



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Εκτίμηση της Κατάστασης των Καλλιεργειών Σιταριού με
Online και Offline Μεθόδους**

Διπλωματική Εργασία

Καράκουλα Αικατερίνη

Επιβλέπων: Αντωνόπουλος Χρήστος

Οκτώβριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Εκτίμηση της Κατάστασης των Καλλιεργειών Σιταριού με
Online και Offline Μεθόδους**

Διπλωματική Εργασία

Καράκουλα Αικατερίνη

Επιβλέπων: Αντωνόπουλος Χρήστος

Οκτώβριος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Assessment of the Status of Wheat Crops with Online and Offline Methods

Diploma Thesis

Karakoula Aikaterini

Supervisor: Antonopoulos Christos

October 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων **Αντωνόπουλος Χρήστος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Καβαλάρης Χρήστος**

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Λάλης Σπυρίδων - Γεράσιμος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, το έτος 2023. Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη του καθηγητή μου κ.Χρήστου Αντωνόπουλου, αλλά και του μέλους Ε.ΔΙ.Π. του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος κ.Χρήστου Καβαλάρη, ο οποίος μου έδωσε όλες τις απαραίτητες γνώσεις για το γεωπονικό υπόβαθρο της εργασίας αυτής αλλά και βοήθησε εμπράκτως στα πιλοτικά προγράμματα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το πρόγραμμα σίτου της εταιρείας Μίσκο (<https://miskoprogrammasitou.gr/>) για τη χρηματοδότηση της παρούσας διπλωματικής, αφού ήταν καίρια για την αγορά του πειραματικού εξοπλισμού.

Ευχαριστώ επίσης εκ βάθρων όλα τα μέλη της πρώην εταιρείας Agile Agriculture Technologies, Γεώργιο Βαρβαρέλη, Δημήτριο Ευαγγελόπουλο και Δημήτριο Ακρίδα, που έκαστος πρόσφερε τη βοήθεια του σε ένα κομμάτι της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης, την Ιωάννα και την Αθανασία Χρηστάκου που είχαν αρκετή υπομονή και μπόρεσαν να με στηρίζουν και να με παρακινήσουν καθόλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Με μεγάλη ευγνωμοσύνη ευχαριστώ την οικογένεια μου Αλέξιο Καράκουλα, Βικτωρία Κουφιώτη και Μαρία Καράκουλα, η οποία με στήριξε και με στηρίζει σε όλα μου τα βήματα. Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους μου που τώρα δεν είναι πια εδώ και που χωρίς αυτούς δεν θα ήμουν τώρα εγώ εδώ, Μαρδίτσα, Ιωάννη και Ηλία Κουφιώτη και Ιωάννη Καράκουλα.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

«Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Καράκουλα Αικατερίνη

Διπλωματική Εργασία

Εκτίμηση της Κατάστασης των Καλλιεργειών Σιταριού με Online και Offline Μεθόδους

Καράκουλα Αικατερίνη

Περίληψη

Σε παγκόσμιο επίπεδο η γεωργία, μέχρι το έτος 2050, θα πρέπει να αυξήσει τη παραγωγή τροφίμων κατά το ήμισυ ώστε να μπορέσει να θρέψει τον παγκόσμιο πληθυσμό (www.fao.org), με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του οικονομικού αποτελέσματος και ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Η χρήση των νέων τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας προσφέρει μια ρεαλιστική απάντηση στις παραπάνω προκλήσεις. Η γεωργία ακριβείας και οι τεχνικές που χρησιμοποιεί στοχεύουν στη διαφοροποιημένη προσθήκη των εισροών ανάλογα με τις χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις στον αγρό. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των εισροών, αύξηση της παραγωγής και βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργητικών συστημάτων.

Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένα προϊόν / σύστημα γεωργίας ακριβείας, το οποίο στοχεύει στην ορθή διανομή λιπάσματος σε χωράφια σίτου. Με το σύστημα αυτό η παραλλακτικότητα κάθε αγροτεμαχίου μπορεί να μετρηθεί και να αναλυθεί ώστε ο παραγωγός να μπορεί να το διαχειριστεί με τεχνικές που ανταποκρίνονται στις ανάγκες της καλλιέργειας. Το σύστημα που αναπτύχθηκε έχει ως σκοπό να βοηθήσει τον παραγωγό να διαχειριστεί την καλλιέργειά του με ακρίβεια, ώστε να μπορεί χωρίς μεγάλη χρονική ή οικονομική επιβάρυνση να αυξήσει και να βελτιώσει την παραγωγή του και ταυτόχρονα να μειώσει τις εισροές του. Επιπροσθέτως, η παρούσα εργασία στοχεύει να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα των εισροών σε έναν αγρό ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναπτύξει τεχνολογίες ικανές να καταγράψουν με ακρίβεια την υπάρχουσα κατάσταση στον αγρό αλλά και να την οπτικοποιήσουν. Πιο συγκεκριμένα η παρούσα εργασία:

- Βασίζεται στην έννοια της τηλεπισκόπησης και της φασματικής υπογραφής των φυτών. Πιο συγκεκριμένα, η φασματική υπογραφή ενός φυτού μπορεί να δηλώσει την κατάσταση θρέψης του. Ειδικότερα, από κάποια χαρακτηριστικά της φασματικής απόκρισης των φυτών προκύπτουν κάποιοι μαθηματικοί τύποι που ονομάζονται δείκτες βλάστησης (π.χ. NDVI) οι οποίοι χαρακτηρίζουν την κατάσταση θρέψης του φυτού. Οι δείκτες αυτοί με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια και να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για διαφοροποιημένη εφαρμογή εισροών.
- Συγκρίνει διαφορετικά συστήματα τηλεπισκόπησης, όπως οι δορυφόροι, οι σημειακοί παθητικοί και ενεργητικοί αισθητήρες και οι πολυφασματικές κάμερες και αναλύει τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα του κάθε συστήματος.
- Περιλαμβάνει:
 - Την υλοποίηση ενός συστήματος πολυφασματικών καμερών. Πιο συγκεκριμένα, ανταπτύσσεται λογισμικό που αξιοποιεί πληροφορία από τις κάμερες και είναι ικανό για την μέτρηση του δείκτη βλάστησης NDVI αλλά και της πυκνότητας φυτείας του αγρού σε πραγματικό χρόνο.
 - Έναν αλγόριθμο οπτικοποίησης δεδομένων, που βασίζεται σε αλγορίθμους παρεμβολής και με αυτοματοποιημένο τρόπο παράγει χάρτες κατανοητούς από τους παραγωγούς αλλά και αξιοποιήσιμους από τα αγροτικά μηχανήματα.

Diploma Thesis

Assessment of the Status of Wheat Crops with Online and Offline Methods

Karakoula Aikaterini

Abstract

Worldwide agriculture will have, until the year 2050, to increase food production by 50% to be able to feed the world (www.fao.org), and needs to achieve that by maximizing the productivity and minimize the negative effects to the environment. Usage of new technologies of precision farming offers a realistic path to address the above challenges. Precision agriculture's techniques aim to manage field inputs (pesticides, herbicides etc.) according to spatial and time variations. Thus, a significant reduction in inputs, an increase in production and an improvement in the efficiency of the farming systems are achieved.

In this Thesis we implemented a precision agriculture product / system, which aims at optimizing the distribution of fertilizer in wheat fields. With this system, the variability of each plot can be measured and analyzed so that the producer can manage it with techniques that meet the needs of the crop. The purpose of the developed system is to help the producer manage her crop precisely, so that she can increase and improve her production without much time or financial burden and at the same time reduce the inputs. Additionally, this work aims to maximize the efficiency of inputs in a field and thus to minimize their environmental impact.

The purpose of this work is to develop technologies capable of accurately quantifying the existing conditions of the field and also visualizing it.

More specifically, this Thesis:

- Is based on the concept of remote sensing and spectral signature of plants. More specifically, the spectral signature of a plant can indicate its nutritional status. In particular, from some characteristics of the spectral response of the plants, some mathematical formulas called vegetation indices (eg NDVI) are derived which

characterize the nutrition status of the plant. These indicators can be accurately quantified with the help of remote sensing and then used for differentiated application of inputs.

- Compares different remote sensing systems, such as satellites, passive and active point sensors, and multispectral cameras, and analyzes the disadvantages and advantages of each system.
- Moreover, it involves:
 - The implementation of a multispectral camera system. More specifically, we develop a software capable of exploiting information from cameras to quantify the NDVI vegetation index as well as the plantation density of the field in real time.
 - A data visualization algorithm, based on interpolation which automatically produces maps understandable by producers and exploitable by agricultural machinery.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xii
Abstract	xiv
Πίνακας περιεχομένων	xvii
Κατάλογος σχημάτων	xxi
Κατάλογος πινάκων	xxv
Συντομογραφίες	xxxι
1 Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος και συμβολή της παρούσας εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	3
2 Υπόβαθρο καταγραφής και οπτικοποίησης δεδομένων από τον αγρό	5
2.1 Φασματική απόκριση φυτών και Τηλεπισκόπηση	5
2.1.1 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	7
2.1.2 Φασματική Υπογραφή Φυτών και δείκτης NDVI	8
2.2 Δεδομένα από κάμερες (spectral response καμερών)	10
2.2.1 Ο αισθητήρας της κάμερας	10
2.2.2 Φίλτρα Καμερών	12
2.3 Εφαρμογή διαφοροποιημένων εισροών	13
2.4 Οπτικοποίηση δεδομένων	14

3	Επισκόπηση εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων καταγραφής και οπτικοποίησης	17
3.1	Υπάρχοντες αισθητήρες	17
3.1.1	Σημειακοί αισθητήρες	17
3.1.2	Δορυφορικά δεδομένα	19
3.1.3	Πολυφασματικές κάμερες τοποθετημένες σε drone	21
3.2	Οπτικοποίηση δεδομένων	22
4	Νέα καινοτόμος προσέγγιση: σύστημα πολυφασματικών καμερών.	25
4.1	Προβλήματα σημερινών λύσεων/αισθητήρων	25
4.1.1	Προβλήματα λήψης δεδομένων με Drones και εφαρμογής διαφοροποιημένων εισροών	26
4.1.2	Προβλήματα λήψης δεδομένων με Δορυφόρους και εφαρμογής διαφοροποιημένων εισροών	26
4.1.3	Προβλήματα λήψης δεδομένων με σημειακούς αισθητήρες	27
4.2	Σύστημα πολυφασματικών καμερών τοποθετημένο σε γεωργικό ελκυστήρα	28
4.2.1	Ζητήματα Υλικού & Εφαρμογής	28
4.3	Ζητήματα λογισμικού	31
4.3.1	Φασματική ανάλυση βλάστησης	31
4.3.2	Αλγόριθμος για εξαγωγή χρώματος από τις μετρήσεις	38
4.4	Σύγκριση συνόλου μεθόδων λήψης δεδομένων	40
4.4.1	Τρόπος καταγραφής δεδομένων από το χωράφι - υλοποίηση	42
4.4.2	Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων	43
4.4.3	Σύγκριση μεθόδων	44
4.4.4	Επιλογή κατάλληλου συνδυασμού αλγορίθμων και αρχιτεκτονικής για το σύστημα	45
4.4.5	Αποτελέσματα και χάρτες όλων των μεθόδων	51
4.4.6	Συμπεράσματα	53
4.5	Περεταίρω βελτιστοποιήσεις (φίλτρα σε καλαμπόκι)	54
4.5.1	Πειραματικά	55
5	Επικύρωση του συστήματος πολυφασματικών καμερών	61
5.1	Σχεδιασμός πειράματος	61
5.2	Σύστημα Λογισμικού	62

5.2.1	Αποτελέσματα Πειραμάτων	63
6	Αλγόριθμος οπτικοποίησης	71
6.1	Επισκόπηση αλγορίθμου	71
6.2	Αποτελέσματα και επαλήθευση του αλγορίθμου οπτικοποίησης	76
6.2.1	Μέθοδος Σύγκρισης των αποτελεσμάτων	76
6.2.2	Ποσοτικά Αποτελέσματα	76
6.2.3	Ποιοτικά Αποτελέσματα	80
6.2.4	Συμπεράσματα	83
7	Συμπεράσματα	85
	Βιβλιογραφία	87

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα διάφορα φάσματα [1]	7
2.2	Φασματική υπογραφή καλαμποκιού	8
2.3	Φασματική απόκριση στα φάσματα μπλε, πράσινο, ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο, σε φύλλα διαφορετικής θρέψης [2]	9
2.4	Αισθητήρας CMOS	10
2.5	Φασματική απόκριση ενός αισθητήρα CMOS	11
2.6	Παράδειγμα οπτικών φίλτρων, που εφαρμόζονται σε κάμερες	12
2.7	Φασματική Απόκριση οπτικού φίλτρου bandpass(690-710nm) [3]	13
2.8	Πριν και μετά την εφαρμογή interpolation [4]	15
3.1	Παθητικός αισθητήρας, ο αισθητήρας NSensor της Yara [5]	18
3.2	Αισθητήρας Crop Circle [6]	19
3.3	Παράδειγμα χρήσης του αισθητήρα Crop Circle [6]	20
3.4	Ένας από τους πιο γνωστούς δορυφόρους, που παρέχει δωρεάν πληροφορία θρέψης του αγρού είναι ο δορυφόρος Sentinel [7]. Το στιγμιότυπο είναι από το Περίβλεπτο Μαγνησίας στις 30/03/2018 και εμφανίζει την τιμή του δείκτη NDVI στην συγκεκριμένη αγροτική περιοχή.	20
3.5	Εμπορικές κάμερες, Sequoia [8]	21
3.6	Εμπορικές κάμερες, Sentera [9]	22
3.7	Εμπορικές κάμερες, Sequoia [10]	22
3.8	Στιγμιότυπο χάρτη από το ArcGIS [11]	22
4.1	Τοποθετημένοι πολλαπλοί σημειακοί αισθητήρες σε ψεκαστικό αγροτικό μηχάνημα	28
4.2	Φασματική απόκριση της κάμερας [10].	29
4.3	Ενδεικτική τοποθέτηση συστήματος πάνω σε γεωργικό ελκυστήρα.	30

4.4	Ενδεικτικό σχήμα υλοποίησης υλικού.	31
4.5	Εικόνα από τα πειράματα, χωρισμένη σε τμήματα.	34
4.6	Στιγμιότυπα από φωτογραφίες στο χωράφι.	35
4.7	Εικόνα από την Agrocarn πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού.	37
4.8	Εικόνα από την webcamera πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού.	38
4.9	Τροποποιημένη εικόνα, σύμφωνα με την τιμή NDVI του κάθε pixel, μετά τη συσχέτιση των εικόνων.	38
4.10	Εικόνα από το σύστημα.	40
4.11	Μάσκα χρώματος.	41
4.12	Μάσκα εξωγενών παραγόντων.	41
4.13	Συνδυασμός όλων των масκών.	41
4.14	Το συνολικό αγροτεμάχιο, από το οποίο επιλέχθηκε ένας μέρος του για τις μετρήσεις.	42
4.15	Χάρτης παραγωγής του τεμαχίου 1 που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.	46
4.16	Ο χρωματικός χάρτης που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία όλων των χαρτών.	46
4.17	Χάρτης από τις μετρήσεις των πολυφασματικών καμερών, με τη χρήση του αλγορίθμου από το κεφάλαιο 4.3.2.	47
4.18	Χάρτης από τις μετρήσεις μόνο της πολυφασματικής κάμερας Agrocarn.	48
4.19	Χάρτης από τις μετρήσεις των πολυφασματικών καμερών.	49
4.20	Χάρτης από τις μετρήσεις αναφορικά με την πυκνότητα φυτείας του αγρού.	50
4.21	Στατιστικά στοιχεία από τη σύγκριση των διαφόρων προσεγγίσεων.	50
4.22	Σύγκριση blueNDVI με redNDVI ([12])	51
4.23	Στιγμιότυπο από το δορυφόρο Sentinel	51
4.24	Χάρτης θρέψης από τον crop circle	52
4.25	Φωτογραφία όλου του αγροτεμαχίου, από την agrocarn τοποθετημένη πάνω στο drone.	52
4.26	Φωτογραφία όλου του αγροτεμαχίου, από την webcamera τοποθετημένη πάνω στο drone.	53
4.27	Χάρτης δείκτη βλάστησης από το drone.	53
4.28	Ποσοστό ομοιότητας των συστημάτων με το χάρτη παραγωγής.	54
4.29	Φασματική υπογραφή φύλλων σίτου [13].	55

4.30	Φασματική απόκριση των φίλτρων.	56
4.31	Σύγκριση του δείκτη NDVI από τον αισθητήρα Crop Circle και από το δικό μας σύστημα, σε φύλλα καλαμποκιού διαφορετικής υγείας.	57
4.32	Εμφάνιση διαφορετικών δεικτών για κάθε φύλλο καλαμποκιού.	57
4.33	Πιλοτικό αγροτεμάχιο φυτείας καλαμποκιού.	58
4.34	NDVI μετρήσεις από το λογισμικό που αναπτύχθηκε και από το σημειακό σένσορα Crop Circle.	59
5.1	Επισκόπηση πειραματικού αγρού και τμηματοποίηση. Απεικονίζεται επίσης η παραγωγή που μετρήθηκε κατά τη συγκομιδή.	62
5.2	Απεικόνιση συστήματος λογισμικού.	64
5.3	Σημειακή απεικόνιση της παραγωγής όπως αποδίδεται από το λογισμικό της εταιρείας John Deere.	65
5.4	Σημειακή απεικόνιση της παραγωγής όπως αποδίδεται από τον αλγόριθμο interpolation που αναπτύξαμε, αναλύοντας τα πρωτογενή δεδομένα.	65
6.1	Ενδεικτικός πίνακας Κ.	73
6.2	Χάρτης με interpolation από τον νέο αλγόριθμο οπτικοποίησης για το αγροτεμάχιο Α.	75
6.3	Χάρτης με interpolation από το GIS Surfer για το αγροτεμάχιο Α.	75
6.4	Χάρτης με interpolation από τον νέο αλγόριθμο οπτικοποίησης για το αγροτεμάχιο Β.	75
6.5	Χάρτης με interpolation από το GIS Surfer για το αγροτεμάχιο Β.	76
6.6	Αντιστοιχία χρωματικής παλέτας του αλγόριθμου οπτικοποίησης με την παλέτα του GIS λογισμικού Surfer.	77
6.7	Μετασχηματισμός χάρτη ώστε να επιτευχθεί ευθυγράμμιση με τον χάρτη που προέκυψε από το λογισμικό Surfer.	77
6.8	Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ 7 αγροτεμαχίων που παράχθηκαν με το λογισμικό Surfer και του αλγορίθμου οπτικοποίησης.	79
6.9	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα και συντελεστής προσδιορισμού R ² , μεταξύ 7 αγροτεμαχίων που παράχθηκαν με το λογισμικό Surfer και του αλγορίθμου οπτικοποίησης.	79

- 6.10 Λόγος μέγιστης ισχύος σήματος προς θόρυβο (PSNR) μεταξύ 7 αγροτεμα-
χίων που παράχθηκαν με το λογισμικό Surfer και τον αλγόριθμο οπτικοποίησης. 80

Κατάλογος πινάκων

4.1	Πίνακας Υπολογισμού NDVI.	36
4.2	Πίνακας εισόδων γεωμετρικών χαρακτηριστικών για αντιστοίχιση πραγμα- τικού χώρου με pixels.	36
4.3	Πίνακας με τα επιλεγμένα φίλτρα από την εταιρεία Thorlabs.	56
5.1	Πίνακας πιλοτικών αγροτεμαχίων.	63
5.2	Αποτελέσματα της One-Way Ανοva ανάλυσης για τις 7 μεταχειρίσεις. (a) .	66
5.3	Αποτελέσματα της One-Way Ανοva ανάλυσης για τις 7 μεταχειρίσεις. (b) .	66
5.4	Οικονομικά στοιχεία αγοράς ανά κιλό.	67
5.5	Σύνοψη στοιχείων εφαρμογής και οικονομικών στοιχείων.	67
5.6	Ποσοστιαία Αποτελέσματα Οικονομικών στοιχείων.	67
5.7	Σύνοψη στοιχείων εφαρμογής και οικονομικών στοιχείων.	68
5.8	Ποσοστιαία Αποτελέσματα Οικονομικών στοιχείων.	68
6.1	Εικονοστοιχία που παρουσιάζουν διαφοροποίηση μεταξύ των 2 μεθόδων. Μέρος 1.	81
6.2	Εικονοστοιχία που παρουσιάζουν διαφοροποίηση μεταξύ των 2 μεθόδων. Μέρος 2.	82

Κατάλογος Εξισώσεων

2.1	Τύπος για το δείκτη NDVI	9
2.2	Η βασική εξίσωση του αλγορίθμου Kriging	15
4.1	Εξαγωγή του δείκτη NDVI, σύμφωνα με το βάρος του κάθε τμήματος. . . .	34
4.2	Αντιστοίχιση απόστασης με pixel της εικόνας.	37
4.3	Υπολογισμός μάσκας για την αναγνώριση της πυκνότητας φυτείας	40
4.4	Τύπος του δείκτη BlueNDVI.	47
4.5	Τύπος του δείκτη GreenDVI.	57
5.1	Υπολογισμός του λόγου παραγωγής.	66
6.1	Ποσοστιαία Διαφορά.	78
6.2	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα.	78
6.3	Συντελεστής προσδιορισμού, R ²	78
6.4	Λόγος μέγιστης ισχύος σήματος προς θόρυβο, PSNR.	78

Κατάλογος Αλγορίθμων

1	Ψευδοκώδικας για τον υπολογισμό του NDVI.	32
2	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου οπτικοποίησης.	74

Συντομογραφίες

NDVI	Normalized difference vegetation index
GIS	Geographic Information System
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος και συμβολή της παρούσας εργασίας

Στις μέρες μας, ο πληθυσμός των ανθρώπων στη γη αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Σύμφωνα με εκτιμήσεις αναμένεται να φτάσει τα 9.2 δις μέχρι το 2050. Αντιθέτως όμως, η παγκόσμια καλλιεργούμενη γη είναι πεπερασμένη, ενώ ταυτόχρονα πολλές χώρες έχουν θεσπίσει πολύ αυστηρούς νόμους περιορισμού χρήσης των αζωτούχων λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος. Την ίδια στιγμή, οι αγρότες σε παγκόσμια κλίμακα πασχίζουν να αυξήσουν το εισόδημά τους και να μειώσουν τα έξοδα.

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι πρέπει να βρούμε καλύτερες μεθόδους για να αυξήσουμε την αποδοτικότητα της γης ώστε να ικανοποιήσουμε τη ζήτηση. Ως αποτέλεσμα, έχουν προκύψει διάφορες τεχνολογίες, προϊόντα και υπηρεσίες που καταγράφουν παραμέτρους των καλλιεργειών σε πραγματικό ή μη χρόνο με σκοπό την εκτέλεση διαφοροποιημένης εφαρμογής εισροών (λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των τρόπων καταγραφής και οπτικοποίησης των “παραμέτρων” αυτών, η σύγκριση, και η πρόταση μιας καινούριας υλοποίησης που μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Στην υλοποίηση μας καταλήγουμε σε ένα σύστημα από πολυφασματικές κάμερες τοποθετημένες πάνω σε γεωργικό ελκυστήρα. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να εξάγει δεδομένα για την κατάσταση του αγρού σε πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός λογισμικού που μπορεί να αξιο-

ποιηθεί σε υλοποιήσεις διαφοροποιημένης λίπανσης στο σιτάρι. Είναι γεγονός ότι κάθε αγρός έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών αλλά πολλές φορές σημαντικές διαφοροποιήσεις διαπιστώνονται και στο εσωτερικό ενός αγρού. Πρακτικά είναι αδύνατο, τόσο οι γεωργικοί σύμβουλοι να αποτυπώσουν με ακρίβεια την κατάσταση του αγρού και να παρέχουν αναλυτικές και εξειδικευμένες συνταγές λίπανσης, όσο και οι αγρότες να εφαρμόσουν τέτοιες συνταγές με τον υπάρχοντα εξοπλισμό. Αντί αυτού εφαρμόζεται λίπανση με το “μέσο όρο”, που έχει ως συνέπεια την αύξηση κόστους και επιβάρυνση του περιβάλλοντος στα σημεία υπερλίπανσης και απώλεια παραγωγής στα σημεία ελλειμματικής λίπανσης. Επομένως το προαναφερθέν λογισμικό συγκεντρώνει, καταγράφει αναλύει και αξιολογεί online και offline δεδομένα που σχετίζονται με τη θρεπτικές απαιτήσεις σε άζωτο και δίνει τη δυνατότητα της χωρικής καταγραφής των απαιτήσεων αυτών. Τα online δεδομένα (πληροφορίες πεδίου) προέρχονται από οπτικούς αισθητήρες που τοποθετήθηκαν είτε πάνω στο γεωργικό ελκυστήρα, είτε σε drone. Τα offline δεδομένα (πληροφορίες από εξωτερικές πηγές) προέρχονται από δορυφορικές εικόνες και από τηλεμετρικούς σταθμούς. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή μελετήθηκαν και αναλύθηκαν:

1. Διάφοροι πιθανοί συνδυασμοί οπτικών αισθητήρων (Crop Circle, multispectral cameras, δορυφόροι) καθώς και διάφοροι τρόποι χρήσης αυτών (λήψη από γεωργικό ελκυστήρα, από drone). Οι πληροφορίες από τους οπτικούς αισθητήρες αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση του δείκτη βλάστησης της καλλιέργειας NDVI. Ο δείκτης NDVI βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση με τη φωτοσυνθετική δεινότητα της καλλιέργειας η οποία περιορίζεται όταν υπάρχει έλλειψη αζώτου [14]. Επομένως, αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο για της εκτίμηση των θρεπτικών αναγκών.
2. Η πολυφασματική κάμερα η οποία χρησιμοποιεί παθητικό τρόπο για τη μέτρηση της ανάκλασης του φωτός (από την ηλιακή ακτινοβολία) και η ανάπτυξη λογισμικού όρασης υπολογιστών το οποίο έχει τη δυνατότητα σε πραγματικό χρόνο:
 - Να εκτιμά τον δείκτη βλάστησης (NDVI), λαμβάνοντας υπόψη την ημερήσια μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στη πάροδο της μέρας και των διάφορων καιρικών συνθηκών.
 - Να αναγνωρίζει τη πυκνότητα της φυτείας.
 - Να αναγνωρίζει προβληματικά σημεία με περιορισμένη βλάστηση και κατεστραμμένα φυτά.

3. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία χαρτών. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν διαφορετικοί αλγόριθμοι παρεμβολής, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος Kriging. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα:

- Να παράγει χάρτες της θρεπτικής κατάστασης της φυτείας του σίτου, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους παραγωγούς, τους γεωπόνους και τους γεωργικούς συμβούλους για την παροχή εμπειριστατωμένων συνταγών λίπανσης με βάση τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας.
- Να ενσωματωθεί σε μηχανικά συστήματα που πραγματοποιούν διαφοροποιημένη λίπανση ούτως ώστε να τους προσφέρει τη δυνατότητα της πραγματικού χρόνου λειτουργίας με βάση τις καταγραφές από αισθητήρες.

Η εφαρμογή της αζωτούχου λίπανσης ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας αναμένεται να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση λιπασμάτων, ουσιαστική μείωση του κόστους της παραγωγής, αύξηση της παραγωγής και βελτίωση της αποδοτικότητας. Όλα τα παραπάνω συμβάλουν προς την κατεύθυνση της βιώσιμης γεωργίας, που σήμερα αποτελεί και το βασικότερο ζητούμενο της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επιπλέον, προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη από την αποφυγή της αλόγιστης χρήσης των εισροών.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Αναλυτικά η εργασία περιέχει:

- Στο κεφάλαιο 2, αναλύεται το επιστημονικό υπόβαθρο της εκτίμησης δεδομένων θρέψης από τα φυτά με βάση τη φασματική τους υπογραφή και πώς αυτή μπορεί να συμβάλει στην εφαρμογή διαφοροποιημένων εισροών. Το κεφάλαιο αυτό, επίσης, προσφέρει μία εισαγωγή στις μεθόδους οπτικοποίησης των δεδομένων που λαμβάνονται, ώστε να είναι σε πρόσφορη μορφή για περαιτέρω ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων από τους ειδικούς.
- Στο κεφάλαιο 3, αναλύονται θεωρητικά όλα τα υπάρχοντα μέσα καταγραφής παραμέτρων των καλλιεργειών. Επίσης, περιγράφονται και αναλύονται οι αλγόριθμοι και οι εφαρμογές οπτικοποίησης των δεδομένων του αγρού σε ψηφιακούς χάρτες.

