

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



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΙΤΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ SENTINEL-2

Growth and water status measurements in wheat for the development of a yield prediction model
using Sentinel-2 satellite images.

Μεγγούδη Σοφία

Επιβλέπων καθηγητής: Κυπαρίσσης Άρης

Μάιος 2020

Βόλος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΙΤΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ SENTINEL-2

Growth and water status measurements in wheat for the development of a yield prediction model using Sentinel-2 satellite images.

Μεγγούδη Σοφία

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Άρης Κυπαρίσσης (επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ευθυμία Λεβίζου (μέλος) Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Χρήστος Καβαλάρης (μέλος) Ε.ΔΙ.Π., Διδάκτωρ Γεωργικής Μηχανολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1 ΣΙΤΑΡΙ	3
1.1.1. Προέλευση και Εξημέρωση.....	3
1.1.2. Ταξινόμηση	3
1.1.3. Καλλιέργεια και Παραγωγή Σιταριού	4
1.1.4. Οικολογικές απαιτήσεις.....	5
1.1.5.Χρησιμότητα	6
1.2. ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	6
1.3. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	7
1.4. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	8
1.5. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	9
1.5.1. Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	10
1.5.2 Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης – EVI (Enhanced Vegetation Index)	11
1.5.3. Εδαφικά Προσαρμοσμένος Δείκτης Βλάστησης- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index).....	11
1.5.4. Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Κόκκινης Ακμής - NDRE (Normalized Difference of Red Edge).....	11
1.5.5. Δείκτης Νερού Κανονικοποιημένης Διαφοράς- NDWI (Normalized Difference Water Index)	12
1.6. ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΙ SENTINEL-2	12
1.7. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ.....	13
1.8. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	14
1.9. LUE MODELS (LIGHT USE EFFICIENCY).....	15
1.9. ΣΚΟΠΟΣ.....	16
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	17
2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΑΓΡΟΣ.....	17
2.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	18
2.2.1. Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI).....	18
2.2.2. Δυναμικό Νερού	19
2.3. ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	19
2.4. ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ	22
2.5. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	22
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	24
3.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	24
3.1.1. Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI).....	24
3.1.2. Δυναμικό νερού (Ψ).....	24
3.2. ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	25
3.3. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ	28

3.3.1. Sentinel-2 – LAI.....	28
3.3.2. Sentinel-2 –Δυναμικό νερού (Ψ)	28
3.4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	29
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	37
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	41

Περίληψη

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός μοντέλου παραγωγικότητας για την εκτίμηση και πρόβλεψη της παραγωγής σκληρού σίτου, βασισμένο σε δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2. Το μοντέλο βασίστηκε στην προσέγγιση αποδοτικότητας χρήσης φωτός και για τη διαμόρφωσή του χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου οικοφυσιολογικών παραμέτρων. Η αξιολόγησή του πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης με την τελική παραγωγή, η οποία μετρήθηκε με μηχανή συγκομιδής εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό, ο οποίος περιελάμβανε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις με ακαλλιέργεια και συμβατική κατεργασία. Έτσι, παράλληλος στόχος ήταν και η αποτίμηση των καλλιεργητικών πρακτικών σε επίπεδο παραγωγής.

Οι μεταχειρίσεις ακαλλιέργειας απέδωσαν μεγαλύτερη παραγωγή συγκριτικά με την συμβατική καλλιέργεια. Ωστόσο, η έντονη διαφοροποίηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους μεταξύ των μεταχειρίσεων, φαίνεται να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που ερμηνεύει τις διαφορές αυτές.

Οι χρονοσειρές δεικτών βλάστησης που προέκυψαν από τα δορυφορικά δεδομένα αποτυπώνουν ικανοποιητικά την αναπτυξιακή πορεία της καλλιέργειας και παρουσιάζουν καλές συσχετίσεις με τις μετρήσεις πεδίου.

Το μοντέλο αποδοτικότητας χρήσης φωτός που αναπτύχθηκε περιελάμβανε scalars για τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και του νερού. Δοκιμάστηκαν διάφορες εκδόσεις του μοντέλου σε σχέση με τη διαμόρφωση των scalars και το χρονικό διάστημα που παρέχει την καλύτερη εκτίμηση και πρόβλεψη της παραγωγής. Λόγω της έντονης διαφοροποίησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, οι αρχικές εκδόσεις του μοντέλου δεν απέδωσαν ιδιαίτερα υψηλές συσχετίσεις με την τελική παραγωγή. Ωστόσο, με την ενσωμάτωση επιπρόσθετου εδαφικού scalar, προέκυψε ικανοποιητική εκτίμηση της παραγωγής με συντελεστή συσχέτισης $R = 0.756$ για το χρονικό διάστημα από την ανθοφορία μέχρι τη συγκομιδή. Επιπροσθέτως, βρέθηκε ότι η επίδραση της υδατικής κατάστασης, εναλλακτικά προς το scalar νερού υπολογισμένου από μετεωρολογικά δεδομένα, μπορεί να ενσωματωθεί μέσω scalar νερού υπολογισμένου από δορυφορικά δεδομένα και συγκεκριμένα από τον δείκτη νερού NDWI. Η νωρίτερη πρόβλεψη της παραγωγής με σχετικά ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης επιτυγχάνεται περίπου δυο μήνες πριν τη συγκομιδή με $R = 0.608$, παρέχοντας τη δυνατότητα εφαρμογής πρακτικών γεωργίας ακριβείας με στόχο την περεταίρω βελτιστοποίηση της παραγωγής και αποτελώντας σημαντική πληροφορία για την κατάρτιση σχεδίων έγκαιρης συγκομιδής και την οργάνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας των εμπλεκόμενων φορέων.

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από την Barilla Hellas, Πρόγραμμα Ελληνικού Σίτου MISKO, στο πλαίσιο του έργου: *«Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής του σίτου με τη χρήση δορυφορικών εικόνων από τους δορυφόρους Sentinel της ESA. - Β. Μετρήσεις αναπτυξιακών παραμέτρων και υδατικής κατάστασης»*, στην οποία εκφράζουμε τις ευχαριστίες μας.

1. Εισαγωγή

1.1 Σιτάρι

1.1.1. Προέλευση και Εξημέρωση

Το σιτάρι είναι μία προϊστορική καλλιέργεια που η περιοχή καταγωγής του και η περιοχή που καλλιεργήθηκε για πρώτη φορά δεν έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια. Χρονολογείται από μελέτες ότι το 8.000 π.Χ πρωτοεμφανίστηκαν οι διπλοειδείς και οι τετραπλοειδείς γενότυποι στις λεκάνες των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη (Smith 1995).

Οι κοινωνικές, πολιτιστικές και οικονομικές αλλαγές από μικρούς οικισμούς στην διαμόρφωση του σύγχρονου κόσμου και πολιτισμού είναι έμμεσα συνδεδεμένες με την γεωργία και στην προκειμένη περίπτωση την εξημέρωση του σιταριού. Μεταξύ του 7500 και 6700 π.Χ. χρονολογούνται τα πρώτα ευρήματα των δύο ειδών καλλιεργημένου σίτου (*Triticum monococcum* L. και *T. turgidum* L. *var. vavilense*) (Xipingetal. 2002).

Οι αρχαίες ποικιλίες που είχαν σημαντικό ρόλο στην ζωή του ανθρώπου είναι το σιτάρι emmer, einkorn και kamut. Ευρήματα από emmer και einkorn έχουν βρεθεί σε περιοχές της Μέσης Ανατολής που χρονολογούνται από την 7η χιλιετία π.Χ. Οι άγριοι πρόγονοι του σιταριού για την διαίωση του είδους τους είχαν στάχεις με εύθραυστη ράχη αλλά στη πορεία της εξημέρωσης τους έχασαν αυτήν την ικανότητα της διασποράς των σπόρων, αλλά και του λήθαργου. Έχουν επέλθει πολλές αλλαγές μορφολογικές, φυσιολογικές και προσαρμοστικές από τις αρχαίες ποικιλίες μέχρι τις σύγχρονες ημι-νάνες ποικιλίες, που εμφανίστηκαν στα μέσα του εικοστού αιώνα με τα γονίδια μειωμένου ύψους (Rht) (Vergauwen 2017). Οι ημι-νάνες ποικιλίες καλλιεργούνται σήμερα και προσφέρουν υψηλή παραγωγικότητα.

1.1.2. Ταξινόμηση

Όσον αναφορά την κατάταξη το σιτάρι ανήκει στην οικογένεια των αγρωστωδών Gramineae και είναι του γένους *Triticum* sp. Το γένος *Triticum* περιέχει τρεις κύριες ομάδες χρωμοσωμάτων (A, B, D), βάσει των οποίων αυτών γίνεται η κατάταξη των ειδών του γένους. Επομένως ανάλογα με τον αριθμό των ομάδων τα είδη διακρίνονται σε διπλοειδή AA ($2n=14$), τετραπλοειδή AABB ($2n=28$) και εξαπλοειδή AABBDD ($2n=42$). Υπάρχει επίσης και μία τέταρτη ομάδα χρωμοσωμάτων η ομάδα G. Στο γένος *Triticum* κατατάσσονται πολλά είδη, τα πιο διαδεδομένα είναι ο μαλακός σίτος (*Triticum aestivum*) που κυρίως χρησιμοποιείται για παρασκευή αλευριού και ο σκληρός σίτος (*Triticum durum*) που κυρίως χρησιμοποιείται για παραγωγή σιμιγδαλιού. Τα δύο αυτά είδη διαφέρουν γενετικά στον αριθμό των χρωμοσωμάτων, καθώς το μαλακό είναι εξαπλοειδές και το σκληρό είναι τετραπλοειδές (Alemuetal. 2020). Επίσης η ταξινόμηση του

σιταριού γίνεται και με βάση τα αγρονομικά κριτήρια (διάρκεια και άριστες θερμοκρασίες για εαρινοποίηση, χρώμα και σκληρότητα των κόκκων, ποιότητα του ενδοσπερμίου κ.ά.).

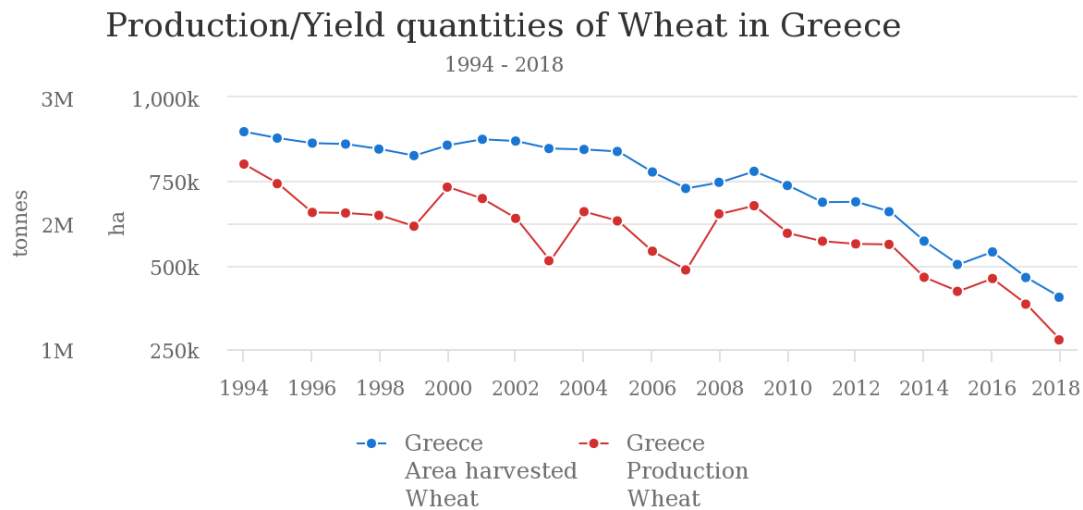
1.1.3. Καλλιέργεια και Παραγωγή Σιταριού

Το σιτάρι αποτελεί το πιο διαδεδομένο καλλιεργούμενο σιτηρό στον κόσμο, είναι μια ετήσια φθινοπωρινή καλλιέργεια αλλά σε περιοχές με βαρύ χειμώνα καλλιεργείται σαν εαρινή. Παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία εδαφοκλιματικών συνθηκών, με αποτέλεσμα κάθε μήνα του έτους σε κάποια περιοχή του κόσμου να συγκομίζεται και μία καλλιέργεια σιταριού, συνθήκη και προνόμιο που ευνοεί το φαινόμενο της αυξημένης ζήτησης των προϊόντων του, εφόσον αποτελεί βασική και καθημερινή τροφή για τους περισσότερους ανθρώπους.

Ο αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός δημιουργεί σημαντική ανησυχία στη γεωργική παραγωγή, ώστε να αντιμετωπίσει την απαίτηση επαρκούς διατροφής για όλους και η αύξηση της απόδοσης του σιταριού κρίνεται απαραίτητη. Η αύξηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία νέων ποικιλιών-καθαρών σειρών, είτε με τη δημιουργία υβριδίων, όπως αναφέρει το ινστιτούτο γενετικής βελτίωσης και φυτογενετικών πόρων.

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία της FAOSTAT η συνολική καλλιεργούμενη έκταση δημητριακών είναι περίπου 6 εκατομμύρια εκτάρια, με την καλλιεργούμενη έκταση σιταριού να καταλαμβάνει 2,1 εκατομμύρια. Η Ασία κατέχει την πρώτη θέση σε παραγωγή σιταριού με ποσοστό 43,6 %, ακολουθεί η Ευρώπη με 32,6 % , η Αμερική, η Αυστραλία και τέλος η Αφρική.

Η παγκόσμια παραγωγή σιταριού το 2018 έφτασε τους 7,3 εκατομμύρια τόνους και η παραγωγή της Ελλάδας ήταν σχεδόν 1 εκατομμύριο τόνοι, με καλλιεργούμενη έκταση περίπου 4 χιλιάδες εκτάρια, η μικρότερη έκταση και παραγωγή από το 1994 μέχρι το 2018 όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1 (FAOSTAT). Σύμφωνα με στοιχεία της ELSTAT η παραγωγή της Ελλάδας το 2017 ήταν 1,3 εκατομμύρια τόνοι, όπου από αυτή η παραγωγή μαλακού σίτου ήταν της τάξης των 366 χιλιάδων τόνων και του σκληρού της τάξης των 989 χιλιάδων τόνων . Η παραγωγή του σκληρού σίτου στην Ελλάδα δεν υπερτερούσε πάντοτε έναντι του μαλακού, το οποίο στις αρχές του εικοστού αιώνα είχε μεγαλύτερη παραγωγή και το 1957 η χώρα βρισκόταν σε σιτάρκεια. Η αλλαγή αυτή των σιτοκαλλιεργειών από το μαλακό στο σκληρό σιτάρι παρατηρήθηκε μετά από την είσοδο της Ελλάδας στην Ευρωπαϊκή Ένωση λόγω των επιδοτήσεων στις καλλιέργειες σκληρού σίτου.



Σχήμα 1. Η ελληνική παραγωγή (κόκκινη γραμμή) και οι καλλιεργούμενες εκτάσεις (μπλε γραμμή) σιταριού από το 1994 μέχρι το 2018, σύμφωνα με τον FAOSTAT (2020).

1.1.4. Οικολογικές απαιτήσεις

Γενικά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το σιτάρι είναι μια καλλιέργεια που παρουσιάζει καλή προσαρμοστικότητα σε διάφορες κλιματικές και εδαφικές συνθήκες. Συνηθίζεται να καλλιεργείται σε περιοχές της Εύκρατης και υποτροπικής ζώνης με εξάπλωση μεταξύ 15 έως 60° ΒΠ και 25 έως 40° ΝΠ, και σε υψόμετρο το οποίο, κυμαίνεται από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι 3000 m.

Είναι φυτό το οποίο για την καλή ανάπτυξή του χρειάζεται σχετικά δροσερό καιρό, η ελάχιστη θερμοκρασία βλάστησης κυμαίνεται από 3 έως 4 °C, με άριστη θερμοκρασία βλάστησης 20-22 °C και οποιαδήποτε θερμοκρασία πάνω από 35 °C δεν είναι επιθυμητή, διότι σε τέτοιες θερμοκρασίες ευνοείται η δράση των μυκήτων και των βακτηρίων με αποτέλεσμα το ενδοσπέρμιο να υφίσταται αποσύνθεση (Φασούλα-Φωτιάδη, 1984). Θερμοκρασίες κάτω των -18 °C επιφέρουν θάνατο, εκτός αν τα φυτά προέρχονται από ανθεκτική ποικιλία και είναι σκληραγωγημένα, οπότε μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες μέχρι -30 °C (Παπακώστα-Τασοπούλου, 2012). Η αντοχή τους μπορεί να φθάσει μέχρι τους -40 °C αν είναι σκεπασμένα με χιόνι όπως αναφέρουν οι Aese and Siddoway (1979). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η πρωιμότητα σχετίζεται με την αντοχή στο κρύο, οι πρώιμες ποικιλίες έχουν μικρότερη αντοχή. Ακόμα, το μαλακό σιτάρι σε σχέση με το σκληρό έχει μεγαλύτερη αντοχή στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι ετήσιες βροχοπτώσεις κυμαίνονται από 250 έως 2000 mm. (Xiping et al., 2002). Στο διάστημα μεταξύ του καλαμώματος και της άνθησης έχει τις μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό, σε αντίθεση με τη περίοδο ωρίμανσης που οι βροχοπτώσεις έχουν δυσμενείς επιδράσεις στη καλλιέργεια, όπως ανάπτυξη ασθενειών, καθυστέρηση της ωρίμανσης κ.α. (Παπακώστα-Τασοπούλου, 2012). Στην Ελλάδα, με βάση το κλίμα της, η μεγαλύτερη βροχόπτωση παρατηρείται το φθινόπωρο και το χειμώνα, όπου η καλλιέργεια δεν χρειάζεται πολύ νερό, με αποτέλεσμα η τελική απόδοση των

φυτών, η οποία κυμαίνεται από 150 έως 600 kg/στρ ή περισσότερο, να εξαρτάται από τις λίγες βροχοπτώσεις στα τελευταία στάδια ανάπτυξής τους κατά την περίοδο της άνοιξης.

