



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΑΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΟ SENTINEL-2 ”**

**« The use of Sentinel-2 derived vegetation indices for durum wheat 2 yield
prediction »**

Κων/νος Ανατολίτης

Επιβλέπων Καθηγητής: **Κυπαρίσης Άρης**

Φεβρουάριος 2020

Βόλος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΑΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΟ SENTINEL-2»
« The use of Sentinel-2 derived vegetation indices for durum wheat 2 yield
prediction »**

Ανατολίτης Κων/νος

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Κυπαρίσης Άρης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δρ. Καβαλάρης Χρήστος

Ε.Δι.Π., Διδάκτωρ Γεωργικής Μηχανολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δαναλάτος Νικόλαος

Καθηγητής Γεωργίας και Οικολογίας Φυτών Μεγάλης Καλλιέργειας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Φεβρουάριος 2020
Βόλος

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με τη διεκπεραίωση της παρούσας μελέτης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου Κυπαρίση Άρη, αναπληρωτή καθηγητή του Εργαστηρίου Οικοφυσιολογίας των Φυτών καθώς και τον Καθηγητή του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Καβαλάρη Χρήστο που μου έδωσαν την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και να συνδυάσω δύο εξαιρετικά ενδιαφέροντες κλάδους της επιστήμης της Γεωπονίας. Ακόμη θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την υπομονή τους απέναντί μου και κυρίως για τη βοήθεια που μου προσέφεραν με τις πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις τους.

Ευχαριστώ επίσης τον Δαναάτο Νικόλαο, Καθηγητή Γεωργίας και Οικολογίας Φυτών Μεγάλης Καλλιέργειας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή καθώς και για τις συμβουλές του.

Τέλος θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου, την αδελφή μου και την οικογένειά μου για την κατανόηση και την ψυχολογική στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας. Ακόμη οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου Χούπη Δέσποινα, Χριστίνα Αδαμάκη-Σωτηράκη, Ειρηνέο-Αλέξανδρο Δημάκη, Αβραάμ Καρατοσίδη, Κωνσταντίνο Μπενεχούτσο και Δημήτρη Μαυροδήμο που συνέχισαν να είναι δίπλα μου, να με στηρίζουν και να με βοηθάνε με οποιοδήποτε τρόπο μπορούσαν καθώς επίσης και για την κατανόηση που έδειξαν ακόμη και όταν ο χρόνος που κατάφερα να τους αφιερώσω ήταν περιορισμένος.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Σιτάρι.....	8
1.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	8
1.1.2 Καλλιέργεια σιταριού.....	8
1.1.3 Προϊόντα του σιταριού.....	10
1.1.4 Κλιματικές απαιτήσεις.....	11
1.1.5 Βοτανικά και μορφολογικά στοιχεία.....	11
1.1.6 Λίπανση.....	14
1.1.7 Καλλιεργούμενα είδη σιταριού σήμερα.....	15
1.2 Γεωργία Ακριβείας.....	16
1.3 Πρόβλεψη παραγωγής.....	17
1.3.1 Για το <i>Triticum turgidum</i> ssp. <i>durum</i>	17
1.3.2 Η πρόβλεψη της απόδοσης μέχρι σήμερα.....	17
1.4 Τηλεπισκόπηση.....	17
1.4.1 Δείκτες Βλάστησης.....	19
1.4.2 Χρήση Δ.Β. για μέτρηση της παραγωγής.....	21
2. Υλικά και Μέθοδοι.....	25
2.1 Περιοχές μελέτης.....	25
2.2 Μέτρηση της παραγωγής.....	26
2.3 Δορυφορικά δεδομένα.....	28
2.3.1 Εξαγωγή δορυφορικών δεδομένων, κατασκευή δεικτών βλάστησης και χρονοσειρών	30
3. Αποτελέσματα.....	32
3.1 Χρονοσειρές και εποχιακά πρότυπα δεικτών βλάστησης.....	32
3.2 Αξιολόγηση των δεικτών βλάστησης.....	32

4. Συζήτηση	40
5. Συμπεράσματα	44
6. Βιβλιογραφία.....	45

Περίληψη

Η πρόβλεψη των αποδόσεων στην παραγωγή του σκληρού σιταριού (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον για ολόκληρο το φάσμα των εμπλεκόμενων φορέων, τόσο από οικονομικής όσο και από διαχειριστικής άποψης. Για τον σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης της απόδοσης, οι οποίες βασίζονται σε φυσιολογικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και σε κλιματικά δεδομένα. Πρόσφατα, με την τεχνολογική πρόοδο στον τομέα της τηλεπισκόπησης, οι δορυφορικές εικόνες μπορούν να αποτελέσουν επιπρόσθετη πηγή δεδομένων στα μοντέλα απόδοσης. Η τελευταία γενιά δορυφόρων της αποστολής Sentinel-2 της ESA έφερε μια νέα εποχή για την τηλεπισκόπηση στη γεωργία, παρέχοντας συχνή (κάθε 5 ημέρες) και υψηλής χωρικής ανάλυσης (μέγεθος εικονοστοιχείου 10 m) πληροφορία με ελεύθερη πρόσβαση. Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η αξιολόγηση τριών ευρέως χρησιμοποιούμενων δεικτών βλάστησης (NDVI, NDRE, EVI), από δεδομένα Sentinel-2 για την εκτίμηση απόδοσης σκληρού σιταριού. Τα δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή χρονοσειρών δεικτών βλάστησης (Δ.Β.) κατά την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018 σε 9 αγροτεμάχια σιταριού στην περιοχή της Θεσσαλίας. Οι συσχετίσεις των Δ.Β. για μεμονωμένες ημερομηνίες καθώς και τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών των Δ.Β. για διάφορα χρονικά διαστήματα της καλλιεργητικής περιόδου εξετάστηκαν σε σχέση με την απόδοση, η οποία μετρήθηκε με θεριζοαλωνιστική μηχανή, εξοπλισμένη με αισθητήρες μετρήσεως της παραγωγής. Για όλους τους Δ.Β., οι συντελεστές συσχέτισης αυξάνονται σταδιακά από χαμηλές τιμές για τα ολοκληρώματα ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου προς υψηλότερες τιμές για τα ολοκληρώματα μετά την περίοδο ανθοφορίας. Υψηλές συσχετίσεις, με r πάνω από 0,78 εμφανίζονται επίσης και για ημερήσιους Δ.Β. της ίδιας περιόδου. Σε όλες τις περιπτώσεις οι NDVI και NDRE παρουσιάζουν παρόμοιες επιδόσεις με μια μικρή υπεροχή του NDRE, ενώ οι μέγιστες συσχετίσεις εμφανίζονται για τον EVI. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι οι Δ.Β. που προέρχονται από τα δεδομένα του Sentinel-2, τα οποία αντιστοιχούν στην περίοδο μετά την ανθοφορία φαίνονται ιδιαίτερα κατάλληλοι για εκτίμηση απόδοσης σκληρού σιταριού με υψηλή ακρίβεια και η χρησιμότητά τους μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με ενσωμάτωση αυτών σε μοντέλα καλλιέργειας που περιλαμβάνουν την εποχιακή και την χωρική παραλλακτικότητα.

1 Εισαγωγή

1.1 Σιτάρι

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

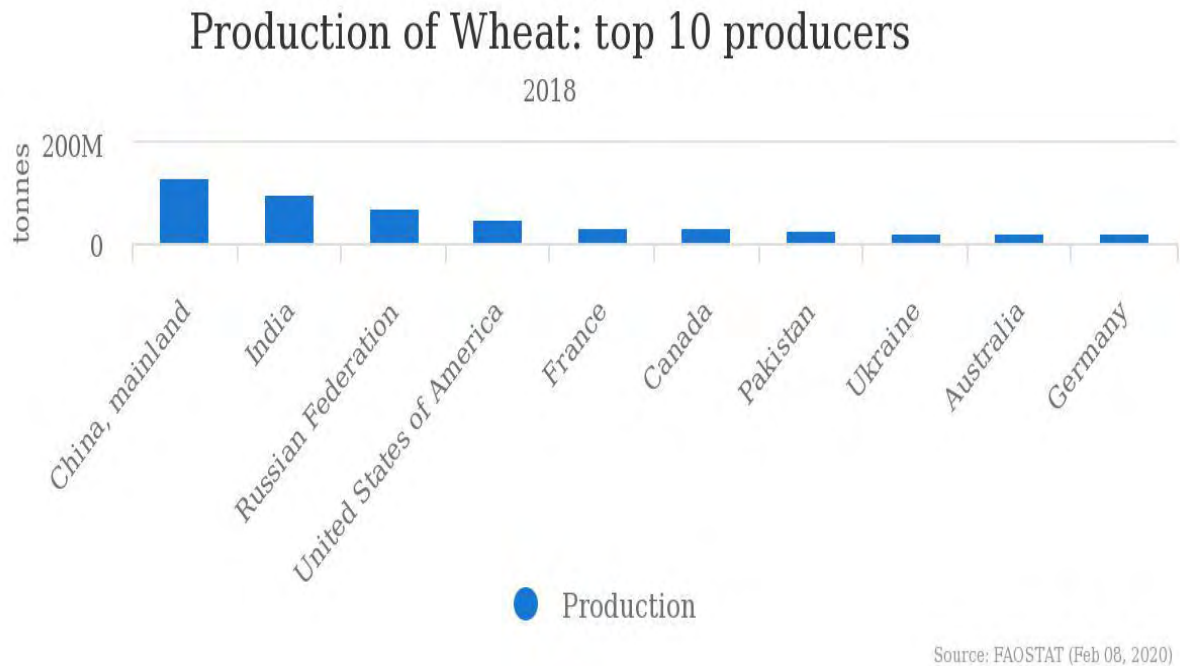
Το σιτάρι είναι στενά συνδεδεμένο με την ιστορία του ανθρώπινου είδους, καθώς είναι ένα από τα πρώτα φυτικά ήδη τα οποία εξημερώθηκαν από τον πρωτόγονο άνθρωπο ως αποτέλεσμα της αναζήτησης του για τροφή όπως αναφέρουν οι Leino et al.. (2010). Συντέλεσε ακόμη ως ένας από τους ακρογωνιαίους λίθους στην επιβίωση και την εξέλιξη των πρώτων ιστορικά πολιτισμών, που ήκμασαν στην περιοχή της μέσης ανατολής και της ανατολικής Μεσογείου πριν από τουλάχιστον 120 αιώνες. Πολυάριθμες αναφορές, απεικονίσεις και συμβολισμοί έχουν αποδοθεί στο σιτάρι στο διάστημα που μεσολάβησε από εκείνη την εποχή μέχρι σήμερα σύμφωνα με τους Vergauwen et al.. (2017), αναδεικνύοντας έτσι την τεράστια αξία της καλλιέργειας για την ανθρωπότητα, η οποία έχει διατηρηθεί και τείνει να αυξηθεί ακόμη περισσότερο στο μέλλον.

Παρ' όλα αυτά, ένας μεγάλος αριθμός ποικίλων παραγόντων χρειάστηκε να μεσολαβήσει έτσι ώστε οι "άγριοι" πρόγονοι του *Triticum* sp. να μετατραπούν στις σύγχρονες ημι-νάνες ποικιλίες του 21ου αιώνα (Royo et al.2017). Η πάροδος των χρόνων, οι κλιματικές και μορφολογικές αλλαγές της επιφάνειας της γης καθώς και διάφοροι μηχανισμοί επιβίωσης που αναπτύχθηκαν από τα φυτά, όπως ο έλεγχος του λήθαργου και της βλάστησης, συντέλεσαν στην εμφάνιση και την εξάπλωση των πρώτων «άγριων» σιταριών γύρω στο 9.500 π.Χ. στην περιοχή της Μεσογείου. Η εφαρμογή διάφορων καλλιεργητικών τεχνικών και της τεχνητής επιλογής από τον άνθρωπο στους πληθυσμούς των πρωτόγονων αυτών ποικιλιών επέφερε την γέννηση των τοπικών ποικιλιών, οι οποίες καλλιεργήθηκαν για αρκετούς αιώνες μέχρι που κάποια στιγμή κατά τα μέσα του προηγούμενου αιώνα, η επιστήμη της γενετικής βελτίωσης των φυτών σύστησε στην ανθρωπότητα τα νάνα φυτά σιταριού που καλλιεργούνται ως και σήμερα.

1.1.2 Καλλιέργεια σιταριού

Το σιτάρι ταξινομείται στην οικογένεια των αγρωστωδών (*Graminae*), ανήκει στη φυλή *Triticeae* και είναι φυτό του γένους *Triticum* sp.. Η καλλιέργειά του απλώνεται σε περίπου 2 δισεκατομμύρια στρέμματα σε ολόκληρο τον πλανήτη και η παγκόσμια παραγωγή υπολογίζεται πως είναι περίπου 750 εκατομμύρια τόνοι σύμφωνα με το πιο πρόσφατα στοιχεία του οργανισμού τροφίμων και γεωργίας των Η.Π.Α (FAOSTAT). Είναι άξιο αναφοράς το

γεγονός ότι από το 1946 έως το 1992 η παγκόσμια παραγωγή αυξανόταν σταδιακά με έναν ετήσιο ρυθμό της τάξης των 9,5 εκατομμυρίων τόνων. Η αύξηση αυτή αποδίδεται κυρίως στην αύξηση της στρεμματικής απόδοσης. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη κατά σειρά παραγωγή για το έτος 2018, σύμφωνα με τα δεδομένα του [FAOSTAT](#), απεικονίζονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1 Παγκόσμια παραγωγή σιταριού για το έτος 2018. Παρουσιάζονται κατά φθίνουσα σειρά οι 10 χώρες με τις μεγαλύτερες παραγωγές σε σιτάρι για το συγκεκριμένο έτος. Στον κατακόρυφο άξονα εμφανίζεται η παραγωγή μετρούμενη σε τόνους ενώ στον οριζόντιο άξονα αναγράφονται οι διάφορες χώρες. [FAOSTAT](#)

Στην Ελλάδα, η έκταση η οποία καταλαμβάνει η καλλιέργεια διατηρείται στα ίδια επίπεδα από το 1940 μέχρι και σήμερα (με μικρές διακυμάνσεις) και ανέρχεται στα 8-10 εκ. στρέμματα ετησίως. Αντιθέτως, οι μέσες αποδόσεις έδειξαν σημαντική αύξηση, από τα 100 kg/στρ. το 1940 στα 230 kg/στρ. το 2006 (FAOSTAT). Η αύξηση αυτή οφείλεται στη χρήση βελτιωμένων ποικιλιών και λιπασμάτων, στη βελτίωση των καλλιεργητικών τεχνικών και την εκμηχάνιση της γεωργίας. Η χώρα μας, από το 1956 είναι σε θέση να καλύψει τις εγχώριες ανάγκες της σε σιτάρι και έκτοτε έχει περιθώρια εξαγωγής.

1.1.3 Προϊόντα του σιταριού

Ο καρπός του σιταριού χρησιμοποιείται για την παραγωγή τροφίμων όπως το ψωμί, τα μακαρόνια, τα μπισκότα και το κουσκούς, τα οποία βρίσκονται στη βάση της πυραμίδας της Μεσογειακής διατροφής (Εικόνα 2). Σύμφωνα με τους Hidalgo-Moraa et al.. (2020), η θέση που καταλαμβάνει μία συγκεκριμένη τροφή στα διάφορα επίπεδα της πυραμίδας υποδηλώνει την συχνότητα με την οποία αυτή πρέπει να λαμβάνεται από τον ανθρώπινο οργανισμό, ξεκινώντας από καθημερινή κατανάλωση στα κατώτερα επίπεδα που μετατρέπεται σε εβδομαδιαία στην κορυφή. Η Μεσογειακή διατροφή έχει αποκτήσει ιδιαίτερη αξία και έχει γίνει πλέον το πρότυπο της υγιεινής διατροφής (Widmer et al. 2015), γεγονός που έμμεσα καθιστά το σιτάρι απαραίτητο για τον άνθρωπο.

Mediterranean diet pyramid: a lifestyle for today
guidelines for adult population

Serving size based on frugality
and local habits



Wine in moderation
and respecting social beliefs



Εικόνα 1. Η πυραμίδα της μεσογειακής διατροφής (ΠΜΔ). Στην παρούσα εικόνα απεικονίζεται η πυραμίδα της μεσογειακής διατροφής, έτσι όπως αυτή έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες έρευνες (Bach-Faig et al. 2011) . Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται τα διάφορα επίπεδα της ΠΜΔ, οι τροφές που περιλαμβάνει κάθε επίπεδο καθώς και η συχνότητα με την οποία οι παραπάνω τροφές πρέπει να λαμβάνονται από τον άνθρωπο.