- Στο κεφάλαιο 4, προτείνεται και αναλύεται μία καινοτόμα προσέγγιση, που περιλαμβάνει τη χρήση πολυφασματικών καμερών τοποθετημένων πάνω στο γεωργικό ελκυστήρα. Ταυτόχρονα, αναλύεται η προσφορά της προσέγγισης αυτής σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα καταγραφής παραμέτρων βλάστησης του αγρού. Στη συνέχεια, περιγράφονται περαιτέρω πειραματισμοί με σκοπό τη βελτιστοποίηση του συστήματος.
- Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η σχεδίαση και εκτέλεση ενός πειράματος σε αγρό 80 στρεμμάτων με καλλιέργεια σκληρού σίτου στο Περίβλεπτο Μαγνησίας για να τεκμηριωθεί επιστημονικά η διαφοροποιημένη λίπανση με τη μέθοδο που υλοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.
- Τέλος, στο κεφάλαιο 6, αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος οπτικοποίησης των δεδομένων του αγρού, που έχει ως σκοπό την αυτόματη δημιουργία χαρτών από τις παραγόμενες μετρήσεις από το σύστημα που υλοποιήθηκε.
- Η εργασία καταλήγει περιγράφοντας, στο κεφάλαιο 7, τα συμπεράσματα και προτείνοντας μελλοντικές βελτιστοποιήσεις για πιθανές αναβαθμίσεις του υπάρχοντος λογισμικού και της αρχιτεκτονικής του.

Κεφάλαιο 2

Υπόβαθρο καταγραφής και οπτικοποίησης δεδομένων από τον αγρό

2.1 Φασματική απόκριση φυτών και Τηλεπισκόπηση

Τις τελευταίες δεκαετίες, ένας καινούριος κλάδος των γεωπονικών επιστημών άρχισε να κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος, αυτός της Τηλεπισκόπησης ή Ψηφιακής Απεικόνισης. Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη καταγραφής δεδομένων για ένα αντικείμενο χωρίς την ύπαρξη φυσικής επαφής με αυτό [15]. Είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη στη γεωργία, αφού ο χρήστης δύναται να αναγνωρίσει διαφοροποιητικά χαρακτηριστικά μεταξύ των βιοφυσικών στοιχείων των φυτών, που βρίσκονται υπό παρατήρηση, καθώς επίσης μπορεί να λάβει ποικίλες πληροφορίες για το φυτό αυτό, μελετώντας πολλές περιοχές του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που δεν παρέχονται από το ανθρώπινο μάτι με απλή επισκόπηση/εξέταση.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου που μπορούν να μελετηθούν με την τηλεπισκόπηση είναι:

- Η χωρική θέση του αντικειμένου/φυτού.
- Το υψόμετρο.
- Το χρώμα.
- Η φασματική συμπεριφορά της χλωροφύλλης.
- Η βιομάζα.

- Το ποσοστό υγρασίας της φυτείας.
- Το ποσοστό υγρασίας του εδάφους.
- Η θερμοκρασία.
- Το μέγεθος και το σχήμα διαφόρων στοιχείων.

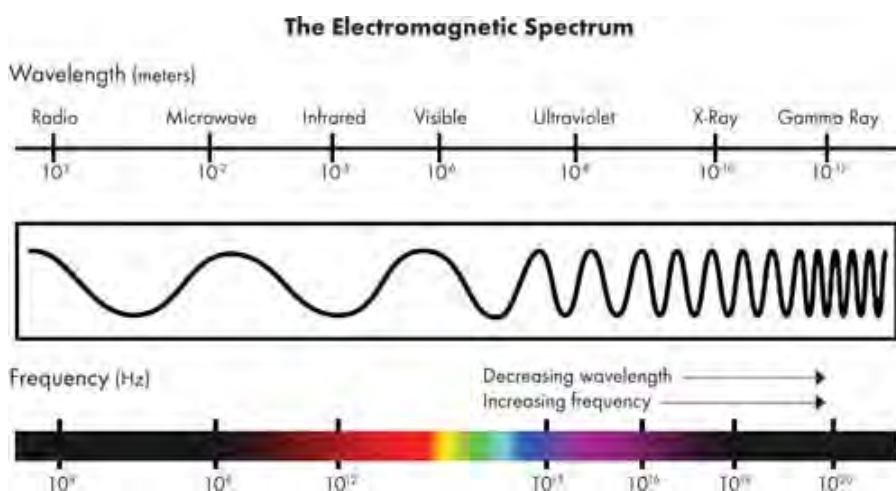
Η πρώτη εφαρμογή της τηλεπισκόπησης έλαβε χώρα στις αρχές του 20ου αιώνα και σχετιζόταν κυρίως με την χαρτογράφηση και την καταγραφή των αγρών με τη χρήση του συστήματος της αεροφωτογραφίας. Σύμφωνα, με την απόχρωση του εδάφους, που εμφανιζόταν στις εικόνες, το αγροτεμάχιο χωριζόταν σε διαφορετικές ζώνες. Στη συνέχεια, με τη χρήση φίλτρων, οι επιστήμονες, κατάφεραν να περιορίσουν τα μήκη κύματος που περνούσαν από το φακό της φωτογραφικής μηχανής. Αυτό, είχε ως αποτέλεσμα, την ανακάλυψη της διαφοροποίησης της φασματικής υπογραφής των φυτών ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται (αναγνώριση καταπόνησης/ στρες των φυτών). Τέλος, στη σημερινή εποχή, όπου υπάρχει ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, δίνεται η ευκαιρία στους επιστήμονες, αλλά και στους παραγωγούς να λάβουν πληροφορίες σχετικά με τις καλλιέργειές τους γρηγορότερα και ευκολότερα, με τη χρήση δορυφόρων, πολυφασματικών καμερών και αισθητήρων [16].

Τα οφέλη της τηλεπισκόπησης στον τομέα της γεωργίας είναι πολλά. Αρχικά, επιτρέπει με πολύ χαμηλό κόστος τη λήψη και τη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων από τον αγρό, κάτι που δεν θα ήταν εφικτό με χειροκίνητες μεθόδους. Επιπρόσθετα, μας δίνει τη δυνατότητα να αναλύσουμε μεγάλες σε έκταση περιοχές, οι οποίες θα εμφάνιζαν πολλές δυσκολίες τόσο στον τεχνικό τρόπο μέτρησης όσο και στις απαιτήσεις που θα είχαν αυτές σε χρόνο (π.χ. δειγματοληψία χώματος). Στον αντίποδα, βέβαια, η λήψη μετρήσεων μέσω τηλεπισκόπησης επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (καιρικές συνθήκες, συνθήκες φωτισμού κ.α.), κάτι που αποτελεί τροχοπέδη στη δημιουργία αξιόπιστων συστημάτων που θα χρησιμοποιούν την τηλεπισκόπηση ως μέσο λήψης αποφάσεων για εκτέλεση ενεργειών στον αγρό.

Συμπερασματικά, οι εφαρμογές της τηλεπισκόπησης εκτείνονται σε μεγάλο εύρος και σίγουρα έχουν να προσφέρουν πολλά στον τομέα των γεωπονικών επιστημών αλλά και της γεωργίας ακριβείας. Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει, είναι σίγουρο ότι θα αποκτήσει πολλές εφαρμογές στο κοντινό μέλλον τόσο σε ερευνητικό όσο και επιχειρησιακό επίπεδο .

2.1.1 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται η εκπομπή ή η μεταφορά ενέργειας υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [17]. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία [18], η ορατή ακτινοβολία (φως) [19], η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ [1]), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1.



Σχήμα 2.1: Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα διάφορα φάσματα [1]

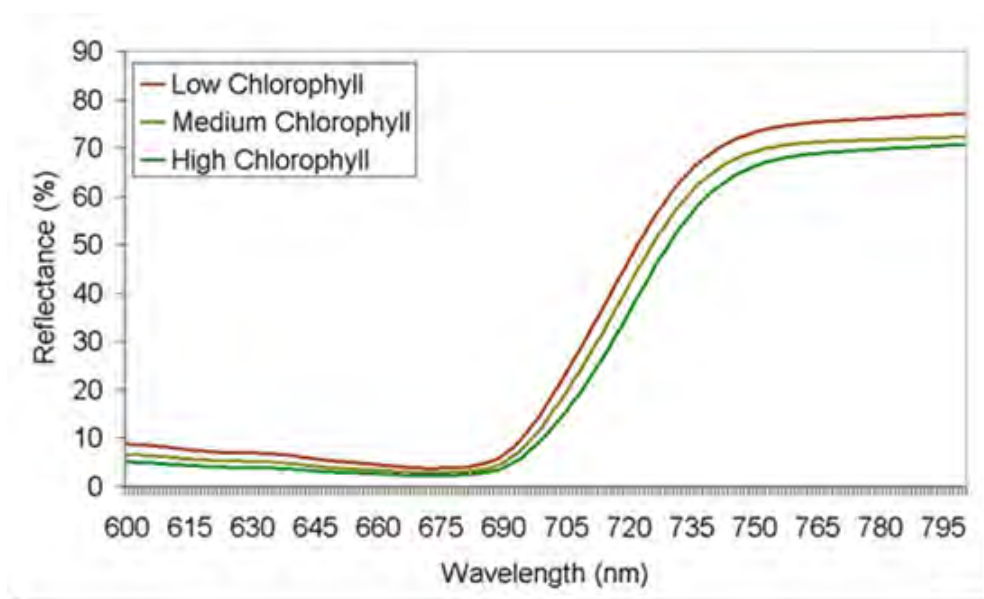
Οι βασικές μορφές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι οι εξής:

- Διερχόμενη ακτινοβολία, η ακτινοβολία που διέρχεται δια μέσου κάποιου αντικειμένου.
- Απορροφούμενη ακτινοβολία, η ακτινοβολία που μπορεί να απορροφηθεί από ένα αντικείμενο.
- Εκπεμπόμενη ακτινοβολία, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο λόγω της δομής του.
- Διαχεόμενη ακτινοβολία, η ακτινοβολία που διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία, ονομάζεται το φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης της ακτινοβολίας, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια.

Η μελέτη της ανακλώμενης ακτινοβολίας με ηλεκτρονικά μέσα και αισθητήρες αποτελεί τη βασική αρχή της τηλεπισκόπησης και θα απασχολήσει το σύνολο της παρούσας εργασίας.

2.1.2 Φασματική Υπογραφή Φυτών και δείκτης NDVI

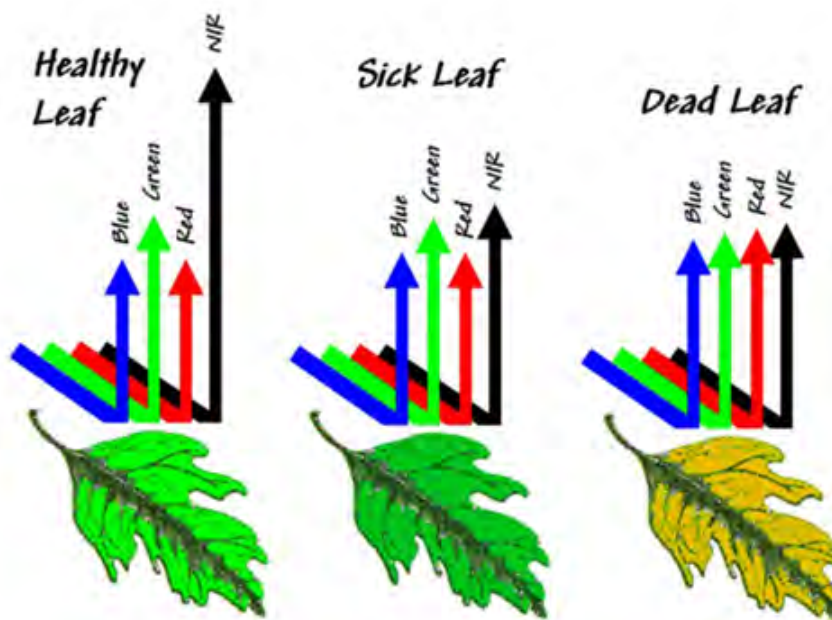
Φασματική υπογραφή είναι ο συγκεκριμένος συνδυασμός ανακλούμενης και απορροφούμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (EM) στα ποικίλα μήκη κύματος, που μπορούν μεμονωμένα να προσδιορίσουν ένα αντικείμενο. Η φασματική υπογραφή ενός αντικειμένου είναι μια αλληλεπίδραση ενός τυχαίου ηλεκτρομαγνητικού μήκους κύματος και του υλικού σε εκείνο το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος [20]. Στο διάγραμμα 2.2 φαίνεται η φασματική υπογραφή ενός φύλλου από καλαμπόκι σε διαφορετικές καταστάσεις υγείας. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν με διάφορα όργανα, συμπεριλαμβανομένου ενός φασματομέτρου, αν και η πιο κοινή μέθοδος είναι ο διαχωρισμός του κόκκινου, πράσινου, μπλε και κοντινού υπέρυθρου μέρους του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αποκτάται από τις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές.



Σχήμα 2.2: Φασματική υπογραφή καλαμποκιού

Η μελέτη της διαφοροποίησης των φασματικών υπογραφών των φυτών καλής και κακής θρέψης έχει τη δυνατότητα να μας δώσει δείκτες, οι οποίοι είναι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται για μοντελοποίηση των ιδιοτήτων των φυτών. Ο κάθε δείκτης έχει δημιουργηθεί για συγκεκριμένο ή περισσότερους από έναν σκοπό και χρησιμοποιεί συγκεκριμένα μήκη κύματος που πολλαπλασιάζονται ή διαιρούνται μεταξύ τους και παράγουν μία τιμή

η οποία δείχνει το βαθμό και την ποσότητα της ιδιότητας που μελετάται εκείνη τη στιγμή. Στο σχήμα 2.3 φαίνονται οι αποκρίσεις φύλλων διαφορετικής θρέψης σε επιλεγμένα μήκη κύματος, ικανά να συνθέσουν ένα δείκτη βλάστησης.



Σχήμα 2.3: Φασματική απόκριση στα φάσματα μπλε, πράσινο, ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο, σε φύλλα διαφορετικής θρέψης [2]

Στην παρούσα εργασία, θα αναφερθούμε κυρίως στο δείκτη NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ή δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης. Ο δείκτης αυτός είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στη γεωργία. Υπολογίζεται από την εξίσωση 2.1.

Εξίσωση 2.1 Τύπος για το δείκτη NDVI

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

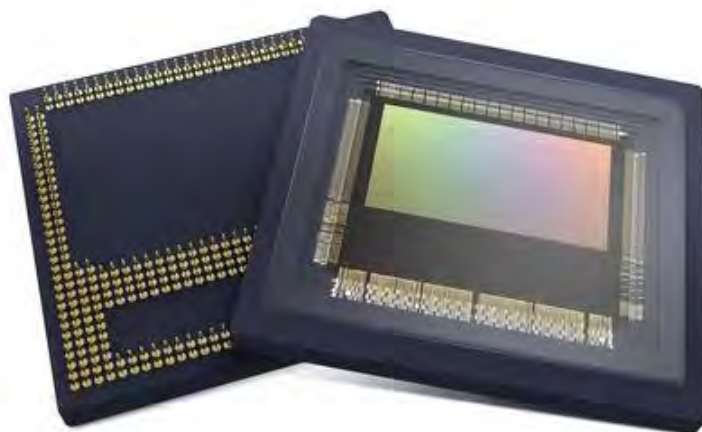
Η μεταβλητή NIR (near infrared) αναφέρεται σε ένα κομμάτι της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας και η μεταβλητή Red σε ένα κομμάτι του μήκος κύματος του ερυθρού φάσματος. Ο δείκτης NDVI θεωρητικά μπορεί να λάβει τιμές από -1 έως 1. Όταν όμως χρησιμοποιείται σε γεωργικές εφαρμογές οι τιμές κατά κανόνα κυμαίνονται από 0,2 (χώμα) – 0,8 (άριστη βλάστηση).

2.2 Δεδομένα από κάμερες (spectral response καμερών)

Οι κάμερες αποτελούν ένα από τα κυριότερα μέσα, που είναι υπεύθυνα για τη λήψη δεδομένων από τον αγρό. Κατά το πλείστον τοποθετούνται σε μη επανδρωμένα οχήματα και λαμβάνουν εικόνες. Έπειτα, οι εικόνες επεξεργάζονται με κατάλληλο τρόπο, ώστε να εξάγουν δείκτες βλάστησης και άλλα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας.

2.2.1 Ο αισθητήρας της κάμερας

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της κάμερας, είναι ο αισθητήρας CMOS που έχει. Ο αισθητήρας CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, είναι ένας αισθητήρας εικόνας (image sensor), ο οποίος ψηφιοποιεί και μεταφέρει πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μιας εικόνας. Αυτό γίνεται με τη μετατροπή της μεταβλητής εξασθένησης των κυμάτων φωτός (καθώς διέρχονται ή αντανακλούν τα αντικείμενα) σε ηλεκτρικά σήματα που μεταδίδουν τις πληροφορίες. Τα κύματα μπορεί να είναι φως ή κάποια άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι αισθητήρες εικόνας χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές απεικόνισης τόσο αναλογικών όσο και ψηφιακών τύπων, οι οποίες περιλαμβάνουν ψηφιακές κάμερες, μονάδες κάμερας, εξοπλισμό ιατρικής απεικόνισης, εξοπλισμό νυχτερινής όρασης, όπως συσκευές θερμικής απεικόνισης, ραντάρ, σόναρ και άλλα [21].



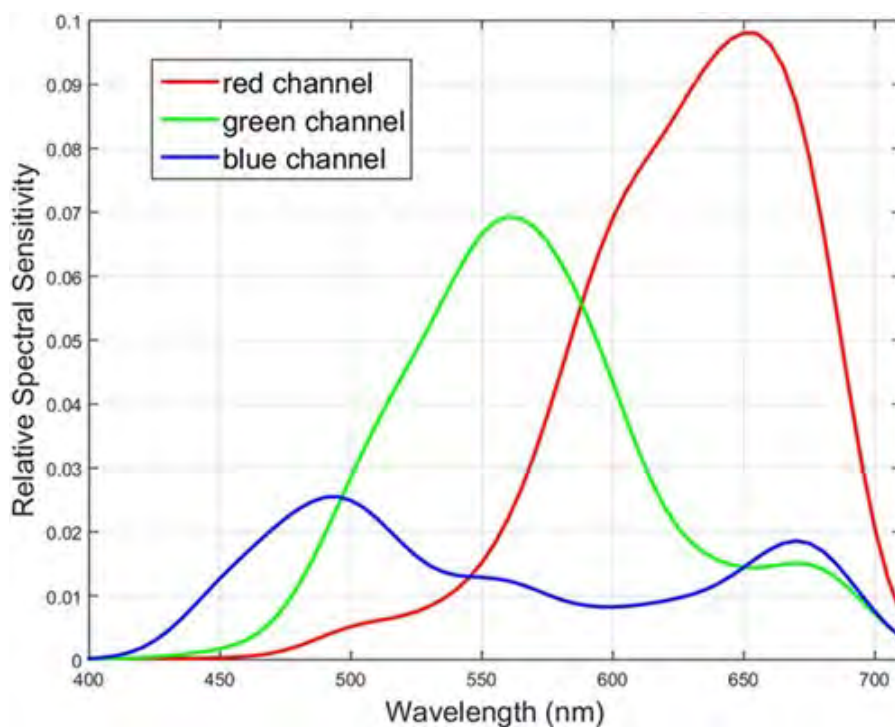
Σχήμα 2.4: Αισθητήρας CMOS

Σύμφωνα με τον αισθητήρα εικόνας που έχει κάθε κάμερα, αλλάζει και ο τρόπος που

“βλέπει”. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας CMOS ευθύνεται για τα εξής χαρακτηριστικά μιας κάμερας:

- Μέγεθος εικονοστοιχείου
- Μέγεθος εικόνας
- Τη φασματική ευαισθησία της κάμερας

Η φασματική ευαισθησία ή αλλιώς το spectral response της κάμερας είναι η σχετική αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης του φωτός ή άλλου σήματος, ως συνάρτηση της συχνότητας ή του μήκους κύματος του σήματος αυτού, στην εικόνα σχήμα 2.5 εμφανίζεται μια χαρακτηριστική καμπύλη φασματικής απόκρισης ενός τέτοιου αισθητήρα. Η απόκριση αυτή της κάμερας, είναι ένα στοιχείο πολύ σημαντικό για τη χρήση της στην τηλεπισκόπηση. Πιο συγκεκριμένα, επειδή στην τηλεπισκόπηση υπάρχει ανάγκη για μέτρηση της απόκρισης των αντικειμένων σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, πρέπει να είναι γνωστό και να ελεγχθεί το διάγραμμα της φασματικής ευαισθησίας της κάμερας ώστε να καλύπτει τις ανάγκες των μετρήσεων.



Σχήμα 2.5: Φασματική απόκριση ενός αισθητήρα CMOS

2.2.2 Φίλτρα Καμερών

Στην τηλεπισκόπηση χρειάζεται κάποιες φορές να ληφθεί η μέτρηση είτε από ένα πολύ μικρό εύρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, είτε από ένα μέρος ενός καναλιού της κάμερας. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται οπτικά φίλτρα, όπως εμφανίζονται στην εικόνα 2.6), τα οποία είναι συσκευές που επιτρέπουν τη μεταφορά επιλεγμένων μηκών κύματος και είναι συνήθως κατασκευασμένα από γυαλί ή βαμμένο πλαστικό.

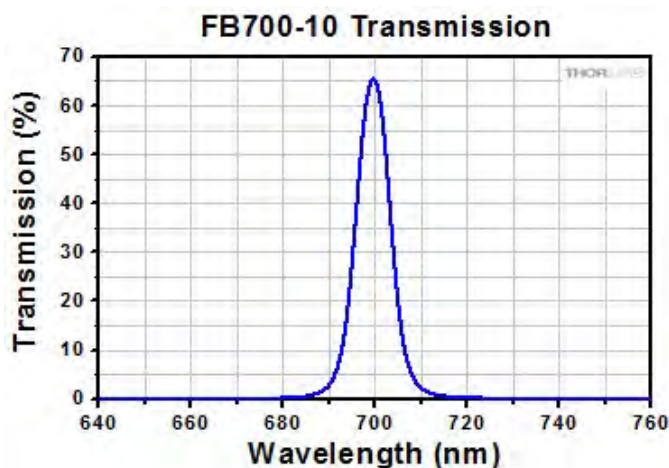
Στο διαγραμμα 2.7 εμφανίζεται η φασματική απόκριση ενός κατωπερατού φίλτρου, που επιτρέπει να διαπεράσουν συχνότητες 690-710nm. Άλλη μια χαρακτηριστική ιδιότητα των φίλτρων είναι η ποσότητα της ακτινοβολίας που τα διαπερνάει, όσο μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας επιτρέπει το φίλτρο να διαβιβαστεί τόσο καλύτερο αξιολογείται το φίλτρο αυτό, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της φασματικής απόκρισης του φίλτρου του παραδείγματος, το ποσοστό διαβίβασης του είναι 60%.



Σχήμα 2.6: Παράδειγμα οπτικών φίλτρων, που εφαρμόζονται σε κάμερες

Υπάρχουν οπτικά φίλτρα που επιτρέπουν συγκεκριμένα μήκη κύματος να διέλθουν προς το αισθητήρα CMOS. Στην τηλεπισκόπηση στη γεωργία, αυτό είναι πολύ χρήσιμο γιατί επιτρέπουν στον αισθητήρα να καταγράψει τα συγκεκριμένα μήκη κύματος που επιθυμούμε σε κάθε περίπτωση. Σε αντίθετη περίπτωση, θα υπήρχε θόρυβος στις μετρήσεις και η εξαγωγή συμπερασμάτων δεν θα ήταν ασφαλής.

Τα οπτικά φίλτρα χρησιμοποιούνται σε πολλούς επιστημονικούς αλλά και εμπορικούς τομείς που έχουν σχέση με την τηλεπισκόπηση (π.χ. όλες οι εμπορικές κάμερες έχουν φίλτρο που δεν επιτρέπει τη διαβίβαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας), είναι απαραίτητα στη γεωργία ακριβείας αλλά και στην έρευνα για την εύρεση του χαρακτηριστικού φαινοτύπου κάθε φυτού.



Σχήμα 2.7: Φασματική Απόκριση οπτικού φίλτρου bandpass(690-710nm) [3]

2.3 Εφαρμογή διαφοροποιημένων εισροών

Παλαιότερα, οι γεωργοί διέθεταν περιορισμένα μέσα για την εκτέλεση των διαφόρων εργασιών στους αγρούς (χειρονακτική εργασία, ζώα). Στην πράξη περπατούσαν το χωράφι τους εκατοστό προς εκατοστό, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα να έχουν πληρέστερη εικόνα για τις ανάγκες του χωραφιού τους και αναλόγως να προσαρμόζουν τις εργασίες τους. Καθάρά εμπειρικά, λοιπόν, μπορούσαν να ενισχύουν με περισσότερο θρεπτικά συστατικά τα σημεία εκείνα που ήταν πιο πτωχά αλλά και να φροντίζουν τα σημεία εκείνα που νοσούσαν περισσότερο, εκτελώντας έτσι ένα είδος μεταβλητής δόσης εισροών, όπως θα ονομάζαμε σήμερα.

Κατά αυτή τη λογική, η γεωργία ακριβείας δεν είναι μια τόσο καινούργια έννοια. Με την είσοδο των μηχανών όμως στον τομέα της γεωργίας αυτή η εμπειρική γνώση χάθηκε. Οι μηχανές αντικατέστησαν τις ανθρώπινες χειρονακτικές εργασίες, οι εργασίες άρχισαν να εκτελούνται γρηγορότερα, ευκολότερα και πιο μαζικά, θυσιάζοντας όμως την ακρίβεια. Μη έχοντας άλλη δυνατότητα, ακολουθείται μια διαδικασία βασισμένη στις μέσες συνθήκες του αγρού για όλες τις περιπτώσεις (σπορά, φυτοπροστασία, ζιζανιοκτονία, λίπανση, άρδευση). Αυτό συχνά καλείται «Γεωργία του μέσου όρου».

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας φαίνεται να δίνει νέα πνοή στα αγροτικά μηχανήματα, παρακάμπτοντας το προαναφερθέν μειονέκτημα σε σχέση με την έλλειψη ακρίβειας και δίνοντας τους την δυνατότητα να ανταποκρίνονται στις πραγματικές και διαφοροποιημένες ανάγκες του χωραφιού. Η νέα αυτή προσέγγιση ξεκίνησε πριν από περίπου 20 χρόνια και ονομάστηκε “γεωργία ακριβείας”. Ουσιαστικά αναφέρεται σε ένα σύ-

στημα παραγωγής αγροτικών προϊόντων που στηρίζεται στη διαχείριση των εισροών σε έναν αγρό σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η φιλοσοφία της γεωργίας ακριβείας, ενθαρρύνει τους παραγωγούς να παράγουν περισσότερα δίνοντας λιγότερα και συμφωνεί με την γενικότερη έννοια της αειφόρου ανάπτυξης.

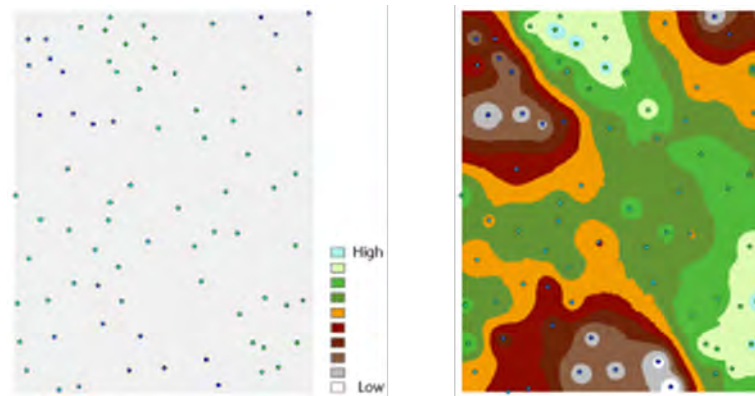
Τελικά, η εφαρμογή μικρότερης ποσότητας λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων ή ακόμα και η μη εφαρμογή σε αυτές τις περιοχές του αγροκτήματος που είναι πιθανό να παράγουν σοδειά συνιστά πιο αποτελεσματική πρακτική. Η εφαρμογή μεγαλύτερης δόσης σε αυτές τις περιοχές του ίδιου αγροκτήματος οι οποίες έχουν τη δυναμική για παραγωγή συνιστά, επίσης, πιο αποτελεσματική πρακτική.