Το σιτάρι είναι μία καλλιέργεια, η οποία μπορεί να καλλιεργηθεί σε ποικίλα εδάφη. Το γεγονός αυτό την καθιστά κατάλληλη καλλιέργεια για εδάφη τα οποία είναι χαμηλά σε γονιμότητα, είτε σε μη αρδευόμενες περιοχές, όπου άλλες καλλιέργειες δεν μπορούν να είναι κερδοφόρες. Ωστόσο, για υψηλότερες και σταθερότερες αποδόσεις συνιστώνται γόνιμα, βαθιά, καλά στραγγιζόμενα ιλυοπηλώδη ή αργιλοπηλώδη εδάφη, καθαρά από ζιζάνια και αρκετά υγρά. Επιπλέον λόγω της ευαισθησίας του σιταριού στην οξύτητα τα όξινα ή ξεπλυμένα εδάφη θεωρούνται ακατάλληλα.

1.1.5.Χρησιμότητα

Το σιτάρι είναι μία από τις βασικότερες καλλιέργειες παγκοσμίως λόγω της μεγάλης προσαρμοστικότητας του σαν καλλιέργεια και του μεγάλου δυναμικού απόδοσης, αλλά και λόγω της πληθώρας των προϊόντων του. Η χρήση του σπόρου του σιταριού για την παραγωγή ψωμιού έχει μεγάλη σημασία και στις θρησκευτικές παραδόσεις, δηλαδή πέραν από τη διατροφική και οικονομική του σημασία αποκτά και πολιτιστική. Για παράδειγμα στον χριστιανισμό η παρομοίωση του άρτου στο σώμα του Χριστού στη Θεία Κοινωνία, όπως κάτι αντίστοιχο ισχύει και για άλλες θρησκείες και πολιτισμούς. Πέραν όμως από το αλεύρι που φτιάχνεται το ψωμί που αποτελεί το σημαντικότερο προϊόν του σίτου, από το σπόρο του παράγονται και άλλα προϊόντα που κατέχουν σημαντική θέση στη διατροφή του ανθρώπου, όπως το σιμιγδάλι το οποίο αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή των ζυμαρικών και διάφορα άλλα προϊόντα στην αρτοποιομηχανία. Το σιτάρι χρησιμοποιείται επίσης και στην κτηνοτροφία και για παραγωγή βιομάζας, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό όσο χρησιμοποιείται στην διατροφή του ανθρώπου. Στην κτηνοτροφία χρησιμοποιούνται κατώτερες ποικιλίες, όπως υποπροϊόντα της αλευροβιομηχανίας. (Φασούλα-Φωτιάδη, 1984). Η κατανάλωση προϊόντων σιταριού προσφέρουν στον καταναλωτή πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, απαραίτητα αμινοξέα, ιχνοστοιχεία και βιταμίνες, αλλά και φυτικές ίνες σύμφωνα με τον Shewry (2009).

1.2. Γεωργία Ακριβείας

Με την πάροδο των χρόνων και την παράλληλη ανάπτυξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας, οι γεωργικές πρακτικές έχουν σημειώσει και αυτές με την σειρά τους μεγάλη ανάπτυξη και πρόοδο, ώστε να μπορούν να συμβαδίζουν με τις ανάγκες του σύγχρονου κόσμου. Μία από αυτές είναι η εκμηχάνιση της γεωργίας, δίνοντας στον παραγωγό τη δυνατότητα καλλιέργειας μεγαλύτερης έκτασης και απαλλαγής από τις χρονοβόρες και επίπονες χειρονακτικές εργασίες, με τις όποιες όμως ο γεωργός γνώριζε τις διαφορετικές ανάγκες των φυτών στην έκταση της καλλιέργειας του. Κύρια προϋπόθεση για την άριστη λειτουργία της μηχανοποιημένης καλλιέργειας είναι ότι οι αγροί είναι ομοιόμορφοι, κάτι που πρακτικά δεν είναι εφικτό. Με αποτέλεσμα οι καλλιεργητικές εισροές σε

κάποια σημεία της καλλιέργειας να είναι σε έλλειμμα και σε κάποια να είναι σε πλεόνασμα. Το γεγονός αυτό, δημιούργησε την ανάγκη για την ανακάλυψη νέων καλλιεργητικών στρατηγικών για την καλύτερη διαχείριση της καλλιέργειας, δηλαδή την βελτιστοποίηση της παραγωγής, αυξάνοντάς την και μειώνοντας τις εισροές, αλλά και μειώνοντας τις οικολογικές επιπτώσεις της γεωργίας, (Φουντάς και Γέμτος, 2015). Μία τέτοια εναλλακτική καλλιεργητική στρατηγική χαμηλής κατανάλωσης και υψηλής απόδοσης είναι η Γεωργία Ακριβείας, η οποία έχει ως βάση την χωρική και χρονική παραλλακτικότητα του αγρού. Η Γεωργία Ακριβείας σχετίζεται με όλα τα στάδια της παραγωγής από την αρχή της καλλιέργειας (σπορά) μέχρι το τέλος (συγκομιδή) και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί είναι: GPS και GIS, χαρτογράφηση παραγωγής, χαρτογράφηση εδαφικών ιδιοτήτων (γονιμότητα), χαρτογράφηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, τηλεπισκόπηση και τέλος τεχνολογία διαφοροποιούμενης δόσης σύμφωνα με τους Φουντάς και Γέμτος, (2015).

Γενικά στον Ευρωπαϊκό Νότο και ειδικότερα στην Ελλάδα, οι αγρότες δεν νιώθουν ασφάλεια ως προς το αν θα υιοθετήσουν αυτές τις καινούριες τεχνικές της Γεωργίας Ακριβείας. Ίσως αυτό συμβαίνει λόγω του χαμηλού μορφωτικού επιπέδου και της προσκόλλησης τους στις παραδοσιακές πρακτικές που γνωρίζουν. Τα κίνητρα τα οποία θα επιφέρουν την υιοθέτηση των εναλλακτικών καλλιεργητικών πρακτικών, μπορούν να προέρθουν από αυστηρή νομοθεσία υπέρ του περιβάλλοντος, από την δημόσια ανησυχία για την υπερκατανάλωση των γεωργικών φαρμάκων και φυσικά την αναγνώριση ότι η μείωση γεωργικών εισροών προσφέρει οικονομικό όφελος και βελτίωση της παραγωγής, όπως αναφέρουν οι Zhang et al. (2002).

1.3. Τηλεπισκόπηση

Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη την οποία την δομούν πολλές άλλες επιστήμες με κύριο σκοπό της την ανάλυση της επιφάνειας της γης. Μέσω της τηλεπισκόπησης ή τελεανίχνευσης είναι δυνατή η λήψη πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μία περιοχή ή φαινόμενο, χωρίς άμεση φυσική επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης. Η καταγραφή των δεδομένων από απόσταση μπορεί να γίνει μέσω αεροφωτογραφιών, εικόνες από ραντάρ και εικόνες από δορυφόρο, όπου οι τελευταίες αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή της και ονομάζεται δορυφορική τηλεπισκόπηση.

Η πρώτη εφαρμογή της τηλεπισκόπησης στη γεωργία χρονολογείται το 1929 σύμφωνα με τους Φουντάς και Γέμτος, (2015) και αφορούσε τη λήψη αεροφωτογραφιών με σκοπό τη χαρτογράφηση των εδαφών, η οποία πραγματοποιήθηκε με γνώμονα το χρώμα του εδάφους. Σήμερα έχει επικρατήσει η δορυφορική τηλεπισκόπηση, η οποία ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960, όπου πλέον οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές μπορούσαν να διαχειρίζονται μεγάλο όγκο δεδομένων. (Καρτάλης και Φείδας, 2013).

Στη δορυφορική τηλεπισκόπηση επεξεργάζονται τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από ειδικούς ανιχνευτές που φέρονται στους δορυφόρους με βασικό γνώμονα την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της γης και ανακλάται ή εκπέμπεται από κάποια επιφάνεια σε διάφορες φασματικές περιοχές. Ανιχνεύοντας και καταγράφοντας λοιπόν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρέχονται πληροφορίες για τις φυσικές και χημικές ιδιότητες της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας, από τους δορυφορικούς αισθητήρες, οι οποίοι ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των ραδιομέτρων.

Οι αισθητήρες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες στους παθητικούς και στους ενεργητικούς. Στους παθητικούς γίνεται χρήση της υπάρχουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ οι ενεργητικοί εκπέμπουν δική τους πηγή ακτινοβολίας για τις μετρήσεις τους.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση έχει βρει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους, όπως στην γεωργία, στην σεισμολογία, στην υδρολογία κ.ά.

Η τηλεπισκόπηση στη γεωργία παρέχει πολλά θετικά, με σημαντικότερο το χαμηλό κόστος σε σχέση με τον όγκο των αποτελεσμάτων. Επίσης, γίνεται εφικτή η μελέτη δύσβατων περιοχών, αποφεύγοντας τις μετρήσεις πεδίου οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν χρονοβόρες και δαπανηρές. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα λήψης δεδομένων όλο το χρόνο. Εκτός των θετικών, όμως υπάρχουν και κάποιες προϋποθέσεις όπως η γνώση χρήσης εξειδικευμένων λογισμικών και ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επεξεργασία των δεδομένων. Το κυριότερο όμως αρνητικό της τηλεπισκόπησης είναι η εξάρτηση της ποιότητας της εικόνας από τις μετεωρολογικές συνθήκες, π.χ. τη συννεφιά.

Εξετάζοντας την βλάστηση μέσω της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, παρέχονται πληροφορίες για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση μιας καλλιέργειας, καταγράφεται η έκταση της, γίνεται ανίχνευση πιθανών ασθενειών και επιπλέον παρέχονται πληροφορίες για την εκτίμηση της παραγωγής. Η βλάστηση παρέχει τέτοιου είδους πληροφορίες με βάση την ανακλαστικότητα της και οι πιο σημαντικοί παράγοντες που την επηρεάζουν είναι οι καιρικές συνθήκες, η γωνία της ηλιακής ακτινοβολίας, το ίδιο το φυτό ως προς την μορφολογία και φυσιολογία του και το σχήμα των φύλλων, αλλά και το είδος του εδάφους. Γενικά κάθε στόχος έχει διαφορετική αλληλεπίδραση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και έτσι επιτυγχάνεται η διαφοροποίησή τους. Αυτή η διαφορά χαρακτηρίζεται ως φασματική υπογραφή και έτσι παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις φυσικοχημικές ιδιότητες και τη μορφή του στόχου.

1.4. Φασματική συμπεριφορά της βλάστησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τα φύλλα των φυτών. Τα φυτά φωτοσυνθέτουν για την παραγωγή των απαραίτητων για τη θρέψη τους συστατικών χρησιμοποιώντας ενέργεια από συγκεκριμένα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής

ακτινοβολίας. Οι χλωροφύλλες στα φύλλα είναι αυτές που απορροφούν ενέργεια για την επίτευξη της φωτοσύνθεσης, αλλά δεν απορροφούν όλο το ηλιακό φως. Παρατηρείται μεγάλη απορρόφηση κατά την φωτοσύνθεση σε δύο περιοχές του ορατού τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στο μπλε (0,4 μm) και στο κόκκινο (0,68 μm), με αντίθεση στο πράσινο (0,55 μm) που υπάρχει μεγάλη ανάκλαση. Η ανάκλαση αυτή ευθύνεται για το γεγονός ότι το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται πράσινη τη βλάστηση. Η ανάκλαση στο εγγύς υπέρυθρο ελέγχεται κυρίως από το μεσόφυλλο του φυτού, διότι στην ακτινοβολία αυτή η επιδερμίδα του φύλλου θεωρείται σχεδόν διάφανη με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να σκεδάζεται και προς τα πάνω αλλά και προς τα κάτω σε ποσοστό της τάξης του 60% και ένα μικρό ποσοστό να απορροφάται από το φύλλο σύμφωνα με τους Καρτάλης και Φείδας (2013). Για το λόγο αυτό, προκαλείται απότομη αύξηση της ανακλαστικότητας στην υγιή βλάστηση κατά την μετάβαση από το ορατό στο εγγύς υπέρυθρο και δημιουργείται η κόκκινη ακμή. Για μεγαλύτερα μήκη κύματος (μέσο υπέρυθρο) η ανάκλαση επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του φύλλου σε νερό.

1.5. Δείκτες Βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης είναι αδιάστατα μεγέθη που ποσοτικοποιούν παραμέτρους της βλάστησης που σχετίζονται με την εκτίμηση της βιομάζας ή την λειτουργικότητα της, όπως τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI, τη πράσινη βιομάζα, το ποσοστό φυτικής κάλυψης, τη περιεκτικότητα φωτοσυνθετικών χρωστικών, τη φωτοσυνθετική ικανότητα και την απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία APAR (Jensen, 2000). Οι δείκτες βλάστησης αυτοί θα πρέπει να α) να παρουσιάζουν μέγιστη ευαισθησία με κάποια βιοφυσική παράμετρο των φυτών, κατά προτίμηση με γραμμική απόκριση, β) να μπορούν να κανονικοποιούν ή να μοντελοποιούν τους εξωγενείς παράγοντες (γωνία ήλιου, γωνία παρατήρησης του δείκτη και ατμόσφαιρα), ώστε να επιτρέπουν τη σύγκριση των τιμών τους για δεδομένα κατανεμημένα στο χρόνο κι στο χώρο, γ) να μπορούν να κανονικοποιούν τις επιδράσεις των ενδογενών παραμέτρων (υπόβαθρο, τοπογραφία, φυτική κόμη, μη φωτοσυνθετικά μέρη και έδαφος) και δ) να συνδέονται άμεσα με κάποια μετρήσιμη βιοφυσική παράμετρο. Ο υπολογισμός τους γίνεται με απλούς αλγεβρικούς τύπους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας απλές αριθμητικές πράξεις (πρόσθεση, πολλαπλασιασμό και διαίρεση) μεταξύ των ψηφιακών τιμών στα διάφορα φασματικά κανάλια δημιουργείται μια μοναδική τιμή για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας. (Καρτάλης και Φείδας, 2013). Τα βασικά φασματικά κανάλια που επιλέγονται είναι οι περιοχές του ερυθρού και του εγγύς υπέρυθρου, διότι στις περιοχές αυτές η βλάστηση παρουσιάζει φασματική απόκριση αντίστροφη με αυτή των επιφανειών που είναι γυμνές από βλάστηση. Αν οι τιμές των δεικτών είναι μεγάλες αυτό υποδηλώνει ότι το έδαφος καλύπτεται από έντονη ή υγιή βλάστηση.

Οι δείκτες βλάστησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν οι δείκτες οι οποίοι προκύπτουν από αριθμητικές πράξεις μεταξύ των ραδιομετρικών τιμών των φασματικών καναλιών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει δείκτες όπως ο NDVI, SAVI, EVI και άλλους. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους δείκτες που υπολογίζουν τη ραδιομετρική απόσταση από τη γραμμή του εδάφους. Οι δείκτες αυτής της κατηγορίας βασίζονται στη διαφορά της σχέσης που σχηματίζεται στην τιμή ανάκλασης κάθε pixel και στην τιμή ανάκλασης του γυμνού εδάφους και έτσι μετράνε το ποσοστό της βλάστησης σε κάθε pixel. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν δείκτες όπως ο WdVI, PVI και MSAVI2.

1.5.1. Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Ο δείκτης NDVI είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης παγκοσμίως. Δημιουργοί του ήταν οι Rouse et al. το 1974 έχοντας στόχο να διαχωρίσουν την βλάστηση από το έδαφος, χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα Landsat MSS (Περάκης κ.ά. 2015). Μέσω του NDVI γίνεται δυνατή η παρακολούθηση των ετήσιων και εποχιακών μεταβολών στην ανάπτυξη της βλάστησης, διότι μπορεί να περιγράψει πολλές ιδιότητες των φυτών. Επίσης λόγω των κανονικοποιημένων τιμών του παραμένει σχεδόν αναλλοίωτος μειώνοντας πολλές μορφές πολλαπλασιαστικού θορύβου (σκιές από σύννεφα, ορισμένες τοπογραφικές μεταβολές κ.α.), ο οποίος εμφανίζεται σε αρκετά κανάλια απεικονίσεων πολλαπλών ημερομηνιών. Οι τιμές που μπορεί να πάρει κυμαίνονται από -1 έως +1, όπου οι αρνητικές τιμές οφείλονται και περιγράφουν την κάλυψη της γης από νερό, από ανθρωπογενείς κατασκευές κ.α., η τιμή 0 οφείλεται στην έλλειψη βλάστησης (γυμνό έδαφος) και οι θετικές τιμές υποδηλώνουν την ύπαρξη πράσινης βλάστησης λόγω της χλωροφύλλης, όσο πιο υγιείς ή όσο πιο πυκνή είναι η βλάστηση οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται προς το +1 (Περάκης κ.ά. 2015). Ο περιορισμός στο εύρος των τιμών του συμβαίνει ώστε να είναι πιο αξιόπιστες οι στατιστικές παράμετροι των τιμών (Καρτάλης-Φείδας, 2013).

Υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

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

όπου το R_{nir} εκφράζει τη τιμή της ανακλαστικότητας στη περιοχή του εγγύς υπέρυθρου και το R_{red} εκφράζει τη τιμή της ανακλαστικότητας στη περιοχή του κόκκινου.

1.5.2 Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης – EVI (Enhanced Vegetation Index)

Ο EVI θεωρείται ως ένας τροποποιημένος δείκτης NDVI. Παρέχει βελτιωμένη ευαισθησία στις περιοχές με υψηλή βιομάζα και λόγω της αποσύνδεσης του σήματος υποβάθρου της φυτικής κόμης και των μειωμένων ατμοσφαιρικών επιδράσεων έχει βελτιωμένη ικανότητα παρακολούθησης της βλάστησης (Matsushita et al. 2007). Έχει υιοθετηθεί από το μοντέλο MODIS ως ο δεύτερος παγκόσμιος δείκτης για την παρακολούθηση της φωτοσυνθετικής βλάστησης της γης, λόγω της βελτιωμένης απόδοσης του σε σχέση με τον δείκτη NDVI.

