

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

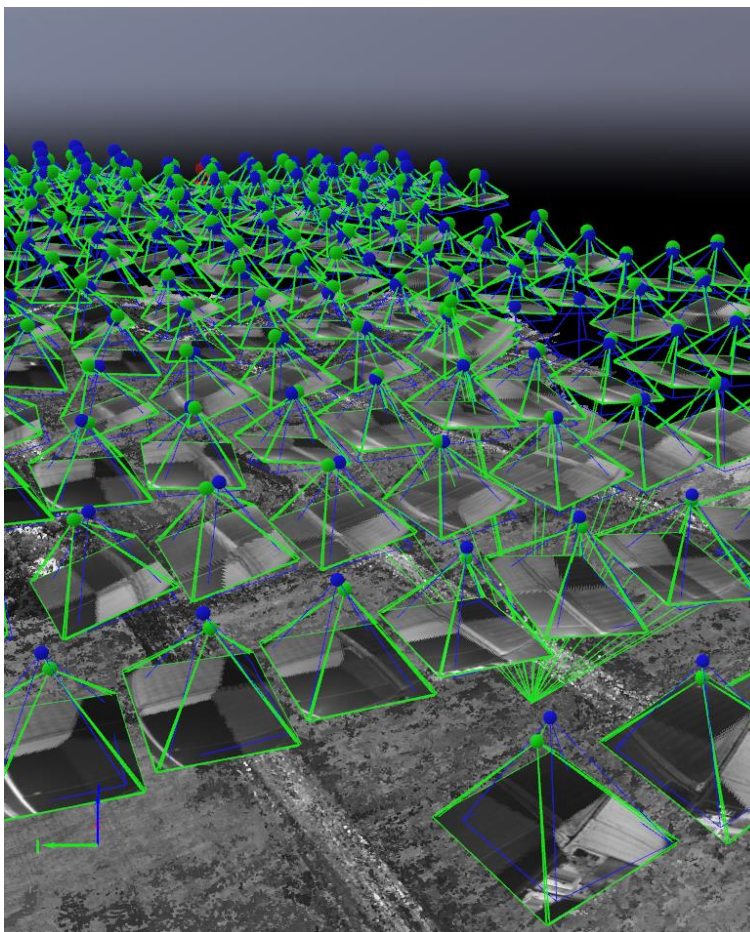
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «Φυσικοί Πόροι,
Γεωπεριβάλλον και Γεωργική Μηχανική»

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ III: «Γεωπληροφορική και Χωρική Ανάλυση»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Χωρική ανάλυση αγρονομικών και τηλεπισκοπικών (UAS) δεδομένων για την πρόβλεψη παραγωγής καλλιέργειας ρυζιού



Νικόλαος Π. Πέρος

Επιβλέπων: Καλύβας Διονύσιος
Καθηγητής Γ.Π.Α.

Αθήνα, 2019

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «Φυσικοί Πόροι,

Γεωπεριβάλλον και Γεωργική Μηχανική»

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΙΙΙ: «Γεωπληροφορική και Χωρική Ανάλυση»

Χωρική ανάλυση αγρονομικών και τηλεπισκοπικών (UAS)
δεδομένων για την πρόβλεψη παραγωγής καλλιέργειας ρυζιού.

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Νικόλαος Π. Πέρρος

Επιβλέπων: Καλύβας Διονύσιος, Καθηγητής

Αθήνα, 2019

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Με θέμα:

Χωρική ανάλυση αγρονομικών και τηλεπισκοπικών (UAS)
δεδομένων για την πρόβλεψη παραγωγής καλλιέργειας ρυζιού.

Νικόλαος Π. Πέρρος

Εξεταστική επιτροπή:

Καλύβας Διονύσιος, Καθηγητής

Φουντάς Σπυρίδων, Αναπληρωτής Καθηγητής

Οικονόμου Γαρυφαλιά, Καθηγήτρια

...αφιερωμένο στο φως της ζωής μου, Α & α

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία ΟΙΚΟΑΝΑΠΤΥΞΗ για τη διάθεση των πρωτογενών δεδομένων που αξιοποιούνται στην εργασία αυτή και των πόρων (σε μέσα, χρόνο και προσωπικό) που απαιτήθηκαν για την απόκτησή τους. Χωρίς τα δεδομένα αυτά δε θα ήταν ποτέ δυνατή η μελέτη του θέματος που εξετάζεται. Θα αναφερθώ και προσωπικά στους Δρ. Ιατρού Γιώργο, Δρ. Μουρελάτο Σπύρο, Gewehr Sandra, Δρ. Ιατρού Μίλτο, Δρ. Τσένη Ξανθή και Δρ. Καρυδά Χρήστο γιατί ο καθένας με τον τρόπο του παρείχε στήριξη είτε ηθική ή ψυχολογική και τεχνική κατά τη διάρκεια της συγγραφής της μελέτης.

Ευχαριστώ θερμά και τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Καλύβα Διονύση για την όλη παρακολούθηση της πορείας της εργασίας αυτής και για το χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τη συγγραφή της καθώς και τον κ. Φουντά για πολύ χρήσιμες υποδείξεις του. Με τις διορθώσεις και παραινέσεις τους κατέστη δυνατή η ορθή μεθοδολογικά επεξεργασία και αξιολόγηση των δεδομένων και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη γυναίκα μου και γεωπόνο Αθηνά Καζάνα για την στήριξη και την επιμονή της στην ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού αυτού κύκλου σπουδών. Με την εμπειρία της βοήθησε στην επιμέλεια της εργασίας αυτής και στην ολοκλήρωσή της.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται χωρική ανάλυση αγρονομικών και τηλεπισκοπικών δεδομένων για την πρόβλεψη της παραγωγής σε καλλιέργεια ρυζιού. Ειδικότερα, διερευνάται η χώρο – χρονική παραλλακτικότητα μιας σειράς δεικτών βλάστησης (Δ.Β.) υπολογισμένων από δεδομένα τηλεπισκόπησης που αποκτήθηκαν με τη χρήση εμπορικής πλατφόρμας UAS (e-Bee σε 4 ημ/νίες) και η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής. Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στην Χαλάστρα Θεσσαλονίκης και τα πρωτογενή δεδομένα ελήφθησαν την καλλιεργητική περίοδο 2016.

Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τηλεπισκοπικές πολυφασματικές εικόνες υπερυψηλής ανάλυσης από 18 αγροτεμάχια 580 στρ. καλλιέργειας 2 ποικιλιών ρυζιού (Ronaldo και Gladio), 97 σημειακά δεδομένα που σχετίζονται με την ποσότητα συγκομιδής, καθώς και λοιπές πληροφορίες για την καλλιέργεια, όπως καταγράφονται στο ημερολόγιο αγρού από τον παραγωγό.

Υπολογίστηκαν 10 απλοί και σύνθετοι Δ.Β. και μελετήθηκε η διαχρονική εξέλιξη των τιμών τους κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου καθώς και η συγκριτική μεταξύ τους συσχέτιση. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της αξιολόγησης/ευαισθησίας του κάθε Δ.Β. για τα διάφορα φαινολογικά στάδια της καλλιέργειας καθώς και η χωρική παραλλακτικότητα της παραγωγής και των Δ.Β., ενώ αναγνωρίστηκαν οι καλύτερα σχετιζόμενοι με τη συγκομιδή Δ.Β. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκαν 3 τύποι διαχρονικών Δ.Β. (multitemporal VI) από συνδυασμούς Δ.Β. διαφορετικών χρονικών περιόδων λήψης τηλεπισκοπικών δεδομένων και μελετήθηκε η συνεισφορά τους στη βελτίωση της πρόβλεψης της συγκομιδής.

Καθώς η Ronaldo είναι ποικιλία τύπου Japonica ενώ η Gladio είναι τύπου Indica, συμπεριφέρονται διαφορετικά ως προς το χρόνο ωρίμανσης (η Gladio είναι προωρότερη κατά περίπου 20 ημέρες) και όλες οι τιμές των Δ.Β. επηρεάζονται από τις αλλαγές στη φυσιολογία και τη φαινολογία των φυτών. Οι διαφορές αυτές μεταξύ των 2 ποικιλιών αποτυπώνονται στη διαχρονική μελέτη των μεμονωμένων Δ.Β. αλλά και των διαχρονικών Δ.Β. Η παραλλακτικότητα εντός των αγροτεμαχίων που αποδίδεται στην εδαφική σύσταση και τη θρέψη επηρεάζει με προβλέψιμο τρόπο τις τιμές των πιο ευαίσθητων εξ' αυτών.

Συμπερασματικά, ο NDVI συσχετίζεται ισχυρά με την παραγωγή ακόμη και σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης ($r = .78$ για Ronaldo και $r = .94$ για Gladio) ενώ οι σύνθετοι Δ.Β. RERDVI και MCARI1 έχουν το μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης με την παραγωγή ($r = .74$ για Ronaldo και $r = .97$ για Gladio αντίστοιχα) ακόμη και όταν υπολογίζονται πρώιμα, στο στάδιο του booting. Για την ποικιλία Ronaldo η εξέταση των διαχρονικών δεικτών βλάστησης αυξάνει την ακρίβεια πρόβλεψης της συγκομιδής (το r αυξάνεται έως και κατά 0.63) ενώ το αντίθετο παρατηρείται με την ποικιλία Gladio.

Abstract

In this thesis a spatial analysis of agronomic and remote sensing data is made in order to derive accurate yield prediction of rice crops. Space-time variability of a series of vegetation indices (VI) were calculated from remote sensing data obtained using a commercial UAS platform (e-Bee at 4 dates) and the development of prediction models was conducted. The study area is located in the region of Chalastra (municipality of Thessaloniki) and the primary data were obtained during the 2016 growing season.

These data include ultra-high resolution remote sensing multispectral images of 18 plots totaling 58 acres of Ronaldo and Gladio rice crop varieties, 97 point data related to yield and many other information recorded in the producer's field log.

Ten (10) simple and compound VIs were calculated and evolution of their values during the growing season as well as their comparative correlation were studied. A study of the usability / sensitivity of each VI was conducted for the different phenological stages of the cultivation as well as of the spatial variation of VI's and yield; the higher correlated VIs was identified. Furthermore, 3 types of multitemporal VI were calculated from combinations of VI from different dates and their contribution to improving yield prediction was studied.

As Ronaldo is a Japonica type of rice variety and Gladio is Indica type, they behave differently in terms of maturation time (Gladio is approximately 20 days earlier) and the value of every VI is affected by changes in plant physiology and phenology. These differences between the two varieties are reflected in the multitemporal study of the individual VIs but also, in the study of the values of the multitemporal VI. Variability within the plots attributed to soil composition and nutrition affects the value of the most sensitive VI in a predictable way.

In conclusion, NDVI is strongly correlated to yield even when calculated during early growth stage ($r = .78$ for Ronaldo and $r = .94$ for Gladio variety) whereas the compound VIs RERDVI and MCARI1 have the highest linear correlation coefficient with yield ($r = .74$ for Ronaldo and $r = .97$ for Gladio respectively) even when calculated as early as in the booting stage. For the Ronaldo variety, the examination of the multitemporal VIs increases yield prediction accuracy (r increase by up to 0.63), while in the case of Gladio variety the opposite is observed.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 3 |
| 1.1 Γενικά στοιχεία για την καλλιέργεια του ρυζιού..... | 3 |
| 1.1.1 Βοτανολογικά χαρακτηριστικά του ρυζιού..... | 3 |
| 1.1.2 Πρακτική καλλιέργειας στην Ελλάδα..... | 4 |
| 1.2 Τα μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής..... | 7 |
| 1.3 Πρόσφατες εξελίξεις στα εμπορικά Unmanned Aerial Systems (UAS)..... | 10 |
| 1.3.1 Το οικονομοτεχνικό περιβάλλον..... | 10 |
| 1.3.2 UAS – η πλατφόρμα..... | 11 |
| 1.4 Τηλεπισκοπικά δεδομένα και δείκτες βλάστησης..... | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ..... | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ..... | 18 |
| 3.1 Περιοχή Μελέτης..... | 18 |
| 3.2 Τα δεδομένα της έρευνας..... | 20 |
| 3.2.1 Λήψη πρωτογενών δεδομένων..... | 22 |
| 3.2.2 Προ – επεξεργασία των δεδομένων & υπολογισμός των δεικτών βλάστησης..... | 25 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ..... | 31 |
| 4.1 Προκαταρκτική ανάλυση δεδομένων..... | 31 |
| 4.2 Πρόβλεψη της παραγωγής με δεδομένα σε επίπεδο αγροτεμαχίου..... | 35 |
| 4.3 Ανάλυση της παραλλακτικότητας εντός των αγροτεμαχίων..... | 40 |
| 4.4 Πρόβλεψη της παραγωγής με αξιοποίηση των σημειακών μετρήσεων παραγωγής..... | 45 |
| 4.5 Πρόβλεψη της παραγωγής με διαχρονικούς δείκτες βλάστησης..... | 50 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 54 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης..... | 56 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – poster από το συνέδριο της Marathon..... | 57 |
| Βιβλιογραφία..... | 58 |

Ευρετήριο εικόνων:

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής για ένα σύγχρονο και γενικευμένο μοντέλο πρόβλεψης της συγκομιδής με τις παραλλαγές που μπορεί να υιοθετηθούν κατά την εφαρμογή του και με κόκκινο χρώμα η διεργασία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία. | 9 |
| Εικόνα 2: Χάρτης της περιοχής των αγροτεμαχίων της μελέτης | 18 |
| Εικόνα 3. Η περιοχή μελέτης με τις ποικιλίες που ερευνήθηκαν και τα σημεία λήψης σημειακών δεδομένων της παραγωγής. | 19 |
| Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση των τυπικών σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας του ρυζιού (προσαρμοσμένων χρονικά στην καλλιεργητική πρακτική της Χαλάστρας, των επιμέρους καλλιεργητικών πρακτικών της περιοχής καθώς και οι ημερομηνίες των 4 πτήσεων με το UAS.20 | |
| Εικόνα 5. Η άνω όψη (a) και η κάτω όψη (b) του eBee με κατασκευαστικές λεπτομέρειες. | 22 |
| Εικόνα 6. Επεξεργασία των πολυφασματικών εικόνων με το Pix4D. Ενδεικτικά απεικονίζεται το πλήθος των φωτογραφιών στο οποίο εμφανίζεται 1 σημείο (a) και η διεργασία της σύνθεσης του μωσαϊκού από πολλαπλές εικόνες (b). | 23 |
| Εικόνα 7. Διαδικασία λήψης σημειακών δεδομένων παραγωγής: Εντοπισμός θέσης με gps (a), το πλαίσιο δειγματοληψίας τοποθετημένο στον αγρό (b) και λεπτομέρεια από τον καρπό (c)..... | 24 |
| Εικόνα 8. Το διάγραμμα ροής για τη δημιουργία των 2 σετ δευτερογενών δεδομένων. | 25 |
| Εικόνα 9. Ο δείκτης NDVI για την περιοχή μελέτης όπως υπολογίστηκε στις 6 Ιουλίου (a), στις 21 Ιουλίου (b) και στις 30 Αυγούστου (c)..... | 36 |
| Εικόνα 10. Οι τελικές ζώνες μελέτης, όπως προέκυψαν από την σχηματική απλοποίησή τους... 41 | |
| Εικόνα 11. Οι προκαταρκτικές ζώνες μελέτης, όπως προέκυψαν από την μη – επιβλεπόμενη ταξινόμηση. | 41 |
| Εικόνα 12. Απεικόνιση των μέσων τιμών των υπό διερεύνηση ζωνών μελέτης στις 30 Αυγούστου των δεικτών NDVI (a), RERDVI (b) και MCARI1 (c)..... | 41 |
| Εικόνα 13. Απεικόνιση της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ύλη (a), της εδαφικής σύστασης του εδάφους και κατάταξής του σε κατηγορίες (b), του αποτελέσματος του cluster & outlier analysis (Anselin Local Moran’s I) επί της παραγωγής (c), τη ς έλλειψης φωσφόρου στο | |

| | |
|--|----|
| έδαφος (d), του fertility Index του εδάφους (e) και την παραλλακτικότητα των ζωνών μελέτης επί της παραγωγής των σημειακών μετρήσεων σε μονάδες τυπικής απόκλισης (f). | 43 |
| Εικόνα 14. Το τρίγωνο ταξινόμησης & κατάταξης των εδαφών σε κατηγορίες ανάλογα με τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά τους..... | 43 |
| Εικόνα 15. Απεικόνιση των σημειακών δεδομένων παραγωγής μαζί με το αποτέλεσμα της cluster & outlier analysis (υπολογισμένο ξεχωριστά για την κάθε ποικιλία) (a) και των φασματικών outlier των δεικτών βλάστησης αναλόγως της συχνότητας εμφάνισής τους (b). | 47 |
| Εικόνα 16. Χρωματική απόδοση του μεγέθους του συντελεστή προσδιορισμού r^2 για τους διαχρονικούς δείκτες βλάστησης όπως υπολογίστηκαν βάσει του NDVI, RERDVI & MCARI1 για τις 2 ποικιλίες. | 52 |
| Εικόνα 17. Ενδεικτική απεικόνιση της παραλλακτικότητας που υπάρχει στην ποσότητα συγκομιδής εντός των αγροτεμαχίων της μελέτης από πείραμα του 2017 με διαφορετικές ποικιλίες και με μέτρηση συγκομιδής ανά 100τ.μ. από ειδικά τροποποιημένη αλωνιστική μηχανή. | 55 |

Ευρετήριο πινάκων:

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1. Γενικές πληροφορίες ως προς την ταξινόμηση, τη φυσιολογία και τη φαινολογία των 2 ποικιλιών ρυζιού που μελετήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα..... | 21 |
| Πίνακας 2. Ραδιομετρικά χαρακτηριστικά της πολυφασματικής κάμερας. | 22 |
| Πίνακας 3. Αναλυτικές πληροφορίες για τις ημερομηνίες, το χρόνο και τις συνθήκες πτήσης του UAS. | 23 |
| Πίνακας 4: Οι δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν για την κάθε ημερομηνία και χρήσιμες πληροφορίες σχετικές με αυτούς..... | 28 |
| Πίνακας 5. Περιγραφικά στατιστικά μεγέθη για την παραγωγή των 2 ποικιλιών ρυζιού..... | 32 |
| Πίνακας 6. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (Pearson's r) μεταξύ των 10 εξεταζόμενων δεικτών βλάστησης και της τελικής συγκομιδής για το γενικό πληθυσμό αλλά και την κάθε ποικιλία ξεχωριστά (με χρωματική απόδοση γαλάζιο & πράσινο παρουσιάζονται οι δείκτες βλάστησης με την μέση καλύτερη συσχέτιση για τις ποικιλίες Ronaldo και Gladio αντίστοιχα)..... | 37 |
| Πίνακας 7. Περιγραφικά στατιστικά μεγέθη της παραγωγής που προκύπτουν από τις σημειακές μετρήσεις της παραγωγής..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Πίνακας 8. Οι συντελεστές συσχέτισης (Pearson's r & Spearman's ρ) μεταξύ του συνόλου και των 97 σημειακών τιμών συγκομιδής και των 10 δεικτών βλάστησης..... | 47 |
| Πίνακας 9. Ο συντελεστής συσχέτισης (Pearson's r) για τα σημειακά δεδομένα ανά ποικιλία και μετά την αφαίρεση όλων των outlier - 19 στο σύνολο (76 σημειακά δεδομένα συνολικά)..... | 48 |
| Πίνακας 10. Οι 3 διαχρονικοί δείκτες βλάστησης που αξιολογήθηκαν – MRL(VI), SUM(VI) & MAX (VI) και ο τρόπος υπολογισμού τους. | 51 |

Ευρετήριο γραφημάτων:

| | |
|---|----|
| Γράφημα 1. Ο βαθμός υιοθέτησης τεχνολογιών & μέσων το διάστημα 2004 – 2015 στον αγροτικό χώρο εν γένει (a), ο βαθμός χρήσης (%) τεχνολογιών & μέσων στην φυτική παραγωγή (b), τα εμπλεκόμενα με τα UAS μέρη στη μικρο & μακρο – κλίμακα (c) και το μερίδιο αγοράς (%) τεχνολογιών & μέσων στη φυτική παραγωγή (d). | 10 |
| Γράφημα 2. Σύγκριση μεταξύ πλατφορμών λήψης τηλεπισκοπικών δεδομένων: μεταξύ δορυφόρων, αερομεταφερόμενων μέσων και UAS ως προς την έκταση κάλυψης & την ευελιξία χρήσης (a), ως προς την έκταση κάλυψης & το κόστος απόκτησης των εικόνων (b) και μεταξύ UAS σταθερής πτέρυγας & multi-rotor ως προς τον απαιτούμενο χρόνο για τη λήψη τελικών επεξεργασμένων εικόνων (c)..... | 13 |
| Γράφημα 3. Γραφική απεικόνιση της ευαισθησίας της πολυφασματικής κάμερας στα 4 μήκη κύματος με υπόβαθρο την τυπική καμπύλη ανακλαστικότητας υγιούς βλάστησης. | 22 |
| Γράφημα 4. Boxplot από τη συνολική παραγωγή (σε kg/στρ.) των 18 αγροτεμαχίων ανά ποικιλία (a), από τη μέση τιμή των 97 σημειακών δεδομένων συγκομιδής ανά ποικιλία (b) και από τα σημειακά δεδομένα συγκομιδής ανά αγροτεμάχιο και ποικιλία (c)..... | 31 |
| Γράφημα 5. Οι μέσες τιμές του NDVI και των 2 δεικτών βλάστησης με τους υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης με την παραγωγή (MCARI1 για την Gladio & RERDVI για τη Ronaldo) ανά αγροτεμάχιο και για τις 3 ημερομηνίες λήψης των τηλεπισκοπικών εικόνων. | 33 |
| Γράφημα 6. Ενδεικτικό scatterplot των τιμών του δείκτη NDVI στις 06/07/2016 και της συγκομιδής για την ποικιλία Ronaldo (a) και ενδεικτική διερεύνηση των μορφών παλινδρόμησης για τον δείκτη βλάστησης NDRE (b). | 35 |
| Γράφημα 7. Boxplot τριών δεικτών βλάστησης στις θέσεις λήψης σημειακών μετρήσεων συγκομιδής ανά αγροτεμάχιο & φαινολογικό στάδιο ανάπτυξης: για τον δείκτη NDVI (a), το δείκτη MCARI1 (b) και το RERDVI (c). | 46 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται για την καλλιέργεια του ρυζιού η χώρο – χρονική παραλλακτικότητα μιας σειράς δεικτών βλάστησης υπολογισμένων από δεδομένα τηλεπισκόπησης που αποκτήθηκαν με τη χρήση εμπορικής πλατφόρμας UAS και η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής της καλλιέργειας βασισμένων σε τηλεπισκοπικούς δείκτες βλάστησης. Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στην Χαλάστρα Θεσσαλονίκης και τα πρωτογενή δεδομένα που αξιοποιήθηκαν στη μελέτη ελήφθησαν με εμπορικό UAS, αποτελούν ιδιοκτησία της εταιρίας ΟΙΚΟΑΝΑΠΤΥΞΗ Α.Ε. και είναι μέρος του ευρύτερου πειραματισμού της εταιρίας στη γεωργία ακριβείας για το 2016.

Η σημασία της έρευνας στην καλλιέργεια του ρυζιού αναδεικνύεται από το γεγονός πως από το ρύζι σήμερα εξαρτώνται διατροφικά πάνω από 3,5 δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως για την κάλυψη του 20% των θερμιδικών τους αναγκών (Ricepedia n.d.), ενώ αποτελεί μαζί με τον σίτο και τον αραβόσιτο τις 3 σημαντικότερες καλλιέργειες. Επί δεκαετίες η επιστημονική κοινότητα ερευνά τρόπους ποσοτικής και ποιοτικής αύξησης της παραγωγής με σημαντικές προόδους να έχουν σημειωθεί σε πολλούς τομείς και τη μέση παγκόσμια παραγωγή από 393 κιλά/στρ. το 1955 να ανέρχεται το 2015 σε 800 κιλά/στρ. (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2018). Η αύξηση στην απόδοση επιτεύχθηκε με την χρήση νέων ποικιλιών, με την βελτίωση της τεχνικής της καλλιέργειας και την αναγνώριση – έλεγχο των περιοριστικών παραγόντων της παραγωγής, με την ενημέρωση των ορυζοπαραγωγών, σχετικά με τις νέες καλλιεργητικές πρακτικές, με την ύπαρξη ενός μόνιμου σύγχρονου συστήματος άρδευσης και στράγγισης καθώς και με την υιοθέτηση τεχνολογιών αιχμής (Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης & Φυτογενετικών Πόρων n.d.).

Σε ότι αφορά τις τεχνολογίες αιχμής, τα προϊόντα και οι υπηρεσίες υψηλής τεχνολογίας περιγράφονται σχεδόν στο σύνολό τους από τον όρο "Γεωργία μειωμένων εισροών", ή όπως έχει καθιερωθεί διεθνώς "Γεωργία Ακριβείας" - Γ.Α. (Precision Agriculture ή Digital Agriculture, όπως αναφέρεται στα έγγραφα της Ευρωπαϊκής Ένωσης) και αποτελούν τεχνολογίες και μέσα ικανά να καταγράψουν με ακρίβεια την υπάρχουσα κατάσταση στον αγρό, στη συνέχεια να διαχειριστούν τη συγκεντρωμένη πληροφορία και τα δεδομένα και τέλος να εφαρμόσουν τις εισροές έτσι, ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες κάθε σημείου και χρονικής στιγμής ξεχωριστά. Καθώς η επιχειρησιακή επιτυχία του όλου συστήματος εξαρτάται από την έγκαιρη απόκτηση χαρτογραφικού υποβάθρου της καλλιέργειας που να αποτυπώνει κρίσιμες παραμέτρους όπως το φαινοτυπικό στάδιο και το ρυθμό ανάπτυξης των φυτών, παραμέτρους που σχετίζονται με τη γονιμότητα του εδάφους κ.λπ.,

η τηλεπισκόπηση μέσω UAS (Unmanned Aerial Systems) έχει αναδειχθεί σε κρίσιμο τομέα έρευνας.

Εφαρμογές Γ.Α. πραγματοποιούνταν στην Ελλάδα ήδη από το 2000, κυρίως από πρωτοπόρους ορυζοκαλλιεργητές της περιοχής της Χαλάστρας στη Θεσσαλονίκη (Μιχαηλίδης, και συν. 2005). Με την ωρίμανση της τεχνολογίας των UAS, από το 2015 εμφανίστηκαν και στην Ελλάδα οι πρώτες εμπορικές πλατφόρμες. Οι δυνατότητες μιας τέτοιας πλατφόρμας UAS αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Στο κεφάλαιο 1 παρατίθενται κάποια γενικά στοιχεία που αφορούν την εργασία. Ειδικότερα, πληροφορίες που σχετίζονται με την καλλιέργεια του ρυζιού παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα, τα βοτανολογικά του χαρακτηριστικά, την καλλιεργητική πρακτική στην περιοχή μελέτης, το θεωρητικό πλαίσιο σχετικά με τα μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής στο ρύζι, γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στους δείκτες βλάστησης που θα χρησιμοποιηθούν ενώ παρατίθενται και οι τελευταίες εξελίξεις στα σύγχρονα UAS.