2.4 Οπτικοποίηση δεδομένων

Το GIS (Geographic Information System - Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών) είναι μία οικογένεια συστημάτων διαχείρισης γεωχωρικών δεδομένων (spatial data) και συσχετισμένων ιδιοτήτων. Στην πιο αυστηρή μορφή του είναι ένα ψηφιακό σύστημα, ικανό να ενσωματώσει, αποθηκεύσει, προσαρμόσει, αναλύσει και παρουσιάσει γεωγραφικά συσχετισμένες (geographically - referenced) πληροφορίες [22]. Για τη δημιουργία ενός χάρτη GIS χρειάζονται δεδομένα γεωχωρικής πληροφορίας συνδυασμένα με την ιδιότητα του χώρου που θέλουμε να απεικονιστεί στο χάρτη. Μία τέτοιου είδους απεικόνιση βοηθά στην ανάλυση των δεδομένων, αφού αυτά αποκτούν φυσική υπόσταση και μετατρέπονται σε μορφή πιο «εύληπτη» για ανάλυση από τους επιστήμονες.

Η χαρτογράφηση του αγρού αποτελεί το βασικό εργαλείο του καλλιεργητή και γεωπόνου, γιατί μόνο με βάση αυτό θα καταφέρουν να συνθέσουν ένα αξιόπιστο πλάνο καλλιεργητικών φροντίδων σε έναν αγρό ή θα μπορέσουν να εξάγουν συμπεράσματα της απόδοσης που είχε το πλάνο της προηγούμενης περιόδου. Για να δημιουργηθεί ένας χάρτης από μετρήσεις του αγρού χρειάζεται να γίνει κάποια επεξεργασία στα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, με οποιοδήποτε μέσο και για οποιοδήποτε σκοπό και να πραγματοποιηθεί η μέτρηση κάποιας ιδιότητας του αγροτεμαχίου, τα δεδομένα που θα συλλεχθούν δεν θα καλύπτουν όλη την επιφάνεια του τεμαχίου (στο σχήμα 2.8 φαίνεται μία τέτοια μέτρηση). Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να εφαρμοστεί interpolation στις μετρήσεις αυτές. Ο αλγόριθμος του interpolation έχει τη δυνατότητα να προσεγγίσει τιμές για σημεία, εντός συγκεκριμένου εύρους, από περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη άγνωστων

τιμών για οποιαδήποτε γεωγραφικά δεδομένα [4].



Σχήμα 2.8: Πριν και μετά την εφαρμογή interpolation [4]

Από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους interpolation που χρησιμοποιείται στη γεωργία ακριβείας είναι ο αλγόριθμος Kriging [23]. Ο αλγόριθμος αυτός, “ζυγίζει” τις τιμές που μετρήθηκαν γύρω από το περιβάλλον για να παράγει μία πρόβλεψη για μία κενή θέση. Η βασική εξίσωση την οποία υλοποιεί ο εκάστοτε αλγόριθμος είναι η εξίσωση 2.2 [24]. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο καθορισμός του βάρους του κάθε στοιχείου παίζει σημαντικό ρόλο στα νέα δεδομένα που εξάγει ο αλγόριθμος. Ταυτόχρονα, υπάρχουν διαφορετικές μορφές του αλγορίθμου, όπως ο Ordinary Kriging, Universal Kriging, Simple Kriging.

Εξίσωση 2.2 Η βασική εξίσωση του αλγορίθμου Kriging

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(s_i)$$

Όπου:

- $Z(s_i)$ είναι η μέτρηση στο i-οστό στοιχείο
- λ_i είναι το βάρος για το i-οστό στοιχείο
- s_0 είναι το σημείο που γίνεται η πρόβλεψη
- N είναι ο αριθμός των μετρήσεων

Κεφάλαιο 3

Επισκόπηση εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων καταγραφής και οπτικοποίησης

3.1 Υπάρχοντες αισθητήρες

Η καταγραφή και η ανάλυση δεδομένων από τις καλλιέργειες αποτελεί εδώ και πολλές δεκαετίες πεδίο έρευνας και δημόσιας συζήτησης. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τηλεπισκόπηση στη γεωργία γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας. Υπάρχουν διάφορα μέσα τηλεπισκόπησης για την καταγραφή δεδομένων από τον αγρό. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι οι σημειακοί αισθητήρες (με και χωρίς δική τους πηγή φωτός), τα δορυφορικά δεδομένα και οι πολυφασματικές κάμερες τοποθετημένες σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή drones.

3.1.1 Σημειακοί αισθητήρες

Οι σημειακοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: του ενεργούς και τους παθητικούς αισθητήρες. Οι ενεργοί αισθητήρες εκπέμπουν ακτινοβολία για να πραγματοποιήσουν τις μετρήσεις τους. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουν ότι οι μετρήσεις που λαμβάνουν είναι ανεξάρτητες από τις καιρικές συνθήκες όπως η ένταση του φωτός, η κλίση του ηλίου, οι σκιές κ.ά.. Αντιθέτως οι παθητικοί αισθητήρες, χρησιμοποιούν την υπάρχουσα ακτινοβολία του ήλιου για την πραγματοποίηση των μετρήσεων

τους. Η εμπειρία από τον γεωργικό πειραματισμό έχει δείξει ότι οι μετρήσεις των παθητικών αισθητήρων είναι ευάλωτες σε θόρυβο, συνεπώς αποτελεί πρόκληση στους μηχανικούς να δημιουργήσουν ένα παθητικό αισθητήρα ο οποίος θα είναι μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών και μετρήσεων. Ένα παράδειγμα παθητικού αισθητήρα εμφανίζεται στην εικόνα 3.1.



Σχήμα 3.1: Παθητικός αισθητήρας, ο αισθητήρας NSensor της Yara [5]

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο ενεργητικός αισθητήρας Crop Circle ACS210 [6] που εμφανίζεται στο σχήμα 3.2. Ο αισθητήρας αυτός κατασκευάζεται από την εταιρεία Holland Scientific με έδρα τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Αποτελείται από 4 βασικά μέρη:

- Το πρώτο και πιο σημαντικό μέρος είναι ο **κυρίως αισθητήρας**, ο οποίος μετρά την ανάκλαση της ακτινοβολίας από τα φυτά.
- Ως ενεργός αισθητήρας διαθέτει δικό του **μέσο εκπομπής ακτινοβολίας**, τόσο στο υπέρυθρο φάσμα (880 nm) όσο και στο ερυθρό (650 nm).
- Τα δεδομένα που λαμβάνονται, στέλνονται σε συσκευή **data logger** με σκοπό την καταγραφή και αποθήκευσή τους σε κάρτα μνήμης για μελλοντική επεξεργασία και εκμετάλλευση. Ο data logger, ομαδοποιεί τα δεδομένα από τις μετρήσεις για κάθε μήκος κύματος χωριστά και εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό του NDVI.
- Τα αποτελέσματα συνδέονται από τον data logger με το στίγμα του **GPS** ώστε να

μπορεί μελλοντικά να παραχθεί ο κατάλληλος χάρτης μέσω χρήσης προγραμμάτων GIS.

Η χρήση του συγκεκριμένου προϊόντος είναι αρκετά απλή. Αφότου τεθεί σε λειτουργία το μηχάνημα είναι σημαντικό ο χρήστης να τον κρατά ή να τον τοποθετήσει με την επιφάνεια που βρίσκεται ο αισθητήρας να έχει φορά προς τα κάτω, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3. Ακολούθως, ο αισθητήρας καταγράφει τις μετρήσεις, οι οποίες εμφανίζονται και στην οθόνη, δίνοντας στον χρήστη την επιλογή να τις αποθηκεύσει στον data logger. Απο τις αποθηκευμένες μετρήσεις, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει έναν χάρτη με τον οποίο θα τροφοδοτήσει συστήματα διαφοροποιημένων εισροών.



Σχήμα 3.2: Αισθητήρας Crop Circle [6]

3.1.2 Δορυφορικά δεδομένα

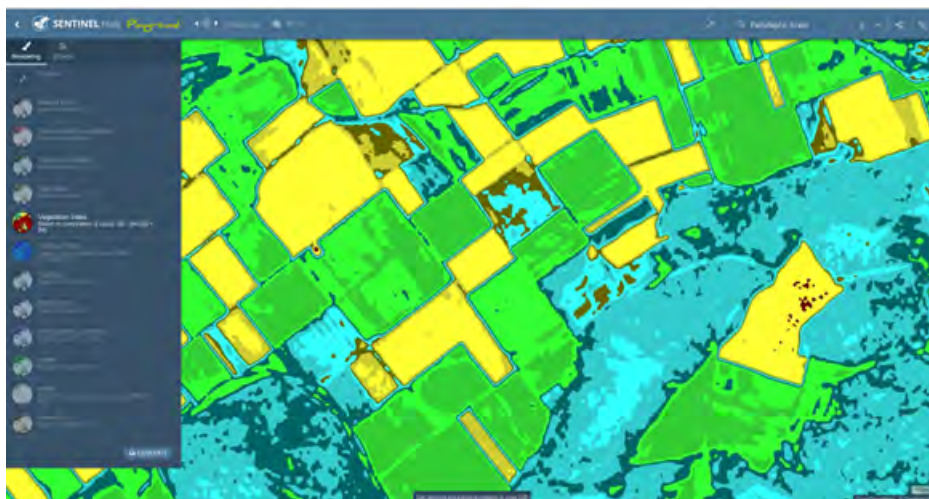
Οι δορυφόροι αξιοποιούνται στη γεωργία με διάφορους τρόπους, ένας από αυτούς είναι να χρησιμοποιούνται ως μέσο καταγραφής και εκτίμησης των αποδόσεων των καλλιεργειών. Οι αισθητήρες οπτικών και ραντάρ μπορούν να παράγουν μια ακριβή εικόνα της έκτασης που καλλιεργείται, ενώ ταυτόχρονα διαφοροποιούν τους τύπους καλλιεργειών και καθορίζουν την υγεία και την ωριμότητα τους. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν στην ενημέρωση της αγοράς και παρέχουν έγκαιρη προειδοποίηση για την αποτυχία της καλλιέργειας ή την ανάγκη για λίπανση.

Ως εκ τούτου, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται επίσης ως εργαλείο διαχείρισης μέσω της πρακτικής της γεωργίας ακριβείας, όπου οι δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται για να



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα χρήσης του αισθητήρα Crop Circle [6]

χαρακτηρίζουν λεπτομερώς τους αγρούς ενός γεωργού, συχνά σε συνδυασμό με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS), ώστε να επιτρέψουν την εντατικότερη και αποδοτικότερη καλλιεργητική πρακτική. Για παράδειγμα, διαφορετικές καλλιέργειες μπορεί να συνιστώνται για διαφορετικά πεδία, ενώ η χρήση του λιπάσματος από τον αγρότη βελτιστοποιείται με πιο οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο.



Σχήμα 3.4: Ένας από τους πιο γνωστούς δορυφόρους, που παρέχει δωρεάν πληροφορία θρέψης του αγρού είναι ο δορυφόρος Sentinel [7]. Το στιγμιότυπο είναι από το Περίβλεπτο Μαγνησίας στις 30/03/2018 και εμφανίζει την τιμή του δείκτη NDVI στην συγκεκριμένη αγροτική περιοχή.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναζητήσει και να βρει το αγροτεμάχιο του σε online

χάρτη της εφαρμογή παροχής υπηρεσιών του Sentinel. Αφότου επιλέξει την ημερομηνία μέτρησης που χρειάζεται, μπορεί να επιλέξει το περιεχόμενο των δεδομένων που επιθυμεί, να τα κατεβάσει και εν συνεχεία να τροφοδοτήσει με αυτά συστήματα διαφοροποιημένων εισροών. Ένα παράδειγμα τέτοιας πρακτικής εμφανίζεται στην εικόνα 3.4.

3.1.3 Πολυφασματικές κάμερες τοποθετημένες σε drone

Τα τελευταία χρόνια, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη η χρήση πολυφασματικών ή υπερφασματικών καμερών για την καταγραφή της θρέψης αλλά και άλλων χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Πιο συγκεκριμένα, είναι συνηθισμένο να τοποθετούνται οι κάμερες πάνω σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV ή drones).

Κάποιες από τις πιο γνωστές πολυφασματικές κάμερες που υπάρχουν στην αγορά για την καταγραφή θρέψης είναι οι εξής:

- Η πολυφασματική κάμερα sequoia της Parrot Drones SAS [8], που εμφανίζεται στην εικόνα 3.5.
- Οι πολυφασματικές κάμερες της εταιρείας Sentera, [9], από τις ΗΠΑ, που εμφανίζεται στην εικόνα 3.6.
- Η Agrocam Pro Nir της εταιρείας Norward Expert από την Ουγγαρία [10], που εμφανίζεται στην εικόνα 3.7.



Σχήμα 3.5: Εμπορικές κάμερες, Sequoia [8]

Στην περίπτωση, που ο χρήστης δε διαθέτει το σύστημα (drone και πολυφασματική κάμερα) και δε μπορεί ο ίδιος να εκτελέσει την πτήση του drone, θα πρέπει να απευθυνθεί σε κάποια εταιρεία παροχής υπηρεσιών, με την οποία θα κλείσει ραντεβού για συγκεκριμένη ημερομηνία πτήσης. Βέβαια, είναι καίριας σημασίας, οι καιρικές συνθήκες να επιτρέπουν την ομαλή πτήση του μέσου. Έπειτα από τη λήψη των εικόνων/δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει να τα αποστείλει σε εταιρεία παροχής υπηρεσιών επεξεργασίας εικόνας, ώστε να γίνει η



Σχήμα 3.6: Εμπορικές κάμερες, Sentera [9]

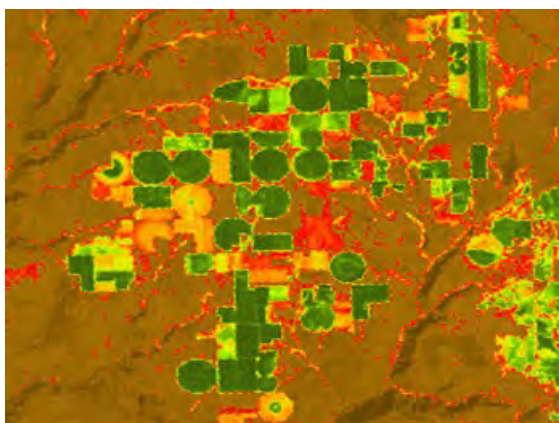


Σχήμα 3.7: Εμπορικές κάμερες, Sequoia [10]

απαραίτητη ανάλυση. Τέλος, η εταιρεία παραδίδει στο χρήστη τα δεδομένα σε κατάλληλη μορφή, προκειμένου να τροφοδοτήσει συστήματα διαφοροποιημένων εισροών.

3.2 Οπτικοποίηση δεδομένων

Προκειμένου, να επιτευχθεί η εφαρμογή εισροών με διαφοροποιημένες δόσεις αλλά και γενικά η πρακτική της γεωργίας ακριβείας, είναι απαραίτητη η επεξεργασία και οπτικοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων.



Σχήμα 3.8: Στιγμιότυπο χάρτη από το ArcGIS [11]

Τα λογισμικά γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων (GIS) χρησιμεύουν στην δημιουργία θεματικών χαρτών. Από αυτά, το πιο διαδεδομένο λογισμικό είναι το ArcGIS [11], ένα παράδειγμα του λογισμικού αυτού παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8, ενώ άλλο ένα αντί-

στοιχο λογισμικό θεματικών χαρτών είναι το Surfer [25], το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά το πλείστον και στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 4

Νέα καινοτόμος προσέγγιση: σύστημα πολυφασματικών καμερών.

4.1 Προβλήματα σημερινών λύσεων/αισθητήρων

Ο σκοπός των μεθόδων καταγραφής είναι να παραδώσουν στον τελικό χρήστη έναν χάρτη βλάστησης του αγρού, ώστε να εφαρμόσει διαφοροποιημένες εισροές (λιπάσματα/φυτοφάρμακα). Κάθε μέθοδος, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιεί διαφορετικό μέσο καταγραφής και πετυχαίνει να αποτυπώσει την κατάσταση του αγρού με μεγαλύτερη ή μικρότερη ακρίβεια. Η πραγματικότητα είναι όμως πως οι συγκεκριμένες τεχνικές αν και υπάρχουν στην αγορά για αρκετά χρόνια, δεν λαμβάνουν την αναμενόμενη αναγνώριση. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι έχουν αρκετά μειονεκτήματα που τις καθιστούν επιχειρησιακά ανεπαρκείς. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα αποτελέσματα δεν έχουν αποδεκτή ακρίβεια.
- Απαιτούν από τον παραγωγό να έχει σημαντικό τεχνολογικό υπόβαθρο.
- Είναι χρονοβόρες.
- Είναι δαπανηρές.
- Δεν λειτουργούν το ίδιο καλά σε κάθε σημείο της γης.

4.1.1 Προβλήματα λήψης δεδομένων με Drones και εφαρμογής διαφοροποιημένων εισροών

Όσον αφορά τα drone, για να επιτευχθεί διαφοροποιημένη εφαρμογή εισροών θα πρέπει να ακολουθηθεί μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, που σε καμία περίπτωση δεν λαμβάνει χώρα σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, εμφανίζονται και τα ακόλουθα προβλήματα:

- Θα πρέπει να μετέχει ένας έμπειρος χειριστής στη διαδικασία λήψης μετρήσεων. Σε αρκετές χώρες για να πραγματοποιηθούν πτήσεις drone, απαιτείται ο χειριστής να έχει δίπλωμα που εκδίδεται από την πολιτική αεροπορία.
- Η καταγραφή δεδομένων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες, αφού επηρεάζεται τόσο η εφικτή διάρκεια πτήσης όσο και η ποιότητα των μετρήσεων. Επίσης, για λόγους εξοικονόμησης χρόνου και μπαταρίας, και ιδιαίτερα όταν πρέπει να καλυφθούν μεγάλες εκτάσεις, τα drone επιλέγεται να πετάνε σε αρκετά μεγάλο υψόμετρο, κάτι το οποίο οδηγεί σε χαμηλής ανάλυσης δεδομένα.
- Επειδή η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων από drone με πολυφασματικές κάμερες είναι πολύπλοκη, δεν γίνεται ο χρήστης να έχει άμεσα τα δεδομένα από τον αγρό που επιθυμεί. Αντιθέτως, απαιτείται να αναλυθούν τα δεδομένα και σε δεύτερο χρόνο να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή στον αγρό.
- Τέλος, απαιτείται σημαντική επένδυση για αγορά των drone, είτε αυτή επιβαρύνει τον παραγωγό είτε την εταιρεία παροχής υπηρεσιών, που πραγματοποιεί τις καταγραφές.

4.1.2 Προβλήματα λήψης δεδομένων με Δορυφόρους και εφαρμογής διαφοροποιημένων εισροών

Άλλος ένας συχνός τρόπος καταγραφής της θρέψης του αγρού είναι με τη χρήση δορυφόρων. Αν και είναι από τις πιο συχνές μεθόδους που χρησιμοποιούνται, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα:

- Είναι αρκετά ακριβή για το μέσο χρήστη, αφού το κόστος της μίας καταγραφής μπορεί να φτάσει έως και τα 5.000 ευρώ ανά αγροτεμάχιο, για καλή ανάλυση.
- Υπάρχουν και δωρεάν καταγραφές από δορυφόρους αλλά η ανάλυση που προσφέρουν δεν είναι ακριβής αφού έχει χαμηλή ανάλυση (Sentinel -> 30*30 μέτρα / Pixel).

- Τα καιρικά φαινόμενα επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων. Για παράδειγμα, αν υπάρχει συννεφιά στην υπό μέτρηση περιοχή τη στιγμή που ο δορυφόρος τυχαίνει να βρίσκεται στο σημείο η μέτρηση που θα πάρει έχει θόρυβο ή είναι εντελώς αναξιόπιστη, ανάλογα με το βαθμό νεφοκάλυψης.
- Μία επί πληρωμή καταγραφή από δορυφόρο παρέχει στον παραγωγό μέτρηση με ανάλυση $0.5 * 0.5$ μέτρο για κάθε εικονοστοιχείο, μία όχι πάντα αποδεκτή ακρίβεια αν κανείς θέλει να μελετήσει σε μεγαλύτερη ανάλυση κάποια χαρακτηριστικά της φυτείας.
- Όπως είναι εμφανές από τα προηγούμενα επιχειρήματα, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο.
- Τέλος, για να χρησιμοποιήσει ο χρήστης τις μετρήσεις θα πρέπει να πληρώσει κάποια υπηρεσία για την ανάλυσή τους, ώστε να πάρει τα δεδομένα σε εύχρηστη μορφή. Κάτι τέτοιο, αυξάνει σημαντικά τη δυσκολία για μαζική υιοθέτηση της συγκεκριμένης μεθόδου.

4.1.3 Προβλήματα λήψης δεδομένων με σημειακούς αισθητήρες

Ακόμη ένας δημοφιλής τρόπος καταγραφής είναι η χρήση σημειακών αισθητήρων. Αν και είναι μία αρκετά διαδεδομένη μέθοδος τα τελευταία χρόνια, δεν έχει καταφέρει να βοηθήσει επαρκώς τον παραγωγό, λόγω των εξής προβλημάτων:

- Το μικρό οπτικό τους πεδίο σε συνάρτηση με τη θέση τους πάνω στο γεωργικό έλκυστήρα δεν επιτρέπουν την λήψη μετρήσεων σε μεγάλο ποσοστό του αγροτεμαχίου.
- Το παραπάνω έχει ως συνέπεια να απαιτείται η τοποθέτηση παραπάνω από ενός αισθητήρων σε κάθε μηχανήμα, κάτι που αυξάνει δραματικά το κόστος, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.
- Τέλος, αυτού του είδους οι αισθητήρες δεν αντιλαμβάνονται το περιβάλλον το οποίο καταγράφουν. Πιο συγκεκριμένα, έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν μόνο το επιστρεφόμενο φάσμα σαν μία μοναδική τιμή, αλλά όχι να αναλύσουν περεταίρω τις πιθανές αιτίες που οδηγούν σε παθολογικές τιμές. Για παράδειγμα, μία χαμηλή τιμή στο δείκτη βλάστησης μπορεί να οφείλεται είτε σε χαμηλή πυκνότητα φυτείας είτε σε ένα άρρωστο φυτό είτε αντίστοιχα σε ένα εξωγενές αντικείμενο (πέτρες, μη καθαρός αισθητήρας κ.α.).



Σχήμα 4.1: Τοποθετημένοι πολλαπλοί σημειακοί αισθητήρες σε ψεκαστικό αγροτικό μηχάνημα

Κατά την ανασκόπηση των υπαρχουσών μεθόδων καταγραφής δεδομένων από τον αγρό, διαπιστώσαμε ότι καμία από αυτές τις μεθόδους δεν καλύπτει όλες τις προϋποθέσεις, που θα την κάνουν προσιτή στον χρήστη. Για το λόγο αυτό, προτείνουμε και μελετάμε μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση, η οποία φιλοδοξεί να αντιμετωπίσει όλα τα παραπάνω προβλήματα ώστε να αποτελεί μια πιο ελκυστική εμπορικά λύση.

4.2 Σύστημα πολυφασματικών καμερών τοποθετημένο σε γεωργικό ελκυστήρα

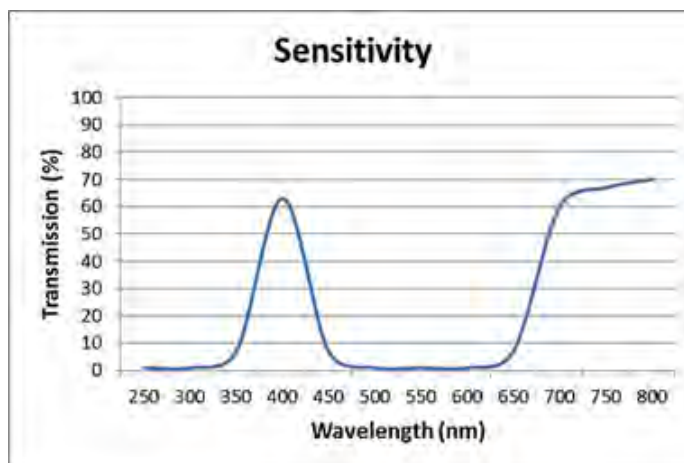
Μελετώντας τα προβλήματα που παρουσιάζει η κάθε μέθοδος, και γνωρίζοντας τις ανάγκες του τελικού χρήστη, σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε ένα σύστημα που προσεγγίζει το θέμα της καταγραφής των αναγκών σε λίπασμα με διαφορετικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετούμε πολυφασματικές κάμερες πάνω από την καμπίνα του ελκυστήρα και εισάγουμε αλγορίθμους για ανάλυση των εικόνων/μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, με στόχο να επιλύσουμε τα περισσότερα προβλήματα των προηγούμενων μεθόδων.

4.2.1 Ζητήματα Υλικού & Εφαρμογής

Για την εφαρμογή της προσέγγισής μας, βασικό συστατικό στοιχείο είναι η λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Πολυφασματικές Κάμερες

Για την ορθή λήψη των δεδομένων από τον αγρό, δοκιμάστηκαν πειραματικά αρκετοί συνδυασμοί διαφορετικών καμερών και τρόπων τοποθέτησης. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η πολυφασματική κάμερα Agrocam PRO NIR [10], η οποία τοποθετήθηκε στο καπό του γεωργικού ελκυστήρα. Η τοποθέτηση αυτή αποδείχθηκε προβληματική, αφού λόγω του χαμηλού ύψους τοποθέτησης (≈ 1 μέτρο), σε συνδυασμό με την κλίση 30° της κάμερας αλλά και την οπτική γωνία του φακού 70° , η ληφθείσα εικόνα απεικονίζει πολύ μικρή έκταση του χωραφιού $\approx 10.8\mu^2$. Στη συνέχεια, η κάμερα τοποθετήθηκε πάνω από την καμπίνα του γεωργικού ελκυστήρα, σε 3m ύψος και με κλίση 30° , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Αν και με αυτή την τοποθέτηση η καταγραφόμενη από την κάμερα έκταση ήταν ικανοποιητική $\approx 130\mu^2$, οι μετρήσεις δεν ήταν ακριβείς και σταθερές. Το κύριο πρόβλημα της μεθόδου αυτής ήταν ότι η Agrocam σύμφωνα με το spectral response, όπως εμφανίζεται στο διάγραμμα 4.2), που δίνεται από τον κατασκευαστή επιστρέφει στο ίδιο κανάλι τα φάσματα Red και Nir, και επιστρέφει ένα επιπλέον κανάλι το Blue. Ο δείκτης NDVI, όμως, με χρήση το μπλε φάσματος αντί για το κόκκινο έχει αρκετά μικρή ακρίβεια στην ανάλυση της θρέψης όπως αναφέρει η βιβλιογραφία [12].



Σχήμα 4.2: Φασματική απόκριση της κάμερας [10].

Τέλος, για να υπολογιστεί το ο δείκτης θρέψης, NDVI, με καλύτερη ακρίβεια, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί το φάσμα Red. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε μια rgb web κάμερα σε απόσταση 7cm από την Agrocam (η απόσταση μετρήθηκε από τα κέντρα των φακών) και με κλίση 30° . Η απόσταση τοποθέτησης μεταξύ των καμερών είναι η μικρότερη δυνατή, 7cm λόγω των θηκών/ casing των καμερών. Η web κάμερα, όπως και η Agrocam είχαν ανάλυση 1920x1080 (full HD) και ίδια γωνία φακού. Οι κάμερες στηρίχθηκαν πάνω στην οροφή του

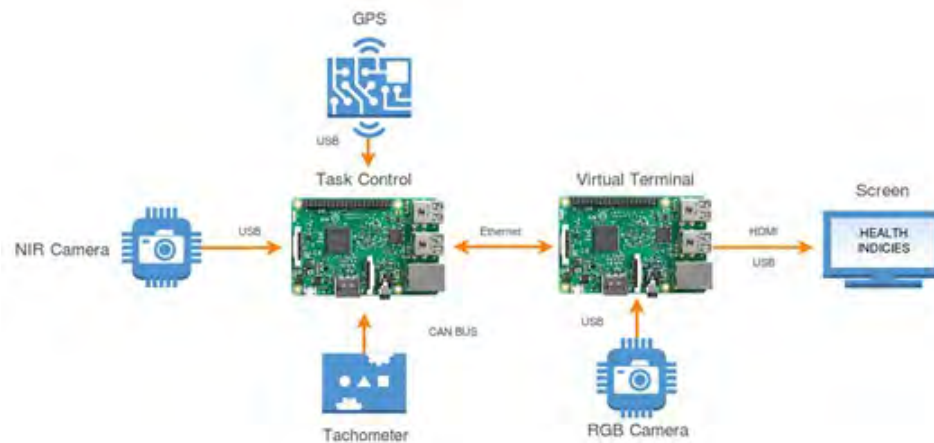
γεωργικού ελκυστήρα με 3M-ταινία διπλής όψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Ενδεικτική τοποθέτηση συστήματος πάνω σε γεωργικό ελκυστήρα.