Η εξίσωση που τον περιγράφει δίνεται παρακάτω:

$$EVI = G * \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + C1R_{red} - C2R_{blue} + L}$$

όπου G είναι ο παράγοντας κέρδους (τυπική τιμή 2.5), C1 και C2 είναι δύο συντελεστές που περιγράφουν τη χρήση του μπλε καναλιού για τη διόρθωση του κόκκινου για την ατμοσφαιρική σκέδαση αερολυμάτων (τυπικές τιμές 6 και 7.5 αντιστοίχως) και L είναι ο συντελεστής προσαρμογής του εδάφους (τυπική τιμή 1) (Jensen, J., 2000).

1.5.3. Εδαφικά Προσαρμοσμένος Δείκτης Βλάστησης- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)

Ο δείκτης SAVI δημιουργήθηκε για να μειώσει τον εδαφικό θόρυβο, δηλαδή τις επιπτώσεις από τη φωτεινότητα του εδάφους, που ενυπάρχουν στο δείκτη NDVI. Υπεύθυνη για αυτό είναι η σταθερά L, όπου περιγράφεται παρακάτω.

Η εξίσωση που τον περιγράφει δίνεται παρακάτω:

$$SAVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red} + L} * (1 + L)$$

όπου L είναι ένας παράγοντας προσαρμογής στο υπόβαθρο της φυτικής κόμης και χάρη σε αυτόν εξηγείται η εξάλειψη μέσα από τη φυτική κόμη του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου (Jensen J. 2000). Οι τιμές που παίρνει το L είναι ανάλογες με τα φασματικά χαρακτηριστικά του εδάφους και εξαρτώνται από τη πυκνότητα της βλάστησης. Λαμβάνει την τιμή 1 όταν πρόκειται για αραιή βλάστηση, την τιμή 0.25 όταν πρόκειται για πυκνή βλάστηση και την τιμή 0.5 όταν η βλάστηση είναι άγνωστη ή ποικίλει (Περάκης κ.ά. 2015).

1.5.4. Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Κόκκινης Ακμής - NDRE (Normalized Difference of Red Edge)

Ο δείκτης NDRE μοιάζει αρκετά με τον δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς NDVI.

Η εξίσωση που τον περιγράφει δίνεται παρακάτω:

$$NDRE = \frac{R_{nir} - R_{re}}{R_{nir} + R_{re}}$$

Όπως φαίνεται και στην εξίσωση η διαφορά τους βρίσκεται στις φασματικές ζώνες που χρησιμοποιούν οι δύο δείκτες. Πιο συγκεκριμένα έχει γίνει αντικατάσταση της κόκκινης ζώνης (Rred) που χρησιμοποιεί ο NDVI από τη φασματική ζώνη τη κόκκινης ακμής (Rre). Η ακτινοβολία Red-edge του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιεί ο δείκτης αυτός έχει την δυνατότητα να διεισδύει στα φύλλα πιο βαθιά, από το κόκκινο που χρησιμοποιεί ο NDVI σύμφωνα με την EOS (Earth Observing System). Οι τιμές που παίρνει ο δείκτης κυμαίνονται από -1 έως +1 ίδιες με αυτές που παίρνει και ο NDVI.

1.5.5. Δείκτης Νερού Κανονικοποιημένης Διαφοράς- NDWI (Normalized Difference Water Index)

Ο δείκτης NDWI είναι ευαίσθητος στη αλλαγή της περιεκτικότητας νερού των φύλλων, χρησιμοποιεί δύο φασματικές ζώνες την Rnir και την Rswir.

Η εξίσωση που τον περιγράφει δίνεται παρακάτω:

$$NDWI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}}$$

Ο συνδυασμός αυτός του SWIR και του NIR έχει τη δυνατότητα να αφαιρεί τις μεταβολές που προκαλούνται από τη εσωτερική δομή του φύλλου και από τη περιεχόμενη ξηρά ουσία του, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ακρίβεια στην ανάκτηση δεδομένων για τη περιεκτικότητα σε νερό της βλάστησης σύμφωνα με το EDO (European Drought Observatory, 2001).

1.6. Δορυφόροι Sentinel-2

Οι δορυφόροι Sentinel-2 είναι προϊόντα συνεργασίας της ESA (Ευρωπαϊκής Επιτροπής Διαστήματος) και μιας κοινοπραξίας εξήντα εταιριών όπου επικεφαλής είναι η Airbus Defense and Space και υποστηρίζονται από το γαλλικό CNES (Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Μελετών) και το DLR. Στην ουσία πρόκειται για δύο όμοιους δορυφόρους, οι οποίοι συνυπάρχουν και συνεργάζονται για την κάλυψη όλης της γήινης επιφάνειας, με γωνιακή απόκλιση μεταξύ τους 180° στην ίδια τροχιά και διάρκεια ζωής τουλάχιστον 7 χρόνια. Ο δορυφόρος Sentinel-2A τέθηκε σε τροχιά στις 23 Ιουνίου του 2015 και ο Sentinel-2B στις 7 Μαρτίου του 2017 από πύραυλο Vega. Το μέσο τροχιακό υψόμετρο είναι 786 km και κατέχουν υψηλή συχνότητα επανάληψης 5 ημερών. Οι δορυφόροι περιέχουν ο καθένας έναν πολυφασματικό σαρωτή με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα και 13 φασματικά κανάλια το MSI (Multi Spectral Instrument). Η Astrium SAS

ευθύνεται για το MSI, το οποίο λειτουργεί παθητικά και συλλέγει το ηλιακό φως το οποίο ανακλάται από τη γη, καθώς ο δορυφόρος κινείται κατά μήκος της τροχιά του.

Τα δεδομένα των δορυφόρων αυτών συμβάλουν στη διαχείριση εκτάκτων περιστατικών, για την παρακολούθηση και την ασφάλεια της γης και στη κλιματική αλλαγή. Είναι κατάλληλοι για αρκετές εφαρμογές όπως για τη διαχείριση των αλλαγών στη κάλυψη και στη χρήση γης, στην καταγραφή φυσικών καταστροφών (πλημμύρες, καθίζηση-ολίσθηση εδαφών, ηφαιστειακές εκρήξεις), στην καταγραφή ρύπανσης υδάτων, στη διαχείριση και στη καταγραφή της ανάπτυξης των φυτικών πληθυσμών, στην καταγραφή δασικών εκτάσεων αλλά και στη καταγραφή δασικών καταστροφών.

1.7. Μοντέλα Προσομοίωσης καλλιεργειών

Τα μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών θεωρούνται αρκετά χρήσιμα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης και της απόδοσης των καλλιεργειών αλλά και χρήσιμο εργαλείο για πιο σωστές και στοχευόμενες επιχειρηματικές κινήσεις των παραγωγών. Αρχικά είχαν σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών όπου οι γεωργικές πρακτικές, το κλίμα, το έδαφος θεωρούνταν γνωστές και ομοιογενές στο χώρο. Όμως η εφαρμογή τους σε μεγάλης κλίμακας καλλιέργειες είναι αρκετά δύσκολη, λόγω της μεγάλης μεταβλητότητας των προαναφερθέντων παραμέτρων στο χώρο και στο χρόνο. Με βάση αυτή τη δυσκολία οι Claverie et al. (2012), διαχωρίζουν τα μοντέλα σε τρεις κατηγορίες.

Στη πρώτη κατηγορία κατατάσσονται σύνθετα μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν πολλές μεταβλητές, μέσω της περιγραφής αρκετών φαινολογικών και φυσιολογικών διεργασιών, όπως η πρόσληψη του αζώτου, η φωτοσύνθεση, η εξατμισοδιαπνοή και η αναπνοή. Αυτά τα μοντέλα απαιτούν πολυάριθμα δεδομένα τα οποία είναι δύσκολο να είναι διαθέσιμα για μεγάλες εκτάσεις. Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται μοντέλα όπως το CERES, AFRCWHEAT2, SWHEAT κ.α.

Στη δεύτερη κατηγορία σε αντίθεση με τη πρώτη κατατάσσονται απλά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν δεδομένα μέσω της τηλεπισκόπησης για τον υπολογισμό της βιομάζας χρησιμοποιώντας δεικτές βλάστησης. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται στην προσέγγιση LUE (Light Use Efficiently). Χρησιμοποιούν χρονοσειρές από δορυφορικά δεδομένα, χαμηλής χωρικής ανάλυσης τα οποία αποκτώνται σε μικρά χρονικά διαστήματα και έτσι έχουν την δυνατότητα να παραμετροποιηθούν σε μεγάλες εκτάσεις. Έχουν τη ικανότητα να παρέχουν εκτιμήσεις για τη μικτή παραγωγή σε φυσικά οικοσυστήματα.

Τα μοντέλα της τρίτης κατηγορίας συγκεντρώνουν περιγραφές από τις κύριες βιοφυσικές διεργασίες, όπως τη συσσώρευση βιομάζας, την ωρίμανση των φύλλων κ.α. και από εμπειρικές παραμετροποιήσεις. Συνδυάζουν την προσέγγιση LUE με προσομοίωση των διαδοχικών φαινολογικών φάσεων των φυτών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη μεγάλων

εκτάσεων, λόγω αυτής της ημι-εμπειρικής προσέγγισης. Ένα παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το SAFY.

Παρακάτω εκθέτονται ενδεικτικά ορισμένα μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών.

Το CERES (Crop Environment Resource Synthesis), χρησιμοποιείται παραπάνω από 30 χρόνια προσομοιώνοντας την ανάπτυξη των καλλιεργειών ανάλογα με το κλίμα, τους γονότυπους, το έδαφος και την διαχείριση σε αρκετές τοποθεσίες ανά τον κόσμο (Basso et al. 2016). Είναι διαθέσιμο στους ενδιαφερόμενους μέσω του DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).

Ένα άλλο μοντέλο είναι το CropSyst (Cropping Systems Simulation Model), το οποίο είναι μοντέλο πολυετούς διάρκειας, για πολλαπλές καλλιέργειες που αναπτύχθηκε με στόχο να χρησιμοποιείται ως ένα αναλυτικό εργαλείο στη μελέτη των επιπτώσεων του κλίματος, του εδάφους και στη διαχείριση του περιβάλλοντος και της παραγωγικότητας των καλλιεργητικών συστημάτων (Stockle et al. 2003). Το CropSyst λόγω απλουστεύσεων για τη περιγραφή κάποιων διαδικασιών είναι ευκολότερο στη χρήση σε σχέση με το CERES, το οποίο χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό παραμέτρων για την πιο λεπτομερή περιγραφή της φυσιολογίας της καλλιέργειας (Singh et al. 2008).

1.8. Εκτίμηση Απόδοσης Καλλιέργειας

Η εκτίμηση της απόδοσης των καλλιεργειών είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τους κλάδους που σχετίζονται με την γεωργία, γιατί τους παρέχει χρήσιμα δεδομένα, αλλά είναι εξίσου σημαντική και για τις χώρες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωργία ώστε να ικανοποιήσουν τις εθνικές ανάγκες αλλά και τις ανάγκες από τα έσοδα των εξαγωγών.

Η εκτίμηση της παραγωγής θεωρείται μία καλλιεργητική πρακτική, η οποία εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Οι έμπειροι γεωργοί είναι σε θέση να προβλέψουν την παραγωγή τους με απλές εκτιμήσεις έχοντας ως γνώμονα τις παλιότερες σοδιές, τις εδαφοκλιματικές συνθήκες, την ευρωστία και την υγεία των φυτών μέχρι το τρέχον σημείο της καλλιέργειας. Όσο η καλλιέργεια κοντεύει στο στάδιο συγκομιδής τόσο πιο ακριβής είναι οι εκτιμήσεις, λόγω του ότι υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες για την κατάσταση της καλλιέργειας. Φυσικά οι παραπάνω εκτιμήσεις είναι καθαρά εμπειρικές και βασίζονται στην κρίση του γεωργού. Για το λόγο αυτό, ώστε οι εκτιμήσεις να είναι πιο συγκεκριμένες χρησιμοποιούνται τα στοιχεία της τηλεπισκόπησης. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης με βάση την κατάσταση της βλάστησης η οποία αντανακλά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα. Βάσει αυτών των στοιχείων και σε συνδυασμό με επιπρόσθετα στοιχεία, όπως οι εδαφοκλιματικές συνθήκες, δομούνται σύνθετα μοντέλα τα οποία μπορούν να εκτιμήσουν το τελικό προϊόν σε ένα πρώιμο στάδιο. Υπάρχουν όμως δύο περιορισμοί στη χρήση αυτής της

προσέγγισης για μεγαλύτερη ακρίβεια, ο ένας είναι η χωρική ανάλυση των δεδομένων και ο άλλος είναι η συχνότητα λήψης δεδομένων από τη τηλεπισκόπηση. Λόγω της χωρικής ετερογένειας των καλλιεργούμενων εκτάσεων απαιτείται υψηλή χωρική και υψηλή χρονική ανάλυση ώστε να μπορεί να γίνει η καταγραφή της ανάπτυξης των καλλιεργειών σε σχέση με το χρόνο, ειδικά σε κρίσιμα στάδια ανάπτυξης.

Για παράδειγμα οι συμβατικοί δορυφόροι υψηλής ανάλυσης SPOT και Landsat δεν θεωρούνται κατάλληλοι για τέτοιου είδους μετρήσεις υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, διότι έχουν μεγάλο επαναληπτικό κύκλο μετρήσεων και επηρεάζονται από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Επίσης οι δορυφόροι RapidEye και Formosat-2 ενώ έχουν μικρότερο επαναληπτικό κύκλο μετρήσεων τα δεδομένα τους είναι διαθέσιμα κατόπιν αιτήματος και δεν είναι δωρεάν και ο δορυφόρος MODIS ενώ έχει υψηλή χρονική ανάλυση έχει σχετικά μικρή χωρική (Dong et al. 2016). Αντίθετα ο δορυφόρος Sentinel-2 έχοντας υψηλή και χωρική και χρονική ανάλυση αλλά και δωρεάν παροχή των δεδομένων χρησιμοποιείται αρκετά για τέτοιου είδους παρατηρήσεις.

1.9. LUE MODELS (Light Use Efficiency)

Όλο και πιο αναγνωρίσιμα γίνονται τα μοντέλα οικολογικής διαχείρισης, όπως τα μοντέλα ανάπτυξης καλλιεργειών και παραμετροποιημένα μοντέλα που βασίζονται στην αποδοτικότητα χρήσης φωτός (LUE), τα οποία έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν βιοφυσικές παραμέτρους από την τηλεπισκόπηση. Τα μοντέλα που στηρίζονται στην προσέγγιση LUE μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της μκτής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP, Gross Primary Productivity) μέσω της εξίσωσης:

$$GPP = \varepsilon * PAR * FAPAR \quad (1)$$

όπου

ε , ο συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε φωτοσυνθετικά προϊόντα

PAR, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που προσπίπτει στο θόλο

FAPAR, το ποσοστό της PAR που απορροφάται από το θόλο

Από τις παραπάνω παραμέτρους, το ε υπολογίζεται από μια βέλτιστη τιμή, χαρακτηριστική για κάθε είδος ή τύπο βλάστησης (ε_0), η οποία επηρεάζεται από αναπτυξιακούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, το διαθέσιμο νερό κ.α. (scalars). Τα διάφορα scalars δρουν πολλαπλασιαστικά στην τιμή ε_0 και οι δυνατές τιμές που μπορούν να λάβουν κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Για παράδειγμα ένα scalar θερμοκρασίας έχει τιμή 1 στη βέλτιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης και τιμές μικρότερες του 1 σε θερμοκρασίες διαφορετικές από τη βέλτιστη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε είδους. Το FAPAR εξαρτάται κυρίως από τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του θόλου και κυρίως από το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI). Οι παράμετροι PAR, FAPAR και τα διάφορα scalars που εμπλέκονται στα μοντέλα LUE μπορούν

να προκύψουν από μετεωρολογικά και δορυφορικά δεδομένα (Running et al. 1999, Myneni et al. 2002, Xiao 2004, Liao et al. 2019). Ωστόσο, τα ϵ_0 , τα scalars και τα δορυφορικά δεδομένα απαιτούν μετρήσεις πεδίου για την παραμετροποίησή τους.

1.9. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διαμόρφωση ενός μοντέλου πρόβλεψης και εκτίμησης της παραγωγής σε καλλιέργεια σκληρού σίτου, διερευνώντας τις δυνατότητες των δεδομένων από το δορυφόρο Sentinel-2. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου (αναπτυξιακών παραμέτρων και υδατικής κατάστασης) που συσχετίστηκαν με τους δείκτες βλάστησης των δορυφορικών εικόνων και συγκρίθηκαν με τα δεδομένα απόδοσης της καλλιέργειας του πειραματικού αγρού, τα οποία προέρχονται από μηχανή συγκομιδής εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό, ο οποίος περιελάμβανε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις με ακαλλιέργεια και συμβατική κατεργασία. Έτσι, παράλληλος στόχος ήταν και η αποτίμηση των καλλιεργητικών πρακτικών σε επίπεδο παραγωγής.

