



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΖΩΝΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ, ΜΕΣΩ ΤΟΥ
ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ (NDVI)»

ΑΝΔΡΙΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανιάτης Ιωάννης

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2024

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο **“Καθορισμός ζωνών μεταβλητής δόσης άρδευσης, μέσω του δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI)”** καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και οι πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. 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. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright © Ανδριόπουλος Χαράλαμπος, 2024, Πειραιάς

Υπογραφή Φοιτητή:

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Κλιματική Κρίση και Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών, του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Πριν την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που γνώρισα, έμαθα και συνεργάστηκα μαζί τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. Μανιάτη Ιωάννη για τις εποικοδομητικές διαλέξεις του, την εμπιστοσύνη και την υπομονή που μου έδειξε.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και συνάδελφο Μαγγίδη Βλάση, για την πολύτιμη βοήθεια του και τις συμβουλές του, για τη συγγραφή αυτής της εργασίας.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να αποτείνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Βούλγαρη Ιωάννα, οι οποία συνέβαλε ουσιαστικά όλα αυτά τα χρόνια στα γραφειοκρατικά και διαδικαστικά θέματα της σχολής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω πολύ την οικογένεια μου έδιναν κουράγιο και δύναμη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και κατά την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου μελέτης.

Περίληψη

Στη σύγχρονη γεωργία, η αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η λειψυδρία, η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για τρόφιμα και η ανάγκη για βιώσιμες γεωργικές πρακτικές έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας.

Μια τέτοια καινοτομία είναι η Μεταβλητή Δόση Άρδευσης (Variable Rate Irrigation - VRI), η οποία επιτρέπει την άρδευση για κάθε τοποθεσία με βάση τις συνθήκες των φυτών και του εδάφους σε πραγματικό χρόνο. Το VRI μπορεί να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα χρήσης του νερού προσαρμόζοντας τα πρότυπα άρδευσης ανάλογα με τις ανάγκες των καλλιεργειών, αλλά απαιτεί ακριβή, έγκαιρα δεδομένα για να είναι αποτελεσματικό.

Ο Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέτρηση στη γεωργία ακριβείας που μετρά την υγεία και το σφρίγος της βλάστησης. Το NDVI καταγράφει παραλλαγές στην πρασινάδα των φυτών, η οποία συσχετίζεται με παράγοντες όπως η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η βιομάζα και το στρες στο νερό. Η ενσωμάτωση δεδομένων NDVI σε συστήματα άρδευσης, ιδιαίτερα στο VRI, δίνει τη δυνατότητα στους αγρότες να παρέχουν τη σωστή ποσότητα νερού τη σωστή στιγμή, αντιμετωπίζοντας τη μεταβλητότητα μέσα σε ένα χωράφι.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν σύγχρονες μέθοδοι χρήσης δεδομένων NDVI για την καθοδήγηση της άρδευσης με μεταβλητό ρυθμό. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί τη σχέση μεταξύ του NDVI και της υδατικής καταπόνησης των καλλιεργειών, θα αξιολογήσει την ακρίβεια του NDVI στον προσδιορισμό των αναγκών άρδευσης και θα αναδείξει τις βελτιώσεις της απόδοσης που επιτυγχάνονται μέσω αυτής της μεθόδου.

Λέξεις Κλειδιά: Γεωργία Ακριβείας, Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (NDVI), Υδατική Καταπόνηση, Συστήματα Άρδευσης, Μεταβλητή Δόση Άρδευσης

Abstract

In modern agriculture, efficient management of water resources is critical to maximizing crop productivity and minimizing environmental impacts. Water scarcity, increasing global demand for food, and the need for sustainable agricultural practices are driving the adoption of precision agriculture technologies.

One such innovation is Variable Rate Irrigation (VRI), which allows irrigation for each location based on plant and soil conditions in real time. VRI can optimize water use by adjusting irrigation patterns to crop needs, but requires accurate, timely data to be effective.

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is a widely used metric in precision agriculture that measures the health and vigor of vegetation. NDVI captures variations in plant greenness, which correlates with factors such as chlorophyll content, biomass and water stress. Integrating NDVI data into irrigation systems, particularly VRI, enables farmers to provide the right amount of water at the right time, addressing variability within a field.

In this thesis, modern methods of using NDVI data to guide variable rate irrigation will be presented. Specifically, it will present the relationship between NDVI and crop water stress, evaluate the accuracy of NDVI in determining irrigation needs, and highlight the yield improvements achieved through this method.

Keywords: Precision Agriculture, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Water Stress, Irrigation Systems, Variable Rate Irrigation

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	8
Κεφάλαιο 2: Γεωργία Ακριβείας και Τεχνολογίες Γεωργίας Ακρίβειας.....	10
2.1. Εισαγωγή.....	10
2.2. Δορυφορικά Συστήματα Παγκόσμιας Πλοήγησης (GNSS).....	13
2.3. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών	16
2.4. Τηλεπισκόπηση	17
2.5. Ρομποτικά Συστήματα.....	25
2.6. Μηχανική Όραση	29
2.7. Εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις (VRA)	32
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία	35
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Συστάσεις	53
Βιβλιογραφία.....	56

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ολοκληρωμένο σύστημα Γεωργίας Ακριβείας (Markinos κ.ά. 2002)	12
Εικόνα 2: Σταθερός επίγειος σταθμός RTK GPS	15
Εικόνα 3: Διάκριση μεταξύ ενεργητικής και παθητικής μέτρησης.....	20
Εικόνα 4: Απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πηγή: Περάκης Κ. (2015)....	20
Εικόνα 5: Φυλλική Απορρόφηση της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας	22
Εικόνα 6: Εναέριο Ρομποτικό Σύστημα.....	27
Εικόνα 7: Τροποποιημένοι ελκυστήρες με εγκατεστημένο το σύστημα μηχανικής όρασης της Augmenta	28
Εικόνα 8: Ρομποτική πλατφόρμα 'Dino', για μηχανικό εντοπισμό και αφαίρεση ζιζανίων	28
Εικόνα 9: Σχέδιο για το πείραμα άρδευσης 2017	38
Εικόνα 10: Σχέδιο για το πείραμα άρδευσης 2018	38
Εικόνα 11: Μέσο δυναμικό εδάφους νερού για την καλλιεργητική περίοδο 2017	40
Εικόνα 12: Μέσο δυναμικό εδάφους νερού για την καλλιεργητική περίοδο 2018	40
Εικόνα 13: FAO56 και συντελεστές καλλιέργειας προερχόμενοι από το NDVI το 2017	41
Εικόνα 14: FAO56 και συντελεστές καλλιέργειας προερχόμενοι από το NDVI το 2018	42
Εικόνα 15: Σωρευτικές βροχοπτώσεις και άρδευση για τις κατεργασίες με NDVI και με ομοιόμορφη άρδευση το 2017.....	44
Εικόνα 16: Σωρευτικές βροχοπτώσεις και άρδευση για τις κατεργασίες με NDVI και με ομοιόμορφη άρδευση το 2018.....	44
Εικόνα 17: Η περιοχή μελέτης οριοθετείται από τον κόκκινο κύκλο	49
Εικόνα 18: Παραλλαγή τιμών NDVI σε έναν κύκλο καλλιέργειας	50
Εικόνα 19: Εισαχθέντα δεδομένα στο ασαφές σύστημα.....	51
Εικόνα 20: Δεδομένα εξόδου από το ασαφές σύστημα συμπερασμάτων.....	52

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) των Ηνωμένων Εθνών εκτιμά ότι για να καλύψει τις ανάγκες σε τρόφιμα το 2050, η γεωργική παραγωγή πρέπει τουλάχιστον να διπλασιαστεί ή να τριπλασιαστεί τα επόμενα 40 χρόνια και το 80% αυτής της αύξησης πρέπει να προέλθει από την αύξηση της παραγωγής. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμένους πόρους του πλανήτη μας, η επίτευξη αυτού του στόχου είναι μεγάλη πρόκληση (FAO, 2016). Η αρδευόμενη γεωργία επιτρέπει την αύξηση της παραγωγικότητας και την παραγωγή αρκετών καλλιεργειών (Borghetti, κ.α. 2017). Ωστόσο, με τον αυξανόμενο περιορισμό των υδάτινων πόρων, η χρήση του νερού στη γεωργία πρέπει να είναι πιο αποτελεσματική για τη διατήρηση των σημερινών επιπέδων παραγωγικότητας σε συνδυασμό με την επέκταση των αρδευόμενων εκτάσεων. Οι αποφάσεις για τη διαχείριση της άρδευσης απαιτούν να λαμβάνονται υπόψη αλληλένδετες οικονομικές, φυσικές και βιολογικές μεταβλητές, οι οποίες είναι συχνά δύσκολο να προβλεφθούν και επί των οποίων υπάρχει ελάχιστος ή καθόλου έλεγχος (Herrera, κ.α. 2013).

Στη σύγχρονη γεωργία, η αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η λειψυδρία, η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για τρόφιμα και η ανάγκη για βιώσιμες γεωργικές πρακτικές έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας. Μια τέτοια καινοτομία είναι η Μεταβλητή Δόση Άρδευσης (Variable Rate Irrigation - VRI), η οποία επιτρέπει την άρδευση για κάθε τοποθεσία με βάση τις συνθήκες των φυτών και του εδάφους σε πραγματικό χρόνο. Η Μεταβλητή Δόση Άρδευσης μπορεί να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα χρήσης του νερού προσαρμόζοντας τα πρότυπα άρδευσης ανάλογα με τις ανάγκες των καλλιεργειών, αλλά απαιτεί ακριβή, έγκαιρα δεδομένα για να είναι αποτελεσματική.

Ωστόσο, τα παραδοσιακά συστήματα άρδευσης βασίζονται συχνά στην ομοιόμορφη εφαρμογή του νερού, αγνοώντας τη χωρική μεταβλητότητα στις ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική άρδευση σε ορισμένες περιοχές και υδατικό στρες σε άλλες, μειώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα χρήσης νερού και την απόδοση των καλλιεργειών. Η μακροχρόνια αναζήτηση για αυτοματοποιημένες λύσεις για τη βελτίωση και την πιο αποτελεσματική χρήση των γεωργικών εφαρμογών, έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή αρκετών λύσεων για τη διεξαγωγή εφαρμογής νερού με χωρική διόρθωση (R.G. Evans, κ.α. 2012). Συνεπώς απαιτούνται συστήματα άρδευσης που να μπορούν να

μεταβάλουν τη δόση εφαρμογής νερού για την ορθότερη διαχείριση του νερού για την αύξηση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών (R.A. Armino, κ.α. 2011).

Η Μεταβλητή Δόση Άρδευσης μέσω NDVI έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει αυτήν την πρόκληση χρησιμοποιώντας δεδομένα τηλεπισκόπησης για να προσαρμόσει την άρδευση με βάση την υγεία των φυτών, με αποτέλεσμα τη βελτιστοποιημένη χρήση του νερού και τη βελτιωμένη απόδοση των καλλιεργειών. Ο Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (NDVI) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέτρηση στη γεωργία ακριβείας που μετρά την υγεία και τη δυναμικότητα της βλάστησης. Το NDVI καταγράφει παραλλαγές στην πρασινάδα των φυτών, η οποία συσχετίζεται με παράγοντες όπως η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η βιομάζα και το υδατικό στρες. Η ενσωμάτωση δεδομένων NDVI σε συστήματα άρδευσης, ιδιαίτερα στο VRI, δίνει τη δυνατότητα στους αγρότες να παρέχουν τη σωστή ποσότητα νερού τη σωστή στιγμή, αντιμετωπίζοντας τη μεταβλητότητα μέσα σε ένα χωράφι.

Παρά τα πιθανά οφέλη, η εφαρμογή VRI που βασίζεται σε NDVI παραμένει ανεξερεύνητη. Υπάρχει ανάγκη να αξιολογηθεί πόσο αποτελεσματικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί το NDVI για να καθοδηγήσει τις αποφάσεις άρδευσης και να βελτιώσει την αποδοτικότητα χρήσης νερού σε διαφορετικές καλλιέργειες και περιβάλλοντα.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν σύγχρονες μέθοδοι χρήσης δεδομένων NDVI για την καθοδήγηση της άρδευσης με μεταβλητό ρυθμό. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί τη σχέση μεταξύ του NDVI και της υδατικής καταπόνησης των καλλιεργειών, θα αξιολογήσει την ακρίβεια του NDVI στον προσδιορισμό των αναγκών άρδευσης και θα αναδείξει τις βελτιώσεις της απόδοσης που επιτυγχάνονται μέσω αυτής της μεθόδου

Κεφάλαιο 2: Γεωργία Ακριβείας και Τεχνολογίες Γεωργίας Ακρίβειας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της Γεωργίας Ακριβείας καθώς και των σύγχρονων τεχνολογιών και εφαρμογών NDVI στη γεωργία και στα συστήματα VRI.

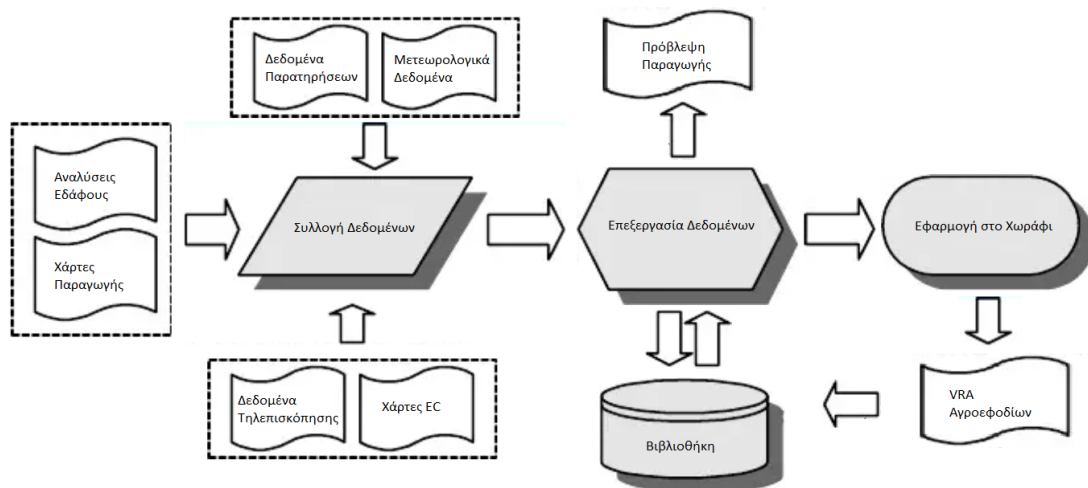
2.1. Εισαγωγή

Στη συμβατική και παραδοσιακή γεωργία, ο γεωργός αρκετές φορές διαφοροποιούσε τις φροντίδες της καλλιέργειας στα διάφορα τμήματα ανάλογα με την εμπειρία και την παρατήρηση. Διαχειρίζονταν μικρά αγροτεμάχια που γνώριζε πολύ καλά. Με την εκμηχάνιση της γεωργίας και την αύξηση του μεγέθους των αγροκτημάτων, ο γεωργός δε έχει πλέον την άμεση επαφή με τα καλλιεργούμενα χωράφια. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αναπτύσσεται ένας νέος τρόπος διαχείρισης του αγρού ο οποίος εκμεταλλεύεται την τεχνολογική πρόοδο και τα νέα εξελιγμένα μέσα, με στόχο να αποκτήσει δεδομένα για τα χαρακτηριστικά του αγρού τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της διαχείρισης του. Άρχισε να γίνεται κατανοητό ότι μόνο με την εκμετάλλευση των εργαλείων που παρέχει η τεχνολογία μπορεί να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών στη γεωργία επέτρεψε τη μέτρηση της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας των παραμέτρων της παραγωγής και των ιδιοτήτων του αγρού και έδωσε τη δυνατότητα ανάπτυξης συστημάτων Γεωργίας Ακριβείας.

Η Γεωργία Ακριβείας είναι ένα σύστημα διαχείρισης αγροκτημάτων το οποίο χρησιμοποιώντας την πληροφορική και ηλεκτρονικά συστήματα εφαρμοσμένα στη γεωργία, βοηθά τον παραγωγό στη λήψη αποφάσεων για καλύτερη διαχείριση του αγροκτήματος (Sigrimis 2000). Ο όρος καλύτερη διαχείριση μπορεί να σημαίνει είτε βελτίωση της οικονομικής απόδοσης του αγροκτήματος (με αύξηση της παραγωγής/ποιότητας ή/και μείωση των εισροών) είτε με βελτίωση των τυχόν αρνητικών επιπτώσεων της γεωργίας στο περιβάλλον. Η εξοικονόμηση πόρων είναι ένας από τους πιο σπουδαίους λόγους που εξετάζονται για την μετάβαση από τον παραδοσιακό τρόπο διαχείρισης στη Γεωργία Ακριβείας. Με την Γεωργία Ακριβείας μπορεί να επηρεαστεί το κόστος παραγωγής και τα έσοδα από την καλλιέργεια. Έτσι, υπάρχει δυνατότητα για μεγαλύτερες αποδόσεις χρησιμοποιώντας τις ίδιες εισροές αλλά ανακατανεμημένες, ή για μεγαλύτερες αποδόσεις με μειωμένες εισροές. Ο παραγωγός πρέπει να αποφασίσει για την καταλληλότερη μέθοδο διαχείρισης. Εκτός από την απόδοση, πρέπει να επιδιώξει καλύτερη ποιότητα προϊόντων

χρησιμοποιώντας τις εισροές ανάλογα με τις ανάγκες των καλλιεργειών. Είναι γνωστό ότι η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων μπορεί να μειώσει την ανάπτυξη των φυτών και να χειροτερεύσει την ποιότητα των προϊόντων. Αλλά και η περίσσεια θρεπτικών στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε κακή ποιότητα καρπών (Jager and Putter, 1999), αλλά και προβλήματα στη φυτεία (πλάγιασμα σιτηρών, ευαισθησία σε εχθρούς). Χαρακτηριστικό της Γεωργίας Ακριβείας είναι ότι αντί να γίνονται οι καλλιεργητικές φροντίδες με βάση τις μέσες τιμές της παραγωγής και γονιμότητας του αγροκτήματος, εφαρμόζεται διαφορετική διαχείριση για κάθε τμήμα του αγρού ανάλογα με τις πραγματικές του ανάγκες. Η Γεωργία Ακριβείας μπορεί να βοηθήσει τους παραγωγούς, διότι επιτρέπει την ακριβή και βελτιστοποιημένη χρήση των εισροών οδηγώντας σε μείωση του κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και παρέχοντας τη δυνατότητα καταγραφής (ιχνηλασιμότητα) των γεωργικών δραστηριοτήτων (Stafford 2000).

Τα προηγούμενα χρόνια η γεωργική παραγωγή αυξήθηκε σημαντικά χάρη στη γενετική βελτίωση των φυτών, τη χρήση χημικών και αρδευτικού νερού, τις βελτιωμένες καλλιεργητικές πρακτικές και την εκμηχάνιση των καλλιεργειών. Σε επόμενο διάστημα, φαίνεται ότι όλοι αυτοί οι παράγοντες θα βοηθηθούν από την εφαρμογή των τεχνολογιών της πληροφορικής, των ηλεκτρονικών και των τηλεπικοινωνιών στη γεωργία. Η χρήση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας έχει αποδειχτεί ότι προσφέρει σημαντικά οφέλη που αφορούν την οικονομία, το περιβάλλον, και την κοινωνία, που αποτελούν και τους τρεις κύριους πυλώνες της αειφόρου ανάπτυξης. Συνεπώς, η Γεωργία Ακριβείας συμβάλει στην επίτευξη αειφορίας στο γεωργικό περιβάλλον, με εφαρμογές της με βάση τις διαφορετικές ανάγκες των φυτών τόσο χωρικά, όσο και χρονικά. Σύμφωνα με το ορισμό που πρότεινε η Παγκόσμια επιτροπή Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης, το 1987, η έννοια της αειφόρου ανάπτυξης αναφέρεται σε ένα πρότυπο ανάπτυξης το οποίο ανταποκρίνεται στις ανάγκες της παρούσας γενιάς χωρίς να υπονομεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες. Αποσκοπεί στο να βελτιώσει τις συνθήκες διαβίωσης των ατόμων διαφυλάσσοντας παράλληλα το περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους σε βραχυπρόθεσμη, σε μεσοπρόθεσμη και, κυρίως, σε μακροπρόθεσμη βάση.



Εικόνα 1: Ολοκληρωμένο σύστημα Γεωργίας Ακριβείας (Markinos κ.ά. 2002)

Το σύστημα της Γεωργίας Ακριβείας απαρτίζεται από τρία στάδια (Εικόνα 1). Το πρώτο στάδιο αφορά τη συλλογή δεδομένων για την καλλιέργεια όπως χάρτες παραγωγής και αποτελέσματα αναλύσεων εδάφους παλαιότερων ετών. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου συλλέγονται κι άλλα δεδομένα όπως δεδομένα καιρού, παρατηρήσεων παθογόνων και τηλεπισκόπησης (Elms & Green 1997). Πολλές από τις διεργασίες του σταδίου αυτού μπορούν ν' αυτοματοποιηθούν με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων και αισθητήρων. Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν ανήκουν στο δεύτερο στάδιο. Ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται τα δεδομένα σε κάθε σύστημα εξαρτάται από την καλλιέργεια από τον αλγόριθμο που έχει χρησιμοποιηθεί (McCauley 1999, McKinion κ.ά. 2001). Σε αυτό το στάδιο είναι αναγκαία η ύπαρξη κατάλληλης βάσης δεδομένων (βιβλιοθήκης) πάνω στην οποία βασίζεται το σύστημα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ο τελικός στόχος είναι ο καθορισμός ζωνών διαχείρισης (management zones) εντός του αγροτεμαχίου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από κοινά εδαφολογικά ή αγρονομικά χαρακτηριστικά (Blackmore κ.α. 2003). Το τρίτο στάδιο αφορά την εφαρμογή των καλλιεργητικών εργασιών, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου. Απαιτείται η προσαρμογή του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού ώστε να υποστηρίζει την εφαρμογή μεταβλητών καλλιεργητικών φροντίδων (VRA – Variable Rate Application) σε κάθε ζώνη διαχείρισης του αγρού (Bowers κ.ά. 2001). Τέλος, στο τέταρτο στάδιο γίνεται ο προγραμματισμός της επόμενης χρονιάς και η αξιολόγηση των τεχνικών που εφαρμόστηκαν. Η χαρτογράφηση της παραγωγής και των διαφόρων παραμέτρων μπορεί να είναι σημείο

εκκίνησης για τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης αλλά και σημείο αξιολόγησης της προηγούμενης χρονιάς.