1.1.4 Κλιματικές απαιτήσεις

Με δεδομένο ότι το σιτάρι ευδοκμεί σε κλίματα εύκρατα και εύκρατα μεσογειακά, οι μεγαλύτερες σε έκταση καλλιέργειες και οι υψηλότερες παραγωγές συναντώνται σε περιοχές και χώρες με τις ανάλογες κλιματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα σε περιοχές μεταξύ του 30ου και του 60ου παράλληλου του βορείου ημισφαιρίου αλλά και ενδιάμεσως του 25ου και του 40ου παράλληλου στο νότιο ημισφαίριο. Υψομετρικά οι καλλιέργειες σιταριού εξαπλώνονται από παραθαλάσσιες περιοχές έως και τα 3000 μ. Βέβαια, σε περιοχές με τροπικό κλίμα απαιτείται υψόμετρο από 2000 μ. έως 3000 μ. Οι ακριβείς ημερομηνίες σποράς και συγκομιδής καθορίζονται κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής καθώς και τον τύπο και την ποικιλία του σιταριού. Για παράδειγμα, το *Triticum* sp., το οποίο καλλιεργείται συνήθως από την πλειοψηφία των καλλιεργητών ως χειμερινό σιτηρό, σπέρνεται από τα μέσα μέχρι τα τέλη του φθινοπώρου και συγκομίζεται στα τέλη της άνοιξης με αρχές καλοκαιριού. Αντίθετα, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από δριμείς χειμώνες με ισχνές και αραιές βροχοπτώσεις το σιτάρι αντιμετωπίζεται ως ανοιξιότικη καλλιέργεια. Στην εύκρατη ζώνη η συγκομιδή του σιταριού γίνεται από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο ενώ στο νότιο ημισφαίριο από τον Οκτώβρη ως τον Ιανουάριο. Η διαφοροποίηση αυτή στην εποχή της συγκομιδής έχει ως αποτέλεσμα κάθε μήνα του έτους να συγκομίζεται και μία καλλιέργεια σιταριού σε κάποιο μέρος του πλανήτη.

1.1.5 Βοτανικά και μορφολογικά στοιχεία

Το σιτάρι, ως ένα εκ των βασικότερων χειμερινών σιτηρών φέρει όλα τα βοτανικά και μορφολογικά γνωρίσματα που είναι χαρακτηριστικά για τα παραπάνω είδη.

1.1.5.1 Ριζικό σύστημα

Το ριζικό σύστημα του σιταριού είναι θυσσανώδες. Αποτελείται από δύο κατηγορίες ριζών α) τις εμβρυακές και β) τις μόνιμες ή δευτερογενείς ρίζες. Οι εμβρυακές φύονται από το σπόρο κατά το φύτεμα. Οι δευτερογενείς αποτελούν το κύριο ριζικό σύστημα το οποίο σχηματίζεται από τους πρώτους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, σε ένα σημείο που ονομάζεται σταυρός. Ο σταυρός είναι στην πραγματικότητα μία μεριστωματική ζώνη η οποία βρίσκεται στη βάση του φυτού και δημιουργεί ρίζες και βλαστούς. Αποτελεί για τον λόγο αυτόν το πιο ευαίσθητο σημείο του σιτηρού. Το τμήμα του φυτού που βρίσκεται μεταξύ σπόρου και σταυρού ονομάζεται μεσοκοτύλιο και το μήκος του μπορεί να είναι από 1 ως 10 εκατοστά.

Οι εμβρυακές ρίζες από την άλλη πλευρά είναι λεπτές, με ομοιόμορφη διάμετρο και πολυάριθμες διακλαδώσεις. Αναλογικά προς το συνολικό ριζικό σύστημα η κατηγορία αυτή των ριζών καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού. Συνήθως οι εμβρυακές ρίζες διατηρούνται ενεργές σε όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών. Ιδιαίτερα μάλιστα κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης του φυτού οι εμβρυακές ρίζες είναι αυτές που το τροφοδοτούν κατά κύριο λόγο με νερό και θρεπτικά στοιχεία. Στα μετέπειτα στάδια της ανάπτυξης του όμως -και κυρίως μετά την εμφάνιση του μόνιμου ριζικού συστήματος- ο ρόλος των εμβρυακών ριζών περιορίζεται πάρα πολύ.

Οι μόνιμες ρίζες, σε αντίθεση με τις εμβρυακές, είναι πολυάριθμες, παχύτερες και πιο ισχυρές. Αρχικά αναπτύσσονται οριζοντίως ενώ στη συνέχεια αποκτούν κατακόρυφο προσανατολισμό με διεύθυνση προς τα κάτω. Μπορούν μάλιστα να εισχωρήσουν σε βάθος που κυμαίνεται από 30 μέχρι 50 εκατοστά.. (Παπακώστα-Τασοπούλου et al. 2012).

1.1.5.2 Βλαστός ή «Καλάμι»

Ο βλαστός των χειμερινών σιτηρών αποκαλείται κοινώς και καλάμι. Έχει σχήμα κυλινδρικό, αποτελείται από μεσογονάτια διαστήματα -τα περισσότερα από τα οποία είναι κενά στο εσωτερικό τους κατά την ωρίμανση- καθώς και από συμπαγείς κόμβους ή γόνατα. Ο αριθμός των μεσογονατίων διαστημάτων εξαρτάται από το είδος του σιτηρού ενώ επηρεάζεται και από τις κλιματικές συνθήκες. Το μήκος τους αυξάνει προοδευτικά καθώς προχωράμε από τη βάση προς την κορυφή. Συνεπώς, το μακρύτερο όλων είναι το κορυφαίο μεσογονάτιο πάνω στο οποίο σχηματίζεται και η ταξιανθία.

Το ύψος των χειμερινών σιτηρών κυμαίνεται ανάλογα το είδος και την ποικιλία. Συνήθως ψηλώνουν από 60 έως 150 cm. Το πάχος τους, από την άλλη, αντιστοιχεί σε ένα εύρος από 3 ως 10 mm.

Στη βάση των μεσογονατίων, μέσα στον κολεό του αντίστοιχου φύλλου, υπάρχει μία μικρή ζώνη που διατηρείται σε μεριστωματική κατάσταση και αποξυλώνεται - λιγνιτοποιείται μετά το ξεστάχασμα. Η ζώνη αυτή είναι σημαντική, διότι παρέχει τη δυνατότητα στα στελέχη να επανέρχονται σε όρθια θέση, όταν για οποιονδήποτε λόγο πλαγιάσουν. Νέα στελέχη, τα λεγόμενα “αδέλφια”, μπορούν να φυτρώσουν από τις καταβολές οφθαλμών που βρίσκονται στη βάση του βλαστού, ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. (Παπακώστα-Τασοπούλου et al. 2012).

1.1.5.3 Φύλλα

Τα φύλλα του σιταριού αποτελούνται από δύο κύρια τμήματα. Το πρώτο ονομάζεται κολεός και αποτελεί το κατώτερο τμήμα του φύλλου που περιβάλλει το καλάμι. Μπορεί να φέρει τρίχες ή και όχι. Στο σημείο όπου ενώνεται η βάση του κολεού με τον αντίστοιχο κόμβο υπάρχει ένας μασχालιαίος οφθαλμός. Ο οφθαλμός αυτός, εάν βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να αναπτυχθεί σε “αδέλφι”.

Το δεύτερο τμήμα του φύλλου ονομάζεται έλασμα και είναι επίμηκες και στενό, φέρει κύριες παράλληλες νευρώσεις, δίχως διακλαδώσεις, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους σταυρωτά με άλλα πιο μικρά νεύρα. Η πάνω και η κάτω επιφάνεια του ελάσματος καλύπτονται από προστατευτικό στρώμα κυττάρων, το οποίο ονομάζεται επιδερμίδα ενώ στο εσωτερικό υπάρχει άφθονο σπογγώδες μεσόφυλλο. Στο έλασμα υπάρχουν μικρές οπές, τα στόματα, τα οποία είναι παράλληλα διατεταγμένα σε σειρές, και παρατηρούνται και στις δύο επιφάνειες των φύλλων με τα περισσότερα να βρίσκονται στην πάνω επιφάνεια. Το έλασμα του σιταριού παρουσιάζει δεξιά συστροφή και είναι λείο ή έχει χνούδι.

Στο σημείο ένωσης ελάσματος και κολεού παρατηρούνται δύο εξαρτήματα, το γλωσσίδιο και τα ωτίδια. Το πρώτο είναι μία μεμβρανοειδής εκβλάστηση με όρθια έκφυση, χωρίς χρώμα. Τα ωτίδια είναι μεμβρανώδεις προεκτάσεις του ελάσματος του φύλλου, τα οποία περιβάλλουν εξ ολοκλήρου ή μερικώς το στέλεχος. Παίρνουν συνήθως από πράσινες ως ερυθρές αποχρώσεις οι οποίες μπορεί να αλλάξουν σε λευκές με την ωρίμανση του φυτού. Το σιτάρι φέρει μέτρια ωτίδια και μέτριο γλωσσίδιο.

Τα φύλλα των σιτηρών είναι διατεταγμένα σε δύο σειρές, η μία απέναντι από την άλλη (δίστιχη φυλλοταξία). Ο αριθμός των φύλλων κυμαίνεται από 5-10. Το μικρότερο φύλλο, συνήθως το τελευταίο, αποκαλείται και φύλλο-σημαία, διότι παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον εφοδιασμό του σπέρματος-κόκκου με προϊόντα της φωτοσύνθεσης. Στην αρχή, τα φύλλα φύονται σε κατακόρυφη διεύθυνση ενώ αργότερα σχηματίζουν γωνία με το βλαστό. Κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης, τα μεσογονάτια διαστήματα δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλα και η εμφάνιση των φύλλων μοιάζει με μία τούφα πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Με τον ερχομό της άνοιξης και την άνοδο των θερμοκρασιών, επιμηκύνονται τα μεσογονάτια διαστήματα και τα φυτά παίρνουν ύψος (Παπακώστα-Τασοπούλου et al. 2012).

1.1.5.4 Ταξιανθίες-Άνθη

Τα άνθη του σιταριού είναι τοποθετημένα σε ταξιανθίες. Η ταξιανθία είναι στάχυς, ο οποίος φέρει μεγάλο αριθμό θέσεων. Οι θέσεις αυτές είναι τοποθετημένες πάνω στη ράχη και σε κάθε θέση, ο στάχυς φέρει και ένα σταχύδιο. Η ταξιανθία στο σκληρό σιτάρι είναι περισσότερο συμπαγής και φτάνει συχνά τα 6-8 cm, ενώ στο μαλακό σιτάρι είναι λιγότερο συμπαγής και φτάνει τα 7-10 cm. Συνήθως, οι συμπαγέστεροι στάχυες έχουν μικρότερο μήκος και οι αραιότεροι μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα ο αριθμός σταχυδίων ανά στάχυ να είναι σχετικά σταθερός.

Κάθε σταχύδιο με τη σειρά του αποτελείται από 2-9 ανθίδια, από τα οποία το ένα ή τα δύο ανώτερα είναι στείρα. Συνήθως σε κάθε σταχύδιο παράγονται 2 ως 3 καρποί. Στις αγανοφόρες ποικιλίες κατά την ωρίμανση το χρώμα των αγάνων είναι λευκό, ερυθρό ή μαύρο. Τα μαύρα άγανα, τα συναντά κανείς κυρίως στο σκληρό σιτάρι.

Τα χαρακτηριστικά του κόκκου, όπως το μέγεθος και το σχήμα, παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις από ποικιλία σε ποικιλία ή μεταξύ μαλακού και σκληρού σιταριού. Το σιτάρι ως μονοκοτυλήδονο φυτό διαθέτει σπόρο (κόκκο) ο οποίος χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα είναι το έμβρυο και το άλλο, το ενδοσπέρμιο, αποτελεί αποθηκευτικό χώρο που τροφοδοτεί το έμβρυο. Στο άκρο του ενδοσπερμίου παρατηρείται ένας θύσανος τριχιδίων, η λεγόμενη βούρτσα. Το μήκος των τριχιδίων και η έκταση που καταλαμβάνει η βούρτσα παρουσιάζουν επίσης αρκετές διαφορές ανάλογα με την ποικιλία και το είδος του σιταριού. Και οι κόκκοι αντιστοίχως διαφέρουν από ποικιλία σε ποικιλία ως προς το χρώμα και τη σκληρότητα (Παπακώστα-Τασοπούλου et al. 2012).

1.1.6 Λίπανση

Για τα χειμερινά σιτηρά, όπως το σιτάρι, η πιο συνηθισμένη μέθοδος εφαρμογής της λιπάνσεως είναι η τμηματική εφαρμογή. Με τη βασική λίπανση χορηγείται μία ποσότητα αζώτου και όλος ο απαιτούμενος φώσφορος πριν από τη σπορά, δηλαδή κατά την περίοδο από τον Σεπτέμβριο μέχρι τον Νοέμβριο, ενώ η επιφανειακή, κατά την οποία εφαρμόζεται το υπόλοιπο κλάσμα του απαιτούμενου N, γίνεται κατά τα τέλη του χειμώνα με αρχές της άνοιξης, στα πρώτα, δηλαδή, αναπτυξιακά στάδια των φυτών. Η ύπαρξη επαρκούς ποσότητας αζώτου στο έδαφος κατά την περίοδο της άνθησης συνεπάγεται την παραγωγή σπόρου με υψηλά επίπεδα σε περιεχόμενη πρωτεΐνη. Μεγάλη σημασία έχει το βάθος μέχρι το οποίο θα εισχωρήσει η εφαρμόσιμη, κατά την επιφανειακή λίπανση, ποσότητα του N. Προκειμένου να καταστεί αφομοιώσιμο από τα φυτά θα πρέπει να φτάσει ως το βάθος του ριζικού συστήματος. Αυτό θα επιτευχθεί κυρίως με

τη βοήθεια του νερού των βροχοπτώσεων. Εφαρμογή της επιφανειακής λίπανσης σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης δεν συνιστάται, αν και έχει βρεθεί ότι ευνοεί την περιεκτικότητα των κόκκων σε πρωτεΐνη. Ο λόγος που δεν προτείνεται είναι διότι την εποχή κατά την οποία τα φυτά του σιταριού φτάνουν σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, στην Ελλάδα οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες και έτσι το N δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από τα φυτά.

Η απαιτούμενη ποσότητα της λίπανσης για το σιτάρι προκύπτει από τον συνδυασμό πλήθους και ποικιλίας παραμέτρων, όπως η ποσότητα των στοιχείων που απομακρύνθηκαν με τον καρπό, η γονιμότητα του εδάφους, το είδος της προηγούμενης καλλιέργειας, η λίπανση της προηγούμενης καλλιέργειας, η διαχείριση των φυτικών υπολειμμάτων, οι διάφορες απώλειες λόγω έκπλυσης, διάβρωσης και διάφοροι άλλοι παράγοντες. Έτσι, με βάση τις κλιματικές συνθήκες και τις τεχνικές καλλιέργειας του σιταριού στην Ελλάδα, η συνολική συνιστώμενη ποσότητα αζώτου ανά έτος είναι 10-15 kg/στρέμμα. Προφανώς, οι μεγαλύτερες ποσότητες θα πρέπει να εφαρμόζονται σε περιοχές όπου οι αποδόσεις αναμένεται να ξεπεράσουν τα 500 kg/στρέμμα. Η λίπανση με φώσφορο (P) δεν είναι απαραίτητη σε όλα τα εδάφη και για κάθε καλλιεργητική περίοδο, διότι ο P δεν εκπλένεται, αλλά δεσμεύεται στο έδαφος και αποδίδεται σταδιακά στα φυτά. Η εφαρμογή φωσφόρου είναι εφικτή κάθε δύο ή τρία χρόνια σε μεγαλύτερη ποσότητα. Χορήγηση K ή άλλων στοιχείων δεν είναι απαραίτητη επειδή δεν υπάρχουν αναφορές για ελλείψεις αυτών σε Ελληνικά εδάφη (Παπακώστα-Τασοπούλου et al. 2012).

1.1.7 Καλλιεργούμενα είδη σιταριού σήμερα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σιτάρι ανήκει στο γένος *Triticum*. Η κατάταξή των ειδών του γένους αυτού γίνεται με βάση τον αριθμό των χρωμοσωμάτων που διαθέτουν. Το είδος *Triticum* έχει τρεις κύριες ομάδες χρωμοσωμάτων, τις A, B και D. Ανάλογα με τον αριθμό των ομάδων, τα διάφορα είδη διακρίνονται σε 1) διπλοειδή AA ($2n=14$) 2) τετραπλοειδή AABB ($2n=28$) 3) εξαπλοειδή AABBDD ($2n=42$).

