

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ

ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εκτίμηση παραγωγής σε καλλιέργειες σίτου με την χρήση μοντέλων
αποδοτικότητας χρήσης φωτός**

Yield estimation in wheat fields with the use of Light Use Efficiency models

Λαμπρόπουλος Νίκος

Επιβλέπων καθηγητής: Άρης Κυπαρίσσης

Ιούλιος 2021

Βόλος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ

ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση παραγωγής σε καλλιέργειες σίτου με την χρήση μοντέλων αποδοτικότητας χρήσης φωτός

Yield estimation in wheat fields with the use of Light Use Efficiency models

Λαμπρόπουλος Νίκος

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

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

Κυριάκος Γιαννούλης, Επίκουρος Καθηγητής, 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.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
1. Εισαγωγή	3
1.1 Σιτάρι.....	3
1.2 Τηλεπισκόπηση	3
1.3 Δορυφόροι Sentinel-2	4
1.4 Δείκτες Βλάστησης	5
1.4.1 Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	6
1.4.2 Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης EVI (Enhanced Vegetation Index)	7
1.4.3 Δείκτης Νερού Κανονικοποιημένης Διαφοράς NDWI (Normalized Differential Water Index)	8
1.4.4 Κανονικοποιημένος Πολυφασματικός Δείκτης Ξηρασίας NMDI (Normalized Multi-band Drought index)	8
1.5 Μοντέλα LUE (Light Use Efficiency)	8
1.6 Σκοπός.....	9
2. Υλικά και μέθοδοι.....	10
2.1 Περιοχή μελέτης.....	10
2.2 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	10
2.3 Δεδομένα παραγωγής	10
2.4 Δορυφορικά δεδομένα.....	10
2.5 Δείκτες βλάστησης και δείκτες νερού.....	12
2.6 Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI, Leaf Area Index)	13
2.7 Μοντέλα εκτίμησης παραγωγής LUE	14
3. Αποτελέσματα.....	17
3.1 Εκτίμηση παραγωγής με μοντέλα LUE	17
3.1.1 Ομάδα μοντέλων που προέκυψαν από NDVI	18

3.1.2 Ομάδα μοντέλων που προέκυψαν από EVI.....	20
3.2 Απομάκρυνση «προβληματικών χωραφιών».....	22
3.2.1 Ομάδα μοντέλων με FAPAR μετρημένο από NDVI	23
3.2.2 Ομάδα μοντέλων με FAPAR μετρημένο από EVI.....	25
4. Συζήτηση.....	27
4.1 Σύγκριση ομάδων μοντέλων NDVI και EVI	27
4.2 Διάφορες εκδόσεις του μοντέλου.....	28
4.3 Συγκρίσεις με παρόμοιες μελέτες	29
4.4 Προτάσεις.....	30
5. Συμπεράσματα	32
6. Βιβλιογραφία	33
7. Παράρτημα.....	37
7.1 Ομάδα NDVI.....	37
7.1.1 Καλλιεργητική περίοδος 2017 - 2018	37
7.1.2 Καλλιεργητική περίοδος 2018 - 2019	38
7.2 Ομάδα μοντέλων EVI	39
7.2.1 Καλλιεργητική περίοδος 2017-2018	39
7.2.2 Καλλιεργητική περίοδος 2018-2019	40

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 η αξιολόγησή του πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης με την τελική παραγωγή, η οποία μετρήθηκε με μηχανή συγκομιδής εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης. Η μελέτη αφορά συμβατικούς αγρούς σκληρού σίτου για τις καλλιεργητικές περιόδους 2017-2018 και 2018-2019.

Το μοντέλο αποδοτικότητας χρήσης φωτός που αναπτύχθηκε περιλάμβανε scalars για τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και του νερού, καθώς και 2 παράγοντες για την επίδραση του εδάφους και ένα για την κλίση του. 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.

Εξετάστηκαν διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης με βάση τα αναπτυξιακά στάδια του φυτού. Το διάστημα που αναμένονταν να δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν το στάδιο μετά την άνθιση, βάση της θεωρίας ότι το φυτό μετά την άνθιση δίνει όλα τα φωτοσυνθετικά του προϊόντα στο σπόρο. Η ικανοποιητικότερη εκτίμηση της παραγωγής παρουσίασε συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή με $R=0,747$ για το διάστημα ολοκλήρωσης 20/4-31/5. Η καλύτερη μονοήμερη εκτίμηση της παραγωγής (29/4) συσχετίστηκε με την μετρημένη με $R= 0,737$.