2. Υλικά και Μέθοδοι

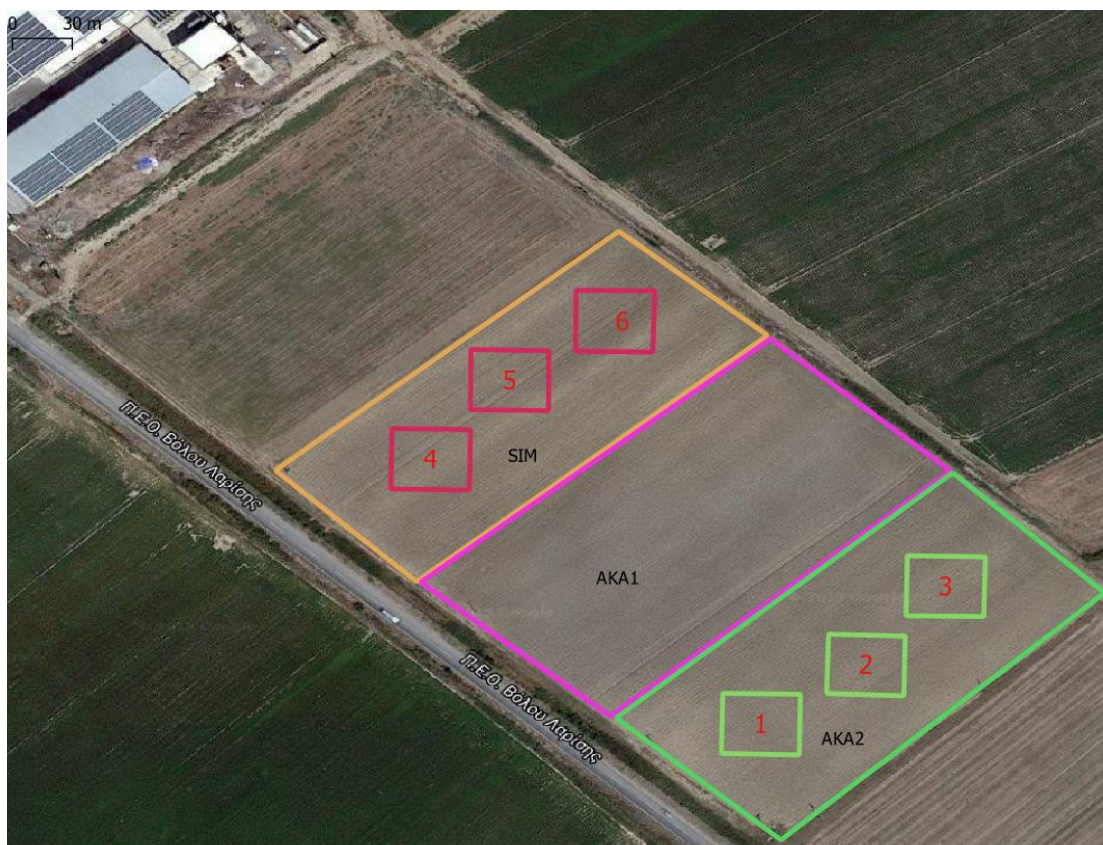
2.1. Πειραματικός Αγρός

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό στη περιοχή της Μόδεστου (Λάρισα, Θεσσαλία, 39°34'52.13"N, 22°35'46.22"E) στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου Νοέμβριος 2018 – Ιούνιος 2019. Ο αγρός συνολικής έκτασης 67 στρεμμάτων χωρίστηκε σε 3 τεμάχια στα οποία εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες μεταχειρίσεις (Εικόνα 1):

1. Συμβατική καλλιέργεια με ημερομηνία σποράς 6 Δεκεμβρίου 2018 (SIM) (12 στρέμματα)
2. Ακαλλιέργεια με ημερομηνία σποράς 16 Νοεμβρίου 2018 (ΑΚΑ1) (18 στρέμματα)
3. Ακαλλιέργεια με ημερομηνία σποράς 6 Δεκεμβρίου 2018 (ΑΚΑ2) (15 στρέμματα)

Ο όρος ακαλλιέργεια επεξηγείται ορθότερα με τον όρο ακατεργασία, δηλαδή αναφέρεται σε χωράφια τα οποία ο παραγωγός δεν επεμβαίνει καθόλου στο έδαφος απλώς ανοίγει μικρά αυλάκια για να τοποθετήσει τον σπόρο και έπειτα τον καλύπτει, αφήνοντας τα υπολείμματα της προηγούμενης καλλιέργειας, τα οποία προστατεύουν από τη διάβρωση και παράλληλα προσθέτουν οργανική ουσία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η προηγούμενη καλλιέργεια της ΑΚΑ1 και της ΑΚΑ2 ήταν το βαμβάκι, όπου τα υπολείμματα της υπήρχαν διάσπαρτα σε όλη την έκταση των δύο μεταχειρίσεων, σε αντίθεση με την SIM όπου εφαρμόστηκε η συμβατική καλλιέργεια και ήταν απαλλαγμένη από τα υπολείμματα της προηγούμενης καλλιέργειας της.

Σε όλες τις μεταχειρίσεις χρησιμοποιήθηκε η ποικιλία Sveno με ποσότητα σπόρου 23 kg / στρέμμα. Οι υπόλοιπες καλλιεργητικές πρακτικές ήταν κοινές και στις τρεις μεταχειρίσεις. Για τη διευκόλυνση της διεξαγωγής του πειράματος και για να είναι δυνατή η ακριβής σύγκριση των μετρήσεων πεδίου με τα δορυφορικά δεδομένα, στην ΑΚΑ2 και στη SIM δημιουργήθηκαν από τρία ίσα plots διαστάσεων 30x30 m, σε ακριβή αντιστοιχία με τα εικονοστοιχεία των δορυφορικών εικόνων του Sentinel-2 (κάθε plot αντιστοιχεί σε 9 εικονοστοιχεία διαστάσεων 10 x 10 m, Εικόνα 1). Η οριοθέτηση του χωραφιού, των plots και των μεταχειρίσεων έγινε μέσω GPS (Garmin, eTrex) και μέσω του λογισμικού QGIS αποτυπώθηκαν σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.



Εικόνα 1. Η οριοθέτηση και η αποτύπωση των τριών μεταχειρίσεων, AKA1, AKA2 και SIM και των έξι plots.

2.2. Μετρήσεις Πεδίου

Οι μετρήσεις πεδίου ξεκίνησαν στις 5 Φεβρουαρίου του 2019 και η τελευταία μέτρηση πραγματοποιήθηκε στις 23 Μαΐου του 2019. Με βάση ότι ο δορυφόρος Sentinel-2 συλλέγει κάθε 5 ημέρες τα δεδομένα του, έτσι και οι επίγειες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με συχνότητα μία φορά την εβδομάδα σε ένα χρονικό διάστημα από τις 11:00 π.μ. μέχρι τις 2:00 μ.μ. τοπική ώρα. Στην πλειοψηφία των μετρήσεων κρατήθηκε ένα σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ της προηγούμενης και της επόμενης μέτρησης, έκτος από τις φορές που οι καιρικές συνθήκες δεν το επέτρεπαν, εφόσον κύρια προϋπόθεση για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν να μην υπάρχει συννεφιά στη περιοχή του χωραφιού.

2.2.1. Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI)

Ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI) μετρήθηκε μέσω μιας έμμεσης μεθόδου η οποία έχει ως βάση μια αντιστροφή της εξίσωσης των Beer-Lambert (Monsi and Saeki 1953) (3), ενσωματώνοντας τη βιοφυσική ή δομική μεταβλητότητα του οικοσυστήματος (Stagakis et al. 2010).

$$LAI = -\frac{1}{k} \ln \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Όπου, I_0 η προσπίπτουσα φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) πάνω από το θόλο της καλλιέργειας, I το PAR που μεταδίδεται κάτω από το θόλο και το k είναι ο συντελεστής απόσβεσης

της ακτινοβολίας στο θόλο και είναι συνάρτηση της γωνίας κατανομής των φύλλων, της αζιμούθιας γωνίας των φύλλων και της γωνίας ζενίθ του ήλιου. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του LAI είναι ένας γραμμικός αισθητήρας φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (ACCUPAR LP-80 PAR/LAI Ceptometer, , Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington, USA), με το οποίο μετρήθηκε το PAR πάνω και κάτω από το θόλο των φύλλων του σιταριού. Στην παραπάνω εξίσωση (2) χρησιμοποιήθηκε μια σταθερή τιμή του συντελεστή k η οποία χρησιμοποιείται για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια από το λογισμικό του οργάνου ACCUPAR. Για κάθε μέτρηση LAI πραγματοποιούνταν 10 μετρήσεις ακτινοβολίας κάτω από το θόλο, σε απόσταση 2 m η μία από την άλλη και υπολογιζόταν η μέση τιμή τους. Σε κάθε ένα από τα plots των μεταχειρίσεων AKA2 και SIM πραγματοποιούνταν κάθε φορά τρεις μετρήσεις LAI, ενώ στην AKA1 έξι μετρήσεις, μέσω μιας τυχαίας διαγώνιας δειγματοληψίας σε όλη την επιφάνεια της μεταχείρισης. Στη συνέχεια, η τιμή του κάθε plot υπολογιζόταν ως η μέση τιμή των τριών μετρήσεων, και η τιμή της κάθε μεταχείρισης ως η μέση τιμή των τριών plots για τις AKA2 και SIM και η μέση τιμή των έξι μετρήσεων για την AKA1.

2.2.2. Δυναμικό Νερού

Το όργανο που έγιναν οι μετρήσεις για το δυναμικό νερού του φύλλου (Ψ) είναι ένας θάλαμος πίεσης τύπου Scolander (SKPM 1400, Skye Instruments). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 4 ημερομηνίες από τον Απρίλιο του 2019 και έπειτα, καθότι για πρακτικούς λόγους (μικρής διαμέτρου και εύθραστοι βλαστοί) δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν νωρίτερα. Η δειγματοληψία γινόταν τυχαία μεταξύ 12:00 και 14:00 μ.μ. με ένα δείγμα από κάθε plot στις μεταχειρίσεις SIM και AKA2. Λόγω του χρονοβόρου της διαδικασίας δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων. Τα δείγματα λαμβάνονταν από τα ανώτερα τμήματα του στελέχους, τα οποία περιτυλίγονταν με αλουμινόχαρτο και σφραγιζόντουσαν με πλαστική σακούλα για δέκα λεπτά το καθένα. Έπειτα από το πέρασμα του δεκαλέπτου κοβόντουσαν και κατευθείαν γινόταν η μέτρηση με το θάλαμο πίεσεως.

2.3. Δορυφορικά Δεδομένα

Χρησιμοποιήθηκαν εικόνες προερχόμενες από το δορυφόρο Sentinel-2 (A και B) της ESA. Η χρονική ανάλυση του συγκεκριμένου δορυφόρου ανέρχεται σε μία εικόνα κάθε 5 μέρες. Συνολικά στο πείραμα επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν 19 εικόνες, οι οποίες μεταφορτώθηκαν από το Copernicus Open Access Hub της ESA και καλύπτουν όλα τα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας από πριν τη σπορά μέχρι τη συγκομιδή σε ένα χρονικό πλαίσιο από τον Οκτώβριο του 2018 μέχρι τον Ιούνιο του 2019. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή και τη χρήση μιας εικόνας ήταν να είναι απαλλαγμένη από σύννεφα και από σκιάσεις στη περιοχή του χωραφιού, ώστε να μην επηρεάζεται η εγκυρότητα των μετρήσεων. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν

ατμοσφαιρικά και ραδιομετρικά διορθωμένα προϊόντα Level 2A, τα οποία η ESA τα παρέχει δωρεάν και αφορούν την ανακλαστικότητα στην επιφάνεια της Γης. Για να επιτευχθεί χωρική ανάλυση 10 m σε όλα τα κανάλια εφαρμόστηκε επαναδειγματοληψία όλων των εικόνων μέσω του δωρεάν λογισμικού ανοικτού κώδικα SNAP-ESA Sentinels Application Platform v6.0.4.

Για την εξαγωγή των δορυφορικών δεδομένων για τα εικονοστοιχεία του υπό μελέτη χωραφιού χρησιμοποιήθηκε το SNAP. Για να γίνει η εξαγωγή των pixel για κάθε μεταχείριση και για κάθε plot αρχικά περάστηκαν στο SNAP αρχεία Vector με σαφή όρια για κάθε ένα από αυτά, μετέπειτα δημιουργήθηκαν μάσκες για κάθε μεταχείριση και κάθε plot αντίστοιχα, οι οποίες παραλείπουν τα σημεία της περιφέρειας τους και κατά αυτόν τον τρόπο τα όρια τους δεν επηρεάζονται από γειτονικές περιοχές, που πιθανόν θα μπορούσαν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Οι μάσκες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή χρονοσειρών για τους δείκτες βλάστησης: NDVI, EVI, SAVI, NDRE και NDWI.

Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς – NDVI

(Normalized Difference Vegetation Index)

$$\text{NDVI} = \frac{R842 - R665}{R842 + R665} \qquad \text{NDVI} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης – EVI

(Enhanced Vegetation Index)

$$\text{EVI} = 2.5 \frac{R842 - R665}{R842 + (6 * R665) - (7.5 * R490) + 1} \qquad \text{EVI} = 2.5 * \frac{B8 - B4}{R842 + (6 * B4) - (7.5 * B2) + 1}$$

Εδαφικά Προσαρμοσμένος Δείκτης Βλάστησης – SAVI

(Soil-adjusted Vegetation Index)

$$\text{SAVI} = \frac{R842 - R665}{R842 + R665 + 0.5} * (1 * 0.5), \qquad \text{SAVI} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4 + 0.5} * (1 * 0.5)$$

Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Κόκκινης Ακμής – NDRE

(Normalized Difference of Red Edge)

$$\text{NDRE} = \frac{R842 - R705}{R842 + R750} \qquad \text{NDRE} = \frac{B8 - B5}{B8 + B5}$$

Δείκτης Νερού Κανονικοποιημένης Διαφοράς – NDWI

(Normalized Difference Water Index)

$$\text{NDWI} = \frac{R882 - R1610}{R882 + R1610} \qquad \text{NDWI} = \frac{B8 - B11}{B8 + B11}$$

Το R_x είναι η ανακλαστικότητα σε μήκος κύματος x , μέσω του οποίου υποδηλώνεται το κεντρικό μήκος κύματος για το αντίστοιχο φασματικό κανάλι του Sentinel-2 και B_x είναι το κανάλι του Sentinel-2 που χρησιμοποιείται σε κάθε δείκτη. Στον Πίνακα 1 φαίνεται αναλυτικά όλο το band setting του Sentinel-2.

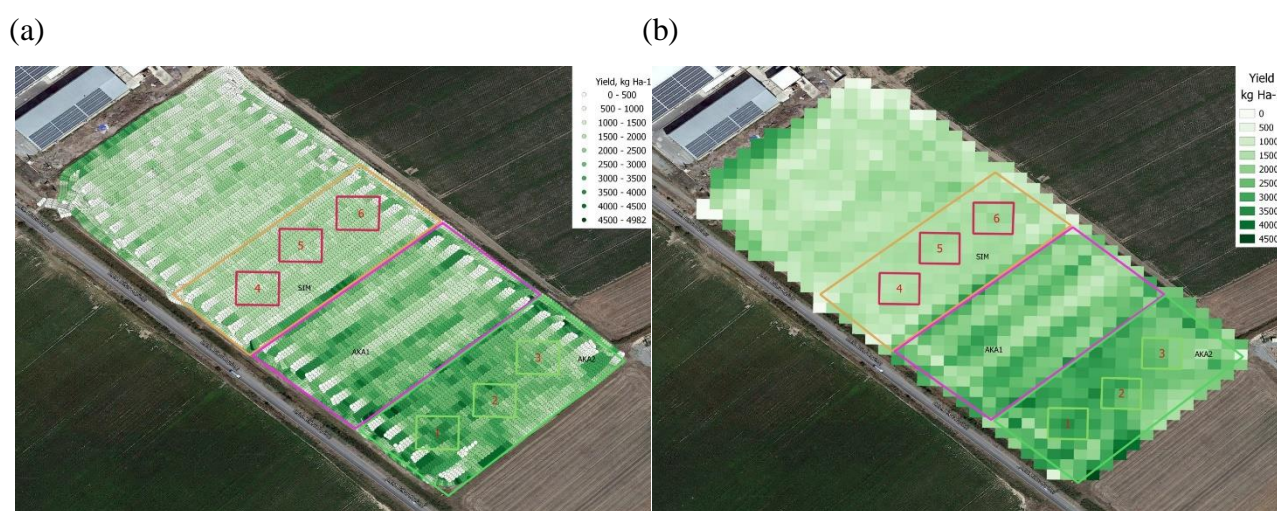
Πίνακας 1. Band Setting του Sentinel-2.

Κανάλι	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Χωρική ανάλυση (m)
B1	443	60
B2	490	10
B3	560	10
B4	665	10
B5	705	20
B6	740	20
B7	783	20
B8	842	10
B8A	865	20
B9	945	60
B10	1380	60
B11	1610	20
B12	2190	20

Οι χρονοσειρές αυτές για κάθε έναν από τους παραπάνω δείκτες, υποβλήθηκαν σε γραμμική παρεμβολή, ώστε να παράγουν καθημερινά δεδομένα για να καλύψουν όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Σκοπός αυτής της μεθοδολογίας ήταν να μπορεί να εφαρμόζεται με ευκολία σε μοντέλα παραγωγικότητας σε πραγματικό χρόνο και για το λόγο αυτό η γραμμική μέθοδος παρεμβολής, αλλά και η απουσία κάποιας διαδικασίας εξομάλυνσης στις χρονοσειρές των παραπάνω δεικτών βλάστησης έγιναν ώστε να διατηρηθεί η μεγαλύτερη δυνατή απλότητα. Τέλος, στα ημερήσια δεδομένα υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των δεικτών βλάστησης για τέσσερις χρονικές περιόδους μεταξύ της έναρξης της καλλιέργειας και της τελικής συγκομιδής.