Οι τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, σύμφωνα και με τους Bhakta κ.ά. (2019) ανάλογα με το σκοπό που επιτελούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Τεχνολογίες συλλογής δεδομένων
- Τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων και λήψης αποφάσεων
- Τεχνολογίες μεταβλητής δόσης εφαρμογής

Αναλυτικότερα, οι τεχνολογίες συλλογής δεδομένων έχουν ως σκοπό την καταγραφή δεδομένων περιλαμβάνοντας τεχνολογίες, όπως τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης με τη χρήση των πολυφασματικών καμερών, εν κινήσει αισθητήρες και αισθητήρες μέτρησης της ποιότητας και της ποσότητας παραγωγής. Έπειτα οι τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων και λήψης αποφάσεων σχετίζονται με τεχνολογίες που αφορούν το φιλτράρισμα των δεδομένων και το μετασχηματισμό τους σε χρήσιμη πληροφορία για τους παραγωγούς και τους επαγγελματίες στο αγροτικό χώρο. Αυτές οι τεχνολογίες είναι τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (GIS), οι τεχνολογίες μηχανικής όρασης, μηχανικής μάθησης, τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και διαδικτύου των πραγμάτων. Στην τρίτη κατηγορία, οι τεχνολογίες μεταβλητής δόσης εφαρμογής περιλαμβάνουν τεχνολογίες που επιτρέπουν την εφαρμογή δόσεων εισροών όπως είναι το νερό, τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα και τα λιπάσματα με στόχο τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής ως προς το κόστος και την αποτελεσματικότητα. Στις τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνονται λιπασματοδιανομείς, αρδευτικά συστήματα και ψεκαστικά μηχανήματα μεταβλητής δόσης εφαρμογής.

2.2. Δορυφορικά Συστήματα Παγκόσμιας Πλοήγησης (GNSS)

Στην Γεωργία Ακριβείας πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν τα δορυφορικά συστήματα παγκόσμιας πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems). Απαρτίζονται από ένα πλήθος δορυφόρων, στο οποίο κάθε δορυφόρος εκπέμπει σήμα με τη θέση στην οποία βρίσκεται, και το οποίο χρησιμοποιείται από δέκτες δορυφορικών συστημάτων παγκόσμιας πλοήγησης για να υπολογίσουν την αντίστοιχη θέση τους στην επιφάνεια της γης. Μέχρι τώρα υπάρχουν τέσσερα δορυφορικά συστήματα παγκόσμιας πλοήγησης το GPS (Global Positioning System, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής), το Glonass (Ρωσία), το Galileo (Ευρωπαϊκή Ένωση) και το Beidou (Κίνα) (Perez-Ruiz and Upadhyaya, 2012).

Το Παγκόσμιο Σύστημα Καθορισμού Θέσης (Global Positioning System, GPS) αναπτύχθηκε από το Αμερικάνικο Υπουργείο Άμυνας το 1970 και αποτελείται από 24 συνολικά δορυφόρους. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του γεωγραφικού στίγματος οποιουδήποτε σημείου επάνω στην επιφάνεια της Γης. Οι δορυφόροι αυτοί βρίσκονται σε σταθερή τροχιά σε ύψος είκοσι χιλιάδων χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης, σε συγκεκριμένα γνωστά σημεία. Κάθε ένας από αυτούς τους δορυφόρους διαθέτει ατομικό ρολόι ακρίβειας και εκπέμπει ένα κωδικοποιημένο ηλεκτρομαγνητικό σήμα, το οποίο λαμβάνεται από τους δέκτες GPS που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης και χρησιμοποιείται για τον ακριβή υπολογισμό της γεωγραφικής θέσης του δέκτη. Το σήμα που εκπέμπεται από κάθε δορυφόρο περιέχει πληροφορίες για την ταυτότητα του δορυφόρου και την ακριβή χρονική στιγμή που έγινε εκπομπή. Αυτά τα σήματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός και μπορούν να προσληφθούν από οποιονδήποτε δέκτη GPS.

Ο δέκτης GPS λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα των δορυφόρων και υπολογίζει τη χρονική υστέρηση στο σήμα που δέχεται, την οποία και χρησιμοποιεί για να μετρήσει την απόσταση του από κάθε δορυφόρο. Όταν δέχεται σήματα από τρεις δορυφόρους τουλάχιστον, ο δέκτης χρησιμοποιεί την γεωμετρική ανάλυση για να καθορίσει τη γεωγραφική του θέση (στίγμα) στην επιφάνεια της γης, που εκφράζεται σε γεωγραφικό μήκος (longitude) και γεωγραφικό πλάτος (latitude). Όταν λαμβάνει σήματα και από τέταρτο δορυφόρο μπορεί να υπολογίσει και το υψόμετρο (altitude, elevation) θέσης που βρίσκεται. Η θέση που αναφέρεται από μια κεραία GPS δεν είναι απόλυτη επειδή πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το σήμα GPS. Τα σφάλματα δορυφορικού ρολογιού, οι ατμοσφαιρικές παρεμβολές και η καθυστέρηση διάδοσης είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της θέσης. Στην περίπτωση της γεωργίας ακριβείας τα συστήματα αυτά καταγράφουν το χωράφι χρησιμοποιώντας γεωγραφικές συντεταγμένες και εντοπίζουν και καθοδηγούν γεωργικά οχήματα μέσα σε ένα χωράφι (Φουντάς και Γέμτος, 2015).

Σήμερα υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα και την ακρίβεια του σήματος ενός δέκτη. Οι παράγοντες αυτοί εξαρτώνται από την κατασκευή και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε αυτόν, το περιβάλλον, το δορυφορικό σύστημα, και πολλές φορές καθιστούν τη χρήση του GPS αδύνατη. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του δέκτη είναι αρχικά η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στον δέκτη GPS, ο αριθμός των δορυφόρων από τους οποίους λαμβάνει σήματα ο δέκτης, καθώς και οι σχετικές θέσεις του, η επιλεκτική διαθεσιμότητα του συστήματος και η εγκατάσταση του συστήματος. Επίσης,

παράγοντες που επηρεάζουν είναι και οι παραμορφώσεις των δορυφορικών σημάτων που μπορεί να οφείλονται στην παρεμβολή αντικειμένων της περιοχής (κτίρια κλπ.), τα τροχιακά σφάλματα, οι λανθασμένες δηλαδή πληροφορίες που εκπέμπονται από τους δορυφόρους σχετικά με την τροχιά τους, οι επιδόσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας, όπως και η ανάκλαση του σήματος από αντικείμενα της περιοχής, πριν αυτό καταλήξει στον δέκτη.

Η ικανότητα διαφορικής διόρθωσης του σήματος που αποτελεί και αυτός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα και ακρίβεια του δείκτη αποτελεί ουσιαστικά έναν τρόπο εξάλειψης του σφάλματος που προκαλείται από τους διάφορους περιοριστικούς παράγοντες της ακρίβειας του GPS. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται επίγειος σταθμός με γνωστές συντεταγμένες και πομπό GPS ο οποίος υπολογίζει το βαθμό που επηρεάζεται το σήμα του δορυφόρου από τους διάφορες παράγοντες, με ακρίβεια από 30cm έως 1m. Το σύστημα GPS που χρησιμοποιείται με τη μέθοδο αυτή λέγεται διαφορικό GPS (Differential GPS, dGPS).

Η τεχνολογία κινηματικού σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic, RTK GPS) είναι άλλη μία τεχνική προσδιορισμού θέσης (Εικόνα 2). Το σύστημα RTK παρέχει ακρίβεια ακόμη και σε 1 cm. Ένας επίγειος σταθμός παρέχει τη διόρθωση σε πραγματικό χρόνο. Ο επίγειος σταθερός σταθμός λαμβάνει σήμα από τους δορυφόρους και εκπέμπει σήμα προς το δέκτη GPS που κινείται. Ο δέκτης εκτός από τα δεδομένα του σταθερού σταθμού, λαμβάνει και τις δικές του μετρήσεις που τις συνδυάζει, και συνεπακόλουθα επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης.



Εικόνα 2: Σταθερός επίγειος σταθμός RTK GPS

2.3. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Στη Γεωργία Ακριβείας απαιτείται, πριν τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση της καλλιέργειας, η επεξεργασία των διαθέσιμων πληροφοριών. Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια, όπου ο γεωργικός κλήρος είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στο παρελθόν, ο όγκος των πληροφοριών που απαιτείται να επεξεργαστεί κάποιος για να φτάσει σε μία απόφαση για τη διαχείριση του αγρού είναι πολύ μεγαλύτερος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στη δημιουργία συστημάτων τα οποία επεξεργάζονται με ταχύτητα γεωγραφικές πληροφορίες που αφορούν το έδαφος, τις καλλιέργειες, την ιστορία ενός αγρού, το κλίμα και άλλα με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνει οικονομικά και γρήγορα. Τα συστήματα αυτά είναι τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information Systems, GIS).

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι τα σημαντικότερα εργαλεία στη Γεωργία Ακριβείας (Φουντάς και Γέμτος, 2015). Πρόκειται για υπολογιστικά συστήματα σχεδιασμένα να υποστηρίζουν τη συλλογή, διαχείριση, επεξεργασία, ανάλυση, μοντελοποίηση και απεικόνιση δεδομένων που αναφέρονται στον χώρο (συνδεδεμένα με συντεταγμένες) και μεταβάλλονται στον χρόνο (Longley κ.ά., 2005). Σημαντική δυνατότητα αυτών των συστημάτων, που τα διαφοροποιεί από τη συνήθη απεικόνιση των δεδομένων, είναι η δυνατότητα συνδυασμού μη όμοιων δεδομένων σε μια κοινή βάση δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά περιέχουν πληροφορίες σχετικές με το ανάγλυφο της επιφάνειας της γης, τα χαρακτηριστικά και τα στοιχεία που την απαρτίζουν (National Research Council, 1997).

Σε ένα σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών εισάγονται πληροφορίες όπως η παραγωγή, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους, η περιεκτικότητα του εδάφους σε θρεπτικά συστατικά. Επίσης είναι δυνατόν να εισαχθούν παρατηρήσεις (π.χ. προσβολές από έντομα, ζιζάνια στον αγρό), ή άλλες πληροφορίες όπως ένας χάρτης των σημείων δειγματοληψίας του εδάφους. Με τη συστηματική συλλογή δεδομένων δημιουργείται ένας αριθμός χαρτών, που απεικονίζουν τη μεταβολή διαφόρων παραμέτρων του αγρού ή της καλλιέργειας. Η ανάλυση των παραπάνω δεδομένων οδηγεί στην εξεύρεση των εντοπισμένων παραγόντων περιοριστικών της παραγωγής και με βάση τα στοιχεία αυτά γίνεται προσπάθεια διόρθωσής τους. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί και με εφαρμογές εισροών με μεταβλητές δόσεις.

2.4. Τηλεπισκόπηση

Η Τηλεπισκόπηση περιγράφεται στο Manual of Photogrammetry της American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) (4η έκδοση 1980) ως «η τέχνη, η επιστήμη και η τεχνολογία που παίρνουμε αξιόπιστη πληροφορία για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον μέσω μιας διαδικασίας που καταγράφει, μετρά και ερμηνεύει εικόνες και πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και άλλα φαινόμενα» ενώ η Διεθνής Φωτογραμμετρική Εταιρεία (ISPRS) διατυπώνει ανάλογο ορισμό: «Η τέχνη, η επιστήμη, και η τεχνολογία για τη συλλογή αξιόπιστης πληροφορίας (χάρτες, διαγράμματα) για φυσικά αντικείμενα (έδαφος, κτίρια, αρχαιολογικούς χώρους, φυσικά διαθέσιμα κ.λ.π.) με χρήση φωτογραφίας ή με άλλους δέκτες ειδικότερα δε εκείνους που λειτουργούν από αεροπλάνα και διαστημόπλοια (Φτάκα, 2006).

Η Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) απαρτίζει μία από τις σημαντικότερες μεθοδολογίες για την παρακολούθηση των καλλιεργειών, καθώς καθίσταται δυνατή η διαρκής και ταχεία παρακολούθηση διαφόρων παραμέτρων καλλιέργειας. Στηρίζεται στην ταυτοποίηση και διαχωρισμό αντικειμένων (3-D) και επιφανειών (2-D) βάσει της αντανακλώμενης και εκλυόμενης ακτινοβολίας από αυτά στις διαφορές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Aggarwal κ.α. 2004).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατηγοριοποίησης της τηλεπισκόπησης. Ανάλογα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και του σκοπού που χρησιμοποιείται, διακρίνεται σε οπτική, θερμική και τηλεπισκόπηση μικροκυμάτων η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση ενεργών ή παθητικών αισθητήρων (Zhu κ.ά., 2018). Επίσης διακρίνεται σε επίγεια, εναέρια και δορυφορική (Babaeian κ.ά., 2019), με βάση τους φορείς των αισθητήρων τηλεπισκόπησης που μπορεί να είναι επίγεια ρομποτικά συστήματα, γεωργικά μηχανήματα, Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ), δορυφόρους και αεροπλάνα (Mulla, 2013).

Το 1929 έγινε η πρώτη εφαρμογή της τηλεπισκόπησης που αφορούσε την χαρτογράφηση εδαφών με τη χρήση αεροφωτογραφιών (Bauer, 1975). Στη συνέχεια εξελίχθηκε και έφτασε στη σημερινή εποχή να χρησιμοποιεί δορυφορική τεχνολογία, δίνοντας έτσι την ευκαιρία στους επιστήμονες και στους παραγωγούς να εξετάζουν τις καλλιέργειες τους πολύ πιο άμεσα. Η τηλεπισκόπηση μπορεί να μελετήσει τη χωρική θέση ενός αντικειμένου πάνω στην επιφάνεια της γης, το χρώμα, τη βιομάζα, το υψόμετρο, το ποσοστό της υγρασίας του εδάφους αλλά και της βλάστησης, τη θερμοκρασία, το μέγεθος και το σχήμα διάφορων στοιχείων αλλά και τη φασματική συμπεριφορά της χλωροφύλλης. Πολύ σημαντική είναι

επίσης η χρήση της για την εύρεση καλλιεργειών προσβεβλημένων από αρρώστιες. Ωστόσο χρήσιμη φαίνεται και για τους παραγωγούς αφού η συνεχής μελέτη των φυτών κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου μπορεί να τους βοηθήσει να προβλέψουν την τελική παραγωγή.

Στα πλεονεκτήματα εφαρμογής της τηλεπισκόπησης σε σχέση με άλλες μεθόδους συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε εργασίες υπαίθρου είναι η ταχεία μελέτη των επιφανειών, που κάνει πιο εύκολη τη σύγκριση μεταξύ ίδιων δεδομένων διαφορετικών όμως περιοχών, η λήψη πληροφοριών σε πολλά μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παρέχοντας τη δυνατότητα στον παραγωγό να εντοπίσει διαφορές μεταξύ των βιοφυσικών στοιχείων που δεν δύναται να το κάνει με γυμνό μάτι, αλλά και η παροχή συνεχών μετρήσεων δίνοντας και πάλι τη δυνατότητα στον παραγωγό να εντοπίσει διαφορές μεταξύ των βιοφυσικών στοιχείων που δεν είναι ικανός να το κάνει με γυμνό μάτι, αλλά και παρέχοντας με αυτό τον τρόπο την ευκαιρία για μελέτη διάφορων χαρακτηριστικών με σκοπό διαχρονικές συγκρίσεις.

Το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό της τηλεπισκόπησης όμως είναι το χαμηλό κόστος που απαιτεί αναλογιζόμενοι το πλήθος των αποτελεσμάτων που μπορούν να ληφθούν, δεδομένου ότι μπορούν να εξεταστούν και περιοχές με επίγειες μετρήσεις που θα απαιτούσαν και χρόνο αλλά και χρήμα για τις δειγματοληψίες τους. Από την άλλη όμως όπως είναι λογικό υπάρχουν και μειονεκτήματα της τηλεπισκόπησης. Ένα από αυτά και ίσως το σημαντικότερο είναι ότι η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (σκόνη, φωτισμός κτλ). Επίσης, πρόβλημα αποτελεί και το γεγονός ότι η επεξεργασία των δεδομένων απαιτεί γνώσεις ηλεκτρονικού υπολογιστή και διαφόρων λογισμικών (Φουντάς και Γέμτος, 2015).

Αισθητήρες Τηλεπισκόπησης

Στη γεωργία ακριβείας οι αισθητήρες τηλεπισκόπησης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους ενεργούς αισθητήρες και τους παθητικούς αισθητήρες. Οι ενεργοί αισθητήρες εκπέμπουν ακτινοβολία για να πραγματοποιήσουν τις μετρήσεις τους, σε αντίθεση με τους παθητικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούν την υπάρχουσα ακτινοβολία από τον ήλιο για να πραγματοποιήσουν τις μετρήσεις τους. Το μειονέκτημα με τους ενεργούς αισθητήρες είναι ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μπορεί να επηρεαστεί από άλλες ακτινοβολίες, ενώ στους παθητικούς αισθητήρες κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες συννεφιασμένων ημερών

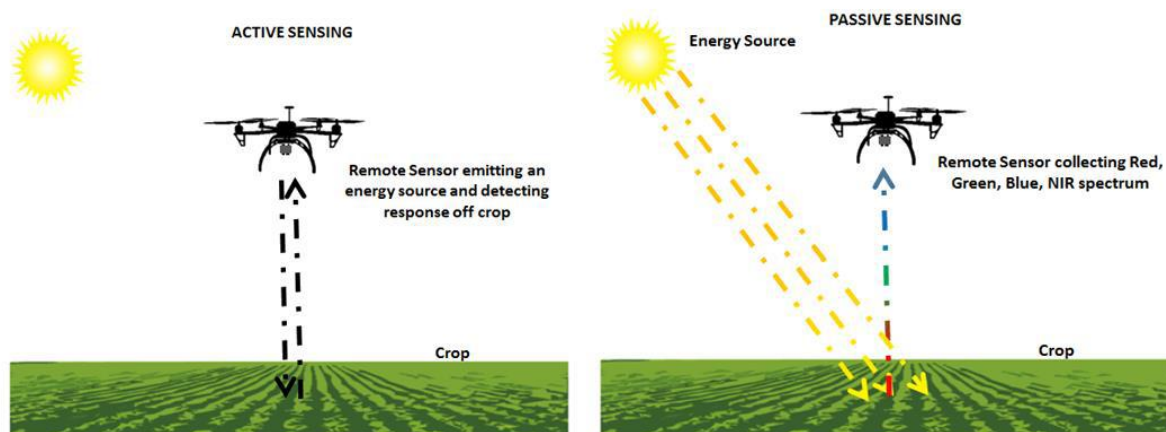
δε μπορούν να λάβουν σωστές μετρήσεις. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά συστήματα αισθητήρων που υπάρχουν στις δύο κατηγορίες:

Στους ενεργούς αισθητήρες εντάσσονται τα:

- Radar (Radio Detection and Ranging): χρησιμοποιεί έναν πομπό είτε σε ραδιοσυχνότητες είτε σε συχνότητες μικροκυμάτων για να εκπέμπονται παλμοί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ένα δέκτη για τη μέτρηση του χρόνου άφιξης της ανακλώμενης ακτινοβολίας.
- Lidar (Light Detection and Ranging): χρησιμοποιώντας ένα laser ενίσχυσης φωτός μεταδίδει έναν παλμό και ένα δέκτη με ευαίσθητους ανιχνευτές με σκοπό τη μέτρηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας του φωτός.
- Laser υψομέτρου: πρόκειται για ένα laser υψομετρητή, που μπορεί να μετρήσει το ύψος του μέσου πάνω από την επιφάνεια της γης και με αυτό τον τρόπο να προσδιορίσει την τοπογραφία της υποκείμενης επιφάνειας.
- Scattermeter: αποτελεί ένα υψηλής συχνότητας Radar μικροκυμάτων που είναι σχεδιασμένο ειδικά για τη μέτρηση της ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία χαρτών ταχύτητας του ανέμου επιφάνειας και κατεύθυνσης.

Στους παθητικούς αισθητήρες κατατάσσονται οι/τα:

- Φασματικές κάμερες: είναι κάμερες που έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν λήψη εικόνας σε διαφορετικά μήκη κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Διακρίνονται σε πολυφασματικές, υπερφασματικές και ultra-φασματικές ανάλογα με τη διακριτική ικανότητα των μηκών κύματος που διαθέτουν.
- Ραδιόμετρα: είναι τα όργανα που μετρούν ποσοτικά την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε κάποια ζώνη μηκών κύματος στο φάσμα.
- Φασματομέτρο: είναι μία διάταξη που έχει σχεδιαστεί για την ανίχνευση, τη μέτρηση και την ανάλυση σε φασματικό περιεχόμενο της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- Φωτογραφικό ραδιόμετρο: είναι ένα ραδιόμετρο που παρέχει μία δισδιάστατη συστοιχία εικονοστοιχειών (pixel) μέσω των οποίων παράγει μία εικόνα.
- Φασματοραδιόμετρο: αποτελεί ένα ραδιόμετρο ικανό να μετρήσει την ένταση της ακτινοβολίας σε πολλαπλές ζώνες μήκους κύματος.