1.1.7.1 Μαλακό σιτάρι (*Triticum aestivum* spp. *aestivum*)

Τη σύγχρονη εποχή δύο είναι τα κυρίαρχα είδη σιταριού που καλλιεργούνται. Το *Triticum aestivum* ssp. *aestivum* ή αλλιώς «μαλακό» σιτάρι και το *Triticum turgidum* ssp. *durum* κοινώς γνωστό και ως «σκληρό» σιτάρι. Το πρώτο είναι εξαπλοειδές και προήλθε από τη διασταύρωση του *Triticum turgidum* και του διπλοειδούς *Aegilops tauschii*. Χρησιμοποιείται

για την παραγωγή ψωμιού και μπισκότων και η έκταση στην οποία καλλιεργείται αποτελεί το 94% της συνολικής έκτασης παγκοσμίως.

1.1.7.2 Σκληρό σιτάρι (*Triticum turgidum* ssp. *durum*)

Ο δεύτερος τύπος είναι το *Triticum turgidum* ssp. *durum*, ένα τετραπλοειδές σιτάρι. Η διασταύρωση του *T. urartu* και ενός συγγενικού είδους του *A. speltoides* έδωσε ζωή στο άγριο emmer (*T. turgidum* ssp. *dicoccoides*) που αργότερα καλλιεργήθηκε ως *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum*. Το τελευταίο είδος είναι και ο πρόγονος του σημερινού «σκληρού» σιταριού. Σήμερα καλλιεργείται με σκοπό την παραγωγή κυρίως ζυμαρικών αλλά και διάφορων άλλων φαγώσιμων προϊόντων όπως το κουσκούς. Θεωρείται πως η ετήσια παραγωγή του «σκληρού» σιταριού ανέρχεται γύρω στους 36 εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως σύμφωνα με τους Magallanes-López et al. (2017) και καταλαμβάνει περίπου 13 εκατομμύρια εκτάρια αρόσιμης γης, με το 60% αυτών, δηλαδή τα 7.8 εκατομμύρια εκτάρια, να είναι συγκεντρωμένο στη λεκάνη της Μεσογείου. Ισπανία και Ιταλία είναι οι δύο χώρες που παράγουν τις μεγαλύτερες ποσότητες σκληρού σιταριού στην περιοχή αυτή (Chairi et al. 2019).

1.2 Γεωργία Ακριβείας

Ωστόσο, η κατανάλωση ζυμαρικών στις Μεσογειακές χώρες είναι υψηλότερη από την τοπική παραγωγή, επομένως οι βιομηχανίες τροφίμων βασίζονται σε εισαγωγές από άλλες περιοχές παραγωγής σκληρού σιταριού, κυρίως τη Βόρεια Αμερική. Επιπλέον, η τελική παραγωγή εξαρτάται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες, ιδιαίτερα κατά τη φάση γεμίσματος του καρπού (Diacono et al. 2012). Το μεταβλητό Μεσογειακό κλίμα, σε συνδυασμό με την τρέχουσα κλιματική αλλαγή, προκαλεί μεγάλες διακυμάνσεις των αποδόσεων του σκληρού σιταριού από χρόνο σε χρόνο, δημιουργώντας κινδύνους και αβεβαιότητες για τον προγραμματισμό των εξαγωγών και των εισαγωγών στη βιομηχανία, σε οργανισμούς εμπορίας σιτηρών, σε υπεύθυνους χάραξης πολιτικής καθώς και σε άλλες ενδιαφερόμενες οντότητες. Και ενώ οι απαιτήσεις για παραγωγή σιταριού αυξάνονται συνεχώς, η εφαρμογή των συνηθισμένων μέχρι πρόσφατα καλλιεργητικών τεχνικών όπως η χορήγηση λιπασμάτων, διάφορων φυτοπροστατευτικών προϊόντων ή κοπριάς ζώων έχει μεγάλης σημασίας αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον σύμφωνα με τον Ma (2019) και επομένως δεν μπορεί παρά να θεωρηθεί πλέον ως ακατάλληλη μέθοδος επίτευξης υψηλών αποδόσεων. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στην δημιουργία νέων καλλιεργητικών στρατηγικών, που αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση της παραγωγής τόσο από οικονομικής, όσο και από οικολογικής άποψης. Μία τέτοια στρατηγική διαχείρισης είναι και η Γεωργία Ακριβείας (Γ.Α.), η οποία βασίζεται στη

διαχείριση της χωρικής και της χρονικής παραλλακτικότητας που παρατηρείται εντός του αγρού, με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας του και τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων που προκαλούνται από την μη ορθολογική χρήση των διάφορων εισροών (Barnes et al. 2019). Πρακτικά, η Γ.Α. είναι ένα σύνολο τεχνολογιών που συμπεριλαμβάνει αισθητήρες, συστήματα πληροφόρησης, ενισχυμένα μηχανήματα και ενημερωμένη διαχείριση για την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων (Gebbers et al. 2010).

1.3 Πρόβλεψη παραγωγής

1.3.1 Για το *Triticum turgidum ssp. durum*

Η πρόωγη πρόβλεψη της απόδοσης του σκληρού σιταριού είναι ζωτικής σημασίας και ικανή να βοηθήσει ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής τροφίμων. Οι αγρότες θα είναι ικανοί να προσαρμόσουν τις εισροές των αγροκτημάτων τους, όπως τα λιπάσματα ή την άρδευση, για να ικανοποιήσουν τις ειδικές ανάγκες της καλλιέργειας, με την εφαρμογή τεχνικών γεωργίας ακριβείας. Επιπλέον, ο τομέας της συγκομιδής θα είναι σε θέση να προγραμματίσει τα λογιστικά του, με τη διαχείριση του στόλου των θεριζοαλωνιστικών μηχανημάτων και προβλέποντας τις απαιτήσεις μεταφοράς και αποθήκευσης.

1.3.2 Η πρόβλεψη της απόδοσης μέχρι σήμερα

Μέχρι στιγμής, η πρόβλεψη απόδοσης για το χειμερινό σιτάρι βασίζεται είτε σε εκτιμήσεις και πληροφορίες που συλλέγονται από εμπειρογνώμονες και ειδικευμένους πληροφοριοδότες, είτε σε αποτελέσματα από διάφορα μοντέλα εξομοίωσης καλλιεργειών, όπως το CERES (Ritchie et al. 1985), το WOFOST (Vandiepen et al. 1989), το CROPSYST (Van Evert et al. 1994) ή το SAFY (Duchemin et al. 2008). Παρόλο που μοντέλα όπως το CERES έχουν χρησιμοποιηθεί με αρκετή επιτυχία για περισσότερα από 30 χρόνια (Basso et al. 2016), το κύριο μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν πολυάριθμα δεδομένα για τον καιρό, το κλίμα, το έδαφος, τους γονότυπους και τις πρακτικές διαχείρισης, τα οποία είναι συνήθως δύσκολο να βρεθούν. Επιπλέον, αυτά τα μοντέλα δεν είναι σε θέση να δώσουν ικανοποιητικές προβλέψεις όταν πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η χωρική παραλλακτικότητα εντός του αγρού (Wiegand et al. 1990).

1.4 Τηλεπισκόπηση

Τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των μοντέλων καλλιέργειας, ξεκίνησε η χρήση δεδομένων τα οποία προέρχονται μέσω της εξ αποστάσεως ανίχνευσης από κάποιο δορυφόρο ή αλλιώς μέσω τηλεπισκόπησης. Η τηλεπισκόπηση είναι η απόκτηση πληροφοριών από απόσταση για ένα αντικείμενο ή ένα φαινόμενο (Weiss et al. 2020). Ένα

τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει ένα όργανο ή έναν αισθητήρα τοποθετημένο σε μια πλατφόρμα, όπως ένας δορυφόρος, ένα αεροσκάφος ή ένα UAV / UGV. Ο αισθητήρας μετρά συνήθως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που είτε ανακλάται είτε εκπέμπεται από τον στόχο. Ο τύπος των πληροφοριών οι οποίες θα προέλθουν μέσω της τηλεπισκόπησης εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ιδιότητες του οργάνου και της πλατφόρμας του. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν: τη δορυφορική τροχιά, το σχέδιο κίνησης UAV / UGV, τη θέση και τον προσανατολισμό του αισθητήρα πεδίου, την ενεργή ή παθητική ανίχνευση, τη συστοιχία ανιχνευτών και τα χαρακτηριστικά των οπτικών φακών, καθώς και τις δυνατότητες αποθήκευσης. Τα χαρακτηριστικά αισθητήρα / πλατφόρμας ορίζουν τις φασματικές δυνατότητες, τις δυνατότητες κατεύθυνσης και πόλωσης, τη χωρική ανάλυση, τη συχνότητα επανεπίσκεψης και τέλος τον λόγο σήμα-προς-θόρυβο. Επιπλέον, κατά την απόκτηση τους, τα δεδομένα επηρεάζονται έμμεσα από τον φωτισμό και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επομένως, για να είναι δυνατή η ανίχνευση και η ποσοτικοποίηση αλλαγών στην επιφάνεια της Γης, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα διάφορα δεδομένα, τα οποία προκύπτουν από τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά μέτρηση, όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, έτσι ώστε το υπόλοιπο σήμα να εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες της ακτινοβολίας του στόχου παρατήρησης. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως είναι οι υπερφασματικοί αισθητήρες και η ευκολότερη διαθεσιμότητα εικόνων, επέτρεψε την εκμετάλλευση των δεδομένων αυτών με ολοένα και πιο αποτελεσματικούς τρόπους και τη ενσωμάτωσή τους σε ποικίλες επιστήμες.

Στο πεδίο της γεωργίας, η φασματοσκοπική απεικόνιση αναφέρεται ως το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας με τα φυτά και η ανίχνευσή της μέσω πολυφασματικών και υπερφασματικών αισθητήρων. Στο ορατό φάσμα, η χαμηλή ανάκλαση που παρατηρείται οφείλεται στην έντονη απορρόφηση ακτινοβολίας από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές καθώς και σε μια χαρακτηριστική κορύφωση της ανακλαστικότητας στην πράσινη περιοχή. Ωστόσο, κατά τη μετάβαση από το ορατό στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) τμήμα του φάσματος παρατηρείται μία απότομη αύξηση της ανακλαστικότητας (red-edge). Στην φασματική ζώνη του κοντινού υπέρυθρου (NIR), η ακτινοβολία που μεταδίδεται από τα ανώτερα φύλλα του θόλου προς τα χαμηλότερα αντανακλάται στη συνέχεια πίσω στο πάνω μέρος. Περαιτέρω, σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, η ανακλαστικότητα μειώνεται βαθμιαία και η απορρόφηση αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της περιεκτικότητας των φύλλων σε νερό, γεγονός που βοηθά στην εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε νερό. Τέτοιες πληροφορίες φασματικής ανάκλασης χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό προσδιορισμό των δεικτών βλάστησης, όπως ο NDVI. Οι δείκτες βλάστησης (Δ.Β.) συσχετίζονται με διάφορα

χαρακτηριστικά, δηλαδή την κατάσταση του νερού, την περιεκτικότητα σε χρωστικές ουσίες και τη φωτοσυνθετικά ενεργή βιομάζα, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνολικής πράσινης βιομάζας, της επιφάνειας των φύλλων, της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη και της απόδοσης σε διάφορα είδη καλλιεργειών (Balwant Singh et al. 2018).

Όσον αφορά τη γεωργία, η χρησιμότητα των Δ.Β. στα μοντέλα πρόβλεψης της απόδοσης διάφορων καλλιεργειών έχει δοκιμαστεί και αποδειχθεί σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών και περιοχών (Becker-reshef et al. 2010, Padilla et al. 2012, Silvestro et al. 2017, Gaso et al. 2019). Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη χρήση των Δ.Β. παρέχουν ποσοτικές και χρονικές πληροφορίες για μεγάλες περιοχές, οι οποίες αφορούν γνωρίσματα ή χαρακτηριστικά των γεωργικών συστημάτων, και ειδικότερα τον τρόπο με τον οποίο τα τελευταία διαφοροποιούνται στο χώρο και το χρόνο. Στα γνωρίσματα τα οποία χαρακτηρίστηκαν ως λειτουργικά συγκαταλέχθηκαν τα μορφολογικά, τα βιοχημικά, τα φυσιολογικά, τα δομικά, τα φαινολογικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοση ή την ικανότητα του οργανισμού. Η φύση αυτών των αγρονομικών χαρακτηριστικών μπορεί να είναι τυπολογική (π.χ. τύπος καλλιέργειας), φυσική (π.χ. υγρασία του εδάφους), χημική (π.χ. περιεκτικότητα του φύλλου σε άζωτο), βιολογική (π.χ. φαινολογία καλλιέργειας), δομική (π.χ. κλίση φύλλων) ή γεωμετρική (π.χ. φυτική πυκνότητα). Μερικά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, όπως η παραγωγικότητα των καλλιεργειών, μπορούν να προκύψουν από μια σειρά συνυφασμένων βιοφυσικών διεργασιών κατά τη διάρκεια μίας δεδομένης χρονικής περιόδου (π.χ. κύκλος ανάπτυξης καλλιεργειών). Παρ' όλα αυτά, κανένα από αυτά τα χαρακτηριστικά δεν μετράται άμεσα από τα όργανα τηλεπισκόπησης. Η σχέση μεταξύ της ανακλώμενης ακτινοβολίας και των γνωρισμάτων πρέπει να μοντελοποιηθεί με κάποιο τρόπο προκειμένου να συναχθεί το δεύτερο από το πρώτο.

1.4.1 Δείκτες Βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης (Δ.Β.), αποτελούν στην ουσία αριθμητικούς συνδυασμούς της ανακλαστικότητας σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές (Lambin, 2001), οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε διάφορες μελέτες ανά τον κόσμο με σκοπό την παρακολούθηση των αλλαγών στην υγεία και την κάλυψη της βλάστησης και υπήρξαν αποτελεσματικοί ως προς τη χαρτογράφηση της ξηρασίας, της απερίμωσης, της φαινολογίας, της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας και της αποψίλωσης. Οι δείκτες βλάστησης έχουν σχεδιαστεί για να μεγιστοποιούν την ευαισθησία στα χαρακτηριστικά της βλάστησης, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν τους παράγοντες θορύβου, όπως η ανακλαστικότητα του εδάφους, οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις ή οι επιδράσεις της κατεύθυνσης. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι δείκτες βλάστησης χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που περιέχονται στις περιοχές του

κόκκινου και του κοντινού υπέρυθρου (NIR) τμήματος της ακτινοβολίας που ανακλάται από το θόλο. Συνδυάζονται υπό τη μορφή αναλογιών (Fang 2008). Τέτοιοι είναι ο Δ.Β. κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al. 1974), ο ενισχυμένος δείκτης βλάστησης (EVI, Enhanced Vegetation Index, Huete et al. 2002), ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς κόκκινου άκρου (NDRE, Normalized Difference Red Edge Index, Barnes et al. 2000) και πολλοί άλλοι. Τέτοιοι Δ.Β. βρίσκονται σε στενή σχέση με τις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης, όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI, Leaf Area Index) ή το κλάσμα της απορροφώμενης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (fAPAR, Prince et al. 1991, Baret et al. 1991).

1.4.1.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}$$

Ο NDVI είναι ο δείκτης με την πιο ευρεία χρήση. Εκφράζεται από την παραπάνω αναλογία, όπου το R_{nir} είναι η τιμή της ανακλαστικότητας στη περιοχή του κοντινού υπέρυθρου και το R_{red} είναι η τιμή της ανακλαστικότητας στη περιοχή του κόκκινου. Αυτές οι δύο ζώνες είναι ευαίσθητες στην πυκνότητα χλωροφύλλης και την πυκνότητα των πράσινων φύλλων, αντίστοιχα, του θόλου ενός φυτού (Kirkham 2014). Η αρχή στην οποία βασίζεται είναι ότι η υγιής πράσινη βλάστηση απορροφά τα περισσότερα από τα προσπίπτοντα κόκκινα μήκη κύματος του φωτός και ανακλά τα περισσότερα από τα μήκη κύματος που βρίσκονται στο κοντινό υπέρυθρο (Horning 2008).

1.4.1.2 EVI (Enhanced Vegetation Index)

$$EVI = 2.5 * \left(\frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + (6 * R_{red}) - (7.5 * R_{blue}) + 1} \right)$$

Ο EVI αναπτύχθηκε με σκοπό τη βελτιστοποίηση του σήματος της βλάστησης αφού παρουσιάζει βελτιωμένη ευαισθησία σε περιοχές με υψηλή βιομάζα, σε σχέση με τον NDVI. Δίνεται από την παραπάνω σχέση. Όπου R_{490} είναι η τιμή της ακτινοβολίας από τη μπλε φασματική ζώνη. Το 1 είναι συντελεστής προσαρμογής υποβάθρου του θόλου (Fang 2008).