2.4. Συγκομιδή και μέτρηση της παραγωγής του πειραματικού αγρού

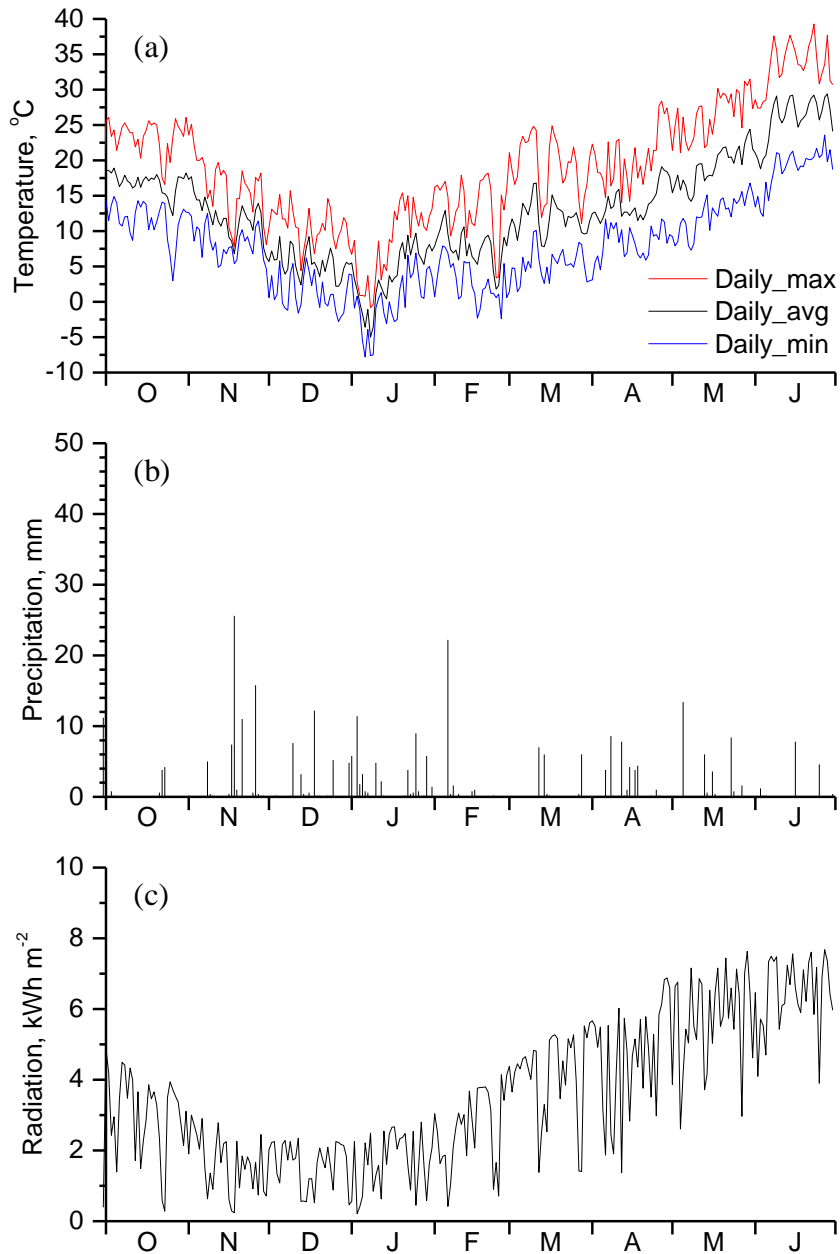
Στις 23/6/2019 πραγματοποιήθηκε η συγκομιδή του χωραφιού. Η συγκομιδή έγινε με αλωνιστική μηχανή John Deere S660i. Η αλωνιστική μηχανή αυτή ήταν εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης παραγωγής, το οποίο καταγράφει με χωρική ανάλυση περίπου 1.5 x 1 m. Τα δεδομένα παραγωγής ανακτήθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα της John Deere και όπως φαίνεται και στον πρώτο χάρτη (a) της Εικόνας 2 περιείχαν αρκετό θόρυβο. Διακρίνεται εμφανώς ότι στα σημεία εισόδου της μηχανής η παραγωγή να παίρνει πολύ μικρές τιμές και στα σημεία εξόδου της πολύ ψηλές. Αιτία για τα αποτελέσματα αυτά κρίθηκαν κυρίως παράγοντες που αφορούν την λειτουργία της αλωνιστικής μηχανής, όπως η αργοπορημένη καταγραφή της παραγωγής από τον αισθητήρα, η μη σταθερή ταχύτητα στα διάφορα σημεία του χωραφιού και τα διπλά περάσματα από το ίδιο σημείο. Έτσι κρίθηκε απαραίτητος ο καθαρισμός του χωραφιού στα σημεία που περιείχαν σφάλματα χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Yield Editor 2.0 όπου φαίνεται στην Εικόνα 2b. Έπειτα από τη διαδικασία καθαρισμού των σφαλμάτων και για να καταστεί δυνατή η απευθείας σύγκριση ριχελπος ριχελμε τα δορυφορικά δεδομένα του Sentinel-2, τα δεδομένα της παραγωγής πέρασαν από διαδικασία επαναδειγματοληψίας (resampling) όπου δημιουργήθηκε μια εικόνα raster που είχε μέγεθος εικονοστοιχείου ίσο με 10 x 10m και χωροθέτηση ίδια με αυτή των δορυφορικών εικόνων.



Εικόνα 2. Τα αρχικά δεδομένα παραγωγής από την αλωνιστική μηχανή John Deere S660i (a) και ο χάρτης παραγωγής μετά από τη διαδικασία καθαρισμού και τη διαδικασία resampling σε pixel 10 m (b).

2.5. Μετεωρολογικά Δεδομένα

Η λήψη των μετεωρολογικών δεδομένων (Θερμοκρασία, βροχόπτωση, ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου) έγινε από το μετεωρολογικό σταθμό της Χάλκης του δικτύου meteo.gr του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<https://www.meteo.gr/>), όπου τα δεδομένα φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 1.



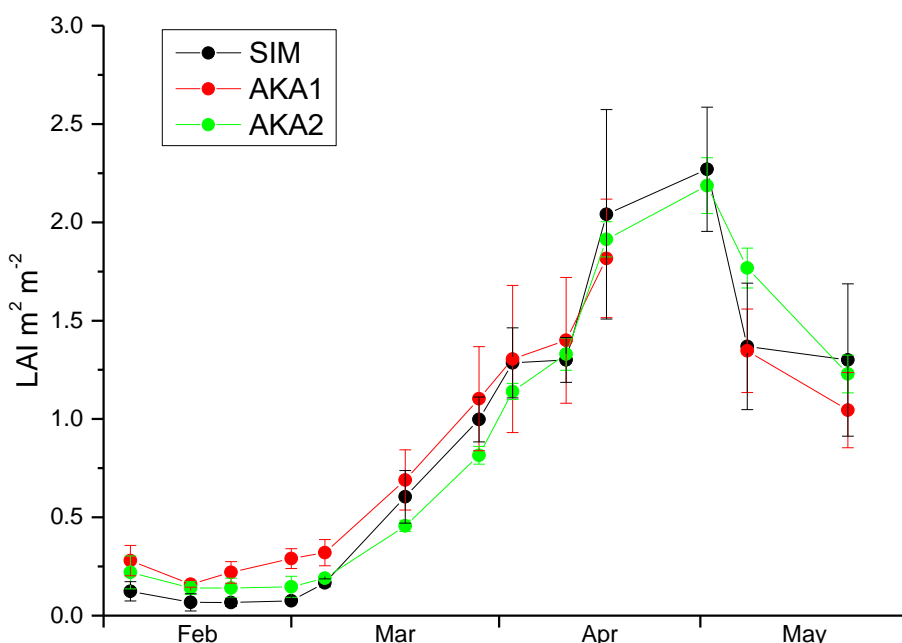
Σχήμα 2. Εποχιακή διακύμανση ημερήσιας θερμοκρασία (a), βροχόπτωσης (b) και ακτινοβολίας (c), από το μετεωρολογικό σταθμό της Χάλκης μέσω του δικτύου *meteo.gr* για όλη τη καλλιεργητική περίοδο. Στο Σχήμα 1a με κόκκινη γραμμή υποδηλώνεται η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία, με μπλε η ελάχιστη και με μαύρο η μέση ημερήσια θερμοκρασία.

3. Αποτελέσματα

3.1. Μετρήσεις πεδίου

3.1.1. Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI)

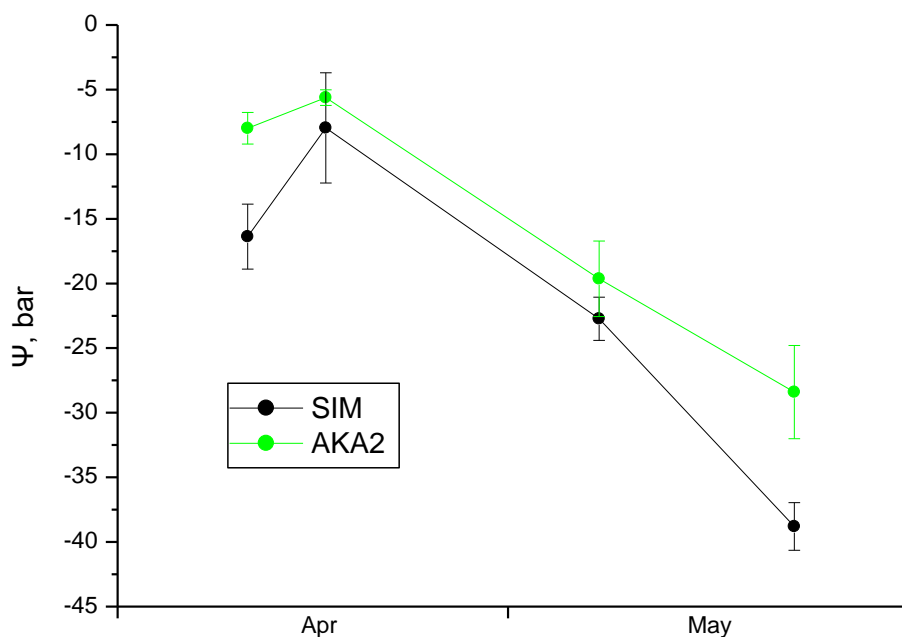
Το εποχιακό πρότυπο του δείκτη φυλλικής επιφάνειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Οι τιμές του LAI και για τις τρεις μεταχειρίσεις για τα ακόμα αρχικά στάδια ανάπτυξης τους (Φεβρουάριο) ήταν χαμηλές και καθώς η καλλιέργεια προχωρούσε στα επόμενα στάδια ανάπτυξης της ο ρυθμός αύξησης του δείκτη μεγάλωνε και οι υψηλότερες τιμές παρουσιάστηκαν σε ένα διάστημα από τα μέσα Απριλίου με τέλη όπου η καλλιέργεια ήταν σε πλήρη ανάπτυξη, ένα ελαφρύ προβάδισμα παρουσίασε η ΑΚΑ1 που είχε σπαρθεί και πρώτη. Όταν η καλλιέργεια προχώρησε στο στάδιο της ωρίμανσης του σπόρου και τα φύλλα άρχισαν να κιτρινίζουν (αρχές Μαΐου) ακολούθησε σταδιακή πτώση του δείκτη.



Σχήμα 3. Εποχιακή διακύμανση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI και για τις τρεις μεταχειρίσεις (AKA1, AKA2 και SIM).

3.1.2. Δυναμικό νερού (Ψ)

Οι μετρήσεις του δυναμικού νερού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4, ξεκίνησαν από τα μέσα Απριλίου εξαιτίας πρακτικών δυσκολιών, διότι κατά την προηγούμενη περίοδο οι βλαστοί ήταν εύθραυστοι και λεπτοί με αποτέλεσμα να σπάνε κατά την διαδικασία της μέτρησης. Η ΑΚΑ2 εμφανίζει μια υπεροχή σε σχέση με την SIM από την αρχή των μετρήσεων, αυτό θα μπορούσε να ερμηνευτεί με βάση τις διαφορές στα χαρακτηριστικά του εδάφους των δύο μεταχειρίσεων.



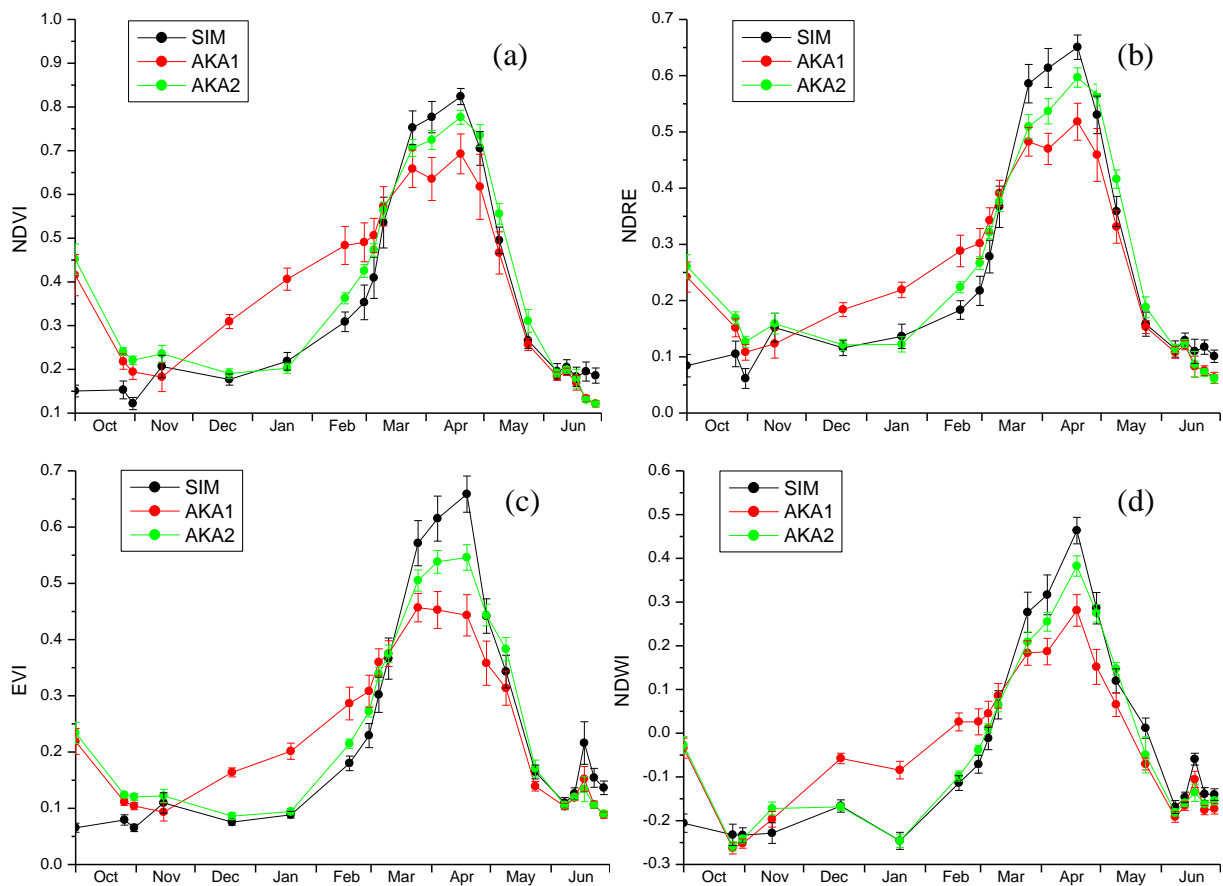
Σχήμα 4. Εποχιακή διακύμανση του δυναμικού νερού (Ψ) για την AKA2 και την SIM.

3.2. Δορυφορικά δεδομένα

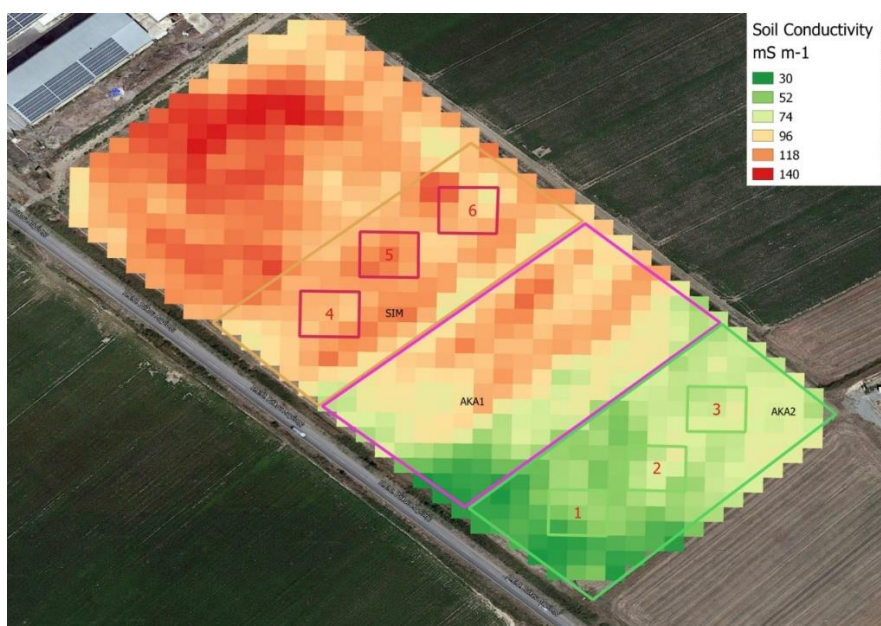
Τα εποχικά πρότυπα για τη καλλιέργεια του χειμερινού σιταριού συμπίπτουν αρκετά καλά με τις χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης από το δορυφόρο Sentinel-2 για όλη τη καλλιεργητική περίοδο (Σχήμα 5). Οι τιμές που παίρνουν οι δείκτες στην αρχή της καλλιέργειας κατά την σπαρτική περίοδο, το φθινόπωρο, είναι χαμηλές και αυξάνονται σταδιακά καθώς προχωράει η καλλιέργεια προς το στάδιο της άνθισης (τέλη Απριλίου), ενώ μετά το πέρας της άνθισης που αρχίζει η ωρίμανση οι τιμές μειώνονται κατακόρυφα. Η κατακόρυφη αυτή μείωση οφείλεται στην αποικοδόμηση των χλωροφυλλών κατά την γήρανση των φύλλων και έτσι μειώνεται σημαντικά η ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας στην κόκκινη περιοχή του φάσματος που περιέχουν οι δείκτες. Οι υψηλές αρχικές τιμές των δεικτών στην AKA1 και στην AKA2 συγκριτικά με την SIM (Οκτώβριος 2018, Σχήμα 5), οφείλονται στο γεγονός ότι λόγω ακαλλιέργειας έχουν παραμείνει στις μεταχειρίσεις αυτές απομεινάρια της προηγούμενης καλλιέργειας (βαμβάκι).

Είναι εμφανές στο Σχήμα 5 ότι η ανάπτυξη της AKA1 δεν συμβαδίζει απόλυτα με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις των οποίων η πορεία ανάπτυξης μοιάζει να είναι αρκετά κοντά. Ένας λόγος σίγουρα, φαίνεται να είναι η πρωιμότητα της σποράς στη συγκεκριμένη μεταχείριση σε σχέση με τις άλλες δύο και γι' αυτό εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές μέχρι και πριν την άνθιση. Παρότι όμως θα έπρεπε να κατέχει το προβάδισμα και στη περίοδο της άνθισης όπως ήταν η αρχική εκτίμηση, παρατηρήθηκε πτώση στο ρυθμό ανάπτυξης με αποτέλεσμα να έχει τις μικρότερες τιμές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων, με την SIM να παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές. Επίσης, παρατηρείται παραλλακτικότητα κατά την άνθιση και στο εσωτερικό της AKA1 όπως φαίνεται και από τις μπάρες σφαλμάτων στο Σχήμα 5. Αυτή η πτώση του ρυθμού ανάπτυξης αλλά και η

παρλλακτικότητα στο εσωτερικό της μεταχείρισης πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη αλατότητας σε ορισμένα σημεία, όπως φαίνεται και σε παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3).