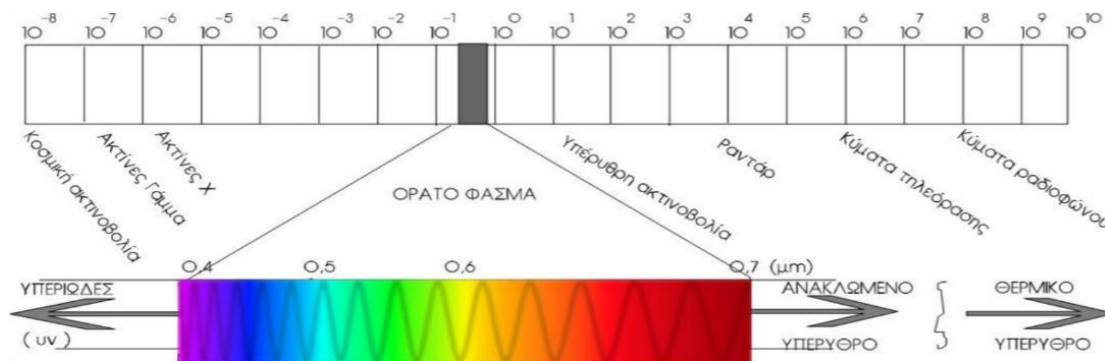


Εικόνα 3: Διάκριση μεταξύ ενεργητικής και παθητικής μέτρησης. Πηγή: www.cropcopter.co

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από κύματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, τα οποία διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζονται με πολλές διαφορετικές μορφές όπως, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως. Επίσης οι ακτίνες X αποτελούν μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.

Το ανθρώπινο μάτι είναι ευαίσθητο μόνο σε ένα πολύ μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 350 – 700 nm, και έτσι τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον δε γίνονται άμεσα αντιληπτά από το μάτι. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται από μήκος κύματος 0,01 Angstrom (γ ακτίνες) μέχρι 3×10^6 μέτρα που χαρακτηρίζει την υψηλή και χαμηλή συχνότητα των ραδιοφωνικών κυμάτων (Φουντάς και Γέμετος, 2015).



Εικόνα 4: Απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πηγή: Περάκης Κ. (2015).

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια (στην περίπτωση μας στην επιφάνεια της γης) υπάρχει περίπτωση ένα μέρος της να ανακλαστεί, ένα άλλο να διαχυθεί και ένα άλλο να απορροφηθεί και να μεταδοθεί στη συνέχεια σ' ένα άλλο μέσο (περίπτωση του νερού). Επειδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανιχνεύεται μόνον κατόπιν αντίδρασής της με οποιοδήποτε υλικό σώμα, οι τηλε-απεικονιστές δέχονται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια η οποία δεν προέρχεται κατευθείαν από την πηγή της (ήλιος), αλλά κατόπιν ανάκλασης, διάχυσης και μετάδοσης κατόπιν απορρόφησης της σε άλλα υλικά μέσα (σύννεφα, καθαρή ατμόσφαιρα, επιφάνεια ξηράς, επιφάνεια νερού κ.ά.)

Η κύρια πηγή μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στη γη είναι ο ήλιος αλλά υπάρχουν και πάρα πολλές τεχνητές πηγές ακτινοβολίας όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι παλιού τύπου τηλεοράσεις, οι φούρνοι μικροκυμάτων ακόμη και οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες, κ.ά. Ωστόσο τα διάφορα υλικά σώματα εκτός από το να ακτινοβολούν, μπορούν και να μεταφέρουν, να απορροφούν ή να ανακλούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Περάκης, 2015).

Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης επιτρέπουν τη λήψη εικόνων της επιφάνειας της γης σε διάφορες περιοχές μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι το μέσο με το οποίο οι πληροφορίες μεταδίδονται από ένα αντικείμενο σε έναν αισθητήρα. Οι πληροφορίες θα μπορούσαν να κωδικοποιηθούν στο περιεχόμενο συχνότητας, την ένταση ή την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Οι περισσότερες εικόνες τηλεπισκόπησης δίνουν δεδομένα για (Aggarwal κ.α. 2004):

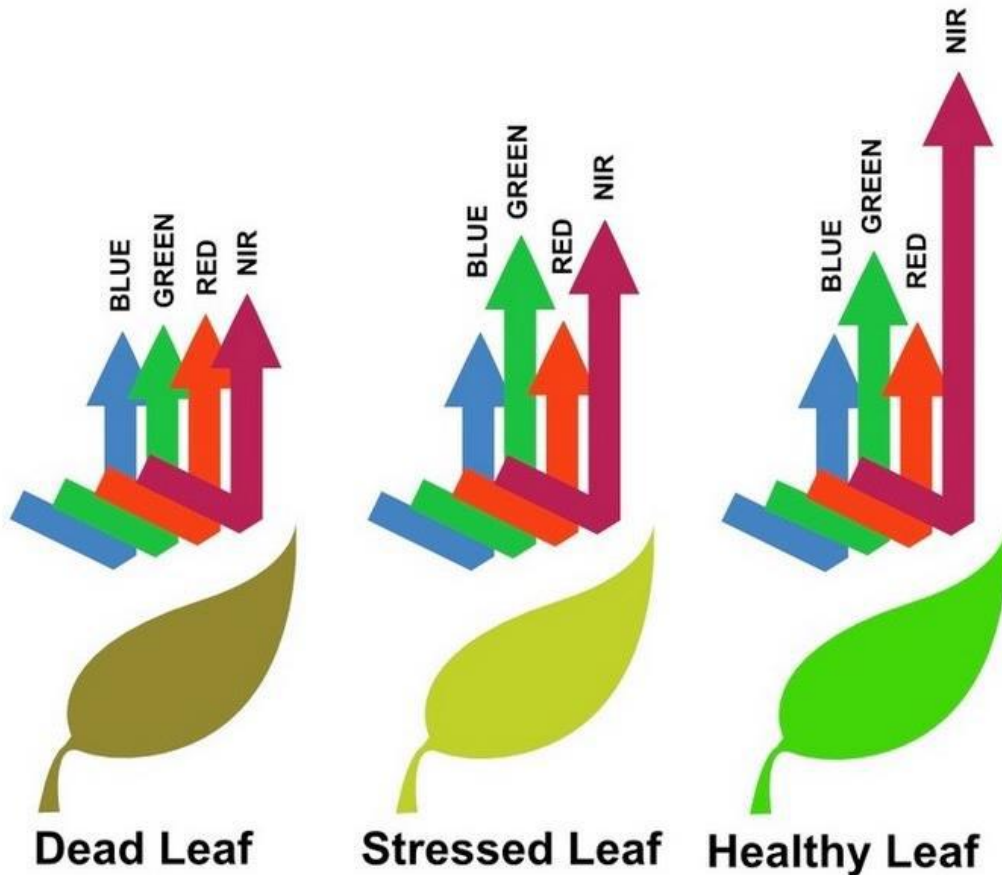
- Την ενέργεια που εκπέμπεται από την ίδια τη γήινη επιφάνεια, η οποία είναι στην περιοχή του μήκους κύματος των θερμικών υπέρυθρων.
- Την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στις ορατές και τις εγγύς υπέρυθρες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- Την ενέργεια που μετριέται στην περιοχή των μικροκυμάτων, η οποία είναι το μέτρο της σχετικής επιστροφής αυτού του εύρους από την επιφάνεια της γης.

Στην επιφάνεια της γης τα διάφορα αντικείμενα αντιδρούν διαφορετικά στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και με βάση το μήκος κύματος που προσπίπτει σε αυτά, εμφανίζονται σκοτεινότερα ή φωτεινότερα. Η κατανομή της ακτινοβολίας που ανακλά ή που εκπέμπει κάθε σώμα σε διαφορετικά μήκη κύματος είναι χαρακτηριστική της φυσικής και χημικής του σύστασης (Slater, 1980).

Δείκτες Βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης που παράγονται από τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω τηλεπισκόπησης, αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση φυσικών ή ανθρωπογενών αλλαγών στη χρήση και την κάλυψη της γης. Αυτοί οι δείκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση πολλών μοτίβων βλάστησης, όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας και η ποσότητα πράσινης βιομάζας, καθώς και για την αξιολόγηση της χρήσης του εδάφους και τη συντήρηση και ανάκτηση υποβαθμισμένων περιοχών (Okin, 2007).

Ένα υγιές φυτό αντανακλά περισσότερη ενέργεια υπέρυθρης ακτινοβολίας σε σύγκριση με ένα στρεσαρισμένο φυτό με χαμηλότερο ρυθμό φωτοσύνθεσης (Εικόνα 5). Όταν ένα φυτό βρίσκεται σε συνθήκες καταπόνησης ή προσβολής, οι οποίες εμποδίζουν την κανονική ανάπτυξη και την παραγωγή της χλωροφύλλης, τότε παρατηρείται λιγότερη απορρόφηση στις ερυθρές και μπλε περιοχές και η ποσότητα ανάκλασης στην ερυθρή ζώνη κυμάτων αυξάνεται (Govender κ.ά., 2007). Συνεπώς η φασματική ανάλυση τόσο της απορρόφησης όσο και της ανάκλασης ενός φυτού σε ορατά και σε υπέρυθρα μήκη κύματος μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την υγεία και την παραγωγικότητά του.



Εικόνα 5: Φυλλική Απορρόφηση της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

Η χαρακτηριστική φασματική υπογραφή των φυτών οδήγησε τη δημιουργία δεικτών βλάστησης. Οι δείκτες βλάστησης αποτελούν έναν τρόπο ποιοτικής αξιολόγησης εδαφικών επιφανειών που καλύπτονται από βλάστηση και βασίζονται σε μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι δείκτες βλάστησης αποτελούν ποσοτικές μέθοδους μέτρησης της ευρωστίας των φυτών οι οποίοι βασίζονται σε συνδυασμούς φασματικών περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με τη χρήση αριθμητικών πράξεων των τιμών ανάκλασης (Bannari κ.ά., 1995). Οι εκπομπές της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερες στο υπεριώδες, στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα, όταν μελετώνται υγιή φυτά (Glenn κ.ά., 2008, Xue and Su, 2017). Γι' αυτό οι δείκτες βλάστησης βασίζονται σε μετρήσεις σε αυτά τα φάσματα. Γενικότερα, οι δείκτες βλάστησης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία και άρα μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από τις απλές τιμές ανάκλασης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά ενδεικτικοί δείκτες βλάστησης. (Πηγή: Copernicus Global Land Service, 2021)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

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

Ο Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της πρασινάδας της βλάστησης και είναι χρήσιμος για την κατανόηση της πυκνότητας της βλάστησης και την αξιολόγηση των αλλαγών στην υγεία των φυτών. Το NDVI υπολογίζεται ως αναλογία μεταξύ των τιμών του κόκκινου (R) και του κοντινού υπέρυθρου (NIR).

Αποτελεί τον πιο σημαντικό δείκτη που χρησιμοποιείται στη γεωργία. Παίρνει τιμές από -1 (μη ύπαρξη φυτοκάλυψης) έως 1 (πλήρης φυτοκάλυψη). Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση χαρακτηριστικών, τη βιομάζα, τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης στα φύλλα, τη παραγωγικότητα των φυτών, τη κλασματική φυτοκάλυψη, τη συνολική βροχόπτωση. (Drissi κ.ά., 2009, Junges κ.ά., 2017)

Leaf Area Index (LAI)

$$LAI = (3.618 * EVI - 0.118)$$

Ο LAI εφαρμόζεται για την εκτίμηση της κάλυψης φυλλώματος και για την πρόβλεψη της ανάπτυξης και της απόδοσης των καλλιεργειών. Περίπου από 0 έως 3,5 κυμαίνονται συνήθως

οι υψηλές τιμές LAI. Παρόλα αυτά, όταν η εικόνα περιέχει σύννεφα και άλλα φωτεινά χαρακτηριστικά που παράγουν κορεσμένα εικονοστοιχεία, οι τιμές LAI μπορούν να ξεπεράσουν το 3,5. Ιδανικά, πρέπει να αποκοπούν τα σύννεφα και τα φωτεινά χαρακτηριστικά από την εικόνα πριν τον υπολογισμό του δείκτη. (Arnó κ.ά., 2013, Orlando κ.ά., 2016)

Enhanced Vegetation Index (EVI)

$$EVI = 2.5 * (NIR - Red) / (NIR + 6 * Red - 7.5 * Blue + 1)$$

Ο δείκτης EVI αναπτύχθηκε προκειμένου να βελτιώσει το δείκτη NDVI αρχικά για χρήση σε δεδομένα MODIS, βελτιστοποιώντας το σήμα βλάστησης σε περιοχές με υψηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI). Θεωρείται πιο χρήσιμο σε περιοχές με υψηλό LAI όπου το NDVI μπορεί να κορεστεί. Χρησιμοποιεί την μπλε περιοχή ανάκλασης για διόρθωση σημάτων φόντου εδάφους και για τη μείωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Ιδανικά, θα ήταν απαραίτητο να αποκοπούν τα σύννεφα και τα φωτεινά χαρακτηριστικά από την εικόνα πριν την επεξεργασία (Fraga κ.ά., 2014, Dold κ.ά., 2019).

NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)

$$NDRE = (RNIR - REDGE) / (RNIR + REDGE)$$

Ο Δείκτης NDRE μπορεί να εξαχθεί μόνο όταν ο αισθητήρας λαμβάνει εικόνες στο φάσμα του ερυθρού. Είναι ευαίσθητο στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φύλλα, τη μεταβλητότητα στην περιοχή των φύλλων και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι υψηλές τιμές του NDRE αντιπροσωπεύουν υψηλότερα επίπεδα περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη φύλλων από τις χαμηλότερες τιμές. Το έδαφος έχει συνήθως τις χαμηλότερες τιμές, τα μη υγιή φυτά έχουν ενδιάμεσες τιμές και τα υγιή φυτά έχουν τις υψηλότερες τιμές (Jorge κ.ά., 2019, Ustuner κ.ά., 2014).

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)

$$RVI = NIR / RED$$

Αποτελεί ένα δείκτη βλάστησης με τον οποίο επιχειρείται να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της φωτεινότητας του εδάφους χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή διόρθωσης της φωτεινότητας του εδάφους. Χρησιμοποιείται σε ξηρές περιοχές όπου η φυτική κάλυψη είναι χαμηλή. (Candiago κ.ά., 2015, Towers κ.ά., 2019)

Kc (Crop Coefficient)

Η έννοια του συντελεστή καλλιέργειας εισήχθη για πρώτη φορά από τον Jensen (Jensen, 1968) για να συσχετίσει η Εξατμισοδιαπνοή (ET) της επιθυμητής καλλιέργειας σε μια επιλεγμένη περίοδο με μια «δυναμική Εξατμισοδιαπνοή (ET)». Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) των Ηνωμένων Εθνών συνιστά τη μέθοδο μονής και διπλής καλλιέργειας συντελεστών για την εκτίμηση του ET από μοντέλα ET αναφοράς. Αυτό συμβαίνει επειδή οι συντελεστές καλλιέργειας ποικίλλουν έντονα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας (Dutta et al., 2016) και σε περιορισμένο βαθμό με το κλίμα (Gallardo et al., 1999), επομένως, θα μπορούσαν να μεταφερθούν σε νέες τοποθεσίες και κλίματα. Για τη μέθοδο του απλού συντελεστή καλλιέργειας, τα αποτελέσματα της διαπνοής της καλλιέργειας και της εξάτμισης του εδάφους συνδυάζονται σε μια ενιαία τιμή, ενώ στους διπλούς συντελεστές καλλιέργειας, αυτά τα δύο αποτελέσματα αντιμετωπίζονται χωριστά.

Ο ενιαίος συντελεστής καλλιέργειας μπορεί να ληφθεί από μετρήσεις ET καλλιέργειας και μετρήσεις ET αναφοράς όπως φαίνεται στην εξής εξίσωση:

$$KC = ETc / ETo$$

Kc : Crop Coefficient

ETc: Daily Crop Evapotranspiration [mm/day]

Eto: Daily Reference Evapotranspiration [mm/day]

Ο διπλός συντελεστής καλλιέργειας μπορεί να εκφραστεί με την εξής εξίσωση:

$$Kcb + Ke = Etc / Eto$$

Kcb: Βασικός συντελεστής καλλιέργειας

Ke: Συντελεστής εξάτμισης εδάφους

2.5. Ρομποτικά Συστήματα

Η ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγή σε συνδυασμό με την έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού οδήγησε στην ανάγκη για εντατικοποίηση της αυτοματοποίησης της γεωργίας και στην ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων προσαρμοσμένων στις ανάγκες της. Δεν υπάρχει τυπικός ορισμός για τον όρο «γεωργικά ρομποτικά συστήματα» και καμία επίσημη αναγνώριση για τα ρομποτικά συστήματα που θέτονται σε λειτουργία για γεωργικές εργασίες. Οι Lowenberg – DeBoer κ.ά. (2019) προτείνουν τον ακόλουθο ορισμό για ρομποτικό

σύστημα σε αγρό: μία κινητή, αυτόματη, λήψης αποφάσεων, μηχανοηλεκτρική διάταξη η οποία διεκπεραιώνει εργασίες φυτικής παραγωγής (π.χ. προετοιμασία εδάφους, σπορά, μεταφύτευση, διαχείριση ζιζανίων, συγκομιδή) υπό ανθρώπινη επιτήρηση, αλλά χωρίς άμεση ανθρώπινη επέμβαση. Οι Bechar και Vigneault (2016) ορίζουν τις γεωργικές ρομποτικές πλατφόρμες ως με αντίληψη προγραμματιζόμενες μηχανές που εκτελούν μία ποικιλία από αγροτικές εργασίες, όπως σπορά, μεταφύτευση, λίπανση και επιλεκτικά συγκομιδή καλλιεργειών (FAO, 2020). Τα τελευταία χρόνια, η προσπάθεια έχει επικεντρωθεί στο να δημιουργηθούν μικρότερα οχήματα όπου με την κατάλληλη ευφυΐα θα μπορούν να εργάζονται σε ένα μεταβλητό ή ημιφυσικό περιβάλλον (un-structured or semi-structured environment), όπως αυτό της γεωργίας. Τα οχήματα αυτά θα μπορούν να βοηθήσουν στην εκτέλεση πολύπλοκων και επαναλαμβανόμενων εργασιών, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών. Ο στόχος των σύγχρονων συστημάτων είναι η επέκταση των καλλιεργητικών τεχνικών σε υψηλότερη χωρική ανάλυση στο επίπεδο των φυτών και η αντιμετώπιση τους ως ξεχωριστές μονάδες. Σύμφωνα με τους Aravind κ.ά. (2017), τα γεωργικά ρομποτικά συστήματα διακρίνονται σε εναέρια και επίγεια, ενώ η σύγχρονη τεχνολογία, ανεξαρτήτως τύπου, επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ τους.

Εναέρια γεωργικά ρομποτικά συστήματα

Τα εναέρια ρομποτικά συστήματα ή ΣμηΕΑ, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μεταφορά αισθητήρων τηλεπισκόπησης, χάρις στην ευελιξία στο προγραμματισμό των πτήσεων και την προσιτή διαχείριση (Campos κ.ά., 2019). Χωρικά δεδομένα άμεσα ή έμμεσα συνδεδεμένα με χαρακτηριστικά φυτοκόμης ή πληροφορίες για σχεδιασμό και διαχείριση του αγρού ως προς τη διαθεσιμότητα νερού (Baluja κ.ά., 2012), ανίχνευση ασθενειών (Albetis κ.ά., 2017) και χαρακτηριστικά φυτοκόμης (Ballesteros κ.ά., 2015, Weiss και Baret, 2017, Mathews και Jensen 2013, Poblete-Echeverria κ.ά. 2017) μπορούν να καταγραφούν με έναν πρακτικό και αποτελεσματικό τρόπο. Ο De Castro κ.ά. (2018) ανέπτυξε μια ολοκληρωμένη αυτοματοποιημένη διαδικασία για χαρακτηρισμό της φυτοκόμης αμπελιών αυτοπροσαρμόσιμη σε διαφορετικές καλλιεργητικές συνθήκες, πραγματοποιώντας μία σημαντική βελτίωση στη διαδικασία χαρακτηρισμού της φυτοκόμης, και αποφεύγοντας τυχόν λάθη που προκύπτουν από μη αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Για την ανάπτυξη του σχεδίου πτήσης και την εκτέλεση του με ασφάλεια και έλεγχο τα Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών αποτελούνται από ένα πλήθος υποσυστημάτων, όπως αισθητήρες, ηλεκτροκινητήρες, λογισμικό (Shamishiri κ.ά., 2018).

Τα ΣμηΕΑ κατηγοριοποιούνται σε σταθερής πτέρυγας, σε τύπου ελικοπτέρου και σε πολυκόπτερα (με δύο ή παραπάνω στροφεία). Αντίστοιχες κατηγορίες υπάρχουν με βάση το ύψος λειτουργίας, αλλά και με το ωφέλιμο φορτίο. Στα πλεονεκτήματά τους έναντι των δορυφόρων κατατάσσονται η μεγαλύτερη ανάλυση των πληροφοριών που συλλέγουν, και η συλλογή δεδομένων ακόμα και σε συνθήκες νέφωσης. Ενώ ο μικρός χρόνος λειτουργίας και η μικρή έκταση που μπορούν να καλύψουν σε αντίθεση με τους δορυφόρους αποτελούν τα μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων (Mogli και Deepak 2018, Barbedo 2019, Tsouros κ.ά. 2019, Natu και Kulkami, 2016).



Εικόνα 6: Εναέριο Ρομποτικό Σύστημα

Η συνταγογράφηση χαρτών για εφαρμογή μεταβλητής δόσης, που βασίζεται σε εικόνες από drone ή από δορυφόρους έχει αποδειχθεί αποτρεπτική, διότι είναι αρκετά δαπανηρή, έχει τεράστια logistics και χρονικές καθυστερήσεις για τον παραγωγό. Αυτό συμβαίνει γιατί οι καιρικές συνθήκες δεν είναι πάντα ευνοϊκές για την αρχική λήψη των φωτογραφιών, υπάρχει καθυστέρηση στο εργαστήριο στην περεταίρω επεξεργασία τους ως την τελική μορφή, και μέχρι ο παραγωγός να πάρει την συνταγή του χάρτη για να κάνει την διεργασία που απαιτείται, έχουν αλλάξει αρκετά οι αρχικές συνθήκες που δημιουργήθηκαν οι χάρτες.