Σύστημα

Για την υλοποίηση των αλγορίθμων σε πραγματικό χρόνο αλλά και για την καταγραφή των δεδομένων χρειάστηκε μια συστοιχία από δύο Raspberry Pi 3 Model B [26], τα οποία ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους σε τοπικό δίκτυο μέσω καλωδίου ethernet. Κάθε Raspberry Pi 3 Model B έχει συνδεδεμένη με USB μία κάμερα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για όλες τις μετρήσεις και τις χαρτογραφήσεις, συνδέθηκε στο σύστημα και συσκευή GPS ώστε να συσχετίζονται οι συντεταγμένες της τρέχουσας θέσης με τις μετρήσεις, με σκοπό στη συνέχεια να μπορούν να οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα με χρήση προγραμμάτων GIS. Τέλος, για την υλοποίηση του λογισμικού χρειάστηκε επιπλέον να δημιουργηθεί και να χρησιμοποιηθεί ένα ταχύμετρο στον τροχό του γεωργικού ελκυστήρα, ώστε να υπάρχουν μετρήσεις με μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια. Το τελικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε εμφανίζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ενδεικτικό σχήμα υλοποίησης υλικού.

4.3 Ζητήματα λογισμικού

4.3.1 Φασματική ανάλυση βλάστησης

Για την εξαγωγή του δείκτη βλάστησης της καλλιέργειας ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη πολλών διαφορετικών αλγορίθμων. Αυτό έγινε για να βρεθεί ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός αλγορίθμων, που θα περιγράφει την πραγματική κατάσταση του χωραφιού και θα πετυχαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια. Στα επόμενα κεφάλαια, περιγράφεται ο κάθε αλγόριθμος αναλυτικά.

Υπολογισμός θρέψης καλλιέργειας

Όπως εξηγήθηκε για τον υπολογισμό του δείκτη NDVI απαιτείται η συσχέτιση δεδομένων από δύο περιοχές του οπτικού φάσματος: ένα εύρος του φάσματος στην περιοχή near infrared και ένα στην περιοχή του ερυθρού φάσματος. Για να επιτευχθεί η εξαγωγή της πληροφορίας από αυτές τις δύο περιοχές του φάσματος, χρειάζεται να διαχωριστεί η κάθε εικόνα στα επιμέρους κανάλια της ώστε να επιλεγούν και απομονωθούν οι απαιτούμενες πληροφορίες από συγκεκριμένα τα συγκεκριμένα φάσματα. Πιο συγκεκριμένα, από την web κάμερα χρησιμοποιήθηκε το red κανάλι το οποίο απεικονίζει το κόκκινο φάσμα (635-700 nm), ενώ από την Agrocarn επιλέχθηκε πάλι το red κανάλι, το οποίο όμως απεικονίζει το ένα κομμάτι του φάσματος red μαζί με το near infrared φάσμα (680-1000 nm). Στη συνέχεια, για κάθε εικόνα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών των pixels από τα επιλεγμένα κανάλια για τις περιοχές ενδιαφέροντος μέσα στην εικόνα, όπως αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο. Τέλος,

όπως φαίνεται στον ψευδοκώδικα 1, έγινε ο υπολογισμός του δείκτη NDVI.

Αλγόριθμος 1 Ψευδοκώδικας για τον υπολογισμό του NDVI.

Input: Input 2 channel **image**, that is the result of cropping and the join of raw images from cameras.

Output: The **NDVI** measurement.

procedure NdviCalculation(*image*)

Red $\leftarrow$ 0

Nir $\leftarrow$ 0

for *i* = 0, ..., *image.cols* **do**

for *j* = 0, ..., *image.rows* **do**

color $\leftarrow$ *image.at* < Vec3b > (*Point*(*i*, *j*))

Red $\leftarrow$ *Red* + *color.val*[2]

Nir $\leftarrow$ *Nir* + *color.val*[1]

end for

end for

averageRed $\leftarrow$ *Red* / (*image.cols* * *image.rows*)

averageNir $\leftarrow$ *Nir* / (*image.cols* * *image.rows*)

NDVI $\leftarrow$ *averageNir*

if (*averageRed* + *averageNir*)! = 0 **then**

NDVI $\leftarrow$ *averageRed*

end if

return *NDVI*

end procedure

Περικοπή και διαχωρισμός εικόνας

Στο πρώτο στάδιο, για την δημιουργία και την επαλήθευση των αλγορίθμων, λήφθηκαν πειραματικές εικόνες από το σύστημα τοποθετημένο σε στατικό μέσο. Στην επεξεργασία των εικόνων αυτών, η μέτρηση της θρέψης υπολογίστηκε από ένα μικρό κομμάτι της εικόνας, 400 x 250 εικονοστοιχεία με κέντρο το εστιακό κέντρο του φακού. Αυτή η περιοχή επιλέχθηκε γιατί η εικόνα έχει καλύτερη ανάλυση σε σημεία κοντά στο εστιακό κέντρο του φακού και μεγαλύτερη παραμόρφωση στα άκρα. Επίσης, στα άκρα της εικόνας λόγω γεωμετρικών ιδιοτήτων, αλλάζει η κλίση με την οποία αποτυπώνονται τα φυτά στην εικόνα με αποτέλεσμα

οι μετρήσεις να μην είναι αξιόπιστες, λόγω του φαινομένου barrel effect στις κάμερες με ευρυγώνιο φακό [27].

Το πείραμα αυτό είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα, όμως όταν οι κάμερες τοποθετήθηκαν στην οροφή του γεωργικού ελκυστήρα, λόγω της ταχύτητας που ανέπτυσσε το όχημα (γεωργικός ελκυστήρας) σε συνδυασμό με τη χαμηλή ταχύτητα λήψης των εικόνων από το σύστημα (λόγω περιορισμού της σύνδεσης), δεν υπήρχε μέτρηση θρέψης για κάθε σημείο του αγροτεμαχίου. Αναλυτικότερα, υπήρχαν τμήματα του αγρού τα οποία δεν απεικονίζονταν σε καμία εικόνα, άρα δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή δείκτη βλάστησης για τα συγκεκριμένα τμήματα. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται κυρίως στο μέγεθος του κομματιού της εικόνας που παίρναμε υπόψιν στην εξαγωγή του δείκτη βλάστησης (NDVI). Πιο συγκεκριμένα, ο γεωργικός ελκυστήρας καλύπτει πάνω από 15 μέτρα μήκους κάθετα στον άξονα της κίνησης (πλάτος εργασίας). Κατά τη λίπανση ενός αγροτεμαχίου το μονοπατι που ακολουθεί ο γεωργικός ελκυστήρας έχει πλάτος ίσο με το πλάτος εργασίας για την αποφυγή διπλής λίπανσης. Για τον λόγο αυτό κρίνεται σημαντικό το σύστημα που αναπτύχθηκε να μπορεί να καλύψει, στο τμήμα που υπολογίζεται ο δείκτης θρέψης, πλάτος ίσο ή μεγαλύτερο του πλάτους εργασίας, αφού οι περιοχές αυτές δεν θα ξανά εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της λίπανσης.

Για να καλυφθεί η ανάγκη αυτή και στην προσπάθεια να αποφύγουμε την αλλαγή του συστήματος σε επίπεδο υλικού (αλλαγή καμερών ή/ και μικροεπεξεργαστή), δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί για την εξαγωγή της μέτρησης μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, ώστε να εκμεταλλευτούμε το μεγαλύτερο δυνατό οπτικό πεδίο της κάμερας. Παρόλα αυτά, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, τα σημεία που βρίσκονται μακριά από το εστιακό κέντρο δεν παράγουν δεδομένα με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, αποφασίσαμε να χωρίσουμε την εικόνα σε 4 κομμάτια: το πρώτο κομμάτι βρίσκεται γύρω από το εστιακό κέντρο και έχει την μεγαλύτερη ακρίβεια, και τα υπόλοιπα κομμάτια βρίσκονται γύρω από αυτό με μικρότερη ακρίβεια. Το κάθε κομμάτι από αυτά συμμετέχει με διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας στον υπολογισμό του μέσου όρου.

Τα 4 κομμάτια αυτά είναι τα τμήματα A, B, C, D, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ξεχωριστά ο δείκτης βλάστησης για το κάθε κομμάτι της εικόνας. Τέλος, για να γίνει η εξαγωγή του τελικού δείκτη από όλη την εικόνα πολλαπλασιάζεται ο δείκτης του κάθε τμήματος με ένα βάρος, ανάλογο της απόστασης από το εστιακό κέντρο και τέλος προστίθενται, όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.1. Πιο συγκεκριμένα, η εξαγωγή των συντελεστών έγινε λαμβάνοντας υπόψιν το μέσο όρο της ακρίβειας της εικόνας (εικονοστοι-

χείο / μέτρο) σε καθένα από τα τμήματα A, B, C, D. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για το τμήμα D αποθηκευόταν η πληροφορία στο σύστημα μέχρι το κομμάτι του αγρού που απεικονιζόταν στο τμήμα αυτό να αποτυπωθεί στα τμήματα A, B, C. Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογισμού του τελικού δείκτη εκτελούνταν όταν ο γεωργικός ελκυστήρας εξήγαγε μέτρηση και από τα επόμενα τμήματα A, B, C, και αφότου η έκταση προς υπολογισμό δεν εμφανιζόταν πια σε κανένα από τα παραπάνω τμήματα.

Εξίσωση 4.1 Εξαγωγή του δείκτη NDVI, σύμφωνα με το βάρος του κάθε τμήματος.

$$NDVI = 0.6 * NDVI_A + 0.15 * (NDVI_B + NDVI_C) + 0.1 * NDVI_D$$



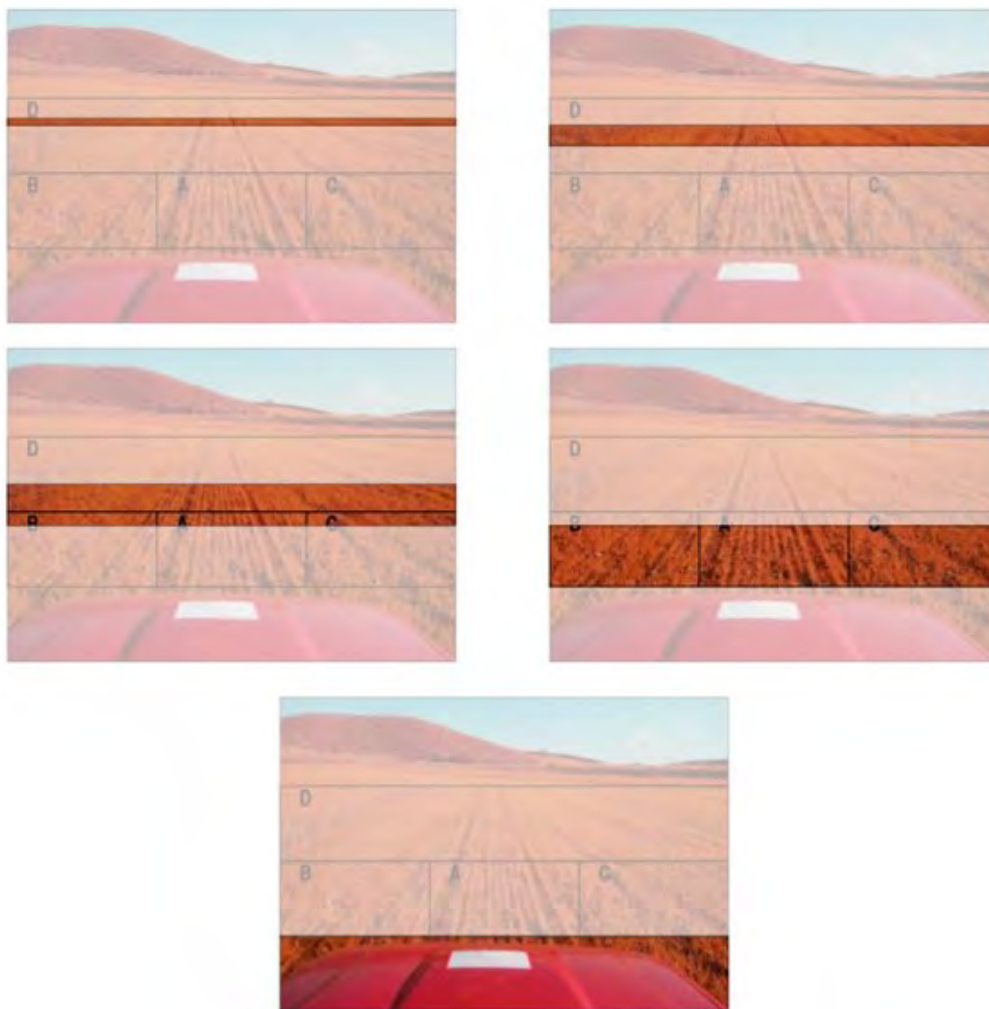
Σχήμα 4.5: Εικόνα από τα πειράματα, χωρισμένη σε τμήματα.

Αντιστοίχιση εικόνων στον πραγματικό χώρο

Με σκοπό να λάβουμε μία μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι απαραίτητο να συλλέξουμε παραπάνω από μία μέτρηση για κάθε τμήμα του αγρού. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται να μπορούμε να αναγνωρίσουμε σε διαδοχικές εικόνες, τα κοινά σημεία του αγρού. Λαμβάνοντας, λοιπόν, διαδοχικά οπτικά δείγματα σε σταθερές αποστάσεις, ανεξαρτήτως της ταχύτητας πορείας του οχήματος, η αναγνώριση αυτή είναι δυνατή λαμβάνοντας υπόψιν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάμερας αλλά και της ταχύτητας, όπως αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο 4.3.1. Πιο συγκεκριμένα, για να προσμετρήσουμε όλη τη δυνατή πληρο-

φορία για κάθε κομμάτι του χωραφιού, αποφασίσαμε να τμηματοποιήσουμε το αγροτεμάχιο σε τμήματα ίδιου μήκους (2 μέτρων στην πορεία του γεωργικού ελκυστήρα).

Στις εικόνες 4.6 απεικονίζονται εικόνες από συνεχόμενα στιγμιότυπα από το χωράφι. Στα στιγμιότυπα αυτά, φαίνεται με υψηλή ευκρίνεια ένα τμήμα καθ' όλη την πορεία του γεωργικού ελκυστήρα, από την πρώτη εικόνα, που έχει αρχίσει να φαίνεται στο οπτικό πεδίο της κάμερας μέχρι την τελευταία, που δεν ανήκει πια σε τμήμα μετρήσιμης περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, στις δύο πρώτες εικόνες το τμήμα εμπεριέχεται μόνο στο D, στην τρίτη εικόνα το τμήμα είναι και στα 4 διαφορετικά τμήματα υπολογισμού του NDVI, στην τέταρτη μόνο στα A,B,C ενώ στην τελευταία δεν εμπεριέχεται σε κανένα κομμάτι από τις μετρήσιμες περιοχές της εικόνας.



Σχήμα 4.6: Στιγμιότυπα από φωτογραφίες στο χωράφι.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας 4.1) με τον υπολογισμό του NDVI για το συγκεκριμένο τμήμα που απεικονίζεται στις εικόνες 4.6.

image	$NDVI_A$	$NDVI_B$	$NDVI_C$	$NDVI_D$
i	-	-	-	0.6
ii	-	-	-	0.5
iii	0.48	0.46	0.42	0.5
iv	0.47	0.45	0.42	-
v	-	-	-	-
Average NDVI	0.475	0.455	0.42	0.533
NDVI for tile	$(0.475 * 0.6 + 0.455 * 0.15 + 0.42 * 0.15 + 0.533 * 0.1) = 0.46955$			

Πίνακας 4.1: Πίνακας Υπολογισμού NDVI.

Inputs	
Ύψος τοποθέτησης	3m
Κλίση τοποθέτησης	40°
Μοίρες φακού	70°
Resolution	1920x1080

Πίνακας 4.2: Πίνακας εισόδων γεωμετρικών χαρακτηριστικών για αντιστοίχιση πραγματικού χώρου με pixels.

Αντιστοίχιση πραγματικού χώρου με pixel

Είναι σημαντικό, προκειμένου να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο 4.3.1, να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ανά πάσα στιγμή την απόσταση των προσμετρώμενων pixel σε σχέση με την κάμερα στον άξονα y αλλά και την αντιστοίχιση τους στον αγρό. Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός αυτός, εκτός από τα χαρακτηριστικά των καμερών πρέπει να είναι γνωστά και τα χαρακτηριστικά της τοποθέτησης της κάμερας (γωνία τοποθέτησης, ύψος τοποθέτησης) αλλά και την ταχύτητα του γεωργικού ελκυστήρα. Πιο συγκεκριμένα, για να μπορέσει να γίνει ο υπολογισμός της εξίσωσης 4.2, θα πρέπει να είναι ήδη γνωστά τα στοιχεία που αναγράφονται στον πίνακα 4.2.

Με βάσει την ταχύτητα που κινείται το όχημα και γνωρίζοντας το χρόνο που διάνυσε από την προηγούμενη μέτρηση μπορούμε να ξέρουμε κάθε εικόνα σε ποιο σημείο του αγρού αντιστοιχεί. Έπειτα με τη χρήση της εξίσωσης μπορούμε να γνωρίζουμε σε ποιο σημείου του αγρού ανήκει η κάθε μέτρηση.

Εξίσωση 4.2 Αντιστοίχιση απόστασης με pixel της εικόνας.

$$pixel = \tan \left(\arcsin \left(\frac{height}{\sqrt{(height)^2 + \left(meter + \frac{height}{\tan(len.Angle + position.Angle)} \right)^2}} \right) \right) * meter$$

Συσχέτιση εικόνων

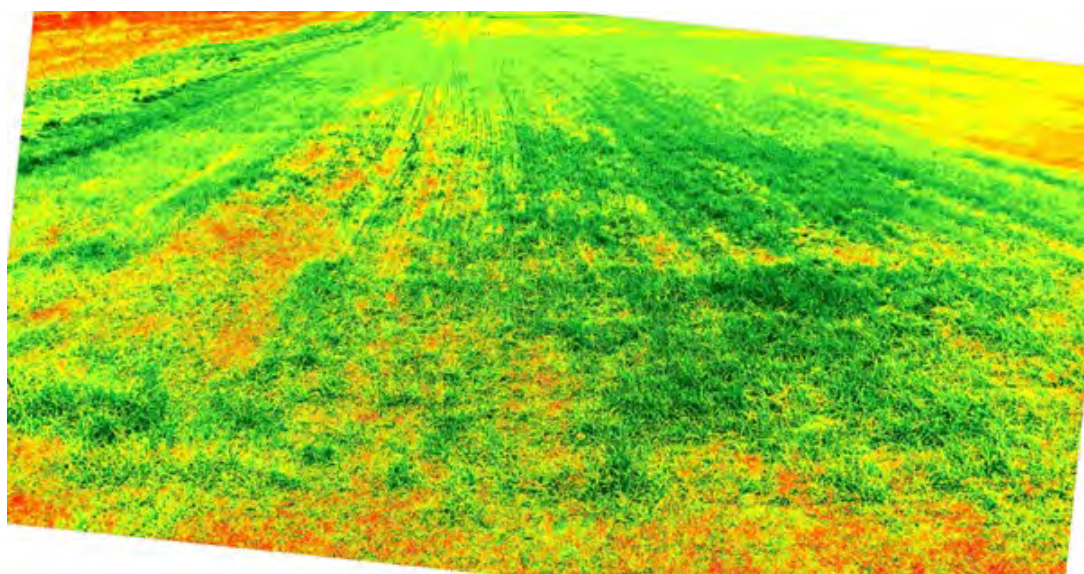
Δεδομένου ότι για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης χρειάστηκαν 2 κάμερες, έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος οι εικόνες που προέρχονται από τις κάμερες να επεξεργαστούν ώστε να υπάρχει μεταξύ των δύο εικόνων αντιστοίχιση εικονοστοιχείου προς εικονοστοιχείου, ώστε να υπολογιστεί σωστά ο δείκτης. Έτσι, χρειάστηκε μία από τις δύο εικόνες να μετασχηματιστεί κατάλληλα για να είναι η περιοχή κάλυψής της, αντίστοιχη με την άλλη. Για να γίνει ο μετασχηματισμός μιας εικόνας, χρειάζεται να δημιουργηθεί ένας πίνακας μετασχηματισμού. Για τη δημιουργία του πίνακα αυτού χρησιμοποιήθηκε από το πρόγραμμα Matlab η εφαρμογή Image Registration, Affine Transformation. Η εφαρμογή αυτή δέχεται σαν είσοδο τις εικόνες και παράγει στην έξοδο τους πίνακες μετασχηματισμού. Για να γίνει όσο το δυνατόν πιο ακριβής ο μετασχηματισμός, δόθηκε ως είσοδος στην εφαρμογή το τμήμα των εικόνων που μετέχουν στον υπολογισμό του δείκτη και όχι ολόκληρες οι εικόνες. Η διαδικασία αυτή εξαγωγής του πίνακα μετασχηματισμού, πραγματοποιήθηκε μόνο μία φορά offline και έπειτα, θεωρήθηκε ότι ο μετασχηματισμός των εικόνων θα είναι πάντα ίδιος εφόσον οι κάμερες θα έχουν σταθερά γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος (ίδια θέση τοποθέτησης, ίδια κλίση κ.α.). Έπειτα, γινόταν η εφαρμογή των πινάκων μετασχηματισμού σε πραγματικό χρόνο σε κάθε εικόνα που λάμβανε το σύστημα από την agrocarn και την webcam. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες 4.7, 4.8, και τέλος φαίνεται μία εικόνα με τροποποιημένα χρώματα σύμφωνα μόνο με το δείκτη βλάστησης NDVI 4.9.



Σχήμα 4.7: Εικόνα από την Agrocarn πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού.



Σχήμα 4.8: Εικόνα από την webcamera πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού.



Σχήμα 4.9: Τροποποιημένη εικόνα, σύμφωνα με την τιμή NDVI του κάθε pixel, μετά τη συσχέτιση των εικόνων.

4.3.2 Αλγόριθμος για εξαγωγή χρώματος από τις μετρήσεις

Είναι σημαντικό για τον αγρότη εκτός από τον δείκτη βλάστησης να γνωρίζει και άλλα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας του. Το πλεονέκτημα που μας δίνει η χρήση καμερών είναι ότι εκτός από μια απλή εξαγωγή μέτρησης από την ένταση συγκεκριμένων φασμάτων, μπορούμε να συλλέξουμε και να αναλύσουμε πληροφορία που έχει σχέση με μοτίβα και σχήματα. Ο αλγόριθμος για την εξαγωγή του χρώματος προέκυψε από την ανάγκη να υπολογιστεί η πυκνότητα φυτείας αλλά και ο δείκτης βλάστησης να υπολογίζεται μόνο από την καλλιέργεια, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη μη σχετιζόμενη οπτική πληροφορία.

Αλγόριθμος Αναγνώρισης Χρώματος

Αρχικά, δημιουργήθηκε ο αλγόριθμος για την αναγνώριση χρώματος. Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ότι το χρώμα έχει χαμηλό δείκτη βλάστησης (NDVI) σε σχέση με την υπόλοιπη φυτεία, έχει ισχυρή την καφέ αποχρωση αλλά και καλύπτει συνεχόμενη επιφάνεια σε σχέση με την υπόλοιπη φυτεία. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται στο κομμάτι A, και σε επημέρους περιοχές των τμημάτων B και C της εικόνας 4.5, γιατί το χρώμα στις περιοχές αυτές είναι πιο εμφανές λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάμερας και του αγρού. Η υλοποίηση του αλγορίθμου είναι αρκετά απλή, και πιο συγκεκριμένα ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Δημιουργεί μία μάσκα με βάση τις αποχρώσεις του καφέ χρώματος.
- Δημιουργεί μία μάσκα με βάση την τιμή του δείκτη βλάστησης.
- Έπειτα υπολογίζει την τομή των δύο αυτών масκών και την αναθέτει σε μια καινούρια μάσκα.

Τέλος, μετά την εφαρμογή της μάσκας που αναφέρεται στο προηγούμενο βήμα, αναγνωρίζει ως χρώμα τις περιοχές που βρίσκονται εντός της μάσκας και που έχουν επιφάνεια μεγαλύτερο των 10*10 εικονοστοιχείων.

Αλγόριθμος Αναγνώρισης Πυκνότητας Φυτείας

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας ήδη τον αριθμό των pixels που έχουν αναγνωριστεί ως χρώμα, για να εξάγουμε μία μέτρηση για την πυκνότητα φυτείας πρέπει να αναγνωρίσουμε τα φυτά, αλλά και όλους τους λοιπούς εξωγενείς παράγοντες. Για να αφαιρέσουμε τους εξωγενείς παράγοντες, δημιουργήσαμε μία μάσκα η οποία περιέχει όλα τα pixel με NDVI χαμηλότερο του 0, η οποία θα αναφέρεται ως object mask. Έπειτα, επειδή όλες οι μάσκες που προαναφέρθηκαν, υπολογίζονται κατά κύριο λόγο με ένα στατικό κατώφλι στα χρώματα, και λόγω του ότι όλες οι μετρήσεις γίνονται με διαφορετικό φωτισμό κάθε φορά άρα και τα χρώματα στις εικόνες δεν είναι ποτέ σταθερά, για την αναγνώριση της φυτείας εφαρμόσαμε στην εικόνα μία επιπλέον μάσκα, με βάση τις αποχρώσεις του πράσινου χρώματος, η οποία στο εξής θα αναφέρεται ως plant mask. Η προσθήκη της μάσκας αυτής έγινε για να μειώσουμε τις πιθανές false positive περιπτώσεις, δηλαδή τις περιπτώσεις κατά τις οποίες αναγνωρίζεται ως φυτό

κάποιος εξωγενής παράγοντας ή ακόμα και χρώμα. Ο υπολογισμός των pixel για την αναγνώριση της φυτείας έγινε με την παρακάτω σύνθεση масκών, που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.3. Τέλος, μετά την εφαρμογή της σύνθεσης των масκών στην εικόνα, για να εκτιμηθεί η πυκνότητα φυτείας διαιρέθηκε το σύνολο των pixel που είναι αναγνωρισμένα ως φυτά με αυτά που είναι ως χρώμα ή άλλα αντικείμενα.

Εξίσωση 4.3 Υπολογισμός μάσκας για την αναγνώριση της πυκνότητας φυτείας

$$plantMask \cap (!groundMask \cup !objectMask)$$

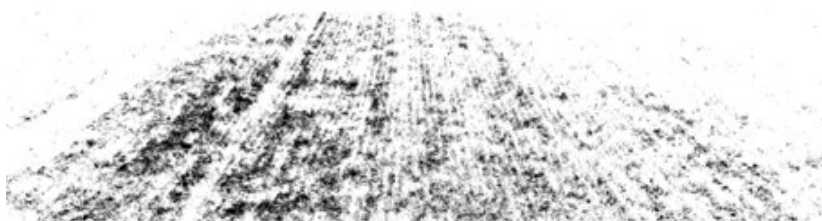
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται, η αρχική rgb εικόνα 4.10, η μάσκα χρώματος 4.11, η μάσκα εξωγενών παραγόντων 4.12, και η σύνθεση των масκών αυτών σε μία νέα μάσκα εφαρμοσμένη πάνω στην αρχική εικόνα 4.13, για λόγους οπτικοποίησης η μάσκα έχει ζωγραφιστεί με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 4.10: Εικόνα από το σύστημα.

4.4 Σύγκριση συνόλου μεθόδων λήψης δεδομένων

Για να επιβεβαιώσουμε τη σωστή λειτουργία του συστήματος που υλοποιήσαμε στην παρούσα εργασία, συγκρίναμε τις μετρήσεις με κάποιες από τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους καταγραφής θρέψης του αγρού. Πιο συγκεκριμένα, για να κάνουμε τη σύγκριση επιλέξαμε από την ομάδα των σημειακών αισθητήρων τον αισθητήρα Crop Circle. Από τις δορυφορικές απεικονίσεις επελέγη ο δορυφόρος Sentinel, ο οποίος παρέχει δωρεάν μετρήσεις. Τέλος,



Σχήμα 4.11: Μάσκα χώματος.