Abstract

The aim of this work was to develop and evaluate a productivity model for estimating and forecasting durum wheat yield, based on data from the Sentinel-2 satellite. The model was based on the light use efficiency approach and was evaluated by comparison with the final yield, which was measured with a harvester equipped with a yield mapping system. The study concerned 31 conventional durum wheat fields during the growing seasons 2017-2018 and 2018-2019.

The light use efficiency model developed included scalars for the effects of temperature and water, as well as two factors for the effects of soil and one for its slope. Various versions of the model were tested in relation to the configuration of the scalars and the period that provides the best estimate and forecast of yield.

Various period integrals were examined based on the developmental stages of the plant. The period that was expected to give the best results was the stage after flowering, based on the theory that plants after that stage give all their photosynthetic products to the seed. The most significant yield estimate showed a correlation with measured yield with $R = 0.747$ for the integration period 20/4-31/5. On the other hand, the best single day estimate (29/4) was correlated with measured yield with $R = 0.737$.

1. Εισαγωγή

1.1 Σιτάρι

Το σιτάρι είναι μία από τις πιο διαδεδομένες καλλιέργειες στον κόσμο, με παραγωγή που ανήλθε σε 760 εκατομμύρια τόνους την καλλιεργητική περίοδο 2019-2020, καταλαμβάνοντας μάλιστα και τη μεγαλύτερη έκταση ($216 * 10^6$ εκτάρια) (FAO). Όσον αφορά το σκληρό σιτάρι, το 60% περίπου της παγκόσμιας καλλιεργήσιμης έκτασης βρίσκεται εντός της λεκάνης της Μεσογείου (Royo et al. 2017). Επιπλέον, οι χώρες της λεκάνης της Μεσογείου είναι οι μεγαλύτεροι εισαγωγείς και οι μεγαλύτεροι καταναλωτές προϊόντων σκληρού σίτου (αλεύρι, ζυμαρικά και σιμιγδάλι). Μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), για το 2019 η Ιταλία θεωρείται ο ηγέτης της παραγωγής σκληρού σίτου, με παραγωγή 4 εκατομμύρια τόνους, με δεύτερη τη Γαλλία με παραγωγή 1,55 εκατομμύρια τόνους, τρίτη την Ισπανία με 740 χιλιάδες τόνους και τέταρτη την Ελλάδα με 684 χιλιάδες τόνους (EUROSTAT). Αποτελεί μια χειμερινή καλλιέργεια, με εξαίρεση περιοχές με βαρύ χειμώνα που καλλιεργείται σαν εαρινή και μπορεί να καλλιεργηθεί σε πληθώρα εδαφοκλιματικών συνθηκών.

Στις μεσογειακές συνθήκες της χώρας μας οι δύο παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση του σιταριού είναι η ξηρασία και οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν μετά το στάδιο της άνθησης (Παπακώστα 2012), με σημαντικότερη την περίοδο κατά την οποία πραγματοποιείται το γέμισμα του σπόρου (Diacono et al. 2012). Πρόκειται για καλλιέργεια μείζονος σημασίας για τη χώρα μας, τόσο από την πλευρά του καταναλωτή, για την διαθεσιμότητα των προϊόντων σίτου σε προσιτές τιμές, όσο και από την πλευρά του παραγωγού και της δυνατότητας του να μπορεί να προβλέπει ικανοποιητικές παραγωγές.

1.2 Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα σύνολο επιμέρους επιστημών που έχει σαν σκοπό την ανάλυση και μελέτη της επιφάνειας της γης. Μέσω της τηλεπισκόπησης ή τηλεανίχνευσης παρέχεται στον μελετητή η δυνατότητα λήψης πληροφοριών για ένα αντικείμενο μελέτης από μακριά χωρίς κάποια φυσική επαφή με αυτό. Η λήψη αυτή των πληροφοριών πραγματοποιείται με τη χρήση συγκεκριμένων ανιχνευτικών συσκευών που ούτε αυτές βρίσκονται σε φυσική επαφή με το αντικείμενο μελέτης. Συνήθως αφορά αεροφωτογραφίες, εικόνες ραντάρ και δορυφορικές εικόνες. Οι