Στο κεφάλαιο 2 ορίζεται με σαφήνεια ο σκοπός της εργασίας και παρουσιάζονται οι επιμέρους στόχοι που θα διερευνηθούν κατά την ανάλυση των δεδομένων του πειράματος.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται διεξοδικά η περιοχή μελέτης και τα αγροτεμάχια που περιλαμβάνει, η πλατφόρμα UAS που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των πρωτογενών δεδομένων καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προ-επεξεργασία των τηλεπισκοπικών εικόνων και την εξαγωγή των δευτερογενών δεδομένων.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται με λεπτομέρεια η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα επίπεδα (με χρήση τριών διαφορετικών σετ δευτερογενών δεδομένων): ανάλυση της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας των μέσων δεικτών βλάστησης των αγροτεμαχίων, μελέτη της παραλλακτικότητας εντός των αγροτεμαχίων και της ευαισθησία των δεικτών βλάστησης στη μεταβολή της φυσιολογίας των φυτών, διερεύνηση της συσχέτισης των σημειακών δεικτών βλάστησης με την τελική παραγωγή και τέλος διερεύνηση της χρήσης διαχρονικών δεικτών βλάστησης σε ένα προβλεπτικό εμπειρικό μοντέλο για την καλλιέργεια του ρυζιού.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων του πειράματος και σύνοψη σε συμπεράσματα που αφορούν στο βαθμό επίτευξης του σκοπού της παρούσας μελέτης. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα σημεία βελτίωσης που αναγνωρίστηκαν και που θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή σε μελλοντική διερεύνηση παρόμοιου θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Γενικά στοιχεία για την καλλιέργεια του ρυζιού

Επί ογδόντα αιώνες, το ρύζι είναι το βασικό στοιχείο της καθημερινής διατροφής για το μισό πληθυσμό της γης, αλλά συγχρόνως ισχυρό σύμβολο ευτυχίας, ευημερίας και γονιμότητας. Η σοδειά του ρυζιού ξεπερνά τα 500.000.000 τόνους και αποτελεί την κυρίαρχη τροφή για 2,7 δισεκατομμύρια ανθρώπους, παραπάνω δηλαδή από το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού για το 2010 (Charles, et al. 2010) και 3,5 δισεκατομμύρια ανθρώπους για το 2017 (Ricipedia n.d.). Χάρη στη μεγάλη του προσαρμοστικότητα μπορεί να καλλιεργηθεί σε διάφορα μέρη του κόσμου όπως την Αυστραλία, την Αίγυπτο αλλά κυρίως σε περιοχές της Ασιατικής Ηπείρου.

Μέσα στα τελευταία 20 χρόνια, η παγκόσμια παραγωγή του ρυζιού αυξήθηκε κατά 160%. Από 165 εκατομμύρια τόνους το έτος 1948-49 σήμερα, το 2017, φθάνει τα 477 εκατομμύρια (USDA 2017). Παρά τούτο, οι ανάγκες σε ρύζι γίνονται κάθε μέρα και εντονότερες και αυτό γιατί η αύξηση του πληθυσμού στην Ασία, όπου το ρύζι αποτελεί τη βάση της διατροφής του πληθυσμού για την πρόσληψη αμύλου και πρωτεΐνης, είναι εξίσου μεγάλη ή και μεγαλύτερη από όση είναι η αύξηση της παραγωγής ρυζιού.

Από τα 1.611 εκατομμύρια στρ. που καλλιεργούνται με ρύζι παγκοσμίως, το 70% περιλαμβάνει τον τύπο ρυζιού *indica* ενώ το υπόλοιπο 30% των καλλιεργούμενων εκτάσεων είναι τύπου *Japonica* (Αρναουτέλη 2010).

Λόγω της εξαιρετικά μεγάλης σημασίας της καλλιέργειας του ρυζιού τόσο από διατροφικής όσο και από οικονομικής απόψεως από το 1970 και έπειτα καταβάλλεται από την επιστημονική κοινότητα σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής. Η διερεύνηση ενός τέτοιου μοντέλου αποτελεί και το σκοπό της παρούσας εργασίας.

1.1.1 Βοτανολογικά χαρακτηριστικά του ρυζιού

Το **ρύζι** είναι ετήσιο πώδες μονοκοτυλήδονο φυτό της οικογένειας των Ποωδών (Poaceae) ή Αγρωστωδών (Gramineae), που απαντάται σε δύο είδη (*Oryza sativa* και *Oryza glaberrima*) με καταγωγή από την τροπική και υποτροπική Νότια Ασία και την Αφρική αντίστοιχα. Ο όρος "άγριο ρύζι" μπορεί να αναφέρεται σε άγρια είδη Όρυζα (*Oryza*), αλλά κατά σύμβαση αναφέρεται σε είδη του συγγενούς είδους *Zizania* spp., τόσο άγρια όσο και καλλιεργούμενα. Τα φύλλα του (10-20 στον αριθμό) είναι επιμήκη (50-100 εκατοστά σε μήκος), στενά (2-2,5 εκατοστά πλάτος) και

περιβάλλουν το στέλεχος με τα «ωτία». Γενικά όλα τα υπέργεια όργανα μπορεί να έχουν και ρόδινες αποχρώσεις λόγω παρουσίας ανθοκυανινών.

Οι ρίζες του είναι θυσανώδεις, λεπτές, πολλές και επιπόλαιες. Φθάνουν μέχρι βάθους 10 εκατοστών και μόνο ένα μικρό ποσοστό (περίπου 20% των ριζών) φθάνουν σε βάθος 25-30 εκατοστών όταν καλλιεργείται υπό κατάκλιση. Αντίθετα, φυτά που καλλιεργούνται χωρίς κατάκλιση αναπτύσσουν ριζικό σύστημα μέχρι βάθους 100 εκατοστών. Μπορεί να σχηματίσει και εναέριες ρίζες.

Ο βλαστός του είναι όρθιος κοίλος (καλάμι), συμπαγής στο σημείο των κόμβων, με κοντά μεσογονάτια διαστήματα. Φθάνει σε ύψος τα 60-180 εκατοστά ανάλογα με την ποικιλία και τις συνθήκες ανάπτυξης. Το φυτό αδελφώνει εύκολα παράγοντας συνήθως 4-5 αδέρφια.

Η ταξιανθία του ρυζιού αναπτύσσεται στις άκρες των βλαστών με τη μορφή αραιής φόβης. Έχει συνήθως μήκος 10-25 εκατοστά και κάμπτεται όταν γεμίζουν οι καρποί. Απαρτίζεται από 75-150 σταχύδια. Τα σταχύδια είναι τριανθή με ένα μόνο γόνιμο άνθος, που περικλείεται από το χιτώνα και τη λεπίδα. Ο καρπός είναι καρύοψη, μήκους 3,5-8 χιλιοστών, πλάτους 1,7-3,0 χιλιοστών, πάχους 1,3-2,3 χιλιοστών. Λόγω του καστανού χρώματος των περιβλημάτων του, ο καρπός χωρίς τον χιτώνα και τη λεπίδα ονομάζεται «brown rice». Εσωτερικά παρατηρούνται το στρώμα της αλευρόνης, το αμυλώδες ενδοσπέρμιο και το έμβρυο.

Το φυτό του ρυζιού αναπαράγεται με αυτογονιμοποίηση. Ο κόκκος του χρειάζεται 40 με 60 ημέρες για να ωριμάσει, από τον καιρό της γονιμοποίησης. Από κάθε μικρό άνθος γίνεται ένας κόκκος και όλη μαζί η ταξιανθία σχηματίζει ένα στάχυ. Ο κόκκος του ρυζιού είναι ο καρπός του φυτού. Ένας κλώνος ρυζιού μπορεί να παράγει περισσότερους από 3.000 κόκκους.

1.1.2 Πρακτική καλλιέργειας στην Ελλάδα

Η Ελλάδα παράγει ένα από τα καλύτερα ρύζια αυτού του τύπου επειδή τα ελληνικά εδάφη είναι αλατούχα και αυτό βοηθάει την υψηλή ποιότητα.. Στην Ελλάδα διατίθενται μια σειρά ποικιλιών και από τους δύο τύπους, απόλυτα προσαρμοσμένων στις τοπικές συνθήκες. Οι ελληνικές ποικιλίες ρυζιού είναι υψηλών και σταθερών αποδόσεων. Η χώρα μας κατατάσσεται στις τέσσερις χώρες με την υψηλότερη απόδοση στον κόσμο μετά την Αυστραλία, τις ΗΠΑ και την Αίγυπτο.

Καλλιεργείται κυρίως στους νομούς Θεσσαλονίκης, Σερρών και λιγότερο στους νομούς Καβάλας, Ημαθίας, Φθιώτιδας, Αιτωλοακαρνανίας, Πιερίας και σε άλλες σποραδικές περιοχές. Ο βιολογικός κύκλος του ρυζιού κυμαίνεται από 2-8 μήνες ανάλογα με την ποικιλία και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Οι ποικιλίες που καλλιεργούνται στη χώρα μας για να ωριμάσουν χρειάζονται 120-150 ημέρες. Άριστες θερμοκρασίες ανάπτυξης θεωρούνται από 30-32°C. Αναπτύσσεται

ικανοποιητικά σε μεγάλη ποικιλία εδαφών και σε ευρέα όρια pH από 5-7,5 με τα ελαφρώς όξινα να είναι καλύτερα (pH 5,5-6,5).

Στη χώρα μας το ρύζι καλλιεργείται κυρίως σε αλατούχα παθογενή εδάφη με την τεχνική της υγρής σποράς (σπορά σε κατάκλιση). Σε περιοχές με αφθονία νερού για άρδευση καλλιεργείται και σε μη παθογενή εδάφη. Το ρύζι έχει μεγάλες απαιτήσεις σε νερό. Ποσότητα 1100-1400 κυβικών μέτρων νερού ανά στρέμμα σε μια καλλιεργητική περίοδο είναι αρκετή για ικανοποιητική απόδοση. Στα αλατούχα εδάφη η ποσότητα νερού που καταναλώνεται είναι μεγαλύτερη από 1300-3600 κυβικά μέτρα ανά στρέμμα. Επίσης, η θερμοκρασία του νερού παίζει μεγάλο ρόλο στην ανάπτυξη του φυτού. Την περίοδο της σποράς πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 12°C και στα επόμενα στάδια μεταξύ 21°C και 30°C. Υψηλότερη θερμοκρασία από 30°C προκαλεί μείωση της απόδοσης. Μακροχρόνια πειράματα του Ινστιτούτου Σιτηρών έδειξαν ότι λίπανση με 14-16 κιλά/στρέμμα αζώτου, 4-8 κιλά/στρέμμα φωσφόρου και 6-10 κιλά/στρέμμα καλίου είναι ικανοποιητική για απόδοση 750-800 κιλά σπόρου/στρέμμα. Το ρύζι δεν πρέπει να σπέρνεται μέχρι η θερμοκρασία να αγγίξει τους 15°C.

Στην περιοχή της μελέτης (Χαλάστρα Θεσσαλονίκης), ο χρόνος συγκομιδής για τις ποικιλίες τύπου *indica* είναι 35-40 ημέρες μετά την άνθηση και για τις ποικιλίες τύπου *japonica* είναι 40-45 ημέρες μετά την άνθηση. Η μέση απόδοση για την πενταετία 2001-2005 ανήλθε στα 832 κιλά /στρέμμα.

Προετοιμασία της σποροκλίνης

Οι λεκάνες του ορυζώνα πρέπει να είναι διατεταγμένες με τη μεγάλη τους πλευρά κάθετα προς τη διεύθυνση των συνήθως πνεόντων ανέμων για να αποφεύγεται κατ' αυτόν τον τρόπο ο σχηματισμός μεγάλων κυμάτων. Τα τελευταία μπορούν να παρασύρουν τα νεαρά φυτά προς τα αναχώματα της λεκάνης με συνέπεια να προκληθεί μια ανομοιόμορφη κατανομή των φυτών στον αγρό. Τα αναχώματα των λεκανών πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά διότι η τυχόν καταστροφή τους κατά την περίοδο της εξέλιξης της καλλιέργειας μπορεί να δημιουργήσει σοβαρό πρόβλημα συγκράτησης του νερού. Η διευθέτηση των καταστραμμένων αναχωμάτων μετά τη σπορά συνεπάγεται την καταβολή υψηλών δαπανών γιατί η εργασία γίνεται σε λασπώδες έδαφος. Επιπλέον, προκαλούνται καταστροφές μεγάλου τμήματος σπαρμένου χωραφιού τόσο από τα παρασυρθέντα χώματα των καταστραμμένων αναχωμάτων όσο και από τα απαιτούμενα χώματα για την επισκευή των ρηγμάτων.

Οι καλλιεργητικές εργασίες προετοιμασίας όπως γίνονται κατά χρονική αλληλουχία περιλαμβάνουν το όργωμα αμέσως μετά τη συγκομιδή του καρπού, το δισκοσβάρνισμα πριν από τη σπορά την άνοιξη, την ισοπέδωση, την εφαρμογή βασικών λιπασμάτων και ενσωμάτωση αυτών

με φρεζάρισμα και την κατάκλιση με νερό. Από αυτές, η σπουδαιότερη εργασία για την ορυζοκαλλιέργεια είναι η ισοπέδωση. Η καλλιέργεια του ρυζιού είναι αρκετά εύκολη και η βεβαιότητα για υψηλές αποδόσεις είναι εξασφαλισμένη εφ' όσον οι αγροί είναι καλά ισοπεδωμένοι. Η διαφορά μεταξύ υψηλότερου και χαμηλότερου σημείου της λεκάνης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2 - 5 cm ανά 100 m. Την τελευταία 15ετία η ισοπέδωση των λεκανών γίνεται με ισοπεδωτήρα που κατευθύνεται με βάση τις ακτίνες Laser. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλή ισοπέδωση των αγρών που προορίζονται για την καλλιέργεια του ρυζιού.

Σε περιπτώσεις κακού φυτρώματος και επανασποράς, επιβάλλεται σβάρνισμα της σποροκλίνης πριν από τη σπορά, για να επιτευχθεί καλή εγκατάσταση των φυτών.

Εποχή σποράς

Η εποχή σποράς εξαρτάται από την θερμοκρασία του εδάφους και του περιβάλλοντος. Όταν η θερμοκρασία του νερού είναι 12° C τότε η σπορά μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς κινδύνους ζημιών. Ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος για τη σπορά του ρυζιού δημιουργούνται στη Β. Ελλάδα για μεν τις ποικιλίες τύπου Japonica 1-15 Μαΐου για δε εκείνες του τύπου Indica 5-15 Μαΐου.

Αρδευση ρυζιού

Οι ανάγκες των φυταρίων σε νερό είναι διαφορετικές στα διάφορα στάδια της εξέλιξής τους. Κρίσιμες φάσεις με αυξημένες απαιτήσεις σε νερό είναι το φύτρωμα και η περίοδος που περιλαμβάνει τις φάσεις της διόγκωσης των οφθαλμών, της άνθησης και του σχηματισμού της καρύωσης.

Ποσότητα νερού 1100-1400 m³/στρέμμα για μια καλλιεργητική περίοδο θεωρείται ότι είναι αρκετή για μια καλλιέργεια ρυζιού με ικανοποιητικές αποδόσεις. Το βάθος του νερού στο στάδιο του φυτρώματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 εκατοστά. Όταν το νερό δεν είναι του ίδιου βάθους σε όλο το αγροτεμάχιο ή είναι μικρού βάθους, είναι πολύ πιθανή η έκθεση τμήματος της επιφάνειας στον αέρα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ζιζανίων και την απώλεια φυτρωμένων σπόρων από τρωκτικά και πτηνά. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο βάθος νερού (πάνω από 15 εκατοστά) κατά την ανάπτυξη των φυταρίων έχει ως αποτέλεσμα την υπέρμετρη ανάπτυξη ριζών. Πρέπει επομένως να ρυθμίζεται το ύψος του νερού στον αγρό όσο χρειάζεται για να αποτραπούν οι εχθροί και οι ασθένειες και να προωθηθεί η βλαστική ανάπτυξη των φυτών.

Ο καλύτερος χρόνος αποστράγγισης εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την καλλιεργούμενη ποικιλία, τα μέσα αποστράγγισης και τον καιρό. Σε ένα τυπικό αργιλώδους δομής έδαφος η αποστράγγιση του αγρού πρέπει να γίνεται όταν είναι τα φυτά είναι πλήρως ξεσταχασμένα και

όλες οι φόβες κλίνουν προς τα κάτω και αρχίζουν να ωριμάζουν. Άλλος ένας οδηγός για την αποστράγγιση είναι όταν το 90% των φοβών έχει τον ακραίο κόκκο στο στάδιο της σκληρής ζύμης.

Λίπανση

Το ρύζι παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα ως προς τη λίπανση γιατί το έδαφος στο οποίο καλλιεργείται βρίσκεται σε συνεχή σχεδόν κατάκλιση με νερό με συνέπεια να δημιουργούνται συνθήκες που διευκολύνουν την έκπλυση και διαρροή των χρησιμοποιούμενων λιπαντικών στοιχείων. Η διαρροή των τελευταίων επαυξάνεται επίσης λόγω της επιβαλλόμενης τακτικής ανανέωσης του νερού για την απομάκρυνση των αλάτων του εδάφους, ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης των φυτών. Να σημειωθεί ότι το ρύζι καλλιεργείται σε εδάφη τα οποία είναι συνήθως αλατούχα. Η επιφανειακή λίπανση γίνεται με λιπάσματα κοκκώδους μορφής, αργά διαλυόμενα στο νερό και σε χρονικές στιγμές που έπονται της ανανέωσής του. Η βελτίωση των αλατούχων εδαφών με ρύζι επιβάλλει επίσης τη χρησιμοποίηση όξινων λιπασμάτων τα οποία μειώνουν το pH του εδάφους. Τα πιο ενδιαφέροντα λιπαντικά στοιχεία για την καλλιέργεια του ρυζιού είναι το άζωτο, ο φωσφόρος, το κάλιο, το θείο και ο ψευδάργυρος.

Συγκομιδή ρυζιού

Τελευταίο στάδιο της παραγωγικής διεργασίας αποτελεί εκείνο της συγκομιδής του προϊόντος από τον αγρό.

Ο άριστος χρόνος συγκομιδής του ρυζιού συμβαδίζει με τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση στον ορυζόμυλο αλλά και με τη μικρότερη θραυστικότητα των κόκκων. Σύμφωνα με πειραματικές εργασίες η συγκομιδή του καρπού πρέπει να γίνεται όταν η υγρασία αυτού κυμαίνεται μεταξύ 19 - 21%. Άλλα κριτήρια για τον κατάλληλο χρόνο συγκομιδής του καρπού είναι:

1. Ο χρόνος από την άνθηση και συγκεκριμένα 35 - 40 ημέρες μετά την άνθηση για τις ποικιλίες τύπου Indica και 40 - 45 ημέρες για εκείνες του τύπου Japonica,
2. όταν το 80% των κόκκων αποκτά χρώμα κίτρινο και
3. όταν ο πρώτος κόμβος της φόβης έχει χρώμα κιτρινοκαστανό.

Στην περιοχή της μελέτης, τελευταίες μέρες του Σεπτεμβρίου με αρχές Οκτωβρίου μπαίνει η θεριζοαλωνιστική μηχανή στον αγρό για να αρχίσει η συγκομιδή του προϊόντος.

1.2 Τα μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής

Η έγκαιρη και ακριβής πρόβλεψη της παραγωγής επιτρέπει στους επιχειρηματίες – καλλιεργητές να προσδιορίσουν τις εισροές, σε σχέση πάντα με τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

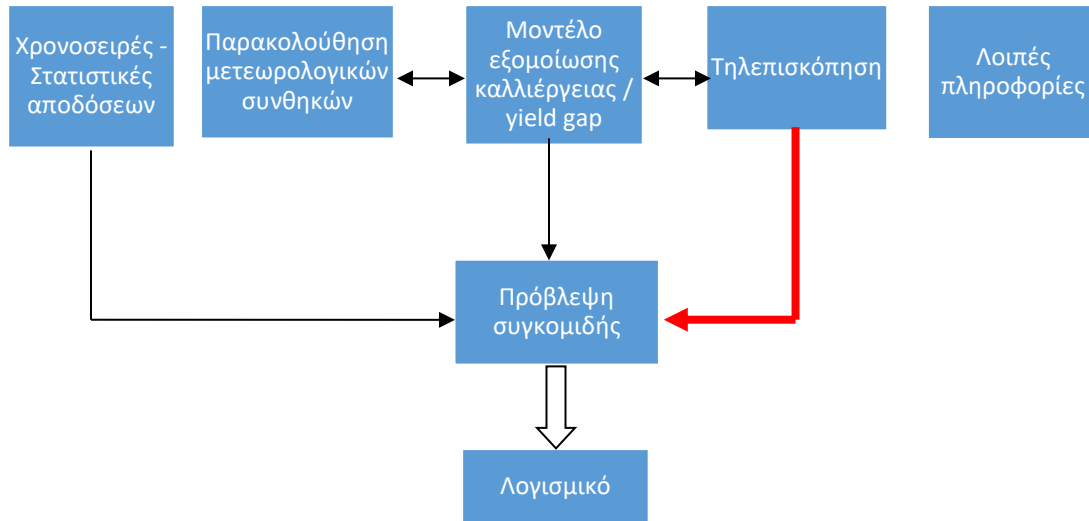
Το ρύζι καλλιεργείται κυρίως σε κατακερματισμένα αγροτεμάχια, τα λεγόμενα «τηγάνια», που έχουν χαρακτηριστεί ως κύριες πηγές ατμοσφαιρικού μεθανίου, με μεγάλη συμβολή στην νιτρορύπανση (Matthews and Wassmann 2003), (Gon 2000). Για την ανταπόκριση με τις αυξημένες απαιτήσεις για την ασφάλεια των τροφίμων και την προστασία του περιβάλλοντος, έχει προταθεί η προσπάθεια για μείωση των εκτάσεων των αγροτεμαχίων ρυζιού με παράλληλη αύξηση των αποδόσεων σε καρπό.

Παραδοσιακά, η εκτίμηση της απόδοσης της καλλιέργειας βασιζόταν στη συλλογή δεδομένων στον αγρό από εξειδικευμένο επιστήμονα. Η τεχνική αυτή είναι συνήθως υποκειμενική, χρονοβόρος και υπόκεινται σε ενδεχομένως μεγάλα σφάλματα που έχουν οδηγήσει πολλές φορές σε πλημμελείς και λανθασμένες εκτιμήσεις (Reynolds, et al. 2000). Όπως αναφέρθηκε ήδη (§1.1), από το 1970 και έπειτα καταβάλλεται από την επιστημονική κοινότητα σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής. Ο όρος «μοντέλο πρόβλεψης» περιλαμβάνει έναν αλγόριθμο που ποσοτικοποιεί και ερμηνεύει δυναμικά τη διεργασία της ανάπτυξης, παραγωγής και αλληλεπίδρασης του φυτού με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Curry 1971). Τα μοντέλα αυτά κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες. Σε μοντέλα προσομοίωσης – ανάπτυξης και σε στατιστικά – εμπειρικά μοντέλα, αναλόγως της βασικής μαθηματικής μεθόδου μοντελοποίησης.

Τα μοντέλα ανάπτυξης προσομοιώνουν συνήθως τις υποκείμενες βιολογικές, χημικές, φυσικές και φυσιολογικές διεργασίες σε ένα οικοσύστημα. Επιτρέπουν συνήθως την προβολή σε μελλοντικό χρόνο ενώ χαρακτηρίζουν ευρύτατες χωρικά ζώνες και δεν εξειδικεύονται ως προς τις καλλιέργειες. Γνωστά τέτοια μοντέλα είναι τα SUCROS (Lin, Mo and Xiang 2003) MACROS (Penning, et al. 1989) για την Ολλανδία και το μοντέλο RSM (Luo, et al. 1990) για την Κίνα, ενώ κάποια εξ αυτών εξειδικεύονται σε συγκεκριμένες καλλιέργειες όπως το ORYZA2000. Παλαιότερα η κατηγορία αυτή των μοντέλων θεωρούνταν καλύτερη από τα εμπειρικά μοντέλα αλλά σταδιακά με τη βελτίωση των δευτέρων αυτό άλλαξε.

Τα εμπειρικά ή στατιστικά μοντέλα στηρίζονταν στην παρατήρηση. Μέσω αυτής, χτιζόταν μια εμπειρική σχέση μεταξύ των παρατηρήσεων και των υπό μελέτη χαρακτηριστικών. Στα μεγάλα τους πλεονεκτήματα είναι το εύρος χρήσης τους (ως προς τις καλλιέργειες) αλλά και το ότι μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες ακόμα και σε επίπεδο αγροτεμαχίου. Τα πρώτα στατιστικά μοντέλα παρουσίαζαν συχνά το φαινόμενο του overfitting, αλλά με τη συνεχή ανάπτυξή τους, τα εμβρυακά αυτά προβλήματα ξεπεράστηκαν και αποδείχθηκαν χρήσιμα σε μεγάλης κλίμακας μελέτες (Stewart and Dwyer 1990). Αυτό οδήγησε στην αμερικάνικη σχολή σκέψης που χρησιμοποιούσε εμπειρικά μοντέλα υιοθετώντας όμως στοιχεία από μοντέλα

προσομοίωσης. Χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα είναι το μοντέλο CERES, που μάλιστα έχει εξειδικευτεί και στην καλλιέργεια του ρυζιού με το μοντέλο CERES – Rice (Akinbile 2013).



Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής για ένα σύγχρονο και γενικευμένο μοντέλο πρόβλεψης της συγκομιδής με τις παραλλαγές που μπορεί να υιοθετηθούν κατά την εφαρμογή του και με κόκκινο χρώμα η διεργασία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία.

Είναι γενικά αποδεκτό πως κανένα μοντέλο πρόβλεψης της παραγωγής δεν είναι ικανοποιητικό σε τοπικό επίπεδο αν δεν έχει αναπτυχθεί και δοκιμαστεί τοπικά (Sheshthan and Naikaset 2003). Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παραλλακτικότητα του εδάφους, στις καιρικές συνθήκες, στην παραλλακτικότητα των ποικιλιών καθώς και στις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές. Πρόσφατα, με την εξέλιξη των αισθητήρων των δορυφόρων αλλά και με την αυξανόμενη χρήση των UAS, καταβάλλεται προσπάθεια για τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων στην πρόβλεψη της παραγωγής. Τα δεδομένα αυτά είτε επικουρούν σε κάποιο βαθμό τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης ή χρησιμοποιούνται, τελευταία, όλο και περισσότερο, σε εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης είτε αυτούσια, είτε ως πηγές των δεικτών βλάστησης.

Πιο πρόσφατο παράδειγμα τέτοιου υβριδικού μοντέλου είναι το PhenoRice (Boschetti, et al. 2017), που χρησιμοποιώντας τηλεπισκοπικά δεδομένα MODIS TERRA & AQUA υπολογίζει τους δείκτες βλάστησης NDFI και EVI και τα εισάγει σε αλγόριθμο ο οποίος συνυπολογίζοντας το DOY (Day OF Year) λήψης των δεδομένων, τις θερμοκρασίες και κάποιες άλλες παραμέτρους εξαγάγει χρήσιμα και αρκετά ακριβή συμπεράσματα για την καλλιέργεια του ρυζιού, σε περιφερειακή όμως κλίμακα. Κάποια από αυτά τα μοντέλα ενσωματώνονται σε ευρύτερα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που έχουν τη μορφή λογισμικών και που αναπτύσσονται επί του παρόντος άμεσα για

τους αγρότες, ώστε να μπορούν να εφαρμόζουν την βέλτιστη διαχείριση και να εξοικονομούν χρήματα και εφαρμόζονται στα συστήματα πληροφοριών διαχείρισης της εκμετάλλευσης (Fountas, et al. 2015).