Τα συστήματα που βασίζονται σε αισθητήρες προτιμώνται γενικά, καθώς είναι πιο εύχρηστα και εφαρμόζουν τις εισροές σε πραγματικό χρόνο για να καλύψουν καλύτερα και αποτελεσματικότερα τις ανάγκες των καλλιεργειών. Ωστόσο είναι ακριβά, χρειάζονται βαθμονόμηση και συνήθως προορίζονται συγκεκριμένα για έναν τύπο κατεργασίας (μόνο λίπανση ή μόνο ψεκασμός). Επιπλέον, η ακρίβεια τους στην κατανόηση των διαφόρων μεταβλητών του πεδίου τίθεται υπό αμφισβήτηση. Για παράδειγμα όταν ένα σύστημα, που βασίζεται σε αισθητήρες που μετράνε την ανάκλαση της χλωροφύλλης, δεν έχει καλές τιμές

μέτρησης υποθέτει ότι και η καλλιέργεια δεν πάει καλά. Κατά συνέπεια εφαρμόζονται και λιγότερες εισροές (πχ λίπασμα). Αν όμως η συγκεκριμένη περιοχή είναι βραχώδης ή πλημμυρισμένη, και όχι λιγότερο παραγωγική όπως μέτρησε το σύστημα, το λίπασμα θα πάει εντελώς χαμένο και η γεωργία ακριβείας όχι απλά δεν εφαρμόζεται αλλά βγαίνει εντελώς ηττημένη.

Επίγεια γεωργικά ρομποτικά συστήματα

Σύμφωνα με τους Blackmore κ.ά. (2004), τα επίγεια γεωργικά ρομποτικά συστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, στα μικρά ρομποτικά συστήματα και στους τροποποιημένους γεωργικούς ελκυστήρες. Ο όρος τροποποιημένοι γεωργικοί ελκυστήρες σημαίνει ότι στους γεωργικούς ελκυστήρες εγκαταστάθηκαν συστήματα, όπως για παράδειγμα σύστημα μηχανικής όρασης, ή σύστημα αυτόματης οδήγησης, τα οποία επιτρέπουν τη λειτουργία τους αυτοματοποιημένα, χωρίς χειριστή, σε αντίθεση με την πρώτη κατηγορία, τα οποία κατασκευάστηκαν εξ ολοκλήρου για να λειτουργούν ως ρομπότ.



Εικόνα 7: Τροποποιημένοι ελκυστήρες με εγκατεστημένο το σύστημα μηχανικής όρασης της εταιρίας 'Augmenta'



Εικόνα 8: Ρομποτική πλατφόρμα 'Dino', για μηχανικό εντοπισμό και αφαίρεση ζιζανίων

Οι Blackmore κ.ά. (2001), και οι Fountas κ.ά. (2007) αναφέρουν ότι τα ρομποτικά οχήματα θα πρέπει να έχουν μικρό μέγεθος, μικρό βάρος, αυτόνομη συμπεριφορά σε απρόοπτες καταστάσεις, και ενεργειακή αυτονομία. Μικρό βάρος σημαίνει ότι τα συστήματα απαιτούν χαμηλότερη ενέργεια και προκαλούν λιγότερη συμπίεση του εδάφους. Παράλληλα, η πλατφόρμα πρέπει να έχει μικρό μέγεθος και για λόγους ασφαλείας, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερη ακρίβεια κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των εργασιών και να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία μέσα στο χωράφι, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι χρονικές καθυστερήσεις στροφής.

Η προσέγγιση της αντιμετώπισης των καλλιεργειών και του εδάφους επιλεκτικά, ανάλογα με τις ανάγκες τους από μικρά αυτόνομα ρομπότ είναι το φυσικό επόμενο βήμα στην εξέλιξη της γεωργίας ακριβείας (Φουντάς και Γέμτος, 2015). Παράδειγμα τέτοιου ρομπότ είναι το «Dino» (Εικόνα 8), το οποίο είναι ένα από τα εύχρηστα ρομπότ της Naïo Technologies (Γαλλία), που έχει κατασκευάσει για την γεωργία. Το ρομπότ είναι εξειδικευμένο στο μηχανικό εντοπισμό και αφαίρεση ζιζανίων σε κηπευτικές καλλιέργειες. Αναγνωρίζει τα ζιζάνια στις σειρές των φυτών και δύναται να κάνει διάκριση μεταξύ του εμπορικού φυτού και του ζιζανίου με χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) εφαρμοσμένη με αναγνώριση από εικόνα. Είναι ήδη σε παραγωγή, έχοντας πουλήσει πάνω από 100 τεμάχια σε γεωργούς υψηλής αξίας κηπευτικών καλλιεργειών. Η μηχανική αφαίρεση ζιζανίων περιορίζει το κόστος και τα ρίσκα που σχετίζονται με τη χρήση ζιζανιοκτόνων. Επίσης, το κόστος εργασίας μειώνεται, καθώς ένας άνθρωπος μπορεί ταυτόχρονα να ελέγχει τρία από αυτά (Bloch, 2019). Τα επίγεια ρομποτικά συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί για να φέρουν αισθητήρες για την παρακολούθηση της καλλιέργειας, πιο συγκεκριμένα για τον έλεγχο της πορείας ανάπτυξης, την εκτίμηση της παραγωγής, την προσβολή από εχθρούς και ασθένειες, καθώς και την εκτέλεση καλλιεργητικών εργασιών, όπως σπορά, ψεκασμός, λίπανση, κατεργασία εδάφους, συγκομιδή (Bechar and Vigneault, 2016).

2.6. Μηχανική Όραση

Η γεωργία ακριβείας σήμερα χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες της μηχανικής όρασης, καθώς κάνει εφικτή την παρακολούθηση της ανάπτυξης των φυτών με πολύ ταχύτερο τρόπο από οποιαδήποτε χειροκίνητη διαδικασία, επιτρέποντας την επίβλεψη με αντικειμενικά και επαναλαμβανόμενα κριτήρια. Η μηχανική όραση είναι ένα σύνολο από τεχνικές που σχετίζονται με την τεχνητή νοημοσύνη, των οποίων ο στόχος είναι να επιτρέψουν σε έναν

υπολογιστή να «καταλάβει» μία εικόνα ή ακριβέστερα την ουσιαστική περιγραφή φυσικών αντικειμένων από τις εικόνες (Ballard & Brown, 1982).

Είναι ένας σχετικά νέος τομέας, ο οποίος ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1960. Τα τελευταία χρόνια, η μηχανική όραση έχει γίνει μία τεχνολογία κλειδί σε μία ευρεία ποικιλία εφαρμογών του πραγματικού κόσμου, οι οποίες περιλαμβάνουν και την ιατρική απεικόνιση με τη φωτογραμμετρία, την οπτική αναγνώριση χαρακτήρων (OCR: Optical Character Recognition), εν σειρά ποιοτική ανίχνευση και έλεγχος, επιτήρηση, αναγνώριση δαχτυλικού αποτυπώματος και αυτόματη οδήγηση.

Μηχανική Όραση στη Γεωργία Ακριβείας

Τα συστήματα μηχανικής όρασης αρχίζουν να εφαρμόζονται δυναμικά σε εργασίες αυτόματης ανίχνευσης στην γεωργία και επεξεργασία τροφίμων. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας κάνει εφικτή την παρακολούθηση της ανάπτυξης των φυτών με πολύ ταχύτερο τρόπο από οποιαδήποτε χειροκίνητη διαδικασία, επιτρέποντας την επίβλεψη με αντικειμενικά και επαναλαμβανόμενα κριτήρια. Η μηχανική όραση βασίζεται σε ψηφιακές φωτογραφίες και προσπαθεί να μιμηθεί την ανθρώπινη αντίληψη.

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της μηχανικής όρασης στη γεωργία είναι η μετασυγκομιστική σε σειρά ανίχνευση και κατάταξη φρούτων και λαχανικών. Αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν συνήθως χειροκίνητα, από ανθρώπους, και σε διαδικασίες ακριβές, αργές και κουραστικές και οι οποίες είναι «εκτεθειμένες» και επιρρεπείς σε ανθρώπινα λάθη (Paulus κ.ά., 1997). Σήμερα αρκετές βιομηχανίες ανά τον κόσμο κατασκευάζουν διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία πρώτη βαθμολόγηση και κατάταξη των φρούτων με βάση τα χαρακτηριστικά τους, όπως το μέγεθος, το χρώμα, η υφή και το βάρος. Τα συστήματα μηχανικής όρασης μπορούν να αυτοματοποιήσουν τέτοιες εργασίες με ταυτόχρονη αύξηση της επαναληψιμότητας, την ταχύτητα ανίχνευσης και μειώνοντας το κόστος. Ο Sun (2016) έχει πραγματοποιήσει μία εκτενή μελέτη για τις διαφορετικές τεχνολογίες και τεχνικές, παρουσιάζοντας όχι μόνο τις τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα, αλλά και αναγράφοντας και τις μελλοντικές προκλήσεις.

Ένας τομέας που ερευνάται αυτή την περίοδο είναι η παρακολούθηση στον αγρό όπου η μηχανική όραση μπορεί να εφαρμοστεί για τη ανίχνευση της κατάστασης του φυτού. Αυτές οι εφαρμογές πρόσθεσαν τις δυσκολίες του μη ελεγχόμενου φωτισμού και του περιβάλλοντος σε σύγκριση με την σε σειρά ανίχνευση (εργαστηριακά). Οι συνθήκες φωτισμού μπορεί να

αλλάζουν (π.χ. από ηλιοφάνεια σε συννεφιά) κατά τη διάρκεια του ίδιου σταδίου παρακολούθησης, αλλάζοντας έτσι το χρώμα και το σχηματισμό της εικόνας.

Μία από τις πρώτες εφαρμογές της μηχανικής όρασης στον αγρό ήταν για τον έλεγχο ζιζανίων (Lee κ.ά. 1996). Έτσι, οι κύριες περιοχές της Γεωργίας Ακριβείας που έχει αναπτυχθεί η μηχανική όραση περιλαμβάνουν την ανίχνευση γραμμών για αυτόματη πλοήγηση και ανίχνευση καρπών για εκτίμηση της παραγωγής, ρομποτική συγκομιδή και ανίχνευση ζιζανίων. Η ανίχνευση ζιζανίων θα συμβάλλει στη μείωση των φυτοφαρμάκων, βελτιώνοντας το οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της καλλιέργειας.

Η εφαρμογή τεχνολογιών μηχανικής όρασης για την παρακολούθηση της κατάστασης του αμπελώνα είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα για τη Διαχείριση Χωρικών Στοιχείων (Site Specific Management). Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνικές που σχετίζονται με την παρακολούθηση της κατάστασης της καλλιέργειας είναι η Εισροή Μεταβλητών Δόσεων (VRA), η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στη βελτιστοποίηση της δόσης στη λίπανση, τη χρήση φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων. Ένα σύστημα αναπτύχθηκε από τους Berenstein κ.ά. (2010). Η μεθοδολογία που προτείνουν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομόνωση των σταφυλών και του φυλλώματος και για την με ακρίβεια εφαρμογή φυτοφαρμάκων. Ελλείψεις σε θρεπτικά μπορούν επίσης να ανιχνευθούν και να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση της ανάλυσης εικόνων. Έλλειψη σε κάλλιο μπορεί να προσδιοριστεί (Rangel κ.ά. 2016) σε φύλλα αμπελού με τη χρήση (k-nearest neighbor (KNN)) αλγορίθμου κατάτμησης εικόνων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελείται από την ανάλυση εικόνων φύλλων που λαμβάνονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Η παρακολούθηση της φυτοκόμης δεν χρησιμοποιείται μόνο για εφαρμογές μεταβλητών δόσεων (VRA), αλλά επίσης σαν μία ένδειξη της κατάστασης και της παραλλακτικότητας του αμπελώνα. Η αξιολόγηση εικόνων που λαμβάνονται χειροκίνητα για την τμηματοποίηση των σταφυλών, των κενών, των κλαδιών και των φύλλων αποτελεί αυτή την περίοδο αντικείμενο έρευνας (Diago κ.ά., 2016). Πρόσφατα, χάρις στην πρόοδο των δυνατοτήτων της υπολογιστικής και των βελτιωμένων αισθητηρίων εικόνων στα έξυπνα κινητά, η ανάπτυξη εφαρμογών με αντικείμενο την αμπελοργία ακριβείας αποτελεί μία ακόμα επιλογή (Aquino κ.ά., 2015, De Bei κ.ά. 2018, Fuentes κ.ά., 2012.).

2.7. Εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις (VRA)

Ο μόνος τρόπος να κατανοήσουμε όλες αυτές τις μεταβλητές των καλλιεργειών, είναι με τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων, που θα μας επιτρέψουν καλύτερες γεωργικές στρατηγικές για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και την αντιμετώπιση των οικονομικών επιβαρύνσεων που αντιμετωπίζουν οι αγρότες. Μια τέτοια στρατηγική είναι η εφαρμογή των εισροών (λιπασματοδιανομή και φυτοφάρμακα) σε μεταβλητές δόσεις στην καλλιέργεια ώστε το κάθε φυτό να παίρνει μόνο ό,τι χρειάζεται, σε αντίθεση με τον συμβατικό τρόπο που εφαρμόζεται παντού η ίδια ποσότητα. Για την εφαρμογή μεταβλητών δόσεων των εισροών (Variable Rate Application – VRA), οι μόνες πρακτικές που ήταν διαθέσιμες μέχρι σήμερα ήταν τα συστήματα που βασίζονται σε υπάρχουσα χαρτογράφηση ή σε συστήματα με αισθητήρες.

Η εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις αποτελούν το μέσο υλοποίησης της Γεωργίας Ακριβείας. Ανάλογα με τη χωρική παραλλακτικότητα (Roberson, 2000) δίνεται η δυνατότητα να προσαρμόζεται δυναμικά η δόση εφαρμογής της εισροής, η οποία μπορεί να είναι νερό, λίπασμα, σπόρος, φυτοπροστατευτικά προϊόντα.

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνολογίες για την εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις οι οποίες είναι: με βάση χάρτες και με βάση τη χρήση αισθητήρων.

- Η εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις με βάση χάρτη, προσαρμόζει το ρυθμό εφαρμογής με βάση έναν ηλεκτρονικό χάρτη. Με τη χρήση της θέσης πεδίου από έναν δέκτη GPS και έναν χάρτη συνταγογράφησης του επιθυμητού ρυθμού, η συγκέντρωση της εισόδου των εισροών αλλάζει, καθώς ο εφαρμοστής κινείται μέσω του πεδίου.
- Η εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις που βασίζεται σε αισθητήρες δεν απαιτεί χάρτη ή σύστημα εντοπισμού θέσης. Οι αισθητήρες στο εφαρμογέα μετρούν τις ιδιότητες του εδάφους ή τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας "εν κινήσει." Με βάση αυτήν τη συνεχή ροή πληροφοριών, ένα σύστημα ελέγχου υπολογίζει τις ανάγκες εισόδου του εδάφους ή των φυτών και μεταφέρει τις πληροφορίες σε έναν ελεγκτή, ο οποίος παραδίδει την είσοδο στη θέση που μετρείται από τον αισθητήρα. Επειδή η κάθε μέθοδος ξεχωριστά έχει μοναδικά οφέλη αλλά και περιορισμούς, ορισμένα συστήματα έχουν αναπτυχθεί για να επωφεληθούν από τα οφέλη και των δύο μεθόδων.

Η ακρίβεια στη διαχείριση των αγροκτημάτων, η σωστή εφαρμογή εισροών στον ακριβή χρόνο και με ακριβείς ποσότητες μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην αύξηση των αποδόσεων. Αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι χάρη στην εφαρμογή Γεωργίας Ακριβείας επιτυγχάνεται μείωση των εισροών, χωρίς να υπάρχει υποβάθμιση στην παραγωγή και ποιότητα των συγκομιζόμενων προϊόντων τόσο ως προς τη σπορά και την κατεργασία του εδάφους, τον ψεκασμό φυτοπροστατευτικών προϊόντων και τη λίπανση. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η λίπανση με χρήση μεθόδων και τεχνολογιών μεταβλητής δόσης έχει επιδείξει σημαντικά οφέλη ως προς το κόστος της καλλιέργειας.

Οι Yu κ.ά. (2020) σημείωσαν μείωση της λίπανσης αζώτου κατά 16,9% συγκριτικά με τη συμβατική λίπανση σε καλλιέργεια βαμβακιού, όταν χρησιμοποίησαν μεταβλητή δόση βασιζόμενοι σε αισθητήρες φυλλώματος, ενώ αναφορικά με την κατεργασία εδάφους ακριβείας, οι Gogucu κ.ά. (2001) ανέφεραν ότι με εφαρμογή μεταβλητού βάθους κατεργασίας μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου έως 28%. Τέλος, οι Campos κ.ά. (2019) πέτυχαν εξοικονόμηση έως 38% σε ποσότητα ψεκαστικού υγρού σε καλλιέργειες αμπελιού όταν πραγματοποίησαν ψεκασμό με βάση ζώνες διαχείρισης που είχαν καθορίσει με χρήση εναέριας τηλεπισκόπησης.

Ζώνες διαχείρισης

Η διαμόρφωση ζωνών διαχείρισης στον αγρό που έχουν ως στόχο την εφαρμογή των εισροών με μεταβλητές δόσεις αποτελεί τη βάση ενός συστήματος Γεωργίας Ακριβείας. Ως ζώνη διαχείρισης μπορεί να οριστεί μία επιμέρους υπό-περιοχή ενός πεδίου που έχει σχετικά ομοιογενείς παράγοντες περιορισμού της απόδοσης, χαρακτηριστικά εδάφους, τοπίο και μπορεί να διαχειριστεί ομοιόμορφα. Μία ιδιότητα ή ένας συνδυασμός ιδιοτήτων πεδίου συνήθως επιτρέπει την οριοθέτηση των Ζωνών Διαχείρισης, που ορίζονται ως τμήματα του πεδίου με ομοιογενείς ιδιότητες που μπορούν να αντιμετωπιστούν ομοιόμορφα.

Η δημιουργία ζωνών διαχείρισης με βάση τοπογραφικά στοιχεία και εδαφικές ιδιότητες συχνά συλλαμβάνει την παραλλακτικότητα στην παραγωγή λόγω της διαφοροποίησης σε διαθέσιμο για τα φυτά νερό και επομένως στο δυναμικό παραγωγής. Ο κατάλληλος αριθμός ζωνών παραγωγής διαφέρει από έτος σε έτος και σχετίζεται με τις καιρικές συνθήκες και το είδος της καλλιέργειας. Οι ζώνες διαχείρισης χρησιμοποιούνται συχνά για να δείξουν περιοχές του αγρού με όμοιο δυναμικό παραγωγής.

Η δημιουργία των ζωνών διαχείρισης γίνεται αξιολογώντας όλες τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες για τον αγρό όπως είναι: φυσικές ιδιότητες του εδάφους, δυνατότητες διαχείρισης του παραγωγού, πιθανό κέρδος του παραγωγού.

Οι ζώνες διαχείρισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή θέσεων για λήψη δειγμάτων εδάφους. Επίσης, περιοχές του αγρού με όμοιες ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση της παραγωγής με εδαφικούς και τοπογραφικούς παράγοντες για τη δημιουργία προτύπων ανάπτυξης καλλιεργειών. Πιο συγκεκριμένα, για τη δημιουργία των ζωνών διαχείρισης χρησιμοποιούνται διάφορες πληροφορίες όπως αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες του αγρού με και χωρίς βλάστηση, το περίγραμμα του αγρού, τοπογραφικοί και εδαφικοί χάρτες, χάρτες παραγωγής, δείκτες βλάστησης, δεδομένα από εδαφολογικές αναλύσεις, ανωμαλίες του αγρού, προσβολές από έντομα και περιοχές στράγγισης.

Σχετικά με το μέγεθος των ζωνών διαχείρισης, το ελάχιστο μέγεθος καθορίζεται από τη δυνατότητα του παραγωγού να διαφοροποιήσει τις εισροές σε έναν αγρό. Αυτό είναι συνάρτηση του μεγέθους του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί. Όσο αφορά τον αριθμό ζωνών διαχείρισης, αυτός εξαρτάται από το μέγεθος του αγρού, την παραλλακτικότητά του και τη δυνατότητα του παραγωγού να διαφοροποιήσει τις εισροές. Παράλληλα, τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι ζώνες διαχείρισης είναι: η σταθερότητα στο χρόνο, η ευκολία στην οριοθέτηση, η συσχέτιση με την παραγωγή και το χαμηλό κόστος δημιουργίας.

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της οριοθέτησης των ζωνών διαχείρισης γίνεται με διάφορα κριτήρια. Σε αυτά περιλαμβάνονται το μέτρο της μείωσης της διακύμανσης σε κάθε ζώνη διαχείρισης, ή αναφορικά με τη μεταβαλλόμενη δόση λιπάσματος, η αποδοτικότητα που υπολογίζεται με την ανάλυση κόστους – οφέλους με βάση το χρησιμοποιούμενο λίπασμα εισόδου και την αποκτηθείσα απόδοση. Σύμφωνα με την τρέχουσα πρακτική, οι ζώνες διαχείρισης δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου.

Ωστόσο, ενώ οι περισσότερες ιδιότητες του εδάφους είναι αρκετά σταθερές με την πάροδο του χρόνου, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι καλλιεργείες μπορεί να είναι περιορισμένες με διαφορετικούς τρόπους στην ίδια τοποθεσία. Παροδικοί παράγοντες, όπως μετεωρολογικά περιστατικά και αγρονομική διαχείριση, είναι παραδείγματα τέτοιων επιρροών. Η πρόσφατη έρευνα υποδηλώνει ότι πρέπει να εφαρμοστεί μια δυναμική προσέγγιση για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας τόσο εντός όσο και μεταξύ των εποχών.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

Η μακροχρόνια αναζήτηση για αυτοματοποιημένες λύσεις για τη βελτίωση και την πιο αποτελεσματική χρήση των γεωργικών εφαρμογών, έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή αρκετών λύσεων για την εφαρμογή νερού με χωρική διόρθωση. Απαιτούνται συστήματα άρδευσης που μπορούν να εφαρμόζουν μεταβλητή δόση νερού, για μια χωρική διαχείριση των υδάτων ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα της καλλιέργειας.