1.4.1.3 NDRE (Normalized Difference of Red Edge)

$$NDRE = \frac{R_{nir} - R_{r.e.}}{R_{nir} + R_{r.e.}}$$

Ο NDRE αποτελεί μία παραλλαγή του NDVI. Η διαφορά των δύο δεικτών βρίσκεται στις φασματικές ζώνες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του καθενός και πιο συγκεκριμένα στην αντικατάσταση της κόκκινης ζώνης του NDVI με την φασματική ζώνη του κόκκινου άκρου (red edge).

1.4.2 Χρήση Δ.Β. για μέτρηση της παραγωγής

Παρόλο που η χωρική παραλλακτικότητα στο πεδίο της παραγωγικότητας των καλλιεργειών συνδέεται στενά με τις ιδιότητες του εδάφους, τη διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών συστατικών (Diacono et al. 2012, Tobias Johnen et al. 2014), η τηλεπισκόπηση του θόλου της καλλιέργειας αποτελεί μια καλή μέθοδο για προβλέψεις απόδοσης επειδή απεικονίζει άμεσα τις περισσότερες από τις επιδράσεις των παραπάνω παραγόντων στην ανάπτυξη των

καλλιιεργειών (Onur Satir et al. 2016). Ο Pantazi (2016) εξέτασε τη σχέση μεταξύ δεδομένων τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης και των ιδιοτήτων του εδάφους με την παραγωγικότητα του χειμερινού σιταριού και διαπίστωσε ότι το NDVI συσχετίζεται περισσότερο με την απόδοση σε σύγκριση με τις ιδιότητες του εδάφους. Μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αποδόσεων, οι εμπειρικές μέθοδοι που βασίζονται στην απλή εφαρμογή μιας στατιστικής παλινδρόμησης μεταξύ Δ.Β. και απόδοσης είναι οι πιο συνηθισμένες, λόγω της απλότητας και των περιορισμένων απαιτήσεων των δεδομένων τους (Wall et al. 2008, Balaghi et al. 2008, Ren, et al. 2008, Bolton et al. 2013, Lopresti et al. 2015, Nagy et al. 2018, Prey et al. 2019). Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι οι σχέσεις μεταξύ του Δ.Β. και της απόδοσης συχνά περιορίζονται στις περιοχές για τις οποίες βαθμονομήθηκαν και δεν είναι παγκοσμίως εφαρμόσιμες (Moriondo et al. 2007, Lopresti et al. 2015). Ο Bhattacharya (2011) απέδωσε την εξαρτώμενη από τον τόπο φύση των μοντέλων φασματικής απόδοσης στον κορεσμό ορισμένων Δ.Β. (π.χ. NDVI) σε υψηλά επίπεδα LAI και την μη ευαισθησία των Δ.Β. στην διακύμανση της υγρασίας του εδάφους, ειδικά σε συνθήκες μέτριας έως πλήρους κάλυψης. Παρ' όλα αυτά, οι Becker-Reshef et al. (2010) ανέπτυξαν ένα μοντέλο μονής παλινδρόμησης για το χειμερινό σιτάρι, όπου η απόδοση συσχετίστηκε θετικά και γραμμικά με το εποχιακό μέγιστο NDVI που δημιουργήθηκε από δεδομένα του MODIS. Το γενικευμένο μοντέλο βαθμονομήθηκε και εφαρμόστηκε σε τοπικό επίπεδο στο Κάνσας και αποδείχθηκε άμεσα μεταβιβάσιμο και εφαρμόσιμο σε εθνικό επίπεδο στην Ουκρανία.

Τα πολυφασματικά όργανα επί των διαφόρων δορυφόρων (π.χ. LANDSAT, MODIS, SPOT) παρείχαν εδώ και αρκετά χρόνια πολλά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της βλάστησης (Hatfield et al. 1983, Quarmby et al. 1993, Hayes et al. 1996, Labus et al. 2002, Kastens et al. 2005, Salazar et al. 2007, Becker-Reshef, et al. 2010, Nagy et al. 2018). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά των δεδομένων που παράγονται από τα πολυφασματικά όργανα των δορυφόρων συχνά περιορίζεται από τη χαμηλή χωρική ή χρονική ανάλυση των εν λόγω οργάνων. Ένας ακόμη λόγος ο οποίος περιορίζει τη χρήση των παραπάνω δεδομένων είναι η μέχρι πρόσφατα έλλειψη δωρεάν διαθεσιμότητας. Το MODIS προσφέρει χωρική ανάλυση, για τις ζώνες που σχετίζονται με τον NDVI, σε μέγεθος pixel ίσο με 250 μ. Αυτό αντιστοιχεί σε 6.25 εκτάρια και θεωρείται υπερβολικά μεγάλο για το μέσο μέγεθος μίας εκμετάλλευσης στη λεκάνη της Μεσογείου, το οποίο μπορεί να είναι μικρότερο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της Ελλάδας ([Eurostat](#) Στατιστικά στοιχεία για τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις). Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα pixels μπορεί να μην περιλαμβάνουν καθαρές πληροφορίες, υπό την έννοια ότι αντί για μία μόνο καλλιέργεια υπάρχει η πιθανότητα τα pixels

να παρέχουν πληροφορίες για ένα μείγμα μεταβλητών τύπων κάλυψης της γης. Αυτό προκαλεί την εισαγωγή εγγενούς θορύβου στα δεδομένα. Ο LANDSAT παρέχει υψηλότερη χωρική ανάλυση (μέγεθος pixel ίσο με 30 m), αλλά με έναν κύκλο επανάληψης 16 ημερών, ο οποίος είναι σχετικά χαμηλός και άρα όχι τόσο χρήσιμος στην παραγωγή χρονοσειρών Δ.Β. οι οποίες να είναι ακριβείς και συνεχείς, ειδικά σε περιόδους γρήγορων φαινολογικών / φυσιολογικών μεταβολών (Becker-Reshef et al. 2010). Ο πιο πρόσφατος δορυφόρος, ο SPOT-7, προσφέρει υψηλή χωρική ανάλυση σε απόσταση 6 μέτρων και είναι σε θέση να παρέχει επισκέψεις σε καθημερινή βάση, αλλά τα δεδομένα του δεν είναι ελεύθερα προσβάσιμα.

Πρόσφατα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA) ξεκίνησε τη λειτουργία ενός ζεύγους δορυφόρων, συγκεκριμένα τους Sentinel-2 A και B, εξοπλισμένους με ένα πολυφασματικό αισθητήρα (MSI), που παρέχει δεδομένα σε διάστημα πέντε ημερών, με πολλαπλές φασματικές ζώνες και χωρική ανάλυση από 10 έως 60 μέτρα (Sentinel - οδηγός χρήστη). Τα δεδομένα των Sentinel-2 φαίνονται ιδιαίτερα κατάλληλα για την αποτελεσματική εκτίμηση των αποδόσεων σε χωράφια μικρού μεγέθους και για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας. Λόγω της σύντομης περιόδου λειτουργίας τους, οι ερευνητικές πληροφορίες για συγκεκριμένες καλλιέργειες και παραμέτρους βλάστησης είναι ακόμη αρκετά περιορισμένες. Οι Xie et al. (2019) χρησιμοποίησαν δεδομένα του Sentinel-2 για να εκτιμήσουν τον LAI, την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φύλλα και την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη του θόλου στο χειμερινό σιτάρι και να συγκρίνουν τα αποτελέσματα με *in situ* μετρήσεις, αποδεικνύοντας την καταλληλότητα του αισθητήρα MSI στην ανάκτηση των βιοφυσικών μεταβλητών της καλλιέργειας. Σε μια συγκριτική μελέτη, οι Prey et al. (2019) κατέδειξαν ότι ο αισθητήρας MSI του Sentinel-2 είναι σαφώς ανώτερος από τους αισθητήρες των Landsat-8, Worldview-2 και RapidEye όσον αφορά την εκτίμηση των Δ.Β. που σχετίζονται με την απόδοση του χειμερινού σιταριού, την πρόσληψη και τη συγκέντρωση του αζώτου. Τα πλεονεκτήματα αποδόθηκαν στο κανάλι red edge για τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το N και την καλύτερη κάλυψη της κλίμακας NIR μεταξύ 800 και 1000 nm από τον Sentinel-2.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της δυναμικότητας των δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-2 για την εκτίμηση και πρόβλεψη των αποδόσεων σκληρού σιταριού, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης απόδοσης, κατάλληλων για τα μικρά χωράφια της λεκάνης της Μεσογείου. Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται τρεις Δ.Β. που χρησιμοποιούνται συχνά σε μοντέλα παραγωγικότητας, δηλ. οι NDVI, NDRE και EVI, έναντι δεδομένων απόδοσης που συλλέγονται από μηχανή συγκομιδής εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης της απόδοσης. Επιπλέον, διερευνώνται οι σημαντικότερες περίοδοι

πρόβλεψης της απόδοσης, προκειμένου να προσδιοριστούν τα κρίσιμα στάδια και η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των πληροφοριών για εφαρμογές σε προγράμματα γεωργίας ακριβείας.

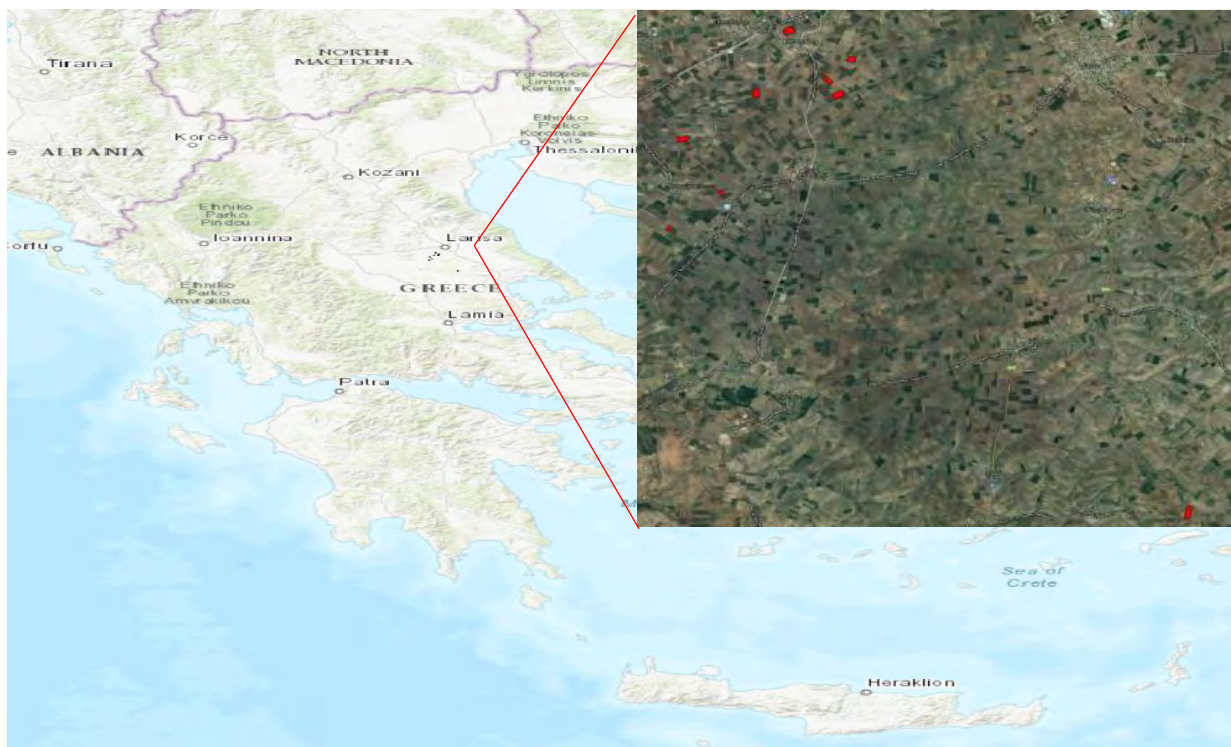
2 Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Περιοχές μελέτης

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 9 χωράφια, τα οποία βρίσκονται στην περιοχή της Θεσσαλίας (Εικόνα 3) και καλλιεργήθηκαν με σιτάρι την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018. Το μέγεθος των χωραφιών διέφερε από χωράφι σε χωράφι, δίνοντας έτσι ένα εύρος μεταξύ 23 και 84 στρεμμάτων (με μέσο μέγεθος τα 59 στρέμματα) με τη συνολική έκταση αυτών να ισούται με 529 στρέμματα (Πίνακας 1). Ως κριτήρια για την επιλογή των χωραφιών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής 2: Αρχική προϋπόθεση ήταν η συγκομιδή των χωραφιών να έχει γίνει με αλωνιστική μηχανή εξοπλισμένη με αισθητήρα μέτρησης της παραγωγής. Ως δεύτερο κριτήριο χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος του κάθε χωραφιού, το οποίο θα έπρεπε να ήταν αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να επιτρέπεται η παρακολούθησή του μέσω δορυφόρου. Η σπορά των χωραφιών έγινε μεταξύ Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου του 2017 και η συγκομιδή τους μήνες Μάιο-Ιούνιο του 2018. Οι ποικιλίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι Svevo, Iride και Normano και η ποσότητα του σπόρου που εφαρμόστηκε κατά μέσο όρο σε όλα τα χωράφια ήταν ίση με 23 κιλά ανά στρέμμα.

Πίνακας 1. Πληροφορίες για τα χωράφια που χρησιμοποιήθηκαν.

Όνομα	Έκταση, στρέμματα	Αριθμός Pixel διαστάσεως 10 μέτρων	Ημερομηνία Σποράς	Ημερομηνία Συγκομιδής	Ποικιλία	Ποσότητα σπόρου, kg/ha	Τοποθεσία
Χωράφι 1	49	275	28/11/2017	31/5/2018	Svevo	240	Μεσορράχη
Χωράφι 2	67	480	26/11/2017	7/6/2018	Givraltar	230	Μεσορράχη
Χωράφι 3	53	327	28/11/2017	2/6/2018	Iridae	230	Μεσορράχη
Χωράφι 4	67	429	12/11/2017	2/6/2018	Iridae	240	Κραννώνας
Χωράφι 5	27	126	16/11/2017	31/5/2018	Svevo	250	Κραννώνας
Χωράφι 6	23	147	14/11/2017	31/5/2018	Svevo	250	Κραννώνας
Χωράφι 7	84	611	12/11/2017	3/6/2018	Iridae	240	Μεσορράχη
Χωράφι 8	80	452	8/12/2017	5/6/2018	Svevo	230	Μεσορράχη
Χωράφι 9	79	537	24/11/2017	8/6/2018	Normano	230	Σκοτούσα



Σχήμα 3 Χάρτης της Ελλάδος και οι τοποθεσίες των χωραφιών που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη σημειωμένες με κόκκινο χρώμα (Ενθετο).

2.2 Μέτρηση της παραγωγής

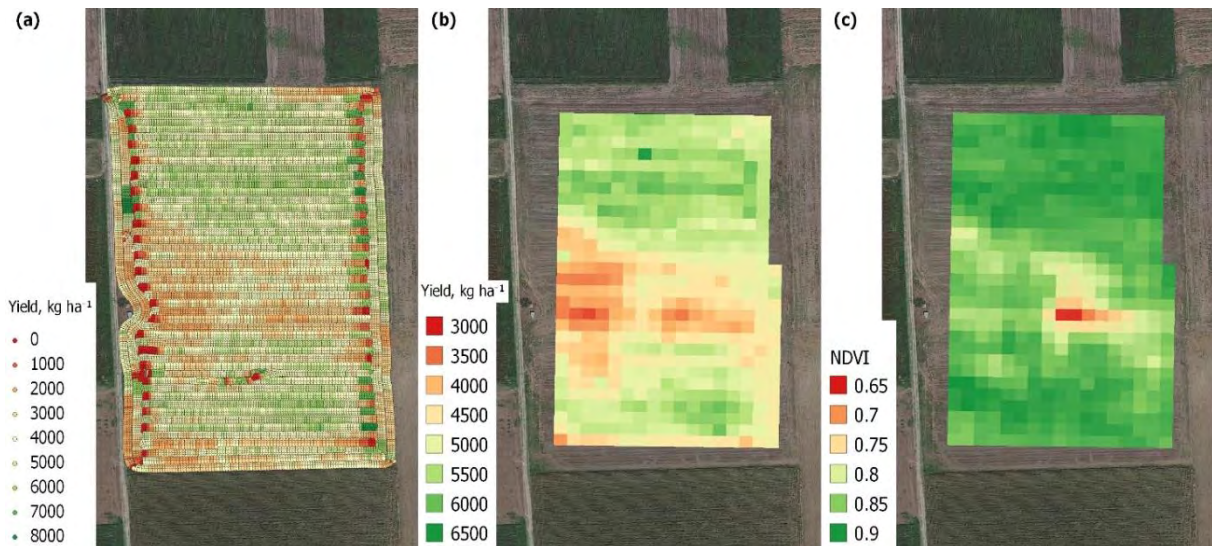
Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου όλα τα χωράφια συγκομίστηκαν με την αλωνιστική μηχανή JohnDeere S660 η οποία ήταν εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής το οποίο καταγράφει με χωρική ανάλυση περίπου 1.5x1 m.