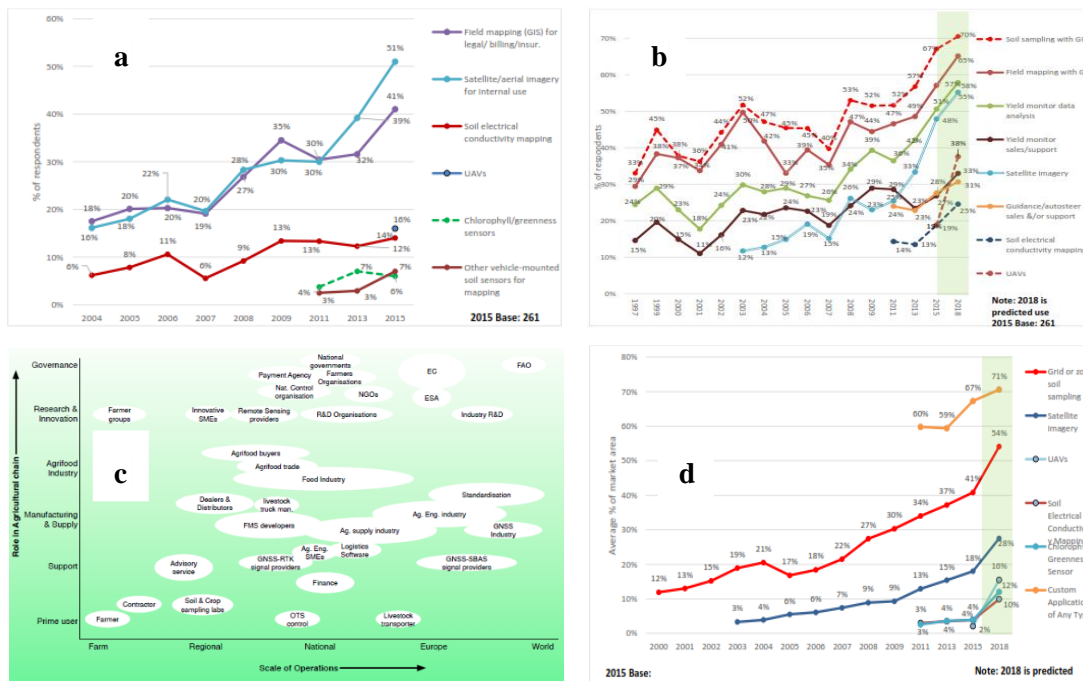
1.3 Πρόσφατες εξελίξεις στα εμπορικά Unmanned Aerial Systems (UAS)

1.3.1 Το οικονομοτεχνικό περιβάλλον

Το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται τα UAS είναι ένα περίπλοκο συνονθύλευμα από παράγοντες που έχουν διαφορετικά μεγέθη και ανήκουν σε ξεχωριστές αλλά αλληλοσυνδεόμενες κατηγορίες. Ο καθένας από αυτούς επηρεάζουν και επηρεάζονται από την ανάπτυξη και εφαρμογή των UAS στη γεωργία (EU Joint Research Centre 2014), όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1c.

Καθώς απογραφικά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα σε καμία χώρα στην οποία υιοθετείται τεχνολογία Γ.Α., οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί αντλούν πληροφορίες από δεδομένα που τους παρέχουν οι κατασκευαστές, οι πάροχοι και γενικότερα οι φορείς του λιανικού εμπορίου.

Ακολουθως απεικονίζεται η υιοθέτηση κάποιων site-specific προϊόντων και τεχνικών μέχρι και το 2015 (Erickson και Widmar 2015), (EU Joint Research Centre 2014). Όπως φαίνεται στο Γράφημα 1a, τα UAS στην Αμερικάνικη και Ευρωπαϊκή αγορά, ωρίμασαν τεχνολογικά το 2015 οπότε και παρατηρήθηκε για 1^η φορά εμπορική χρήση τους στο 16% των περιπτώσεων.



Γράφημα 1. Ο βαθμός υιοθέτησης τεχνολογιών & μέσων το διάστημα 2004 – 2015 στον αγροτικό χώρο εν γένει (a), ο βαθμός χρήσης (%) τεχνολογιών & μέσων στην φυτική παραγωγή (b), τα εμπλεκόμενα με τα UAS μέρη στη μικρο & μακρο – κλίμακα (c) και το μερίδιο αγοράς (%) τεχνολογιών & μέσων στη φυτική παραγωγή (d).

Στο Γράφημα 1b παρουσιάζεται ο βαθμός χρήσης (σε ποσοστό % των χρηστών – καλλιεργητών που κάνουν χρήση κάποιου μέσου) των προσφερόμενων υψηλής τεχνολογίας μέσων και υπηρεσιών από πάροχους του αγροτικού χώρου, μέσων που αποτελούν τεχνολογικές συνιστώσες της Γ.Α. Φαίνεται πως τα UAS έχουν την πιο ραγδαία ανάπτυξη, με την πρόβλεψη για το 2018 να αγγίζει το 38%.

Τέλος, στο Γράφημα 1d αποτυπώνεται το εκτιμώμενο μερίδιο αγοράς για κάθε έτος, των διάφορων τεχνολογιών που είναι στην υπηρεσία του παραγωγού. Εδώ, η πρόβλεψη για τα UAS το 2018 είναι στο 16% . Φαίνεται πως για τα UAS το 2018 το μερίδιο αγοράς παρόλο που αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά θα είναι σίγουρα μικρότερο από το ποσοστό χρήσης της τεχνολογίας αυτής από τους παραγωγούς. Αυτό αντικατοπτρίζει το μικρό συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες και υπηρεσίες κόστος απόκτησης ή/και εφαρμογής όταν επιλέγεται και χρησιμοποιείται ορθά.

1.3.2 UAS – η πλατφόρμα

Το κόστος και η διαθεσιμότητα υψηλής χωρικής ανάλυσης δορυφορικών εικόνων συχνά αποτελεί παρεμποδιστικό παράγοντα στη χρήση τους στην πρωτογενή παραγωγή. Τα UAS αποτελούν ένα εν γένει ανέξοδο και πρακτικό υποκατάστατο των δορυφορικών και αερομεταφερόμενων μέσων τηλεπισκόπησης (EU Joint Research 2015).

Τα UAS που χρησιμοποιούνται στη Γ.Α. και είναι επαγγελματικών προδιαγραφών, είναι συνήθως πλήρεις, αυτοματοποιημένες και οικονομικές σε σχέση με το παρελθόν λύσεις για εφαρμογές Precision Agriculture. Ως προς τους αισθητήρες τους, προσφέρουν τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων καμερών (NIR, Red Edge, Multi-Spectral, hyperspectral, thermal και lidar) και καταγραφής σε jpeg ή/και raw format.

Τα επαγγελματικών προδιαγραφών, επιχειρησιακά UAS διακρίνονται σε 2 κατηγορίες: σταθερού πτερυγίου και με ρότορες (τετρακόπτερα-εξακόπτερα-οκτακόπτερα).

Η κάθε κατηγορία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτά δεν αφορούν στους αισθητήρες καθώς και οι 2 πλατφόρμες μπορούν να δεχτούν αισθητήρες όλων των τύπων αλλά σχετίζονται με τη διάρκεια πτήσης, το ύψος και τις συνθήκες πτήσης και επομένως με την έκταση στην οποία μπορούν να λάβουν τηλεσκοπικά δεδομένα ανα πτήση.

Σε γενικές γραμμές τα multicopter είναι κατάλληλα για μικρές εκτάσεις (περίπου 500 στρ.). Έχουν διάρκεια πτήσης σχεδόν 20 λεπτά επιτρέποντας την κάλυψη των μικρότερων περιοχών και μπορούν να πετάξουν σε πολύ χαμηλό ύψος για υψηλότερη ανάλυση. Επίσης, οι απαιτήσεις της

απογείωσης και της προσγείωσης είναι σημαντικά μικρότερες (κάθετη προσέγγιση). Το μειονέκτημά τους, όπως αναφέρθηκε, είναι το περιορισμένο εύρος τους, πράγμα που σημαίνει ότι για μεγάλες περιοχές είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται πολλαπλές πτήσεις. Για μεσαίες έως μεγάλες περιοχές (περίπου 10.000 στρ.), οι πλατφόρμες σταθερών πτερυγίων κυριαρχούν. Ο λόγος είναι ο μηχανισμός άντωσης των σταθερών πτερυγίων. Εφ' όσον έχουν αρκετή κίνηση προς τα εμπρός για τη δημιουργία άντωσης, μένουν στον αέρα. Αν και οι δύο τύποι UAS χρησιμοποιούν την ίδια μπαταρία, τα UAS σταθερών πτερυγίων θα είναι σε θέση να πετάξουν πολύ περισσότερο. Θεωρητικά μέχρι 3 φορές περισσότερο, αν και στην πράξη, τα τελευταίας γενιάς UAS (μοντέλα 2016) με φορτίο και σε πραγματικές συνθήκες έχουν χρόνους πτήσης τα μεν multicopter 10-15 λεπτά, τα δε fixed wing 30-40 λεπτά..

Όλες οι πλατφόρμες βέβαια UAS ενσωματώνουν GPS. Το 2016 μάλιστα παρουσιάστηκαν τα πρώτα UAS με RTK – GPS που προσφέρουν εναέριες λήψεις υψηλής ακρίβειας, εφάμιλλης δεκτών GNSS πολλών συχνοτήτων. Μπορεί αν επιτευχθεί συλλογή φωτογραφιών, παραγωγή ορθοφωτοχαρτών και νέφους σημείων με ακρίβεια που φτάνει τα 3cm χωρίς την ανάγκη σημείων GCP (Sensefly n.d.).

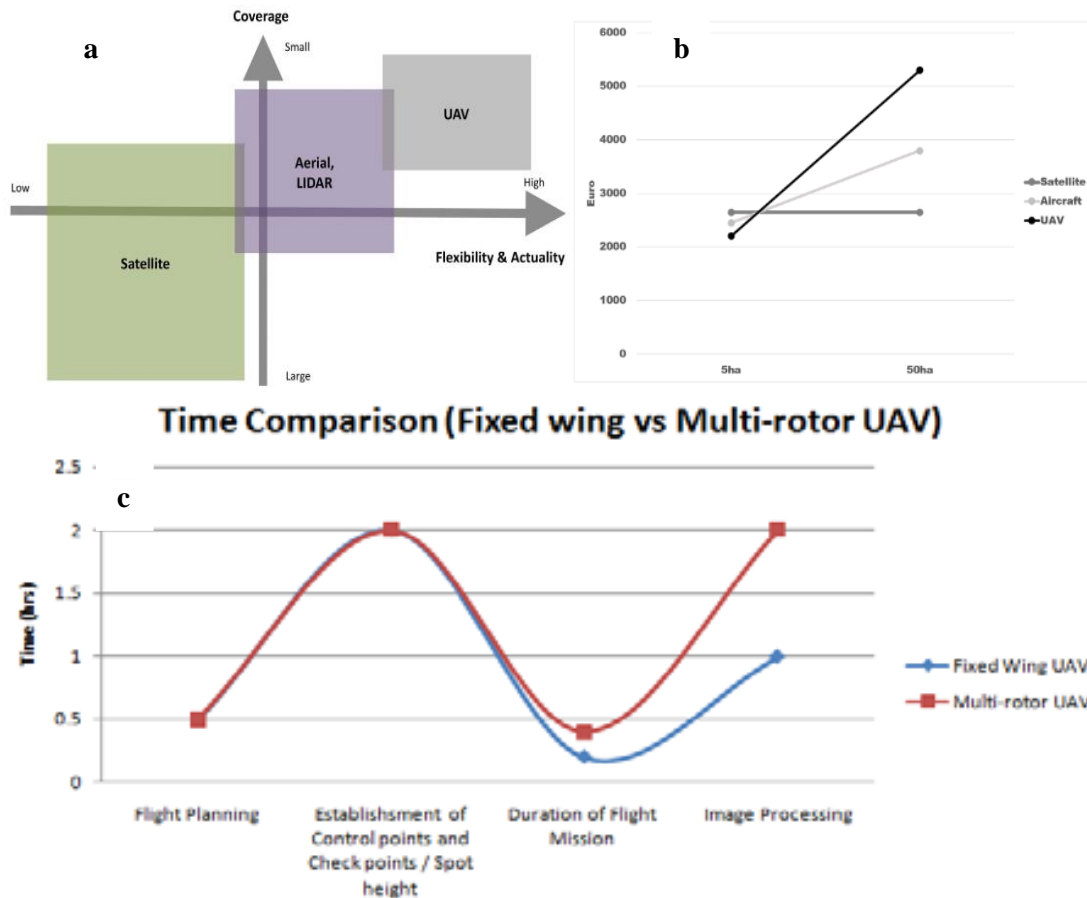
Οι εικόνες που λαμβάνονται μπορεί να μεταδίδονται (downlinked) προς το σταθμό εδάφους ή να αποθηκεύονται στη μνήμη του αισθητήρα της μονάδας έως ότου το όχημα προσγειωθεί.

Τέλος, στις πιο πρόσφατες εμπορικές εφαρμογές δίδεται η δυνατότητα real time παρακολούθησης της πτήσης και των δεδομένων καθώς και το uploading μέσω cloud σε server παρόχων υπηρεσιών επεξεργασίας και διαχείρισης των τηλεπισκοπικών εικόνων (University of Nebraska–Lincoln 2015), (Precision Hawk n.d.)

Ως προς την ποιότητα των παραγόμενων εικόνων, πρόσφατη μελέτη έδειξε πως τα multicopter UAS έχουν καλύτερης ποιότητας εικόνα συγκρινόμενα με UAS σταθερού πτερυγίου. Βασικός βέβαια παράγοντας είναι ότι οι εικόνες από multicopter UAS αποτυπώθηκαν από το πιο χαμηλό ύψος των 80 μέτρων ενώ των σταθερών πτερυγίων ελήφθησαν από υψόμετρο 320 μέτρων. Ωστόσο, και οι 2 τύποι UAS είχαν ακρίβεια σφάλματος (RMSE) κάτω του 1 μέτρου ενώ απέδειξαν πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση επικλινών εδαφών (Tahar and Ahmad 2013).

Σε σύγκριση με τις δορυφορικές εικόνες, με τα UAS είναι δυνατή η λήψη δεδομένων πολύ μεγαλύτερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Τα πιο πρόσφατα μοντέλα UAS (e-bee, precision Hawk) από ύψος 150 μέτρων προσφέρουν αναλύσεις 5-7 cm με χρήση οπτικής κάμερας (RGB). Επιπλέον, είναι εφικτή η προσαρμογή της χρήσης τους ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη (βλ. Γράφημα 2a).

Από την άλλη μεριά, οι πιο σύγχρονοι εμπορικοί δορυφόροι (Worldview 2, 3) προσφέρουν πολύ υψηλότερες αναλύσεις σε σχέση με το πρόσφατο παρελθόν, που φτάνουν πλέον τα 30cm στο παγχρωματικό κανάλι (Fritz 2012), (Belward και Skoien 2015).



Γράφημα 2. Σύγκριση μεταξύ πλατφορμών λήψης τηλεπισκοπικών δεδομένων: μεταξύ δορυφόρων, αερομεταφερόμενων μέσων και UAS ως προς την έκταση κάλυψης & την ευελιξία χρήσης (a), ως προς την έκταση κάλυψης & το κόστος απόκτησης των εικόνων (b) και μεταξύ UAS σταθερής πτέρυγας & multi-rotor ως προς τον απαιτούμενο χρόνο για τη λήψη τελικών επεξεργασμένων εικόνων (c).

Σε πρόσφατη δημοσίευση (Matese, και συν. 2015), έγινε σύγκριση μεταξύ των 3 πλατφορμών τηλεπισκόπησης (UAS, αεροπλάνο και δορυφόροι) ως προς το κόστος χρήσης για διάφορα μεγέθη εκμετάλλευσης (βλ. Γράφημα 2b). Ως προς τη σύγκριση μεταξύ των 2 κυρίαρχων τύπων UAS, των multirotor και fixed wing UAS, οι ανάγκες σε χρόνο για τα διάφορα στάδια απόκτησης μιας εικόνας απεικονίζονται στο Γράφημα 2c (Tahar και Ahmad 2013):

1.4 Τηλεπισκοπικά δεδομένα και δείκτες βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης (vegetation indices ή VIs) είναι ποσοτικές εκφράσεις οι οποίες υπολογίζονται από τις τιμές λαμπρότητας των τηλεπισκοπικών δεδομένων και σχετίζονται κυρίως με την κατάσταση της βλάστησης ή τη βιομάζα (Καρτέρης 2004). Η συσχέτιση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και των δεικτών βλάστησης αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της παρακολούθησης του περιβάλλοντος με τηλεπισκόπηση και έχει μελετηθεί ευρέως (Tucker, 1979, Jackson et al., 1983, Tucker et al., 1991).

Οι Daughtry et al. (2000) ταξινόμησαν του δείκτες βλάστησης σε 2 κατηγορίες:

- Τους intrinsic indices που αποτελούν κλάσματα 2 ή περισσότερων φασμάτων, συνήθως στο οπτικό μήκος κύματος και στο εγγύς υπέρυθρο. Οι δείκτες αυτοί είναι ευαίσθητοι στην ανάκλαση υποβάθρου του εδάφους και είναι δύσκολο να ερμηνευτούν σε μικρές τιμές του δείκτη φυλλικής μάζας (LAI, Leaf Area Index).
- Τους solid line VI που αξιοποιούν την παλινδρόμηση για να διορθώνουν τις τιμές των δεικτών και να μειώνουν το σφάλμα που προκύπτει από την ανακλαστικότητα του εδάφους.

Άλλοι ερευνητές έχουν ακολουθήσει άλλη ταξινόμηση και διακρίνουν τους δείκτες βλάστησης σε:

- Δείκτες με βασικό χαρακτηριστικό την κλίση (slope). Ένας από τους πρώτους τέτοιους δείκτες είναι ο RVI (Ratio Vegetation Index), ενώ η πιο συνήθης μορφή είναι αυτή που εμπεριέχει και κανονικοποίηση. Γνωστότερος όλων ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- Δείκτες με βασικό χαρακτηριστικό την απόσταση (distance)

Λόγω της πληθώρας των δεικτών βλάστησης στη βιβλιογραφία και των νέων φασμάτων που είναι ευρέως διαθέσιμα σήμερα όπως το RED edge, πέρα από τις παραπάνω ταξινομήσεις οι δείκτες βλάστησης χωρίζονται με μια γενικότερη έννοια σε απλούς όταν περιλαμβάνουν 2 ή 3 φάσματα και σύνθετους ή νέου τύπου όταν περιλαμβάνουν 4 ή και παραπάνω φάσματα. Πολλοί από τους «νέου τύπου» σύνθετους δείκτες βλάστησης αποτελούν παραλλαγές παλαιότερων δεικτών που όμως περιλαμβάνουν καινούρια μήκη κύματος, συνηθέστερα στο red edge.

Σύμφωνα με τον Jensen (2005) όλοι οι δείκτες βλάστησης πρέπει να:

- Μεγιστοποιούν την ευαισθησία στις βιοφυσικές παραμέτρους των φυτών. Προτιμότερο δε είναι να έχουν γραμμική εξάρτηση με τις βιοφυσικές παραμέτρους και να έχουν ένα

μεγάλο εύρος από καταστάσεις της βλάστησης και να διευκολύνουν την επικύρωση και βαθμονόμησή τους.

- Κανονικοποιούν ή να μοντελοποιούν εξωτερικές επιρροές όπως τη γωνία του ήλιου, τη γωνία του αισθητήρα και την ατμόσφαιρα για συνεπείς χωρικές και χρονικές συγκρίσεις.
- Κανονικοποιούν εσωτερικές επιρροές όπως επιπτώσεις από την ποικιλομορφία των φύλλων, συμπεριλαμβάνοντας την τοπογραφία (κλίση και έκθεση στον ορίζοντα), διαφοροποιήσεις που οφείλονται στο έδαφος και να ξεχωρίζουν την ξυλώδη από την ξηρή βλάστηση.
- Να είναι συνδεδεμένοι με κάποιες ειδικές μετρήσιμες βιοφυσικές παραμέτρους όπως η βιομάζα, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας για να μπορούν να επαληθευτούν από επίγειες μετρήσεις και να γίνει έλεγχος της ποιότητάς τους.

Οι δείκτες βλάστησης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην παρακολούθηση της βλάστησης, επειδή έχουν συσχετίζονται με διάφορες παραμέτρους που περιγράφουν την κατάσταση της βλάστησης, όπως: Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI), η φαινολογία της βλάστησης, το κλάσμα της ενεργού φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας που απορροφάται από τη βλάστηση (fAPAR), την πυκνότητα της βλάστησης, την ξηρότητα και την υγεία της φυσικής και διαχειριζόμενης βλάστησης (Asrar et al. 1984, Gao 1996, Silleos et al. 2002, Zhang et al. 2003, Gitas et al. 2004).

Ανάμεσα στους πολυάριθμους δείκτες βλάστησης που υπάρχουν, αυτός που έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο στην παρακολούθηση της βλάστησης (Huete et al. 1985, Baret and Guyot 1991) είναι ο NDVI, λόγω των πλεονεκτημάτων του, παρόλο που έχουν αναφερθεί συγκεκριμένα μειονεκτήματά του (Huete et al. 1985). Συγκεκριμένα ο δείκτης βλάστησης NDVI, είναι από τους παλαιότερους, πιο γνωστούς και πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάστησης. Είναι ανθεκτικός κάτω από την επίδραση διαφόρων συνθηκών, λόγω του κανονικοποιημένου τύπου του και της υψηλής απορρόφησης της ανακλώμενης ακτινοβολίας που παρουσιάζει στις περιοχές του φάσματος όπου υπάρχει χλωροφύλλη.

Όμως, κάτω από συνθήκες πυκνής βλάστησης και όταν ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας - Leaf Area Index (LAI) παίρνει μεγάλες τιμές, μπορεί να πάθει κορεσμό σήματος (saturation) στις τιμές του κι έτσι να μην αυξάνεται ανάλογα με τη αύξηση της χλωροφύλλης. Επίσης είναι πολύ ευαίσθητος στις μεταβολές της βλάστησης του υπορόφου και η υποβάθμιση του σήματός του γίνεται πιο έντονη όταν υπάρχουν συνθήκες υψηλής βιομάζας στον υπόροφο (Huete, 1988). Παίρνει τιμές από -1 έως +1, όμως οι συνήθεις τιμές που εμφανίζει για την υγιή βλάστηση είναι από +0.2 έως +1 (Rouse et al, 1973), (Tucker, 1979), (Jackson, 1983) & (Sellers, 1985).

Ο δείκτης βλάστησης EVI είναι μια τροποποίηση του NDVI και δημιουργήθηκε για να δώσει βελτιωμένα αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας την ανάκλαση του πιο ευαίσθητου ατμοσφαιρικά μπλε διαύλου για να διορθώσει τον κόκκινο δίαυλο της ακτινοβολίας από τις επιδράσεις των μικροσωματιδίων (aerosols) της ατμόσφαιρας (Kaufman, Y. J. & Tanre', D. 1992). Ο δείκτης αυτός μπορεί να φανεί πιο χρήσιμος στις περιοχές που παίρνει μεγάλες τιμές ο LAI, καθώς ο NDVI μπορεί να πάθει κορεσμό σήματος. Οι τιμές που παίρνει είναι από -1 έως +1 και το σύνηθες εύρος τιμών του για την υγιή βλάστηση από +0,2 έως +1 (Huete et al, 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση, για την καλλιέργεια του ρυζιού, της χωρο – χρονικής παραλλακτικότητας μιας σειράς δεικτών βλάστησης υπολογισμένων από δεδομένα τηλεπισκόπησης προερχόμενων από σύγχρονη, εμπορική πλατφόρμα UAS και η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής της καλλιέργειας βασισμένων σε τηλεπισκοπικούς δείκτες βλάστησης.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα και οι παραγόμενοι από αυτά δείκτες βλάστησης δεν αρκούν από μόνα τους για μια ακριβή πρόβλεψη της συγκομιδής αλλά δρουν επικουρικά σε συνδυασμό με κάποιο πιο περίπλοκο ντετερμινιστικό ή στοχαστικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του και άλλες παραμέτρους (φυσιολογίας του φυτού, εδαφολογικές, κλιματολογικές, καλλιεργητικές κλπ). Παρόλα αυτά και καθώς ο ρυθμός εξέλιξης των αισθητήρων τηλεπισκόπησης ως προς τη διακριτική και φασματική τους ικανότητα, των μη επανδρωμένων οχημάτων που διατίθενται πλέον σε ιδιώτες και επαγγελματίες αλλά στους ίδιους τους δείκτες βλάστησης που μελετώνται από την επιστημονική κοινότητα είναι ταχύς, η ανάγκη για αξιολόγηση των πλέον σύγχρονων δεικτών βλάστησης ως προς τη συσχέτισή τους με τη συγκομιδή είναι επιτακτικότερη από ποτέ.

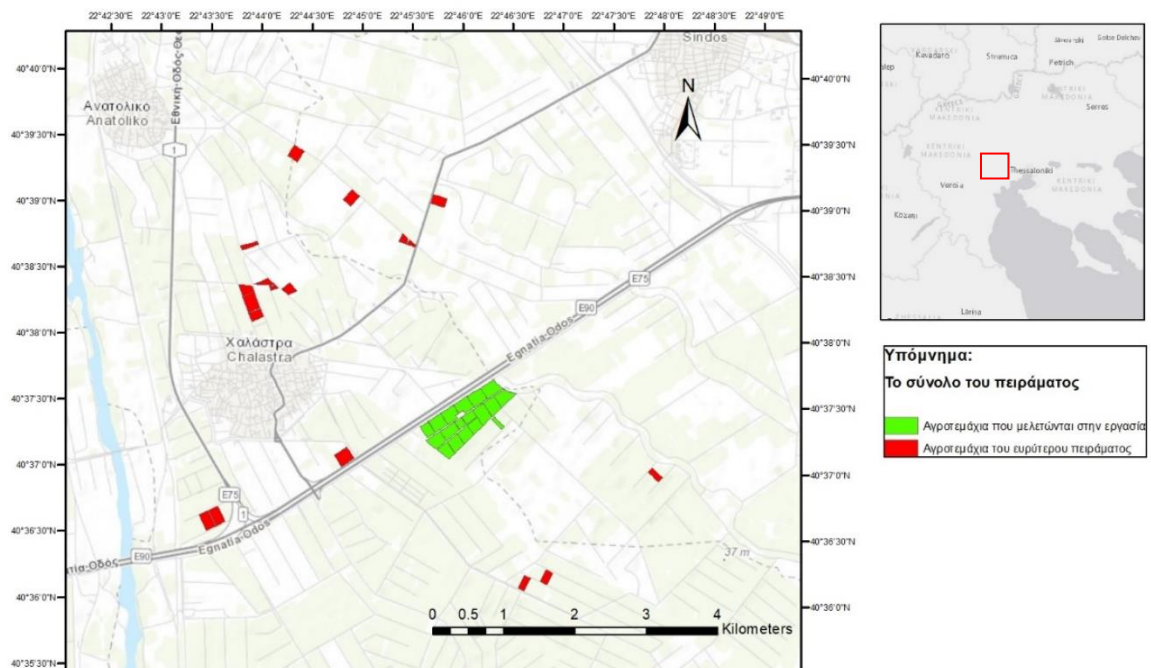
Οι επιμέρους στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

1. Η μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης των τιμών των δεικτών βλάστησης κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου καθώς και η συγκριτική μεταξύ τους εξέλιξη των τιμών τους, η διερεύνηση της αξιολόγησης/ευαισθησίας καθενός δείκτη για τα διάφορα φαινολογικά στάδια της καλλιέργειας
2. Η αξιολόγηση δύο ποικιλιών ρυζιού (Ronaldo και Gladio) σε σχέση με την παραγωγικότητά τους, τη διάρκεια του βλαστικού κύκλου τους (πρωιμότητα), την συμπεριφορά τους σε διαφορετικά εδαφικά περιβάλλοντα, σε πραγματικές συνθήκες αγρού
3. Η μελέτη της χωρικής παραλλακτικότητας της παραγωγής και των δεικτών βλάστησης
4. Η συσχέτιση της παραγωγής σε σχέση με τους τηλεπισκοπικούς δείκτες βλάστησης
5. Η αναγνώριση των καλύτερα σχετιζόμενων με τη συγκομιδή δεικτών βλάστησης από τους δείκτες βλάστησης που εξετάζονται
6. Η εύρεση ενδεχομένως ενός βέλτιστου συνδυασμού δεικτών βλάστησης και χρόνου λήψης τηλεπισκοπικών δεδομένων που να παρουσιάζει αυξημένη ακρίβεια στην πρόβλεψη της συγκομιδής στο ρύζι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

3.1 Περιοχή Μελέτης

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πρωτογενή δεδομένα που αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου σε έκταση και πολυπλοκότητα πειράματος που διενεργήθηκε το 2016 στο πλαίσιο της ευρύτερης έρευνας της εταιρίας στον τομέα της γεωργίας ακριβείας. Η περιοχή της έρευνας τοποθετείται πλησίον του οικισμού της Χαλάστρας, στην Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης.