Η διαχείριση της άρδευσης μέσω των φυτών δείχνει την πολυπλοκότητα στην απεικόνιση των συμπτωμάτων της έλλειψης νερού, τα οποία είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα προβλήματα ανακαλύπτονται όταν είναι πολύ αργά, δηλαδή όταν τα αποτελέσματά τους έχουν ήδη θέσει σε κίνδυνο την παραγωγή και την ποιότητα του προϊόντος. Συνήθως, αυτά τα συμπτώματα σχετίζονται με τον χρωματικό τόνο των φύλλων, το στρίψιμο καθώς και την γωνία των φύλλων. Ωστόσο, μπορεί να διαπιστωθεί συσχέτιση μεταξύ των τιμών NDVI και του βασικού συντελεστή καλλιέργειας (Kc) (Kamble, Kilic, & Hubbard, 2013), καθώς υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των εκτιμώμενων Kc (KcNDVI) και παρατηρήσιμο Kc (Allen, κ.α. 1998/FAO-56) σε καλλιέργειες καλαμποκιού και σόγιας για καθοδήγηση των χρόνων άρδευσης στην εποχή.

Ο δείκτης NDVI παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του φυλλώματος υποδεικνύοντας στην ουσία πόσο πράσινο και πόσο πυκνό είναι το φύλλωμα. Η υγιής έντονη βλάστηση παρουσιάζει χαμηλή ανάκλαση στο ορατό και υψηλή στο υπεριώδες και άρα υψηλή τιμή NDVI. Σύμφωνα με τον Δαλέζιο (2015), η βαθμιαία μείωση του δείκτη NDVI υποδηλώνει καταπόνηση που υπέστηκε η καλλιέργεια από έλλειψη νερού ή υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες που οδηγούν σε μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης και τελικά σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των φυτών.

Ο χρόνος άρδευσης είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων βαμβακιού και ποιότητας στο χνούδι. Οι Ken Stone, Eric D. Billman, Philip J. Bauer, Gilbert Sigua πραγματοποίησαν μια διετή (2017-2018) έρευνα, για την αξιολόγηση δύο μεθόδων προγραμματισμού μεταβλητής δόσης άρδευσης. Οι μέθοδοι ήταν: (1) ομοιόμορφη διαχείριση άρδευσης με βάση την εβδομαδιαία χρήση του νερού των καλλιεργειών και (2) μέσω χωρικών συντελεστών καλλιέργειας που προέρχονται από τον Δείκτη Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (NDVI). Συνέκριναν τις αποδόσεις του βαμβακιού και την αποδοτικότητα χρήσης νερού χρησιμοποιώντας τις δύο μεθόδους προγραμματισμού

άρδευσης σε δύο διαφορετικές πυκνότητες φύτευσης (5 και 11,5 φυτών m² για να παρέχουν διαφορετικές μετρήσεις NDVI και απαιτήσεις σε νερό).

Το 2017, δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές στις αποδόσεις του βαμβακιού λόγω των επαρκών βροχοπτώσεων κατά την καλλιεργητική περίοδο που απαιτούσαν μόνο τρία ποτίσματα. Το 2018, σημειώθηκαν χαμηλότερες βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και χρειάστηκαν οκτώ ποτίσματα με τις αποδόσεις του βαμβακιού στις δύο αρδευτικές επεξεργασίες να είναι σημαντικά υψηλότερες από την επεξεργασία με βροχή. Οι αποδόσεις της χρήσης νερού δεν διέφεραν σημαντικά για τις δύο μεθόδους άρδευσης. Η πυκνότητα φύτευσης είχε μικρή επίδραση στις αποδόσεις βαμβακιού, στο βάθος άρδευσης, στην αποδοτικότητα χρήσης νερού και στην ποιότητα των ινών του βαμβακιού.

Τα αποτελέσματα τους υποδεικνύουν ότι οι τιμές του συντελεστή καλλιέργειας που προέρχονται από το NDVI, ήταν εξίσου αποτελεσματικές για τη συνταγογράφηση εφαρμογών μεταβλητής δόσης άρδευσης με την ομοιόμορφη μέθοδο άρδευσης. Η μέθοδος άρδευσης με συντελεστή καλλιέργειας που προέρχεται από το NDVI, απέδειξαν ότι είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση της άρδευσης και την ανάπτυξη συνταγών μεταβλητής δόσης άρδευσης.

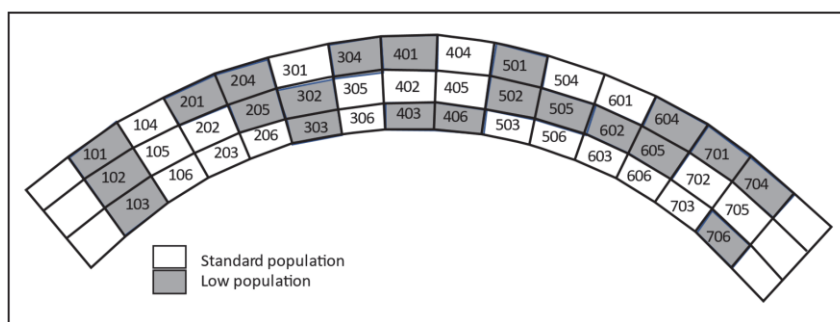
Οι παραγωγοί την σημερινή εποχή δεν διαθέτουν εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για να βοηθήσουν στον προσδιορισμό του χρόνου και της ποσότητας των γεγονότων άρδευσης, αντ'αυτού λαμβάνουν αποφάσεις με βάση οπτικών αξιολογήσεων των φυτών και της υγρασίας του εδάφους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερβολικό είτε σε υποποτισμό της καλλιέργειας και ενδεχομένως σε άλλα προβλήματα στην ανάπτυξη των καλλιεργειών, με παθογόνα ή με την εξάντληση των υδροφόρων οριζώντων. Από τη δεκαετία του 1990 εξετάστηκε η άρδευση ανάλογα την τοποθεσία για να λυθούν ζητήματα χωρικής μεταβλητότητας στο χωράφι, είτε προκαλούνται από το έδαφος, το μικροκλίμα ή τα είδη/καλλιέργεια καλλιεργειών (Sadler et al., 1996). Πιο πρόσφατες μελέτες που έχουν διεξαχθεί για την αξιολόγηση της άρδευσης μεταβλητού ρυθμού (VRI) μπορούν να μειώσουν περαιτέρω τον κίνδυνο υπερβολικού ποτίσματος (Lo κ.α. 2015, Sui και Yan, 2017). Αυτές οι μελέτες έδειξαν αυξήσεις στις αποδόσεις καλαμποκιού και σόγιας και ελαχιστοποίησαν το υδατικό στρες όταν εφαρμόστηκε μεταβλητή δόση σε μια αναπτυσσόμενη καλλιέργεια, αλλά έχουν δει περιορισμένη υιοθέτηση σε συστήματα καλλιέργειας βαμβακιού λόγω ανησυχιών σχετικά με το κόστος (Bronson κ.α., 2006).

Για την παροχή ενός εργαλείου άρδευσης που υποστηρίζει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο για τους παραγωγούς, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά συστήματα για την αξιολόγηση των ελλειμμάτων νερού στο χωράφι. Αυτά κυμαίνονται από αναλογικές μετρήσεις των μετρήσεων του δυναμικού του νερού των φύλλων με φορητούς θαλάμους πίεσης (Steger κ.α., 1998) έως φασματικούς δείκτες βλάστησης όπως ο δείκτης NDVI. Ο NDVI είναι χρήσιμος στον προσδιορισμό του επιπέδου του στρες στις καλλιέργειες (Berger κ.α., 2010), το οποίο υποδηλώνει ότι μπορεί να είναι επωφελές για όσους επιθυμούν να αξιολογήσουν γρήγορα ζητήματα στον αγρό, που κυμαίνονται από παθογόνα έως στρες ξηρασίας. Η μέθοδος μέσω NDVI έχει δείξει πολλά υποσχόμενη στον προσδιορισμό των συντελεστών υδατικής καταπόνησης των καλλιεργειών (K_{cb}) ως συνάρτηση της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών (E_{Tc}).

Ειδικά για το βαμβάκι, μελέτη στις ψηλές πεδιάδες του Τέξας διαπίστωσε ότι το NDVI συσχετίστηκε θετικά με την απόδοση στο χνούδι και αρνητικά συσχετίστηκε με το στρες του νερού (Attia και Rajan, 2016). Πρόσθετη έρευνα στα ξηρά κλίματα της Αριζόνα (Hunsaker κ.α., 2005 & 2015) έδειξε ότι κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες πίεσης, το NDVI ήταν πιο αποτελεσματικός παράγοντας πρόβλεψης της καταπόνησης του βαμβακιού και του επακόλουθου προγραμματισμού άρδευσης από το να βασιζόταν απλώς στις χειροκίνητα υπολογισμένες τιμές E_{Tc} και K_{cb} . Πρόσφατες παραλλαγές όπως το πράσινο NDVI έχουν επίσης συσχετιστεί σε μεγάλο βαθμό με τις μετρήσεις του δυναμικού του νερού των φύλλων (Lacerda κ.α., 2021). Αυτοί οι παράγοντες, σε συνδυασμό με τον υψηλό βαθμό μεταβλητότητας που βιώνουν οι νοτιοανατολικές ΗΠΑ στις εποχιακές βροχοπτώσεις (Sadler κ.α., 1996) δείχνουν ότι το NDVI μπορεί να είναι ένα κατάλληλο εργαλείο για την εφαρμογή πιο αποτελεσματικού προγραμματισμού άρδευσης στο βαμβάκι στην παράκτια πεδιάδα. Ωστόσο, αυτό απαιτεί επικύρωση υπό τις συνθήκες ανάπτυξης που υπάρχουν στην εκάστοτε περιοχή.

Δεδομένης της ανάγκης για δοκιμή της αποτελεσματικότητας του VRI με βάση το NDVI, ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να συγκρίνει τις αποδόσεις χνουδιών βαμβακιού και την αποδοτικότητα χρήσης νερού κάτω από VRI βασισμένο σε NDVI, ομοιόμορφη και βροχή άρδευσης σε χαμηλή και τυπικές πυκνότητες φύτευσης. Οι πυκνότητες των φυτών χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή μεγαλύτερου εύρους τιμών NDVI για την εφαρμογή VRI που βασίζεται σε NDVI.

Το πείραμα που διεξήχθη το 2017 και το 2018 υπό ένα σύστημα VRI μήκους 305 μέτρων στο Κέντρο Έρευνας και Εκπαίδευσης του Πανεπιστημίου Clemson Pee Dee κοντά στη Φλωρεντία της Νότιας Καρολίνας. Το σύστημα είχε πέντε ανοίγματα 60 μέτρων, το καθένα αποτελούμενο από τρεις ζώνες διαχείρισης 20 μέτρων. Αυτές οι ζώνες 20 μέτρων χρησίμευσαν ως μία από τους τρεις τρόπους εφαρμογής άρδευσης: (1) ομοιόμορφη άρδευση με βάση την εβδομαδιαία καμπύλη χρήσης νερού (2) άρδευση VRI με βάση υπολογισμένους συντελεστές καλλιέργειας (K_{cb}) που προκύπτουν από μετρήσεις NDVI από μεμονωμένα αγροτεμάχια και (3) εφαρμογή με βροχή.



Irrigation Treatments

NDVI– 102, 104, 205, 206, 303, 306, 401, 404, 502, 503, 602, 606, 701, 702
 Uniform– 103,106, 201, 203, 301, 302, 403, 405, 501, 506, 601, 605, 705, 706
 Rainfed– 101, 105, 203, 204, 303, 304, 402, 406, 504, 505, 603, 604, 703, 704

Εικόνα 9: Σχέδιο για το πείραμα άρδευσης 2017



Irrigation Treatments

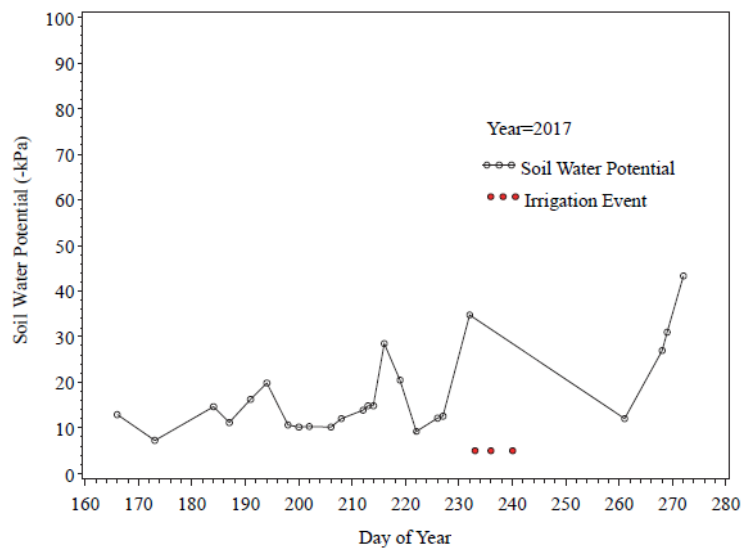
NDVI– 101, 102, 203, 206, 304, 306, 401, 406
 Uniform– 104,106, 204, 205, 303, 305, 403, 405
 Rainfed– 103, 105, 201, 202, 301, 302, 402, 404

Εικόνα 10: Σχέδιο για το πείραμα άρδευσης 2018

Για τη μέτρηση του δυναμικού νερού του εδάφους (Soil Water Potentials - SWP), εγκαταστάθηκαν τασιόμετρα στην ομοιόμορφη επεξεργασία άρδευσης/τυποποιημένης πυκνότητας για κάθε αναπαραγωγή σε βάθος 30 cm. Αυτές οι μετρήσεις SWP χρησιμοποιήθηκαν για την έναρξη γεγονότων άρδευσης όταν ο μέσος όρος SWP ήταν κάτω από -30 kPa. Όταν ξεκίνησε η άρδευση, οι όγκοι άρδευσης για την ομοιόμορφη επεξεργασία άρδευσης και τις επόμενες 3 ημέρες βασίστηκαν στις συστάσεις του Πανεπιστημίου της Τζόρτζια. Κατά τη διάρκεια περιόδων εξαιρετικά υψηλών ενδείξεων SWP, όταν τα τεντόμετρα δεν μπορούσαν να διατηρήσουν την τάση, χρησιμοποιήσαν την προεπιλεγμένη καμπύλη χρήσης νερού του Πανεπιστημίου της Τζόρτζια.

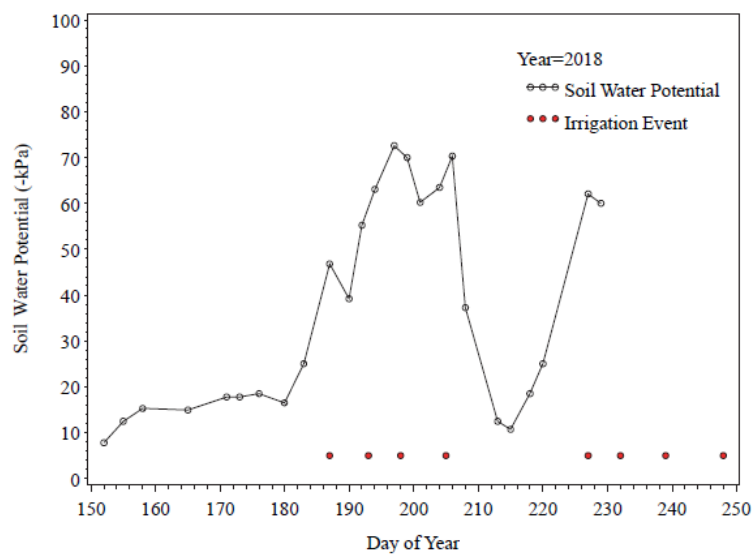
Η ανάκλαση καλλιέργειας (Crop reflectance) μετρήθηκε στις δύο κεντρικές σειρές κάθε αγροτεμαχίου χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα χειρός NDVI (GreenSeeker, NTech Industries, Ukiah, Καλιφόρνια) για να παρέχει μια μέση συνολική μέτρηση NDVI του αγροτεμαχίου έως ότου το φύλλωμα του φυτού φτάσει στο πλήρες κλείσιμο και οι τιμές NDVI πλησίασαν τον κορεσμό ($>0,8$), μετά από τον οποίο χρησιμοποιήσαν τις συστάσεις του Πανεπιστημίου της Τζόρτζια. Οι μετρήσεις NDVI στη συνέχεια μετατράπηκαν σε μεμονωμένους συντελεστές καλλιέργειας αγροτεμαχίου (K_{cb}) χρησιμοποιώντας την εξίσωση σχέσης NDVI- K_{cb} ($K_{cb} = 1,5 * NDVI - 0,1$) που αναπτύχθηκε από τους Hunsaker κ.α. (2005) και Gonzalez - Piqueras κ.α. (2004). Οι ποσότητες άρδευσης για τα αγροτεμάχια NDVI υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας τις τιμές K_{cb} του αγροτεμαχίου με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (E_{To}). Οι περιβαλλοντικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (E_{To}) αξιοποιώντας την τυποποιημένη εξίσωση ASCE (Allen κ.α., 2005) και συλλέχθηκαν από έναν επιτόπιο μετεωρολογικό σταθμό.

Όταν οι μετρήσεις SWP στα οικόπεδα ομοιόμορφης άρδευσης/τυπικού πληθυσμού ήταν κατά μέσο όρο κάτω από -30 kPa, ξεκινούσε ένα συμβάν άρδευσης. Το ενιαίο βάθος εφαρμογής της επεξεργασίας άρδευσης ορίστηκε τόσο για τις τυπικές όσο και για τις εφαρμογές χαμηλού πληθυσμού. Για τις εφαρμογές NDVI, τα βάθη εφαρμογής VRI βασίστηκαν στις υπολογισμένες τιμές K_{cb} για τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις τους. Η άρδευση ξεκίνησε όταν οι ενδείξεις SWP στην ομοιόμορφη αρδευόμενη κατεργασία έπεσαν κάτω από -30 kPa. Λόγω των γενικά επαρκών βροχοπτώσεων το 2017, οι ενδείξεις SWP ήταν συχνά πάνω από το επίπεδο -30 kPa που απαιτείται για την έναρξη μιας άρδευσης μέχρι τα τέλη Αυγούστου (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Μέσο δυναμικό εδάφους νερού για την καλλιεργητική περίοδο 2017

Το 2017, απαιτήθηκαν τρεις κατεργασίες άρδευσης για να γίνει το SWP μεγαλύτερο από -30 kPa. Το 2018, απαιτήθηκε νωρίτερα και συχνότερη άρδευση από ό,τι το 2017, λόγω των κάτω του μέσου όρου βροχοπτώσεων από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο (Εικόνα 12).



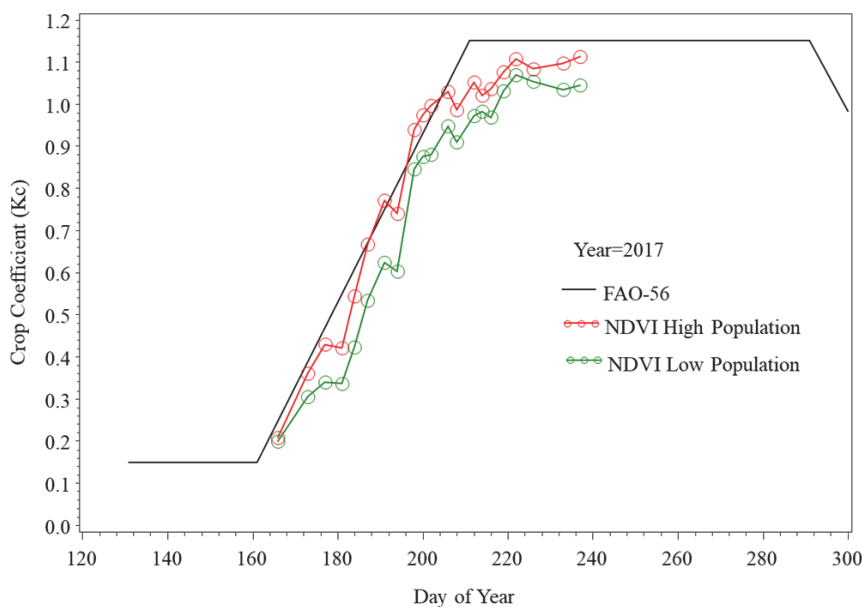
Εικόνα 12: Μέσο δυναμικό εδάφους νερού για την καλλιεργητική περίοδο 2018

Οι ενδείξεις SWP άρχισαν να μειώνονται στα τέλη Ιουνίου και έπεσαν κάτω από -30 kPa στις αρχές Ιουλίου για να ξεκινήσουν οι απαιτήσεις άρδευσης. Χρειάστηκαν τέσσερις κατεργασίες άρδευσης τον Ιούλιο έως ότου αυξηθούν οι μετρήσεις SWP. Στα μέσα Αυγούστου, οι μετρήσεις SWP έπεσαν ξανά κάτω από -30 kPa, υποδεικνύοντας την ανάγκη για τέσσερις ακόμη κατεργασίες άρδευσης από τα μέσα Αυγούστου έως τις αρχές Σεπτεμβρίου.

Μετρήσεις NDVI και εκτιμήσεις Kcb

Οι παρατηρούμενες μετρήσεις NDVI για τα αγροτεμάχια καταγράφηκαν για 21 ημέρες μεταξύ 15 Ιουνίου και 25 Αυγούστου 2017 και 20 ημέρες μεταξύ 29 Απριλίου και 25 Ιουλίου 2018. Αυτές οι μετρήσεις NDVI για κάθε αγροτεμάχιο κατεργασίας άρδευσης, υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο και υπολογίστηκε ένας συντελεστής καλλιέργειας για κάθε συνολική επεξεργασία άρδευσης NDVI. Οι μετρήσεις NDVI έτειναν να κορεστούν, να ισοπεδώνονται και να γίνονται μη γραμμικές γύρω στο 0,8 (αντίστοιχο Kcb = 1,1) μετά το φυλλώματος της καλλιέργειας. Έτσι, σε αυτό το σημείο της σεζόν, σταμάτησαν να παίρνουν μετρήσεις NDVI.