Σχήμα 4.12: Μάσκα εξωγενών παραγόντων.



Σχήμα 4.13: Συνδυασμός όλων των масκών.

χρησιμοποιήσαμε το drone *Dji Phantom 4 Pro* με τις ίδιες κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του συστήματος.

4.4.1 Τρόπος καταγραφής δεδομένων από το χωράφι - υλοποίηση

Για να γίνει ορθά η λήψη, η καταγραφή και η σύγκριση των δεδομένων θρέψης από τα μέσα, χρησιμοποιήθηκε ένας πειραματικός αγρός με φυτεία σίτου, 10 στρεμμάτων στο Περιβλεπτο Μαγνησίας, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 4.14, (τα τεμάχια 1 και 2a από το πιλοτικό που αναφέρεται στο κεφάλαιο 5). Για τη σύγκριση των μέσων καταγραφής θρέψης από τον αγρό, έγιναν 3 επαναλήψεις των μετρήσεων στον πειραματικό αγρό. Κάθε επανάληψη, περιείχε 2 σετ μετρήσεων με διαφορά 4 ημερών. Ο σκοπός αυτού ήταν να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Οι επαναλήψεις είχαν μεταξύ τους διαφορά ενός μήνα, ώστε να παρακολουθείται η φυτεία κατά τη διάρκεια ανάπτυξής της. Κάθε σετ μετρήσεων αποτελείται από μετρήσεις

- Δορυφόρου (Sentinel).
- Drone.
- Crop Circle.
- Του συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 4.14: Το συνολικό αγροτεμάχιο, από το οποίο επιλέχθηκε ένας μέρος του για τις μετρήσεις.

Όλες οι μετρήσεις του σετ πραγματοποιήθηκαν την ίδια μέρα. Για να μπορέσει να γίνει αντιστοίχιση όλων των μετρήσεων και να δημιουργηθούν χάρτες τοποθετήθηκαν, σε όλα τα συστήματα καταγραφής, εκτός του δορυφόρου, GPS συστήματα. Τέλος, όλες οι μετρήσεις έγιναν από τις ίδιες διαδρομές εντός του αγροτεμαχίου.

4.4.2 Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων

Παρακάτω, περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες τόσο για τη λήψη όσο και για την επεξεργασία των μετρήσεων από κάθε μέσο.

Λήψη δεδομένων με χρήση καμερών

Επειδή οι μετρήσεις ήταν συχνές, για να αποφευχθεί η καταστροφή της φυτείας του αγροτεμαχίου, το σύστημα τοποθετήθηκε πάνω σε αγροτικό αυτοκίνητο με αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και όχι σε γεωργικό ελκυστήρα. Για την επεξεργασία των δεδομένων από το σύστημα δοκιμάσαμε τη χρήση διαφορετικών συνδυασμών αλγορίθμων και αρχιτεκτονικής. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης αναγράφονται παρακάτω:

- Εξαγωγή του δείκτη βλάστησης, χωρίς να αφαιρεθεί το χρώμα και οι εξωγενείς παράγοντες από τις μετρήσεις.
- Εξαγωγή του δείκτη βλάστησης με αφαίρεση χρώματος και εξωγενών παραγόντων.
- Χρήση μόνο της NIR κάμερας (Agrocam).
- Χρήση και των 2 καμερών, Agrocam και rgb κάμερας.

Λήψη δεδομένων με Drone

Στο drone χρησιμοποιήθηκαν και οι 2 κάμερες που είχε το σύστημα και το ίδιο λογισμικό με αυτό του συστήματος για την επεξεργασία εικόνας. Οι κάμερες τοποθετήθηκαν σε γωνία 90° από το επίπεδο του εδάφους και το drone βρισκόταν σε ύψος περίπου 15 μέτρων από την επιφάνεια της γης. Επειδή το αγροτικό τεμάχιο που έγιναν οι μετρήσεις ήταν μικρής επιφάνειας, από αυτό το ύψος το οπτικό πεδίο των καμερών κάλυπτε όλο το τεμάχιο στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις, οπότε δεν χρειάστηκε περαιτέρω λογισμικό για ένωση εικόνων.

Λήψη δεδομένων από τον σημειακό αισθητήρα Crop Circle

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στην πρόσοψη του οχήματος που έγιναν και οι μετρήσεις με το σύστημα της παρούσας εργασίας. Σταθεροποιήθηκε σε ύψος 1 μέτρου, όπως είναι το προτεινόμενο από το εγχειρίδιο του αισθητήρα, στην πρόσοψη του οχήματος. Οι μετρήσεις θρέψης του αισθητήρα μαζί με τις μετρήσεις του GPS καταγράφονταν στον data logger που ήταν συνδεδεμένος με τον Crop Circle. Έπειτα έγινε ανάλυση των μετρήσεων του αισθητήρα ώστε να εντοπισθούν και απομονωθούν τυχόν σφάλματα. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια εκκίνησης του ο αισθητήρας αποθηκεύει μη έγκυρες μετρήσεις, ή και κατά τη διάρκεια της μέτρησης κάποιες μετρήσεις είναι άκυρες ή κενές. Επίσης, χρειάστηκε επεξεργασία για τιμές GPS που είχαν πολύ μεγάλο σφάλμα σύμφωνα με την καταγεγραμμένη κίνηση του οχήματος στο αγροτεμάχιο.

Λήψη δεδομένων από το δορυφόρο Sentinel

Για την λήψη των δεδομένων από το δορυφόρο, αναζητήσαμε το αγροτεμάχιο αναφοράς στην online εφαρμογή παροχής υπηρεσιών του δορυφόρου και επιλέξαμε ως ημερομηνίες μέτρησης, εκείνες που βρίσκονταν πιο κοντά στις ημερομηνίες των μετρήσεων που είχαν πραγματοποιηθεί με τα άλλα μέσα. Ακολούθως, έγινε η επιλογή του κατάλληλου δείκτη βλάστησης (NDVI) για να γίνει αποτελεσματικά η σύγκριση και εν συνεχεία δημιουργήθηκε ο χάρτης.

4.4.3 Σύγκριση μεθόδων

Για την ακριβή σύγκριση και αξιολόγηση των μεθόδων λήψης δεδομένων χρειάζεται να γνωρίζουμε εκ των προτέρων την ακριβή κατάσταση του αγρού. Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό, είναι με αναλύσεις φύλλων του σίτου στο εργαστήριο. Η διαδικασία αυτή, όμως, είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά τη συλλογή φύλλων αλλά και με πολύ μεγάλο κόστος. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήσαμε το χάρτη παραγωγής του συγκεκριμένου αγροτεμαχίου για να μπορέσουμε να κάνουμε την αξιολόγηση. Πιο συγκεκριμένα, λόγω κάποιων ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου αγροτεμαχίου, ήταν γνωστό ότι κάποια συγκεκριμένα τμήματα του αγρού, λόγω είτε γεωλογικών χαρακτηριστικών είτε κακής σποράς θα μπορούσαν να είναι ενδεικτικές περιοχές σύγκρισης.

Η σύγκριση των χαρτών ολοκληρώθηκε μετά τον αλωνισμό της φυτείας. Η διαδικασία

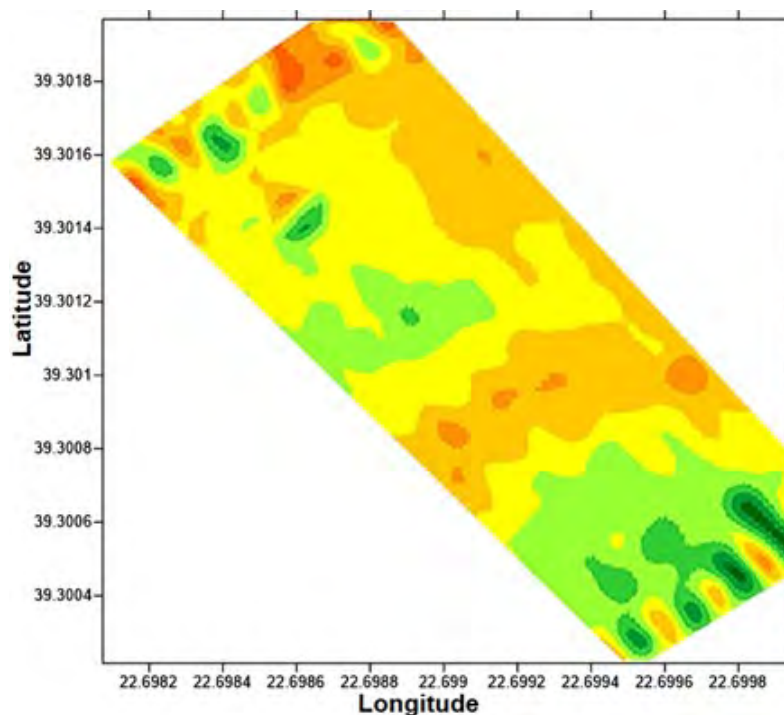
που ακολουθήσαμε ήταν η εξής: Χωρίσαμε αρχικά τον χάρτη παραγωγής, που εμφανίζεται στον χάρτη 4.15, σε 3 τμήματα. Στο πρώτο τμήμα (part 1), ανήκουν τα περιθώρια του αγροτεμαχίου, τα οποία είναι περιοχές συνήθως κακής υγείας της φυτείας, επειδή είναι το σημείο που κινείται περισσότερο ο γεωργικός ελκυστήρας ή οποιοδήποτε άλλο όχημα. Στο δεύτερο τεμάχιο (part 2), παρουσιάζονται δύο περιοχές του αγροτεμαχίου με ιδιαίτερα αυξημένη παραγωγή κατά συνέπεια και υγεία. Στο τρίτο τεμάχιο (part 3), υπάρχει ένα φυσικό ρέμα στην περιοχή το οποίο δημιουργεί προβλήματα κατά τη διαδικασία της σποράς αλλά και της λίπανσης, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από χαμηλή πυκνότητα φυτείας αλλά και με χαμηλό δείκτη βλάστησης κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας.

Στο χάρτη παραγωγής δεν είναι εμφανές ολόκληρο το τμήμα 1. Για το λόγο αυτό για κάθε σύγκριση λάβαμε υπόψη μας και μία εικόνα από την rgb κάμερα του drone που εμφανίζονται τα περιθώρια του τεμαχίου (δηλαδή το τμήμα 1). Στη συνέχεια, κάναμε εξαγωγή στατιστικών στοιχείων από το χάρτη του κάθε τμήματος. Η στατιστική ανάλυση έγινε στις μετρήσεις μετά την εφαρμογή του interpolation και αφορούσε την ομοιότητα των χαρτών με το χάρτη παραγωγής. Ο διαχωρισμός των τεμαχίων έγινε με GPS δεδομένα και ήταν σε όλες τις αξιολογήσεις σταθερός. Τέλος, όσον αφορά το τμήμα 1, βγήκαν στατιστικά δεδομένα μόνο για τις περιοχές που ήταν εντός του χάρτη παραγωγής και για τα υπόλοιπα κομμάτια υπήρξε μόνο εποπτεία των δεδομένων σε σύγκριση με την εικόνα από το αγροτεμάχιο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όλοι οι χάρτες δημιουργήθηκαν με τον ίδιο χρωματικό χάρτη, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 4.16, για να μπορέσει να επιτευχθεί σωστά η σύγκριση τους. Επίσης, λόγω του ότι ο καθένας έχει διαφορετική κλίμακα όσον αφορά το δείκτη βλάστησης, ο χρωματισμός τους και τα όρια στον χρωματικό χάρτη τέθηκαν σύμφωνα με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή τους.

4.4.4 Επιλογή κατάλληλου συνδυασμού αλγορίθμων και αρχιτεκτονικής για το σύστημα

Στις μετρήσεις / εικόνες που ελήφθησαν από το σύστημα της παρούσας εργασίας, εφαρμόσαμε πολλαπλούς συνδυασμούς αλγορίθμων. Για κάθε συνδυασμό αλγορίθμων, δημιουργήσαμε έναν χάρτη με interpolation. Χρησιμοποιήθηκε, η διαδικασία της σύγκρισης που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα 4.4.3, ώστε να καταλήξουμε στην αλληλουχία των αλγορίθμων αλλά και του set up που οδηγεί στις μετρήσεις με την μεγαλύτερη ακρίβεια.



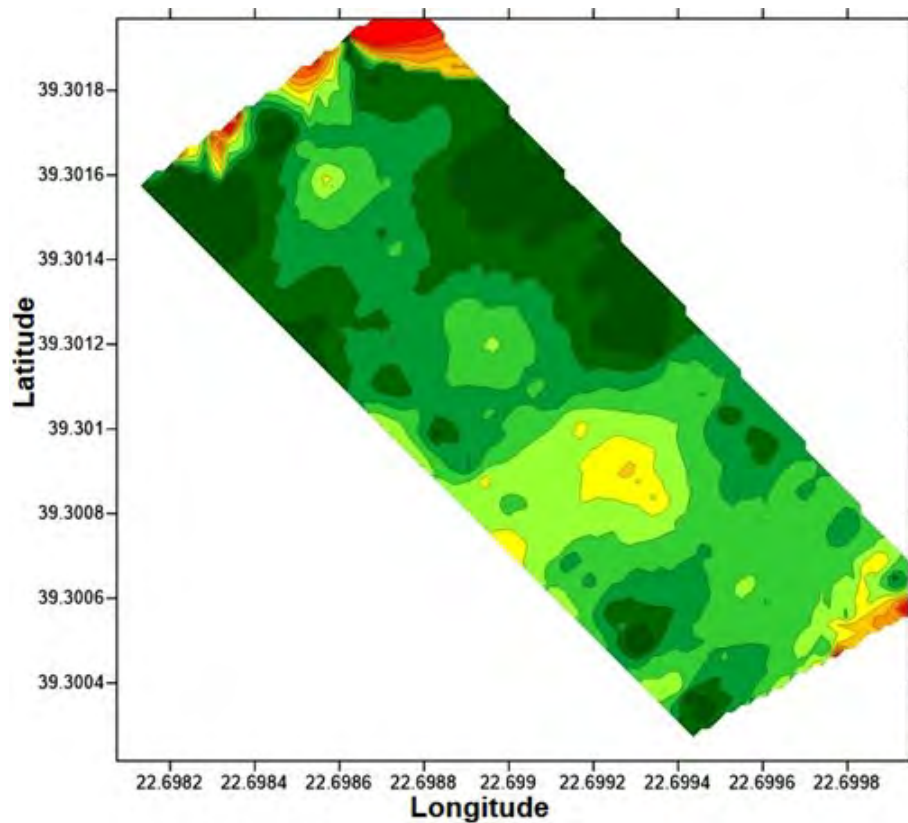
Σχήμα 4.15: Χάρτης παραγωγής του τεμαχίου 1 που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Σχήμα 4.16: Ο χρωματικός χάρτης που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία όλων των χαρτών.

Εξαγωγή του δείκτη βλάστησης με αφαίρεση χόματος και εξωγενών παραγόντων

Στην εξαγωγή των μετρήσεων αυτών, χρησιμοποιήθηκε η μάσκα του χόματος και των εξωγενών παραγόντων που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.3.2. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο δείκτης βλάστησης, μόνο από τις περιοχές των εικόνων που υπήρχε σίτος. Ο χάρτης που δημιουργήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.17.



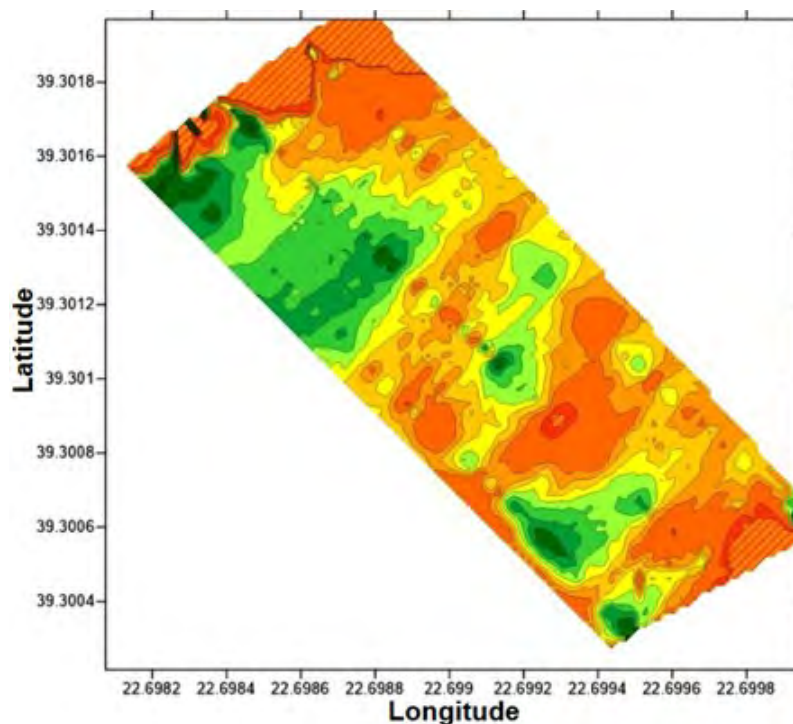
Σχήμα 4.17: Χάρτης από τις μετρήσεις των πολυφασματικών καμερών, με τη χρήση του αλγορίθμου από το κεφάλαιο 4.3.2.

Εξαγωγή του δείκτη βλάστησης μόνο με χρήση της Agrocarn

Σε αυτήν την προσπάθεια, χρησιμοποιήσαμε μόνο τις μετρήσεις από την μία κάμερα. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο δείκτης βλάστησης από το κανάλι Red της κάμερας, που αντιστοιχεί στο NIR φάσμα, και το κανάλι Blue. Ο δείκτης βλάστησης που υπολογίστηκε ονομάζεται Blue NDVI και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.4. Ο χάρτης που δημιουργήθηκε φαίνεται στην εικόνα 4.18.

Εξίσωση 4.4 Τύπος του δείκτη BlueNDVI.

$$BlueNDVI = \frac{(NIR - Blue)}{(NIR + Blue)}$$



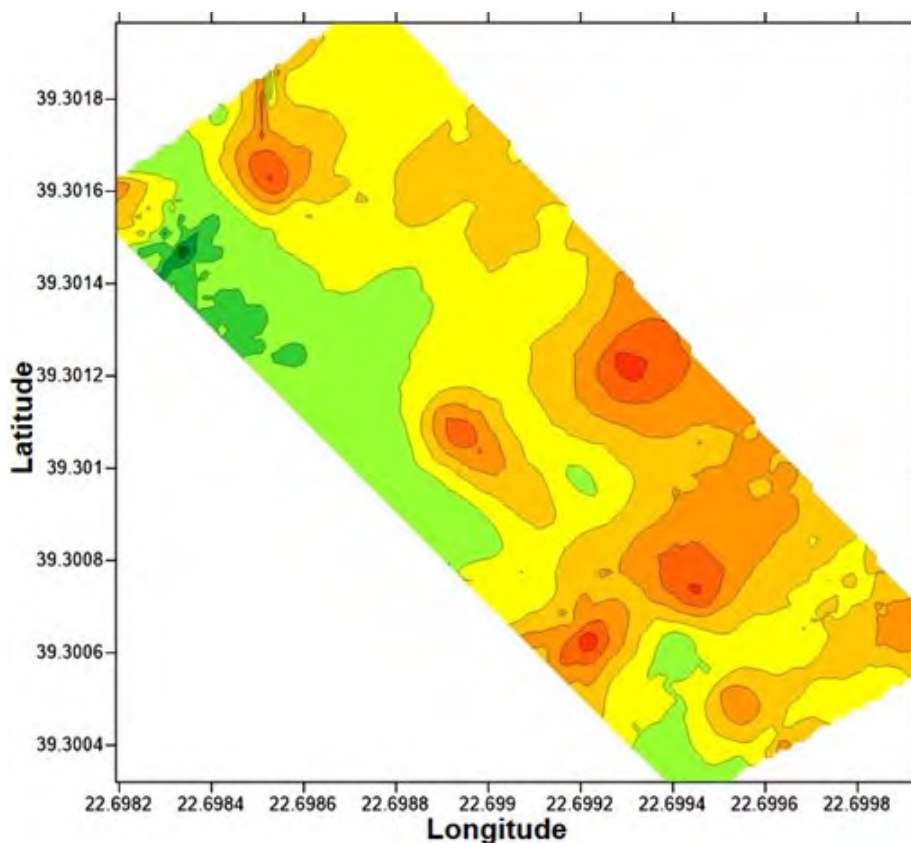
Σχήμα 4.18: Χάρτης από τις μετρήσεις μόνο της πολυφασματικής κάμερας Agrocarn.

Εξαγωγή του δείκτη βλάστησης με τη χρήση 2 καμερών

Στην εκδοχή αυτή, για την εξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις / εικόνες και των δύο καμερών (webcamera και agrocarn). Ο υπολογισμός του δείκτη NDVI έγινε σε συγκεκριμένο κομμάτι της εικόνας, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.3.1. Ο εξαγόμενος χάρτης από τις μετρήσεις αυτές εμφανίζεται στην εικόνα 4.19.

Αλγόριθμος Πυκνότητας Φυτείας

Το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας που υλοποιήθηκε, έχει τη δυνατότητα εξαγωγής δύο χαρακτηριστικών του αγρού: το πρώτο είναι ο δείκτης βλάστησης και το δεύτερο η πυκνότητα φυτείας του αγρού. Η εξαγωγή του χαρακτηριστικού της πυκνότητας φυτείας του αγρού, είναι πολύ σημαντική για τον αγρότη, αφού μπορεί πιο αποτελεσματικά να διαφοροποιήσει τις εισροές του. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του αγροτεμαχίου που μελετάμε, όπως φαίνεται και στο χάρτη 4.20, οι περιοχές του ρέματος (part3), αλλά και τα περιθώρια του αγροτεμαχίου (part1), έχουν τόσο χαμηλή πυκνότητα φυτείας, που η εισροή των συγκεκριμένων τμημάτων μπορεί να είναι οικονομικά ζημιογόνα για τον παραγωγό.

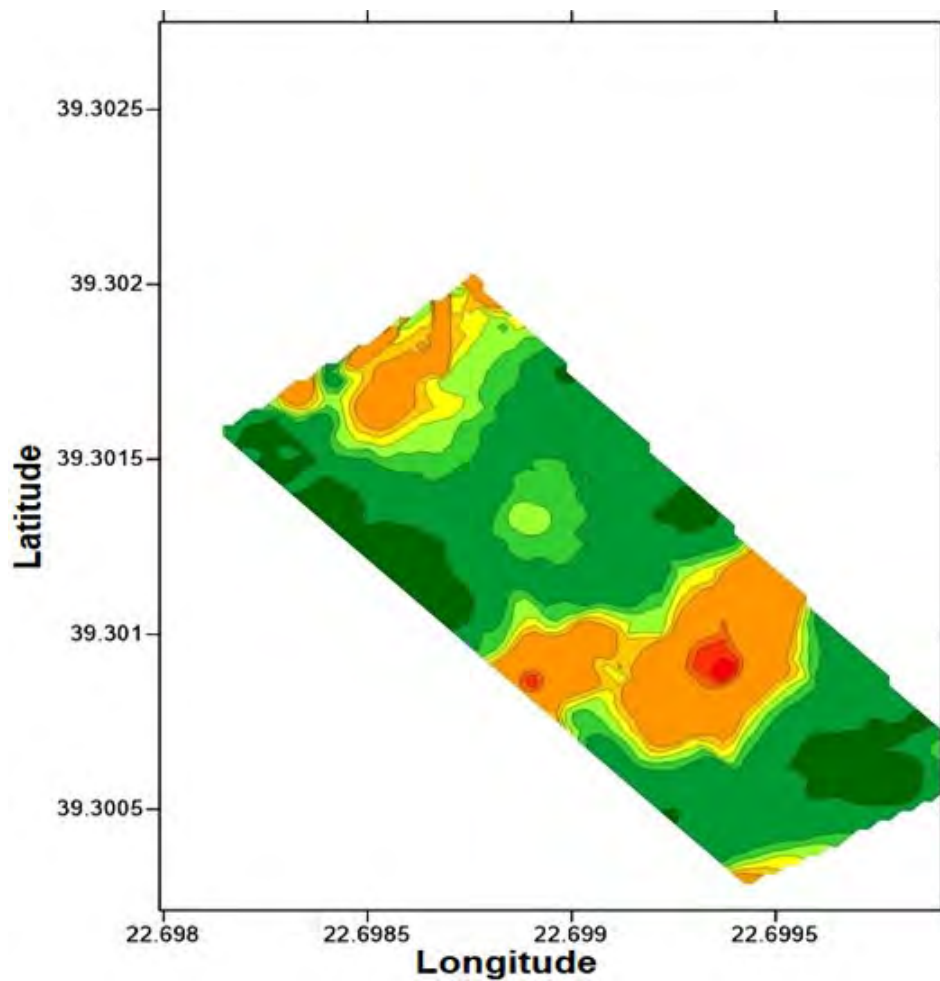


Σχήμα 4.19: Χάρτης από τις μετρήσεις των πολυφασματικών καμερών.

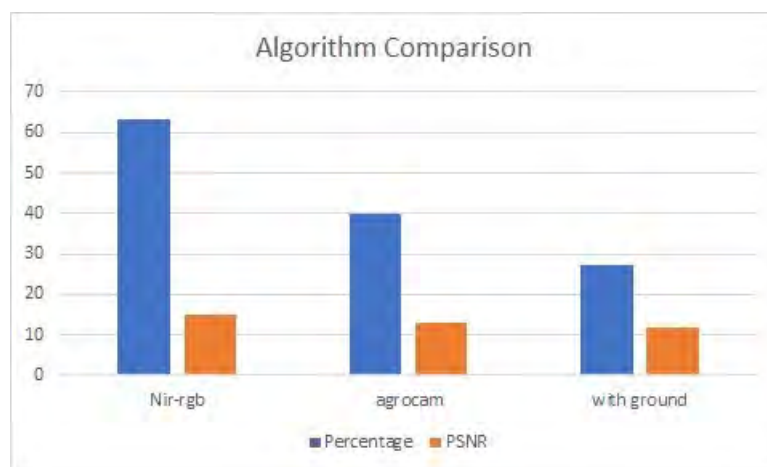
Συμπεράσματα

Από τα στατιστικά αποτελέσματα, είναι εμφανώς διακριτό, ότι μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας είχε η χρήση του λογισμικού που δεν αφαιρούσε τους εξωγενείς παράγοντες και το χρώμα από την μέτρηση του δείκτη. Το αποτέλεσμα, αυτό, ήταν αναμενόμενο, αφού ο δείκτης βλάστησης NDVI είναι δείκτης που εμπεριέχει την πυκνότητα φυτείας. Ταυτόχρονα, είναι φανερό ότι στην εξαγωγή δεδομένων μόνο από την Agrocarn, η ακρίβεια των μετρήσεων σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα είναι πολύ μικρή. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [12], αυτό ήταν επίσης ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, αφού υπολογίζεται ο δείκτης Blue NDVI, ένας δείκτης με πολύ χαμηλότερη ακρίβεια σε σχέση με το NDVI, λόγω της μικρής διακύμανσης των τιμών του, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.22. Τέλος, ο αλγόριθμος πυκνότητας φυτείας, φαίνεται να έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με την πραγματική εικόνα του αγρού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στην αρχιτεκτονική τοποθετήθηκε ο συνδυασμός των δύο καμερών και το τελικό λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων λήψης δεδομένων από τον αγρό, εμπεριέχει τον αλγόριθμο εξαγωγής θρέψης, χω-

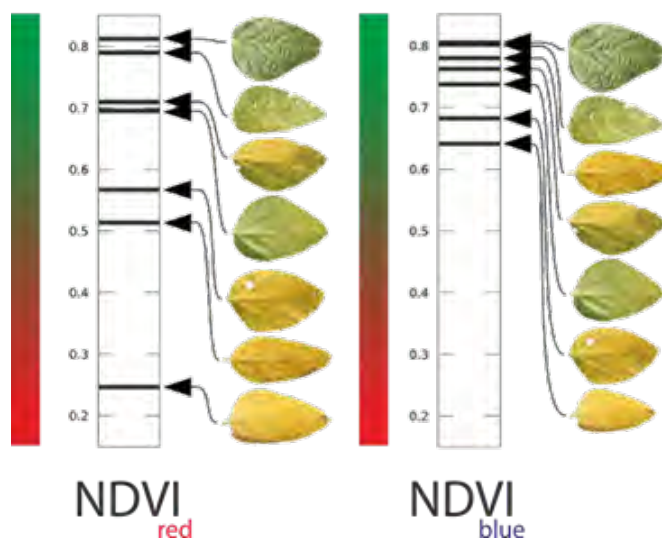


Σχήμα 4.20: Χάρτης από της μετρήσεις αναφορικά με την πυκνότητα φυτείας του αγρού.