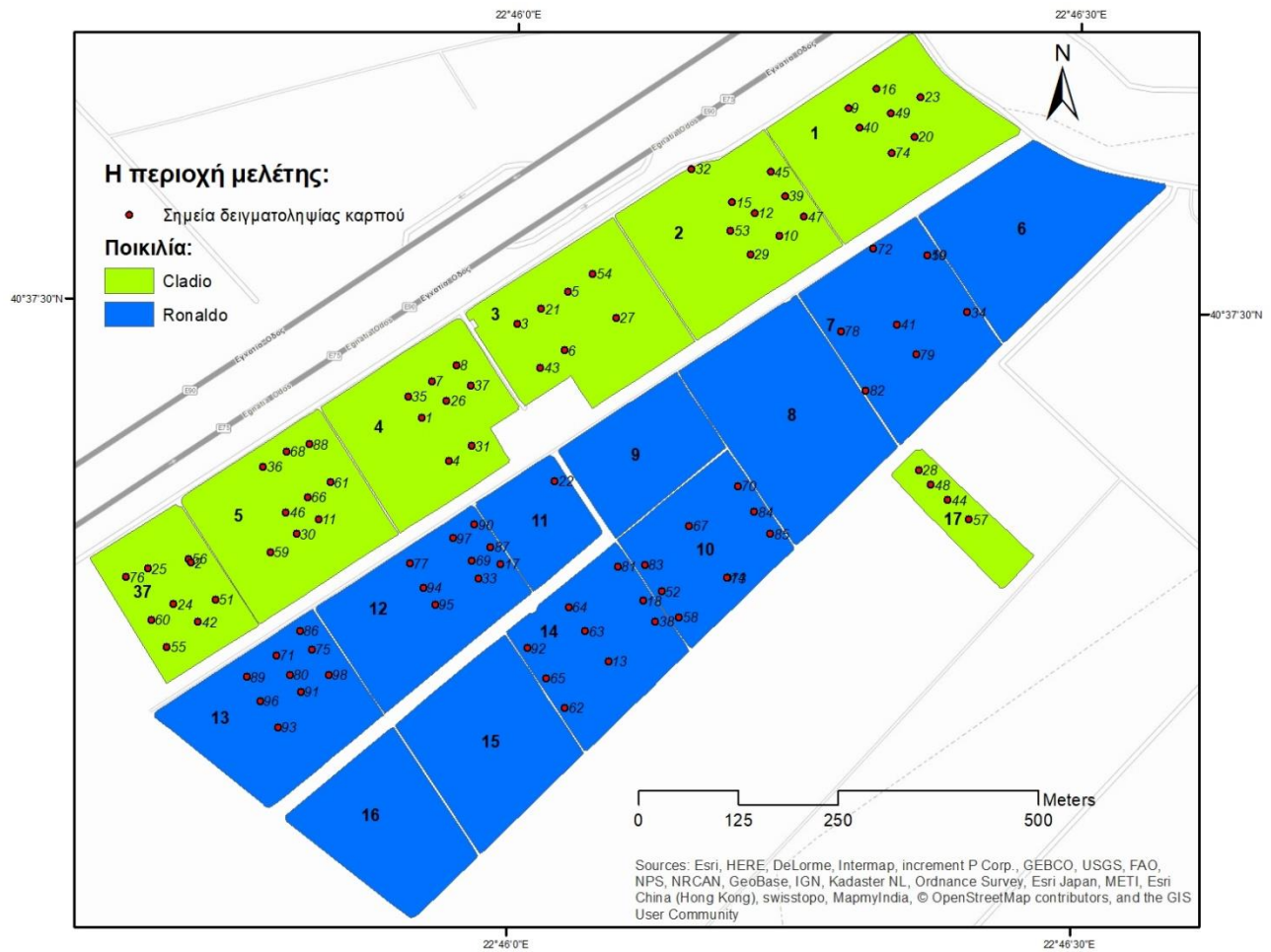
Εικόνα 2: Χάρτης της περιοχής των αγροτεμαχίων της μελέτης

Από τα συνολικά 36 αγροτεμάχια ρυζιού του πειράματος της, επιλέχθηκαν εν τέλει για περαιτέρω ανάλυση στην παρούσα εργασία τα 18 από αυτά (βλ. Εικόνα 2) συνολικής έκτασης 580 στρεμμάτων για τους εξής λόγους:

- Η συγκέντρωσή τους στην ίδια περιοχή και η άμεση γειννίαση μεταξύ τους καθιστά την επεξεργασία των δεδομένων πιο εύκολη
- Για την λήψη τηλεπισκοπικών δεδομένων και από τα 36 αγροτεμάχια απαιτήθηκαν 5 πτήσεις με το UAS για την κάθε ημερομηνία λήψης των εικόνων. Η κάθε πτήση όμως διαρκεί 20-30 λεπτά και λόγω αλλαγής του αζιμουθίου, οι εικόνες που λαμβάνονταν τις

πρωινές ώρες είχαν φασματικές διαφορές από αυτές που λαμβάνονταν το μεσημέρι ή το απόγευμα.

- Οι εικόνες των πτήσεων αυτών θα έπρεπε στη συνέχεια να δημιουργήσουν 1 μωσαϊκό, κάτι που θα εισήγαγε σφάλματα λόγω των περίπλοκων ραδιομετρικών και γεωμετρικών διορθώσεων που θα έπρεπε να γίνουν κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας των δεδομένων
- Δεδομένα από in situ μετρήσεις βάρους καρπού και από εδαφολογικές αναλύσεις ελήφθησαν κυρίως από την κεντρική αυτή περιοχή των 18 αγροτεμαχίων



Εικόνα 3. Η περιοχή μελέτης με τις ποικιλίες που ερευνήθηκαν και τα σημεία λήψης σημειακών δεδομένων της παραγωγής.

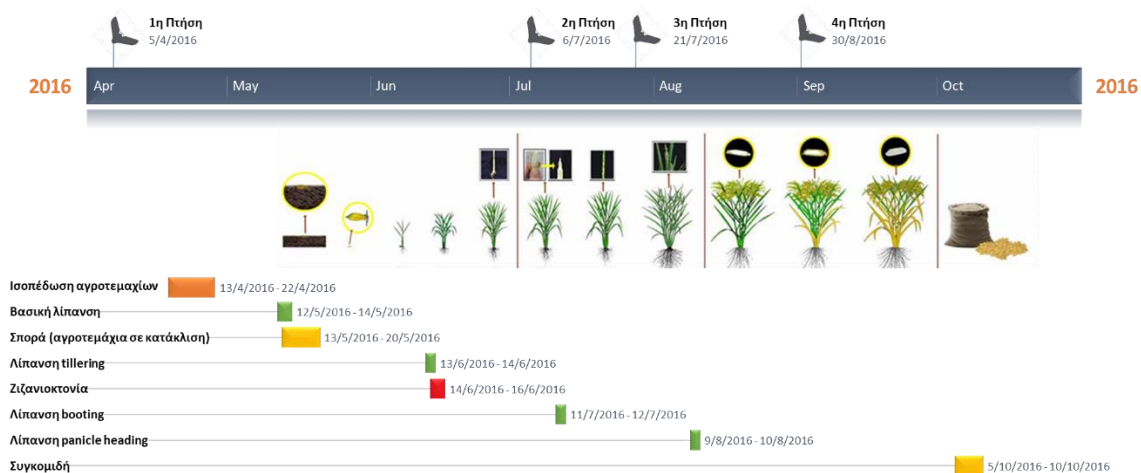
3.2 Τα δεδομένα της έρευνας

Τα πρωτογενή δεδομένα της έρευνας περιλαμβάνουν τέσσερις (4) τηλεπισκοπικές πολυφασματικές εικόνες υπερυψηλής ανάλυσης, 97 σημειακά δεδομένα πεδίου που σχετίζονται με την ποσότητα συγκομιδής (αναγωγή σε Kg/στρ.), 18 πολύγωνα που αντιστοιχούν στα αγροτεμάχια της μελέτης, δεδομένα του συνόλου της συγκομιδής ανά αγροτεμάχιο καθώς και λοιπές πληροφορίες για την καλλιέργεια, όπως καταγράφονται στο ημερολόγιο αγρού από τον παραγωγό. Από τα πρωτογενή αυτά δεδομένα μετά από επεξεργασία προέκυψαν τα 3 σετ δευτερογενών δεδομένων που αξιοποιήθηκαν στην στατιστική επεξεργασία της επόμενης ενότητας.

Δεδομένα από το ευρύτερο πείραμα που σχετίζονται κυρίως με την παραγωγικότητα του εδάφους των υπό μελέτη αγροτεμαχίων και προκύπτουν από εδαφολογικές αναλύσεις αξιοποιήθηκαν για το σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

Στην περιοχή μελέτης καλλιεργήθηκαν το 2016 δύο ποικιλίες ρυζιού, οι Ronaldo και Gladio με την καλλιεργητική πρακτική της υγρής σποράς. Η ταξινόμηση των δύο ποικιλιών καθώς και τα φυσιολογικά και φαινολογικά τους χαρακτηριστικά αναφέρονται ακολούθως (βλ. Πίνακας 1).

Η καλλιεργητική πρακτική που ακολουθείται στην περιοχή της Χαλάστρας στην περίπτωση του ρυζιού με τα βασικά φαινολογικά στάδια, τις κύριες καλλιεργητικές παρεμβάσεις και τις ημερομηνίες πτήσης του UAS απεικονίζονται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση των τυπικών σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας του ρυζιού (προσαρμοσμένων χρονικά στην καλλιεργητική πρακτική της Χαλάστρας, των επιμέρους καλλιεργητικών πρακτικών της περιοχής καθώς και οι ημερομηνίες των 4 πτήσεων με το UAS.

Πίνακας 1. Γενικές πληροφορίες ως προς την ταξινόμηση, τη φυσιολογία και τη φαινολογία των 2 ποικιλιών ρυζιού που μελετήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα.

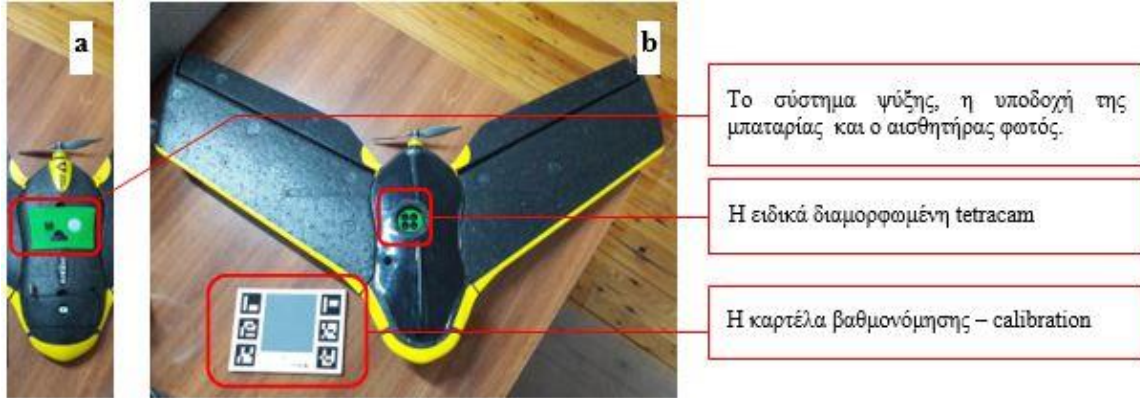
| Χαρακτηριστικά | Ποικιλίες | |
|---|----------------------------------|---------------------------------|
| | Ronaldo (προμηθευτής: Lugano) | Gladio (προμηθευτής: Almo) |
| Τύπος φυτού: | Japonica | Indica |
| Τύπος καρπού: | long A | long B |
| Ύψος φυτού: | Ψηλό, 90 cm | Κοντό, μικρό μήκος μεσογονατίων |
| Κύκλος ζωής: | 150 ημέρες | Πρώιμη ποικιλία (130 ημέρες) |
| Ανθεκτικότητα στην <i>Ryricularia</i> : | Μεγάλη | Μεγάλη |
| Ανθεκτικότητα στο <i>Helminthosporium</i> : | Μεγάλη | Μέτρια |
| Αντίσταση στην κάμψη στελέχους | Μεγάλη | Μεγάλη |
| Ανοχή στο κρύο: | Μεγάλη | Μεγάλη |
| Ικανότητα αδελφώματος | Μεγάλη | Μεγάλη |
| Ανάπτυξη φυτού – ζωηρότητα | Αργή | Γρήγορη – ζωηρή ποικιλία |
| Παραγωγή: | Πολύ υψηλή | Υψηλή |
| Ποσότητα σπόρου (για υγρή σπορά): | 23 kg/στρ. | 23 kg/στρ. |
| Μέγεθος κόκκου: | 6.5 x 2.9 mm. | 7,5 x 2.3 mm |
| Περιεκτικότητα σε αμυλόζη: | 13% | 23% |

Πηγές: Cimonelli, Abbiati and Cormenga 2016, <http://www.lugano.it/en>, http://almoamenti.eu/en/portfolio_page/gladio/

Στις σελίδες που ακολουθούν περιγράφεται με λεπτομέρεια η διεργασία της συλλογής των πρωτογενών δεδομένων (βλ. Ενότητα 3.2.1), η προ – επεξεργασία τους και η προετοιμασία τους για τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης (βλ. Ενότητα 3.2.2) και των τριών σετ δευτερογενών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική επεξεργασία της ενότητας 4.

3.2.1 Λήψη πρωτογενών δεδομένων

Στην περιοχή μελέτης ελήφθησαν όπως αναφέρθηκε ήδη τέσσερις πολυφασματικές εικόνες υψηλής ανάλυσης. Τα τηλεπισκοπικά αυτά δεδομένα ελήφθησαν με UAS και συγκεκριμένα με το μοντέλο eBee της SenseFly (θυγατρική της Parrot, <https://www.sensefly.com/UASs/ebec.html>, βλ. Εικόνα 5). Η κάμερα που φέρει το συγκεκριμένο UAS είναι tetracam ειδικά τροποποιημένη (custom made) για τις ανάγκες της έρευνας στη γεωργία ακριβείας (Βλ. Πίνακας 2 & Γράφημα 3).

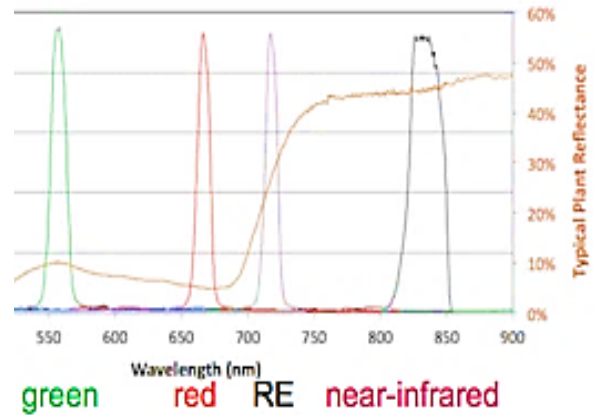


Εικόνα 5. Η άνω όψη (a) και η κάτω όψη (b) του eBee με κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικές πληροφορίες για τα φάσματα λήψης της πολυφασματικής κάμερας.

Πίνακας 2. Ραδιομετρικά χαρακτηριστικά της πολυφασματικής κάμερας.

| Μπάντες | Εύρος συχνότητων (nm) | Peak συχνότητας (nm) | Φάσμα |
|---------|-----------------------|----------------------|---------------|
| Band 1 | 500 – 520 | 510 | Πράσινο |
| Band 2 | 640 – 680 | 660 | Κόκκινο |
| Band 3 | 690 – 730 | 710 | Red Edge |
| Band 4 | 770 – 810 | 790 | Near Infrared |



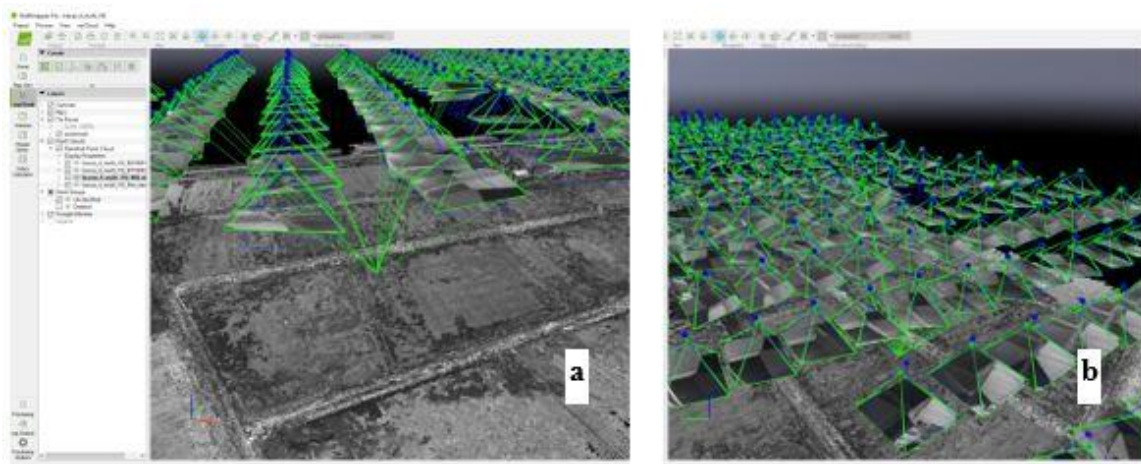
Γράφημα 3. Γραφική απεικόνιση της ευαισθησίας της πολυφασματικής κάμερας στα 4 μήκη κύματος με υπόβαθρο την τυπική καμπύλη ανακλαστικότητας υγιούς βλάστησης.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν πτήσεις σε 4 κρίσιμες για την καλλιέργεια του ρυζιού ημερομηνίες, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα (βλ. Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Αναλυτικές πληροφορίες για τις ημερομηνίες, το χρόνο και τις συνθήκες πτήσης του UAS.

| Ημ/νία | Κάμερα | Ανάλυση (cm/pixel) | Ύψος (m) | Επικάλυψη (%-%) | Ωρα έναρξης | Ηλιοφάνεια (%) | Άνεμος (m/s), Κατεύθυνση | Στάδιο ανάπτυξης |
|----------|--------|--------------------|----------|-----------------|-------------|----------------|--------------------------|--------------------|
| 05-04-16 | multi | 20 | 192 | 65-80 | 11:30 | 100% | 1,1 BA | Προεργασία εδάφους |
| 06-07-16 | multi | 20 | 192 | 65-80 | 9:55 | 70% | 2,4-3,8 ΝΔ | Έναρξη Booting |
| 21-07-16 | multi | 20 | 192 | 65-80 | 10:37 | 100% | 1,6 N | Panicle heading |
| 30-08-16 | multi | 20 | 192 | 65-80 | 10:40 | 100% | 4,3 ΒΔ | Έναρξη ripening |

Οι πτήσεις σχεδιάστηκαν με το λογισμικό eMotion που παρέχεται με το UAS και λήφθηκε μέριμνα στο μέτρο του δυνατού να πραγματοποιούνται παρεμφερείς ώρες της ημέρας, με παρόμοια διαδρομή, διάρκεια, καιρικές συνθήκες και κάλυψη για να μην επηρεάζονται οι εικόνες από τις αλλαγές του αζιμούθιου και των συνθηκών πτήσης.



Εικόνα 6. Επεξεργασία των πολυφασματικών εικόνων με το Pix4D. Ενδεικτικά απεικονίζεται το πλήθος των φωτογραφιών στο οποίο εμφανίζεται 1 σημείο (a) και η διεργασία της σύνθεσης του μωσαϊκού από πολλαπλές εικόνες (b).

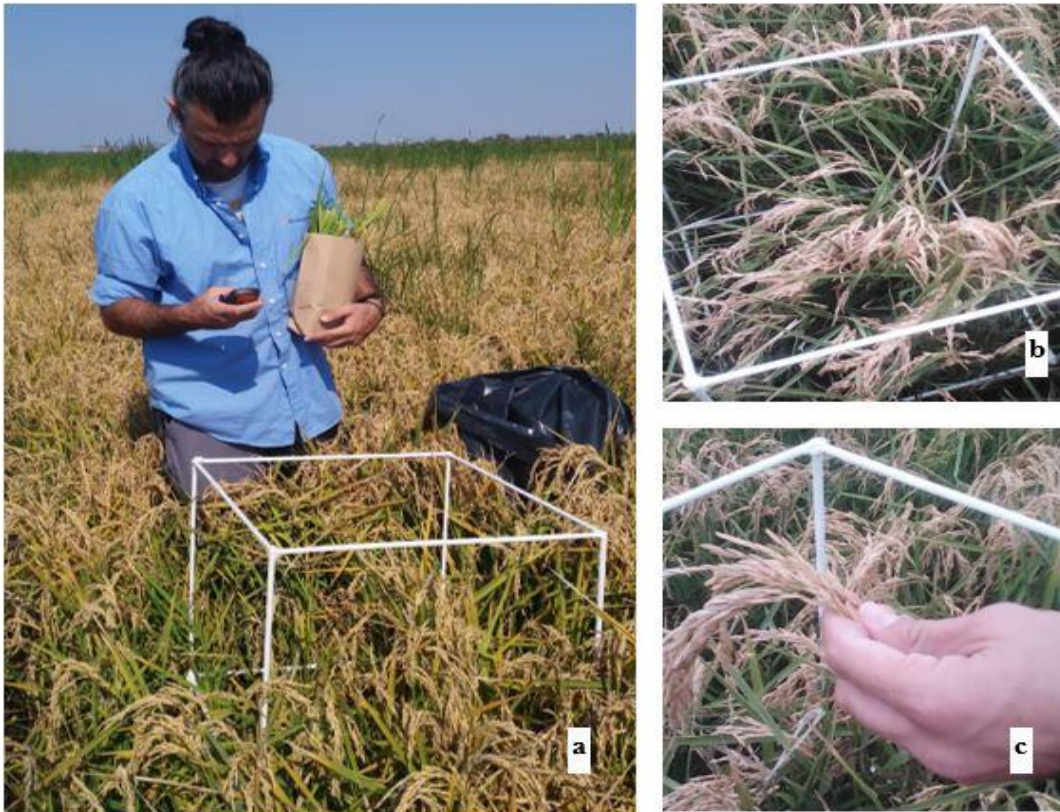
Πέρα από τις πολυφασματικές εικόνες χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη 97 σημειακά δεδομένα συγκομιδής. Για τη συλλογή των σημειακών δεδομένων συγκομιδής ρυζιού, κατασκευάστηκε ένα κυβικό μεταλλικό πλέγμα με μήκος πλευράς 50 εκατοστών. Από τα 97 σημεία, λίγες ημέρες πριν

την έναρξη της συγκομιδής διενεργήθηκε συλλογή των ταξικαρπιών, ενώ ταυτόχρονα καταγράφηκε με gps χειρός η θέση του κάθε σημείου (βλ. Εικόνα 7).

Ακολούθησε πλήρης ξήρανση των καρπών, χειρωνακτική αποφλοιώσή τους και ζύγισμα. Η παραγωγή (σε γραμμάρια) από τα 97 σημεία έκτασης 0,25 τ.μ. έκαστο εκφράζεται στην ανάλυση που ακολουθεί με απλή αναγωγή σε κιλά ανά στρέμμα.

Επιπρόσθετα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν αποτελούν οι συνολικές αποδόσεις καρπού (σε τόνους) για τα 18 αγροτεμάχια της μελέτης, όπως τις διέθεσε ο παραγωγός. Τα αδρά όρια των αγροτεμαχίων εντοπίστηκαν από το ΟΣΔΕ του παραγωγού ενώ για τον υπολογισμό της ακριβούς έκτασής τους ψηφιοποιήθηκαν με ακρίβεια σε κατάλληλο χαρτογραφικό υπόβαθρο με gps χειρός.

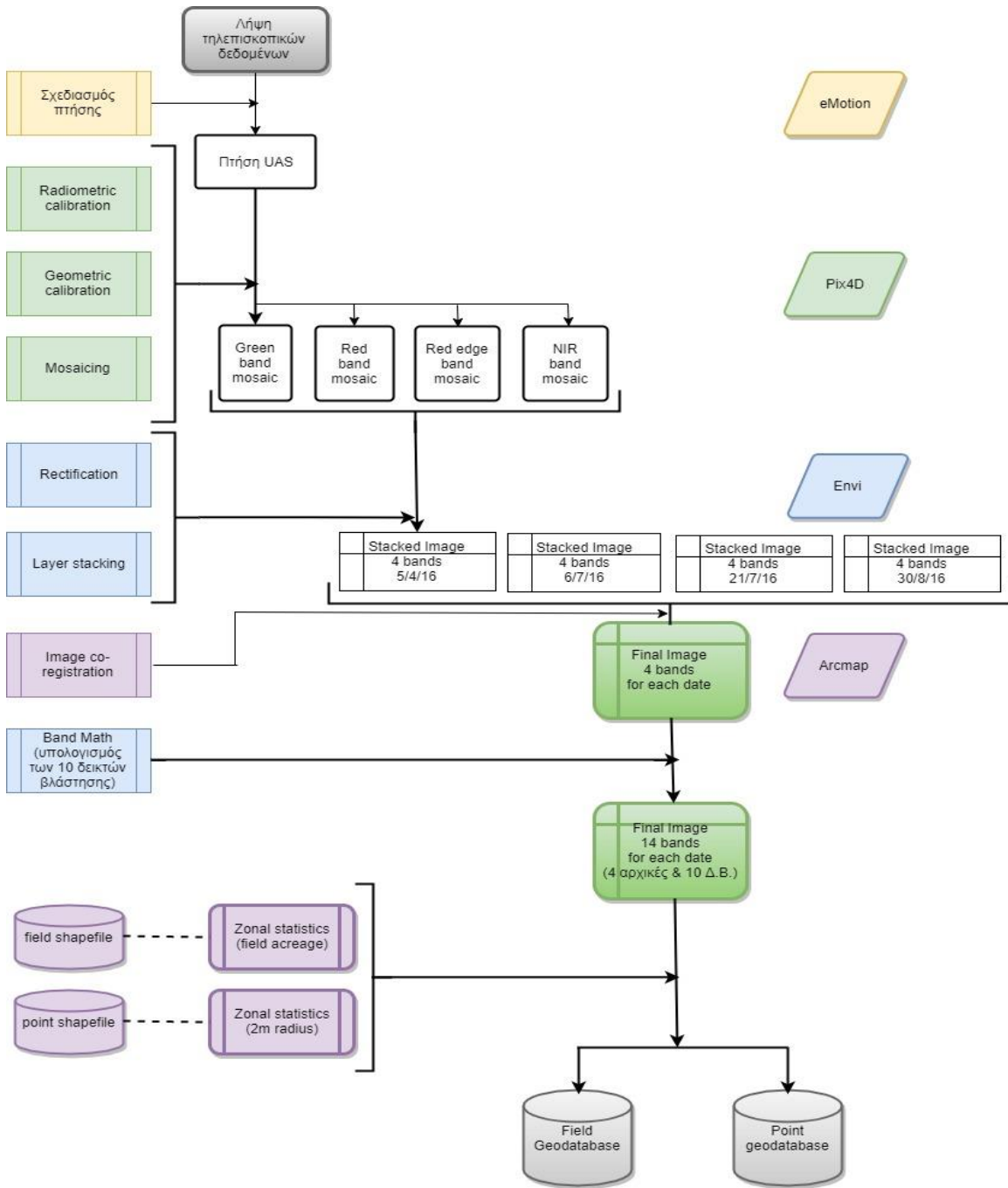
Με τον τρόπο αυτό, για το κάθε αγροτεμάχιο πραγματοποιήθηκε αναγωγή της παραγωγής σε κιλά ανά στρέμμα.



Εικόνα 7. Διαδικασία λήψης σημειακών δεδομένων παραγωγής: Εντοπισμός θέσης με gps (a), το πλαίσιο δειγματοληψίας τοποθετημένο στον αγρό (b) και λεπτομέρεια από τον καρπό (c).

3.2.2 Προ – επεξεργασία των δεδομένων & υπολογισμός των δεικτών βλάστησης

Το διάγραμμα ροής που ακολουθήθηκε κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων, τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης και την τελική δημιουργία των 2 σετ δευτερογενών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική ανάλυση παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 8. Το διάγραμμα ροής για τη δημιουργία των 2 σετ δευτερογενών δεδομένων.

Το παραπάνω διάγραμμα ροής είναι αρκετά αναλυτικό αλλά δίνονται ακολούθως κάποιες λεπτομέρειες.