Συγκρίναν τις τιμές Kcb με τις τιμές Kcb αναφοράς από τον FAO 56. Τόσο το 2017 όσο και το 2018, οι τιμές Kcb ακολούθησαν την ίδια τάση και κλίση με εκείνες του FAO56. Επίσης χρησιμοποίησαν τους δύο πληθυσμούς φύτευσης για να παρέχουν περισσότερες διαφορές στις μετρήσεις NDVI στις κατεργασίες άρδευσης. Το 2017, οι υπολογισμένες τιμές Kcb ήταν λίγες ημέρες πίσω από την καμπύλη FAO 56, πιθανώς λόγω της βραδύτερης ανάπτυξης των καλλιεργειών, με τις χαμηλότερες βροχοπτώσεις μετά τη φύτευση τον Μάιο (Εικόνα 13). Ωστόσο, ακολούθησε τη γραμμή αναφοράς FAO 56 εκ των υστέρων έως το φύλλωμα έκλεισε πλήρως και για τους δύο πληθυσμούς.

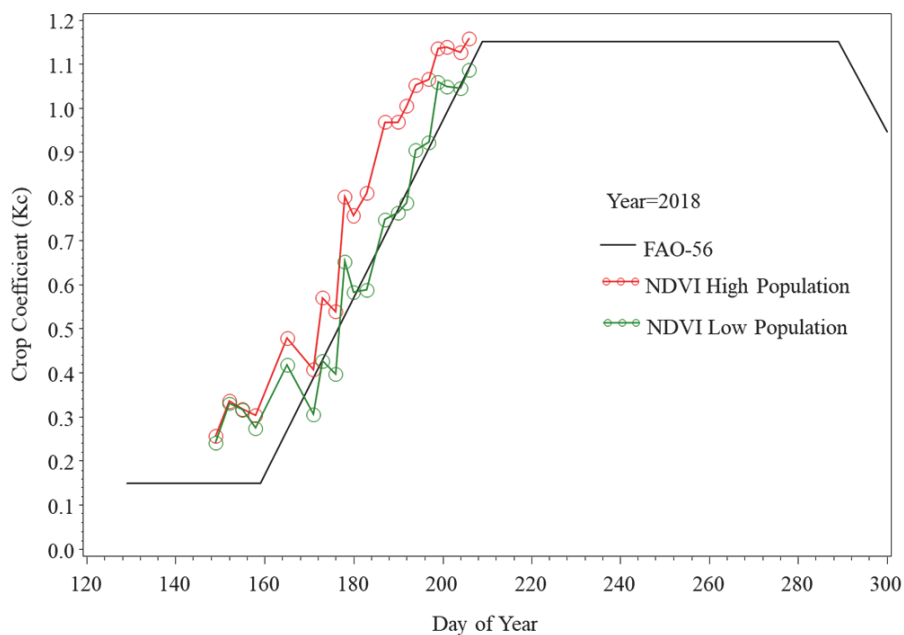


Εικόνα 13: FAO56 και συντελεστές καλλιέργειας προερχόμενοι από το NDVI το 2017

Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί από τους Hunsaker κ.α. (2005) όταν συγκρίνονται οι τιμές Kcb έναντι των τιμών αναφοράς FAO56 για την άρδευση βαμβακιού.

Στη συνέχεια, δεν είδαν καμία διαφορά στην ποσότητα άρδευσης που παρέχεται μεταξύ των συστημάτων FAO56 και NDVI και καμία επίδραση στην απόδοση στο χνούδι. Στην μελέτη τους, και οι δύο πληθυσμοί φύτευσης ακολούθησαν αυτή την τάση με την κατεργασία χαμηλού πληθυσμού να υστερεί μερικές ημέρες από την τυπική πληθυσμιακή επεξεργασία. Αυτό έδειξε ότι οι συστάσεις άρδευσης δεν διέφεραν για τον τυπικό πληθυσμό μεταξύ των μεθόδων FAO56 και NDVI, ενώ ο χαμηλός πληθυσμός χρειαζόταν λιγότερο νερό λίγες ημέρες αργότερα, όταν χρησιμοποιούσε τιμές Kcb με βάση το NDVI.

Το 2018, οι επαρκείς βροχοπτώσεις στην αρχή της σεζόν είχαν ως αποτέλεσμα οι τιμές Kcb να είναι λίγες ημέρες μπροστά από τη γραμμή αναφοράς FAO 56 (Εικόνα 14). Η τυπική κατεργασία πληθυσμού συνέχισε αυτή την τάση μέχρι το κλείσιμο του φυλλώματος. Μετά τις αρχικές τιμές Kcb, η κατεργασία χαμηλού πληθυσμού ακολούθησε στενά τη γραμμή FAO 56 έως ότου οι μετρήσεις διακόπηκαν.



Εικόνα 14: FAO56 και συντελεστές καλλιέργειας προερχόμενοι από το NDVI το 2018

Αυτές οι υπολογιζόμενες τιμές Kcb από τη μέτρηση NDVI μπορούν να παρέχουν πληροφόρηση για την πιο σωστή διαχείριση των εφαρμογών άρδευσης ανάλογα με τις καλλιέργειες και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Το 2017 πραγματοποιήθηκαν τρία αρδευτικά γεγονότα. Όλα τα βάθη εφαρμογής ομοιόμορφης άρδευσης ήταν 23 mm για τις δύο πρώτες αρδεύσεις και 18 mm για την τρίτη άρδευση. Τα βάθη εφαρμογής NDVI κυμαίνονταν από 15 έως 23 mm για τις δύο πρώτες αρδεύσεις και 13 έως 20 mm για την τρίτη άρδευση. Οι τυπικές εφαρμογές άρδευσης NDVI

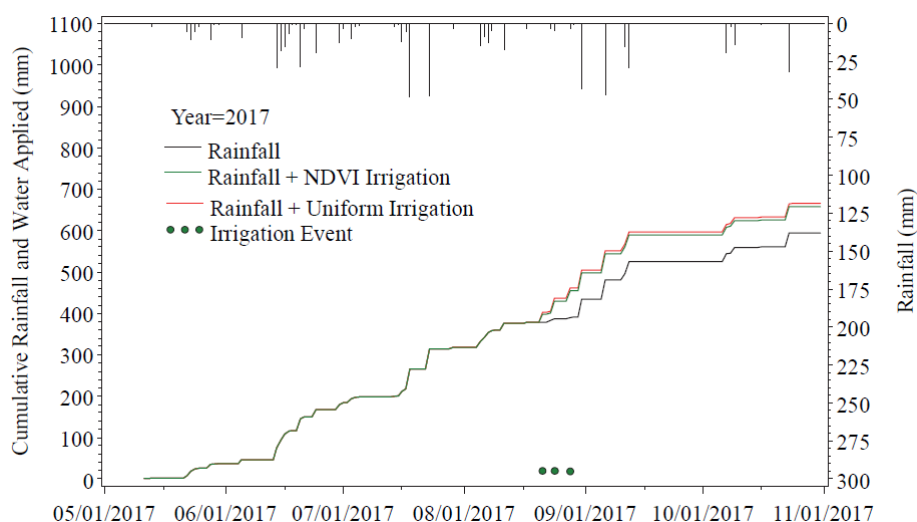
έτειναν να απαιτούν ελαφρώς υψηλότερη άρδευση από τα αγροτεμάχια χαμηλότερου πληθυσμού. Παρόμοιο μοτίβο παρατηρήθηκε το 2018 με τον τυπικό πληθυσμό NDVI να απαιτεί μεγαλύτερα βάθη εφαρμογής από τις θεραπείες χαμηλότερου πληθυσμού. Αυτή η επίδραση είχε προηγουμένως παρατηρηθεί στο καλαμπόκι, με χαμηλότερες πυκνότητες καλλιέργειας (<3 φυτά ανά τετραγωνικό μέτρο) να παρουσιάζουν λιγότερη ανάγκη για άρδευση από το κανονικό (4,25 φυτά ανά τετραγωνικό μέτρο) ή υψηλές (8,4 φυτά ανά τετραγωνικό μέτρο) πυκνότητες φύτευσης (Tokatlidis κ.α., 2011). Για τις τρεις πρώτες αρδεύσεις το 2018, η τυπική πληθυσμιακή εφαρμογή με NDVI, απαιτούσε μεγαλύτερα βάθη εφαρμογής άρδευσης από την ομοιόμορφη εφαρμογή άρδευσης. Μετά τη διακοπή των μετρήσεων NDVI τον Αύγουστο του 2018, όλες οι επόμενες αρδεύσεις εφαρμόστηκαν ομοιόμορφα σε όλα τα αγροτεμάχια.

Αποτελέσματα Άρδευσης

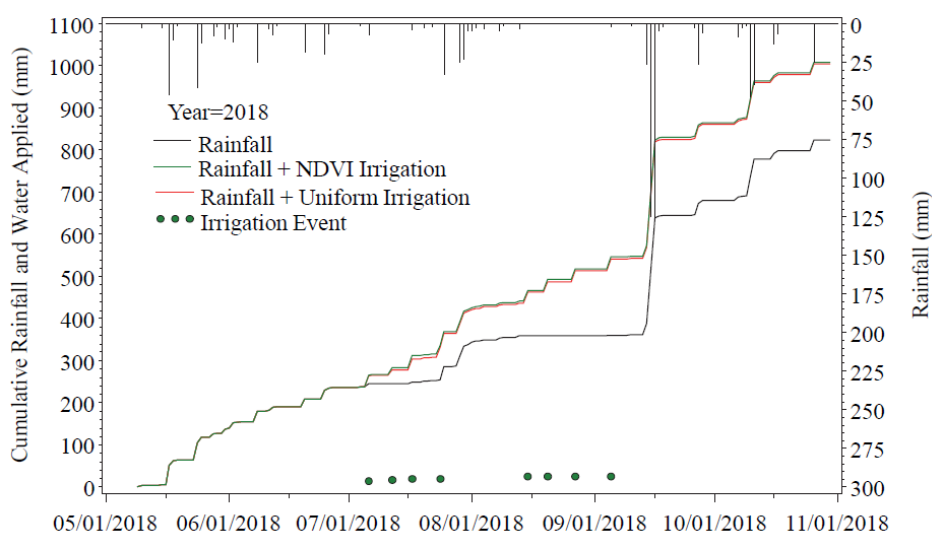
Το 2017, τα συνολικά βάθη εφαρμογής άρδευσης και στις δύο κατεργασίες άρδευσης ήταν σημαντικά διαφορετικά (LSD = 4,2). Οι ομοιόμορφες κατεργασίες άρδευσης έλαβαν μεγαλύτερα βάθη εφαρμογής από την κατεργασία NDVI (64 έναντι 56 mm). Το 2018 δεν υπήρξε σημαντική διαφορά μεταξύ των θεραπειών άρδευσης Ομοιόμορφου (168 mm) και μέσης NDVI (166 mm). Το 2018, τα τυπικά βάθη άρδευσης πληθυσμού NDVI ήταν σημαντικά μεγαλύτερα από τον χαμηλό πληθυσμό (LSD = 4,8), αλλά οι κατεργασίες πληθυσμού NDVI δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους το 2017. Οι σωρευτικές βροχοπτώσεις και η άρδευση που παρέχονται σε καθεμία από τις κατεργασίες άρδευσης φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (15 & 16).

Η κατανομή των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου δείχνει λίγες βροχοπτώσεις τις ημέρες και τις εβδομάδες που προηγούνται των αρδεύσεων. Η σωρευτική βροχόπτωση + άρδευση καθ' όλη τη διάρκεια της σεζόν δείχνει μικρή διαφορά μεταξύ των επεξεργασιών Ομοιόμορφης και NDVI Άρδευσης, για το συνολικό νερό που έλαβε η καλλιέργεια τόσο το 2017 όσο και το 2018. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές Kcb που προέκυψαν από το NDVI, ήταν εξίσου αποτελεσματικές με την ομοιόμορφη μέθοδο άρδευσης για τη διαχείριση της άρδευσης. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο χρόνος της βροχής ή των γεγονότων άρδευσης μπορεί να επηρεάσει την παραγωγικότητα του βαμβακιού. Σε σενάρια όπου το υδατικό στρες είναι πιο συχνό, αλλά όχι σοβαρό, το NDVI θα μπορούσε δυνητικά να ανιχνεύσει τέτοιες καταπονήσεις και να συνταγογραφήσει ποσά

άρδευσης που καλύπτουν καλύτερα τις αναπτυξιακές ανάγκες των φυτών από την ομοιόμορφη άρδευση χωρίς να σπαταλά τους υδάτινους πόρους.



Εικόνα 15: Σωρευτικές βροχοπτώσεις και άρδευση για τις κατεργασίες με NDVI και με ομοιόμορφη άρδευση το 2017.



Εικόνα 16: Σωρευτικές βροχοπτώσεις και άρδευση για τις κατεργασίες με NDVI και με ομοιόμορφη άρδευση το 2018.

Η ανάλυση για το 2017 έδειξε ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές στις αποδόσεις μεταξύ των κατεργασιών άρδευσης και βροχής, με τις μέσες αποδόσεις στο χνούδι να κυμαίνονται από 1006 έως 1084 kg ανά εκτάρριο και μέσες αποδόσεις σε σπόρους βαμβακιού να κυμαίνονται από 2370 έως 2645 kg ανά εκτάρριο. Οι κατεργασίες άρδευσης πληθυσμού τόσο για τις αποδόσεις του βαμβακιού όσο και για τους σπόρους, δεν ήταν σημαντικά διαφορετικές από τις κατεργασίες άρδευσης χαμηλότερου πληθυσμού.

Το 2018, οι αποδόσεις σε χνούσι και σε σπόρους για την ομοιόμορφη και NDVI επεξεργασία άρδευσης, ήταν σημαντικά υψηλότερες ($LSD = 225$ χνούδι, $LSD = 481$ σπόροι) από την επεξεργασία με βροχή με μέσες αποδόσεις 1318, 1274 και 957 kg ανά εκτάριο, για την ομοιόμορφη, NDVI και βροχή επεξεργασία αντίστοιχα. Οι μέσοι όροι του συνολικού πληθυσμού μεταξύ των κατεργασιών άρδευσης τυπικού και χαμηλού πληθυσμού δεν διέφεραν σημαντικά. Για σύγκριση, οι αποδόσεις χνουδιών βαμβακιού 2017 στην Πολιτεία Νότιας Καρολίνας για το αρδευόμενο και το βροχερό βαμβάκι ήταν 1210 και 907 kg ανά εκτάριο αντίστοιχα, και οι αποδόσεις χνουδιών βαμβακιού το 2018 για το αρδευόμενο και το βροχερό βαμβάκι ήταν 1245 και 83 kg ανά εκτάριο αντίστοιχα.

Με την αύξηση των αρδευτικών γεγονότων κατά το 2018, αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η άρδευση είναι ο κύριος μοχλός της απόδοσης όταν η υγρασία είναι περιοριστική. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί από τον Feng κ.α. (2014), ο οποίος είδε μεγαλύτερες αποδόσεις στο χνούδι υπό διαδοχικά μεγαλύτερες ποσότητες άρδευσης, αλλά καμία επίδραση από την πυκνότητα φύτευσης υπό συνθήκες άρδευσης και ξηράς. Τα δεδομένα απόδοσης συνδυάστηκαν με τα συνολικά βάθη της επεξεργασίας άρδευσης και τις βροχοπτώσεις για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας χρήσης νερού (Water Use Efficiency - WUE) για τις θεραπείες άρδευσης και πληθυσμού. Οι υπολογισμένες τιμές WUE για το βαμβάκι και τους σπόρους δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ της άρδευσης ή της πληθυσμιακής επεξεργασίας είτε το 2017 είτε το 2018. Η απόδοση του αρδευόμενου νερού που χρησιμοποιείται (Irrigated Water Used Efficiency - IWUE) υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ της αρδευόμενης απόδοσης και της απόδοσης βροχής διαιρεμένη με την ποσότητα άρδευσης.

Η έλλειψη επιπτώσεων επεξεργασίας στα WUE και IWUE δεν είναι απροσδόκητη, ιδιαίτερα το 2017 όταν τα γεγονότα άρδευσης ήταν ελάχιστα και σπάνια. Ωστόσο, η έλλειψη επίδρασης από τους πληθυσμούς των φυτών σε κάθε έτος ήταν πιο εκπληκτική. Οι υψηλότεροι πληθυσμοί φύτευσης βαμβακιού έχουν υψηλότερη IWUE από τους χαμηλότερους πληθυσμούς ακόμη και υπό περιορισμένη άρδευση, με περιορισμένη άρδευση (425 mm) και υψηλότερους πληθυσμούς (10,8 φυτά m^{-2}) με IWUE 13 έως 15 $kg/(ha*mm)$ περίπου 1,5 έως 2, $kg/(ha*mm)$ μεγαλύτερο από τον επόμενο υψηλότερο συνδυασμό Chen κ.α. (2019). Είναι πιθανό οι συχνές βροχοπτώσεις το 2017 και τα στοχευμένα ποσά άρδευσης το 2018 να ήταν πολύ υψηλά για να διαφοροποιηθεί η IWUE μεταξύ των κατεργασιών, δεδομένου ότι οι πληθυσμοί των φυτών μας ήταν παρόμοιοι με τους Chen κ.α. (2019). Ο Buttar κ.α. (2007) βρήκαν επίσης ότι το IWUE βαμβακιού αυξήθηκε όταν καθυστερούσε η πρώτη άρδευση

αργότερα το καλοκαίρι (42 ημέρες μετά τη σπορά) και το πότισμα αργότερα μέσα στην καλλιεργητική περίοδο (170 ημέρες μετά τη σπορά). Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης δεν υποδεικνύουν τέτοιες σχέσεις το 2018, όταν επικρατούσε η άρδευση, υποδεικνύοντας ότι η άρδευση που συνταγογραφείται από το NDVI δεν επηρεάζει αρνητικά το IWUE σε σύγκριση με ομοιόμορφα ή συστήματα βροχής. Η μέθοδος NDVI θα πρέπει να αξιολογηθεί στο μέλλον για IWUE υπό πιο έντονες συνθήκες ξηρασίας.

Η ποιότητα των ινών του βαμβακιού αναλύθηκε επίσης για όλες τις κατεργασίες άρδευσης για όλους τους πληθυσμούς. Δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές στις μικροίνες μεταξύ των μεθόδων άρδευσης ή των πληθυσμών φυτών είτε το 2017 είτε το 2018. Το μήκος ινών για τις κατεργασίες βροχής ήταν σημαντικά χαμηλότερο από την κατεργασία άρδευσης NDVI και τα δύο χρόνια, αλλά δεν διαφέρει από την ομοιόμορφη άρδευση το 2017 (2017 LSD = 0,37, 2018 LSD = 0,58). Η αντοχή των ινών δεν ήταν σημαντικά διαφορετική το 2017, αλλά η κατεργασία με βροχή είχε σημαντικά χαμηλότερη αντοχή ινών το 2018 (LSD = 1,32).

Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι μικροίνες στο χνούδι του βαμβακιού δεν επηρεάζονται σταθερά από την άρδευση, αλλά το μήκος και η αντοχή των ινών φαίνεται να είναι μεγαλύτερα κατά την άρδευση. Αυτές οι επιπτώσεις μπορούν να αποδοθούν στην άνω του μέσου όρου βροχοπτώσεις το 2017 και στις σχεδόν ίδιες ποσότητες βροχής+NDVI και βροχής+ομοιόμορφης άρδευσης που εφαρμόστηκαν (Εικόνες 15 & 16).

Παρόμοιες έρευνες έχουν δείξει περιορισμένες ή ασυνεπείς επιδράσεις της άρδευσης στις παραμέτρους ποιότητας στο χνούδι όπως οι μικροίνες, το μήκος της ίνας και η αντοχή των ινών (Booker κ.α., 2006, Snowden κα, 2013). Εάν υπήρχε μεγαλύτερη διαστρωμάτωση μεταξύ των ποσοτήτων άρδευσης που εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη, πιθανότατα θα υπήρχαν ευδιάκριτες διαφορές στις μικροίνες και στην αντοχή του χνούδι, όπως παρατηρήθηκε από τους Balkcom κ.α., (2006) οι οποίοι ανέφεραν μεγαλύτερες τιμές μήκους μικροινών και ινών κάτω από αυξανόμενες ποσότητες της άρδευσης.

Συνοπτικά, η άρδευση με τη χρήση συντελεστών καλλιέργειας που προέρχονται από το NDVI για χωρική εφαρμογή άρδευσης παρήγαγε αποδόσεις βαμβακιού, αποδοτικότητες χρήσης νερού και ποιότητα ινών που δεν διέφεραν σημαντικά από το βαμβάκι που αρδεύτηκε ομοιόμορφα. Η μέθοδος επεξεργασίας άρδευσης NDVI & Kcb φαίνεται να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση συστημάτων άρδευσης VRI και την ανάπτυξη χαρτών συνταγών VRI που αντικατοπτρίζουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Η χρήση της θερμοκρασίας του φυλλώματος και της υπέρυθρης θερμομετρίας είναι ένας ακόμη τρόπος για να συσχετιστεί η ανάπτυξη της καλλιέργειας μέσω της τηλεπισκόπησης. Ένα φυτό υπό υδατικό στρες έχει μειωμένη διαπνοή και θα εμφανίζει υψηλότερη θερμοκρασία από ένα φυτό που δεν βρίσκεται υπό πίεση (Bellvert, κ.α. 2014), ένα χαρακτηριστικό που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ισχυρό εργαλείο για την παρακολούθηση και ποσοτικοποίηση της υδατικής καταπόνησης. Η θερμοκρασία του φυλλώματος αυξάνεται όταν απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία, αλλά ψύχεται όταν η λανθάνουσα ενέργεια ή η διαπνοή χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού αντί για την ψύξη των επιφανειών των φυτών. (Idso & Baker, 1967)

Μια έρευνα που συνδιάζει τις παραπάνω παραμέτρους καθώς και ένα σύστημα αποφάσεων που βασίζεται στην Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic), πραγματοποίησαν οι Williams R.M., Fabio M.U.A., Ritaban D. Και Derek M.H. (2019).