Οι μετρήσεις και τα δεδομένα των χαρτών παραγωγής μετά τη συγκομιδή περάστηκαν απευθείας στην επίσημη ιστοσελίδα της John Deere (εταιρεία κατασκευής της αλωνιστικής μηχανής και του συστήματος χαρτογράφησης) από την οποία και ανακτήθηκαν για περαιτέρω επεξεργασία.

Τα αρχικά δεδομένα παραγωγής περιείχαν αρκετό θόρυβο (σχήμα 1a). Η υπόθεση ήταν πως αυτό οφείλεται κυρίως σε παράγοντες που σχετίζονται με την λειτουργία της θεριζοαλωνιστικής μηχανής John Deere S600 κατά τη συγκομιδή, όπως τα διπλά περάσματα από το ίδιο σημείο, η διαφορετική ταχύτητα στα διάφορα σημεία του ίδιου χωραφιού, αλλά κυρίως η χρονοκαθυστέρηση στην καταγραφή της παραγωγής από τον αισθητήρα. Αυτά είχαν ως αποτέλεσμα, η παραγωγή στα σημεία εισόδου της μηχανής στις γραμμές να παίρνει πολύ χαμηλές τιμές ενώ αντίθετα σε σημεία εξόδου της μηχανής, η παραγωγή να φαίνεται πολύ

υψηλή. Επίσης, υπήρχαν γειτονικά σημεία στο κεντρικό τμήμα του χωραφιού, μεταξύ των οποίων παρατηρήθηκε απότομη και ακραία μεταβολή στη κλίμακα της παραγωγής. Για τους παραπάνω λόγους κρίθηκε αναγκαίος ο καθαρισμός κάθε χωραφιού από σημεία με σφάλματα στις μετρήσεις της παραγωγής. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό των δεδομένων της παραγωγής είναι το Yield Editor 2.0 (Sudduth et al. 2012).

Μετά τον καθαρισμό των χωραφιών από σημεία όπου υπήρχαν σφάλματα στη μέτρηση της παραγωγής, τα δεδομένα πέρασαν από διαδικασία επαναδειγματοληψίας (resampling) έτσι ώστε να παραχθεί μία εικόνα raster με μέγεθος εικονοστοιχείου 10 m και χωροθέτηση ίδια με αυτή των εικόνων του Sentinel-2, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η απευθείας σύγκριση pixel προς pixel (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Αρχικά δεδομένα παραγωγής (a), χάρτης παραγωγής μετά από καθαρισμό, αφαίρεση των ορίων του χωραφιού και resampling σε pixel μεγέθους 10 μ. (b) και η αντίστοιχη εικόνα NDVI από τον Sentinel-2 στις 29 Απριλίου 2018 (c) για ένα από τα χωράφια.

2.3 Δορυφορικά δεδομένα

Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν 32 εικόνες του δορυφόρου Sentinel-2 (A και B) χωρίς σύννεφα μεταξύ Οκτωβρίου του 2017 και Ιουνίου του 2018, οι οποίες μεταφορτώθηκαν από το Copernicus Open Access Hub της ESA (<https://scihub.copernicus.eu>). Οι δορυφόροι Sentinel-2 έχουν διαστάσεις 3.4 m μήκος, 1.8 m πλάτος, 2.35 m ύψος και μάζα 1140 κιλών, με τα 123 εξ αυτών να αποτελούν τα καύσιμα. Βρίσκονται στην ίδια τροχιά, σε ύψος 786 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης, αλλά με διαφορά 180° μεταξύ τους με σκοπό την καλύτερη κάλυψη και συλλογή πληροφοριών. Κύρια αποστολή των δύο δορυφόρων αποτελεί η συλλογή πληροφοριών για γεωργικές και δασικές εφαρμογές, όπως η κατασκευή δεικτών βλάστησης μέσω των δορυφορικών εικόνων που παρέχουν, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για την πρόβλεψη της παραγωγής. Εκτός, όμως, από την παρακολούθηση της ανάπτυξης των φυτών, οι Sentinel-2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλους σκοπούς όπως για παράδειγμα τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη ρύπανση σε λίμνες και παράκτια νερά. Η λειτουργία του Sentinel-2A ξεκίνησε στις 23 Ιουνίου του 2015 και δύο περίπου χρόνια αργότερα, στις 7 Μαρτίου του 2017, ακολούθησε ο Sentinel-2B. Το σύμπλοκο των δυο δορυφόρων παρέχει συστηματική κάλυψη ξηράς και παράκτιων περιοχών μεταξύ 84° N και 84° S. Τα πολυφασματικά όργανα (MSI), με τα οποία είναι εξοπλισμένοι οι δορυφόροι Sentinel-2, παρέχουν πληροφορίες σε 13 φασματικά κανάλια (433-2190 nm), με πλάτος λωρίδας κάλυψης (swath) ίσο με 290 χιλιόμετρα, χωρική ανάλυση από 10 ως 60 m, και με χρόνο επανεπισκεψιμότητας 5 ημέρες σε ένα σημείο πάνω από τον Ισημερινό, καλύπτοντας όλη την επιφάνεια της Γης. Πιο αναλυτικά, τα φασματικά κανάλια του Sentinel-2, παρουσιάζονται στους Πίνακες 2-4. Η διάρκεια ζωής των δορυφόρων ανέρχεται στα 7 χρόνια το ελάχιστο, αλλά η αναμενόμενη είναι πολύ μεγαλύτερη. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν προϊόντα Level2A (ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά διορθωμένα) που αφορούν ανακλαστικότητα στην επιφάνεια της γης (BOA) και παρέχονται ελεύθερα από την ESA. Σε όλες τις εικόνες εφαρμόστηκε αναδειγματοληψία, μέσω του δωρεάν λογισμικού ανοικτού κώδικα SNAP-ESA Sentinels Application Platform v6.0.4, ώστε όλα τα κανάλια να έχουν χωρική ανάλυση 10 m.

Πίνακας 2. Φασματικά κανάλια χωρικής ανάλυσης 10m και σχετική αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio *SNR*) των δορυφόρων Sentinel-2.

Αριθμός φασματικού ή καναλιού	S2A		S2B		Ακτινοβολία αναφοράς ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)	SNR @ <i>Lanaφ</i>
	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Πλάτος καναλιού (nm)	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Πλάτος καναλιού (nm)		
2	492.4	66	492.1	66	128	154
3	559.8	36	559.0	36	128	168
4	664.6	31	664.9	31	108	142
8	832.8	106	832.9	106	103	174

Πίνακας 3. Φασματικά κανάλια χωρικής ανάλυσης 20m και σχετική αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio *SNR*) των δορυφόρων Sentinel-2.

Αριθμός φασματικού καναλιού	S2A		S2B		Ακτινοβολία αναφοράς ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)	SNR @ <i>Lanaφ</i>
	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Πλάτος καναλιού (nm)	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Πλάτος καναλιού (nm)		
5	704.1	15	703.8	16	74.5	117
6	740.5	15	739.1	15	68	89
7	782.8	20	779.7	20	67	105
8a	864.7	21	864.0	22	52.5	72
11	1613.7	91	1610.4	94	4	100
12	2202.4	175	2185.7	185	1.5	100

Πίνακας 4. Φασματικά κανάλια χωρικής ανάλυσης 60m και σχετική αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio *SNR*) των δορυφόρων Sentinel-2.

Αριθμός φασματικού καναλιού	S2A		S2B		Ακτινοβολία αναφοράς ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)	SNR @ <i>Lanaφ</i> .
	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Πλάτος καναλιού (nm)	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Πλάτος καναλιού (nm)		
1	442.7	21	442.2	21	129	129
9	945.1	20	943.2	21	9	114
10	1373.5	31	1376.9	30	6	50

2.3.1 Εξαγωγή δορυφορικών δεδομένων, κατασκευή δεικτών βλάστησης και χρονοσειρών

Η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων πραγματοποιήθηκε με το ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα SNAP (ESA Sentinels Application Platform v6.0.4, <http://step.esa.int>). Για την εξαγωγή των δεδομένων των pixel για τα χωράφια που μελετήθηκαν αρχικά περάστηκαν στο SNAP αρχεία Vector με τα σαφή για κάθε ένα χωράφι όρια. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν μάσκες για κάθε χωράφι, έτσι ώστε να παραλειφθούν τα σημεία της περιφέρειας του χωραφιού τα οποία ενδεχομένως επηρεάζονταν από γειτονικές περιοχές. Οι μάσκες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δεδομένων για τα εικονοστοιχεία των υπό μελέτη χωραφιών (συνολικά 3384 εικονοστοιχεία) και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν χρονοσειρές για τους ακόλουθους δείκτες βλάστησης:

Normalized Difference Vegetation Index,

$$NDVI = \frac{R842 - R665}{R842 + R665}$$

Enhanced Vegetation Index,

$$EVI = 2.5 * \left(\frac{R842 - R665}{R842 + (6 * R665) - (7.5 * R490) + 1} \right)$$

Normalized Difference Red Edge Index,

$$NDRE = \frac{R842 - R705}{R842 + R705}$$

Όπου R_x , η ανακλαστικότητα σε μήκος κύματος x , με το x να υποδεικνύει το κεντρικό μήκος κύματος του αντίστοιχου φασματικού καναλιού του Sentinel-2.

Οι χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης ελέγχθηκαν περαιτέρω για υπολείμματα θορύβου λόγω συννεφιάς για κάθε χωράφι ξεχωριστά, λόγω διαφορετικής γεωγραφικής θέσης του κάθε χωραφιού και οι εσφαλμένες τιμές αφαιρέθηκαν από τις αντίστοιχες χρονοσειρές.

Ακολούθως, οι χρονοσειρές των 3384 εικονοστοιχείων για τους 3 Δ.Β. υποβλήθηκαν σε γραμμική παρεμβολή, παράγοντας καθημερινά δεδομένα για ολόκληρη την περίοδο ανάπτυξης (Οκτώβριος 2017 - Ιούνιος 2018). Η γραμμική μέθοδος παρεμβολής καθώς και η απουσία οποιασδήποτε διαδικασίας εξομάλυνσης στις χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης επιλέχθηκαν έτσι ώστε να διατηρηθεί η μεγαλύτερη δυνατή απλότητα, με σκοπό η όλη

μεθοδολογία να είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε μοντέλα παραγωγικότητας πραγματικού χρόνου. Τα παραπάνω σετ δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων των δεικτών βλάστησης για μεταβαλλόμενα χρονικά διαστήματα ανά την καλλιεργητική περίοδο.

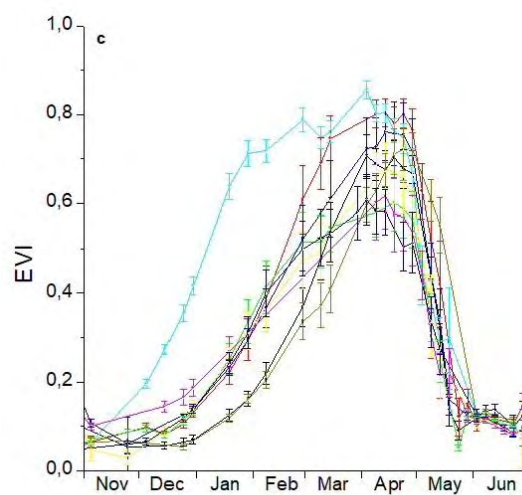
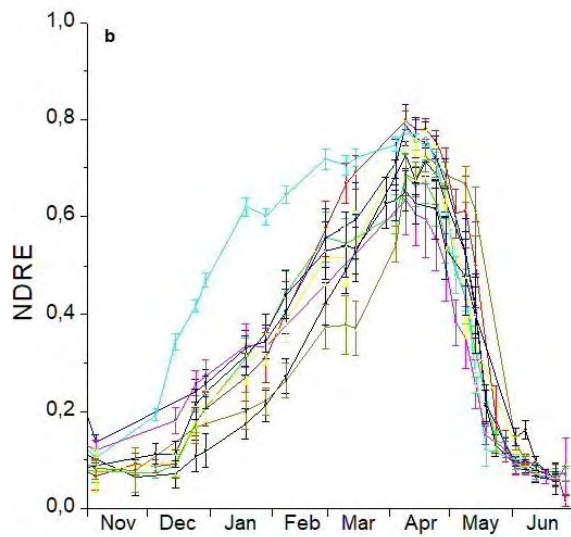
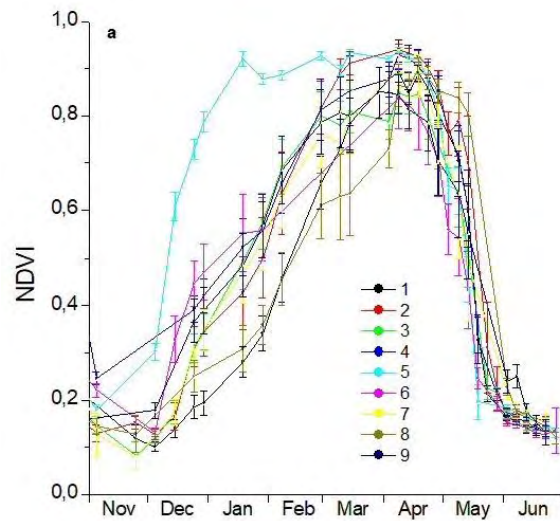
3 Αποτελέσματα

3.1 Χρονοσειρές και εποχιακά πρότυπα δεικτών βλάστησης

Είναι εμφανές πως οι διακυμάνσεις των Δ.Β. αναπαριστούν με ακρίβεια το εποχιακό πρότυπο της καλλιέργειας του χειμερινού σιταριού. Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, οι Δ.Β. ξεκινούν με χαμηλές τιμές κατά τη διάρκεια της σπαρτικής περιόδου (Νοέμβριος), οι οποίες αυξάνονται σταδιακά ως την εποχή της άνθισης, τον Απρίλιο, ενώ στη συνέχεια, κατά την περίοδο ωρίμανσης του σπόρου, το Μάη, ακολουθεί απότομη μείωση των τιμών των Δ.Β. Παρ' όλ' αυτά, υπάρχει μεγάλη παραλλακτικότητα τόσο μεταξύ διαφορετικών χωραφιών όσο και στο εσωτερικό του καθενός, όπως φαίνεται από τις μπάρες σφαλμάτων στο Σχήμα 2. Αυτή οφείλεται κυρίως σε μικρές διαφορές στο χρόνο βλάστησης και άνθισης της κάθε ποικιλίας σιταριού με τις οποίες καλλιεργήθηκαν τα χωράφια. Μικρή παραλλακτικότητα παρατηρήθηκε επίσης και στα εποχιακά πρότυπα χωραφιών τα οποία καλλιεργήθηκαν με την ίδια ποικιλία. Στην περίπτωση αυτή, η παραλλακτικότητα πιθανώς οφείλεται σε διαφορές στη σύσταση του εδάφους των χωραφιών αλλά και στις καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν, όπως η άρδευση, η λίπανση, η ποσότητα του σπόρου που χρησιμοποιήθηκε και η ζιζανιοκτονία (Πίνακας 2.1). Ένας ακόμη παράγοντας που θα μπορούσε να ερμηνεύσει την παραλλακτικότητα αυτή είναι η ύπαρξη ή μη ζιζανίων ή φυτικών υπολειμμάτων στην επιφάνεια του χωραφιού πριν την εκβλάστηση των σπόρων. Το χωράφι 5 είναι το πλέον πρώιμο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3. όπου ο δείκτης NDVI αποκτά αρκετά υψηλές τιμές, σε σχέση με τα υπόλοιπα χωράφια, κατά την χρονική περίοδο μεταξύ σποράς και άνθισης ενώ το χωράφι 8 είναι το πιο όψιμο με τον NDVI αυτού, για την περίοδο που αναφέρθηκε προηγουμένως, να έχει τις χαμηλότερες τιμές (Σχήμα 3), μεταξύ όλων όσων χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αυτή.