- Με το λογισμικό eMotion σχεδιάζεται η πτήση με την εισαγωγή παραμέτρων όπως ύψος πτήσης, πολυγώνου κάλυψης και βαθμού επικάλυψης (across & between) αλλά δεν υπάρχει έλεγχος κατά τη διάρκεια της πτήσης.
- Με το λογισμικό Pix4D η παραγωγή των μωσαϊκών γίνεται αυτοματοποιημένα, μετά τη ρύθμιση κάποιων βασικών παραμέτρων από το χρήστη. Σε ότι αφορά τις ραδιομετρικές διορθώσεις, εφαρμόζεται ειδικός αλγόριθμος που έχει ως εισερχόμενη πληροφορία τις τιμές των εικονοστοιχείων και τη φωτεινότητα από τον αισθητήρα φωτός του UAS και εξάγει την πληροφορία (εικόνα) απευθείας σε τιμή ανάκλασης (reflectance), κάτι που διευκολύνει τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης. Τα μωσαϊκά είναι γεωαναφεραμένα αλλά χρειάζονται περαιτέρω διόρθωση για να επιτευχθεί ο βαθμός ακρίβειας που απαιτείται για τη μελέτη της συσχέτισης δεικτών βλάστησης – παραγωγής.
- Το στάδιο του rectification έγινε με χρήση πολυωνυμικής συνάρτησης 3^{ου} βαθμού (είχε το μικρότερο RMSE <1.2) και με υπόβαθρο την Red μπάντα, πάνω στην οποία «ταίριαξαν» όλες οι υπόλοιπες μπάντες για την κάθε ημερομηνία λήψης. Το co-registration μεταξύ των σύνθετων εικόνων των τεσσάρων ημερομηνιών έγινε με εικόνα αναφοράς αυτή της 6 Ιουλίου.
- Για τη δημιουργία του 2^{ου} σετ δευτερογενών δεδομένων (από τις σημειακές συγκομιδές), επειδή αφενός με τη διεργασία του rectification εισάγονται σφάλματα και αφετέρου το gps χειρός με το οποίο καταγράφηκαν οι 97 θέσεις δεν ήταν RTK gps και τις περισσότερες φορές κατέγραφε ακρίβεια θέσης στο εύρος $\pm 1.5 - 2.5$ μέτρα, δημιουργήθηκε buffer zone γύρω από το κάθε σημείο ακτίνας 2 μέτρων και επομένως υπολογίστηκε η μέση τιμή του κάθε δείκτη βλάστησης από επιφάνεια περίπου 12.5 τ.μ. που απαρτίζεται από 315 pixel (των 20 εκατοστών).

Επιλέχθηκε η διερεύνηση πολλών δεικτών βλάστησης «νέας γενιάς» που ενσωματώνουν το φάσμα Red edge, καθώς η τροποποιημένη tetracam του UAS παρέχει τη δυνατότητα αυτή. Εξαιτίας της μικρής απορρόφησης της χλωροφύλλης στο φάσμα του Red edge, η χρήση του στον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης μειώνει τον κορεσμό που παρατηρείται πολλές φορές σε υψηλές τιμές του δείκτη φυλλικής μάζας (LAI) και η ανακλαστικότητα παραμένει ευαίσθητη στην απορροφητικότητα από τη χλωροφύλλη σε μέσες και υψηλές τιμές. (Gitelson and Merzlyak 1994).

Έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πολλοί δείκτες βλάστησης που ενσωματώνουν το φάσμα αυτό, ενώ έχουν δημιουργηθεί και πολλές παραλλαγές ήδη γνωστών και χρησιμοποιούμενων δεικτών. Η

σύγκριση σύνθετων δεικτών βλάστησης (Xu, et al. 2010) με φάσματα στα 705, 750, 670 και 800 nm ως προς τη συσχέτιση των τιμών τους με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη σε ρύζι έδειξε ισχυρή συσχέτιση όταν οι δείκτες περιλαμβάνουν το Red edge και εγγύς υπέρυθρο ή κάποιον συνδυασμό τους (στα 710 nm και 800 nm).

Ανάμεσα στους πολυάριθμους δείκτες βλάστησης που υπάρχουν, αυτός που έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο στην παρακολούθηση της βλάστησης (Huete et al. 1985, Baret and Guyot 1991) είναι ο NDVI, λόγω των πλεονεκτημάτων του, παρόλο που έχουν αναφερθεί συγκεκριμένα μειονεκτήματά του (Huete et al. 1985). Συγκεκριμένα ο δείκτης βλάστησης NDVI, είναι από τους παλαιότερους, πιο γνωστούς και πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάστησης. Είναι ανθεκτικός κάτω από την επίδραση διαφόρων συνθηκών, λόγω του κανονικοποιημένου τύπου του και της υψηλής απορρόφησης της ανακλώμενης ακτινοβολίας που παρουσιάζει στις περιοχές του φάσματος όπου υπάρχει χλωροφύλλη.

Όμως, κάτω από συνθήκες πυκνής βλάστησης και όταν ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας - Leaf Area Index (LAI) παίρνει μεγάλες τιμές, μπορεί να πάθει κορεσμό σήματος (saturation) στις τιμές του κι έτσι να μην αυξάνεται ανάλογα με τη αύξηση της χλωροφύλλης. Επίσης είναι πολύ ευαίσθητος στις μεταβολές της βλάστησης του υπορόφου και η υποβάθμιση του σήματός του γίνεται πιο έντονη όταν υπάρχουν συνθήκες υψηλής βιομάζας στον υπόροφο (Huete, 1988). Παίρνει τιμές από -1 έως +1, όμως οι συνήθεις τιμές που εμφανίζει για την υγιή βλάστηση είναι από +0.2 έως +1 (Rouse et al, 1973), (Tucker, 1979), (Jackson, 1983) & (Sellers, 1985).

Στην παρούσα εργασία, από την πληθώρα των Δ.Β. που υπάρχουν στη βιβλιογραφία επιλέχθηκαν για μελέτη 10. Από αυτούς ο πρώτος δείκτης βλάστησης που επιλέχθηκε για μελέτη είναι ο NDVI. Οι υπόλοιποι 9 έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στη διεθνή βιβλιογραφία για παρόμοιες μελέτες σε καλλιέργεια ρυζιού και άλλων αγρωστωδών με ποικίλη χρησιμότητα. Κάποιοι αποτελούν παραλλαγές ήδη γνωστών Δ.Β. που αξιοποιούν όμως το φάσμα Red edge. Οι 7 από τους 10 δείκτες βλάστησης που διερευνώνται στην παρούσα εργασία αξιοποιούν το φάσμα Red edge (βλ. Πίνακα 4).

Πίνακας 4: Οι δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν για την κάθε ημερομηνία και χρήσιμες πληροφορίες σχετικές με αυτούς.

| Δείκτης βλάστησης | Μαθηματικός τύπος | Πηγή | Κλίμακα εφαρμογής | Παράμετρος που εκτιμάται |
|---|--|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| Normalized difference vegetation index (NDVI) | $\frac{NIR - R}{NIR + R}$ | Rouse et al. (1973) | Κόμη | Βιομάζα, βλάστηση |
| Normalized NIR index (NNIR) | $\frac{NIR}{NIR + Red + G}$ | Sripada et al. (2006) | Περιοχή, κόμ | βλάστηση |
| Red Edge difference vegetation index (REDVI) | $NIR - Red$ | Miao et al. (2013) | | Vegetation coverage |
| Normalized difference red edge (NDRE) | $\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$ | Barnes et al. (2000) | φύλλο | βιομάζα |
| Red edge chlorophyll index (CIre) | $\frac{NIR}{Red} - 1$ | Gitelson et al. (2005) | | |
| Modified chlorophyll absorption in reflectance index 1 (MCARI1) | $[NIR - Red - 0.2 * (NIR - G)] * \frac{NIR}{Red}$ | Miao et al. (2013) | Φύλλο | Χλωροφύλλη, LAI |
| Red edge soil adjusted vegetation index (RESAVI) | $1.5 * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.5)}$ | Miao et al. (2013) | Κόμη | Βιοφυσικές παράμετροι |
| Red edge re-normalized different vegetation index (RERDVI) | $\frac{NIR - Red}{\sqrt{NIR + Red}}$ | Miao et al. (2013) | | |
| Transformed vegetation index (TVI) | $\sqrt{\frac{NIR - R}{NIR + R}} + 0.5$ | Derring et al. (1975) | Κόμη | Χλωροφύλλη |
| Modified transformed vegetation index 2 (MTVI2) | $\frac{1.5 * [1.2 * (NIR - G) - 2.5 * (R - G)]}{\sqrt{(2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{R})} - 0.5}$ | Haboudane et al. (2004) | | |

Ο πρώτος δείκτης βλάστησης που επιλέχθηκε για μελέτη είναι ο NDVI. Θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή ως ο δείκτης αναφοράς καθώς έχει μελετηθεί επαρκώς από πολλούς ερευνητές και είναι γνωστή εδώ και πολλά χρόνια η συσχέτισή του με πολλές παραμέτρους της ανάπτυξης των φυτών. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, έχει αποδειχθεί σε πολλές εργασίες πως συσχετίζεται ισχυρά με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) αλλά στα αρνητικά του είναι πως έχει εκθετικής μορφής συσχέτιση και παρουσιάζει κορεσμό τιμών (μικρή ευαισθησία) σε μεγάλες τιμές του δείκτη αυτού (LAI>6).

Ο δεύτερος δείκτης βλάστησης (NNIR) είναι σύνθετος δείκτης καθώς περιλαμβάνει 3 φάσματα. Λόγω της χρήσης της ανακλαστικότητας στο μήκος κύματος του πράσινου, βρέθηκε πως συσχετίζεται ισχυρά με την απορρόφηση αζώτου που με τη σειρά της επηρεάζει την θρέψη και εν τέλει την παραγωγή του φυτού (Stripada 2006)

Για τη μείωση του κορεσμού αυτού και την επίτευξη γραμμικής συσχέτισης βιοφυσικών παραμέτρων – τιμών δείκτη βλάστησης προτάθηκε ο δείκτης του REDVI (Renormalized Difference Vegetation Index) που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του DVI και NDVI (Rougean and Breon 1995) και τροποποιήθηκε – βελτιώθηκε περαιτέρω με την προσθήκη του φάσματος Red edge (Miao, et al. 2013).

Ο τέταρτος κατά σειρά ΔΒ που υπολογίστηκε είναι ο NDRE (Normalized difference red edge) που στην ουσία είναι ο δείκτης NDVI με αντικατάσταση του φάσματος R με αυτό του Red Edge. Το NDRE είναι ένας καλύτερος δείκτης για την υγεία / ζωηρότητα της βλάστησης από το NDVI για καλλιέργειες μεσο-όψιμη παρατήρηση οπότε και έχουν συσσωρεύσει υψηλά επίπεδα χλωροφύλλης στα φύλλα τους, επειδή το μήκος κύματος Red Edge είναι πιο διεισδυτικό στα φύλλα από το κόκκινο φως και έτσι απορροφάται λιγότερο. Είναι πιο κατάλληλο από το NDVI για καλλιέργειες υψηλών εισροών καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, επειδή το NDVI χάνει συχνά την ευαισθησία αφού τα φυτά συγκεντρώσουν ένα κρίσιμο επίπεδο κάλυψης φύλλων ή περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη.

Ο δείκτης χλωροφύλλης – Red edge chlorophyll index (CI_{re}) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνολικής περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη. Οι τιμές ανάκλασης στο μήκος κύματος green και red είναι ευαίσθητες σε μικρές μεταβολές στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και συνεπώς στα περισσότερα είδη φυτών. Η συνολική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη συσχετίζεται γραμμικά με το δείκτη αυτό. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται ευρέως και κυρίως σε φυτά μεγάλης καλλιέργειας.

Ο MCARI1 είναι δείκτης απόστασης και ανήκει στην κατηγορία των solid line Δ.Β. Παρουσιάζει πολύ υψηλή συσχέτιση με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και ταυτόχρονα διορθώνει δια την ανακλαστικότητα του εδάφους. Περιλαμβάνει και το φάσμα Red Edge οπότε θεωρείται χρήσιμος για τη μελέτη των καλλιεργειών με ποικίλα ποσοστά φυτοκάλυψης και ακόμη και σε μέσο-όψιμο στάδιο (Xiao, και συν. 2014).

Ο ΔB RESAVI είναι μια ειδική περίπτωση του δείκτη βλάστησης προσαρμοσμένου στο έδαφος (SAVI) και της βελτιωμένης του εκδοχής (OSAVI). Χαρτογραφεί τη μεταβλητότητα της πυκνότητας κόμης. Επιπλέον, είναι ανθεκτικός στη μεταβλητότητα της ανακλαστικότητας του εδάφους και έχει αυξημένη ευαισθησία σε υψηλά LAI και φυτοκάλυψη μεγαλύτερη από 50%. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται καλύτερα σε περιοχές με σχετικά αραιή βλάστηση όπου το έδαφος είναι ορατό μέσα από την κόμη των φυτών (Shanyu Huang 2015).

Ο Δ.Β. Red edge re-normalized different vegetation index (RERDVI) αποτελεί βελτίωση του Normalized difference red edge (NDRE). Είναι καλός δείκτης για τη μελέτη της ζωνρότητας της βλάστησης με μεσο-όψιμη παρατήρηση οπότε και έχουν συσσωρεύσει οι φυτικοί ιστοί υψηλά επίπεδα χλωροφύλλης. Το μήκος κύματος Red Edge που χρησιμοποιεί είναι πιο διεισδυτικό στα φύλλα από το κόκκινο φως και έτσι απορροφάται λιγότερο (Qiang Cao 2015).

Ο δείκτης TVI υπολογίζεται ως η περιοχή ενός υποθετικού τριγώνου στον φασματικό χώρο που συνδέει την περιοχή μέγιστης ανάκλασης στο πράσινο, την περιοχή ελάχιστης απορρόφησης χλωροφύλλης και το φάσμα NIR. Όταν η απορρόφηση χλωροφύλλης προκαλεί μείωση της ανάκλασης στο φάσμα του κόκκινου χρώματος και η αφθονία των φύλλων προκαλεί αύξηση της ανακλαστικότητας στο NIR, η συνολική επιφάνεια του τριγώνου και επομένως η τιμή του δείκτη αυξάνεται. Είναι καλός για την εκτίμηση του LAI, αλλά η ευαισθησία του στη χλωροφύλλη αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας της κόμης και επομένως της φυτοκάλυψης (E. Raymond Hunt Jr., et al. 2013).

Τέλος, ο ΔB MTVI2 αποτελεί παραλλαγή του MTVI και στην ουσία βελτίωση του TVI. Θεωρείται πως συσχετίζεται ισχυρά με το LAI και διορθώνει για την ανακλαστικότητα του εδάφους σε τιμές πολύ μικρού LAI. Η τιμή του επηρεάζεται από δομικά στοιχεία των φυτικών ιστών και σχετίζεται και με ποιοτικά χαρακτηριστικά του φυτού (χλωρότητα, υγεία).

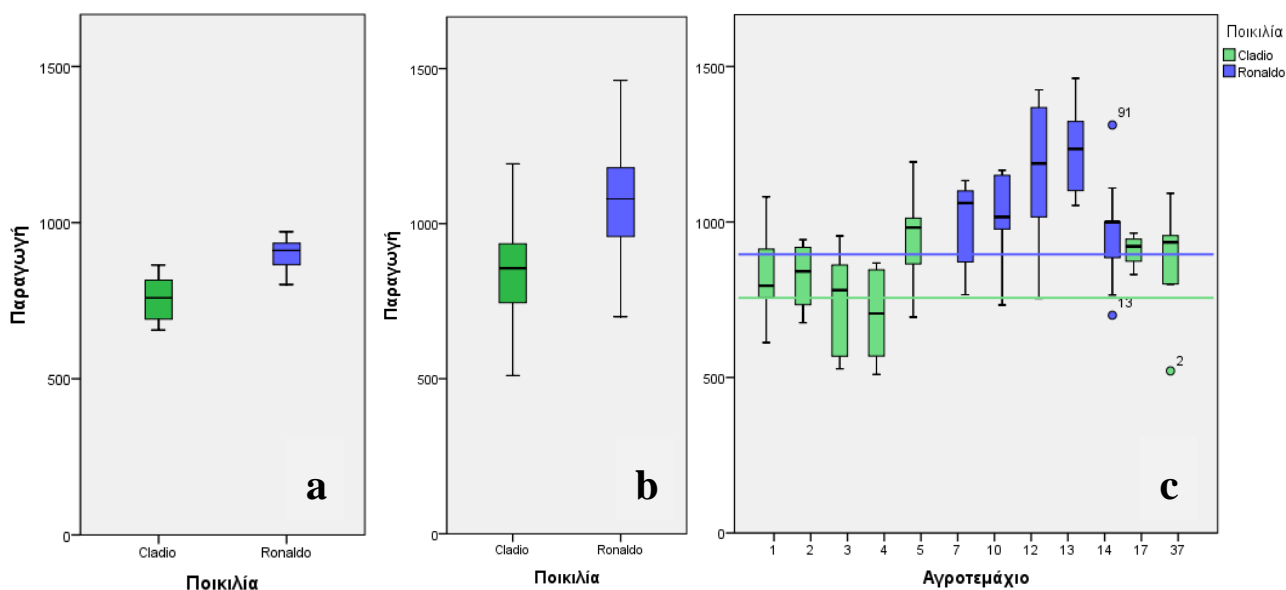
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Προκαταρκτική ανάλυση δεδομένων

Η προκαταρκτική ανάλυση των δεδομένων συγκομιδής σε συνδυασμό με τους δείκτες βλάστησης θα πραγματοποιηθεί σε 3 «χωρικά επίπεδα» για τα οποία υπάρχουν δεδομένα:

- Σε επίπεδο αγροτεμαχίων
- Σε επίπεδο ζωνών μελέτης εντός των αγροτεμαχίων για τη διερεύνηση της παραλλακτικότητας εντός των χωραφιών
- Σε επίπεδο σημειακών δεδομένων συλλογής συγκομιδής

Σε κάθε περίπτωση, για την προκαταρκτική ανάλυση των δεδομένων είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο της στατιστικής ανάλυσης. Στο παρόν πείραμα ένας παράγοντας που υπάρχει είναι ο παράγοντας «ποικιλία». Για την οπτική διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η παραγωγή στο ρύζι επηρεάζεται από την ποικιλία σχεδιάστηκαν τα ακόλουθα γραφήματα (βλ. Γράφημα 4a, b, c).



Γράφημα 4. Βοxplot από τη συνολική παραγωγή (σε kg/στρ.) των 18 αγροτεμαχίων ανά ποικιλία (a), από τη μέση τιμή των 97 σημειακών δεδομένων συγκομιδής ανά ποικιλία (b) και από τα σημειακά δεδομένα συγκομιδής ανά αγροτεμάχιο και ποικιλία (c).

Από το γράφημα 4a αναδεικνύεται η διαφορά στην παραγωγικότητα μεταξύ των δύο ποικιλιών ρυζιού, κάτι που αποδεικνύεται και στατιστικά ($F=19,323$, $Sig=0.000$), ενώ τα περιγραφικά στατιστικά δεδομένα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (βλ. Πίνακας 5). Επιπρόσθετα φαίνεται στο γράφημα 4b πως τα σημειακά δεδομένα συγκομιδής όταν εξεταστούν ανά ποικιλία μεροληπτούν ελαφρώς προς τα πάνω. Φαίνεται δηλαδή πως η μέση τιμή της συγκομιδής (σε kg/στρ.) είναι μεγαλύτερη και στις 2 ποικιλίες από αυτή που προκύπτει από τις συνολικές συγκομιδές των αγροτεμαχίων. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός πως ο δειγματολήπτης επέλεγε για τις σημειακές συγκομιδές σημεία – θέσεις στις οποίες η καλλιέργεια δεν παρουσίαζε κανένα πρόβλημα. Οι μέσοι όροι όμως των αγροτεμαχίων λαμβάνουν υπόψη τους και περιοχές με προβληματική βλάστηση όπως αυτές κοντά στα όρια των αγροτεμαχίων ή περιοχές που η βλάστηση έχει υποβαθμιστεί από άλλους παράγοντες (ασθένειες, μειωμένη πυκνότητα φυτών κλπ.).

Πίνακας 5. Περιγραφικά στατιστικά μεγέθη για την παραγωγή των 2 ποικιλιών ρυζιού.

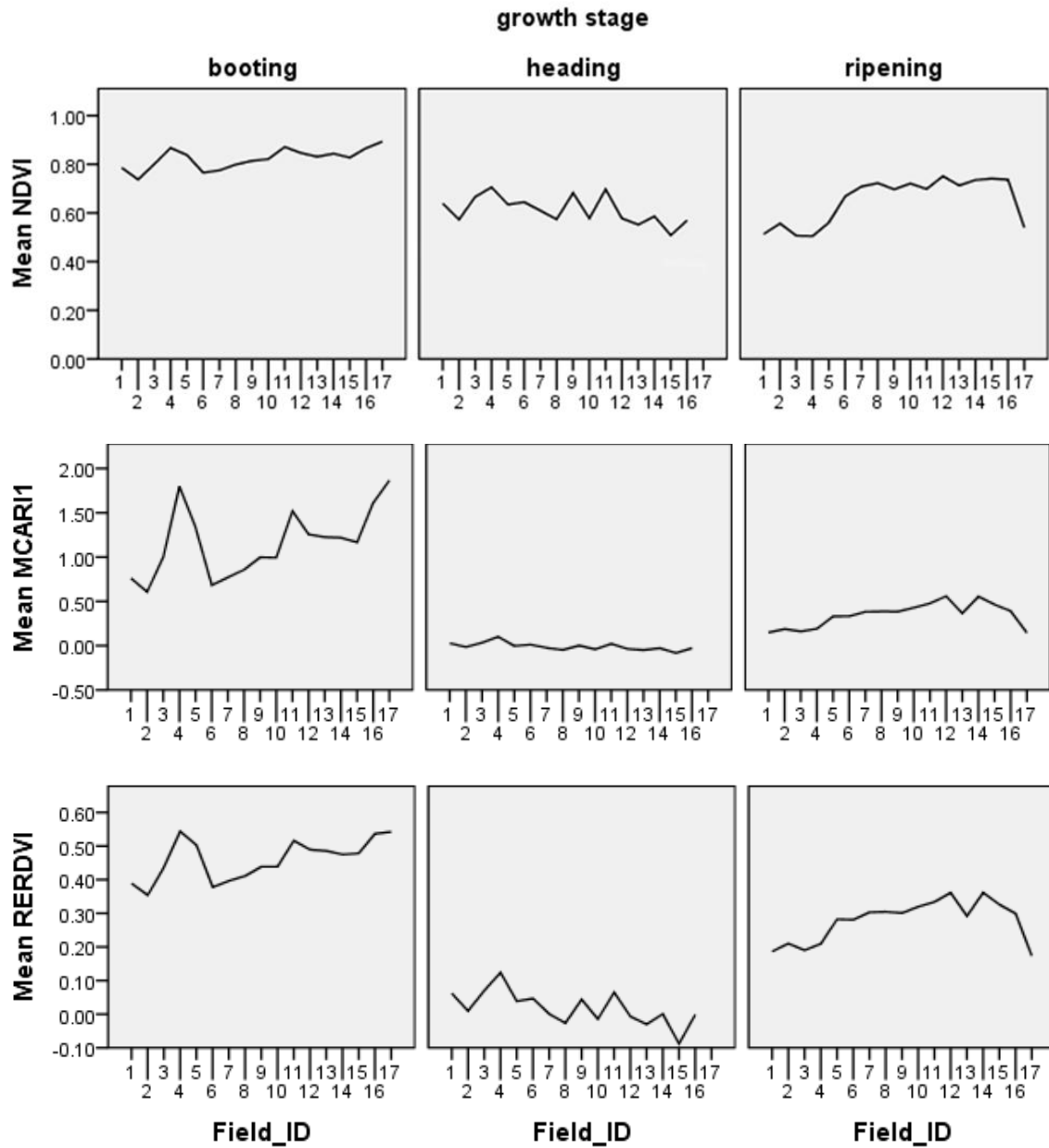
| | N | Range | Minimum | Maximum | Mean | | Std. Deviation | Variance | CV% |
|----------------|----|-------|---------|---------|-----------|------------|----------------|----------|-------|
| | | | | | Statistic | Std. Error | | | |
| General | 18 | 315 | 656 | 971 | 841.83 | 22.453 | 95.260 | 9074.500 | 11.32 |
| Gladio | 7 | 208 | 656 | 864 | 756.00 | 30.470 | 80.616 | 6499.000 | 10.66 |
| Ronaldo | 11 | 169 | 802 | 971 | 896.45 | 16.756 | 55.572 | 3088.273 | 6.20 |

Επιπλέον, το εύρος των ποσοτήτων συγκομιδής για την κάθε ποικιλία, όπως προκύπτει από τα σημειακά δεδομένα παραγωγής φαίνεται σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό που προκύπτει από τις μέσες παραγωγές για την κάθε ποικιλία. Αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη παραλλακτικότητας εντός των αγροτεμαχίων που επηρεάζει την παραγωγή και θα διερευνηθεί στη συνέχεια το μέγεθος αυτής της παραλλακτικότητας.

Εξάλλου και από άλλα παρόμοια πειράματα στην Ελλάδα η χωρική παραλλακτικότητα αναγνωρίζεται σε πολλές περιπτώσεις ακόμη και σε μικρής έκτασης αγροτεμάχια των 10 στρεμμάτων. Για το λόγο αυτό συνήθως πρακτική είναι η εξέταση του NDVI στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου προκειμένου να εκτιμηθεί αυτή η παραλλακτικότητα (Gemtos, et al. 2013)

Για τη συμπεριφορά των δεικτών βλάστησης κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της καλλιεργητικής περιόδου χρησιμοποιήθηκαν τρεις δείκτες: ο NDVI (που είναι ο πιο μελετημένος από όλους), ο

RERDVI και ο MCARI1 που δίνουν τις καλύτερες συσχετίσεις με την παραγωγή για τις ποικιλίες Ronaldo και Gladio αντίστοιχα (βλ. Γράφημα 5).



Γράφημα 5. Οι μέσες τιμές του NDVI και των 2 δεικτών βλάστησης με τους υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης με την παραγωγή (MCARI1 για την Gladio & RERDVI για τη Ronaldo) ανά αγροτεμάχιο και για τις 3 ημερομηνίες λήψης των τηλεπισκοπικών εικόνων.

Όπως φαίνεται παραπάνω (βλ. Γράφημα 5a, Εικόνα 9) ο δείκτης NDVI μεταξύ των 3 ημερομηνιών εμφανίζεται διαφοροποιημένος. Στις 6 Ιουλίου που γενικά τοποθετείται χρονικά το φαινολογικό στάδιο του σχηματισμού φόβης (booting) όλες οι μέσες τιμές κυμαίνονται στο εύρος 0.74 – 0.89 χωρίς όμως σημάδια κορεσμού (που βιβλιογραφικά παρουσιάζεται λίγο νωρίτερα στο στάδιο του μέγιστου αδελφώματος (maximum tillering), στις 21 Ιουλίου που είναι το στάδιο της επιμήκυνσης των μεσογονατίων (panicle heading) έχει χαμηλότερη μέση τιμή και εύρος 0.75 – 0.84 ενώ στις 30 Αυγούστου ο NDVI παίρνει τις μικρότερες τιμές του μεταξύ 0.50 – 0.75. Αυτές οι τιμές είναι αναμενόμενες καθώς στο στάδιο booting έπεται αμέσως μετά το φαινολογικό στάδιο του μέγιστου αδελφώματος. Στο στάδιο της επιμήκυνσης των μεσογονατίων έχει ήδη σχηματιστεί η φόβη και η καλλιέργεια είναι κοντά στην άνθιση, όπου η βλαστικότητα όπως αντικατοπτρίζεται και από άλλες παραμέτρους (LAI, frag κλπ) βαίνει μειούμενη, για να έχει τη μικρότερη μέση τιμή της (από τις 3 εξεταζόμενες ημερομηνίες) στις 30 Αυγούστου οπότε και η καλλιέργεια του ρυζιού βρίσκεται στην έναρξη της ωρίμανσης.