Σχήμα 4.21: Στατιστικά στοιχεία από τη σύγκριση των διαφόρων προσεγγίσεων.

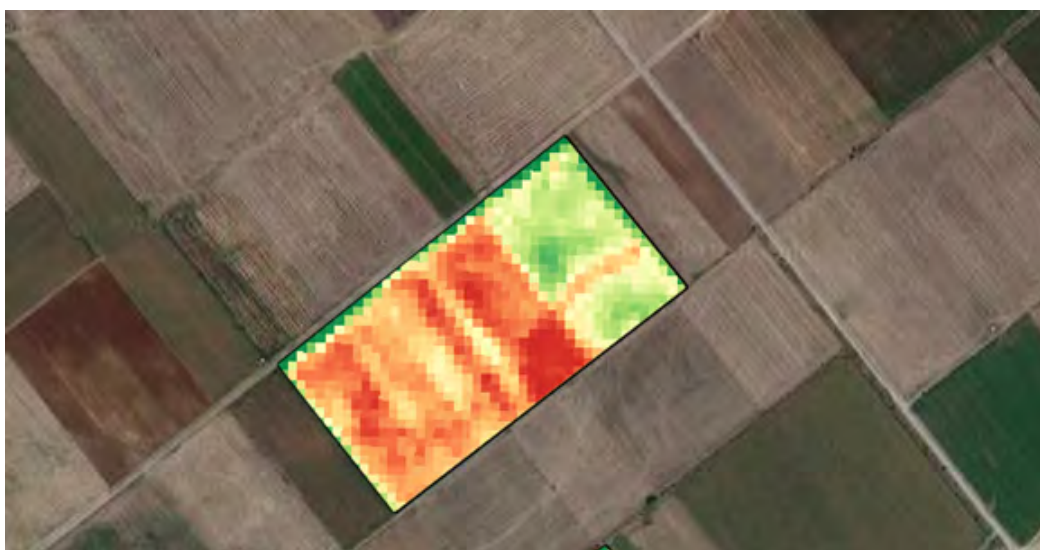
ρίς τη χρήση μάσκας χρώματος και εξωγενών παραγόντων και θα αποθηκεύει της μετρήσεις της πυκνότητα φυτείας, γιατί αποδεικνύονται πολύ χρήσιμες για τον παραγωγό αφού έχουν μεγάλη συσχέτιση με την πραγματική εικόνα του αγρού.



Σχήμα 4.22: Σύγκριση blueNDVI με redNDVI ([12])

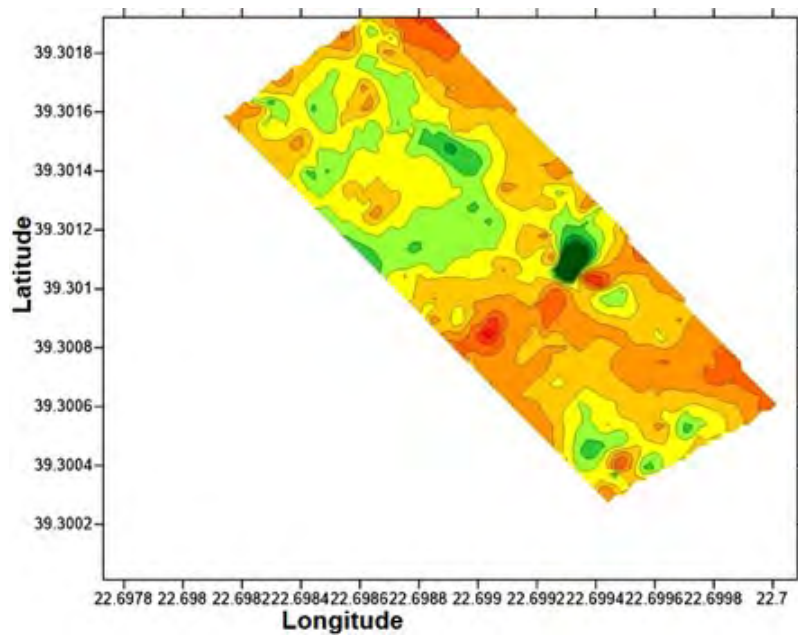
4.4.5 Αποτελέσματα και χάρτες όλων των μεθόδων

Για την σύγκριση της λήψης δεδομένων με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.4.3. Στην εικόνα 4.23 εμφανίζονται οι χάρτες από τις μετρήσεις του δορυφόρου Sentinel και στην εικόνα 4.24 από τις μετρήσεις του αισθητήρα Crop Circle, του συστήματος του drone 4.27, και τα στατιστικά τους αποτελέσματα σύμφωνα με το χάρτη παραγωγής 4.28.



Σχήμα 4.23: Στιγμιότυπο από το δορυφόρο Sentinel

Η εξαγωγή του χάρτη από τις μετρήσεις / εικόνες του drone, δεν έγινε με interpolation μέθοδο. Ο κύριος λόγος ήταν, όπως προαναφέρθηκε, ότι το αγροτεμάχιο ήταν μικρής έκτασης

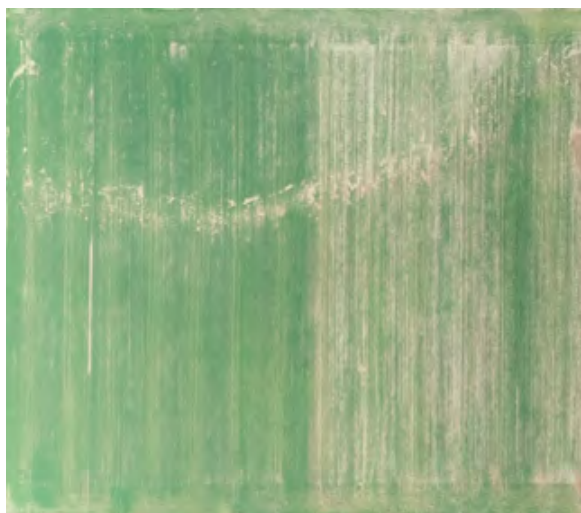


Σχήμα 4.24: Χάρτης θρέψης από τον crop circle

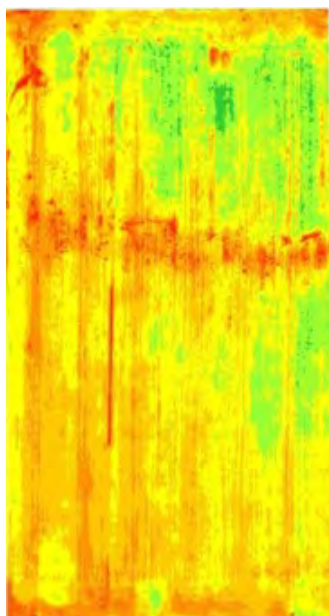
και οι κάμερες που ήταν τοποθετημένες στο drone είχαν στο οπτικό τους πεδίο όλο το τεμάχιο σε χαμηλό ύψος πτήσης για το drone, με αρκετά καλή ανάλυση για την εξαγωγή του δείκτη βλάστησης. Έτσι, αφού επιλέχθηκαν και από τις δύο κάμερες εικόνες που απεικονίζουν ολόκληρο το αγροτεμάχιο, όπως εμφανίζεται στις εικόνες 4.25 και 4.26, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.3.2. Έπειτα, υπολογίσαμε το δείκτη βλάστησης για κάθε στοιχείο της εικόνας (pixel), και το χρωματίσαμε σύμφωνα με την τιμή του και με τον χάρτη χρωμάτων των προηγούμενων χαρτών, το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4.27.



Σχήμα 4.25: Φωτογραφία όλου του αγροτεμαχίου, από την agrocams τοποθετημένη πάνω στο drone.



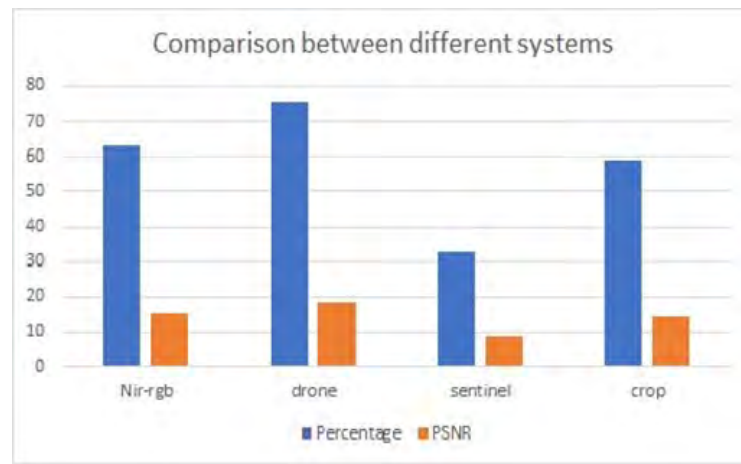
Σχήμα 4.26: Φωτογραφία όλου του αγροτεμαχίου, από την webcamera τοποθετημένη πάνω στο drone.



Σχήμα 4.27: Χάρτης δείκτη βλάστησης από το drone.

4.4.6 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, στο διάγραμμα 4.28, το ποσοστό επιτυχίας όλων των μέσων έχει αρκετά υψηλή ακρίβεια. Αυτές οι διακυμάνσεις των στατιστικών στοιχείων στα διάφορα μέσα ήταν αναμενόμενη. Πιο συγκεκριμένα, ο δορυφόρος Sentinel, που χαρακτηρίζεται από τη χαμηλή του ακρίβεια σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, φαίνεται να μην ανταποκρίνεται τόσο καλά. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας crop circle φαίνεται τρίτος σε απόδοση, αποτέλεσμα λογικό, αφού και αυτός με τη σειρά του έχει αρκετά μικρό οπτικό εύρος,



Σχήμα 4.28: Ποσοστό ομοιότητας των συστημάτων με το χάρτη παραγωγής.

σε σύγκριση με το μέγεθος τους αγροτεμαχίου.

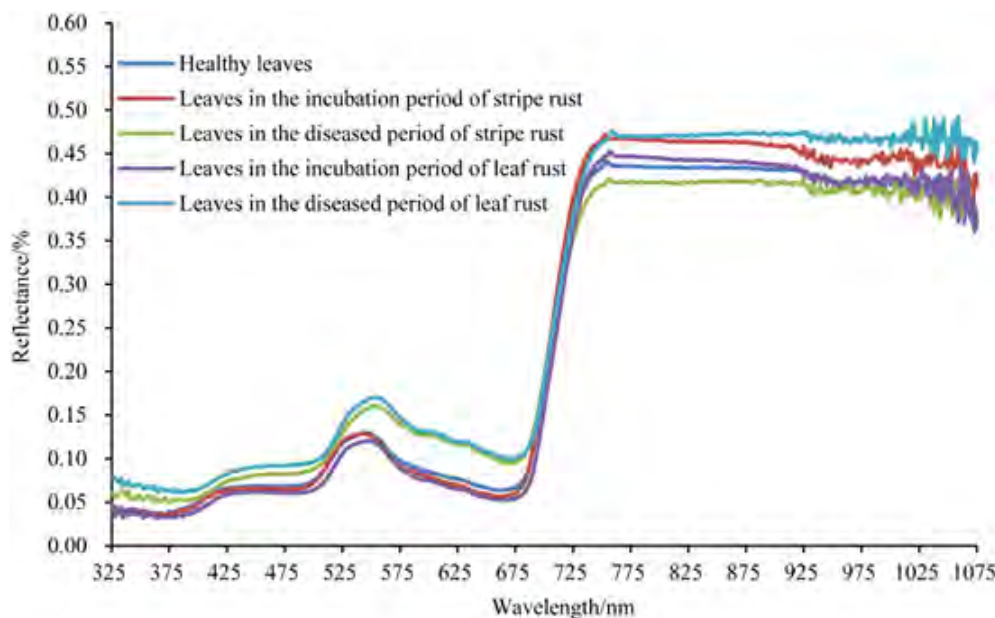
Τέλος, φαίνεται ότι το σύστημα που δημιουργήθηκε σε αυτήν την εργασία, αν και αρκετά αποτελεσματικό, δεν ξεπερνάει την απόδοση του drone. Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται στο τρόπο επεξεργασίας των εικόνων. Στο σύστημα της εργασίας παράγεται μία μέτρηση για κάθε μέτρο που διαπερνά ο γεωργικός ελκυστήρας, σε αντίθεση με το χάρτη που έχει παραχθεί για το drone, ο οποίος προέρχεται από την επεξεργασία pixel, ξεχωριστά (κάθε pixel από το drone είναι $0.032 \mu^2$). Συμπερασματικά, αν από το σύστημα παραγόταν ο χάρτης από πανόραμα φωτογραφιών το αποτέλεσμα θα είχε καλύτερη ακρίβεια, αφού λόγω της θέσης των καμερών στο γεωργικό ελκυστήρα, οι εικόνες έχουν πολύ καλύτερη ανάλυση / διακριτότητα σε σχέση με αυτή του drone.

4.5 Περαιτέρω βελτιστοποιήσεις (φίλτρα σε καλαμπόκι)

Κατά την ανάλυση της βιβλιογραφίας πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τον όρο φασματική υπογραφή των φυτών, [28, 29, 30]. Πρόκειται για μια καμπύλη που απεικονίζει το ποσοστό ανάκλασης της ακτινοβολίας για μήκη κύματος από 300-2500 nm και είναι μοναδική για κάθε φυτό, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.29. Σε περίπτωση έλλειψης αζώτου ή άλλων προβλημάτων καταπόνησης του φυτού (αυτό που οι γεωπόνοι αποκαλούν στρες), η συγκεκριμένη καμπύλη εμφανίζει απότομες βυθίσεις ή κορυφές σε συγκεκριμένα μήκη κύματος που διαφέρουν από καλλιέργεια σε καλλιέργεια. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η καμπύλη του σίτου και του καλαμποκιού είναι παρόμοιες, αυτός είναι και ένας από τους λόγους που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη φυτεία για την εκτέλεση των πειραματικών, που αναφέρονται

στη συνέχεια.

Δυστυχώς, οι εμπορικές κάμερες / αισθητήρες έρχονται με ένα προεπιλεγμένο σερ φίλτρων, που διαβάζουν συνήθως ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων του φάσματος. Θέλοντας να αυξήσουμε την ακρίβεια της μέτρησης, προσθέσαμε κάποια φίλτρα στην κάμερα για να περιορίσουμε το φάσμα που μετρά.



Σχήμα 4.29: Φασματική υπογραφή φύλλων σίτου [13].

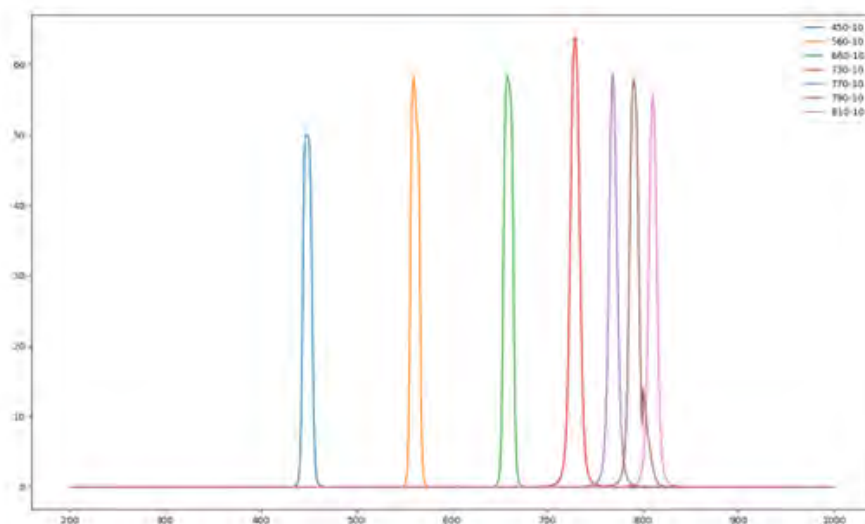
Με σκοπό, να επιλεγούν τα οπτικά φίλτρα, τα οποία θα βοηθήσουν στην περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση των πληροφοριών, αποφασίσαμε να ανατρέξουμε σε δεδομένα και πειραματικές μελέτες, που έχουν καταγραφεί στη σχετική βιβλιογραφία [31, 13]. Μετά την απαραίτητη έρευνα, βρήκαμε ενδιαφέρον τα ακόλουθα τμήματα του φάσματος: 450nm, 560nm, 660nm, 730nm, 770nm, 790nm, 810nm. Τα συγκεκριμένα τμήματα, επιλέχθηκαν με επιπρόσθετο γνώμονα τη φασματική απόκριση της κάμερας. Στον πίνακα 4.3 και στο διάγραμμα 4.30 εμφανίζεται η φασματική απόκριση των φίλτρων που επιλέχθηκαν.

4.5.1 Πειραματικά

Για να επιβεβαιώσουμε πειραματικά τα συμπεράσματά μας με τη χρήση των φίλτρων, θελήσαμε να χρησιμοποιήσουμε το σύστημα που υλοποιήθηκε σε πραγματικές συνθήκες, με μόνη διαφορά την προσθήκη των φίλτρων αυτών. Λόγω εποχικότητας, όμως, δεν υπήρχαν φυτείες σίτου όταν πραγματοποιήθηκε η έρευνα αυτή. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκαν φυτείες καλαμποκιού. Για να εκτιμηθεί αποκλειστικά, η συνεισφορά των φίλτρων αυτών

Bandwidth	Center Wavelength	Sensitivity
(440-460) nm	450 nm	50%
(550-570) nm	560 nm	57%
(650-670) nm	660 nm	57%
(720-740) nm	730 nm	65%
(760-780) nm	770 nm	58%
(780-800) nm	790 nm	73%
(800-820) nm	810 nm	55%

Πίνακας 4.3: Πίνακας με τα επιλεγμένα φίλτρα από την εταιρεία Thorlabs.



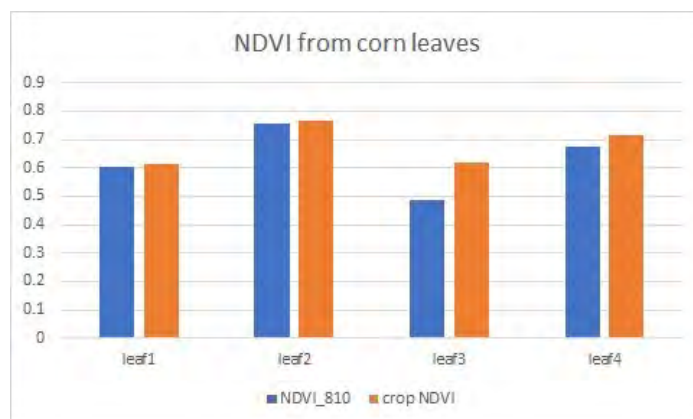
Σχήμα 4.30: Φασματική απόκριση των φίλτρων.

στη μέτρηση, επιλέξαμε να αφαιρέσουμε οποιονδήποτε άλλο παράγοντα που θα την επηρέαζε, όπως διαφορά σε ηλιοφάνεια και άλλους εξωγενείς παράγοντες όπως σκιές ή χρώμα. Σε σταθερές συνθήκες έγινε διαλογή με εικόνες από φύλλα καλαμποκιού υγιή και μη. Τα τοποθετήσαμε πάνω σε μια σταθερή επιφάνεια, έπειτα μετρήσαμε με το όργανο Crop Circle τη φασματική τους απόκριση και στη συνέχεια τα βγάλαμε φωτογραφία με τις κάμερες. Στην επεξεργασία της εικόνας, επιλέξαμε χειροκίνητα να μετρήσουμε την υγεία μόνο του φύλλου από όλες τις διαφορετικές φωτογραφίες των φίλτρων. Στη συνέχεια, υπολογίσαμε τους δείκτες, NDVI, και GreenDVI, όπως αναφέρεται στην εξίσωση 4.5. Πιο συγκεκριμένα, ο κάθε δείκτης υπολογίστηκε για 2 διαφορετικές μπάντες του NIR φάσματος, δηλαδή υπολογίστηκε

NDVI και GDVI με NIR=730nm και NIR=810nm.

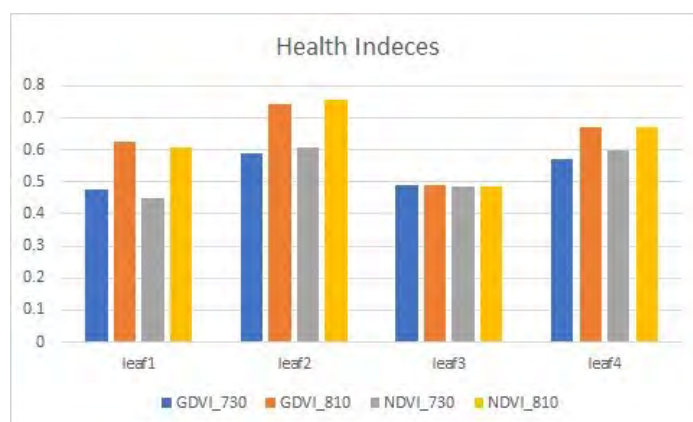
Εξίσωση 4.5 Τύπος του δείκτη GreenDVI.

$$GDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$$



Σχήμα 4.31: Σύγκριση του δείκτη NDVI από τον αισθητήρα Crop Circle και από το δικό μας σύστημα, σε φύλλα καλαμποκιού διαφορετικής υγείας.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Crop Circle. Για να μπορέσει να γίνει με επιτυχία η σύγκριση αυτή υπολογίστηκε ο δείκτης βλάστησης NDVI από την κάμερα, με τη χρήση του φάσματος NIR=810nm. Στο διάγραμμα 4.31 εποπτικά φαίνεται ότι τα δύο συστήματα έχουν κοινή απόκριση. Πιο συγκεκριμένα, μετά από στατιστική ανάλυση φαίνεται το σφάλμα MSRE είναι ίσο με 0.05. Δεδομένου λοιπόν ότι ο δείκτης NDVI έχει εύρος από -1 έως 1, το σφάλμα αυτό θεωρείται αποδεκτό.



Σχήμα 4.32: Εμφάνιση διαφορετικών δεικτών για κάθε φύλλο καλαμποκιού.

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια για εξαγωγή διαφορετικών δεικτών, ώστε να εκτιμηθεί

ποιος από τους δείκτες αυτούς έχει την καλύτερη απόκριση και ακρίβεια στη θρέψη του καλαμποκιού. Η πρώτη εκτίμηση έγινε πάλι με τη δοκιμή σε φύλλα διαφορετικής υγείας. Στο σχήμα 4.32, ο δείκτης GDVI με NIR=810nm, φαίνεται να έχει το μεγαλύτερο εύρος τιμών σε σχέση με τους άλλους δείκτες. Το συμπέρασμα αυτό είναι μια πρωταρχική εκτίμηση, και θα πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω.

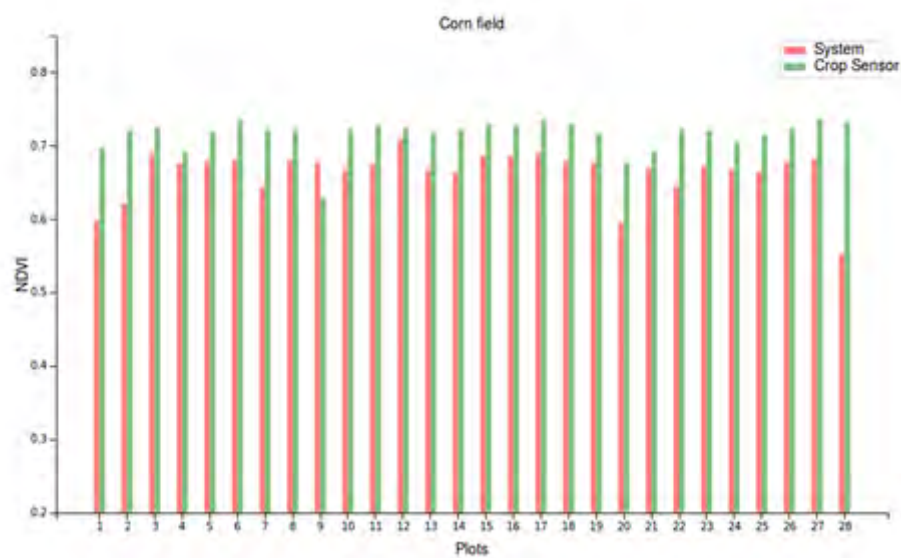
Πιλοτικό σε αγρό

Στη συνέχεια, για να χρησιμοποιήσουμε το σύστημα σε κανονική λειτουργία, εκτελέσαμε κάποια πειράματα σε μικρή έκταση αγρού με φυτεία καλαμποκιού, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 4.33. Ο συγκεκριμένος αγρός είχε χωριστεί σε 24 τεμάχια, εκ των οποίων το καθένα είχε υποστεί διαφορετική μεταχείριση, οπότε ο σκοπός του πειράματος ήταν να εξαχθεί μία μέτρηση σε καθένα από αυτά τα τεμάχια τόσο με το σύστημα μας, όσο και με τον Crop Circle για να συγκριθούν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.33: Πιλοτικό αγροτεμάχιο φυτείας καλαμποκιού.

Με βάση τα παραπάνω πειράματα που διεξήχθησαν, επιβεβαιώσαμε ότι τα αποτελέσματα τα οποία λάβαμε παρουσίαζαν αρκετή ομοιότητα με τα αποτελέσματα, τα οποία είχαμε λάβει από τη χρήση του Crop Circle, όπως εμφανίζεται στο διάγραμμα 4.34. Πιο συγκεκριμένα, η κλίμακα των 2 φαίνεται διαφορετική αλλά ακολουθούν την ίδια καμπύλη. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από το root-mean-square error (RMSE), το οποίο είναι 0.045, που σε σύγκριση με το εύρος του NDVI (-1,1), είναι αποδεκτή απόκλιση.



Σχήμα 4.34: NDVI μετρήσεις από το λογισμικό που αναπτύχθηκε και από το σημειακό σένσορα Crop Circle.

Κεφάλαιο 5

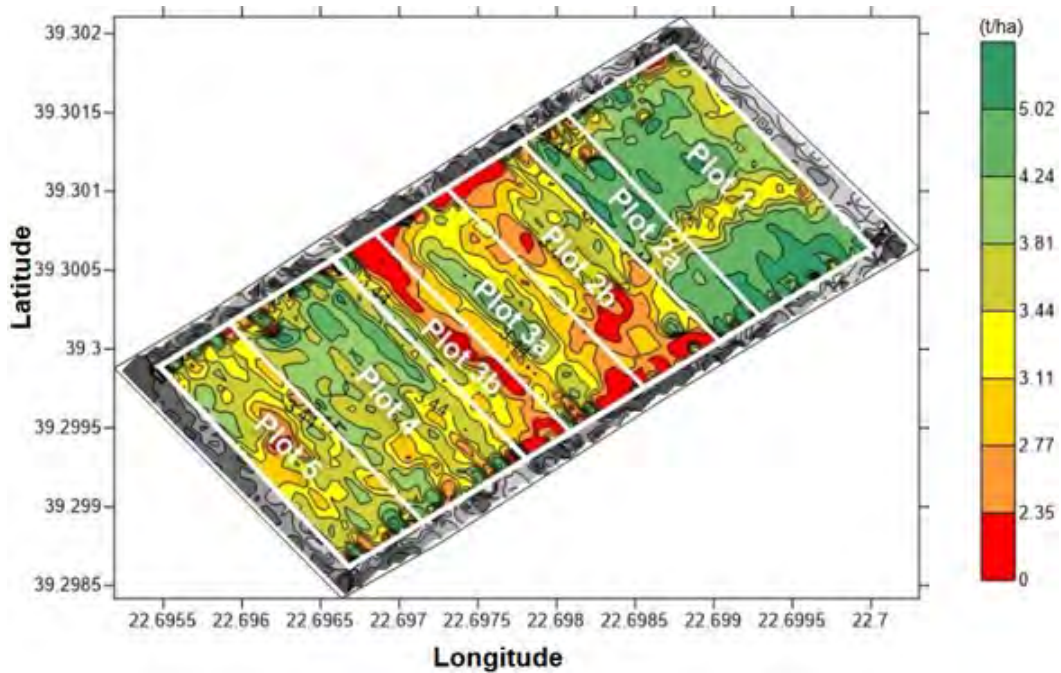
Επικύρωση του συστήματος πολυφασματικών καμερών

Στα πλαίσια επικύρωσης της υλοποίησης αυτής, εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση σε αγρό 80 στρεμμάτων στο Περίβλεπτο Μαγνησίας. Στο πείραμα αυτό, χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μέθοδοι που αναλύθηκαν και περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1 Σχεδιασμός πειράματος

Χωρίστηκε ο αγρός σε 7 τεμάχια, που σε κάθε τεμάχιο εφαρμόστηκαν διαφορετικές τεχνικές καλλιέργειας, όπως φαίνεται στον χάρτη 5.1. Οι διαφορές στις τεχνικές εστιάζουν στον τρόπο κατεργασίας του εδάφους, δεύτερον στις αμειψισπορές και τρίτον στον τρόπο εφαρμογής του λιπάσματος. Για την ανάλυσή μας θα επικεντρωθούμε στα τεμάχια 1, 2a, 2b και 3a.