Σχήμα 5. Χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης NDVI (a), NDRE (b), EVI (c) και NDWI (d) από το δορυφόρο Sentinel-2 για τις τρεις μεταχειρίσεις, AKA1 (κόκκινο), AKA2 (πράσινο) και SIM (μαύρο). Τα σημεία αφορούν τις μέσες τιμές ανά μεταχείριση και οι μπάρες σφαλμάτων το \pm SD.



Εικόνα 3. Χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους σε όλο το χωράφι.

Για την αξιολόγηση των δεικτών βλάστησης ως προς την εκτίμηση της απόδοσης των μεταχειρίσεων υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών τους για τέσσερα διαφορετικά χρονικά διαστήματα της καλλιέργειας. Οι ημερομηνίες που επιλέχθηκαν βασίζονται στα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, έχοντας ως αρχικό στάδιο τη περίοδο της σποράς και ως τελικό τη περίοδο της συγκομιδής. Οι ημερομηνίες αυτές ήταν οι ίδιες για όλους του δείκτες βλάστησης και για όλες τις μεταχειρίσεις. Ως τελική ημερομηνία σε όλα τα διαστήματα ήταν η 23^η Ιουνίου του 2019, μια ημερομηνία κοντά στη συγκομιδή και ως αρχική το καθένα είχε μία από κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας: σπορά (31 Οκτωβρίου 2018), έντονη βλάστηση (1 Φεβρουαρίου 2019), καλάμωμα (25 Μαρτίου 2019) και άνθιση (29 Απριλίου 2019). Σε δεύτερη φάση τα ολοκληρώματα που προέκυψαν συσχετίστηκαν με τα δεδομένα από τη αλωνιστική μηχανή με το σύστημα χαρτογράφησης John Deere S660i. Η αρχική εκτίμηση ήταν πως το ολοκλήρωμα που αναφέρεται σε όλη την καλλιεργητική περίοδο θα είχε μικρότερη συσχέτιση με το τελικό προϊόν συγκριτικά με το ολοκλήρωμα που αναφέρεται στη περίοδο μετά την άνθιση έως τη συγκομιδή, διότι μετά την άνθιση τα προϊόντα της φωτοσύνθεσης χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση του σπόρου. Οι συσχετίσεις που προέκυψαν (Πίνακας 2) δεν ήταν οι αναμενόμενες, ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των ολοκληρωμάτων των δεικτών βλάστησης με τα αποτελέσματα παραγωγής από την αλωνιστική μηχανή παρέμενε αρκετά χαμηλός και για τα τέσσερα διαστήματα για όλους τους δείκτες.

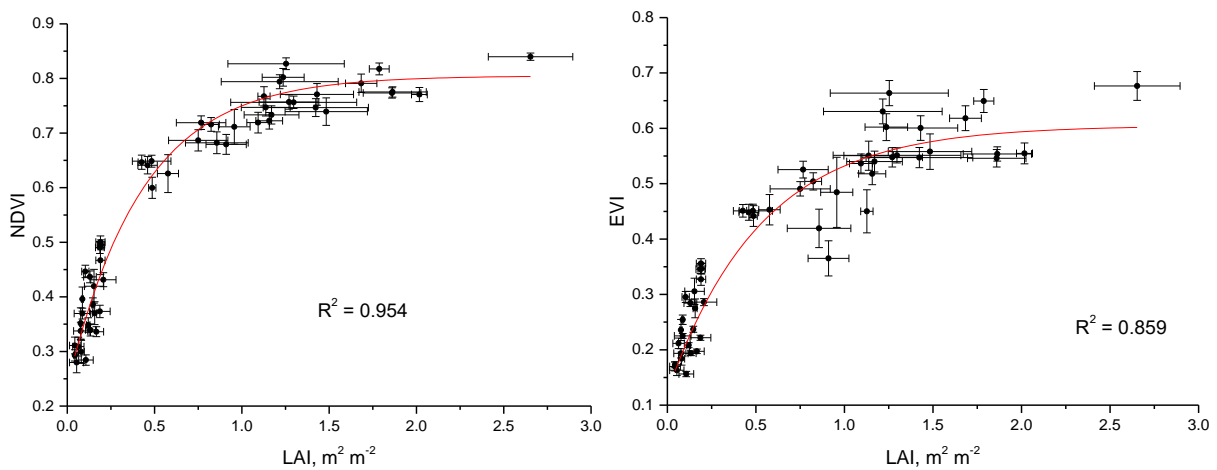
Πίνακας 2: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ ολοκληρωμάτων από τις χρονοσειρές των τριών δεικτών βλάστησης (NDVI, EVI και NDRE) και τελικής παραγωγής, για τέσσερα διαφορετικά χρονικά διαστήματα, για τις τρεις μεταχειρίσεις μαζί (ALL) και ξεχωριστά.

Δείκτης	Διάστημα	ALL	AKA1	AKA2	SIM
NDVI	31/10-23/6	0,432	0,602	0,186	0,342
	1/2-23/6	0,480	0,629	0,187	0,394
	25/3-23/6	0,216	0,663	0,309	0,581
	29/4-23/6	0,530	0,765	0,490	0,507
EVI	31/10-23/6	0,238	0,537	0,276	0,392
	1/2-23/6	0,037	0,557	0,259	0,444
	25/3-23/6	-0,103	0,562	0,247	0,557
	29/4-23/6	0,201	0,654	0,434	0,534
NDRE	31/10-23/6	0,333	0,498	-0,034	0,409
	1/2-23/6	0,238	0,520	0,054	0,438
	25/3-23/6	0,052	0,533	0,164	0,500
	29/4-23/6	0,430	0,527	0,479	0,307

3.3. Συσχετίσεις

3.3.1. Sentinel-2 – LAI

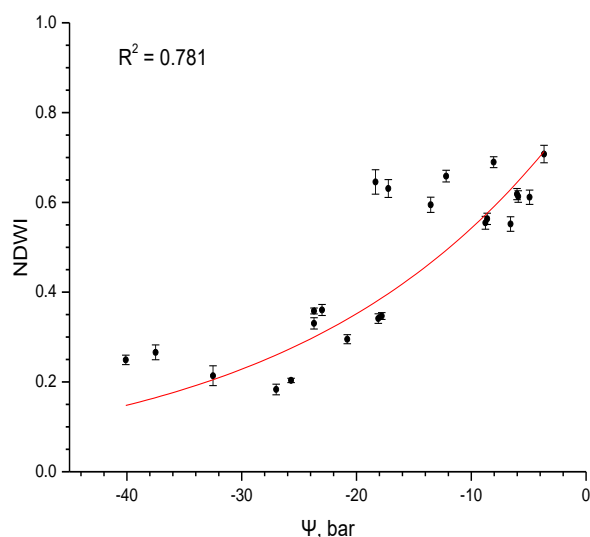
Το LAI ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας είναι μια παράμετρος η οποία έχει σημαντικό ρόλο στα μοντέλα παραγωγής και στη παρακολούθηση των καλλιεργειών. Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η συσχέτιση του με δύο δείκτες βλάστησης τον NDVI και τον EVI οι οποίοι υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2. Συνήθως για μεγάλες τιμές LAI ο NDVI παρουσιάζει κορεσμό και ο EVI λειτουργεί καλύτερα. Στη συγκεκριμένη μελέτη όμως ο NDVI δούλεψε καλύτερα σε σχέση με τον EVI, αυτό πιθανόν εξηγείται στη μη καλή αναπτυξιακή πορεία της καλλιέργειας όπου οι τιμές του LAI δεν ξεπέρασαν την τιμή 3.



Σχήμα 6. Συσχέτιση του LAI με τους δείκτες βλάστησης NDVI (αριστερά) και EVI (δεξιά) του δορυφόρου Sentinel-2.

3.3.2. Sentinel-2 – Δυναμικό νερού (Ψ)

Η συσχέτιση του δυναμικού νερού (Ψ) και του δείκτη NDWI που υπολογίστηκε από δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2 φαίνεται στο Σχήμα 7, όπου παρά τις λίγες μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν υποδεικνύει μια καλή συσχέτιση ($R=0.8$) και ο δείκτης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας.



Σχήμα 7. Συσχέτιση του δυναμικού νερού (Ψ) των δύο μεταχειρίσεων (AKA2 και SIM) με τις τιμές του δείκτη νερού NDWI από τον δορυφόρο Sentinel-2.

3.4. Μοντέλο παραγωγικότητας

Το μοντέλο παραγωγικότητας βασίστηκε στην προσέγγιση αποδοτικότητας χρήσης φωτός (LUE), σύμφωνα με τη εξίσωση:

$$GPP = \varepsilon * PAR * FAPAR$$

όπου

ε , ο συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε φωτοσυνθετικά προϊόντα

PAR, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που προσπίπτει στο θόλο

FAPAR, το ποσοστό της PAR που απορροφάται από το θόλο

και περιελάμβανε ένα scalar θερμοκρασίας (T_{scalar}) και ένα νερού (W_{scalar}):

$$GPP = \varepsilon_0 * T_{\text{scalar}} * W_{\text{scalar}} * PAR * FAPAR$$

όπου

ε_0 , ο συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε φωτοσυνθετικά προϊόντα για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια σιταριού κάτω από βέλτιστες συνθήκες. Το ε_0 προσδιορίστηκε μέσω μετρήσεων φωτοσύνθεσης στα $0.432 \text{ g C mol}^{-1} \text{ PAR}$ (Μαξούρη 2020).

T_{scalar} , scalar θερμοκρασίας, το οποίο υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (Raich et al. 1991):

$$T_{\text{scalar}} = \frac{(T_{\text{day}} - T_{\text{min}})(T_{\text{day}} - T_{\text{max}})}{[(T_{\text{day}} - T_{\text{min}})(T_{\text{day}} - T_{\text{max}})] - (T_{\text{day}} - T_{\text{opt}})^2}$$

όπου

T_{day} , η μέση θερμοκρασία της ημέρας

T_{min} , η ελάχιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης

T_{max} , η μέγιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης

T_{opt} , η βέλτιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης

Η T_{day} προερχόταν από τα μετεωρολογικά δεδομένα, ενώ οι T_{min} , T_{max} , και T_{opt} προσδιορίστηκαν από μετρήσεις φωτοσύνθεσης στους 5, 45 και 25 °C αντίστοιχα (Μαζούρη 2020).

W_{scalar} , scalar νερού, το οποίο υπολογίστηκε με δυο διαφορετικούς τρόπους:

1. Από μετεωρολογικά δεδομένα, σύμφωνα με την εξίσωση (Stagakis et al. 2015):

$$W_{scalar}^m = 1 - e^{-(WB+60)/36}$$

όπου WB η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για διάστημα 10 ημερών. Δοκιμάστηκαν διάφορα διαστήματα (5, 10, 20 και 30 ημερών), με τις 10 ημέρες να δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα.

2. Από δορυφορικά δεδομένα, σύμφωνα με την εξίσωση (Mahadevan et al. 2008):

$$W_{scalar}^s = \frac{1 + NDWI}{1 + NDWI_{max}}$$

όπου ο δείκτης NDWI υπολογίστηκε από δεδομένα Sentinel-2 και το $NDWI_{max}$ αφορά τη μέγιστη τιμή του σε όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου.

PAR, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (400 – 700 nm) που προσπίπτει στο θόλο. Προέρχεται από μετεωρολογικά δεδομένα.

FAPAR, το ποσοστό της PAR που απορροφάται από το θόλο. Εξαρτάται από το πόσο ανεπτυγμένος είναι ο θόλος της καλλιέργειας, αλλά και από αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του θόλου. Υπολογίζεται μέσω του LAI, σύμφωνα με την εξίσωση (Ruimy et al. 1999):

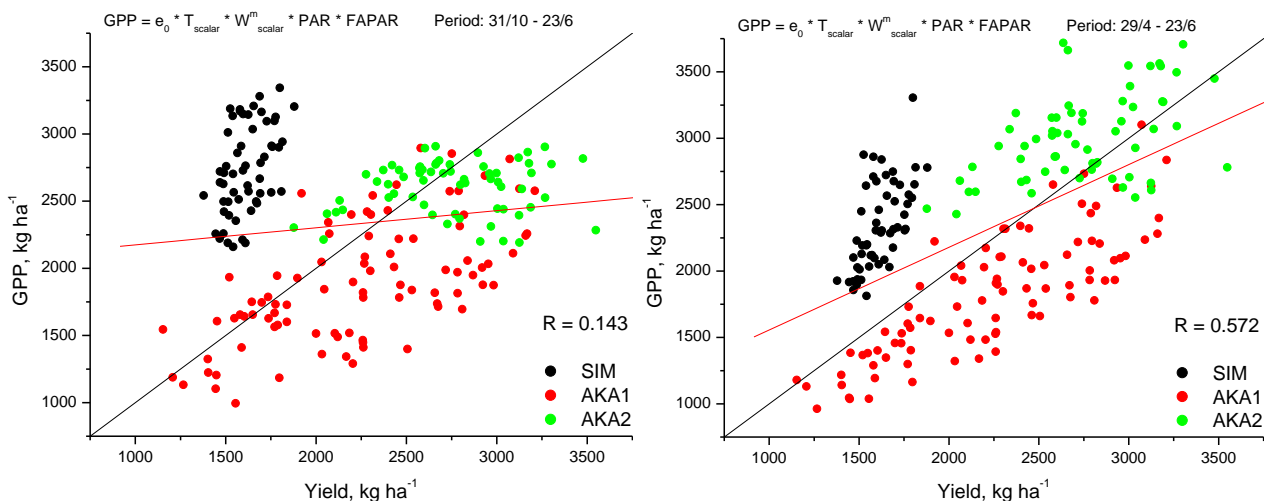
$$FAPAR = (1 - e^{-kd * LAI}) * 0.95$$

όπου kd, ο συντελεστής απόσβεσης του φωτός στο θόλο, ο οποίος υπολογίστηκε στο 0.5 (Kukal & Irmak 2020), ενώ το LAI υπολογίζεται από δορυφορικά δεδομένα. Ο υπολογισμός του LAI μπορεί να γίνει μέσω οποιουδήποτε δορυφορικού δείκτη σχετίζεται με την παρουσία πράσινης βιομάζας (π.χ. NDVI, EVI, NDRE, SAVI κλπ.), αλλά στη συνέχεια παρουσιάζονται εκδόσεις του μοντέλου μόνο για τους δείκτες NDVI και EVI, που έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα.

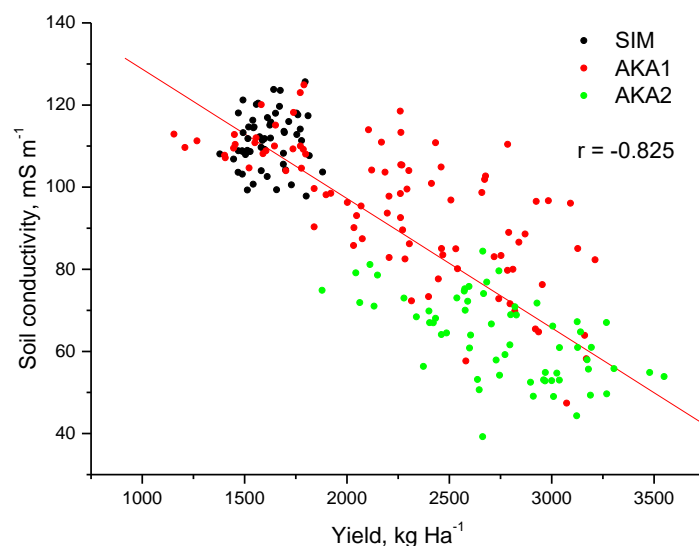
Η αξιολόγηση των διαφόρων εκδόσεων του μοντέλου έγινε μέσω σύγκρισης με την τελική παραγωγή που μετρήθηκε με θεριζοαλωνιστική μηχανή με σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής από την οποία προέκυψε ο χάρτης παραγωγής σε ανάλυση (10 x 10 m) και χωροθέτηση ίδια με του Sentinel-2 (Εικόνα 2). Σε πρώτη φάση αξιολογήθηκαν διαφορετικά διαστήματα ολοκλήρωσης, σύμφωνα με την υπόθεση που αξιολογήθηκαν τα ολοκληρώματα από τις ημερήσιες χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης: ολοκληρώματα κοντά στην ανθοφορία αναμενόταν να παρουσιάζουν καλύτερη συσχέτιση με την τελική παραγωγή, διότι μετά το πέρας της ανθοφορίας τα φωτοσυνθετικά προϊόντα κατευθύνονται σχεδόν αποκλειστικά προς την σύνθεση του σπόρου.

Πραγματικά, τα ολοκληρώματα της παραγωγικότητας για όλη τη καλλιεργητική περίοδο (31/10-23/6) δεν παρουσίασαν ιδιαίτερη συσχέτιση με την παραγωγή, ενώ το ολοκλήρωμα από την ανθοφορία μέχρι το τέλος (29/6-23/6) εμφάνισε μεν συσχέτιση, πλην όμως σχετικά χαμηλή (Σχήμα 8). Επιπροσθέτως, οι διαφορετικές μεταχειρίσεις – και ειδικά η συμβατική καλλιέργεια – φαίνονται να διαχωρίζονται ευκρινώς στο διάγραμμα συσχέτισης, υποδεικνύοντας ότι κάποιος άλλος παράγοντας παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική παραγωγή.

Προς ανεύρεση του παράγοντα αυτού και δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πεδίου παρατηρήθηκε ότι το έδαφος παρουσίαζε διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ των μεταχειρίσεων, θεωρήθηκε σκόπιμο να δοκιμαστεί ένα scalar εδάφους στο μοντέλο. Αρχικά, εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της αγωγιμότητας του εδάφους (Βασίλου Χ. 2020) και της τελικής παραγωγής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, διαπιστώθηκε μία πολύ καλή συσχέτιση, στην οποία οι τρεις μεταχειρίσεις περιγράφονται αρκετά καλά από την ίδια ευθεία. Στο μεγάλο εύρος αγωγιμότητας που μετρήθηκε στον πειραματικό αγρό ($40 - 130 \text{ mS m}^{-1}$), οι περιοχές με υψηλή αγωγιμότητα αποδίδουν μικρή παραγωγή και οι περιοχές με μικρή αγωγιμότητα υψηλή παραγωγή.