τελευταίες είναι και οι πιο συνηθισμένες και έχουν να κάνουν με την δορυφορική τηλεπισκόπηση. Η χρήση της τηλεπισκόπησης σαν μέσο μελέτης στην γεωργία βρίσκει χρήση εδώ και πολλά χρόνια, πιο συγκεκριμένα, η πρώτη εφαρμογή ήταν το 1929 και αφορούσε τη χαρτογράφηση των εδαφών με χρήση αεροφωτογραφιών (Bauer, 1975). Πλέον η διαδικασία λήψης τέτοιων φωτογραφιών γίνεται μέσω αισθητήρων που φέρονται σε δορυφόρους, δεδομένου ότι, τόσο η αποθήκευση αυτού του όγκου πληροφοριών όσο και η επεξεργασία τους είναι πιο εύκολη από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Καρτάλης, Φείδας 2013).

1.3 Δορυφόροι Sentinel-2

Οι δορυφόροι Sentinel-2 (A και B), είναι ένα νέο ζεύγος δορυφόρων που λόγω των ευνοϊκών χαρακτηριστικών τους μπορούν να αποκτήσουν πολλές χρήσεις. Ο Sentinel-2A τέθηκε σε τροχιά στις 23/6/2015 ενώ ο Sentinel-2B τέθηκε σε τροχιά στις 07/03/2017. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν μια μέτρια χρονική ανάλυση δέκα ημερών αλλά επειδή είναι ζεύγος ουσιαστικά γίνεται πέντε. Οι δορυφόροι Sentinel-2 διαθέτουν από έναν πολυφασματικό σαρωτή με 13 φασματικά κανάλια, το MSI (Multi Spectral Instrument), με πλάτος σάρωσης 290 km και χωρική ανάλυση στα 60 m, 20 m και 10 m (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

Οι στόχοι της αποστολής Sentinel-2 είναι να παρέχει:

- παγκόσμιες πολυφασματικές απεικονίσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης με υψηλή συχνότητα επανεπίσκεψης.
- συνέχεια στις πολυφασματικές εικόνες που παρέχονται από τη σειρά δορυφόρων SPOT και LANDSAT
- δεδομένα παρατήρησης για την επόμενη γενιά επιχειρησιακών προϊόντων, όπως χάρτες κάλυψης γης, χάρτες ανίχνευσης αλλαγών εδάφους και γεωφυσικές μεταβλητές.

Τα δεδομένα των δορυφόρων αυτών, συμβάλουν στη διαχείριση ακραίων φαινομένων, για την παρακολούθηση και την ασφάλεια της γης, καθώς 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 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

1.4 Δείκτες Βλάστησης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πρώτη επιφάνεια με την οποία θα αλληλοεπιδράσει η ακτινοβολία που καταγράφεται από τους δορυφορικούς ανιχνευτές, είναι η βλάστηση. Έτσι, για το μεγαλύτερο κομμάτι της ξηράς, οι δορυφορικές εικόνες ουσιαστικά καταγράφουν τα χαρακτηριστικά της βλάστησης και όχι της επιφάνειας του εδάφους (Καρτάλης, Φείδας 2013).

Οι δείκτες βλάστησης είναι ένα σημαντικό εργαλείο στην δορυφορική παρακολούθηση της βλάστησης. Είναι αδιάστατες μεταβλητές, που έχουν την ικανότητα να ποσοτικοποιούν παραμέτρους της βλάστησης σχετικές με τη βιομάζα και/ή την λειτουργική κατάστασή της. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI), το ποσοστό φυτικής κάλυψης, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η πράσινη βιομάζα και η απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Absorbed Photosynthetic Active Radiation, APAR) (Jensen 2015).

Οι δείκτες βλάστησης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- (α) Στους δείκτες που προκύπτουν από λόγους των φασματικών καναλιών (ratios) και
- (β) στους δείκτες που μετρούν την ραδιομετρική απόσταση από τη γραμμή εδάφους (distance-based).

Στους πρώτους, ανήκουν οι δείκτες που δημιουργούνται με αριθμητικές πράξεις μεταξύ των ραδιομετρικών τιμών των διαφόρων φασματικών καναλιών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι δείκτες οι οποίοι μετράνε ποσοστιαία τη βλάστηση σε κάθε pixel χρησιμοποιώντας ως βάση την διαφορά που προκύπτει από την τιμή ανάκλασης κάθε pixel σε σχέση με την τιμή ανάκλασης του γυμνού εδάφους. Εδώ βασικό ρόλο διαδραματίζει το ανάγλυφο της επιφάνειας, δηλαδή η γνώση της γραμμής του εδάφους (soil line). Καθώς αυξάνεται η βλάστηση και καλύπτει το έδαφος, τα αντίστοιχα pixels της βλάστησης αυξάνουν κατακόρυφα την απόστασή τους από την γραμμή του εδάφους (Περάκης κ.α 2015).