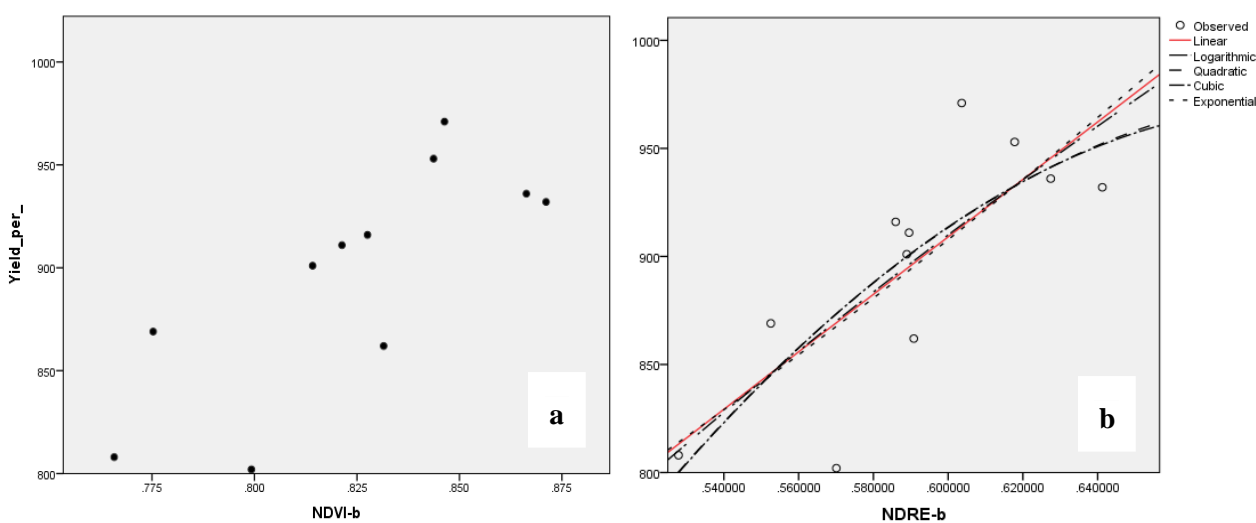
Σε αντίθεση με τον NDVI που βαίνει μειούμενος όσο εξελίσσεται η καλλιεργητική περίοδος, παρατηρούμε πως τόσο ο MCARI1 και ιδιαίτερα ο RERDVI αυξάνουν τις τιμές τους σε όλα τα αγροτεμάχια, ιδιαίτερα στο στάδιο της ωρίμανσης. Αυτό εξηγείται καθώς οι δείκτες αυτοί αξιοποιούν το φάσμα Red Edge και επομένως είναι πιο ευαίσθητοι στο στάδιο ωρίμανσης της καλλιέργειας οπότε και η χλωρότητα των φυτών έχει υποχωρήσει σημαντικά.

4.2 Πρόβλεψη της παραγωγής με δεδομένα σε επίπεδο αγροτεμαχίου

Για την ανάλυση σε επίπεδο αγροτεμαχίων αξιοποιήθηκαν 2 σετ δεδομένων (πρωτογενών & δευτερογενών):

- Η συνολική παραγωγή του κάθε αγροτεμαχίου η οποία εκφράστηκε ως μέση απόδοση σε kg/στρ.
- Οι μέσες για το κάθε αγροτεμάχιο τιμές για τους 10 υπό μελέτη δείκτες βλάστησης υπολογισμένοι για κάθε ημερομηνία πτήσης.

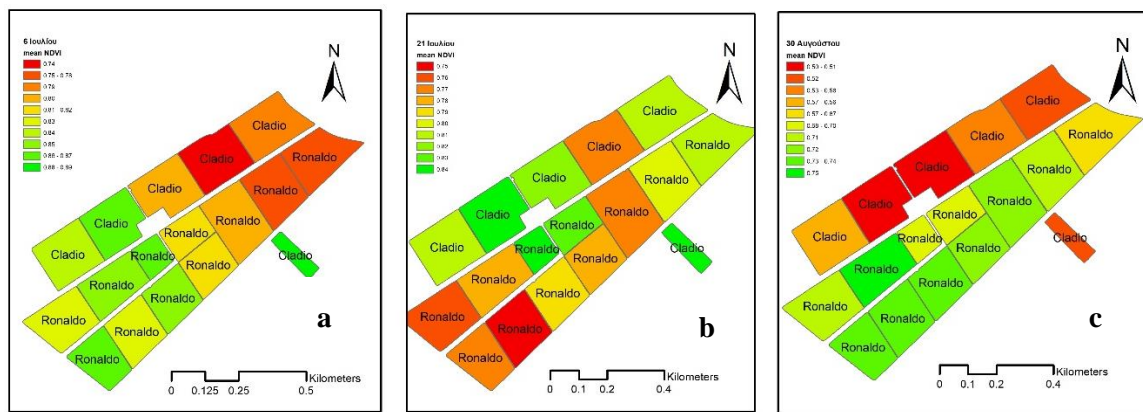
Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό πως σε γενικές γραμμές οι δείκτες βλάστησης συσχετίζονται γραμμικά με μεγέθη της φυσιολογίας των φυτών. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, ερευνήθηκαν 4 τύποι συσχέτισης μεταξύ της τελικής συγκομιδής και των δεικτών βλάστησης που περιλαμβάνουν τη γραμμική συσχέτιση, τη λογαριθμική μετατροπή, την εκθετική και την πολυωνυμική σχέση. Εν τέλει, η γραμμική συσχέτιση είναι εν γένει αποδεκτή στην περίπτωση της παρούσας εργασίας καθώς βρέθηκε πως σε μεμονωμένες μόνο περιπτώσεις (που αναφέρονται αργότερα) πολυωνυμική ή λογαριθμική σχέση δίνει καλύτερο R^2 . Ενδεικτικά παρατίθεται ακολούθως (βλ. Γράφημα 6) ένα scatterplot των δεδομένων συγκομιδής σε συνδυασμό με τις τιμές του δείκτη NDVI για την ποικιλία Ronaldo στο στάδιο του booting όπου φαίνεται η ύπαρξη γραμμικότητας καθώς και η διερεύνηση όλων των μορφών παλινδρόμησης για το δείκτη NDRE στην ίδια ποικιλία στο στάδιο του booting.



Γράφημα 6. Ενδεικτικό scatterplot των τιμών του δείκτη NDVI στις 06/07/2016 και της συγκομιδής για την ποικιλία Ronaldo (a) και ενδεικτική διερεύνηση των μορφών παλινδρόμησης για τον δείκτη βλάστησης NDRE (b).

Όπως φαίνεται ακολούθως (βλ. Εικόνα 9) ο δείκτης NDVI μεταξύ των 3 ημερομηνιών εμφανίζεται αρκετά διαφοροποιημένος.

Στις 6 Ιουλίου που γενικά τοποθετείται χρονικά το φαινολογικό στάδιο του σχηματισμού φόβης (booting) όλες οι μέσες τιμές κυμαίνονται στο εύρος 0.74 – 0.89, στις 21 Ιουλίου που είναι το στάδιο της επιμήκυνσης των μεσογονατίων (panicle heading) έχουν εύρος 0.75 – 0.84 ενώ στις 30 Αυγούστου ο NDVI παίρνει τιμές μεταξύ 0.50 – 0.75. Αυτές οι τιμές είναι αναμενόμενες καθώς στο στάδιο booting έπεται αμέσως μετά το φαινολογικό στάδιο του μέγιστου αδελφώματος (maximum tillering), που η καλλιέργεια έχει και τη μέγιστη βλαστική ανάπτυξη. Στο στάδιο της επιμήκυνσης των μεσογονατίων έχει ήδη σχηματιστεί η φόβη και η καλλιέργεια είναι κοντά στην άνθιση, όπου η βλαστικότητα όπως αντικατοπτρίζεται και από άλλες παραμέτρους (LAI, frag κλπ) βαίνει μειούμενη, για να έχει τη μικρότερη μέση τιμή της (από τις 3 εξεταζόμενες ημερομηνίες) στις 30 Αυγούστου οπότε και η καλλιέργεια του ρυζιού βρίσκεται στην έναρξη της ωρίμανσης.



Εικόνα 9. Ο δείκτης NDVI για την περιοχή μελέτης όπως υπολογίστηκε στις 6 Ιουλίου (a), στις 21 Ιουλίου (b) και στις 30 Αυγούστου (c).

Παρόλα αυτά, από τις ίδιες εικόνες γίνεται και κάτι ακόμη αντιληπτό. Οι δύο ποικιλίες φαίνεται πως συμπεριφέρονται διαφορετικά μεταξύ τους, ιδιαίτερα στις 21 Ιουλίου και 30 Αυγούστου.

Στις 21 Ιουλίου (Εικόνα 9b) η ποικιλία Gladio φαίνεται να διατηρεί τις μέσες τιμές του δείκτη NDVI ενώ αντίθετα της ποικιλίας Ronaldo εμφανίζει μικρή μείωση. Αντίθετα, στις 30 Αυγούστου και οι 2 ποικιλίες παρουσιάζουν σημαντικά μειωμένες τιμές του δείκτη NDVI αλλά για την ποικιλία Gladio οι τιμές είναι ιδιαίτερα χαμηλές, κάτι που ξεχωρίζει εύκολα και στην εικόνα 4c. Αυτό αποδίδεται στην προχωρημένη ωρίμανση της ποικιλίας Gladio.

Φαίνεται επομένως πως οι 2 ποικιλίες συμπεριφέρονται διαφορετικά ως προς το χρόνο ωρίμανσής τους. Βιβλιογραφικά, η Gladio είναι πρωιμότερη της Ronaldo κατά περίπου 20 ημέρες, με ζωνρότερη ανάπτυξη και μικρότερη παραγωγή. Επιβεβαιώνεται και με τη μελέτη του NDVI πως

ενώ καθυστερεί να εισέλθει φαινολογικά στο στάδιο του ripening (στις 21 Ιουλίου διατηρεί τη ζωνρότητά της, περισσότερο από τη Ronaldo), εντούτοις ωριμάζει στη συνέχεια με πολύ πιο γρήγορο ρυθμό (στις 30 Αυγούστου βρίσκεται ομοιογενώς σε προχωρημένη ωρίμανση). Το γεγονός του διαφορετικού ρυθμού ανάπτυξης αναμένεται να επηρεάσει σοβαρά τις συσχετίσεις της απόδοσης με τους δείκτες βλάστησης, καθώς λίγο ως πολύ, όλοι οι δείκτες βλάστησης επηρεάζονται από τη φυσιολογία και τη φαινολογία των φυτών της καλλιέργειας.

Για να διερευνηθεί η υπόθεση αυτή από τα 2 σετ δεδομένων υπολογίστηκαν αρχικά οι τιμές γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson's για το γενικό πληθυσμό και για την κάθε ποικιλία ξεχωριστά (Πίνακας 6).

| Δείκτες βλάστησης | General (N=18) | | | Ronaldo (N=11) | | | Gladio (N=7) | | |
|-------------------|----------------|-----------------|----------|----------------|-----------------|----------|--------------|-----------------|----------|
| | Booting | Panicle heading | Ripening | Booting | Panicle heading | Ripening | Booting | Panicle heading | Ripening |
| NDVI | .268 | .054 | .510* | .781** | -.064 | .620* | .939** | .835* | -.370 |
| NNIR | .224 | .017 | .333 | .781** | -.098 | .668* | .942** | .874* | -.101 |
| REDVI | .451 | -.230 | .604** | .698* | -.009 | .612* | .921** | .836* | .178 |
| NDRE | .287 | -.242 | .609** | .731** | -.034 | .783** | .946** | .846* | -.215 |
| CIre | .382 | -.227 | .685** | .752** | -.059 | .735* | .946** | .855* | -.190 |
| MCARI1 | .464 | -.229 | .740** | .722* | -.058 | .697** | .975** | .830* | .009 |
| RESAVI | .386 | -.237 | .611** | .754** | -.024 | .784** | .940** | .843* | -.046 |
| RERDVI | .390 | -.236 | .614** | .744** | -.021 | .771** | .941** | .842* | .003 |
| TVI | .188 | .120 | .614** | .783** | -.061 | .771** | .936** | .816* | .003 |
| MTVI2 | -.557* | -.048 | -.433** | -.691* | -.177 | -.453 | -.924** | -.854* | -.519 |

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed), * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Πίνακας 6. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (Pearson's r) μεταξύ των 10 εξεταζόμενων δεικτών βλάστησης και της τελικής συγκομιδής για το γενικό πληθυσμό αλλά και την κάθε ποικιλία ξεχωριστά (με χρωματική απόδοση γαλάζιο & πράσινο παρουσιάζονται οι δείκτες βλάστησης με την μέση καλύτερη συσχέτιση για τις ποικιλίες Ronaldo και Gladio αντίστοιχα).

Γίνεται εύκολα αντιληπτή η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των 2 ποικιλιών. Για τη Ronaldo οι δείκτες βλάστησης στο στάδιο της επιμήκυνσης των μεσογονατίων σε συσχετίζεται καθόλου με την παραγωγή ενώ τόσο στο στάδιο της διαφοροποίησης της φόβης όσο και στο στάδιο της ωρίμανσης συσχετίζεται πολύ ισχυρά. Αντίστροφα για την Gladio, ισχυρή συσχέτιση προκύπτει για τα 2 πρώτα στάδια ενώ αντίθετα στην ωρίμανση φαίνεται πως οι δείκτες βλάστησης δε μπορούν να προβλέψουν καθόλου καλά την παραγωγή.

Η παραπάνω παρατήρηση μπορεί να εξηγηθεί από τη φυσιολογία των φυτών της κάθε ποικιλίας σε συνδυασμό με τη θεωρία πίσω από τους δείκτες βλάστησης. Η ποικιλία Ronaldo είναι όψιμη ποικιλία, μικρής ζωηρότητας, ιδιαίτερα μετά το στάδιο του αδελφώματος των στελεχών, που αναπτύσσεται πολύ σε ύψος, έχει μεγάλα μεσογονάτια διαστήματα στο ανθοφόρο στέλεχος και δίνει πολύ μεγάλη παραγωγή. Το στάδιο της επιμήκυνσης των μεσογονατίων ξεκινάει περίπου την περίοδο λήψης της πολυφασματικής εικόνας (21 Ιουλίου) και διαρκεί πολλές ημέρες μετά. Κατά το διάστημα αυτό, το φυτό είναι στρεσαρισμένο καθώς προηγήθηκε η λίπανση για την βοήθεια του σχηματισμού της φόβης – booting (στις 11 Ιουλίου) με λίπασμα ταχείας απορρόφησης ενώ η επόμενη λίπανση (στο peak του σταδίου αυτού) πραγματοποιήθηκε στις 10 Αυγούστου. Στο κρίσιμο αυτό στάδιο επομένως το ρύζι της ποικιλία Ronaldo έχει μεγάλη ανάγκη από θρεπτικά στοιχεία και κυρίως N καθώς η ανάπτυξη είναι σε εξέλιξη και σε λίγες μέρες ακολουθεί η άνθιση. Η παραγωγή την ημερομηνία αυτή δεν μπορεί να συσχετιστεί με τις τιμές των δεικτών καθώς εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα, το είδος και το timing της λίπανσης που θα ακολουθήσει, ενώ όλοι οι δείκτες βλάστησης είναι λιγότερο ή περισσότερο ευαίσθητοι σε φυσιολογικούς παράγοντες όπως ο ρυθμός απορρόφησης N, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη κ.ά.

Από την άλλη μεριά, η ποικιλία Gladio είναι κατά 20 ημέρες πρωιμότερη και πιο ζωηρή, με κοντά μεσογονάτια διαστήματα και στις 21 Ιουλίου έχει ολοκληρώσει το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης και έχει ήδη σχηματιστεί η φόβη. Η τελική παραγωγή φαίνεται πως συσχετίζεται ισχυρότερα με τους δείκτες βλάστησης καθώς δεν αντιμετωπίζει την καθυστέρηση στην ανάπτυξη της Ronaldo. Στην Gladio όμως, λόγω πρωιμότητας η παλυφασματική εικόνα της 30 Αυγούστου δε μπορεί να συσχετιστεί με την παραγωγή καθώς τα φυτά είναι ήδη σε προχωρημένο στάδιο γεμίσματος των καρπών ενώ έχει προηγηθεί λίπανση λίγες ημέρες πριν (10 Αυγούστου).

Θα πρέπει εδώ να διευκρινιστεί πως η παρούσα εργασία δε πραγματεύεται τη δημιουργία ενός πραγματικού μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής. Θέτει όμως τη βάση για περαιτέρω μελέτη στο μέλλον. Μελετώνται διεξοδικά συντελεστές γραμμικής συσχέτισης όπως προκύπτουν από τα διαθέσιμα δεδομένα. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής για ένα σύγχρονο και γενικευμένο μοντέλο πρόβλεψης της συγκομιδής

με τις παραλλαγές που μπορεί να υιοθετηθούν κατά την εφαρμογή του και με κόκκινο χρώμα η διεργασία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία. (σελ. 9) και στην οποία δε χρησιμοποιήθηκαν στατιστικές μέθοδοι που θα επέτρεπαν τη δημιουργία ενός πραγματικού μοντέλου πρόβλεψης. Κάτι τέτοιο απαιτεί την ύπαρξη σετ δεδομένων που να προσδιορίζει χωρικά, σε επίπεδο αγροτεμαχίου, ζώνης ή σημειακά πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν των παραγωγή όπως ακριβείς ποσότητες λίπανσης (μονάδες N, P και K), ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των ζιζανίων κλπ. Πλέον αυτών ιδανικά θα έπρεπε να υπάρχουν 2 σετ δεδομένων για την επικύρωση (validation) των μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής και τη μέτρηση της ακρίβειάς τους, δεδομένων που δεν ήταν διαθέσιμα κατά την εκπόνησης της μελέτης αυτής. Τα αγροτεμάχια ήταν στον αριθμό τους 18 (είναι λίγα για τη δημιουργία 2 σετ δεδομένων), τα σημειακά δεδομένα που θα μπορούσαν να χωριστούν σε 2 σετ δεν είχαν όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα την επιθυμητή ακρίβεια και για τις ζώνες μελέτης όπως θα δούμε ακολούθως ήταν διαθέσιμα μόνο ποιοτικά δεδομένα (χάρτες γονιμότητας εδάφους) και όχι ποσοτικά (αυτούσιες εδαφικές αναλύσεις, δεδομένα συγκομιδής ανά πολύγωνο κ.λπ.).

4.3 Ανάλυση της παραλλακτικότητας εντός των αγροτεμαχίων

Για την ανάλυση αυτή αξιοποιήθηκαν 2 σετ δεδομένων (πρωτογενών & δευτερογενών):

- Οι 97 σημειακές αποδόσεις σε καρπό (αναγωγή σε kg/στρ.),
- Οι μέσες για το κάθε σημείο (ακτίνας 2 μέτρων, βλ. ενότητα 3.2.2, σελ. 25) τιμές για τους 10 υπό μελέτη δείκτες βλάστησης υπολογισμένοι για κάθε ημερομηνία πτήσης του UAS.

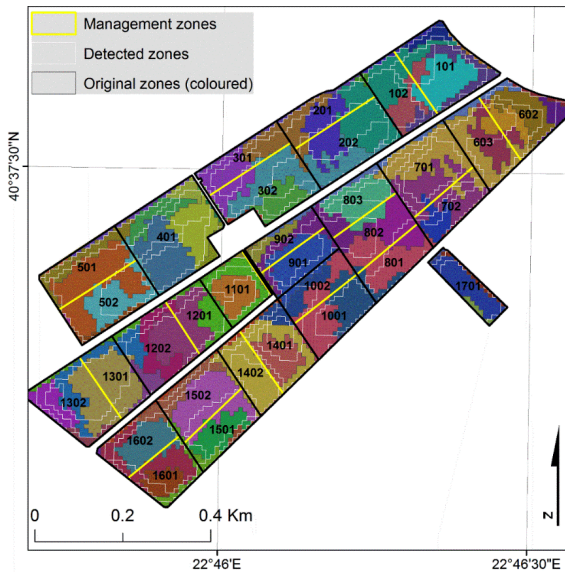
Με βάση τις εικόνες από το UAS και από τις 4 ημερομηνίες, τα αγροτεμάχια χωρίστηκαν σε προκαταρκτικές ζώνες. Για να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκε μη – επιβλεπόμενη ταξινόμηση με το λογισμικό ENVI.

Για την κάθε ημερομηνία η εικόνα προς ταξινόμηση περιελάμβανε 5 μπάντες: τα 4 φάσματα της πολυφασματικής κάμερας (G, R, Red & NIR) και τον δείκτη βλάστησης NDVI της κάθε ημερομηνίας, με στόχο να βρεθούν 15 φασματικές κλάσεις για την κάθε ημερομηνία. Η καθεμία τέτοια κλάση αποτέλεσε και μια προκαταρκτική ζώνη μελέτης. Στη συνέχεια, η κάθε κλάση μετατράπηκε σε πολύγωνο και με τον τρόπο αυτό πραγματοποιήθηκε αντιπαραβολή όλων των προκαταρκτικών ζωνών μελέτης – πολυγώνων (60 συνολικά) στο ίδιο χαρτογραφικό επίπεδο, με υπόβαθρο το NDVI της 30 Αυγούστου, ημερομηνία κατά την οποία ο δείκτης αυτός βλάστησης είχε το μεγαλύτερο εύρος.

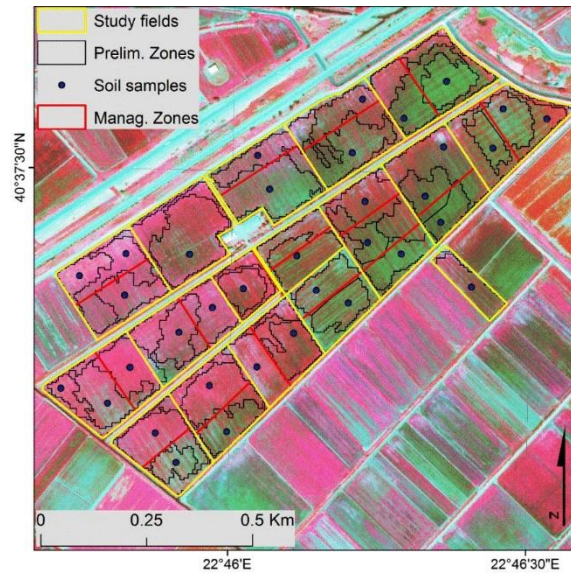
Από τις 60 κλάσεις – προκαταρκτικές ζώνες μελέτης, παρατηρήθηκε πως πολλές από αυτές είχαν παρεμφερή όρια. Μετά από την ενοποίηση των παρεμφερών ζωνών, πραγματοποιήθηκε μια πρώτη αξιολόγηση των κλάσεων που είχαν απομείνει (βλ. Εικόνα 11, άσπρα πολύγωνα) μελετώντας το ιστόγραμμα συχνοτήτων για τον δείκτη NDVI. Γειτνιάζουσες ζώνες με παρόμοιο ιστόγραμμα συχνοτήτων συγχωνεύτηκαν γεωμετρικά (βλ. Εικόνα 11, χρωματιστά πολύγωνα) και έτσι μετά τη γεωμετρική τους συγχώνευση πραγματοποιήθηκε και γεωμετρική απλοποίησή τους προκειμένου να διευκολυνθεί η περαιτέρω επεξεργασία.

Από την απλοποίηση αυτή προέκυψαν τελικά 32 πολύγωνα που αποτέλεσαν και τις ζώνες διαχείρισης στις οποίες ακολούθησε στατιστική ανάλυση (βλ. Εικόνα 10).

Η προκαταρκτική μελέτη για τη διερεύνηση της παραλλακτικότητας στους δείκτες βλάστησης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ευρέως γνωστού και μελετημένου NDVI. Στόχος της διερεύνησης αυτής είναι να αναδειχθεί τυχόν διακύμανση των δεικτών βλάστησης ανάλογα με τις αναγνωρισμένες ζώνες μελέτης. Μια τέτοια στατιστικά σημαντική διακύμανση θα οδηγήσει στη μελέτη του χωρικού παράγοντα (που αποτελούν οι ζώνες μελέτης) ως προς τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει τοπικά τις τιμές των δεικτών βλάστησης.



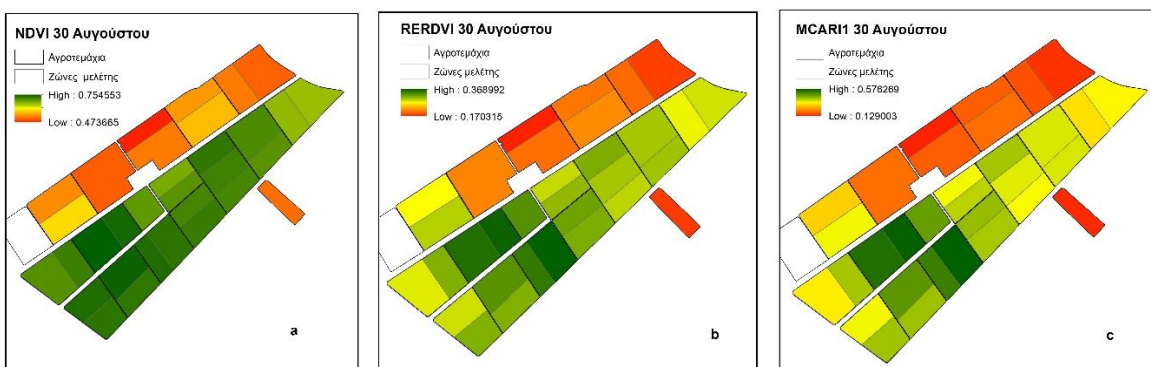
Εικόνα 11. Οι προκαταρκτικές ζώνες μελέτης, όπως προέκυψαν από την μη – επιβλεπόμενη ταξινόμηση.



Εικόνα 10. Οι τελικές ζώνες μελέτης, όπως προέκυψαν από την σχηματική απλοποίησή τους.

Για την κάθε ζώνη μελέτης που αναγνωρίστηκε με τον τρόπο που περιεγράφηκε παραπάνω υπολογίστηκε για την κάθε ημερομηνία λήψης τηλεπισκοπικών εικόνων από το UAS στην οποία η καλλιέργεια ήταν σε εξέλιξη (6 Ιουλίου, 21 Ιουλίου και 30 Αυγούστου) η μέση τιμή των δεικτών βλάστησης NDVI (για γνώση), καθώς και των RERDVI και MCARI1, που είχαν την καλύτερη γραμμική συσχέτιση με την ποικιλία Ronaldo και Gladio αντίστοιχα.

Η διακύμανση του δείκτη NDVI ακολουθεί τη διακύμανση που αναμένεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα και στις επιμέρους ζώνες μελέτης. Ενδεικτικά, παρατίθενται ακολουθώντας σχηματικά οι μέσες τιμές των 3 δεικτών για τις 30 Αυγούστου (βλ. Εικόνα 12).



Εικόνα 12. Απεικόνιση των μέσων τιμών των υπό διερεύνηση ζωνών μελέτης στις 30 Αυγούστου των δεικτών NDVI (a), RERDVI (b) και MCARI1 (c).

Όπως φαίνεται παραπάνω, υπάρχει διαφοροποίηση στις μέσες τιμές των 3 αυτών δεικτών στα αγροτεμάχια που έχουν χωριστεί σε επιμέρους ζώνες. Η διαφοροποίηση αυτή είναι στατιστικά σημαντική σχεδόν για το σύνολο των δεικτών σε κάθε ημερομηνία και επιβεβαιώνει σε πρώτη φάση την ορθή επιλογή των επιμέρους ζωνών μελέτης.

Συγκρίσεις μεταξύ της τελικής παραγωγής για τις επιμέρους ζώνες δε μπορούν να γίνουν, ούτε και να βρεθούν συσχετίσεις μεταξύ παραγωγής και των μελετώμενων δεικτών βλάστησης καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα συγκομιδής για την κάθε ζώνη ξεχωριστά. Παρόλα αυτά, οι σημειακές μετρήσεις παραγωγής εμπίπτουν σε κάποιες από αυτές τις ζώνες και χρησιμοποιήθηκαν για το λόγο αυτό για τη διερεύνηση της παραλλακτικότητας των σημειακών δεδομένων συγκομιδής.