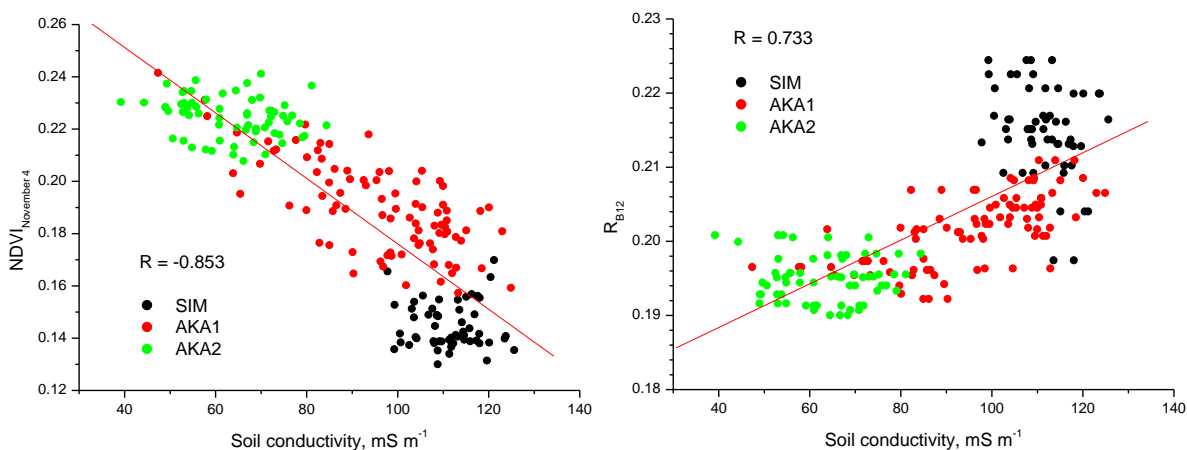


Σχήμα 8. Συσχέτιση μεταξύ GPP (μοντελοποιημένης παραγωγικότητας) με τα τελικά δεδομένα της παραγωγής (yield) για διαφορετικά ολοκληρώματα όπου το διάστημα τους φαίνεται πάνω δεξιά σε κάθε διάγραμμα και πάνω αριστερά εμφανίζονται οι συνιστώσες του μοντέλου.



Σχήμα 9. Συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους και τελικής παραγωγής (yield).

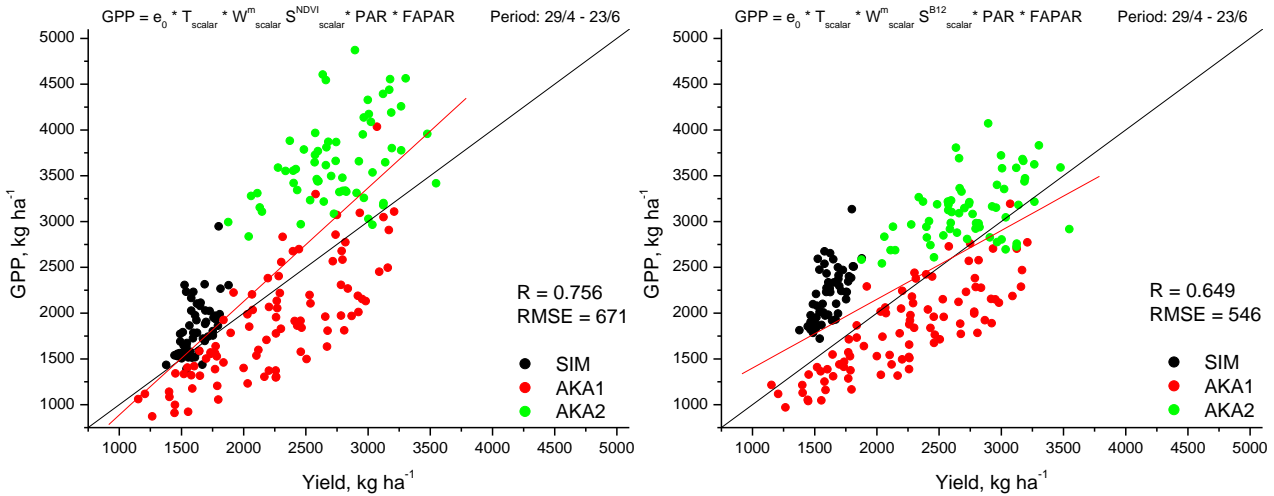
Δεδομένου όμως ότι η εδαφική αγωγιμότητα είναι μια παράμετρος η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο και πρακτικά είναι δύσκολο να βρεθούν μετρήσεις της σε μεγάλη χωρική κλίμακα, κρίθηκε αναγκαία η εύρεση κάποιας άλλης μεταβλητής η οποία θα μπορεί να ενσωματώνει εύκολα στο μοντέλο τις επιδράσεις του εδάφους. Έτσι, σε επόμενο στάδιο έγινε δοκιμή με τον NDVI του δορυφόρου Sentinel-2 για τις 4/11/2018 – ημερομηνία που αντιπροσωπεύει μετρήσεις για γυμνό έδαφος – και την ανακλαστικότητα στα 2190 nm (κανάλι B12 του δορυφόρου) κατά την ίδια ημερομηνία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10 οι δύο αυτές μεταβλητές παρουσίασαν καλή συσχέτιση με την αγωγιμότητα του εδάφους.



Σχήμα 10. Συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους και δείκτη NDVI για τις 4/11/2018 αναφερόμενο σε γυμνό έδαφος (αριστερά) και του καναλιού B12 (δεξιά) από το δορυφόρο Sentinel-2.

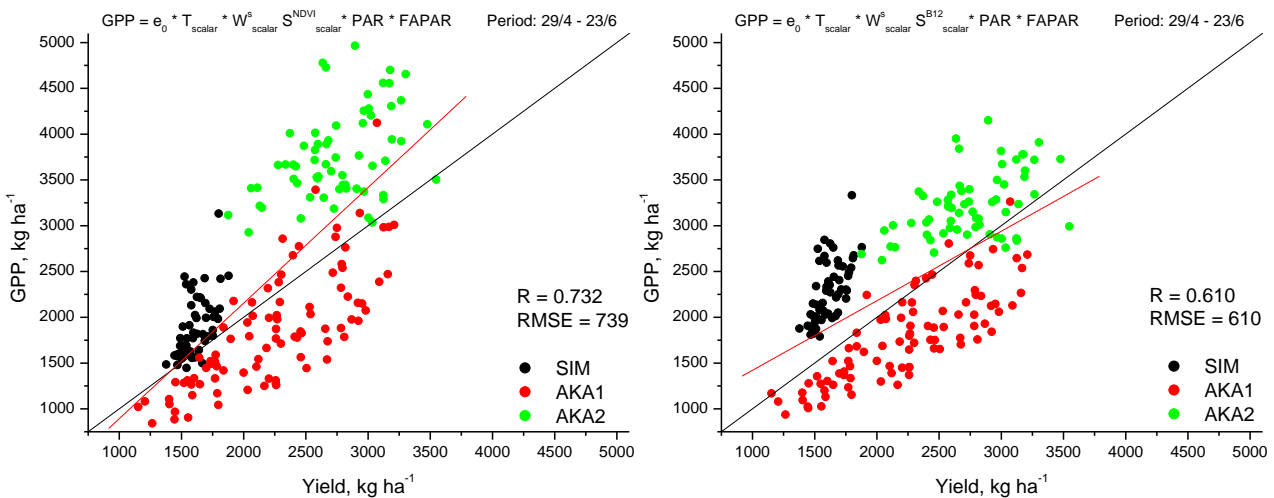
Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, έγινε ενσωμάτωση αυτών των δύο μεταβλητών υπό μορφή εδαφικού scalar στο μοντέλο (S^{NDVI}_{scalar} και S^{B12}_{scalar} για NDVI και ανακλαστικότητα στο κανάλι B12 αντίστοιχα). Πράγματι, και τα δυο scalar βελτιώνουν σημαντικά το μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, με το S^{NDVI}_{scalar} να δουλεύει καλύτερα από το S^{B12}_{scalar} (συντελεστές

συσχέτισης $R = 0.75$ και 0.64 αντίστοιχα). Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ με την ενσωμάτωση του S^{B12} scalar προκύπτει μικρότερος συντελεστής συσχέτισης προκύπτει όμως και μικρότερο RMSE, δηλαδή η ακρίβεια του είναι καλύτερη.



Σχήμα 11. Συσχέτιση μεταξύ τελικής παραγωγής (yield) και μοντελοποιημένης παραγωγής περιέχοντας την μεταβλητή εδάφους, στα αριστερά είναι με το S^{NDVI} scalar και στα δεξιά με το S^{B12} scalar, η εξίσωση του μοντέλου σε κάθε περίπτωση φαίνεται πάνω αριστερά και η περίοδος ολοκλήρωσης της παραγωγικότητας πάνω δεξιά.

Ακολουθώντας, δοκιμάστηκε η υποκατάσταση του scalar νερού που βασίζονταν σε μετεωρολογικά δεδομένα (W^m_{scalar}) από αντίστοιχο scalar βασισμένο σε δορυφορικά δεδομένα και συγκεκριμένα στον δείκτη νερού NDWI (W^s_{scalar}), ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση απουσίας μετεωρολογικών δεδομένων. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση του Σχήματος 13 με το Σχήμα 12, οι επιδόσεις του μοντέλου μεταξύ των δυο εκδόσεων (με W^m_{scalar} και W^s_{scalar}) δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, υποδεικνύοντας ότι η επίδραση του νερού απουσίας μετεωρολογικών δεδομένων μπορεί να γίνει μέσω δορυφορικών.



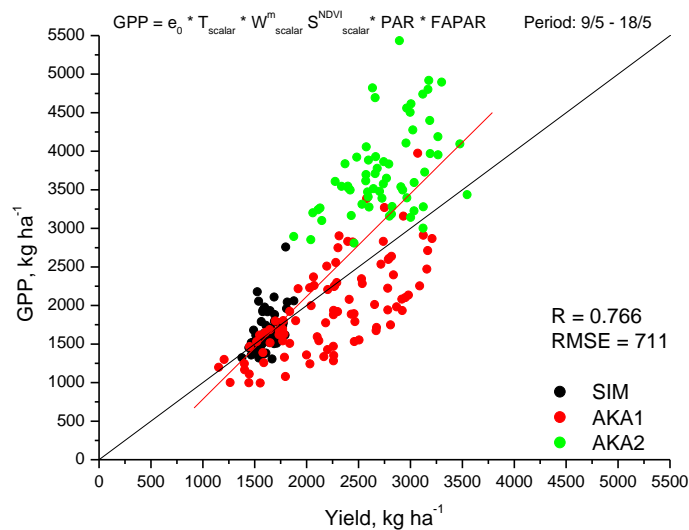
Σχήμα 12. Συσχέτιση τελικής παραγωγής με την μοντελοποιημένη παραγωγή χρησιμοποιώντας το W^s_{scalar} (από δορυφορικά δεδομένα). Στο αριστερό διάγραμμα είναι η εξίσωση με το S^{NDVI} scalar και στο δεξί με το S^{B12} scalar,

η εξίσωση του μοντέλου σε κάθε περίπτωση φαίνεται πάνω αριστερά και η περίοδος ολοκλήρωσης της παραγωγικότητας πάνω δεξιά.

Επομένως, η καλύτερη δυνατή μορφή της εξίσωσης του μοντέλου για το διάστημα 29/4-23/6 είναι:

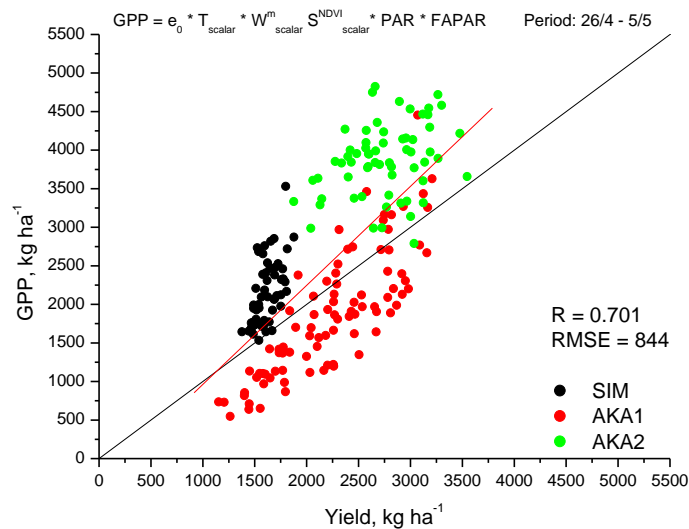
$$GPP = \epsilon_0 * T_{scalar} * W^m_{scalar} * S^{NDVI}_{scalar} * PAR * FAPAR \quad (11)$$

Προφανώς όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που εκτείνονται μέχρι την περίοδο συγκομιδής στα μοντέλα πρόβλεψης της απόδοσης. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν δεδομένα για διαστήματα ολοκλήρωσης πριν από την ημερομηνία συγκομιδής σε σχέση με την τελική παραγωγή. Για τον προσδιορισμό της καλύτερης και της πιο απομακρυσμένης ημερομηνίας από αυτή της συγκομιδής για την πρόβλεψη της παραγωγής εξετάστηκαν διαστήματα ολοκλήρωσης 10, 20 και 30 ημερών. Χρησιμοποιώντας πάντα την εξίσωση 11 οι καλύτεροι συντελεστές συσχέτισης προερχόντουσαν από διαστήματα ολοκλήρωσης 10 ημερών. Η καλύτερη συσχέτιση με $R = 0.766$ επιτεύχθηκε στο 10 ήμερο διάστημα 9/5 - 18/5 περίπου 1 μήνα πριν την συγκομιδή (Σχήμα 13), ενώ για τα διάστημα ολοκλήρωσης 20 ημερών ο καλύτερος συντελεστής ήταν $R = 0.765$ για το διάστημα 7/5 - 26/5 και για το διάστημα ολοκλήρωσης 30 ημερών ο καλύτερος ήταν $R = 0.766$ για το διάστημα 6/5 - 4/6.



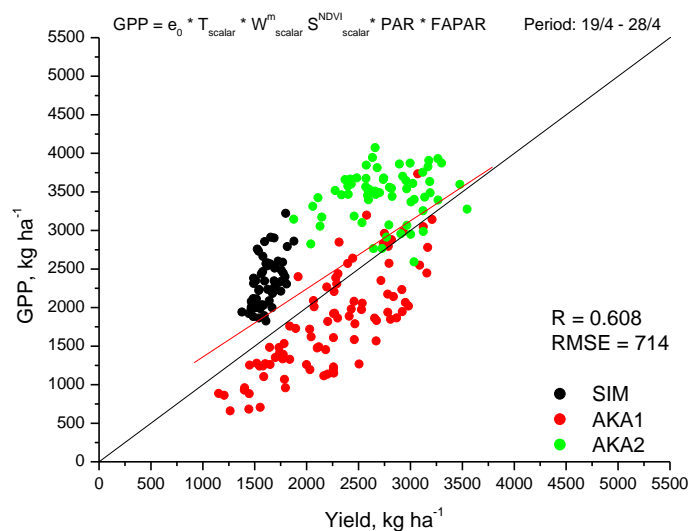
Σχήμα 13. Συσχέτιση μεταξύ τελικής παραγωγής (yield) με την μοντελοποιημένη παραγωγής για το διάστημα ολοκλήρωσης 9/5 - 18/5, όπου έχει επιτευχθεί η καλύτερη συσχέτιση.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο καλύτερος συντελεστής συσχέτισης επιτεύχθηκε στο διάστημα 9/5 - 18/5, ενώ για μικρότερο συντελεστή συσχέτισης $R = 0.7$ το διάστημα ολοκλήρωσης μετατοπίζεται νωρίτερα (26/4 - 5/5) παρέχοντας μία πιο έγκαιρη αλλά λιγότερο ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής (Σχήμα 14).



Σχήμα 14. Συσχέτιση μεταξύ τελικής παραγωγής (yield) με την μοντελοποιημένη παραγωγή για το διάστημα ολοκλήρωσης 26/4-5/5 όπου έχει επιτευχθεί συσχέτιση με $R=0.7$.

Αντίστοιχα, για ακόμη χαμηλότερο συντελεστή συσχέτισης $R = 0.6$ το 10ήμερο διάστημα ολοκλήρωσης μπορεί να μετατοπιστεί ακόμη πιο νωρίς (19/4 - 28/4), παρέχοντας μια σχετικά καλή πρόβλεψη περίπου ενάμιση μήνα πριν τη συγκομιδή (Σχήμα 15).



Σχήμα 15. Συσχέτιση μεταξύ τελικής παραγωγής (yield) με την μοντελοποιημένη παραγωγή για το διάστημα ολοκλήρωσης 26/4-5/5 όπου έχει επιτευχθεί συσχέτιση με $R=0.6$.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διαφορετικά 10ήμερα ολοκλήρωσης, μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για ολόκληρο το χωράφι και για τις τρεις μεταχειρίσεις ξεχωριστά.

Πίνακας 3. Συντελεστές συσχέτισης για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διαφορετικά 10ήμερα ολοκλήρωσης, μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για ολόκληρο το χωράφι (All) και για τις τρεις μεταχειρίσεις ξεχωριστά (AKA1, AKA2, SIM).