Η διαφοροποιημένη λίπανση εφαρμόστηκε σε 2 τεμάχια, πιο συγκεκριμένα στα τεμάχια 1 και 3a όπως φαίνεται στην εικόνα. Η διαφορετική παράμετρος των δύο αυτών τεμαχίων ήταν η προηγούμενη καλλιέργεια. Συγκεκριμένα, στο τεμάχιο 1 η προηγούμενη καλλιέργεια ήταν το φασόλι. Το φασόλι έχει την ιδιότητα μέσω αζωτοβακτηρίων που υπάρχουν στη ρίζα του να μετατρέπει το άζωτο που υπάρχει στην ατμόσφαιρα σε τέτοια μορφή που μπορούν να εκμεταλλευτούν τα φυτά. Είναι γνωστό στη γεωπονική επιστήμη, ([32]) ότι η καλλιέργεια ψυχανθών φυτών, όπως το φασόλι, εφοδιάζει το χώμα με επαρκείς ποσότητες αζώτου που μπορεί να εκμεταλλευτεί η καλλιέργεια της επόμενης χρονιάς. Συνεπώς, το τεμάχιο 1, σε αντίθεση με το τεμάχιο 3a είχε μειωμένες ανάγκες σε άζωτο. Χρησιμοποιήσαμε τα 2 αυτά



Σχήμα 5.1: Επισκόπηση πειραματικού αγρού και τμηματοποίηση. Απεικονίζεται επίσης η παραγωγή που μετρήθηκε κατά τη συγκομιδή.

τεμάχια ως το πρώτο σημείο σύγκρισης των αλγορίθμων μας, με παράγοντα διαφοροποίησης την αμειψισπορά. Έπειτα, χρησιμοποιήσαμε το τεμάχιο 2b, στο οποίο εφαρμόστηκε παραδοσιακή λίπανση και η προηγούμενη καλλιέργεια ήταν καλαμπόκι, και πάλι το τεμάχιο 3a, ως δεύτερο σημείο σύγκρισης, με παράγοντα διαφοροποίησης αυτή τη φορά τη λίπανση (σταθερή/διαφοροποιημένη).

Στον πίνακα 5.1, αναλύονται τα τεμάχια (plot), από τις προηγούμενες καλλιέργειες και τον τρόπο λίπανσης που ακολουθήθηκε στο καθένα.

5.2 Σύστημα Λογισμικού

Το τελικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, περιείχε τους αλγορίθμους που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα:

- Χρησιμοποιούσε σαν είσοδο τις εικόνες από τις δύο κάμερες, οι οποίες ήταν τοποθετημένες πάνω στην καμπίνα του γεωργικού ελκυστήρα, και δεδομένα από το ταχύμετρο.
- Γινόταν εφαρμογή του αλγορίθμου overlay (ενότητα 4.3), δηλαδή εφαρμόζοταν στις εικόνες ο πίνακας μετατροπής, ώστε αντίστοιχα pixels στις δύο εικόνες να αντιστοιχούν

Plot ID	Έκταση (ha)	Προηγούμενη Καλλιέργεια	Μέθοδος Λίπανσης
Plot 1	1.31	Φασόλι	Διαφορική
Plot 2a	0.47	Φασόλι	Παραδοσιακή
Plot 2b	0.87	Καλαμπόκι	Παραδοσιακή
Plot 3a	0.86	Καλαμπόκι	Διαφορική
Plot 3b	0.47	Καλαμπόκι	Μηδενική
Plot 4	1.22	Καλαμπόκι	Παραδοσιακή
Plot 5	0.82	Καλαμπόκι	Παραδοσιακή

Πίνακας 5.1: Πίνακας πιλοτικών αγροτεμαχίων.

σε ίδια πραγματική θέση στο αγροτεμάχιο. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος που αντιστοιχεί κάθε εικόνα και κάθε pixel με μέτρα σε πραγματικό χώρο (Αντιστοίχιση πραγματικού χώρου με pixel, Αντιστοίχιση εικόνων με πραγματικό χώρο (ενότητα 4.3.1)).

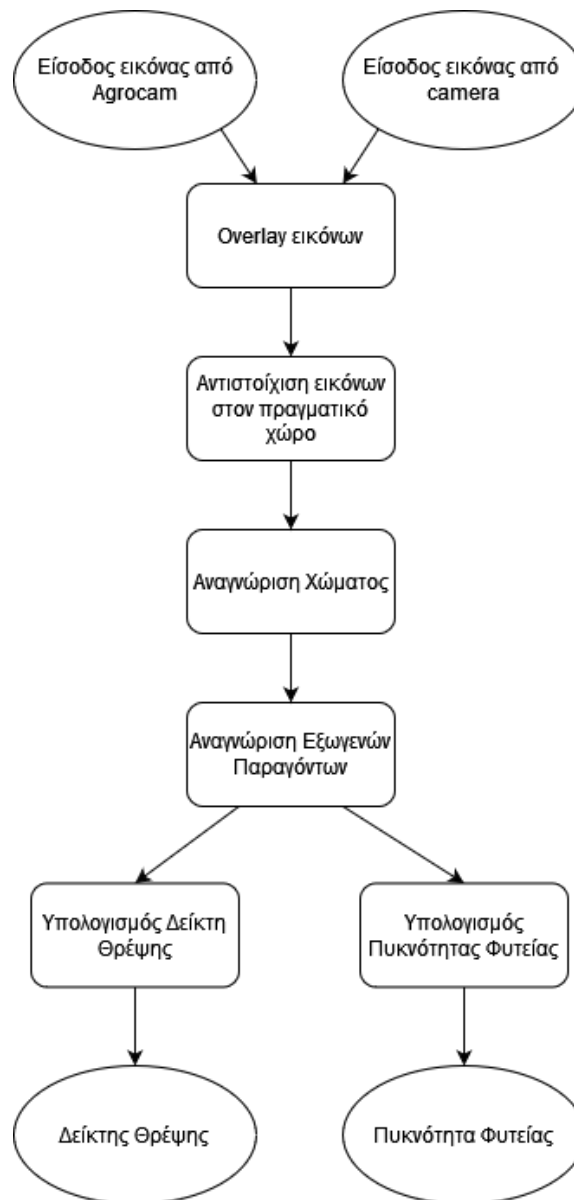
- Τέλος, εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι αναγνώρισης χρώματος και εξωγενών παραγόντων (ενότητα 4.3.2), ώστε να γίνει ο υπολογισμός δείκτη βλάστησης και πυκνότητας φυτείας (ενότητα 4.3.1).
- Τα αποτελέσματα των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν, δόθηκαν σαν είσοδος στο λογισμικό της εταιρείας Augmenta, για να εφαρμοστεί διαφοροποιημένη λίπανση.

5.2.1 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Η συγκομιδή έγινε στις 10/6/2018 με μια θεριζοαλωνιστική μηχανή (τύπος John Deere S660i). Η παραγωγή μετρήθηκε με δύο τρόπους

- Με ζύγιση της παραγωγής από κάθε τεμάχιο ξεχωριστά. Κατά τη συγκομιδή, η παραγωγή από τα τεμάχια φορτώθηκε σε ξεχωριστά φορτία και ζυγίστηκε χωριστά.
- Από στοιχεία χαρτογράφησης της παραγωγής που λήφθηκαν από την θεριζοαλωνιστική μηχανή.

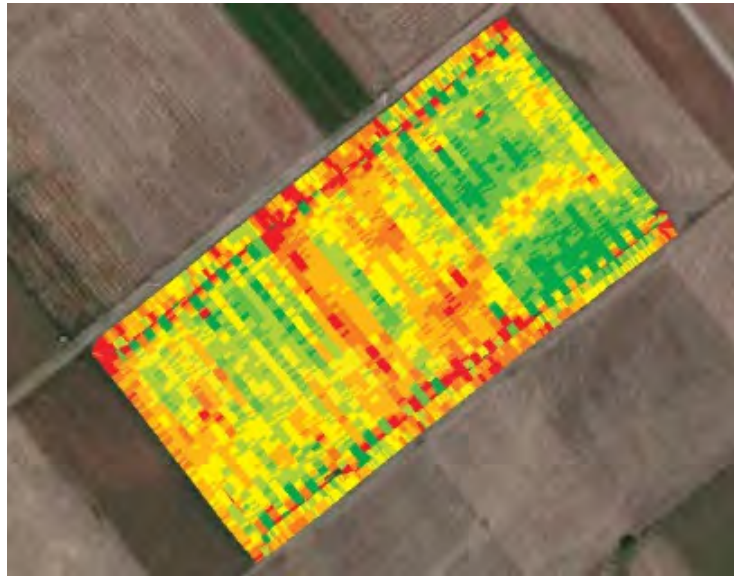
Πριν από τη συγκομιδή των κυρίως τεμαχίων, έγινε αλωνισμός της περιμετρικής έκτασης του αγρού με δύο περιμετρικά περάσματα της μηχανής (συνολικό πλάτος 12,5m). Ο σπόρος αυτός δεν λήφθηκε υπόψη στην εκτίμηση της παραγωγής.



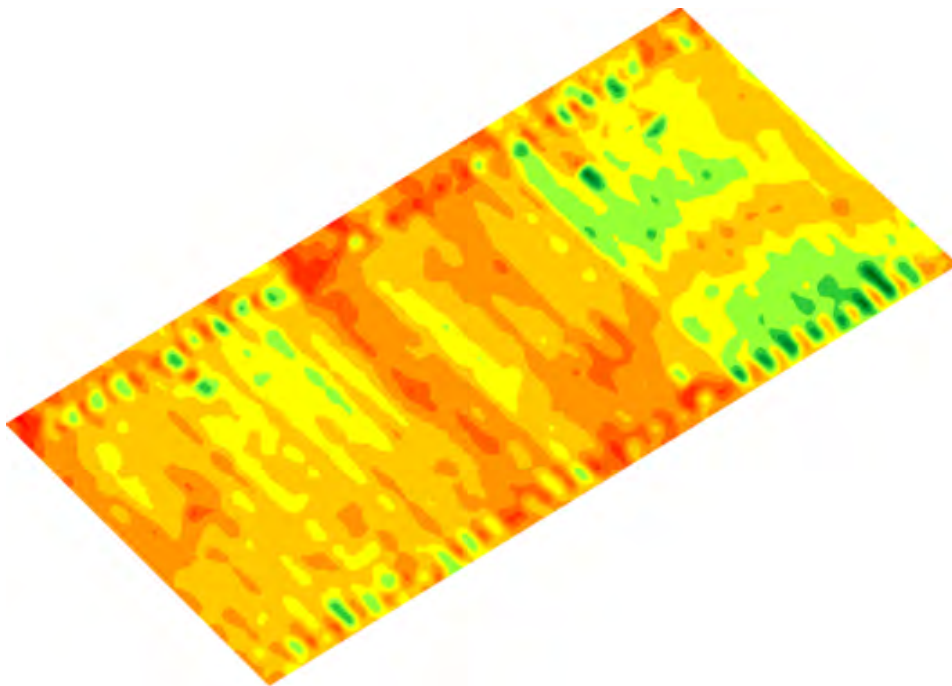
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση συστήματος λογισμικού.

Μετά από interpolation των δεδομένων (με τον δικό μας αλγόριθμο) προέκυψε ένα κανονικό πλέγμα στοιχείων (grid), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του χάρτη παραγωγής, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 5.4. Στο χάρτη αυτό έγινε περικοπή των περιθωρίων που αλώνισε η μηχανή πριν εισέλθει στα πειραματικά τεμάχια και υπολογίστηκε η μέση παραγωγή. Η παραγωγή εκτός των περιθωρίων ήταν αυτή που ζυγίστηκε και με τα φορτηγά.

Η μέση παραγωγή που καταγράφηκε από τη θεριζοαλωνιστική, παρουσιάζει απόκλιση με τη μέση παραγωγή που ζυγίστηκε στα φορτηγά, γεγονός που προφανώς σχετίζεται με σφάλμα στη βαθμονόμηση του συστήματος χαρτογράφησης της παραγωγής της θεριζοαλωνιστικής. Για να διορθωθεί το σφάλμα υπολογίστηκε ο λόγος της παραγωγής από τα φορτηγά προς τη



Σχήμα 5.3: Σημειακή απεικόνιση της παραγωγής όπως αποδίδεται από το λογισμικό της εταιρείας John Deere.



Σχήμα 5.4: Σημειακή απεικόνιση της παραγωγής όπως αποδίδεται από τον αλγόριθμο interpolation που αναπτύξαμε, αναλύοντας τα πρωτογενή δεδομένα.

παραγωγή από τη θεριζοαλωνιστική, όπως εμφανίζεται στην εξίσωση 5.1.

Όπου:

- Z : Μέση παραγωγή με ζύγιση.

Εξίσωση 5.1 Υπολογισμός του λόγου παραγωγής.

$$\frac{Z(\frac{t}{ha})}{X(\frac{t}{ha})} = \frac{3.57}{3.38} = 1.061$$

	N	Mean	Std. Dev.	Std. Error
Plot 1	556	4.2588	0.91367	0.03875
Plot 2a	2215	4.3650	0.99557	0.06790
Plot 2b	375	2.9162	0.70216	0.03626
Plot 3a	373	3.1627	0.72903	0.03775

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα της One-Way Anova ανάλυσης για τις 7 μεταχειρίσεις. (a)

- X : Μέση παραγωγή με χαρτογράφηση.

Στη συνέχεια, τα αρχικά στοιχεία της παραγωγής της θεριζοαλωνιστικής διορθώθηκαν πολλαπλασιάζοντας με το πηλίκο 1,061. Κατ' αυτό τον τρόπο, η νέα κλίμακα που προέκυψε με τη χαρτογράφηση, αντιπροσωπεύει την πραγματική παραγωγή στον αγρό, όπως εμφανίζονται στην εικόνα 5.1. Ο χάρτης επίσης χωρίστηκε σε επτά τεμάχια με βάση τις συντεταγμένες των πραγματικών ορίων στον αγρό. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τα αγροτεμάχια που μελετάμε φαίνεται επίσης στους πίνακες 5.2, 5.3.

Για τη σύγκριση των τεμαχίων και εξαγωγή συμπερασμάτων θα πρέπει να τηρηθούν όλες οι παράμετροι κοινές και να μελετηθεί η επίδραση της λίπανσης. Δεν είναι σωστό να συγκριθούν ως προς τη λίπανση δύο τεμάχια στα οποία έχει γίνει διαφορετική κατεργασία εδάφους για παράδειγμα.

	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
	Lower Bound	Upper Bound		
Plot 1	4.1827	4.3349	0.62	7.61
Plot 2a	4.2311	4.4988	0.58	7.52
Plot 2b	2.8449	2.9875	0.46	5.45
Plot 3a	3.0885	3.2370	0.59	5.37

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα της One-Way Anova ανάλυσης για τις 7 μεταχειρίσεις. (b)

Τιμή λιπάσματος (ανά kg)	0.70€
Τιμή πώλησης σίτου (ανά kg)	0.22€

Πίνακας 5.4: Οικονομικά στοιχεία αγοράς ανά κιλό.

	Τεμάχιο 1	Τεμάχιο 2a
Λίπασμα ανά στρ (kg)	16	25
Κόστος Λίπανσης (€)	11.2	17.5
Παραγωγή ανά στρ (kg)	426	437
Κέρδος Πώλησης Προϊόντος	93.72	96.14
Συνολικό Κέρδος	82.52	78.64

Πίνακας 5.5: Σύνοψη στοιχείων εφαρμογής και οικονομικών στοιχείων.

Σύγκριση 1 - Τεμάχιο 1 και Τεμάχιο 2a

Και τα 2 αυτά τεμάχια είχαν ως προηγούμενη καλλιέργεια το φασόλι το οποίο εφοδίασε το έδαφος με επαρκείς ποσότητες αζώτου. Στο τεμάχιο 1 εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση με μέσο όρο λιπάσματος τα 16 κιλά ανά στρέμμα όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή αλλά φυσικά διαφορετική κατανομή από σημείο σε σημείο, ενώ στο τεμάχιο 2a εφαρμόστηκε σταθερή δόση λίπανσης με 25 κιλά το στρέμμα ίδιου λιπάσματος όπως συμβούλεψε ο συνεργαζόμενος με τον παραγωγό γεωπόνος.

Από τα στοιχεία, που καταγράφονται στους πίνακες 5.4, 5.5, 5.6, γίνεται εμφανής η ευνοϊκή επίδραση της διαφοροποιημένης λίπανσης αν συνυπολογίσουμε όλους τους παράγοντες (παραγωγή νωπού προϊόντος, λίπασμα που χρησιμοποιήθηκε). Το σύστημα των καμερών μπόρεσε επιτυχώς να αναγνωρίσει την πολύ καλή κατάσταση της φυτείας που είχε δημιουργηθεί λόγω της αμειψισποράς με φασόλι και έδωσε εντολή να εφαρμοστεί λιγότερο λίπασμα σε αντίθεση με τον γεωπόνο, που έδωσε μια γενική συνταγή για όλα τα τεμάχια του αγρού, χωρίς να λαμβάνει υπόψη του επιπλέον παραμέτρους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να εξοικονομήσουμε 36% λιπάσματος ή αλλιώς 6.3 Ευρώ/στρέμμα. Από άποψη παραγωγής το

Ποσοστό Κέρδους	4.93387589%
Ποσοστό παραγωγής	-2.517162471%

Πίνακας 5.6: Ποσοστιαία Αποτελέσματα Οικονομικών στοιχείων.

	Τεμάχιο 3a	Τεμάχιο 2b
Λίπασμα ανά στρ (kg)	27	25
Κόστος Λίπανσης (€)	18.9	17.5
Παραγωγή ανά στρ (kg)	316	292
Κέρδος Πώλησης Προϊόντος	69.52	64.24
Συνολικό Κέρδος	50.62	46.74

Πίνακας 5.7: Σύνοψη στοιχείων εφαρμογής και οικονομικών στοιχείων.

Ποσοστό Κέρδους	8.301240907%
Ποσοστό παραγωγής	8.219178082%

Πίνακας 5.8: Ποσοστιαία Αποτελέσματα Οικονομικών στοιχείων.

τεμάχιο 2a πέτυχε λίγο μεγαλύτερη παραγωγή (2,5%) αλλά χωρίς αυτό να μπορεί να υπερκαλύψει το οικονομικό όφελος από την εξοικονόμηση λιπάσματος. Για μια ενδεικτική τιμή πώλησης σίτου 0,22 Ευρώ/ στρέμμα, το συνολικό κέρδος στο τεμάχιο 1 ήταν 82,52 Ευρώ ενώ στο τεμάχιο 2a ήταν 78,64 Ευρώ, κατά περίπου 5% δηλαδή λιγότερο.

Σύγκριση 2 - Τεμάχιο 3a και Τεμάχιο 2b

Και τα 2 αυτά τεμάχια είχαν ως προηγούμενη καλλιέργεια το καλαμπόκι, μια απαιτητική σε άζωτο καλλιέργεια. Στο τεμάχιο 3a εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση με μέσο όρο λιπάσματος τα 27 κιλά ανά στρέμμα όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή αλλά φυσικά διαφορετική κατανομή από σημείο σε σημείο, ενώ στο τεμάχιο 2b εφαρμόστηκε σταθερή δόση λίπανσης με 25 κιλά το στρέμμα ίδιου λιπάσματος όπως συμβούλεψε ο συνεργαζόμενος με τον παραγωγό γεωπόνος.

Από τα στοιχεία, που καταγράφονται στους πίνακες 5.4, 5.7, 5.8, γίνεται εμφανής η ευνοϊκή επίδραση της διαφοροποιημένης λίπανσης αν συνυπολογίσουμε όλους τους παράγοντες (παραγωγή νωπού προϊόντος, λίπασμα που χρησιμοποιήθηκε). Το σύστημα των καμερών μπόρεσε επιτυχώς να αναγνωρίσει την αυξημένη ανάγκη για άζωτο της φυτείας που είχε δημιουργηθεί λόγω της αμειψισποράς με καλαμπόκι και έδωσε εντολή να εφαρμοστεί περισσότερο λίπασμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να εφαρμοστεί 8% περισσότερο λίπασμα ή αλλιώς επιβάρυνση 1.5 Ευρώ/στρέμμα. Από άποψη παραγωγής το τεμάχιο 3a πέτυχε σαφώς μεγαλύτερη παραγωγή (8.2%) υπερκαλύπτοντας την οικονομική επιβάρυνση από την

αυξημένη δόση εφαρμογής λιπάσματος. Για μια ενδεικτική τιμή πώλησης σίτου 0,22 ευρώ/στρέμμα, το συνολικό κέρδος στο τεμάχιο 3α ήταν 50,62 ευρώ ενώ στο τεμάχιο 2β ήταν 46,74 ευρώ, κατά περίπου 8.3% αυξημένο προς όφελος του παραγωγού.

Κεφάλαιο 6

Αλγόριθμος οπτικοποίησης

Για την ανάλυση και την οπτικοποίηση των δεδομένων αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GIS Surfer [25]. Το συγκεκριμένο λογισμικό, αν και καλύπτει αρκετά μεγάλο φάσμα εφαρμογών, γίνεται αρκετά δύσχρηστο όταν πρέπει να γίνει ανάλυση σε μεγάλο όγκο δεδομένων, αφού χρειάζεται να αφιερωθεί χρόνος για την εξαγωγή κάθε χάρτη διαφορετικής μέτρησης ξεχωριστά. Επιπλέον, λόγω των πολλαπλών του χρήσεων, το Surfer δεν παρέχει δυνατότητες παραμετροποίησης κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Kriging. Γι' αυτούς τους λόγους, στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος οπτικοποίησης μετρήσεων, ο οποίος έχει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με τον αλγόριθμο Kriging. Η επαλήθευση του αλγορίθμου αυτού έγινε με τους χάρτες που παράγει το λογισμικό GIS Surfer.

6.1 Επισκόπηση αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος που θα αναλυθεί παρακάτω, βασίζεται στη θεωρία του interpolation.

Ως είσοδοι του αλγορίθμου αξιοποιούνται:

- Τα όρια (συντεταγμένες) του αγροτεμαχίου που έγιναν οι μετρήσεις.
- Τα δεδομένα συνδυασμένα με γεωγραφικά στίγματα.
- Η επιθυμητή ανάλυση του χάρτη (σε m).
- Η απόσταση επιρροής των μετρήσεων (σε m).

Για να καταφέρει ο αλγόριθμος να προσεγγίσει τις τιμές θρέψης των φυτών σε ενδιάμεσα σημεία, που δεν έχουν καλυφθεί από τον αισθητήρα, χρησιμοποιεί ένα εύρος από γνωστές διακριτές μετρήσεις θρέψης.

Τα βήματα που ακολουθούνται περιγράφονται παρακάτω και στον ψευδοκώδικα 2:

- Ο αλγόριθμος δημιουργεί έναν πίνακα M , διαστάσεων (X,Y) , που κάθε θέση του αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό στίγμα στο χωράφι. Το X και το Y υπολογίζεται από τα όρια (περιμετρικά σημεία) του χωραφιού σε συνδυασμό με την επιθυμητή ανάλυση που έχει ορίσει ο χρήστης.
- Έπειτα, δημιουργείται ένας πανομοιότυπος πίνακας με τον M , M' και σε αυτόν συμπληρώνονται τα κελιά με τις πραγματικές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναζήτηση για το ποιο στοιχείο του πίνακα M αντιστοιχεί σε θέση στο αγροτεμάχιο με την μικρότερη απόσταση από τη μέτρηση. Σε περίπτωση που παραπάνω από ένα στοιχεία του M αντιστοιχούν σε ισάξια απόσταση με την μέτρηση, επιλέγεται η θέση του πίνακα με τις μικρότερες συντεταγμένες, και έπειτα του ανατίθεται η τιμή της μέτρησης.
- Για να εκτιμήσει ο αλγόριθμος τις τιμές στα σημεία στα οποία δεν υπάρχει μέτρηση:
 - Δημιουργεί έναν πίνακα K . Ο πίνακας K , που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως Kernel ή Convolution Matrix, περιέχει κατανεμημένα βάρη σε όλες τις θέσεις. Το βάρος που ανατίθεται σε κάθε κελί, είναι ανάλογο της απόστασης του κελιού αυτού, από το κέντρο του πίνακα. Το μέγεθος του πίνακα K , εξαρτάται από το χρήστη και είναι ανάλογο με την απόσταση που μπορεί να επηρεάσει μία μέτρηση το αποτέλεσμα της συνέλιξης. Πιο συγκεκριμένα, το κάθε μετρούμενο μέγεθος από το χωράφι έχει διαφορετική επιρροή όσον αφορά την απόσταση, γι' αυτό και είναι απόφαση του χρήστη η επιλογή του μεγέθους σύμφωνα με το είδος των μετρήσεων προς οπτικοποίηση .
 - Έπειτα εκτελείται ο παρακάτω κώδικας καταλήγοντας σε ένα καινούργιο πίνακα M που περιέχει τις τελικές τιμές του χάρτη και μια εικόνα που έχει αποτυπωμένο το χάρτη αυτό.
 - * Στην αρχή αναζητά κάποιο σημείο στο οποίο χρειάζεται να προβλεφθεί η μέτρηση. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι ο αλγόριθμος δε μεταβάλλει την τιμή σε θέσεις στις οποίες έχουν αποθηκευτεί μετρήσεις από τον αισθητήρα.
 - * Στη συνέχεια, για να κάνει προσέγγιση της τιμής για το σημείο αυτό, εφαρμόζει συνέλιξη μεταξύ των πινάκων K και ενός υποπίνακα του M' ο οποίος έχει μέγεθος ίδιο με του K και κέντρο το σημείο που πρέπει να γίνει η πρόβλεψη της μέτρησης.

- * Τέλος, αφού προσεγγιστεί η τιμή όλων των σημείων για τα οποία δεν υπήρχαν πραγματικές μετρήσεις, με τη χρήση της βιβλιοθήκης OpenCV [33], οπτικοποιείται ο πίνακας M.

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 2 & 1 \\ 2 & 3 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 3 & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & (N-1) & (N-1) & (N-1) & (N-1) & (N-1) & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & (N-1) & N & N & N & (N-1) & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & (N-1) & N & 0 & N & (N-1) & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & (N-1) & N & N & N & (N-1) & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & (N-1) & (N-1) & (N-1) & (N-1) & (N-1) & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 2 & 3 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 3 & 2 \\ 1 & 2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 6.1: Ενδεικτικός πίνακας K.

Αλγόριθμος 2 Ψευδοκώδικας αλγορίθμου οπτικοποίησης.