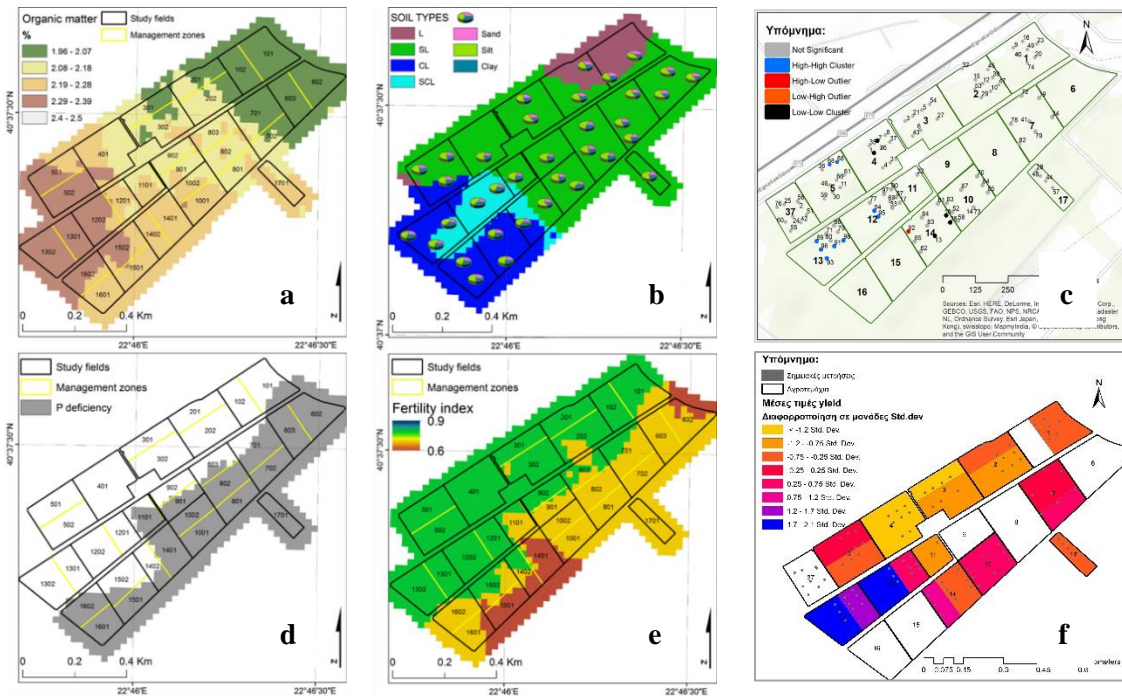
Από το ευρύτερο πείραμα της ΟΙΚΟΑΝΑΠΤΥΞΗΣ είναι διαθέσιμοι χάρτες που αποτυπώνουν εδαφολογικές παραμέτρους και απεικονίζονται ακολούθως (βλ. Εικόνα 13a,b,d,e).

Η οργανική ουσία του εδάφους (βλ. Εικόνα 13Εικόνα 12a) επιδρά συνολικά βοηθητικά στην παραγωγή του ρυζιού που καλλιεργείται υπό κατάκλιση διότι βελτιώνει την κακή δομή του εδάφους, τον αερισμό του και την κυκλοφορία των θρεπτικών συστατικών ενώ μειώνει τη συμπίεσή του (Biswas, Roy and Sahu 1970).

Ως προς την εδαφική σύσταση, παρατηρείται μεγάλη παραλλακτικότητα στα 580 στρ. που μελετώνται για τα δεδομένα της καλλιέργειας του ρυζιού (Εικόνα 13b). Το ρύζι ως καλλιέργεια είναι πιο παραγωγική σε βαριά, αργιλώδη εδάφη, ιδιαίτερα όταν είναι υπό κατάκλιση) με μεγαλύτερη παραγωγή/φυτό και περισσότερες ταξιανθίες/φυτό (Dou, et al. 2016) και έχει βρεθεί μεγάλη συσχέτιση μεταξύ αυξημένης ικανότητας κατακράτησης νερού και υψηλής παραγωγής (Ruth and Lennardz 2008).

Το ρύζι είναι επιρρεπές στην ανεπάρκεια του φωσφόρου καθώς το στοιχείο αυτό επηρεάζει έμμεσα την παραγωγή με σημαντική επίδραση σε κρίσιμα φαινολογικά στάδια όπως του αδελφώματος, την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, τη διαφοροποίηση της φόβης και την ωρίμανση (Xu and Yang 2007). Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει μια μεγάλη ζώνη ανεπάρκειας φωσφόρου (Εικόνα 13d), που επηρεάζει σχεδόν αποκλειστικά την ποικιλία Ronaldo.

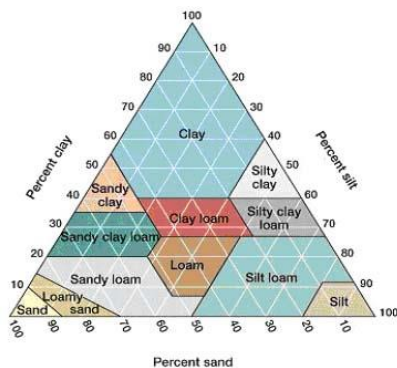
Τέλος, ο δείκτης γονιμότητας (fertility index, βλ. Εικόνα 13e) υποδεικνύει το μέγεθος της γονιμότητας εξειδικευμένα για την καλλιέργεια του ρυζιού και παίρνει τιμές στο διάστημα [0, 1]. Για παράδειγμα, η τιμή 0,7 σημαίνει πως οι 7 από τις 10 παραμέτρους που λαμβάνει υπόψη του (πέρα από όσες αναφέρθηκαν νωρίτερα περιλαμβάνονται και πολλές άλλες όπως το Ph, η ηλεκτρικά αγωγιμότητα, το εδαφικό N κ.ά.) είναι σε επάρκεια και οι 3 από τους 10 έχουν ανεπάρκεια σε κάποιο βαθμό (Khaki, et al. 2017).



Εικόνα 13. Απεικόνιση της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ύλη (a), της εδαφικής σύστασης του εδάφους και κατάταξής του σε κατηγορίες (b), του αποτελέσματος του cluster & outlier analysis (Anselin Local Moran's I) επί της παραγωγής (c), της έλλειψης φωσφόρου στο έδαφος (d), του fertility Index του εδάφους (e) και την παραλλακτικότητα των ζωνών μελέτης επί της παραγωγής των σημειακών μετρήσεων σε μονάδες τοπικής απόκλισης (f).

Με δεδομένο πως οι 2 ποικιλίες έχουν στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση στο ύψος παραγωγής και τη φυσιολογική και φαινολογική εξέλιξη κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, διερευνήθηκε η ύπαρξη outlier στις 97 σημειακές αποδόσεις (βλ. Εικόνα 13c). Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε με τον υπολογισμό του δείκτη Anselin Local Moran's I για την κάθε ποικιλία

ξεχωριστά. Το 1 χωρικό outlier στην σημειακή απόδοση δε δικαιολογείται με βάση τις ιδιότητες του εδάφους, φαίνεται πως αποτελεί μεμονωμένη περίπτωση και θα εξαιρεθεί από περαιτέρω ανάλυση. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν στην ίδια εικόνα τα high – high cluster καθώς τοποθετούνται σε περιοχές με μέγιστο fertility index, επάρκεια φωσφόρου και οργανικής ύλης και CL (clay loam) και SCL (sandy clay loam) έδαφος (βλ. Εικόνα 14), που για το ρύζι είναι το πιο παραγωγικό. Η πρώτη από τις δύο ομάδες low – low cluster που αναγνωρίζονται περιλαμβάνει πολλές σημειακές αποδόσεις και συγκεντρώνεται στο αγροτεμάχιο #14 (βλ.



Εικόνα 14. Το τρίγωνο ταξινόμησης & κατάταξης των εδαφών σε κατηγορίες ανάλογα με τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά τους.

Εικόνα 13c) που παρουσιάζει ανεπάρκεια φωσφόρου και έχει το χαμηλότερο fertility index, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει μόνο δύο σημειακές αποδόσεις και παρόλο που δε φαίνεται να δικαιολογείται από το fertility index τοποθετείται στο αγροτεμάχιο #4 που έχει μεγάλη ετερογένεια ως προς το οργανικό φορτίο.

4.4 Πρόβλεψη της παραγωγής με αξιοποίηση των σημειακών μετρήσεων παραγωγής

Στις προηγούμενες ενότητες βρέθηκε πως όλοι οι δείκτες βλάστησης συσχετίζονται γραμμικά με την παραγωγή, είναι ευαίσθητοι σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό στην ανίχνευση της παραλλακτικότητας που υπάρχει στα αγροτεμάχια και αποδίδεται σε φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους ενώ τουλάχιστον ένας δείκτης βλάστησης για την κάθε ποικιλία μπορεί να προβλέψει το 62-65% της παραγωγής ήδη από το στάδιο της διαφοροποίησης της φύβης. Οι γραμμικές εξισώσεις παλινδρόμησης της προηγούμενης ενότητας όμως έχουν προκύψει από μικρό πλήθος δεδομένων (N=11 για τη Ronaldo και N=7 για τη Gladio). Στην ενότητα αυτή θα διερευνηθεί η δυνατότητα πρόβλεψης της παραγωγής με εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης που προκύπτουν από μεγαλύτερο πλήθος σημειακών δεδομένων (N=44 για τη Ronaldo και N=53 για τη Gladio).

Για την ανάλυση της ενότητας αυτής αξιοποιήθηκε επομένως το σετ δευτερογενών δεδομένων (point geodatabase) που δημιουργήθηκε από:

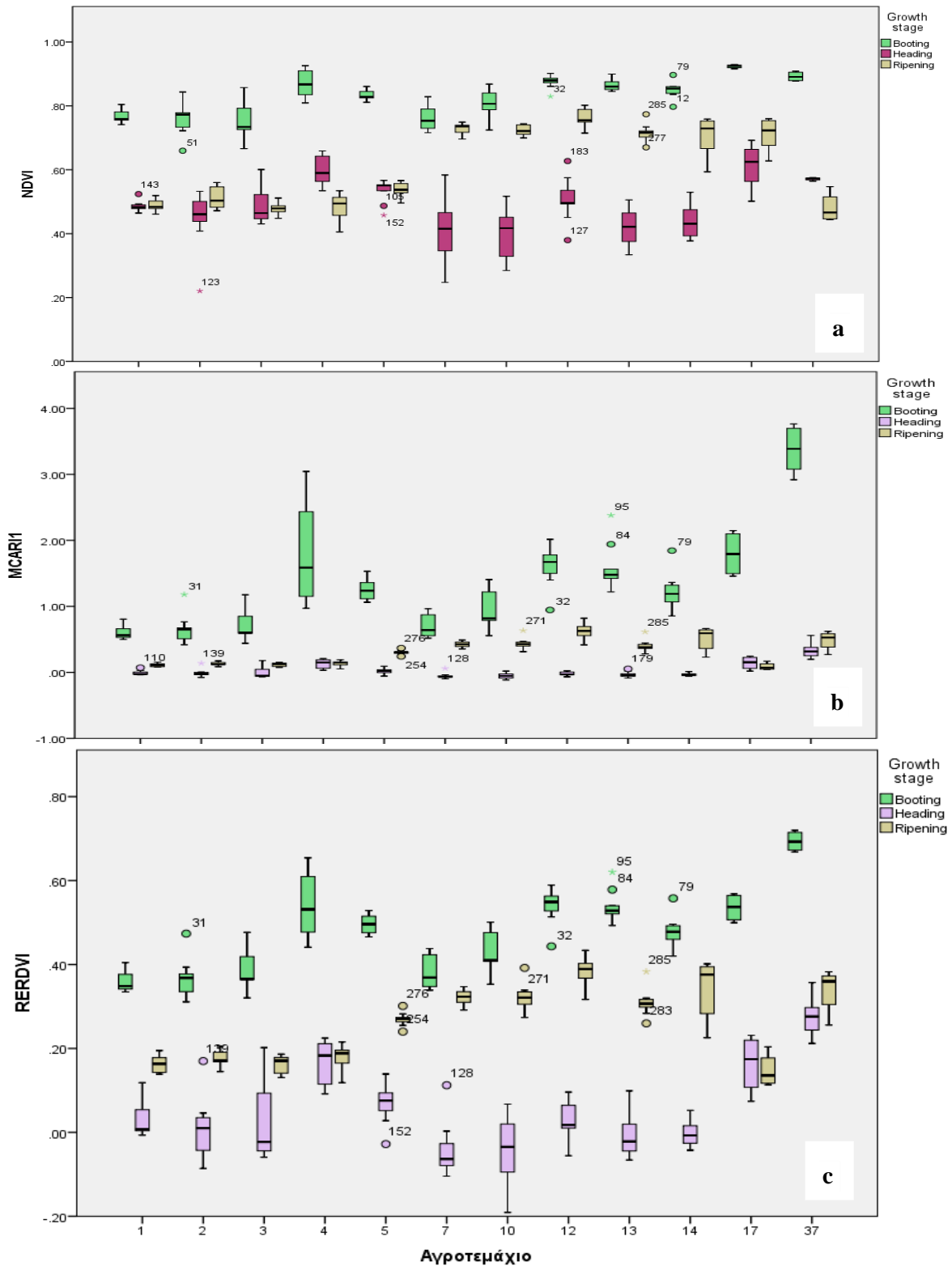
- τις 97 σημειακές αποδόσεις σε καρπό (αναγωγή σε kg/στρ.),
- τις πολυφασματικές εικόνες για τις 3 ημερομηνίες πτήσης του UAS στις οποίες υπήρχε βλαστική ανάπτυξη (6 Ιουλίου, 21 Ιουλίου και 30 Αυγούστου).

Έχει ήδη διαπιστωθεί πως το εύρος των ποσοτήτων συγκομιδής για την κάθε ποικιλία, όπως προκύπτει από τα σημειακά δεδομένα παραγωγής είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό που προκύπτει από τις μέσες παραγωγές για την κάθε ποικιλία. Αυτό φαίνεται και στα περιγραφικά στατιστικά μεγέθη του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7. Περιγραφικά στατιστικά μεγέθη της παραγωγής που προκύπτουν από τις σημειακές μετρήσεις της παραγωγής.

| | N | Range | Minimum | Maximum | Mean | | Std. Deviation | Variance | CV% |
|----------------|----|-------|---------|---------|-----------|------------|----------------|-----------|--------|
| | | | | | Statistic | Std. Error | | | |
| General | 97 | 952 | 510 | 1462 | 940.91 | 21.774 | 214.446 | 45987.168 | 22.791 |
| Cladio | 53 | 683 | 510 | 1193 | 832.28 | 21.835 | 158.959 | 25267.976 | 19.099 |
| Ronaldo | 44 | 762 | 700 | 1462 | 1071.75 | 30.170 | 200.128 | 40051.215 | 18.673 |

Από τα δεδομένα υπολογίστηκαν αρχικά οι τιμές γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson's για το γενικό πληθυσμό και για την κάθε ποικιλία ξεχωριστά (βλ. Πίνακας 8).



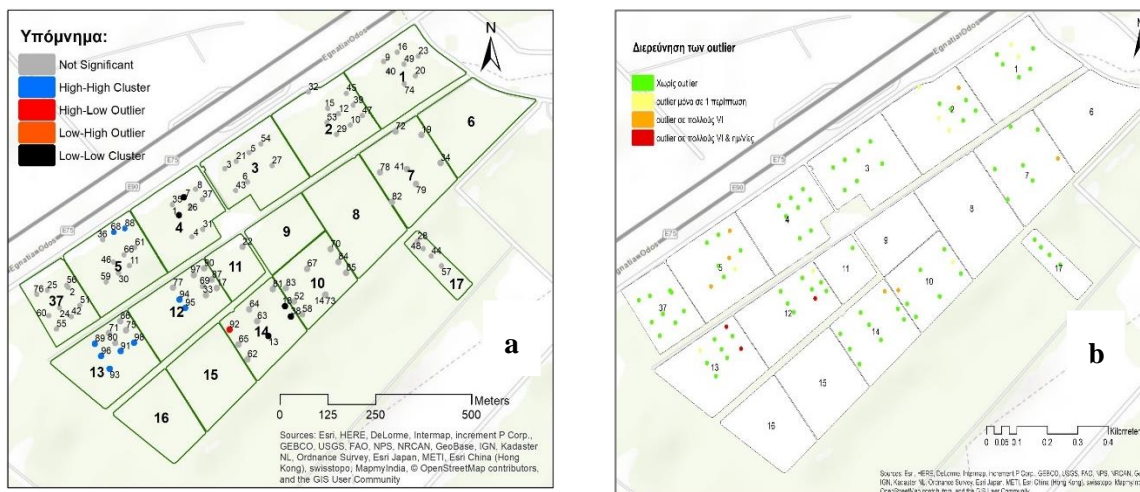
Γράφημα 7. Βοξπλοτ τριών δεικτών βλάστησης στις θέσεις λήψης σημειακών μετρήσεων συγκομιδής ανά αγροτεμάχιο & φαινολογικό στάδιο ανάπτυξης: για τον δείκτη NDVI (a), το δείκτη MCARI1 (b) και το RERDVI (c).

Πίνακας 8. Οι συντελεστές συσχέτισης (Pearson's r & Spearman's rho) μεταξύ του συνόλου και των 97 σημειακών τιμών συγκομιδής και των 10 δεικτών βλάστησης

| Δείκτες Βλάστησης | Booting | | Panicle heading | | Ripening | |
|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | Pearson Correlation | Spearman's rho | Pearson Correlation | Spearman's rho | Pearson Correlation | Spearman's rho |
| NDVI | .254* | .261** | -.217* | -.218* | .543** | .508** |
| NNRI | .255* | .266** | -.264** | -.264** | .549** | .514** |
| REDVI | .213* | .278** | -.200* | -.198 | .433** | .431** |
| NDRE | .199 | .264** | -.224* | -.191 | .542** | .510** |
| Cire | .129 | .260* | -.227* | -.198 | .542** | .512** |
| MCARI1 | .126 | .274** | -.203* | -.218* | .475** | .472** |
| RESAVI | .222* | .280** | -.214* | -.195 | .505** | .478** |
| RERDVI | .217* | .280** | -.212* | -.195 | .493** | .476** |
| TVI | .255* | .260* | -.209* | -.221* | .543** | .508** |
| MTVI2 | -.223* | -.280** | .063 | .027 | -.392** | -.421** |

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed), * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Οι γραμμικές συσχετίσεις είναι πολύ μικρότερες από αυτές που προέκυψαν με τη χρήση των μέσων τιμών των αγροτεμαχίων. Για το λίγο αυτό πραγματοποιήθηκε διερεύνηση για την ύπαρξη τυχόν outlier που επιδρούν αρνητικά στις συσχετίσεις.



Εικόνα 15. Απεικόνιση των σημειακών δεδομένων παραγωγής μαζί με το αποτέλεσμα της cluster & outlier analysis (υπολογισμένο ξεχωριστά για την κάθε ποικιλία) (a) και των φασματικών outlier των δεικτών βλάστησης αναλόγως της συχνότητας εμφάνισής τους (b).

Όπως φαίνεται παραπάνω (βλ. Εικόνα 15a), με τη διεργασία cluster & outlier analysis επί της παραγωγής και ανά ποικιλία, αναγνωρίζεται ένα σημείο χωρικά (No 92) που αποτελεί HI-LOW outlier. Αναγνωρίζονται ακόμη 3 High – High cluster και 1 Low – Low cluster, που μπορούν να ερμηνευτούν με βάσει τους χάρτες με τις ιδιότητες του εδάφους και την παραγωγικότητά τους (βλ. Εικόνα 13, σελ. 43).

Τοποθετώντας στο χάρτη των αγροτεμαχίων όλα τα φασματικά outlier των δεικτών βλάστησης (όπως προέκυψαν από το Γράφημα 7, σελ. 46) φαίνεται πως επί συνόλου 18 σημειακών δεδομένων – φασματικών outlier, τα 8 σημεία αποτελούν φασματικά outlier μονάχα μια φορά σε ένα δείκτη βλάστησης και μία ημερομηνία, 7 σημεία αποτελούν φασματικά outlier σε πολλούς δείκτες βλάστησης ενώ 3 σημεία αποτελούν φασματικά outlier σε πολλούς δείκτες βλάστησης και σε παραπάνω από μία ημερομηνίες.

Απαλείφοντας από το σετ δεδομένων το σύνολο των 19 σημείων όπου παρατηρούνται ανωμαλίες στις τιμές των δεικτών βλάστησης, υπολογίστηκαν εκ νέου οι τιμές γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson's για το γενικό πληθυσμό και για την κάθε ποικιλία ξεχωριστά (βλ. Πίνακας 9).

Πίνακας 9. Ο συντελεστής συσχέτισης (Pearson's r) για τα σημειακά δεδομένα ανά ποικιλία και μετά την αφαίρεση όλων των outlier - 19 στο σύνολο (76 σημειακά δεδομένα συνολικά).

| Δείκτες βλάστησης | Ronaldo (N= 34) | | | Gladio (N= 42) | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------|----------------|-----------------|----------|
| | Booting | Panicle heading | Ripening | Booting | Panicle heading | Ripening |
| NDVI | .266 | .073 | .131 | .341* | .218 | .393* |
| NNIR | .299 | .105 | .161 | .332* | .244 | .422** |
| REDVI | .392* | .066 | -.229 | .337* | .323* | .453** |
| NDRE | .262 | .056 | .159 | .336* | .281 | .399** |
| CIre | .267 | .015 | .185 | .344* | .293 | .402** |
| MCARI1 | .354* | -.040 | -.067 | .353* | .333* | .428** |
| RESAVI | .346* | .060 | -.037 | .331* | .299 | .426** |
| RERDVI | .357* | .061 | -.088 | .336* | .303 | .432** |
| TVI | .264 | .080 | .126 | .340* | .221 | .394** |
| MTVI2 | -.389* | -.048 | .283 | -.340* | -.344* | -.480** |

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Φαίνεται πως αυτού του είδους η προσπάθεια για εξεύρεση κάποιου μοντέλου συσχέτισης μεταξύ της παραγωγής και των δεικτών βλάστησης όπως προκύπτουν από τις διαθέσιμες σημειακές μετρήσεις δεν έχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα ούτε ως προς το μέγεθος των συσχετίσεων αλλά και

τη λογική που αυτές εμφανίζουν κατά τη διερεύνηση σε επίπεδο αγροτεμαχίου (βλ. Πίνακας 6, σελ. 37).

Αιτία για αυτό είναι η συσσώρευση συστηματικών σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης. Όπως αναφέρθηκε (βλ. ενότητα 3.2.2, σελ. 25), κατά την προ επεξεργασία των τηλεπισκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε *rectification* της κάθε μπάντας για την κάθε ημερομηνία και ακολούθως *image co-registration* των πολυφασματικών εικόνων μεταξύ των 4 ημερομηνιών λήψης, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή χωρική ακρίβεια. Οι διεργασίες αυτές έγιναν με χρήση πολυωνυμικών σχέσεων 3^{ου} βαθμού και $RMSE < 1.2$. Φαίνεται όμως από το γεγονός ότι 7 σημεία αποτελούν φασματικά outlier σε πολλούς δείκτες βλάστησης ενώ 3 σημεία αποτελούν φασματικά outlier σε πολλούς δείκτες βλάστησης και σε παραπάνω από μία ημερομηνίες πως και στις δύο διεργασίες η ακρίβεια δεν ήταν η απαιτούμενη και εισήλθαν συστηματικά σφάλματα στον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης, και μάλιστα τοπικού χαρακτήρα. Τα σφάλματα αυτά όταν ήταν μεγάλα (στα σημεία που οι εικόνες δεν «ταίριαζαν» απόλυτα) αναγνωρίστηκαν κατά την outlier analysis αλλά ακόμα και μετά την αφαίρεσή τους ($N=76$), παρέμειναν μικρότερα σφάλματα που αθροιστικά εμποδίζουν την αποτελεσματική συσχέτιση μεταξύ παραγωγής και δεικτών βλάστησης.

Όταν η συσχέτιση αυτή όμως προκύπτει από τις μέσες τιμές παραγωγής και δεικτών βλάστησης των αγροτεμαχίων, φαίνεται πως παρόλο που είναι διαθέσιμο μικρότερο πλήθος παρατηρήσεων ($N=18$), εντός των παρατηρήσεων αυτών αμβλύνονται τα συστηματικά σφάλματα που λόγω της πολυωνυμικής σχέσης 3^{ου} βαθμού έχουν τοπικό χαρακτήρα.

Εν τέλει, φαίνεται πως τα σημειακά δεδομένα επηρεάζονται πολύ και από άλλους παράγοντες που επιδρούν στις τιμές των Δ.Β. όπως η τοπική εδαφική ποιότητα, η ύπαρξη ζιζανίων κλπ. Τα δεδομένα για το έδαφος μπορούν να βελτιώσουν την εκτίμηση της εμφάνισης ζιζανίων αλλά και της παραγωγής. Κάτι τέτοιο όμως είναι πέραν του σκοπού της εργασίας αυτής καθώς θα απαιτούσε τον ποσοτικό προσδιορισμό των ζιζανίων και στη συνέχεια τη χρήση εξελιγμένων τεχνικών γεωστατιστικής όπως ανάλυση με τη μέθοδο *co-Kriging* (Kalivas, et al. 2017).

4.5 Πρόβλεψη της παραγωγής με διαχρονικούς δείκτες βλάστησης

Μετά από την αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ των δεικτών βλάστησης που προκύπτουν από 1 ημερομηνία και της τελικής συγκομιδής στην καλλιέργεια του ρυζιού επιχειρήθηκε μια παρόμοια προσέγγιση με τη χρήση διαχρονικών δεικτών βλάστησης, που προκύπτουν από τη χρήση δεδομένων από μια ή περισσότερες ημερομηνίες. Από τη βιβλιογραφία προκύπτει πως οι διαχρονικοί αυτοί δείκτες βλάστησης είναι σημαντικοί στη μελέτη της ανάπτυξης όπως για παράδειγμα, στα φαινολογικά χαρακτηριστικά.

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

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

Στις περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες, οι περίοδοι κοντά στη μέγιστη βλαστική ανάπτυξη, την άνθιση και την έναρξη της ωρίμανσης φαίνεται να δίνουν ισχυρότερη συσχέτιση μεταξύ των δεικτών βλάστησης και της παραγωγής (Geipel, Link and Claupein 2014). Από την άλλη μεριά, οι δείκτες βλάστησης που υπολογίζονται εκτός αυτής της περιόδου (πολύ νωρίς ή αργά στην καλλιεργητική περίοδο) δε συσχετίζονται ισχυρά με την ποσότητα της συγκομιδής. Λαμβάνοντας υπόψη μας πως η βέλτιστη περίοδος για τη συσχέτιση με την παραγωγής είναι αυτή στην οποία συνήθως οι δείκτες βλάστησης έχουν τις μεγαλύτερες τιμές, ένας δεύτερος διαχρονικός δείκτης βλάστησης που εξετάζεται στην ενότητα αυτή είναι ο δείκτης MAX (VI), που προκύπτει από τη μέγιστη τιμή για τον κάθε δείκτη κατά τη διάρκεια όλης της καλλιεργητικής περιόδου.