Μια καθαρή προσέγγιση για την αντιμετώπιση τέτοιων αβέβαιων καταστάσεων βρίσκεται στη θεωρία των ασαφών συνόλων, η οποία έχει πλέον φτάσει σε μια ώριμη κατάσταση για επέκταση και εφαρμογή. Η θεωρία των ασαφών συνόλων έχει χρησιμοποιηθεί για τη συγγραφή ρεαλιστικών μοντέλων υποστήριξης αποφάσεων. Η ασαφής λογική μπορεί να αναλύσει τις ανακριβείς πληροφορίες και είναι αποτελεσματική στη λήψη αποφάσεων για ασαφή και αβέβαια φαινόμενα (Kweon, 2012). Στη γεωργία, η διεπαφή αυτών των συστημάτων επιτρέπει μια φυσική και απλή χρήση, ως εργαλείο προγραμματισμού για τον διαχειριστή και τον αγρότη. Ένα σύστημα άρδευσης που βασίζεται στη ασαφή λογική με απλούς κανόνες είναι πιο ελκυστικό για τους περισσότερους αγρότες (Bahat, κ.α. 2000) δεδομένου ότι αυτά τα συστήματα δεν απαιτούν ακριβή μέτρηση ή ακριβές μοντέλο, το οποίο μπορεί να είναι πολύ περίπλοκο και απαιτεί σημαντικά κεφάλαια, πόρους και χρόνο ανάπτυξης.

Τα δεδομένα που αξιοποίησαν προέρχονται από το i-ekbase. Το ευφυές σύστημα περιβαλλοντικής γνώσης (i-ekbase) είναι μια αυτόνομη μηχανή ανάλυσης μεγάλων δεδομένων που τρέχει ένα σύστημα CLOUD. Το i-ekbase είναι ένα εύχρηστο πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Επικεντρώνεται κυρίως σε εφαρμογές ακριβείας παρακολούθησης της γεωργίας και της βιοποικιλότητας, ενσωματώνοντας αυτόματα δεδομένα από διάφορους δορυφόρους με τοπικά καιρικά δεδομένα, τις γνώσεις των αγροτών και εφαρμόζοντας τεχνικές Μηχανικής Μάθησης για τη

δημιουργία ενός μέλλοντος με γνώμονα τα δεδομένα για την παγκόσμια γεωργία (Dutta et al., 2014).

Το i-ekbase ρυθμίζει τη δορυφορική τηλεπισκόπηση για γεωργική παρακολούθηση ακριβείας γενικής χρήσης σε φορητή συσκευή, για μεγαλύτερο όφελος για την παγκόσμια αγροτική κοινότητα και για αύξηση της κερδοφορίας των γεωργικών επιχειρήσεων. Οι υπηρεσίες του συστήματος παρέχουν εβδομαδιαία ή καθημερινά προϊόντα χαρτών διαχείρισης πόρων μεγάλης έκτασης, συμπεριλαμβανομένου δείκτη κανονικής βλάστησης (NDVI), υγρασία του εδάφους, βιομάζα, θερμοκρασία επιφάνειας, χάρτες βλάστησης τοπίου για υποστήριξη απομακρυσμένου ψηφιακού εντοπισμού, παρακολούθηση αγροκτημάτων μεγάλης έκτασης και υποστήριξη αποφάσεων σύστημα, και ταχεία παρέμβαση ενός θέματος διαχείρισης.

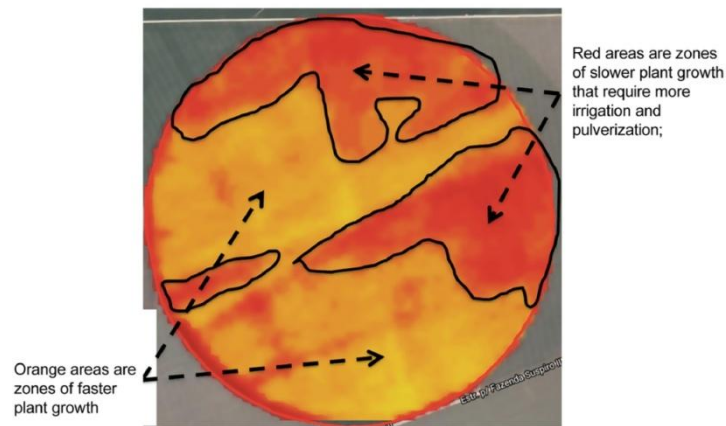
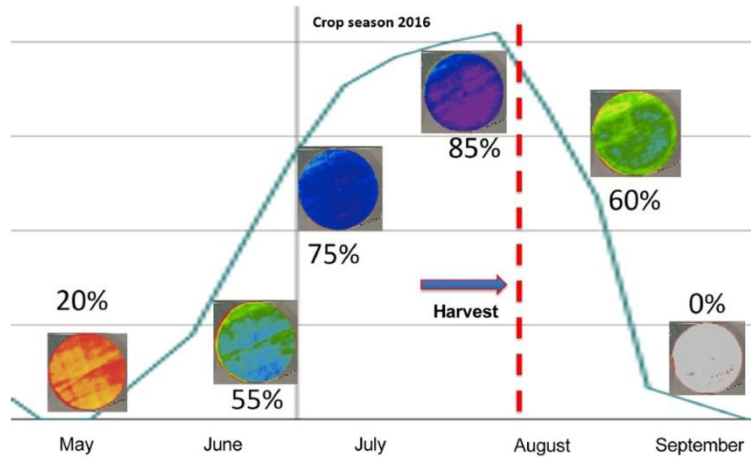
Μετά τη συλλογή των δεδομένων τηλεπισκόπησης χρησιμοποιώντας το διαδικτυακό εργαλείο i-ekbas, οι πληροφορίες υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία για να φιλτράρουν τα δεδομένα που δεν απαιτούνταν από το σύστημα λήψης αποφάσεων. Έτσι, λάβανε υπόψη μόνο τη θερμοκρασία του φυλλόματος, την υγρασία του εδάφους στο ανώτερο στρώμα, το NDVI και τις συντεταγμένες.

Η περιοχή μελέτης τους ήταν μια φάρμα 140 εκτάρια στην Βραζιλία, με καλλιέργεια καλαμποκιού, και ποτίζοντας με σύστημα άρδευσης κεντρικού άξονα. Το καλαμπόκι είναι πολύ ευαίσθητο στην ξηρασία. Επομένως, η εμφάνιση μιας περιόδου χαμηλότερης πρόσληψης νερού από τα φυτά σε κρίσιμες στιγμές για την ανάπτυξη της καλλιέργειας, από την ανθοφορία έως τη φυσιολογική ωρίμανση, μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη απόδοση. Για μέγιστη απόδοση, η φυτεία καλαμποκιού χρειάζεται περίπου 650 mm νερό κατά τη διάρκεια του κύκλου της, η οποία κυμαίνεται από 110 έως 140 ημέρες στα υβρίδια με μέσο κύκλο.



Εικόνα 17: Η περιοχή μελέτης οριοθετείται από τον κόκκινο κύκλο

Η ανάπτυξη των φυτών γίνεται εμφανής από τις εικόνες που λαμβάνονται με τηλεπισκόπηση κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης. Μετά την ανάλυση των τιμών NDVI που περιέχονται στην παρακάτω εικόνα, επαλήθευσαν την ομοιότητα μεταξύ των τιμών που αποδίδονται στον συντελεστή καλλιέργειας (K_c) (Hunsaker, κ.α. 2005 και Kamble, κ.α. 2013). Καθώς αναπτύσσεται η καλλιέργεια, η επιφάνεια των φύλλων αυξάνεται, γεγονός που καθιστά δυνατή τη δημιουργία μιας σχέσης NDVI.

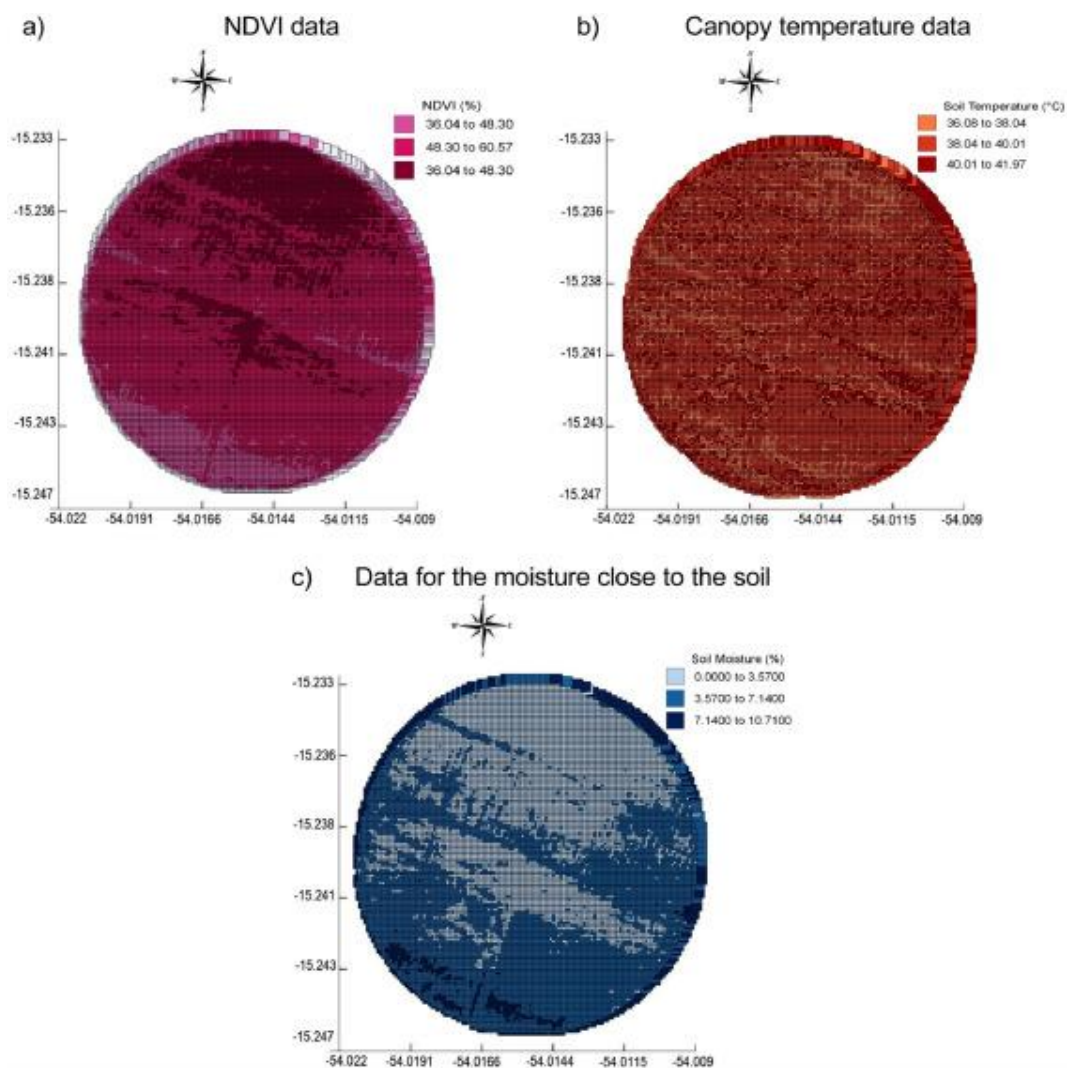


Εικόνα 18: Παραλλαγή τιμών NDVI σε έναν κύκλο καλλιέργειας

Αυτή η διαδικασία περιγράφεται επίσης από τον Hunsaker κ.α.. (2005), με σχέσεις για τον υπολογισμό του βασικού συντελεστή καλλιέργειας (K_{cb}) για το βαμβάκι ως συνάρτηση του NDVI. Όταν αναλύεται καθεμία από τις φάσεις ανάπτυξης της καλλιέργειας, είναι εμφανείς δύο διακριτές περιοχές: ένας με μικρή ανάπτυξη και ένας άλλος με μέση ανάπτυξη. Από αυτή τη διαφοροποίηση, είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας χάρτης ζήτησης νερού καθώς και χάρτες ελέγχου ταχύτητας.

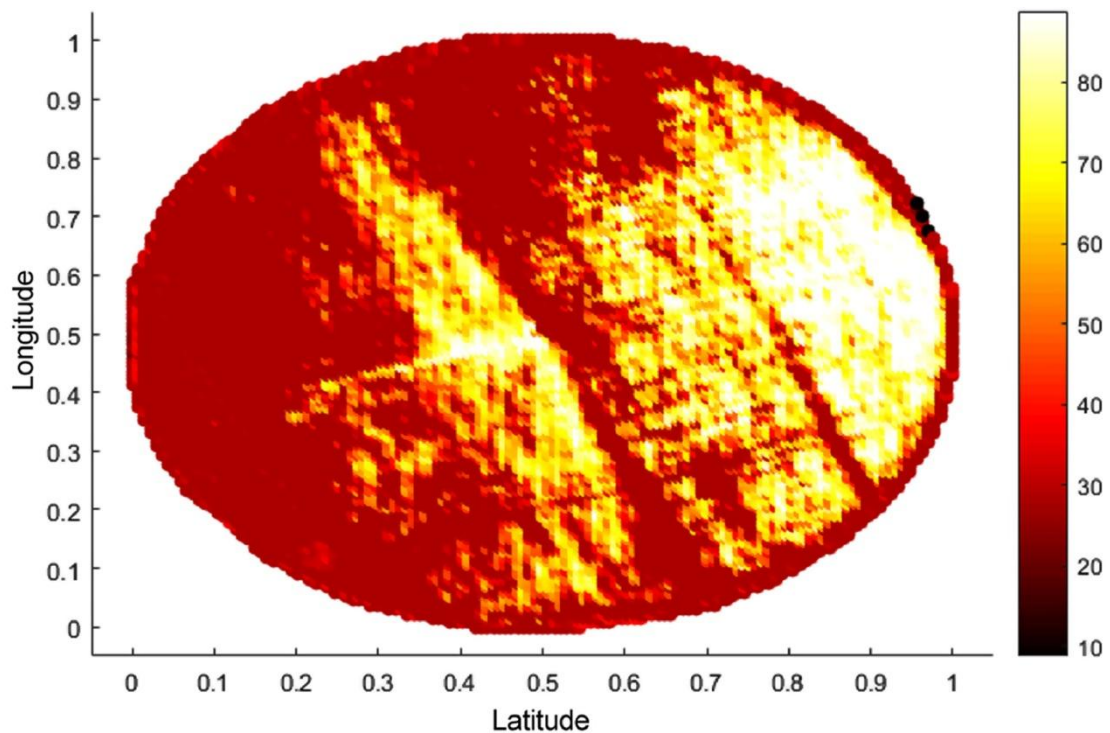
Λόγω της φύσης της διαχείρισης της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν ασαφή συστήματα για να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων άρδευσης. Επειδή οι αποφάσεις ενός αγρότη είναι καθαρά διαισθητικές και βασισμένες στη γνώση που αποκτώνται με χρόνια εργασία, επέλεξαν να μην περιγράψουν ρητά τον τρόπο λειτουργίας του αγροκτήματος. Ένα άλλο κρίσιμο κομμάτι στη ρουτίνα του αγρότη ήταν ότι το σύστημα άρδευσης, χρησιμοποίησε πολύ χρόνο για να εκτελέσει μια πλήρη στροφή. Ωστόσο, το κεντρικό σύστημα άρδευσης θα πρέπει να λειτουργεί 21 ώρες την ημέρα, με 3 ώρες για συντήρηση, επειδή οι υψηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας χρεώνονται από το δίκτυο. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταβλητές

εισόδου (NDVI, υγρασία του εδάφους ανώτερου στρώματος και θερμοκρασία φυλλώματος) για να συναχθεί η ταχύτητα, την οποία πρέπει να φτάσει ο κεντρικός άξονας για να βελτιώσει το επίπεδο άρδευσης εντός της περιοχής καλλιέργειας και να βρει μια επαρκή ταχύτητα για την κίνηση περιστροφής στο σχέση με την ποσότητα του νερού που βγαίνει από τους καταιονιστήρες.



Εικόνα 19: Εισαχθέντα δεδομένα στο ασαφές σύστημα

Το έξυπνο σύστημα άρδευσης έφερε τα παρακάτω αποτελέσματα όπου απεικονίζονται διαφορετικές περιοχές εντός της περιοχής καλλιέργειας με διαφορετικές τιμές περιστροφής περιστροφής. Μια υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής συνεπάγεται την εφαρμογή ενός λεπτότερου στρώματος νερού και μια χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής οδηγεί σε περισσότερη εφαρμογή νερού στο έδαφος, δεδομένου ότι η ροή εφαρμογής διατηρείται σταθερή στους καταιονιστήρες.



Εικόνα 20: Δεδομένα εξόδου από το ασαφές σύστημα συμπερασμάτων

Μόλις συγκριθούν ξανά οι δορυφορικές εικόνες, το NDVI και η θερμοκρασία του φυλλώματος είναι απαραίτητα για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων του ευφυούς συστήματος άρδευσης. Οι μεγάλες επιφάνειες με χαμηλότερη ανάπτυξη φύλλων θα μπορούσαν να υποδηλώνουν έλλειψη νερού για ανάπτυξη. Στην περίπτωση της απόδοσης του ευφυούς συστήματος άρδευσης, οι πιο έντονες κόκκινες περιοχές υποδεικνύουν ότι ο άξονας περιστροφής πρέπει να μειώσει την ταχύτητά του.

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Συστάσεις

Στην παρούσα εργασία έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων ερευνών εφαρμογής του δείκτη NDVI για την καθοδήγηση της άρδευσης με μεταβλητό ρυθμό για την εξοικονόμηση υδάτινων πόρων. Το NDVI φαίνεται να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη δυναμικών συνταγών άρδευσης για συστήματα άρδευσης μεταβλητού ρυθμού.

Η μελέτη που διεξήχθη το 2017 και το 2018 αξιολόγησε τη δυνητική χρήση των συντελεστών καλλιέργειας που προέρχονται από μετρήσεις αγρού NDVI στην υγρή περιοχή Eastern Beach Plain των Ηνωμένων Πολιτειών. Η μελέτη διεξήχθη κάτω από ένα σύστημα άρδευσης μεταβλητού ρυθμού (VRI) και συνέκρινε τη χωρική διαχείριση καλλιεργητικού συντελεστή άρδευσης που προέρχεται από το NDVI με μια ομοιόμορφη διαχείριση άρδευσης που βασίζεται στην εβδομαδιαία χρήση του νερού των καλλιεργειών. Και στις δύο μεθόδους άρδευσης φυτεύτηκαν δύο πυκνότητες φυτών για να παρέχουν πιο μεταβλητές μετρήσεις NDVI.

Το 2017 εφαρμόστηκαν τρία αρδευτικά γεγονότα λόγω επαρκών βροχοπτώσεων στην καλλιεργητική περίοδο και το 2018 γίναν οκτώ εφαρμογές άρδευσης.

Τα κυριότερα ευρήματα αυτής της έρευνας ήταν:

- Οι υπολογισμένοι συντελεστές καλλιέργειας που προέκυψαν από μετρήσεις πεδίου NDVI ήταν παράλληλοι με αυτούς του εγχειριδίου FAO-56.
- Μόνο μικρές διαφορές στις συνταγές νερού και στα βάθη εφαρμογής ανά εφαρμογή άρδευσης εμφανίστηκαν σε αυτήν τη μελέτη μεταξύ του συντελεστή καλλιέργειας NDVI και των συνταγών άρδευσης με βάση την ομοιόμορφη κατανομή.
- Τα βάθη εφαρμογής της μεθόδου άρδευσης του συνολικού καλλιεργητικού συντελεστή NDVI το 2017 ήταν σημαντικά χαμηλότερα από τα ομοιόμορφα βάθη εφαρμογής άρδευσης ενώ τα βάθη εφαρμογής άρδευσης του 2018 για τις αρδευτικές θεραπείες δεν ήταν σημαντικά διαφορετικά. Η αποδοτικότητα χρήσης νερού και η αποδοτικότητα χρήσης του αρδευόμενου νερού δεν διέφεραν σημαντικά για τις μεθόδους άρδευσης.
- Οι αποδόσεις του αρδευόμενου βαμβακιού το 2017 όταν χρειάζονταν ελάχιστες αρδεύσεις δεν ήταν σημαντικά μεγαλύτερες από τις αποδόσεις του όμβριου βαμβακιού. Ωστόσο, το 2018 όταν απαιτήθηκε μεγαλύτερος αριθμός αρδεύσεων, και οι δύο αρδευτικές επεξεργασίες είχαν μεγαλύτερες αποδόσεις από τις αποδόσεις των

βροχερών. Η ποιότητα των ινών βαμβακιού δεν ήταν σημαντικά διαφορετική για τις δύο μεθόδους άρδευσης ή τους πληθυσμούς φυτών.

Το ανεπτυγμένο σύστημα ασάφειας που προέκυψε από την έρευνα που διεξήχθη το 2019 για τον έλεγχο της άρδευσης είναι πρωτότυπο και καινοτόμο. Είναι οι πρώτοι που ανέπτυξαν σχετικούς χάρτες ελέγχου ταχύτητας συστημάτων άρδευσης κεντρικού άξονα (Pivot Irrigation Systems). Τα πειράματα τους κατέδειξαν την πιθανή αποτελεσματικότητα της λειτουργίας περιστροφής με βάση τις διαφορές μεταξύ των ταχυτήτων ανά ζώνες διαχείρισης. Το σύστημα ακολουθεί τον ορισμό της Μεταβλητής Δόσης Άρδευσης. Μόλις αλλάξει η ταχύτητα, υπάρχουν αλλαγές στην ποσότητα του παρεχόμενου νερού. Σε αυτό το πλαίσιο, η ασαφής λογική μπορεί να εφαρμοστεί ευρέως σε γεωργικές περιοχές. Ως εκ τούτου, μπορεί να κατασκευαστεί ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων που έχει τη γνώση της άρδευσης ακριβείας.