Input: Ο πίνακας **Measurements** που περιέχει τις πραγματικές μετρήσεις του συστήματος εκεί που υπάρχουν και στα υπόλοιπα κελιά αρχικοποιείται με -1 , ο πίνακας **M** με μέγεθος **X** και **Y**, και η μήτρα **K** με μέγεθος $N \times N$

Output: Τον πίνακα **M** που εμπεριέχει τις interpolated μετρήσεις.

procedure MeasurementInterpolation(*Measurements*)

$M \leftarrow 0$

$Mindex \leftarrow M$

for $i = 0, \dots, M.cols$ **do**

for $j = 0, \dots, M.rows$ **do**

if $Measurements[i][j] == -1$ **then**

continue

end if

for $k = \max(0, i - N/2), \dots, \min(M.cols, i + N/2)$ **do**

for $l = \max(0, j - N/2), \dots, \min(M.rows, j + N/2)$ **do**

$M[k][l] \leftarrow M[k][l] + K[k - i][l - j] * Measurements[i][j]$

$Mindex[k][l] \leftarrow Mindex[k][l] + 1 * Measurements[i][j]$

end for

end for

end for

end for

for $i = 0, \dots, M.cols$ **do**

for $j = 0, \dots, M.rows$ **do**

if $Measurements[i][j] \neq -1$ **then**

$M[i][j] \leftarrow Measurements[i][j]$

else if $Mindex[i][j] \neq 0$ **then**

$M[i][j] \leftarrow M[i][j] / Mindex[i][j]$

end if

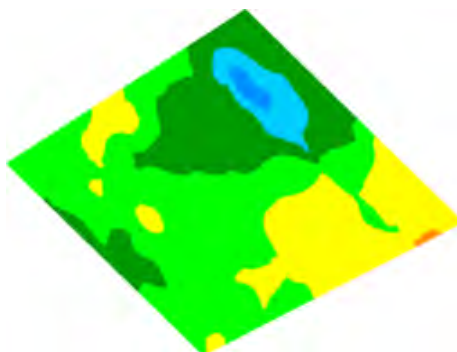
end for

end for

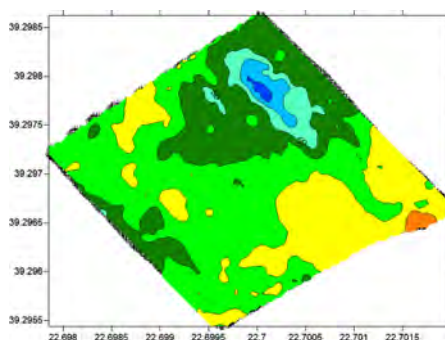
return M

end procedure

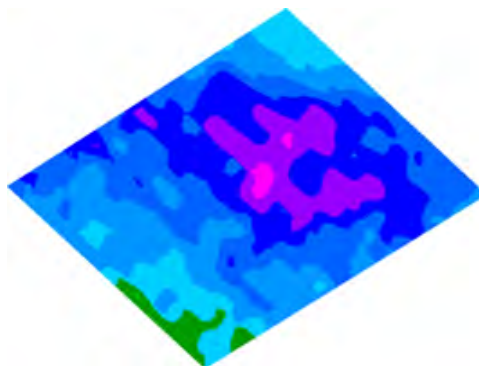
Στις εικόνες 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, εμφανίζονται χάρτες από δύο αγροτεμάχια, με τη χρήση του νέου λογισμικού οπτικοποίησης, αλλά και με το λογισμικό GIS Surfer.



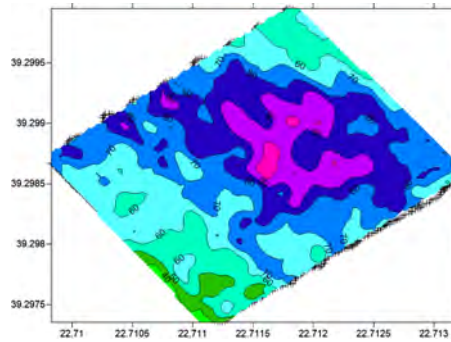
Σχήμα 6.2: Χάρτης με interpolation από τον νέο αλγόριθμο οπτικοποίησης για το αγροτεμάχιο Α.



Σχήμα 6.3: Χάρτης με interpolation από το GIS Surfer για το αγροτεμάχιο Α.



Σχήμα 6.4: Χάρτης με interpolation από τον νέο αλγόριθμο οπτικοποίησης για το αγροτεμάχιο Β.



Σχήμα 6.5: Χάρτης με interpolation από το GIS Surfer για το αγροτεμάχιο B.

6.2 Αποτελέσματα και επαλήθευση του αλγορίθμου οπτικοποίησης

Προκειμένου να επαληθευθεί ο αλγόριθμος οπτικοποίησης για την χρήση του στην παρούσα εργασία, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με αυτά του GIS εργαλείου Surfer. Πιο συγκεκριμένα έγινε εξαγωγή επτά διαφορετικών χαρτών και με τα δύο λογισμικά.

6.2.1 Μέθοδος Σύγκρισης των αποτελεσμάτων

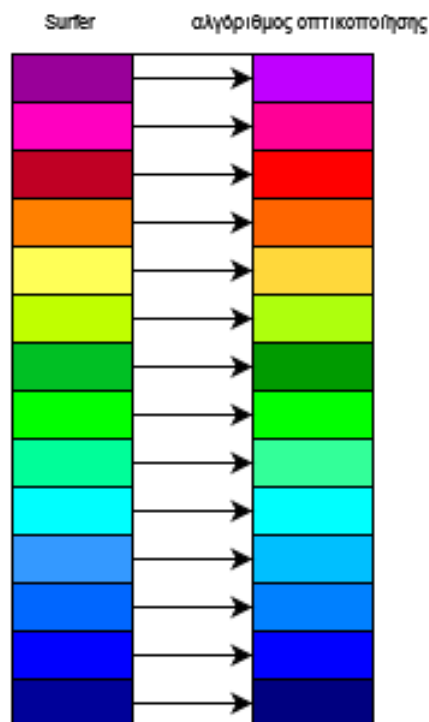
Για την υλοποίηση της σύγκρισης των δύο μεθόδων χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία των δεδομένων. Το πρώτο βήμα είναι η επεξεργασία του χάρτη απεικόνισης όσον αφορά την παλέτα χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκε κατά την εξαγωγή των χαρτών. Η αντιστοιχία των χρωμάτων φαίνεται στην εικόνα 6.6.

Το δεύτερο βήμα είναι ο μετασχηματισμός του χάρτη απεικόνισης από τον αλγόριθμο οπτικοποίησης ώστε να ταιριάζει με τον χάρτη που παράχθηκε από το λογισμικό του Surfer. Η διαδικασία αυτή έγινε με τη χρήση του εργαλείου Gimp [34]. Στην παρακάτω εικόνα 6.7 φαίνεται το αποτέλεσμα ενός μετασχηματισμού που υλοποιήθηκε για την ευθυγράμμιση των 2 χαρτών.

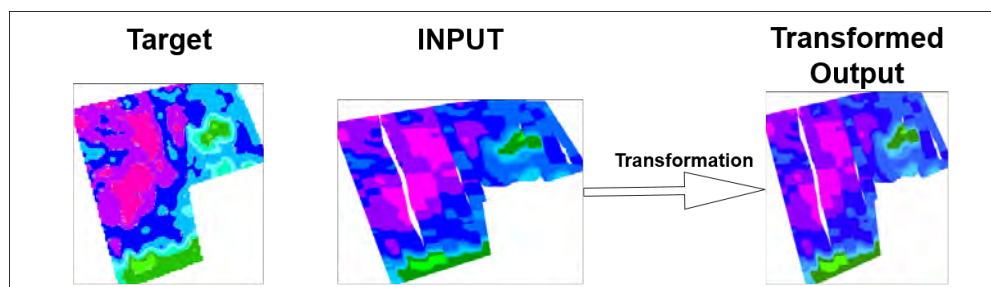
Το τελευταίο βήμα είναι να συγκριθούν όλα τα εικονοστοιχεία του κάθε χάρτη ώστε αν εξαχθούν ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα.

6.2.2 Ποσοτικά Αποτελέσματα

Για την εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μετρικές.



Σχήμα 6.6: Αντιστοιχία χρωματικής παλέτας του αλγόριθμου οπτικοποίησης με την παλέτα του GIS λογισμικού Surfer.



Σχήμα 6.7: Μετασχηματισμός χάρτη ώστε να επιτευχθεί ευθυγράμμιση με τον χάρτη που προέκυψε από το λογισμικό Surfer.

- Ποσοστιαία διαφορά (εξίσωση 6.1).
- Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (εξίσωση 6.2).
- Συντελεστής προσδιορισμού, R^2 (εξίσωση 6.3).
- Λόγος μέγιστης ισχύος σήματος προς θόρυβο, PSNR (εξίσωση 6.4).

Στην εικόνα 6.8 φαίνεται το διάγραμμα των ποσοστιαίων διαφορών, από το οποίο προέκυψε ότι η μέση ποσοστιαία διαφορά είναι 8%. Στη συνέχεια είναι ένα διάγραμμα 6.9 που αποτυπώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αλλά και τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 , από

Εξίσωση 6.1 Ποσοστιαία Διαφορά.

$$\frac{(NumberOfTotalColoredPixels - NumberOfNonMatchedPixels)}{NumberOfTotalColoredPixels}$$

Εξίσωση 6.2 Μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - y_{ij})^2$$

m ο αριθμός των σειρών του χάρτη που παράχθηκε από το λογισμικό Surfer.

n ο αριθμός των στηλών του χάρτη που παράχθηκε από το λογισμικό Surfer.

x_{ij} η τιμή του εικονοστοιχείου του χάρτη που παράχθηκε από το λογισμικό Surfer.

y_{ij} η τιμή του εικονοστοιχείου του χάρτη που παράχθηκε από τον αλγόριθμο οπτικοποίησης.

Εξίσωση 6.3 Συντελεστής προσδιορισμού, R².

$$R^2 = \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

SS_{res} το άθροισμα τετραγώνων των υπολειπόμενων σφαλμάτων του αλγορίθμου οπτικοποίησης.

SS_{tot} το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων.

Εξίσωση 6.4 Λόγος μέγιστης ισχύος σήματος προς θόρυβο, PSNR.

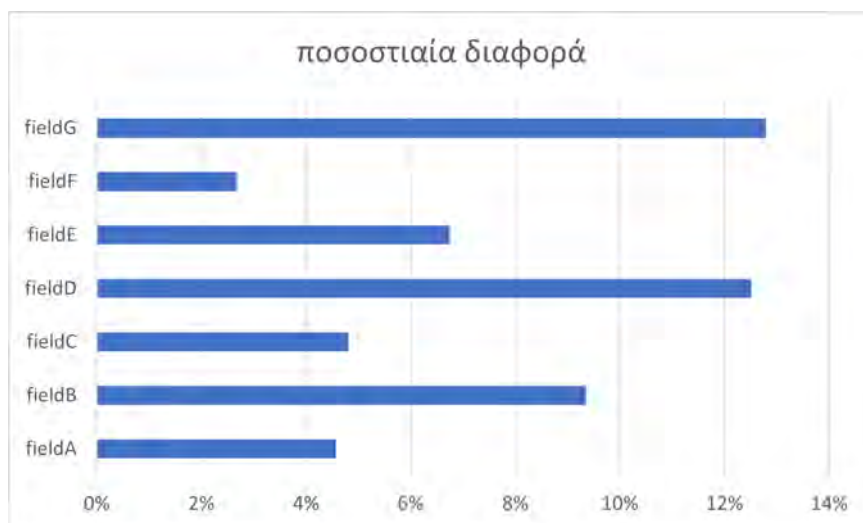
$$PSNR = 20 * \log_{10} \frac{Maxf}{\sqrt{MSE}}$$

$Maxf$ η μέγιστη τιμή του χάρτη που παράχθηκε από το λογισμικό Surfer.

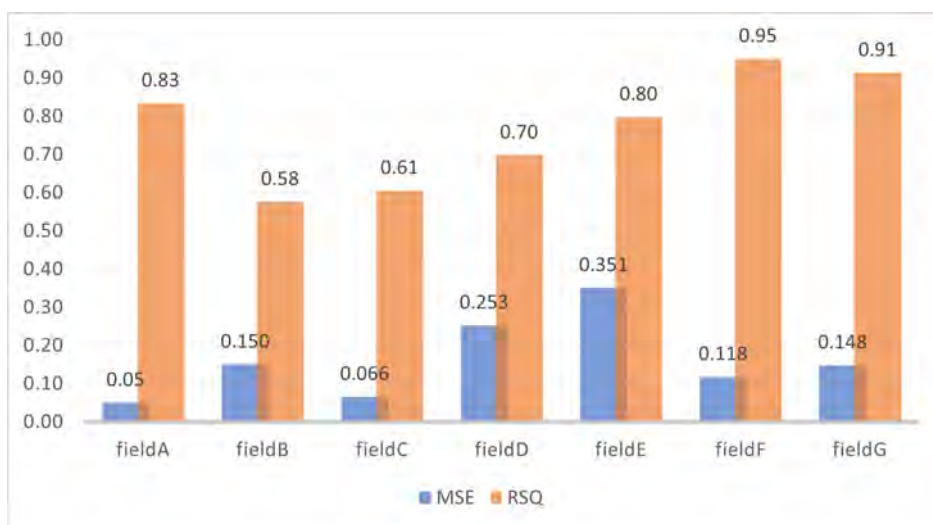
MSE το Μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

το οποίο προκύπτει ότι οι μέσες τιμές τους είναι 0.16 και 0.77 αντίστοιχα. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο είναι αρκετά σημαντική η χωρική πληροφορία των χαρτών και όχι η διαφορά των τιμών της οπτικοποίησης. Σίγουρα με τις μετρικές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος αλλά και του συντελεστή προσδιορισμού R², μπορεί κάποιος να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα αλλά δεν είναι αρκετές για να βγάλει κάποιος πλήρη συμπεράσματα για την απόδοση του αλγορίθμου. Το ίδιο συμβαίνει και με το ποσοστό των εικονοστοιχείων που διαφέρουν, όπως θα δούμε παρακάτω η οπτικοποίηση των διαφορών οδηγεί σε διαφορετικά συμπεράσματα

από αυτά που θα εξήγαγε κανείς από την συγκεκριμένη μετρική.

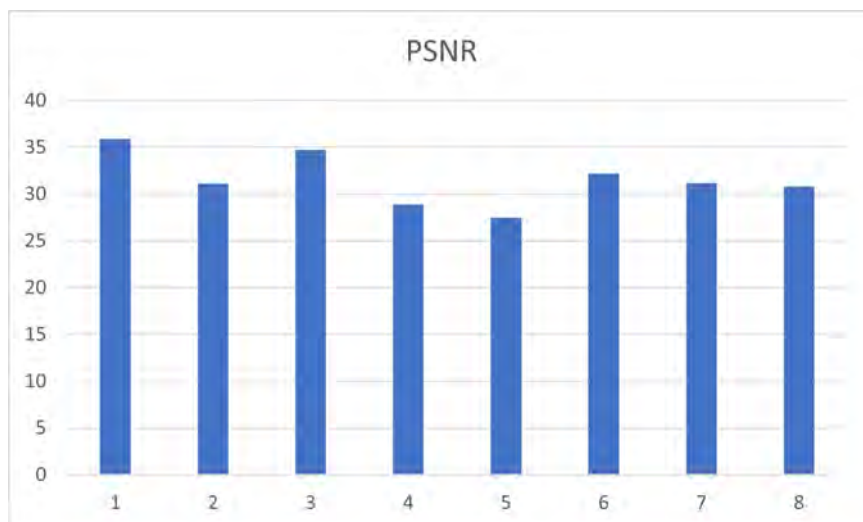


Σχήμα 6.8: Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ 7 αγροτεμαχίων που παράχθηκαν με το λογισμικό Surfer και του αλγορίθμου οπτικοποίησης.



Σχήμα 6.9: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα και συντελεστής προσδιορισμού R2, μεταξύ 7 αγροτεμαχίων που παράχθηκαν με το λογισμικό Surfer και του αλγορίθμου οπτικοποίησης.

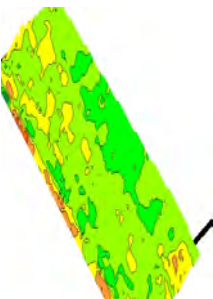
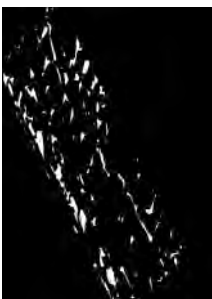
Τέλος η μετρική PSNR, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της ποιότητας μίας εικόνας, εμφανίζεται στο διάγραμμα 6.10, με μέσο όρο τιμής 30.8db για τα 7 αγροτεμαχία. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από τη συγκεκριμένη μετρική ταυτίζονται με καλή ποιότητα εικόνας. Συνολικά, σύμφωνα με τη μετρική PSNR φαίνεται να είναι επαρκής η ταύτιση των αποτελεσμάτων των παραπάνω λογισμικών.



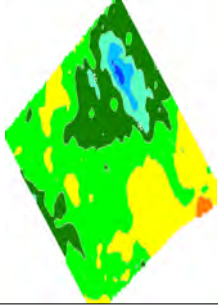
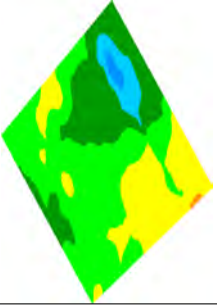
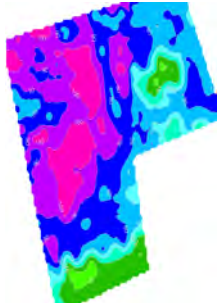
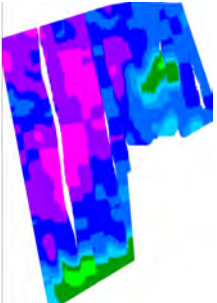
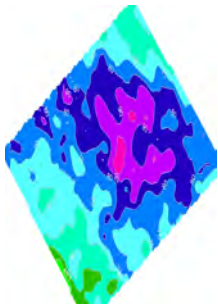
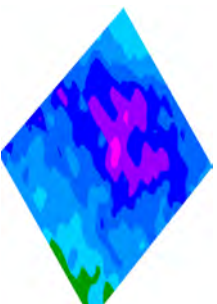
Σχήμα 6.10: Λόγος μέγιστης ισχύος σήματος προς θόρυβο (PSNR) μεταξύ 7 αγροτεμαχίων που παράχθηκαν με το λογισμικό Surfer και τον αλγόριθμο οπτικοποίησης.

6.2.3 Ποιοτικά Αποτελέσματα

Οι πίνακες 6.1, 6.2 αποτυπώνουν τους χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση. Στους πίνακες αυτούς εμφανίζεται επίσης και μία στήλη η οποία περιέχει εικόνες που με άσπρο χρώμα φαίνονται τα εικονοστοιχεία που διέφεραν μεταξύ των δύο μεθόδων, μόνο στις περιοχές που και οι δύο διαφορετικές μέθοδοι έχουν περιεχόμενο.

Name	Χάρτης Surfer	Χάρτης Αλγορίθμου οπτικοποίησης	Μάσκα με τα εικονοστοιχεία που δεν ταυτίζονται
fieldA			
fieldB			
fieldC			
fieldD			

Πίνακας 6.1: Εικονοστοιχεία που παρουσιάζουν διαφοροποίηση μεταξύ των 2 μεθόδων. Μέρος 1.

Name	Χάρτης Surfer	Χάρτης αλγόριθμου οπτικοποίησης	Μάσκα με τα εικονοστοιχεία που δεν ταυτίζονται
fieldE			
fieldF			
fieldG			

Πίνακας 6.2: Εικονοστοιχεία που παρουσιάζουν διαφοροποίηση μεταξύ των 2 μεθόδων. Μέρος 2.

Παρατηρείται ότι τα εικονοστοιχεία που έχουν διαφοροποίηση ανήκουν κυρίως σε 2 κατηγορίες:

- **Κατηγορία 1:** τα περιγράμματα των ομαδοποιημένων σε ένα χρώμα εικονοστοιχείων.
- **Κατηγορία 2:** πολύ μικρές περιοχές που αποτυπώνονται στο χάρτη που έχει παραχθεί από το λογισμικό Surfer αλλά όχι σε αυτόν που έχει παραχθεί από το νέο λογισμικό οπτικοποίησης.

Οι παραπάνω κατηγορίες μπορούν να εξηγηθούν από τους εξής παράγοντες:

- Οι εικόνες δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους.
- Έχει γίνει ισχυρότερη εξομάλυνση στον χάρτη του καινούριου λογισμικού. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικό μέγεθος μήτρας ($N \times N$) και σε διαφορετικούς συντελεστές σε κάθε θέση της μήτρας. Πιο συγκεκριμένα, αν η συντελεστές γύρω από το σημείο της μέτρησης ήταν μεγαλύτεροι τότε το σημείο της μέτρησης θα είχε πολύ μεγαλύτερο βάρος, έτσι ώστε ακόμα και να μην υπήρχαν παρόμοιες τιμές πλησίον του, ο χάρτης θα εμφάνιζε μια περιοχή (μεγαλύτερη τους ενός εικονοστοιχείου) της συγκεκριμένης μέτρησης.

6.2.4 Συμπεράσματα

Δεδομένων των ποσοτικών και ποιοτικών αποτελεσμάτων η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία ως εργαλείο αυτόματης οπτικοποίησης των μετρήσεων.

Πιθανά μελλοντικά βήματα για τη βελτιστοποίηση του αλγορίθμου οπτικοποίησης είναι τα εξής:

- Υλοποίηση του αλγορίθμου σε CUDA για καλύτερη χρονική επίδοση
- Χρήση διαφορετικού πίνακα μήτρας τόσο σε μέγεθος όσο και σε βάρη για καλύτερη αποτύπωση μικρών περιοχών
- Δοκιμή εναλλακτικού τρόπου interpolation για πιο ομαλές μεταβάσεις μεταξύ περιοχών, ώστε να αποτυπώνεται πιο ορθά η πραγματική κατάσταση του αγροτεμαχίου

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Προκειμένου να φτάσουμε στην υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας, ήταν απαραίτητη η εκτενής έρευνα, η σωστή οργάνωση των διαφόρων παραμέτρων αλλά και η αποτελεσματική επίλυση των εμποδίων τα οποία παρουσιάστηκαν στην πορεία. Η εμπλοκή του συστήματος με το φυσικό περιβάλλον και οι ελεύθερες παράμετροι που εισάγει το τελευταίο, ήταν ένας παράγοντας που «δυσκόλεψε» την υλοποίηση και την εκτέλεση των δοκιμών του συστήματος. Στον αντίποδα, όμως, η δημιουργία ενός συστήματος για χρήση σε πραγματικές συνθήκες, είναι μια διαδικασία, που μας δίνει πολλές εμπειρίες για την ανάπτυξη εμπορικής φύσεως συστημάτων.

Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένα σύστημα, το οποίο με τη χρήση πολυφασματικών καμερών και του κατάλληλου λογισμικού, έχει τη δυνατότητα σε πραγματικό χρόνο να εξάγει πληροφορίες, όπως δείκτη βλάστησης και πυκνότητας φυτείας, για τον αγρό. Ταυτόχρονα, έγινε αναφορά και σύγκριση με άλλα εμπορικά συστήματα τα οποία έχουν ως σκοπό την καταγραφή δείκτη βλάστησης από τον αγρό.

Ο αγροτικός τομέας είναι ένας τομέας που δεν έχει ενστερνιστεί ακόμα σε μεγάλο βαθμό την τεχνολογία. Βοηθούμενος από αυτήν όμως μπορεί να προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Με την ανάπτυξη αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης, που θα είναι βασισμένοι σε αναγνώριση προτύπων και σε machine learning, μπορεί το σύστημα να χρησιμοποιηθεί για αναγνώριση ασθενειών της φυτείας και για την πρόβλεψη παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, η χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων θα μειωθεί στο ελάχιστο αναγκαίο για τα φυτά, ένα πλεονεκτήματα που θα αποφέρει οφέλη τόσο στον αγρότη (οικονομικά), όσο και στο περιβάλλον.

Τέλος, παρόλο που οι αρχικοί πειραματισμοί συσχετίστηκαν κυρίως με τις καλλιέργειες

σίτου, είδαμε στην πορεία της παρούσας έρευνας πως είναι δυνατόν να εφαρμοστούν και σε άλλα είδη καλλιέργειας, με μόνο προαπαιτούμενο τη γνώση της φασματικής υπογραφής του κάθε φυτού, ώστε να επιλεγθούν τα κατάλληλα φίλτρα για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια. Οι συνεχείς έρευνες που γίνονται παγκοσμίως στην αναζήτηση μοναδικής φασματικής υπογραφής για το κάθε φυτό είναι πολλά υποσχόμενες και έχουν άμεση συσχέτιση με τη χρήση πολυφασματικών καμερών. Η έρευνα αυτή, φανερώνει ότι η χρήση τέτοιου είδους καμερών και η ανάπτυξη αλγορίθμων στον τομέα της μηχανικής όρασης θα γνωρίσουν ραγδαία ανάπτυξη στο άμεσο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] Electromagnetic spectrum. https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [2] Joseph K. Berry. *The Precision Farming Primer*. BASIS, Inc, 1 edition, 1999.
- [3] Thorlabs. *Bandpass Filter*, 2018.
- [4] Arcgis. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.9/tool-reference/spatial-analyst/understanding-interpolation-analysis.htm>. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [5] Antonio Comparetti. Precision agriculture: Past, present and future. In *International scientific conference "Agricultural Engineering and Environment*, September 2011.
- [6] Crop circle acs210, 2017.
- [7] Sentinel hub. <https://www.sentinel-hub.com/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [8] Parrot sequoia. https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/sequoia-userguide-en-fr-es-de-it-pt-ar-zn-zh-jp-ko_0.pdf, 2019.
- [9] Sensors-sentera. <https://sentera.com/products/fieldcapture/sensors/>, 2019.
- [10] Agrocampa pro. <https://www.agrocampa.eu/specification-agrocampa-pro-ndvi>, 2017.
- [11] Ndpi function. <https://www.esri.com/en-us/industries/agriculture/overview>, 2016.

- [12] Red vs. blue filters for ndvi. <https://publiclab.org/notes/nedhorning/10-30-2013/red-vs-blue-filters-for-ndvi>. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [13] Hui Wang, Feng Qin, Liu Ruan, Rui Wang, Qi Liu, Zhanhong Ma, Xiaolong Li, Pei Cheng, and Haiguang Wang. Identification and severity determination of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on hyperspectral data acquired using a black-paper-based measuring method. *PloS one*, April 2016.
- [14] William Raun, J.B. Solie, M. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, Hailin Zhang, J.s Schepers, and G. Johnson. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis - COMMUN SOIL SCI PLANT ANAL*, 36:2759–2781, 10 2005.
- [15] Liaghat S. and Balasundram S. K. A review: The role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(1):50–55, January 2010.
- [16] Φουντάς Σπύρος και Γέμτος Θεοφάνης. *Γεωργία Ακριβείας*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Αθήνα, 1 edition, 2015.
- [17] Joanne Zwinkels. *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer, New York, NY, 1 edition, 2016.
- [18] Infrared. <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [19] Light. <https://en.wikipedia.org/wiki/Light>. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [20] Nguyen Dinh Duong, Anh Le, H.L. Thu, and Kim-Anh Nguyen. Spectral signatures in landsat 8 oli image and their interpretation for land cover study. *35th Asian Conference on Remote Sensing 2014, ACRS 2014: Sensing for Reintegration of Societies*, January 2014.
- [21] Image sensor. https://en.wikipedia.org/wiki/Image_Sensor. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.

- [22] David J Maguire. An overview and definition of gis. *Geographical information systems: Principles and applications*, 1(1):9–20, October 1991.
- [23] Eduardo Souza, Cláudio Bazzi, Raj Khosla, Miguel Uribe Opazo, and Robin Reich. Interpolation type and data computation of crop yield maps is important for precision crop production. *Journal of Plant Nutrition*, 39, January 2016.
- [24] Arcgis. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>. Ημερομηνία πρόσβασης: 11-06-2023.
- [25] GOLDEN SOFTWARE, LLC. *Golden Software*, 2018.
- [26] Raspberry Pi Foundation. *Product*, 2019.
- [27] Ciarán Eising, Patrick Denny, Edward Jones, and Martin Glavin. Accuracy of fish-eye lens models. *Applied Optics*, 49:3338–47, June 2010.
- [28] Agata Orych, Piotr Walczykowski, Rafał Dąbrowski, and Edyta Kutyna. Using plant spectral response curves in detecting plant stress. *Ecological Questions*, 17:67–74, January 2013.
- [29] R. Kancheva, Denitsa Borisova, and Ilko Ts. Iliev. Chlorophyll fluorescence as a plant stress indicator. In *Chlorophyll fluorescence as a plant stress indicator*, 2008.
- [30] Chi Guangyu, Zheng Taihui, Ma Jian, Shi Yi, and Chen Xin. Changes in spectral reflectance of vegetation in response to specific nutrient supply. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 155:671–675, January 2012.
- [31] Ying Qu, Suhong Liu, and Jiangzhou Xia. Spectral response of wheat (*tritiznm aestivum* l.) leaves to copper stress. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 2780–2783, July 2010.
- [32] Παπακώστα και Τασοπούλου. *Ψυχανθή (Καρποδοτικά- Χορτοδοτικά)*. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη, 2005.
- [33] G. Bradski. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
- [34] Gimp. <https://www.gimp.org/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 08-10-2023.