GPP	Διάστημα	All	AKA1	AKA2	SIM
$\epsilon_0 * PAR * FAPAR$	9/5-18/5	0.65	0.72	0.50	0.58
$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Temp$	9/5-18/5	0.65	0.72	0.50	0.58
$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Temp * W^{m}scalar$	9/5-18/5	0.65	0.72	0.50	0.58
$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Temp * W^{m}scalar * S^{NDVI}scalar$	9/5-18/5	0.77	0.69	0.47	0.52
$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Temp * W^{m}scalar S^{NDVI}scalar$	26/4-5/5	0.70	0.82	0.30	0.57
$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Temp * W^{m}scalar S^{NDVI}scalar$	19/4-28/4	0.60	0.78	0.17	0.55

4. Συζήτηση

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός δορυφορικού μοντέλου παραγωγικότητας για την εκτίμηση και πρόβλεψη της παραγωγής σίτου. Το μοντέλο στηρίχτηκε στην προσέγγιση αποδοτικότητας χρήσης φωτός και για τη διαμόρφωσή του χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου οικοφυσιολογικών παραμέτρων. Οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν σε πειραματικό αγρό ο οποίος περιελάμβανε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις με ακαλλιέργεια και συμβατική κατεργασία. Έτσι, παράλληλος στόχος ήταν και η αποτίμηση των καλλιεργητικών πρακτικών σε επίπεδο παραγωγής.

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα οι δυο μεταχειρίσεις ακαλλιέργειας – και ειδικά η ΑΚΑ2 – είχαν μεγαλύτερες παραγωγές από τη συμβατική καλλιέργεια. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, η παράμετρος που εξηγεί στον καλύτερο βαθμό (υψηλότερη συσχέτιση) τις διαφορές στην τελική παραγωγή είναι η αγωγιμότητα του εδάφους. Η παράμετρος αυτή παρουσίασε μεγάλο εύρος διακύμανσης στον συγκεκριμένο πειραματικό αγρό, γεγονός μάλλον ασυνήθιστο κάτω από πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας. Σε γενικές γραμμές, η αγωγιμότητα ήταν υψηλή στην περιοχή της συμβατικής καλλιέργειας (χαμηλή παραγωγή), ενδιάμεση στην περιοχή της ΑΚΑ1 (ενδιάμεση παραγωγή) και χαμηλή στην περιοχή της ΑΚΑ2 (υψηλή παραγωγή). Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για την επίδραση των μεταχειρίσεων στην τελική παραγωγή, πράγμα που θα ήταν δυνατό εάν η αγωγιμότητα ήταν σχετικά ομοιόμορφη μεταξύ των μεταχειρίσεων. Παρόλα αυτά, ο χάρτης της παραγωγής (Εικόνα 2) φανερώνει μια απότομη αύξηση της απόδοσης κατά τη μετάβαση από το τεμάχιο της συμβατικής κατεργασίας στην ακαλλιέργεια, γεγονός που υποδεικνύει την επωφελή επίδραση της ακαλλιέργειας.

Οι τρεις μεταχειρίσεις (ΑΚΑ1, ΑΚΑ2 και SIM) του πειράματος παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους κατά την περίοδο που εξελισσόταν το πείραμα. Η αρχική εκτίμηση ήταν ότι η ΑΚΑ1, έχοντας το προβάδισμα στην ημερομηνία σποράς, θα έχει πρωιμότερη ανάπτυξη σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, πράγμα που παρατηρήθηκε μέχρι και πριν την περίοδο της άνθισης, αλλά από κει και πέρα μειώθηκε αρκετά συγκριτικά με τις άλλες δύο, παρουσιάζοντας διαφορές και στο εσωτερικό της. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποδόθηκαν με σαφήνεια από τα στοιχεία που πάρθηκαν από το δορυφόρο Sentinel-2. Τα δεδομένα από τις πολυφασματικές εικόνες του δορυφόρου χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη χρονοσειρών για τους δείκτες βλάστησης, οι οποίες συμπίπτουν αρκετά καλά με το εποχιακό πρότυπο της καλλιέργειας. Κατά την χειμερινή περίοδο που το σκληρό σιτάρι ολοκληρώνει το αδελφωμα, οι τιμές των δεικτών βλάστησης παρουσίασαν μια σταδιακή αύξηση με τις τιμές του NDVI να αυξάνονται ταχύτερα συγκριτικά με τους άλλους δείκτες. Την περίοδο που αυξάνεται η θερμοκρασία κοντά στα τέλη Φεβρουαρίου και τα φυτά εισέρχονται σε ταχεία ανάπτυξη οι τιμές των δεικτών αυξήθηκαν και κορυφώθηκαν στην άνθιση (τέλη Απριλίου). Μέγιστη τιμή για τον NDVI ήταν περίπου 0.8, για τον EVI κοντά στο 0.7 το ίδιο

και για τον NDRE και για τον NDWI κοντά στο 0.5. Συνήθως ο NDVI δεν ενδείκνυται για την παρακολούθηση της βιομάζας των καλλιεργειών, διότι ο δείκτης φθάνει σε κορεσμό αρκετά νωρίς. Αυτό όμως συμβαίνει όταν οι τιμές του LAI είναι πάνω από 3 και έτσι η αναλογική σχέση του NDVI και της βιομάζας χάνεται (Huete et al., 2002), κάτι που στο συγκεκριμένο πείραμα δεν παρατηρήθηκε διότι οι τιμές του LAI δεν ξεπέρασαν το 3, πιθανώς επειδή η πορεία ανάπτυξης της καλλιέργειας δεν ήταν ιδιαίτερα καλή. Μετά το πέρας της άνθισης όλοι οι δείκτες παρουσίασαν απότομη μείωση, διότι σε αυτή τη φάση η καλλιέργεια εισέρχεται στο στάδιο της ωρίμανσης και ξεκινά το κιτρίνισμα των φύλλων με σταδιακή αποικοδόμηση των χλωροφυλλών.

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, στηριζόμενο στη προσέγγιση LUE, για την εκτίμηση και την πρόβλεψη της τελικής παραγωγής εφαρμόστηκαν και δοκιμάστηκαν διάφορες μεταβλητές (scalars) και διάφορα χρονικά διαστήματα, ώστε να επιτευχθεί μια καλή συσχέτιση με τα τελικά αποτελέσματα της συγκομιδής. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προερχόντουσαν από το δορυφόρο Sentinel-2 αλλά και από μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων. Το FAPAR που ενσωματώθηκε στο μοντέλο μέσω του LAI το οποίο προερχόταν από NDVI δούλεψε πολύ καλύτερα σε σχέση με αυτό που προερχόταν από EVI σε αντίθεση με άλλες αναφορές (π.χ. Stagakis et al. 2015), πιθανώς διότι ο LAI της καλλιέργειας δεν ξεπέρασε την τιμή 3, πάνω από την οποία ο LAI εμφανίζει κορεσμό σε σχέση με τον NDVI. Για την ενσωμάτωση της επίδρασης του νερού στο μοντέλο έγιναν δύο δοκιμές, η μία ήταν από δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τον κανονικοποιημένο δείκτη νερού NDWI από τον δορυφόρο Sentinel-2 και η δεύτερη από μετεωρολογικά δεδομένα μέσω της διαφοράς της ημερήσιας βροχόπτωσης με την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή. Η τελική ενσωμάτωση της επίδρασης του νερού στο μοντέλο έγινε μέσω του scalar που ήταν υπολογισμένο από μετεωρολογικά δεδομένα, αλλά αποδείχθηκε ότι και η ενσωμάτωση από δορυφορικά δεδομένα μπορεί να δουλέψει εξίσου καλά με μικρές διαφορές. Η χρήση scalar εδάφους στο μοντέλο, βελτίωσε σημαντικά τη λειτουργία του, ενσωματώνοντας τις μεγάλες διαφορές της εδαφικής αγωγιμότητας που υπήρχαν στον πειραματικό αγρό. Δοκιμάστηκαν δυο scalar εδάφους, ένα που βασίζονταν στον δείκτη βλάστησης NDVI στις 4/11/2018, περίοδος κατά την οποία το έδαφος είναι γυμνό και ένα με βάση την ανακλαστικότητα στα 2190 nm (κανάλι B12 του δορυφόρου Sentinel-2) κατά την ίδια περίοδο. Το scalar που βασίστηκε στο NDVI δούλεψε καλύτερα από αυτό με βάση το κανάλι B12, δίνοντας μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η καλύτερη εκτίμηση της τελικής παραγωγής παρέχεται από την έκδοση του μοντέλου

$$GPP = \epsilon_0 * T_{scalar} * W_{scalar}^m * S_{scalar}^{NDVI} * PAR * FAPAR$$

για διάστημα ολοκλήρωσης 29/4 – 23/6 (περίοδος ανθοφορίας – συγκομιδή).

Σύμφωνα με τους Cossani et al. (2009) οι περιβαλλοντικές συνθήκες για το εικοσαήμερο πριν την άνθιση και για το δεκαήμερο μετά την άνθιση της καλλιέργειας για τη περιοχή της Μεσογείου

θεωρούνται κρίσιμες για τον προσδιορισμό της απόδοσης για την καλλιέργεια χειμερινού σιταριού. Σε αυτό το διάστημα επομένως οποιασδήποτε μορφή καταπόνησης (θερμοκρασία, υδατικό στρες, ανεπάρκεια N ή ασθένεια) μπορεί να επηρεάσει την απόδοση ως προς το σπόρο. Ιδανικά το μοντέλο θα έπρεπε να παρέχει μια καλή συσχέτιση με την παραγωγή όσο το δυνατόν πιο νωρίς, γύρω στο Μάρτιο, ώστε να παρεμβάλλεται ένα σεβαστό χρονικό διάστημα μεταξύ πρόγνωσης και τελικής συγκομιδής. Δοκιμάστηκαν 10ήμερα, 20ήμερα και 30ήμερα ολοκληρώματα, όπου τα 10ήμερα δούλεψαν καλύτερα παρέχοντας μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης σε μια σχετικά μακρινότερη περίοδο από αυτή της συγκομιδής. Δεδομένου ότι η συγκομιδή έγινε στις 23/6, ενώ το καλύτερο 10ήμερο ($R = 0.766$) αφορούσε το διάστημα 9/5 - 18/5, δηλαδή περίπου ένα μήνα πριν τη συγκομιδή, γίνεται φανερό ότι η χρονική περίοδος που παρεμβάλλεται μεταξύ τους είναι σχετικά μικρή και όχι αυτή που θα προσέφερε ένα μεγαλύτερο όφελος στον παραγωγό ώστε να κινηθεί πιο στοχευμένα. Ωστόσο, για μικρότερους συντελεστές συσχέτισης, το 10 ήμερο πρόβλεψης μπορεί να μετατοπιστεί αρκετά νωρίτερα, στις 5/5 για $R = 0.701$ ή στις 28/4 για $R = 0.608$. Επιπροσθέτως, σε αυτό το τελευταίο 10ήμερο η ευθεία της συσχέτισης είναι πιο κοντά και πιο παράλληλη με τη γραμμή 1:1, κάτι που γενικά είναι επιθυμητό να συμβαίνει σε τέτοιου είδους μοντέλα.

5. Συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές, η πορεία ανάπτυξης της καλλιέργειας όπως αποτυπώνεται από τις χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης που προέκυψαν από τα δορυφορικά δεδομένα, αποδίδει ικανοποιητικά το εποχιακό πρότυπο της καλλιέργειας με βάση τις μετρήσεις πεδίου. Οι μετρήσεις πεδίου παρουσιάζουν καλές συσχετίσεις με τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2, γεγονός που συμβάλει στην εγκυρότητα χρήσης των δεδομένων αυτών. Στη συγκεκριμένη καλλιέργεια, σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση της απόδοσης μεταξύ των μεταχειρίσεων είχε η έντονη παραλλακτικότητα της εδαφικής αγωγιμότητας. Οι αρχικές δοκιμές του μοντέλου δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικές, ωστόσο οι επιδόσεις του μοντέλου βελτιώθηκαν σημαντικά με την ενσωμάτωση της επίδρασης του εδάφους από δορυφορικά δεδομένα, με $R = 0.766$ μεταξύ μετρημένης και μοντελοποιημένης παραγωγής σχεδόν ένα μήνα πριν την ημερομηνία της συγκομιδής, ή σχεδόν 2 μήνες πριν με $R = 0.608$. Αυτή η σχετικά καλή και έγκαιρη πρόβλεψη που επιτυγχάνεται από το μοντέλο αφενός παρέχει πιθανώς τη δυνατότητα εφαρμογής πρακτικών γεωργίας ακριβείας με στόχο την περεταίρω βελτιστοποίηση της παραγωγής, αφετέρου αποτελεί μια σημαντική πληροφορία για την κατάρτιση σχεδίων έγκαιρης συγκομιδής και την οργάνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας των εμπόρων και της βιομηχανίας ζυμαρικών.

Βιβλιογραφία

- Aese J.K. and Siddoway F.H., 1979. Crown-Depth Soil Temperatures and Winter Protection for Winter Wheat Survival. Access DL.
- Alemu A., Feyissa T., Letta T. and Abeyo B., 2020. Genetic Diversity and Population Structure Analysis based on the High Density SNP markers in Ethiopian Durum Wheat (*Triticum turgidum* ssp. *Durum*). *BMC Genetics*.
- Basso B., Liu L. and Ritchie J.T., 2016. *Advances in Agronomy. A Comprehensive Review of the CERES-Wheat,-Maize and -Rice Models' Performances*, pp 27-132.
- Becker-Reshef, Vermote E. and Justice C., 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, pp 1312-1323.
- Claverie M., Demarez V., Duchemin B., Hagolle O., Ducrot D., Marais-Sicre C., Dejoux J.F., Huc M., Keravec P., Beziat P., Fieuzal R., Ceschia E. and Dedieu G., 2012. *Remote Sensing of Environment. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data*, pp 844-857.
- Cossani C.M., Slafer G.A. and Savin R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of condition in a Mediterranean site. *Field Crops Research*, pp 205-213.
- Dong T., Liu J., Qian B., Zhao T., Jing Q., Geng X., Wang J., Huffman T. and Shang J., 2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Estimating winter wheat biomass by assimilating leaf area index derived from fusion of Landsat-8 and MODIS data*, pp 63-74.
- EDO (European Drought Observatory). NDWI: Normalized Difference Water Index, 2001.
- EOS. Earth Observing System. Normalized Difference REDEDGE.
- ESA united space in Europe. Sentinel2.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguex E.P., Gao X. and Ferreira L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, pp 195-213.
- Jensen J.R., 2015. Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος μια προοπτική για τα φυσικά διαθέσιμα. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα.
- Liao C., Waang J. and Shan B., 2019. Corn Biomass Estimation Using Sentinel-2 and VENμS Data Based on A Simple Light Use Efficiency Method. Publisher IEEE.
- Matsushita B., Yang W., Chen J., Onda Y. and Qiu G., 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. MDPI.

- Monsi M. and Saeki T., 1953. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, pp 14, 22-52.
- Raich, J.W., Rastetter, E.B., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W., Steudler, P.A., Peterson, B.J., Grace, A.L., Moore, B., III & Vorosmarty, C.J., 1991. Potential net primary productivity in south America: Application of a global model, pp 399-429.
- Ren J., Chen Z., Zhou Q. and Tang H., 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Sandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Shewry P.R., 2009. Wheat. *Journal of Experimental Botany*.
- Singh A.K., Tripathy R. and Chopra U.K., 2008. *Agricultural Water Management*. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop, pp 776-786.
- Smith C.W., 1995. *Crop Production Evolution History and Technology*. Wiley J. Publishers, New York.
- Stockle C.O., Donatelli M. and Nelson R., 2003. *European Journal of Agronomy*. CropSyst, a cropping systems simulation model, pp 289-307.
- Stragakis S., Markos N., Levizou E. and Kyparissis A., 2007. *Forest Ecosystem Dynamics Using Spot and MODIS Satellite Images*.
- Stragakis S., Markos N., Sykioti O. and Kyparissis A., 2010. Monitoring canopy biophysical and biochemical parameters in ecosystem scale using satellite hyperspectral imagery: An application on a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using multiangular CHRIS/PROBA observations. *Remote Sensing of Environment*, pp 977-994.
- Stragakis S., Markos N., Vanikiotis T., Tzotsos A., Sykioti O. and Kyparissis A., 2015. sCASE: A primary productivity monitoring system for the forests of North Pindus National Park (Epirus, Greece). *European Journal of Remote Sensing*.
- Vergauwen D., and Smet I.D., 2017. From Early Farmers to Norman Borlaug - the making of modern wheat. *Current Biology*, pp R858-R862.
- Xiao X., Hollinger D., Aber J., Goltz M., Davidson E. A., Zhang Q. and Moore B., 2004. *Remote Sensing of Environment* 89. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest, pp 519-534.
- Xiping D., Lun S. and Shinobu I., 2002. *Assessments on the Water Conservation Practices and Wheat Adaptations to the Semiarid and Eroded Environments*. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Shaanxi 712100, PR. China.
- Zhang N., Wang M. and Wang N., 2002. *Computers and Electronics in agriculture*. In: *Precision agriculture- a worldwide overview* pp. 113-132.

- Ανατολίτης Κ., 2020. Εκτίμηση Παραγωγής σε καλλιέργεια Σκληρού Σιταριού με τη χρήση Δεικτών Βλάστησης από το Δορυφόρο Sentinel-2.
- Βασίλου Χ., 2020. Χρήση επίγειων και υπέργειων αισθητήρων για την αποτύπωση της χωροχρονικής παραλλακτικότητας πιλοτικού αγρού με καλλιέργεια σκληρού σίτου και συσχέτιση των παραμέτρων με τη τελική παραγωγή
- Καρτάλης Κ. και Φείδας Χ. 2017. Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Μαξούρη Μ., 2020. Μετρήσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και φωτοσύνθεσης σε καλλιέργεια σίτου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2.
- Μικρούλης Α., Αναστασίου Ε., Φούντας Σ., Μπαλαφούτης Α. και Τραυλός Ι., 2015. Monitoring of Growth of Cultures with use of Spectral Sensor and RGB Camera. Πρακτικά από 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος “Καινοτομία και Νέες Τεχνολογίες στη Γεωργική Μηχανική και τη Διαχείριση Φυσικών Πόρων”, Θεσσαλονίκη.
- Παπακώστα-Τασοπούλου Δ., 2012. Σιτηρά και Ψυχανθή. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη, σελ. 111-146.
- Περάκης Κ., Φαρασλής Ι. και Μουσιάδης Α., 2015. Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες: Θεωρία, Μέθοδοι και Εφαρμογές. Εκδόσεις ΣΕΑΒ.
- Φασούλα Α.Κ. και Φωτιάδη Ν.Α., 1984. Αρχές της Επιστήμης των Καλλιεργειών Φυτών. Θεσσαλονίκη σελ. 118-125.