Ένας καλός δείκτης βλάστησης θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε ορισμένα χαρακτηριστικά. Θα πρέπει να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ευαισθησία, στις διάφορες βιοφυσικές παραμέτρους που σχετίζονται με τα φυτά, φυσικά να σχετίζεται άμεσα με κάποια από αυτές, καθώς και να κανονικοποιεί ενδογενείς και

εξωγενείς παράγοντες, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση τους στο χώρο και στο χρόνο. (Running et al. 1994, Huete and Justice 1999)

1.4.1 Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Πρόκειται για τον πιο διαδεδομένο δείκτη βλάστησης στον κόσμο, με ευρεία χρήση σε εφαρμογές που αφορούν εκτιμήσεις βιομάζας, μεταβολές στη βλάστηση στο χώρο και στο χρόνο, στην εκτίμηση της διάρκειας της περιόδου ανάπτυξης και των περιόδων ξηρασίας, καθώς και στον εντοπισμό περιοχών οικολογικού ενδιαφέροντος. (Καρτάλης, Φείδας 2013) Σύμφωνα με τους Περάκης κ.α. (2015), ο συγκεκριμένος δείκτης δημιουργήθηκε το 1974 με στόχο να διαχωρίσει τη φωτεινότητα του εδάφους χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα Landsat MSS.

Το εύρος τιμών είναι από -1 έως και +1. Οι αρνητικές τιμές περιγράφουν καλύψεις γης που δεν αφορούν βλάστηση, όπως το νερό, και οι διάφορες ανθρωπογενείς κατασκευές. Η τιμή 0 εκφράζει την απουσία βλάστησης (γυμνό έδαφος) ενώ οι θετικές τιμές εκφράζουν την παρουσία βλάστησης. Όσο οι θετικές τιμές τείνουν στο 1 τόσο πιο έντονη είναι η παρουσία βλάστησης, με μεγάλη βιομάζα και ευρωστία.

Υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

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

Όπου το R_{nir} εκφράζει την ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και το R_{red} την ανακλαστικότητα στο κόκκινο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Όπως είναι σαφές εξ' ορισμού, ο δείκτης NDVI (όπως και κάθε δείκτης που θα μετρηθεί εξ' αποστάσεως) δεν αποτελεί, κάποια ουσιαστική βιοφυσική παράμετρο των φυτών, παρ' όλο που συνδέεται άμεσα με ορισμένες από αυτές, όπως είναι το LAI, η βιομάζα, η ποσοστιαία φυτική κάλυψη και η ευρωστία της βλάστησης (Carlson and Ripley, 1997).

Ο δείκτης NDVI έχει τα εξής μειονεκτήματα (Liu and Huete, 1995):

1. Οι τιμές μεταξύ του «αληθινού» NDVI, που θα μετρηθεί στην επιφάνεια της γης, σε σχέση με αυτόν που θα μετρηθεί από το διάστημα είναι διαφορετικές

λόγω εξασθένησης από την ατμόσφαιρα και από τα αερολύματα, γεγονός που αφορά και τους υπόλοιπους δείκτες βλάστησης.

2. Η ευαισθησία του NDVI στο LAI γίνεται όλο και πιο αδύναμη με την αύξηση του LAI και πάνω από μια τιμή LAI (συνήθως μεταξύ 2 και 3) παρουσιάζει κορεσμό.
3. Οι διακυμάνσεις στη φωτεινότητα του εδάφους μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες διακυμάνσεις στο NDVI από τη μία εικόνα στην άλλη.