Ένας τρίτος διαχρονικός δείκτης βλάστησης που υπολογίστηκε στην εργασία αυτή είναι η πολυμεταβλητή γραμμική παλινδρόμηση. Οι τρεις διαχρονικοί δείκτες βλάστησης συνοψίζοντας που υπολογίστηκαν είναι οι ακόλουθοι:

$$\text{MRL(VI)} = a x_i + b x_j + c$$

$$\text{SUM(VI)} = x_i + x_j$$

$$\text{MAX(VI)} = \text{Max} (x_i, x_j)$$

όπου x_i και x_j αντιπροσωπεύουν τις τιμές των δεικτών βλάστησης σε δύο διαφορετικά στάδια ανάπτυξης. Για το πείραμα της εργασίας αυτής, ο τρόπος υπολογισμού των διαχρονικών δεικτών βλάστησης περιγράφεται στον ακόλουθο πίνακα:

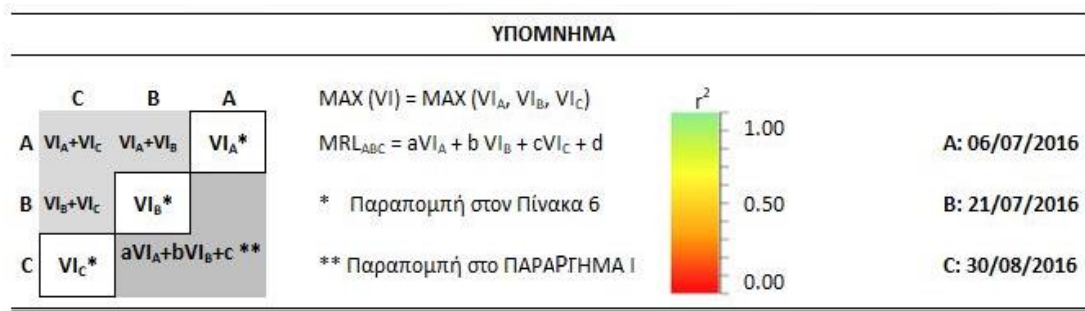
Πίνακας 10. Οι 3 διαχρονικοί δείκτες βλάστησης που αξιολογήθηκαν – MRL(VI), SUM(VI) & MAX (VI) και ο τρόπος υπολογισμού τους.

| Δείκτες βλάστησης (απλοί & διαχρονικοί) | Περιγραφή του τρόπου υπολογισμού |
|---|--|
| VI_A | Δείκτης βλάστησης στις 4 Ιουλίου, στάδιο booting |
| VI_B | Δείκτης βλάστησης στις 21 Ιουλίου, στάδιο panicle heading |
| VI_C | Δείκτης βλάστησης στις 30 Αυγούστου, στάδιο ripening |
| MRL(VI) | Υπολογίζεται κατά περίπτωση από τη γραμμική παλινδρόμηση ενός δείκτη σε 2 ή και 3 ημερομηνίες. |
| SUM (VI_{AB}) | VI _A + VI _B |
| SUM (VI_{AC}) | VI _A + VI _C |
| SUM (VI_{BC}) | VI _B + VI _C |
| MAX (VI) | Max (VI _A , VI _B , VI _C) |

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση των διαχρονικών δεικτών βλάστησης ως προς τη συσχέτιση με το τελικό ύψος παραγωγής συνοψίζονται στην ακόλουθη εικόνα.

| Ronaldo | | | | Gladio | | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|--------|--------|------|------|------|---|--------|------|------|---|------|------|------|
| NDVI | | | RERDVI | | | NDVI | | | MCARI1 | | | | | | |
| | C | B | A | | C | B | A | | C | B | A | | | | |
| A | 0.76 | 0.61 | 0.78 | A | 0.77 | 0.34 | 0.74 | A | 0.01 | 0.01 | 0.94 | A | 0.36 | 0.27 | 0.98 |
| B | 0.67 | 0.06 | 0.61 | B | 0.17 | 0.02 | 0.61 | B | 0.01 | 0.84 | 0.14 | B | 0.10 | 0.83 | 0.54 |
| C | 0.62 | 0.67 | 0.66 | C | 0.77 | 0.50 | 0.80 | C | 0.37 | 0.53 | 0.70 | C | 0.01 | 0.54 | 0.59 |

Max (NDVI) = **0.78** Max (RERDVI) = **0.77** Max (NDVI) = **0.94** Max (MCARI1) = **0.98**
 MRL_{ABC} = **0.75**** MRL_{ABC} = **0.81**** MRL_{ABC} = **0.78**** MRL_{ABC} = **0.61***



Εικόνα 16. Χρωματική απόδοση του μεγέθους του συντελεστή προσδιορισμού r^2 για τους διαχρονικούς δείκτες βλάστησης όπως υπολογίστηκαν βάσει του NDVI, RERDVI & MCARI1 για τις 2 ποικιλίες.

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, και για τις 2 ποικιλίες που μελετήθηκαν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση των δεικτών του παραπάνω πίνακα με την παραγωγή ήδη από την πρώτη ημερομηνία λήψης τηλεπισκοπικών δεδομένων. Φαίνεται πως το χρονικό αυτό διάστημα (αρχές Ιουλίου) οι δείκτες βλάστησης συσχετίζονται ισχυρά με το τελικό ύψος συγκομιδής, κάτι που δεν ισχύει στον ίδιο βαθμό για τις επόμενες ημερομηνίες λήψης δεδομένων.

Για την ποικιλία Ronaldo και τον δείκτη NDVI καλή γραμμική συσχέτιση με το ύψος παραγωγής ($r^2=0.78$) επιτυγχάνεται με αξιοποίηση δεδομένων ήδη από την πρώτη πτήση (στις 06 Ιουλίου) ενώ δεν προκύπτει καλή συσχέτιση για τις άλλες 2 ημ/νίες. Παρατηρείται όμως σημαντική βελτίωση της συσχέτισης με τη χρήση του διαχρονικού δείκτη SUM (VI) σε σχέση την 3^η ημ/νία οποιοσδήποτε συνδυασμός ημερομηνιών και αν επιλεγεί, ενώ η συσχέτιση που επιτυγχάνεται με τον διαχρονικό δείκτη MRL είναι $r^2=0.75$. Επιπρόσθετα, για τον δείκτη RERDVI η καλύτερη γραμμική συσχέτιση με το ύψος παραγωγής ($r^2=0.79$) επιτυγχάνεται με αξιοποίηση δεδομένων από την τελευταία πτήση (στις 30 Αυγούστου) ενώ προκύπτει καλή συσχέτιση και από την πρώτη

ημ/νία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο δείκτης αυτός αξιοποιεί δεδομένα από το φάσμα Red Edge που είναι ευαίσθητος κατά την ωρίμανση των καρπών. Παρατηρείται όμως σημαντική βελτίωση της συσχέτισης με τη χρήση του διαχρονικού δείκτη SUM (VI) σε σχέση με μια μεμονωμένη ημ/νία σε οποιοσδήποτε συνδυασμό περιλαμβάνει δεδομένα της 1^{ης} ή της 3^{ης} πτήσης ενώ και πάλι η μέγιστη συσχέτιση επιτυγχάνεται με τον διαχρονικό δείκτη MRL ($r^2=0.81$).

Για την ποικιλία Gladío και τον δείκτη NDVI καλή γραμμική συσχέτιση με το ύψος παραγωγής ($r^2=0.94$) επιτυγχάνεται με αξιοποίηση δεδομένων ήδη από την πρώτη πτήση (στις 06 Ιουλίου) ενώ δεν προκύπτει καλή συσχέτιση για την τελευταία ημ/νία. Αντίθετα με ότι συμβαίνει στην ποικιλία Ronaldo, εδώ δεν παρατηρείται καμιά βελτίωση της συσχέτισης με τη χρήση του διαχρονικού δείκτη SUM (VI) σε σχέση με μια μεμονωμένη ημ/νία οποιοσδήποτε συνδυασμός ημερομηνιών και αν επιλεγεί. Επιπρόσθετα, για τον δείκτη MCARI1 η καλύτερη γραμμική συσχέτιση με το ύψος παραγωγής ($r^2=0.98$) επιτυγχάνεται με αξιοποίηση δεδομένων από την πρώτη πτήση ενώ δεν προκύπτει καλή συσχέτιση για την τελευταία ημ/νία. Και για αυτόν τον δείκτη αυτό είναι αναμενόμενο καθώς αξιοποιούνται και εδώ δεδομένα από το φάσμα Red Edge που είναι ευαίσθητο κατά την ωρίμανση των καρπών αλλά πρωτίστως διορθώνει και για την ανακλαστικότητα του εδάφους. Στην πρώτη πτήση (6 Ιουλίου) η ποικιλία αυτή λόγω πρωιμότητας και ζοηρότητας φαίνεται πως έχει ήδη αποκτήσει τις ιδιότητες αυτές που συσχετίζονται με την τελική της απόδοση, ιδιότητες που αντικατοπτρίζονται από τις τιμές του δείκτη MCARI1. Παρατηρείται σημαντική μείωση της συσχέτισης με τη χρήση του διαχρονικού δείκτη SUM (VI) σε σχέση με μια μεμονωμένη ημ/νία σε οποιοσδήποτε συνδυασμό περιλαμβάνει δεδομένα της 2^{ης} ή της 3^{ης} πτήσης ενώ καμία γραμμική παλινδρόμηση που περιλαμβάνει συνδυασμό τιμών από διαφορετικές ημερομηνίες δεν παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Όπως φάνηκε ήδη από την προκαταρκτική στατιστική και ποιοτική ανάλυση των δεδομένων, όλοι οι δείκτες βλάστησης επηρεάζονται από τη φυσιολογία και τη φαινολογία των φυτών ρυζιού. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο καθώς οι τιμές ανάκλασης της ακτινοβολίας στα μήκη κύματος που περιλαμβάνονται στους δείκτες και καθορίζουν τις τιμές των Δ.Β. στην ουσία επηρεάζονται από το είδος του φυτικού ιστού (καλλιέργεια ή ζιζάνια), τα δομικά στοιχεία που υπάρχουν στους φυτικούς ιστούς και την αναλογία αυτών (περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, Ν κ.λπ.), το έδαφος και την πυκνότητα της βλάστησης.

Καθώς η Ronaldo είναι ποικιλία τύπου Japonica ενώ η Gladio είναι τύπου Indica, συμπεριφέρονται διαφορετικά ως προς το χρόνο ωρίμανσης. Όπως φάνηκε και από τη σύγκριση των ίδιων Δ.Β. από την κάθε ημερομηνία λήψης για τις 2 ποικιλίες, η Gladio είναι προωμότερη κατά περίπου 20 ημέρες, με ζωηρότερη ανάπτυξη. Αυτό βέβαια είναι γνωστό και από τα τεχνικά δελτία των προμηθευτών σπόρου. Φαίνεται όμως κατόπιν της ανάλυσης των τιμών των Δ.Β. πως στην ουσία η Gladio ενώ στα αρχικά καλλιεργητικά στάδια είναι πιο ζωηρή και με έντονη βλαστική ανάπτυξη που συνεπάγεται πως καθυστερεί να εισέλθει στο στάδιο της ωρίμανσης, εντούτοις ωριμάζει στη συνέχεια με πολύ πιο γρήγορο ρυθμό από τη Ronaldo. Στην ουσία ενώ ημερομηνιακά φαίνεται πως βρίσκονται στο ίδιο βλαστικό στάδιο, ως προς τη φυσιολογία, από τη μέση περίπου της καλλιεργητικής περιόδου η Gladio αποκτά προβάδισμα.

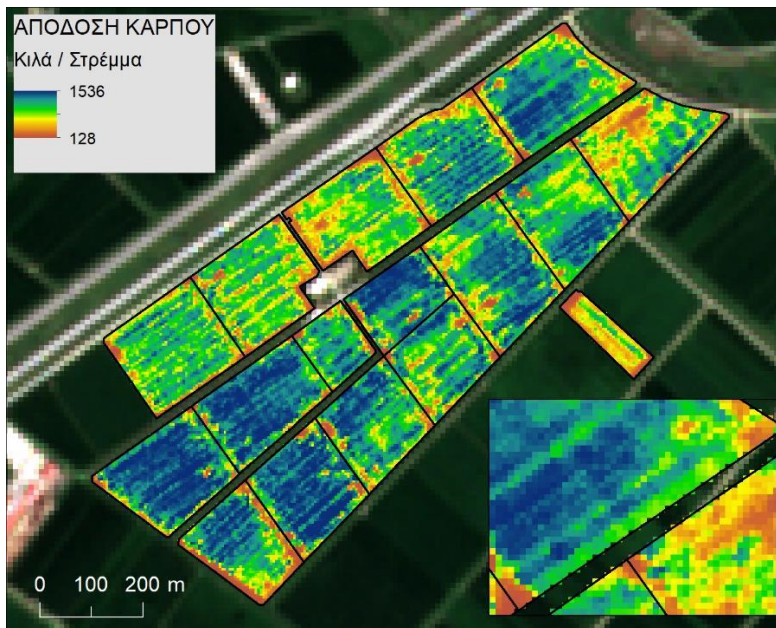
Η βέλτιστη συσχέτιση των τιμών όλων των Δ.Β. που μελετήθηκαν με την τελική παραγωγή επιτυγχάνεται με τη χρήση γραμμικής συσχέτισης, παρόλο που βιβλιογραφικά κάποιοι σύνθετοι Δ.Β. μη κανονικοποιημένοι θα αναμενόταν να συμπεριφέρονται διαφορετικά. Η παραλλακτικότητα εντός των αγροτεμαχίων που αποδίδεται στην εδαφική σύσταση και τη θρέψη των φυτών επηρεάζει με προβλέψιμο τρόπο τις τιμές των πιο ευαίσθητων δεικτών βλάστησης (ενδεικτικά παρατίθενται απεικόνιση της παραλλακτικότητας που υπάρχει στην ποσότητα συγκομιδής εντός των αγροτεμαχίων της μελέτης από πείραμα του 2017 με διαφορετικές ποικιλίες από αυτές της παρούσας μελέτης στην εικόνα 17). Η παραλλακτικότητα αυτή αναδεικνύεται ακόμα και με την ποιοτική εξέταση των χαρτών των αγροτεμαχίων σε αντιδιαστολή με τους εδαφικούς χάρτες και τη χαρτογράφηση της συγκομιδής.

Ο NDVI συσχετίζεται ισχυρά με το μέσο ύψος παραγωγής για το κάθε αγροτεμάχιο ανεξάρτητα ποικιλίας ακόμη και όταν οι τιμές του υπολογίζονται σε πρώιμο στάδιο (εδώ στις 7 Ιουλίου). Από τους υπόλοιπους Δ.Β., σύνθετοι Δ.Β. RERDVI για τη Ronaldo και MCARI1 για τη Gladio έχουν

το μεγαλύτερο βαθμό συσχέτισης με την παραγωγή ακόμη και όταν υπολογίζονται στο στάδιο του booting.

Οι διαχρονικοί Δ.Β. που υπολογίζονται με από συνδυασμούς των τιμών των Δ.Β. από διαφορετικά στάδια γενικά έχουν αυξημένη συσχέτιση με την τελική παραγωγή, αν και πάλι η ποικιλία έχει και εδώ πολύ μεγάλη επίδραση. Ειδικότερα, για την ποικιλία Ronaldo η εξέταση των διαχρονικών δεικτών βλάστησης αυξάνει την ακρίβεια πρόβλεψης της συγκομιδής σε όλα τα στάδια (το r^2 αυξάνεται έως και κατά 0.63) ενώ αντίθετα στην ποικιλία Gladio παρατηρείται βελτίωση μόνο στο στάδιο ωρίμανσης της καλλιέργειας.

Η αξιοποίηση του μεγαλύτερου πλήθους μετρήσεων των σημειακών δεδομένων συγκομιδής δεν συνεισέφερε θετικά στη βελτίωση της συσχέτισης των τιμών των Δ.Β. με την παραγωγή. Αυτό αποδίδεται στη συσσώρευση συστηματικών σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης και την εισαγωγή πολλών φασματικών outlier. Τα συστηματικά αυτά σφάλματα αποδίδονται σε σφάλματα θέσης κατά τη συγκεκριμένη μελέτη. Φαίνεται πως απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη λήψη των δεδομένων πεδίου, ενδεχομένως με τη χρήση RTK GPS.



Εικόνα 17. Ενδεικτική απεικόνιση της παραλλακτικότητας που υπάρχει στην ποσότητα συγκομιδής εντός των αγροτεμαχίων της μελέτης από πείραμα του 2017 με διαφορετικές ποικιλίες και με μέτρηση συγκομιδής ανά 100τ.μ. από ειδικά τροποποιημένη αλωνιστική μηχανή.

Τέλος, ο υπολογισμός των διαχρονικών δεικτών βλάστησης από περισσότερες ημερομηνίες, π.χ. ανά εβδομάδα, είναι εφικτός με τη χρήση UAS και ενδεχομένως θα βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια της πρόβλεψης της παραγωγής και θα υποδείξει με ακρίβεια τα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας που είναι τα πιο σημαντικά για την εκτίμησή της.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης

Οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης για τους διαχρονικούς δείκτες (MRL) του σχήματος 17, για την ποικιλία Ronaldo και τον δείκτη NDVI:

$$YIELD_{AB} = -154.766 + 1281.315 NDVI_A - 9.675 NDVI_B$$

$$YIELD_{AC} = -413.551 + 1035.434 NDVI_A + 636.772 NDVI_C$$

$$YIELD_{BC} = -1374.901 + 752.870 NDVI_A + 2688.982 NDVI_C$$

$$YIELD_{ABC} = -1132.428 + 659.285 NDVI_A + 497.265 NDVI_B + 1755.871 NDVI_C$$

Οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης για τους διαχρονικούς δείκτες (MRL) του σχήματος 17, για την ποικιλία Ronaldo και τον δείκτη RERDVI:

$$YIELD_{AB} = 515.501 + 831.108 RERDVI_A + 73.461 RERDVI_B$$

$$YIELD_{AC} = 276.922 + 559.453 RERDVI_A + 1146.431 RERDVI_C$$

$$YIELD_{BC} = 384.696 + 90.827 RERDVI_B + 1616.244 RERDVI_C$$

$$YIELD_{ABC} = 268.285 + 566.385 RERDVI_A + 126.671 RERDVI_B + 1164.011 RERDVI_C$$

Οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης για τους διαχρονικούς δείκτες (MRL) του σχήματος 17, για την ποικιλία Gladio και τον δείκτη NDVI:

$$YIELD_{AB} = 762.228 - 842.783 NDVI_A + 1339.968 NDVI_B$$

$$YIELD_{AC} = 780.132 + 882.851 NDVI_A - 1430.237 NDVI_C$$

$$YIELD_{BC} = 780.259 + 864.281 NDVI_B - 892.572 NDVI_C$$

$$YIELD_{ABC} = 785.896 + 3007.831 NDVI_A - 2483.192 NDVI_B - 2346.801 NDVI_C$$

Οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης για τους διαχρονικούς δείκτες (MRL) του σχήματος 17, για την ποικιλία Gladio και τον δείκτη MCARI1:

$$YIELD_{AB} = 714.563 + 1.892 MCARI1_A + 917.864 MCARI1_B$$

$$YIELD_{AC} = 723.085 + 107.707 MCARI1_A - 488.462 MCARI1_C$$

$$YIELD_{BC} = 722.130 + 927.985 MCARI1_B - 36.495 MCARI1_C$$

$$YIELD_{ABC} = 732.430 + 383.327 MCARI1_A - 2503.616 MCARI1_B - 1653.287 MCARI1_C$$

Βιβλιογραφία

- Akinbile, Christopher O. «Assessment of the CERES-Rice model for rice production in Ibadan, Nigeria.» *CIGR Journal*, 2013: 19-26.
- Becker, Reshef, E. Vermote, Linderman, και C. Justice. «A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data.» *Remote Sensing of Environment*, 2010: 1312-1323.
- Belward, Alan S., και Jon O. Skoien. «Who lunched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites.» *Remote Sensing V.103*, 2015: 115-128.
- Biswas, T., R. Roy, και B. Sahu. «Effect of different sources of organic manures on the physical properties of the soil growing rice.» *Indian Society of Soil science*, 1970: 233-242.
- Boschetti, Micro, Lorenzo Busetto, Giacinto Manfron, Alice Laborte, και Andrew Nelson. «PhenoRice: A method for automatic extraction of spatio-temporal information on rice crops using satellite data time series.» *Remote Sensing of Environment*, 2017: 347-365.
- Charles, H., J. Godfray, J. R. Beddington, I. R. Crute, και L. Haddad. «Food security: the challenge of feeding 9 billion people.» 2010: 812-818.
- Childs Nathan; Skorbiansky Sharon Raszap. «USDA.» *Rice Outlook*. 14 November 2017. <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/RCS/RCS-11-14-2017.pdf>.
- Cimonelli, C., A. Abbiati, και M. Cormenga. «Physicochemical Characterization.» *Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica*, 2016: 9-23.
- Curry, R. B. «Dynamic simulation of plant growth I.» *Dev. Model*, 1971: 946-959.
- Dou, Fugen, Junel Soriano, Rodante Tabien, και Kun Chen. «Soil Texture and Cultivar Effects on Rice (*Oryza sativa*, L.) Grain Yield, Yield Components and Water Productivity in Three Water Regimes.» *PLOS*, 2016: 113-119.
- E. Raymond Hunt Jr., Paul C. Doraiswamy, James E. McMurtrey, Craig S.T. Daughtry, και Eileen M. Perry. «A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale.» *Remote sensing and the Environment*, 2013: 119-137.

- Erickson, Bruce, και David A. Widmar. *Precision Agriculture Services - Dealership Survey Results*. Survey results, Indiana: Croplife Magazine, 2015.
- EU Joint Research Centre. *Precision Agriculture: An opportunity for E.U. Farmers - Potential support with the CAP 2014-2020*. Study, Brussels: European Parliament, 2014.
- EU Joint Research. «JOINT RESEARCH CENTRE The European Commission's in-house science service.» *Precision Agriculture: An opportunity for EU farmers?* 2015. <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/precision-agriculture-opportunity-eu-farmers> (πρόσβαση March 18, 2016).
- *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2018. <http://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/>.
- Fountas, Spyros, Giacomo Carli, Claus Sorensen, και Bruno Tisseyre. «Farm Management Information Systems: Current situation and future perspectives.» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015: 40-50.
- Fritz, Lawrence W. «Commercial Earth Observation Satellites.» *Remote Sensing and the Environment*, 2012: 976-983.
- Geipel, Jacob, Johanna Link, και Wilhelm Claupein. «Combined Spectral and Spatial Modeling of Corn Yield Based on Aerial Images and Crop Surface Models Acquired with an Unmanned Aircraft System.» *Remote Sensing and the Environment*, 2014: 10335-10355.
- Gemtos, Theofanis, Spyros Fountas, A. Tagarakis, και V. Liakos. «Precision Agriculture Application in Fruit Crops: Experience in Handpicked Fruits.» *Procedia Technology*, 2013: 324-333.
- Giterson, A., και M. Merzlyak. «Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation.» *Journal of plant physiology*, 1994: 286-292.
- Gon, H. Denier Van Der. «Changes in CH₄ emission from rice fields from 1960s to 1990s: 1. Impacts of modern rice technology.» *Global Biogeochem*, 2000: 61-72.

- Kalivas, Dionissios, Christos Vlachos, Garifalia Economou, και Paraskevi Dimou. «Regional Mapping of Perennial Weeds in Cotton with the Use of Geostatistics.» *Weed Science*, 2017: 233-243.
- Khaki, Bahareh, Naser Honarjoo, Naser Davatgar, και Ahmad Jalalian. «Assessment of Two Soil Fertility Indexes to Evaluate Paddy Fields for Rice Cultivation.» *Sustainability*, 2017: 1299-1306.
- Lin, Z. H., X. G. Mo, και Y. Q. Xiang. «Research advances on crop growth models.» *Acta Agron*, 2003: 750-758.
- Luo, S. M., H. Zhen, C. H. Chen, και W. Yang. «Study on application of computer simulation in rice high yield cultivation.» *Guangdong Agriculture*, 1990: 14-17.
- Markets and Markets. «Precision Farming Market by Technology (Guidance Systems, Variable Rate Application, Remote Sensing), Hardware Devices and Software & Services, Application, and Geography - Global Forecast to 2020.» *Markets and Markets*. January 2016. <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/precision-farming-market-1243.html> (πρόσβαση March 16, 2016).
- Matese, Alessandro, και συν. «Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture.» *Remote Sensing*, 2015: 2971-2990.
- Matthews, R., και R. Wassmann. «Modelling the impacts of climate change and methane emission reductions on rice production: a review.» *Eur. J. Agron*, 2003: 573-598.
- Miao, Yuxin, Qiang Cao, Hongye Wang, και Shanyu Huang. «Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor.» *Field Crops Research*, 2013: 133-144.
- Penning, De Vries, F. W. Jansen, Ten Berge, και A. Bakema. «Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops.» *Simulation Monographs*, 1989.
- PradhanEmail, S., K. Bandyopadhyay, R. Sahoo, και V. Sehgal. «Predicting Wheat Grain and Biomass Yield Using Canopy Reflectance of Booting Stage.» *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014: 711-718.
- *Precision Hawk*. n.d. www.precisionhawk.com (πρόσβαση May 11, 2016).

- Qiang Cao, Yuxin Miao, Jianning Shen, Weifeng Yu, Fei Yuan, Shanshan Cheng, Shanyu Huang, Hongye Wang, Wen Yang, Fengyan Liu. «Improving in-season estimation of rice yield potential.» *Precision Agric*, 2015: 2110-2121.
- Reynolds, C. A., M. Yitayew, D. C. Slack, και C. F. Hutchinson. «Estimating crop yields and production by integrating the FAO crop specific water balance model with real-time satellite data and ground-based ancillary data.» *International Journal of Remote Sensin*, 2000: 3487-3508.
- *Ricepedia*. n.d. <http://ricepedia.org/rice-as-food/the-global-staple-rice-consumers> (πρόσβαση February 08, 2018).
- Rougean, J., και F. Breon. «Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements.» *Remote Sensing and Environment*, 1995: 375-384.
- Ruth, B., και B. Lennardz. «Spatial Variability of Soil Properties and Rice Yield Along Two Catenas in Southeast China.» *Pedosphere*, 2008: 409-420.
- *Sensefly*. n.d. www.sensefly.com (πρόσβαση May 09, 2016).
- Shanyu Huang, Yuxin Miao 1, Guangming Zhao, Fei Yuan, Xiaobo Ma, Chuanxiang Tan, Weifeng Yu, Martin L. Gnyp, Victoria I.S. Lenz-Wiedemann, Uwe Rascher, Georg Bareth. «Satellite Remote Sensing-Based In-Season Diagnosis of Rice.» *Remote Sensing*, 2015: 10646-10667.
- Sheshthan, R.P., και S. Naikaset. «Agro-spectral models for estimating dry season rice yield in the Bangkok Plain of Thailand.» *Asian Journal of Geoinformatics*, 2003: 11-19.
- Sripada, R.P., Heiniger, R.W., White, J.G., and A.D. Meijer. «Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn.» *Agronomy Journal*, 2006: 968-977.
- Stewart, D.W., και L.M. Dwyer. «A model of spring wheat (*Triticum aestivum*) for large area yield estimations on the Canadian Prairies.» *Plant Science*, 1990: 19-32.
- Tahar, Khairul Nizam, και Anuar Ahmad. «An Evaluation on Fixed Wing and Multi-Rotor UAV Images using Photogrammetric Image Processing.» *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, February 2013: 223-228.

- Torres, Sanches, M. Pena, A. Castro, και Lopez Granados. «Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV.» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013: 104-113.
- University of Nebraska–Lincoln. «Precision Agriculture Usage and Big Agriculture Data.» *Institute of Agriculture and Natural Resources*. 27 May 2015. <http://agecon.unl.edu/cornhusker-economics-may-27-2015> (πρόσβαση March 22, 2016).
- Wang, Laiagang, Tian, Yao, και Yan Zhu. «Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images.» *Field Crops Research*, 2014: 178-188.
- Xiao, Yanfang, Wenji Zhao, Demin Zhou, και Huili Gong. «Sensitivity Analysis of Vegetation Reflectance to Biochemical and Biophysical Variables at Leaf, Canopy, and Regional Scales.» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014: 4014-4024.
- Xu, H. X., και Y. Yang. «Effect of phosphorus deficiency on the photosynthetic characteristics of rice plants.» *Russian Journal of Plant Physiology*, 2007: 741-748.
- Xu, X., X. Song, C. Li, και W. Huang. «Assessing rice chlorophyll content with vegetation indices from hyperspectral data.» *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, 2010: 296-303.
- Xue, Li Hong, Way Xing, και Lin Zhang. «Predicting Grain Yield and Protein Content in Winter Wheat at Different N Supply Levels Using Canopy Reflectance Spectra.» *Pedosphere*, 2007: 646-653.
- Αρναουτέλη, Ευαγγελία Ιωάννη. *Ανάλυση του κλάδου της ορυζοβιομηχανίας και στρατηγική διαφοροποίησης μέσω της διοίκησης ολικής ποιότητας*. Πειραιάς: Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2010.
- *Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης & Φυτογενετικών Πόρων*. n.d. <http://www.ipgrb.gr/> (πρόσβαση Ιανουάριος 2018).
- Καρτέρης, Μ. «Τηλεπισκόπηση περιβάλλοντος.» 214-217. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2004.

- Μιχαηλίδης, Αναστάσιος, Βαγής Σαμαθρακής, Φώτιος Χατζηθεωδορίδης, και Ευστράτιος Λοίζου. «Διάχυση-Υιοθέτηση της Γεωργίας Ακριβείας: Συγκριτική Ανάλυση μεταξύ των Περιφερειών της Ελλάδας.» 2005.

..... Αθηνά & αριαδνάκι