3.2 Αξιολόγηση των δεικτών βλάστησης

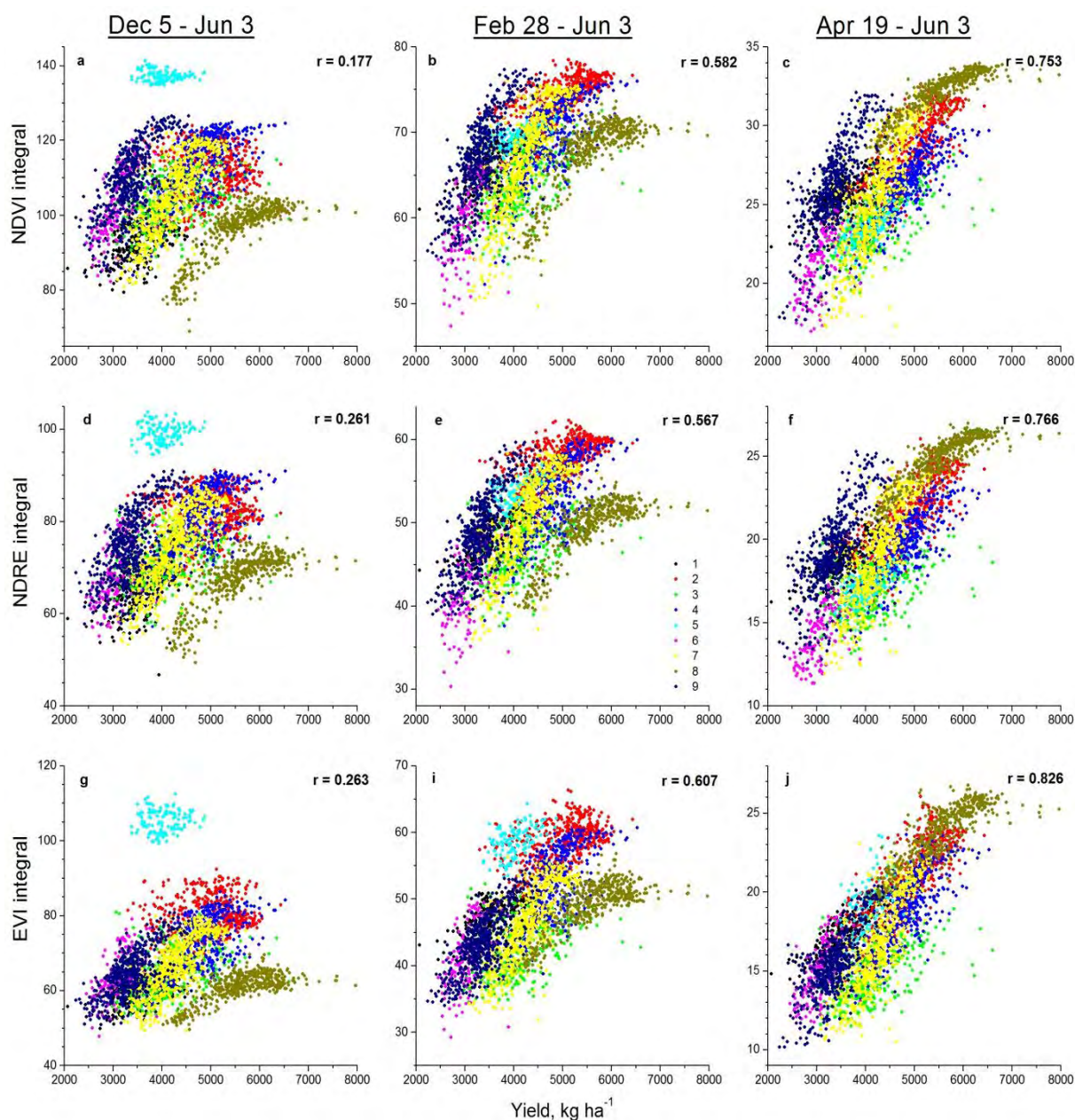
Προκειμένου να αξιολογηθούν οι ΔΒ για την εκτίμηση της απόδοσης των καλλιεργειών, αρχικά, υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών των Δ.Β. για τέσσερα διαφορετικά χρονικά διαστήματα της καλλιεργητικής περιόδου 2017-2018. Στη συνέχεια, τα διάφορα ολοκληρώματα που δημιουργήθηκαν από τους Δ.Β. συσχετίστηκαν με τα δεδομένα απόδοσης, τα οποία προήλθαν από μετρήσεις που πραγματοποίησε ο αισθητήρας με τον οποίο ήταν εξοπλισμένη η θεριζοαλωνιστική μηχανή, κατά τη συγκομιδή. Οι ημερομηνίες



Σχήμα 2: Οι χρονοσειρές των NDVI (a), NDRE (b), EVI (c) για τα 9 χωράφια που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Υπολογίστηκε ο μέσος όρος των δεδομένων όλων των pixel ανά ημερομηνία για κάθε χωράφι. Οι μπάρες σφαλμάτων δείχνουν το \pm SD.

που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικά όρια του κάθε διαστήματος επιλέχθηκαν με βάση τα διάφορα στάδια της καλλιέργειας θεωρώντας ως αρχικό στάδιο τη σπορά και τελευταίο τη συγκομιδή και ήταν οι ίδιες για κάθε χωράφι και κάθε δείκτη βλάστησης. Και τα τέσσερα διαστήματα είχαν ως τελικό τους όριο την ίδια ημερομηνία, 3 Ιουνίου του 2018 και ως αρχικό όριο τις αντίστοιχες κατά σειρά ημερομηνίες: 5 Δεκεμβρίου 2017 (σπορά), 28 Φεβρουαρίου 2018 (βλάστηση), 15 Μαρτίου 2018 και 19 Απριλίου (άνθιση) του 2018. Η αρχική υπόθεση ήταν πως το ολοκλήρωμα ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου ίσως εμφάνιζε μικρότερη συσχέτιση με τα δεδομένα της παραγωγής σε σχέση με το ολοκλήρωμα από την περίοδο της άνθισης ως την συγκομιδή, λόγω του ότι τα προϊόντα της φωτοσύνθεσης στο σιτάρι, μετά την άνθιση, χρησιμοποιούνται εξ ολοκλήρου στη σύνθεση του σπόρου (Gonzalez-Navarro et al. 2016).

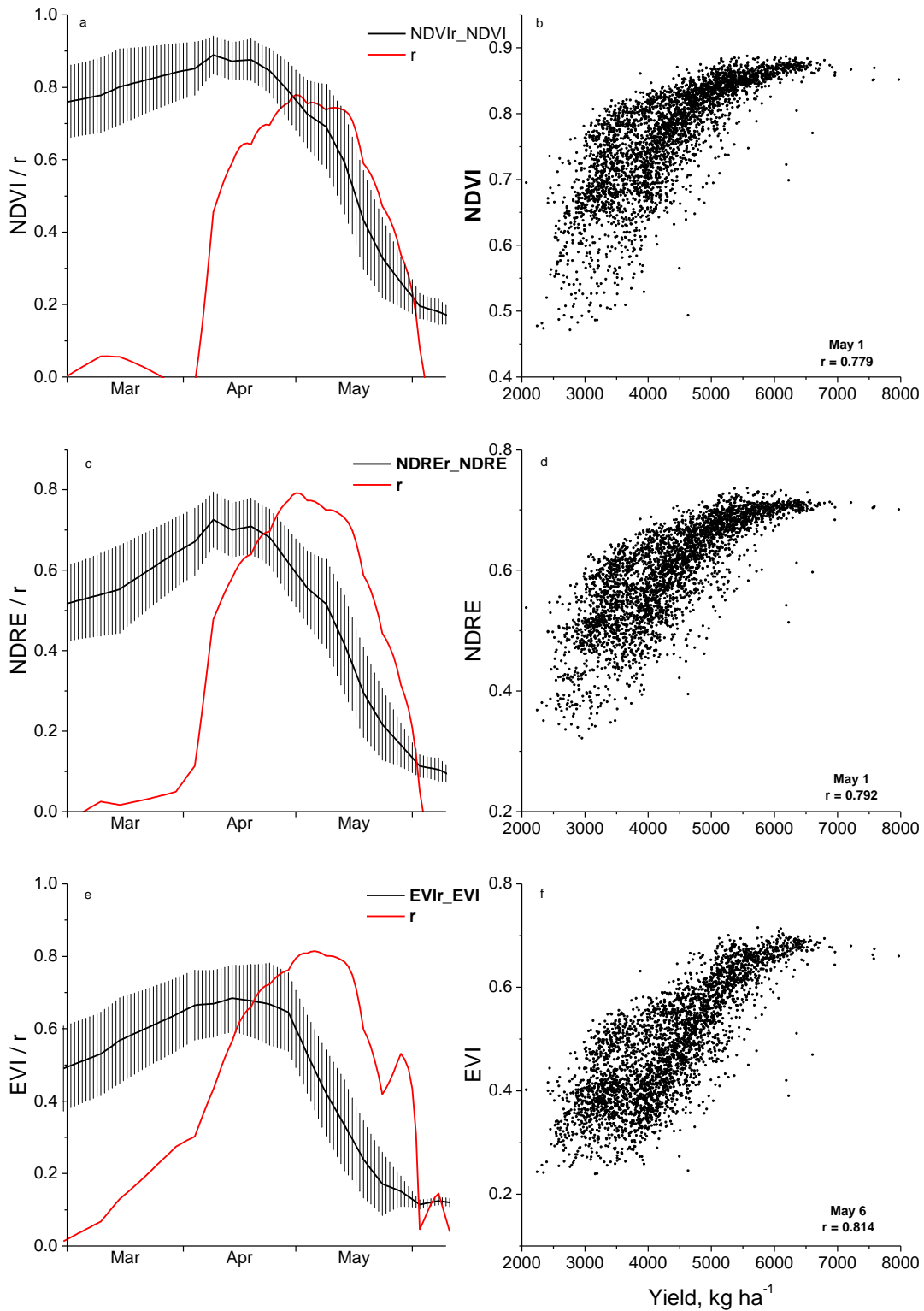
Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, δεν υπάρχει πρακτικά καμία συσχέτιση για κανέναν από τους Δ.Β. μεταξύ ολοκληρωμάτων ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου και παραγωγής, ενώ η συσχέτιση παρουσιάζει αύξηση καθώς η περίοδος του ολοκληρώματος μειώνεται και πλησιάζει την εποχή άνθισης. Είναι άξιο αναφοράς, ότι για όλους τους Δ.Β. (Σχήμα 3 a, d, g) τα χωράφια 5 και 8 είναι ξεκάθαρα χωρισμένα από τα υπόλοιπα, με το πρώτο να εμφανίζει τις υψηλότερες και το δεύτερο τις χαμηλότερες τιμές ολοκληρωμάτων NDVI, σύμφωνα με το πρότυπο των πρώτων μηνών της περιόδου ανάπτυξης. (Σχήμα 2). Για το τελευταίο διάστημα της αναπτυξιακής περιόδου κατά το οποίο όλοι οι Δ.Β. έδειξαν τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την παραγωγή (Σχήμα 3 c, f, j), οι δείκτες NDVI και NDRE έδειξαν παρόμοια απόδοση με μία μικρή σχετικά υπεροχή του NDRE, ενώ ο EVI έδειξε τη μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ των τριών.



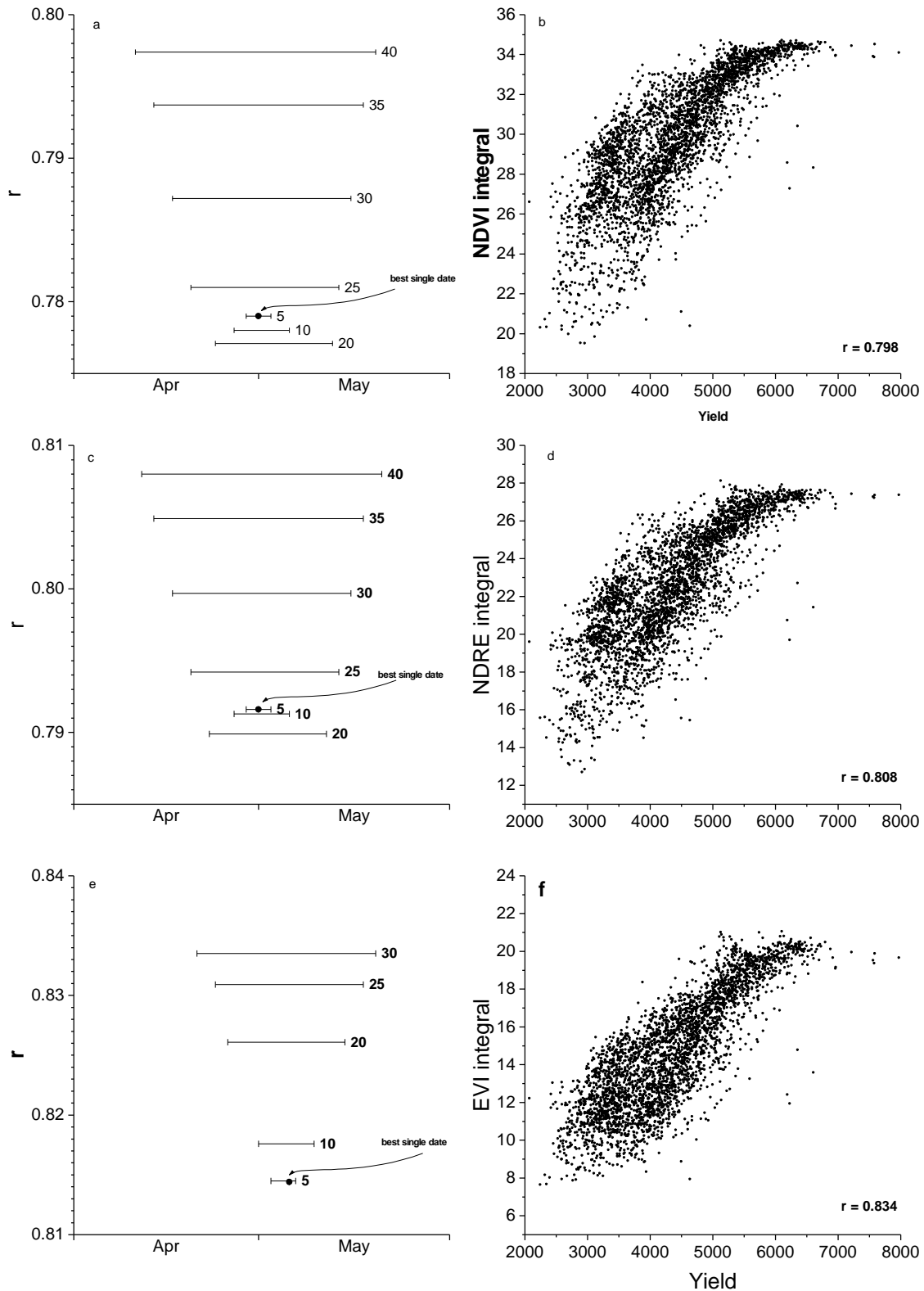
Σχήμα 3 Σχέσεις μεταξύ ολοκληρωμάτων Δ.Β.(NDVI,NDRE,EVI) για 4 χρονικές περιόδους(φαίνονται στην πάνω αριστερή γωνία κάθε γραφήματος) και της τελικής παραγωγής για όλα τα χωράφια. Οι συντελεστές συσχέτισης φαίνονται στην πάνω δεξιά γωνία κάθε γραφήματος.