Η εφαρμογή του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων ασαφούς λογικής ήταν επιτυχής για την ανάπτυξη χαρτών συνταγών για VRI με κεντρικούς άξονες. Ωστόσο, μια ευρύτερη και εμπορική εφαρμογή θα εξαρτηθεί από την ενοποίηση συστημάτων συλλογής δεδομένων, στρατηγικών διαχείρισης και ελέγχου υλικού. Με άλλα λόγια, το μοντέλο ασαφούς λογικής απέδωσε όπως αναμενόταν, παρέχοντας εξαιρετικά αποτελέσματα. Ωστόσο, η αξιοπιστία των πηγών δεδομένων (NDVI, επιφανειακά ύδατα εδάφους και θερμοκρασία θόλου) για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου χάρτη συνταγών είναι το σημαντικότερο αντικείμενο μελέτης.

Στην ερευνά τους, δεν λαμβάνουν υπόψη τον όγκο του στρώματος νερού που θα εφαρμοστεί αλλά περιορίζεται στον έλεγχο περιστροφής της ταχύτητας του συστήματος άρδευσης. Όπου υπάρχει διακύμανση στην ανάπτυξη των φυτών, θα υπάρχει διακύμανση στη ζήτηση νερού. Τα αποτελέσματα ήταν ευνοϊκά για τη συνέχεια των μελετών σχετικά με την άρδευση ακριβείας και την εφαρμογή της ασαφούς λογικής για τη δημιουργία χαρτών κεντρικών αρδευτικών συστημάτων άρδευσης. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα κάτω από πιο μεταβλητές καλλιέργειες και καιρικές συνθήκες. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εφαρμόσει αυτό το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων σε δοκιμές πεδίου για να αξιολογήσει την ικανότητά του να μειώνει την άντληση άρδευσης και να βελτιώνει την απόδοση των καλλιεργειών.

Μέσα από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας κατανοείται ότι η διαχείριση των καλλιεργειών, μπορεί να επιτευχθεί μέσα από τον καθορισμό Ζωνών Διαχείρισης. Ο Καθορισμός Ζωνών Διαχείρισης αποτελεί τη βασική αρχή της Γεωργίας Ακριβείας. Υπό αυτό το πρίσμα, θα μπορούσαν να εξετάζονται και άλλοι παράμετροι και αγρονομικά

χαρακτηριστικά του αγροτεμαζίου για μία πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση. Η παρακολούθηση της βλάστησης, έμμεσα με χρήση τεχνολογιών οπτικής τηλεπισκόπησης είναι πολύ χρήσιμη, καθώς τα χαρακτηριστικά της βλάστησης της καλλιέργειας ενσωματώνουν τη συνολική επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος (έδαφος, κλίμα, νερό, παθογόνα). Παρόλα αυτά, η παράμετρος της τοπογραφίας διαδραματίζει, επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς σε συνθήκες κλίσης, το κάτω μέρος της πλαγιάς χαρακτηρίζεται από εδάφη με μεγαλύτερο βάθος και υδατοχωρητικότητα. Η φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECa) είναι μία ακόμη παράμετρος που εκφράζει μία συνολική εκτίμηση των ιδιοτήτων του εδάφους με τη χρήση αισθητήρων ηλεκτρικής αντίστασης (Arno κ.ά., 2009), και η οποία χρησιμοποιείται σαν παράμετρος για τον καθορισμό Ζωνών Διαχείρισης σε καλλιέργειες.

Και άλλοι παράμετροι όπως δεδομένα από την παραγωγή προηγούμενων ετών, η εμπειρία του γεωργού από το χωράφι, περιοχές στράγγισης, δεδομένα από προσβολές εντόμων, και μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό Ζωνών Διαχείρισης. Το κλίμα είναι ένας σημαντικός παράγοντας που έχει επίδραση στην παραγωγή και η καταγραφή κλιματικών δεδομένων σίγουρα θα δώσει στοιχεία για τη χωρική παραλλακτικότητα, αλλά και την παραλλάκτικότητα στην παραγωγή. Όλα αυτά τα δεδομένα είναι πολύ σημαντικά, καθώς δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης της παραγωγής αρκετές εβδομάδες πριν τη συγκομιδή, που είναι η αγρονομική παράμετρος που επηρεάζει κυρίως τις οικονομικές αποδόσεις των παραγωγών. Σε τελικό στάδιο, ο παραγωγός μπορεί να πραγματοποιήσει διαφοροποιημένη διαχείριση της καλλιέργειάς του, είτε αφορά την άρδευση, τη λίπανση, τους ψεκασμούς ή κάποια άλλη κατεργασία. Με αυτό τον τρόπο δε θα δαπανώνται όπως σήμερα, μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την εφαρμογή των εισροών (νερών, λιπασμάτων, χημικών και καυσίμων).

Βιβλιογραφία

- Aggarwal, S. (2004). Principles of remote sensing. In M.V.K. Sivakumar, P.S. Roy, K. Harmsen, & S.K. Saha (Eds.), *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology* (pp. 23– 38). Dehra Dun: World Meteorological Organisation, Switzerland.
- Albetis, J., Duthoit, S., Guttler, F., Jacquin, A., Goulard, M., Poilvé, H., ... & Dedieu, G. (2017). Detection of Flavescence dorée grapevine disease using unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral imagery. *Remote Sensing*, 9(4), 308.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Aquino, A., Millan, B., Gaston, D., Diago, M. P., & Tardaguila, J. (2015). vitisFlower®: development and testing of a novel android-smartphone application for assessing the number of grapevine flowers per inflorescence using artificial vision techniques. *Sensors*, 15(9), 21204-21218.
- Aravind, K. R., Raja, P., & Pérez Ruiz, M. (2017). Task-based agricultural mobile robots in arable farming: A review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15 (1), 1-16.
- Arnó Satorra, J., Martínez Casasnovas, J. A., Ribes Dasi, M., & Rosell Polo, J. R. (2009). Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2009, vol. 7, núm. 4, p. 779-790.
- Attia, A., & Rajan, N. (2016). Within-season growth and spectral reflectance of cotton and their relation to lint yield. *Crop Sci.*, 56(5), 2688-2701. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.05.0296>
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., & Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57(2), 530-616.
- Balkcom, K. S., Reeves, D. W., Shaw, J. N., Burmester, C. H., & Curtis, L. M. (2006). Cotton yield and fiber quality from irrigated tillage systems in the Tennessee Valley. *Agron. J.*, 98(3), 596-602. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0219>

- Ballard, D.H. & Brown, C.M. (1982). *Computer vision*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernandez, D., & Moreno, M. A. (2018). Onion biomass monitoring using UAV-based RGB imaging. *Precision agriculture*, 19(5), 840-857.
- Baluja J, Diago M.P., Balda., Zorer R., Meggio F., Morales F. & Tardaguila J. (2012c). Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science* 30, 511–522.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1-2), 95–120.
- Barbedo, J. G. A., Koenigkan, L. V., Santos, T. T., & Santos, P. M. (2019). A study on the detection of cattle in UAV images using deep learning. *Sensors*, 19(24), 5436.
- Bauer, M. E. (1975). The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops. In *Advances in agronomy* (Vol. 27, pp. 271-304). Academic Press.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. J. P. A. (2014). Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision agriculture*, 15, 361-376.
- Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94-111.
- Berenstein, R., Shahar, O. B., Shapiro, A., & Edan, Y. (2010). Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer. *Intelligent Service Robotics*, 3(4), 233-243.
- Berger, B., Parent, B., & Tester, M. (2010). High-throughput shoot imaging to study drought responses. *J. Exp. Bot.*, 61(13), 3519- 3528. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq201>
- Bhakta, I., Phadikar, S., & Majumder, K. (2019). State-of-the-art technologies in precision agriculture: a systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(11), 4878-4888.
- Blackmore, B. S., Have, H., and Fountas, S. 2001. A specification of behavioural requirements for an autonomous tractor. 6th International J.R.
- Blackmore S., Godwin R.J. and Fountas S., 2003. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems Engineering* 84(4): 455-466.

- Bloch, S. 2019. Robotic weeders are racing to replace glyphosate and dicamba. In: The Counter [online]. New York. [Cited 4 August 2020]. <https://newfoodeconomy.org/robotweeders-glyphosate-dicamba-herbicide-replacement/>.
- Booker, J. D., Bordovsky, J., Lascano, R. J., & Segarra, E. (2006). Variable rate irrigation on cotton lint yield and fiber quality. Proc. Beltwide Cotton Conferences, (pp. 3-6).
- Borghetti, W.L.C. Silva, H.R. Nocko, L.N. Loyola, G.K. Chianca Agricultura irrigada sustentável no Brasil: identificação de áreas prioritárias (2017), p. 243 (Sustainable irrigated agriculture in Brazil: Identification of priority areas. 243p.)
- Bowers, C.G., Roberson, G.T., Cassel, D.K., Naderman, G.C. & Brownie, C. (2001). Variable rate liquid nitrogen application for cotton and corn production. ASAE Annual International Meeting, Sacramento, CA, ASAE Paper No. 01- 1201.
- Bronson, K. F., Booker, J. D., Bordovsky, J. P., Keeling, J. W., Wheeler, T. A., Boman, R. K.,... Nichols, R. L. (2006). Sitespecific irrigation and nitrogen management for cotton production in the Southern High Plains. Agron. J., 98(1), 212-219. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0149>
- B. Kamble, A. Kilic, K. Hubbard Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index Remote Sensing, 5 (2013), pp. 1588-1602
- Campos, J., Llop, J., Gallart, M., García-Ruiz, F., Gras, A., Salcedo, R., & Gil, E. (2019). Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. Precision Agriculture, 20(6), 1136-1156.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. Remote sensing, 7(4), 4026-4047.
- Chen, Z., Niu, Y., Zhao, R., Han, C., Han, H., & Luo, H. (2019). The combination of limited irrigation and high plant density optimizes canopy structure and improves the water use efficiency of cotton. Agric. Water Manage., 218, 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.037>
- De Bei, R., Kidman, C., Wotton, C., Shepherd, J., Fuentes, S., Gilliam, M., ... & Collins, C. (2018). Canopy architecture is linked to grape and wine quality in Australian Shiraz.

- De Castro, A. I., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Jiménez-Brenes, F. M., Csillik, O., & López-Granados, F. (2018). An automatic random forest-OBIA algorithm for early weed mapping between and within crop rows using UAV imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 285.
- Diago, M. P., Krasnow, M., Bubola, M., Millan, B., & Tardaguila, J. (2016). Assessment of vineyard canopy porosity using machine vision. *American Journal of Enology and Viticulture*, 67(2), 229-238.
- D.J. Hunsaker, E.M. Barnes, T.R. Clarke, G.J. Fitzgerald, P.J. Pinter Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients *Transactions of ASAE*, 48 (2005), pp. 1395-1407
- Dold, C., Heitman, J., Giese, G., Howard, A., Havlin, J., & Sauer, T. (2019). Upscaling evapotranspiration with parsimonious models in a North Carolina vineyard. *Agronomy*, 9(3), 152.
- Drissi, R., Goutouly, J. P., Forget, D., & Gaudillere, J. P. (2009). Nondestructive measurement of grapevine leaf area by ground normalized difference vegetation index. *Agronomy Journal*, 101(1), 226-231.
- Elms, M. K., Green, C. J., & Upchurch, D. R. (1997). Spatial variability of yield in irrigated cotton. In *Beltwide Cotton Conferences (USA)*.
- Fao.org. Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production [Policy Support and Governance] Food and Agriculture Organization of the United Nations . (n.d.). Retrieved November 27, 2021, from <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/1365039/>.
- Feng, L., Mathis, G., Ritchie, G., Han, Y., Li, Y., Wang, G., Bednarz, C. W. (2014). Optimizing irrigation and plant density for improved cotton yield and fiber quality. *Agron. J.*, 106(4), 1111-1118. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0503>
- Fortes Gallego, R., Prieto Losada, M. D. H., García Martín, A., Córdoba Pérez, A., Martínez, L., & Campillo Torres, C. (2015). Using NDVI and guided sampling to develop yield prediction maps of processing tomato crop.
- Fountas, S., Anastasiou, E., Balafoutis, A., Koundouras, S., Theoharis, S., & Theodorou, N. (2014, July). The influence of vine variety and vineyard management on the effectiveness of canopy sensors to predict winegrape yield and quality. In

Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, Switzerland (pp. 6-10).

- Fraga, H., Amraoui, M., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Eiras-Dias, J., Silvestre, J., & Santos, J. A. (2014). Examining the relationship between the Enhanced Vegetation Index and grapevine phenology. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), 753-771.
- Fuentes, S., Bei, R. D., Pozo, C., & Tyerman, S. (2012). Development of a smartphone application to characterise temporal and spatial canopy architecture and leaf area index for grapevines. *Wine and Viticulture Journal*, 27(6), 56-60.
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136-2160.
- Gonzalez-Piqueras, J., Calera, A., Gilabert, M., Cuesta, A., & De la Cruz Tercero, F. (2004). Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn. *Remote Sensing Agric., Ecosyst. Hydrol.* V, 5232. <https://doi.org/10.1117/12.511317>
- Gorucu, S., Khalilian, A., Han, Y. J., Dodd, R. B., Wolak, F. J., & Keskin, M. (2001). Variable depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in coastal plain region of South Carolina. *ASAE*, 1, 1-11.
- Govender, M., Chetty, K., & Bulcock, H. (2007). A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water Sa*, 33(2), 145-151.
- Herrera, J., Ibeas, A., & de la Sen, M. (2013). Identification and control of integrative MIMO systems using pattern search algorithms: An application to irrigation channels. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 334-346.
- Hunsaker, D. J., Barnes, E. M., Clarke, T. R., Fitzgerald, G. J., & Pinter Jr, P. J. (2005). Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients. *Trans. ASAE*, 48(4), 1395-1407. <https://doi.org/10.13031/2013.19197>
- Hunsaker, D. J., French, A. N., Waller, P. M., Bautista, E., Thorp, K. R., Bronson, K. F., & Andrade-Sanchez, P. (2015). Comparison of traditional and ET-based irrigation

scheduling of surface-irrigated cotton in the arid southwestern USA. *Agric. Water Manage.*, 159, 209-224. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.016>

- Jager, A. and Putter, H., 1999. Preharvest factors and postharvest quality decline of apples. *Proceedings of the International Symposium on Effect of Pre- and Post Harvest factors on Storage of Fruit*, pp. 103-110.
- Jorge, J., Vallbé, M., & Soler, J. A. (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 169-177.
- Junges, A. H., Fontana, D. C., Anzanello¹, R., & Bremm, C. (2017). Normalized difference vegetation index obtained by ground-based remote sensing to characterize vine cycle in Rio Grande do Sul, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 41, 543-553.
- Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote sensing*, 5(4), 1588-1602.
- Kweon G. Delineation of site-specific productivity zones using soil properties and topographic attributes with a fuzzy logic system *Biosystems Engineering*, 112 (2012), pp. 261-277
- Lacerda, L. N., Snider, J., Cohen, Y., Liakos, V., & Vellidis, G. (2021). The use of remote sensing for variable rate irrigation in cotton. In *Precision agriculture '21* (pp. 217-237). Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_45
- Lee, W.S., Slaughter, D.C. & Giles, D.K. (1996) Development of a machine vision system for weed control using precision chemical application. In: *International Conference on agricultural machinery engineering*. 1996, pp. 802-811.
- Lo, T. H., Heeren, D. M., Mateos, L., Luck, J. D., Martin, D. L., & Eisenhauer, D. E. (2015). Potential irrigation reductions from increasing precipitation utilization with variable rate irrigation. *Proc. 2015 ASABE/IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation-A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings* (pp. 1-11). St. Joseph, MI: ASABE.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons.
- Lowenberg-DeBoer, J. M., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*.

- Markinos, A., Gemtos, T., Toullos, L., Pateras, D., & Zerva, G. (2002, June). Yield mapping of cotton crop in Greece. In Proceedings of the 1st HAICTA Conf (pp. 56-62).
- Mathews, A. J., & Jensen, J. L. (2013). Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an unmanned aerial vehicle (UAV) collected high density structure from motion point cloud. *Remote Sensing*, 5(5), 2164-2183.
- McCauley, J.D. 1999. Simulation of Cotton Production for Precision Farming. *Precision Agriculture*, 1, pp. 81-94.
- Mogili, U. R., & Deepak, B. B. V. L. (2018). Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia computer science*, 133, 502-509.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- M. Bahat, G. Inbar, O. Yaniv, M. Schneider A fuzzy irrigation controller system *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13 (2000), pp. 137-145
- National Research Council, 1997. Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. National Academy Press, Washington, D.C. pp. 1-15.
- Natu, A. S., & Kulkarni, S. C. (2016). Adoption and utilization of drones for advanced precision farming: A review. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 4(5), 563-565.
- Okin, G. S. (2007). Relative spectral mixture analysis—A multitemporal index of total vegetation cover. *Remote Sensing of Environment*, 106(4), 467-479.
- Orlando, F., Movedi, E., Coduto, D., Parisi, S., Brancadoro, L., Pagani, V., ... & Confalonieri, R. (2016). Estimating leaf area index (LAI) in vineyards using the PocketLAI smart-app. *Sensors*, 16(12), 2004.
- Paulus, I., De Busscher, R. & Schrevens, E. (1997). Use of image analysis to investigate human quality classification of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 68 (4). pp. 341-353.
- Rangel, B. M. S., Fernández, M. A. A., Murillo, J. C., Ortega, J. C. P., & Arreguín, J. M. R. (2016, February). KNN-based image segmentation for grapevine potassium deficiency diagnosis. In 2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP) (pp. 48-53). IEEE.

- R.A. Armindo, T.A. Botrel, T.C. Garzella. Flow rate sprinkler development for site-specific irrigation *Irrigation Science*, 29 (2011), pp. 233-240
- R. Dutta, A. Morshed, J. Aryal, C. D'Este, A. Das Development of an intelligent environmental knowledge system for sustainable agricultural decision support *Environmental Modelling & Software*, 52 (2014), pp. 264-272
- R.G. Evans, B.A. King. Site-specific sprinkler irrigation in a water-limited future *Transactions of the ASABE—Advances in Irrigation*, 55 (2012), pp. 493-504.
- Roberson, G. T. (2000). Precision agriculture technology for horticultural crop production. *HortTechnology*, 10(3), 448-451.
- Poblete-Echeverría, C., Olmedo, G. F., Ingram, B., & Bardeen, M. (2017). Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution RGB imagery obtained from unmanned aerial vehicle (UAV): A case study in a commercial vineyard. *Remote Sensing*, 9(3), 268.
- Sadler, E. J., Camp, C. R., Evans, D. E., & Usrey, L. J. (1996). A site-specific center pivot irrigation system for highly-variable Coastal Plain Soils. In P. C. Robert, R. H. Rust, & W. E. Larson (Eds.), *Proc. Third International Conference on Precision Agriculture* (pp. 827-834). ASA, CSSA, SSSA. <https://doi.org/10.2134/1996.precisionagproc3.c98>
- S.B. Idso, D.G. Baker Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants *Plant Physiology*, 42 (1967), pp. 631-640
- Shamshiri, R. R., Hameed, I. A., Balasundram, S. K., Ahmad, D., Weltzien, C., & Yamin, M. (2018). Fundamental research on unmanned aerial vehicles to support precision agriculture in oil palm plantations. *Agricultural Robots-Fundamentals and Application*, 91-116.
- Sigrimis, N. (2000). The 21st century expectations in IT. What are the limits. The XIV Memorial CIGR World Conference, Tsukuba, Japan.
- Slater, P. N. (1980). *Remote sensing: optics and optical systems*. Reading.
- Snowden, C., Ritchie, G., Cave, J., Keeling, W., & Rajan, N. (2013). Multiple irrigation levels affect boll distribution, yield, and fiber micronaire in cotton. *Agron. J.*, 105(6), 1536-1544. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0084>
- Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of agricultural engineering research*, 76(3), 267-275.

- Steger, A. J., Silvertooth, J. C., & Brown, P. W. (1998). Upland cotton growth and yield response to timing the initial postplant irrigation. *Agron. J.*, 90(4), 455-461. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000040002x>
- Sui, R., & Yan, H. (2017). Field study of variable rate irrigation management in humid climates. *Irrig. Drain.*, 66(3), 327-339. <https://doi.org/10.1002/ird.2111>
- Sun, D. W. (Ed.). (2016). *Computer vision technology for food quality evaluation*. Academic Press.
- The state of food and agriculture. *Climate change, agriculture and food security, 2016*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (2016).
- Tokatlidis, I. S., Has, V., Melidis, V., Has, I., Mylonas, I., Evgenidis, G.,... Fasoula, V. A. (2011). Maize hybrids less dependent on high plant densities improve resource-use efficiency in rainfed and irrigated conditions. *Field Crops Res.*, 120(3), 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.006>
- Towers, P. C., Strever, A., & Poblete-Echeverría, C. (2019). Comparison of vegetation indices for leaf area index estimation in vertical shoot positioned vine canopies with and without grenbiule hail-protection netting. *Remote Sensing*, 11(9), 1073.
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- Ustuner, M., Sanli, F. B., Abdikan, S. A. Y. G. I. N., Esetlili, M. T., & Kurucu, Y. U. S. U. F. (2014). Crop type classification using vegetation indices of rapideye imagery. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(7), 195.
- Weiss, M., & Baret, F. (2017). Using 3D point clouds derived from UAV RGB imagery to describe vineyard 3D macro-structure. *Remote Sensing*, 9(2), 111.
- Willians Ribeiro Mendes, Fábio Meneghetti U. Araújo, Ritaban Dutta, Derek M. Heeren (2019). Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Systems with Applications*, Volume 124, pp 13-24.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017.
- Yu, R., & Kurtural, S. K. (2020). Proximal sensing of soil electrical conductivity provides a link to soil-plant water relationships and supports the identification of plant water status zones in vineyards. *Frontiers in Plant Science*, 11, 244.

- Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Kaartinen, H., & Haggren, H. (2018). A Review: Remote Sensing Sensors. Multi-Purposeful Application of Geospatial Data. InTechOpen: Rijeka, Croatia, 2018.
- Περάκης, Κ. (2015). Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και Τηλεπισκόπηση. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/1841>.
- Φουντάς, Σ., Γέμτος, Θ., 2015. Γεωργία ακριβείας. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2670>
- Φτάκα, Α., 2006. Η Γεωργία Ακριβείας ως εργαλείο της γεωργικής πρακτικής για την αειφόρο ανάπτυξη. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών Συστημάτων.