Παρόλο που, όπως φαίνεται παραπάνω, οι τρεις δείκτες που μελετήθηκαν μπορούν να χρησιμεύσουν ως καλοί εκτιμητές της απόδοσης της καλλιέργειας σιταριού, προφανώς τα δεδομένα που εκτείνονται μέχρι την περίοδο συγκομιδής δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα πρόβλεψης της απόδοσης. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν, σε σχέση με τα τελικά δεδομένα απόδοσης, ολοκληρώματα για διάφορες περιόδους πριν από την ημερομηνία συγκομιδής, καθώς και ημερήσιες τιμές δεικτών βλάστησης. Παραδόξως, οι ημερήσιες τιμές

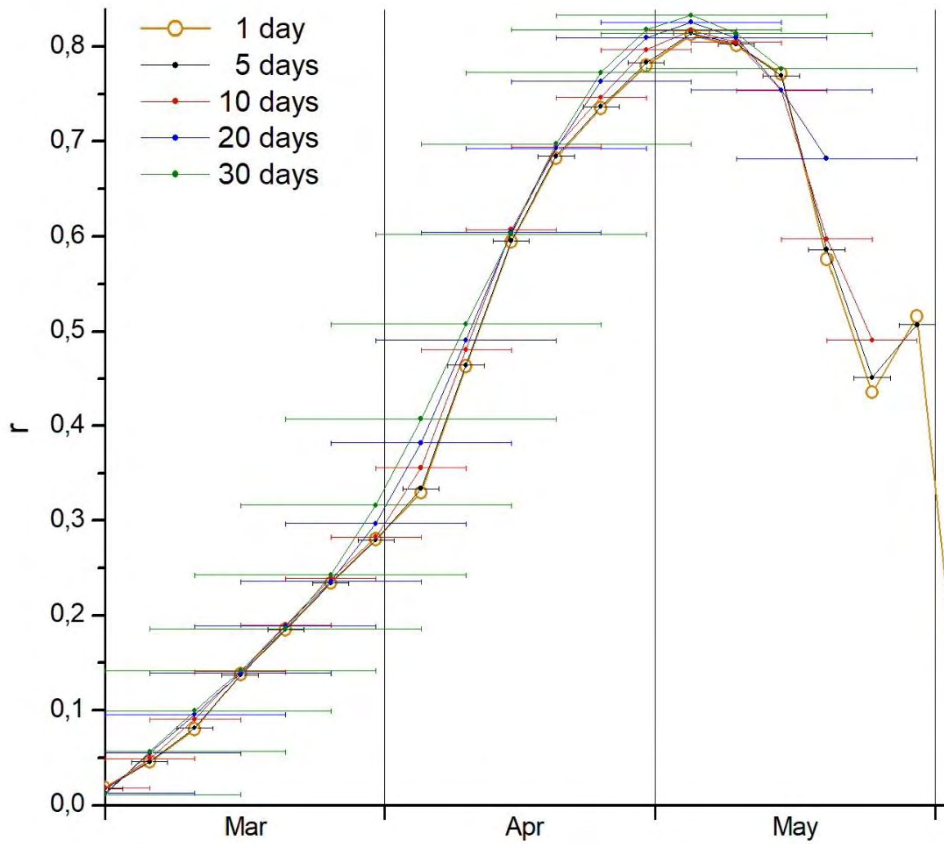
των δεικτών βλάστησης έδειξαν υψηλές συσχετίσεις με την απόδοση κατά την περίοδο γύρω από την ανθοφορία και προς το τέλος της περιόδου ανάπτυξης, όταν δηλαδή τα φυτά αρχίζουν να χάνουν τις χλωροφύλλες τους και τα οι τιμές των δεικτών αρχίζουν να μειώνονται (Σχήμα 4 a, c, e). Οι μέγιστες συσχετίσεις για τους δείκτες NDVI και NDRE εμφανίζονται κατά την 1 Μαΐου ενώ για τον δείκτη EVI στις 6 του ίδιου μήνα (Σχήμα 4 b, d, f), με συντελεστές συσχέτισης ελαφρώς υψηλότερους από εκείνους που αντιστοιχούν στα ολοκληρώματα των δεικτών βλάστησης της τελικής περιόδου ανάπτυξης (Σχήμα 3 c, f, i). Ακολούθως, δοκιμάστηκαν σε σχέση με την απόδοση τα ολοκληρώματα των δεικτών βλάστησης για όλα τα διαστήματα από 5 έως 90 ημέρες, (με ένα βήμα 5 ημερών) που μεσολάβησαν από την αρχή μέχρι το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, τα καλύτερα ολοκληρώματα 5 ημερών όλων των δεικτών βλάστησης εμφανίζουν παρόμοιους συντελεστές συσχέτισης με τους καλύτερους ημερήσιους δείκτες και επικεντρώνονται γύρω από την αντίστοιχη ημέρα. Για τα ολοκληρώματα των NDVI και NDRE 10 έως 20 ημερών δεν παρατηρήθηκε καμία βελτίωση της προβλεψιμότητας της απόδοσης, ενώ οι καλύτερες προβλέψεις παρέχονται από ολοκληρώματα των 40 ημερών. Για τον EVI, όλα τα ολοκληρώματα με διαστήματα έως και 30 ημερών εμφάνισαν βελτιωμένη ικανότητα πρόβλεψης, με υψηλές συσχετίσεις να εμφανίζονται κυρίως το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Απριλίου, αναδεικνύοντας την περίοδο αυτή ως την πιο κατάλληλη για αποτελεσματική πρόβλεψη της παραγωγής.



Σχήμα 4. (a, c, e) Οι χρονοσειρές των Δ.Β. (NDVI, NDRE, EVI) για τους τελευταίους μήνες της καλλιεργητικής περιόδου (μαύρη γραμμή) και συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ημερήσιων τιμών των Δ.Β. και δεδομένων παραγωγής (κόκκινη γραμμή). Τα ημερήσια δεδομένα των Δ.Β. κατασκευάστηκαν από το γραμμικό interpolation των αρχικών δεδομένων για κάθε rixel όλων των χωραφιών που μελετήθηκαν και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των ημερήσιων τιμών για τα 3384 rixel. Οι μπάρες σφαλμάτων δείχνουν το \pm SD. (b, d, f) Σχέσεις μεταξύ Δ.Β. και παραγωγής για την ημερομηνία με τη μέγιστη συσχέτιση. Οι ημερομηνίες με τη μέγιστη συσχέτιση και οι συντελεστές συσχέτισης φαίνονται στην κάτω δεξιά γωνία κάθε γραφήματος.



Σχήμα 5. (a, c, e) Οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ολοκληρωμάτων των Δ.Β.(NDVI, NDRE, EVI) για τα καλύτερα διαστήματα των 5 ως των 40 ημερών και δεδομένων παραγωγής. Το μήκος το μπαρών αντιστοιχεί στον αριθμό ημερών για κάθε ολοκλήρωμα (υποδεικνύεται από τους αριθμούς) και οι θέσεις τους ως προς τον άξονα-χ υποδεικνύουν τις ημερομηνίες των διαστημάτων. Επιπροσθέτως, ο συντελεστής συσχέτισης για την καλύτερη ημερήσια τιμή NDVI απεικονίζεται ως σημείο. (b, d, f) Οι σχέσεις μεταξύ καλύτερου ολοκληρώματος Δ.Β. (όπως φαίνεται στα Σχήματα a, c, e) και παραγωγής. Οι συντελεστές συσχέτισης φαίνονται στην κάτω δεξιά γωνία κάθε γραφήματος.



Σχήμα 6: Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ολοκληρωμάτων του EVI (για διαστήματα 1 έως 30 ημερών) και δεδομένων απόδοσης. Τα μήκη των ράβδων αντιστοιχούν στον αριθμό ημερών για κάθε ολοκλήρωμα και η θέση των ράβδων δείχνει τις πραγματικές ημερομηνίες σε σχέση με τον άξονα χ.

4 Συζήτηση

Τα χωράφια που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη παρουσίασαν σημαντική διακύμανση στην απόδοση, ενώ εμφανής ήταν και η διακύμανση στο εσωτερικό του κάθε χωραφιού. Αυτή η παραλλακτικότητα αποδόθηκε με σαφήνεια και από τους δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα των πολυφασματικών εικόνων του Sentinel-2. Στα 3384 pixels εφαρμόστηκαν resampling και collocation, με σκοπό να γίνει εφικτή η συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων με αυτών της παραγωγής. Οι αποδόσεις κυμάνθηκαν από 2 Mg/εκτάριο έως 8 Mg/εκτάριο, ενώ οι Δ.Β. κυμάνθηκαν, μετά τον Μάρτιο, ως εξής: από 0,45 έως 0,90 για τον NDVI και από 0,30 έως 0,70 για τους NDRE και EVI. Οι Δ.Β. και η μεγάλη παραλλακτικότητα της απόδοσης επέτρεψαν στα απλά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης να επιτύχουν συντελεστές συσχέτισης r 0,753 και 0,766 για τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών των δεικτών NDVI και NDRE αντίστοιχα. Τα ολοκληρώματα του EVI πέτυχαν συσχετίσεις ίσες με 0,826 κάτι που πιθανώς συνέβη λόγω της υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (10x10 m) των αισθητήρων MSI του Sentinel-2. Η σημασία της αναγνώρισης της παραλλακτικότητας της απόδοσης εντός του αγρού μέσω της τηλεπισκόπησης έχει αναφερθεί από αρκετούς συγγραφείς που επίσης προσπάθησαν να την ποσοτικοποιήσουν στο χώρο και στο χρόνο (Dang 2011, Lai et al. 2018). Οι Gaso et al. (2019) χρησιμοποίησαν χρονοσειρές δεδομένων με ανάλυση 30x30 m του Landsat σε απλές μεθόδους παλινδρόμησης και σε μοντέλα καλλιεργειών για να προβλέψουν την απόδοση του χειμερινού σιταριού αλλά δεν ήταν σε θέση να προσδιορίσουν τη διακύμανση της απόδοσης σε κλίμακα χωραφιού. Οι Lyle et al. (2013) χρησιμοποίησαν επίσης δεδομένα του Landsat, αλλά δεν ήταν σε θέση να προσδιορίσουν επαρκώς την εντός του αγρού παραλλακτικότητα στο χειμερινό σιτάρι σε χρονιές με βροχοπτώσεις μετρίου επιπέδου, παρόλο που είχαν καλά αποτελέσματα σε χρόνια με υψηλές ή χαμηλές βροχοπτώσεις. Οι Rudorff et al. (1991) ήταν σε θέση να εξηγήσουν μόνο το 40-60% της παραλλακτικότητας της απόδοσης του σιταριού με τα δεδομένα του LandsatTM.

Οι τρεις κανονικοποιημένοι Δ.Β. απεικονίζουν, σε γενικές γραμμές, την εποχική εξέλιξη της καλλιέργειας του χειμερινού σιταριού αλλά με διαφορετικά πρότυπα. Το σκληρό σιτάρι στη Νότια Ευρώπη φυτεύεται αργά το φθινόπωρο, συνήθως κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου ή του Δεκεμβρίου. Οι νεαροί βλαστοί αναδύονται σύντομα και ολοκληρώνουν το αδέλφωμα κατά τη χειμερινή περίοδο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου οι τρεις Δ.Β. παρουσίασαν μια σταδιακή αύξηση, με τον NDVI να αυξάνεται ταχύτερα από τους άλλους δύο δείκτες. Τα

φυτά εισέρχονται σε ταχεία ανάπτυξη μετά τον Φεβρουάριο μόλις ο καιρός αρχίσει να θερμαίνεται. Στα μέσα Φεβρουαρίου, οι τιμές του NDVI κυμάνθηκαν από 0,5 έως 0,7, ενώ οι τιμές των NDRE και EVI κυμάνθηκαν από 0,3 έως 0,5. Οι υψηλότερες τιμές του NDVI υποδεικνύουν ότι ο δείκτης φθάνει στον κορεσμό αρκετά νωρίς, περιορίζοντας ενδεχομένως τη χρησιμότητά του σε μεταγενέστερα κρίσιμα στάδια της καλλιέργειας. Η επίδραση που έχει ο κορεσμός του NDVI αναγνωρίζεται ως κύριο εμπόδιο για την παρακολούθηση της βιομάζας των καλλιεργειών, καθώς η αναλογική σχέση μεταξύ του δείκτη και της βιομάζας χάνεται όταν το LAI παίρνει τιμές πάνω από 3 (Huete et al. 2002, Prabhakara et al. 2015, Gaso et al. 2019). Ο NDVI έφτασε σχεδόν στο μέγιστο του στα μέσα Μαρτίου, ενώ ο NDRE παρουσίασε κορύφωση ένα μήνα αργότερα, κατά τα μέσα Απριλίου και τέλος, ο EVI στα τέλη Απριλίου. Η άνθηση του σιταριού στην περιοχή της Θεσσαλίας συμβαίνει συνήθως στα μέσα Απριλίου. Η ανθοφορία θεωρείται κρίσιμη περίοδος της καλλιέργειας (Aparicio et al. 2002, Cossani et al. 2009). Τυπικά, η μέγιστη επιφάνεια φύλλων του σιταριού επιτυγχάνεται 10-15 ημέρες πριν από την ανθοφορία (Lopresti et al. 2015). Μεταξύ των τριών Δ.Β., ο EVI ήταν ο μόνος που δεν έφτασε στο μέγιστο κατά τη διάρκεια του σταδίου της άνθισης, επιτρέποντας ακόμα μια διακύμανση για συσχέτιση με την απόδοση κατά τη διάρκεια αυτής της κρίσιμης περιόδου. Αυτό συμφωνεί με τα ευρήματα των Huete et al. (2002) οι οποίοι διαπίστωσαν ότι σε υψηλές τιμές LAI ο EVI δεν φτάνει τόσο γρήγορα σε κορεσμό όσο ο NDVI. Οι Johnson et al. 2016 προτείνουν ότι ο EVI πιθανόν να μετρά διαφορετικές ιδιότητες των καλλιεργειών από ότι ο NDVI. Και οι τρεις Δ.Β. παρουσίασαν μια απότομη πτώση στις αρχές Μαΐου, όταν δηλαδή η καλλιέργεια εισέρχεται στη φάση ωρίμανσης των σπόρων και το LAI μειώνεται γρήγορα καθώς τα φύλλα γηράσκουν.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη περίοδος για την πρόβλεψη της πιθανής απόδοσης, τα ημερήσια δεδομένα των Δ.Β. που προέκυψαν με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής για κάθε pixel, εξετάστηκαν έναντι της αντίστοιχης απόδοσης της συλλεκτικής μηχανής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ικανότητα πρόβλεψης είναι χαμηλή στην αρχή της περιόδου ανάπτυξης και αυξάνεται καθώς η περίοδος πλησιάζει στο στάδιο της ανθοφορίας. Για τους δύο από τους τρεις δείκτες, τους NDVI και NDRE, οι μέγιστες συσχετίσεις με την απόδοση λήφθηκαν στα τέλη Απριλίου, λίγο μετά την ανθοφορία. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου τα φυτά αρχίζουν να χάνουν τις χλωροφύλλες τους (Rafiqul Islam et al. 2014) και έτσι οι τιμές των Δ.Β. μειώνονται (Σχήμα 4 a, c, e). Για την περιοχή της Μεσογείου, αυτό θεωρείται επίσης μια κρίσιμη περίοδος για τις τελικές αποδόσεις (Cossani et al. 2009, Diacono et al. 2012), επειδή τα φυτά κατευθύνουν τα φωτοσυνθετικά τους προϊόντα

στον σπόρο, μια διαδικασία που μπορεί επηρεαστεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό από βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις, όπως για παράδειγμα οι θερμές καιρικές συνθήκες, το υδατικό στρες, η έλλειψη αζώτου ή τυχόν ασθένειες. Στην πραγματικότητα, η επιβίωση και η δραστηριότητα της καλλιέργειας εξαρτώνται από την επαρκή πρόσληψη αζώτου και νερού (Shi et al. 2014). Οι υψηλότερες τιμές των NDVI και NDRE καταδεικνύουν μία δραστήρια καλλιέργεια που μπορεί να υποστηρίξει υψηλότερες αποδόσεις. Τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα ευρήματα των Ren et al. (2008) και Becker-Reshef et al. (2010) που έχουν βρει ότι η καλύτερη συσχέτιση μεταξύ NDVI και απόδοσης σιταριού συμπίπτει με την περίοδο του υψηλότερου LAI που επιτυγχάνεται λίγες ημέρες πριν από την ανθοφορία, αλλά συμφωνούν με τους Lorpresti et al. (2015) που διαπίστωσαν ότι η πρόβλεψη της απόδοσης του σιταριού είναι η καλύτερη δυνατή 30 ημέρες πριν από τη συγκομιδή, μετά τα στάδια της ανθοφορίας. Ο EVI παρουσίασε την υψηλότερη συσχέτιση με την απόδοση των καλλιεργειών στις αρχές Μαΐου, λίγες ημέρες αργότερα από ότι ο NDVI και ο NDRE και επίσης ξεπέρασε τους άλλους δύο δείκτες, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης ήταν ελαφρώς υψηλότερος. Παρόμοια ευρήματα αναφέρονται από τους Johnson et al. (2016), οι οποίοι υποδεικνύουν ότι ο MODIS-EVI ήταν πιο αποτελεσματικός προγνωστικός παράγοντας της απόδοσης του χειμερινού σιταριού σε σχέση με τον MODIS-NDVI.

Είναι γενικώς ευρέως αποδεκτό ότι η συσχέτιση ενός Δ.Β. με την απόδοση συνήθως αυξάνεται όταν, αντί για δεδομένα μεμονωμένων ημερομηνιών, ενσωματωθούν σε μια περίοδο ανάπτυξης πολλαπλά δεδομένα των Δ.Β. (Labus et al. 2002, Lai et al. 2018). Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των Δ.Β. για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο, καθώς επίσης και για διάφορες περιόδους πριν από την ημερομηνία συγκομιδής. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τους Becker-Reshef et al. (2010) ή τους Lai et al. (2018) δεν εφαρμόστηκε καμία επεξεργασία εξομάλυνσης ή φιλτραρίσματος στα δεδομένα μας εκτός από τις απλές γραμμικές παρεμβολές. Συνεπώς, κατασκευάστηκαν για κάθε pixel, τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών των Δ.Β. για διαστήματα 5, 10, 15 ημερών κ.ο.κ. έως τις 90 ημέρες, με βήμα 5 ημερών και εξετάστηκαν και πάλι έναντι αντίστοιχων δεδομένων απόδοσης. Οι υπολογισμοί περιλάμβαναν ολόκληρη την περίοδο ανάπτυξης, αλλά τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ επικεντρώνονται γύρω από τις ημερομηνίες κατά τις οποίες παρατηρήθηκαν οι μέγιστες συσχετίσεις των τριών Δ.Β. (σχήμα 5 α, c, e). Το βήμα των 5 ημερών επιλέχθηκε επειδή αντιστοιχεί στη συχνότητα επανεπίσκεψης των Sentinel-2. Στόχος ήταν να προσδιοριστούν τα κατάλληλα χρονικά διαστήματα και οι κατάλληλοι δείκτες για μεγάλης ακρίβειας πρόβλεψη της απόδοσης του χειμερινού σιταριού. Τα αποτελέσματα

έδειξαν ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ολοκληρώματος των Δ.Β. για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο και της απόδοσης, επιβεβαιώνοντας επίσης την αρχική μας υπόθεση. Η συσχέτιση γίνεται όλο και μεγαλύτερη, καθώς το διάστημα του ολοκληρώματος των Δ.Β. γίνεται όλο και μικρότερο και πλησιάζει την περίοδο άνθησης, παρόμοια με τα μοτίβα των μεμονωμένων ημερών. Οι NDVI και NDRE μπορούν να παρέχουν επαρκή πρόβλεψη για την απόδοση στο τέλος του μήνα Απρίλη χρησιμοποιώντας ένα ολοκλήρωμα Δ.Β. 5 ημερών, που είναι και η μικρότερη περίοδος η οποία περιλαμβάνει τουλάχιστον μία πραγματική δορυφορική καταγραφή μεταξύ των δεδομένων, με τον NDRE να παρέχει ελαφρώς καλύτερες προβλέψεις. Οι καλύτερες προβλέψεις επιτεύχθηκαν από τον EVI, αλλά η βέλτιστη περίοδος καθυστερεί για σχεδόν 6 ημέρες και παρατηρείται στις αρχές του Μαΐου. Για να επιτευχθεί με τον NDRE παρόμοια ακρίβεια με αυτή του EVI, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ολοκλήρωμα για το 40ήμερο διάστημα, μια επιλογή που θα παρατείνει την περίοδο πρόβλεψης μετά τα μέσα Μαΐου, πολύ κοντά στη συγκομιδή. Από την άλλη πλευρά, το ολοκλήρωμα του EVI για το διάστημα των 5 ημερών στο τέλος του Απριλίου (Σχήμα 6) περιορίζει την ακρίβεια της πρόβλεψης στο ίδιο επίπεδο με το αντίστοιχο ολοκλήρωμα για τον NDVI. Συμπερασματικά, οι προβλέψεις υψηλής ακρίβειας για την απόδοση σκληρού σιταριού μπορούν να ληφθούν κατά τη περίοδο στα τέλη του Απριλίου με τη χρήση ολοκληρωμάτων του NDRE με διάστημα 5 ημερών. Οι προβλέψεις μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω χρησιμοποιώντας τον δείκτη EVI και / ή αυξάνοντας τα διαστήματα ημερών των ολοκληρωμάτων.

Οι υψηλές συσχετίσεις που επιτεύχθηκαν στην παρούσα μελέτη επιβεβαιώνουν την ύπαρξη γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των αποδόσεων χειμερινού σιταριού και των παραγόμενων από δορυφορικά δεδομένα Δ.Β. Ωστόσο τα δεδομένα θα πρέπει να ενσωματωθούν σε μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών όπως το GRAMI (Padilla et al. 2012) ή το SAFY (Gaso et al. 2019) έτσι ώστε να εξεταστούν για την ικανότητα πρόβλεψης σε διαφορετικές εποχές ή κλιματικές περιοχές.

Οι παραπάνω πληροφορίες είναι πολύ χρήσιμες για τους οργανισμούς εμπορίας σιτηρών, τους αντιπροσώπους και τις εταιρείες συγκομιδής, αλλά, δυστυχώς, περιορισμένου ενδιαφέροντος για τους αγρότες. Με ακρίβεια προβλέψεων περίπου 80%, οι κίνδυνοι διαπραγμάτευσης και εμπορίας σχεδόν εξαλείφονται, αλλά οι αγρότες δεν μπορούν να κερδίσουν απολύτως τίποτα από αυτό. Στην πραγματικότητα, οι γεωργοί θα μπορούσαν να επωφεληθούν από την πρόβλεψη της απόδοσης μόνο εάν μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τις πληροφορίες για να βελτιστοποιήσουν τις εισροές τους, για να μειώσουν το κόστος παραγωγής και να βελτιώσουν τις αποδόσεις τους. Για παράδειγμα, η τεχνολογία γεωργίας ακριβείας προσφέρει την ευκαιρία

να εφαρμοστούν εισροές (π.χ. λιπάσματα) σε μεταβλητές τιμές ανάλογα με τις ανάγκες των φυτών. Πολλοί από τους αλγόριθμους λίπανσης του χειμερινού σιταριού που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό βασίζονται κυρίως στην ανάκτηση των θρεπτικών ουσιών που αναμένεται να απομακρυνθούν από την παραγωγή (Solie et al. 2012). Η προβλεπόμενη απόδοση υπολογίζεται εμπειρικά από τις συνεντεύξεις των καλλιεργητών και των εμπειρογνομόνων, επομένως οι προβλέψεις απόδοσης κατά τη διάρκεια των περιόδων λίπανσης της καλλιέργειας θα ήταν εξαιρετικά πολύτιμες πληροφορίες. Τα αζωτούχα λιπάσματα στο χειμερινό σιτάρι της Νότιας Ευρώπης συνήθως χωρίζονται σε 2 έως 3 κλάσματα, τα πρώτα εφαρμόζονται στο στάδιο του αδελφώματος, στα τέλη Ιανουαρίου ή στις αρχές Φεβρουαρίου, το δεύτερο κλάσμα κατά τη διάρκεια της επιμήκυνσης του στελέχους, στα μέσα Μαρτίου, και μερικές φορές, όταν αναμένονται υψηλές αποδόσεις, ένα τρίτο κλάσμα εφαρμόζεται στο στάδιο των φύλλων σημαίας στις αρχές Απριλίου για να διασφαλιστεί επίσης υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες σιτηρών. Δυστυχώς, η ακρίβεια της πρόβλεψης απόδοσης με τον EVI ακόμη και στις αρχές Απριλίου ήταν κάτω από 30%, ενώ ο NDVI και ο NDRE δεν έδωσαν καμία συσχέτιση.

5 Συμπεράσματα

Η υψηλή χωρική ανάλυση των πολυφασματικών δεδομένων που ανακτήθηκαν από τον Sentinel-2 επέτρεψε την πρόβλεψη των αποδόσεων σκληρού σιταριού με υψηλή ακρίβεια, περίπου 80%, τριάντα έως σαράντα ημέρες πριν από τη συγκομιδή. Η πρόβλεψη βασίζεται σε πληροφορίες από τα δεδομένα NDVI, NDRE ή EVI που παρουσιάζουν μια γραμμική συσχέτιση με την απόδοση. Οι NDVI και NDRE παρουσίασαν παρόμοια απόδοση, με μια μικρή υπεροχή του NDRE, ενώ ο EVI ξεπέρασε τους άλλους δύο Δ.Β. αλλά με μια ελαφριά καθυστέρηση 6 ημερών στη μέγιστη ακρίβεια πρόβλεψης. Η βέλτιστη περίοδος για την πρόβλεψη της απόδοσης είναι στα τέλη Απριλίου, σύντομα μετά την ανθοφορία, χρησιμοποιώντας ολοκληρώματα NDRE 5 ημερών. Οι προβλέψεις μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω με χρήση του EVI ή αύξηση των διαστημάτων ολοκλήρωσης. Η υψηλή ακρίβεια των πληροφοριών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους αντιπροσώπους, τους εμπόρους και τις εταιρείες παραγωγής ζυμαρικών, αλλά δεν έχει αξία για τους αγρότες, διότι κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου δεν μπορούν πλέον να παρέμβουν στην καλλιέργεια.

Βιβλιογραφία

1. A.P.Barnes, I. V.-B. (2019, Μάρτιος). Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. *Environmental Science and Policy*, 93, σσ. 66-74.
2. Anna Bach-Faig (a1), E. M.-M. (2011, Δεκέμβριος 13). Mediterranean diet pyramid today. Science and cultural updates. *Public health nutrition*, σσ. 2274-2284.
3. Anna-María Magallanes-López, K. A.-D.-S. (2017, May). Grain quality traits of commercial durum wheat varieties and their relationships with drought stress and glutenins composition. *Journal of Cereal Science*, σσ. 1-9.
4. Aparicio, N. V. (2002). Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science* 42, σσ. 1547–1555.
5. Balwant Singh, S. M. (2018). Crop Phenomics for Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. Στο *Biochemical, Physiological and Molecular Avenues for Combating Abiotic Stress Tolerance in Plants* (σσ. 277-296).
6. Baret, F. G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*(35), σσ. 161–173.
7. Barnes, E. C. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data.
8. Basso, B. L. (2016). A Comprehensive Review of the CERES-Wheat, Maize and Rice Models Performances. *Advances in Agronomy*, σσ. 27-132.
9. Basso, B. L. (2016). A Comprehensive Review of the CERES-Wheat, Maize and Rice Models Performances. *Advances in Agronomy* (136), σσ. 27-132. Ανάκτηση από doi.org/10.1016/bs.agron.2015.11.004
10. Becker-reshef, I. V. (2010). A generalized regression based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*(114), σσ. 1312–1323.
11. Bhattacharya, B. M. (2011). Efficiency based wheat yield prediction in a semi-arid climate using surface energy budgeting with satellite observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, σσ. 1394-1408.

12. Cossani, C. S. (2009). Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Research* 112, σσ. 205-213.
13. Dang, Y. P. (2011). Identifying the spatial variability of soil constraints using multi-year remote sensing. *Field Crops Research*, σσ. 248-258.
14. Diacono, M. C. (2012). Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research*(131), σσ. 49–62.
15. Douglas K. Bolton, M. A. (2013, May 15). Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, σσ. 74-84.
16. Duchemin, B. M. (2008). A simple algorithm for yield estimates: evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling and Software*(23), σσ. 876–892.
17. Fadia Chairi, R. S.-B.-T. (2019, August 1). Agronomic and physiological traits related to the genetic advance of semidwarf durum wheat: The case of Spain . *Plant Science*.
18. Gaso, D. B. (2019). Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images. *Computers and Electronics in Agriculture*(159), σσ. 75-83.
19. Gonzalez-Navarro, O. G. (2016). Variation in developmental patterns among elite wheat lines and relationship with spike fertility. *Field Crops Research* 196, σσ. 294–304.
20. H. Fang, S. L. (2008). Leaf Area Index Models. *Encyclopedia of Ecology*.
21. H. Fang., S. L. (2008). Leaf area index models. Στο *Encyclopedia of ecology*.
22. Hatfield, J. (1983). Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. *Remote Sensing of Environment* , σσ. 301-311.
23. Hayes, M. D. (1996). Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing* , σ. 3189–3200.
24. Horning, N. (2008). Remote Sensing. *Encyclopedia of Ecology*.

25. Huete, A. D. (2002). Overview of 437 the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*(83), σσ. 195-213.
26. Jianqiang Ren, Z. C. (2008, December). Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, σσ. 403-413.
27. Johnson, M. H. (2016). Crop yield forecasting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 218–219, σσ. 74–84.
28. Juan José Hidalgo-Moraa, A. G.-V.-S.-Á.-P. (2020, February). The Mediterranean diet: A historical perspective on food for health. *Maturitas*, σσ. 65-69.
29. Kastens, J. K. (2005). Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery. *Remote Sensing of Environment*, σ. 341–356.
30. Kirkham, M. (2014). Stress-Degree-Day Concept and Crop Water Stress Index. *Principles of Soil and Plant Water Relations (Second Edition)*.
31. Labus, M. N. (2002). Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, σ. 4169–4180.
32. Lai, Y. P. (2018). An empirical model for prediction of wheat yield, using time-integrated Landsat NDVI. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, σσ. 99-108.
33. Lambin, E. (2001). Remote Sensing and Geographic Information Systems Analysis. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*.
34. Lenny Wall, D. L.-M. (2008, March 25). The early explanatory power of NDVI in crop yield modelling. *International Journal of Remote Sensing* , σσ. 2211-2225.
35. Lyle, G. L. (2013). Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale. *Remote Sensing* 5, σσ. 1549–1567.
36. M.Weiss, F. G. (2020, January). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, σσ. 111-402.

37. Ma, Y. (2019, Νοεμβρίου 15). Seed coating with beneficial microorganisms for precision agriculture. *Biotechnology Advances*, 37(7), σσ. 107-423.
38. Mariano F.Lopresti, C. M. (2015, September). Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. *Information Processing in Agriculture*, σσ. 73-84.
39. Moriondo, M. M. (2007). A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy* , σσ. 266-274.
40. Nagy, A. F. (2018). Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Computers and Electronics in Agriculture* , σσ. 41-49.
41. Onur Satir, S. B. (2016, June). Crop yield prediction under soil salinity using satellite derived vegetation indices. *Field Crops Research*, σσ. 134-143.
42. Padilla, F. M.-D. (2012). Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the 473 GRAMI model and satellite imagery. *Field Crops Research*(130), σσ. 145–154.
43. Prabhakara, K. D. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. . *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 39, σσ. 88–102.
44. Prey, L. S. (2019). Simulation of satellite reflectance data using high frequency ground based hyperspectral canopy measurements for in-season estimation of grain yield and grain nitrogen status in winter wheat. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , σσ. 176-187.
45. Prince, S. (1991). A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*(12), σσ. 1313–1330.
46. Quarmby, N. M. (1993). The use of multitemporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing* , σσ. 199-210.
47. R. Jay Widmer MD, P. A. (2015, March). The Mediterranean Diet, its Components, and Cardiovascular Disease. *The American Journal of Medicine*, σσ. 229-238.
48. Rafiqul Islam M., S. H. (2014). Leaf chlorophyll dynamics in wheat based on SPAD meter reading and its relationship with grain yield. *Scientia Agriculturae*, 8 (1), σσ. 13-18 .

49. Ren, J. C. (2008). Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10(4), σσ. 403–413.
50. Riad Balaghi, B. T. (2008, December). Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, σσ. 438-452.
51. Ritchie, J. O. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: A user oriented wheat yield model. ARS wheat yield project. *USDA ARS*, σ. 159–175.
52. Robin Gebbers, V. I. (2010, February 12). Precision Agriculture and Food Security. *Science*, 327(5967), σσ. 828-831.
53. Rouse, J. H. (1974). Monitoring vegetation systems 509 in the great plains with ERTS. *Third ERTS-1 Symposium*, σσ. 309–317.
54. Royo C., S. J. (2017). Wheat: A Crop in the Bottom of the Mediterranean Diet Pyramid. (IntechOpen, Επιμ.) *Mediterranean Identities - Environment, Society, Culture*.
55. Rudorff, B. a. (1991). Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. *International Journal of Remote Sensing* 12, σσ. 2477–2484.
56. Salazar, L. K. (2007). Use of remote sensing data for estimation of winter wheat yield in the United States. *International Journal of Remote Sensing* , σ. 3795–3811.
57. Shi, J. Y.-G. (2014). Dynamic responses of wheat to drought and nitrogen stresses during re-watering cycles. *Agricultural Water Management* 146, σσ. 163–172.
58. Silvestro, P. P. (2017). Estimating wheat yield in China at the field and district scale from the assimilation of satellite data into the Aquacrop and simple algorithm for yield (SAFY) models. *Remote Sensing* , σσ. 1–24.
59. Solie, J. D. (2012). Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. *Agronomy Journal* 104, σσ. 378–387.
60. Sudduth, K. D. (2012). Yield Editor 2.0: Software for Automated Removal of Yield Map Errors. *ASABE Meeting Presentation: 121338243*, (σσ. 1-14).
61. Tobias Johnen, U. B. (2014, January). An analysis of factors determining spatial variable grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, σσ. 297-306.

62. Van Evert, F. K. (1994). CropSyst: A Collection of Object-Oriented Simulation Models of Agricultural Systems. *Agronomy Journal*(86), σσ. 325-331.
63. Vandiepen, C. W. (1989). WOFOST - A simulation 534 model of crop production. *Soil Use and Management*(5), σσ. 16-24.
64. Vergauwen D., D. S. (2017, September 11). From early farmers to Norman Borlaug — the making of modern wheat. *Current biology*, σσ. R858-R862.
65. W.Leino, L. A. (2010, September). Re-evaluating the history of the wheat domestication gene NAM-B1 using historical plant material. *Journal of Archaeological Science*, pp. 2303-2307.
66. Wiegand, C. L. (1990). Use of Spectral Vegetation Indices to Infer Leaf 543 Area, Evapotranspiration and Yield: I. Rationale. *Agronomy Journal* , σσ. 623-629.
67. X.E. Pantazi, D. M. (2016, February). Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, σσ. 57-65.
68. Xie, Q. D. (2019). Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, σσ. 187-195.
69. Παπακώστα-Τασοπούλου, Δ. (2012). Σιτάρι. Στο Δ. Παπακώστα-Τασοπούλου, *Σιτηρά και Ψυχανθή* (σσ. 111-146).