1.4.2 Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης EVI (Enhanced Vegetation Index)

Από την ομάδα MODIS Land Discipline Group δημιουργήθηκε ο Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης (EVI, Enhanced Vegetation Index), ο οποίος θεωρείται μια τροποποιημένη έκδοση του NDVI, καθώς στην εξίσωσή του εισάγεται το μπλε κανάλι και κάποιες επιπλέον παράμετροι. Ως αποτέλεσμα, ο κορεσμός του EVI σε υψηλές τιμές LAI δεν είναι τόσο έντονος όσο του NDVI και επίσης μειώνονται πολλά προβλήματα ατμοσφαιρικού και εδαφικού θορύβου. (Huete et al. 2002a) Έτσι, ο EVI παρουσιάζει βελτιωμένη ευαισθησία σε περιοχές με υψηλή βιομάζα και λόγω της αποσύνδεσης του σήματος του εδαφικού υποβάθρου από την φυτική κόμη και των μειωμένων ατμοσφαιρικών επιδράσεων έχει βελτιωμένη ικανότητα παρακολούθησης της βλάστησης (Matsushita et al. 2007). Ωστόσο, δεν μπορεί να λάβει υπ' όψη την τοπογραφική επίδραση, η οποία ορίζεται ως η διακύμανση της ακτινοβολίας που συνοδεύει μια αλλαγή προσανατολισμού από μια οριζόντια προς μια κεκλιμένη επιφάνεια, σαν αντίδραση στην αλλαγή της γωνίας του ήλιου και της θέσης του αισθητήρα (Matsushita et al. 2007).

Η εξίσωση που τον περιγράφει δίνεται παρακάτω:

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

Όπου, G είναι ένας παράγοντας ενίσχυσης (τυπικές τιμές 2 - 2,5), τα R_{nir}, R_{red} και R_{blue} εκφράζουν τη τιμή της ανακλαστικότητας στη περιοχή του εγγύς υπέρυθρου, του κόκκινου και του μπλε τμήματος του φάσματος αντίστοιχα, τα 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 το L είναι ο συντελεστής προσαρμογής του εδάφους (τυπική τιμή 1) (Jensen, 2000).

1.4.3 Δείκτης Νερού Κανονικοποιημένης Διαφοράς NDWI (Normalized Differential Water Index)

Ο δείκτης νερού κανονικοποιημένης διαφοράς (NDWI) προτείνεται για την παρατήρηση του υγρού νερού της βλάστησης από το διάστημα. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιεί δύο κανάλια με κέντρα κοντά στα 842 nm (NIR, εγγύς υπέρυθρο) και 1610 nm (SWIR, μικροκυματικό υπέρυθρο) (Gao, 1996). Η εξίσωση που τον περιγράφει δίνεται παρακάτω:

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

Όπου R_{nir} και R_{swir} είναι η ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο και στο μικροκυματικό υπέρυθρο αντίστοιχα. Ο δείκτης NDWI είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που κυμαίνεται μεταξύ -1 έως +1, και εξαρτάται από την περιεκτικότητα των φύλλων σε νερό καθώς επίσης και από τον τύπο βλάστησης και την κάλυψη. Οι υψηλές τιμές NDWI αντιστοιχούν σε βλάστηση με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό και σε έντονη κάλυψη και αντίστροφα. Σε περιόδους με υψηλή υδατική καταπόνηση το NDWI είναι μικρό (European Drought Observatory, 2001).

1.4.4 Κανονικοποιημένος Πολυφασματικός Δείκτης Ξηρασίας NMDI (Normalized Multi-band Drought index)

Άλλος ένας δείκτης υγρασίας είναι ο κανονικοποιημένος πολυφασματικός δείκτης ξηρασίας (NMDI), ο οποίος προτείνεται για την δορυφορική τηλεπισκόπηση τόσο του εδάφους, όσο και της βλάστησης. Ο NMDI χρησιμοποιεί τρία κανάλια κεντραρισμένα στα 860 nm, 1640 nm και 2130 nm. Η χρήση του καλό είναι να περιορίζεται στην παρακολούθηση επιφανειών με γυμνό έδαφος ή ελάχιστη βλάστηση και για πυκνή βλάστηση ($LAI \geq 2$), δηλαδή δεν θεωρείται κατάλληλος για αραιή βλάστηση (Wang, Qu, 2007).

Δίνεται από την εξίσωση:

$$NMDI = \frac{R_{860nm} - (R_{1640nm} - R_{2130nm})}{R_{860nm} + (R_{1640nm} - R_{2130nm})}$$

1.5 Μοντέλα LUE (Light Use Efficiency)

Τα μοντέλα που στηρίζονται στην προσέγγιση αποδοτικότητας χρήσης φωτός (LUE, Light Use Efficiency) υπολογίζουν την πρωτογενή παραγωγικότητα (GPP) μέσω της εξίσωσης:

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

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

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.

1.6 Σκοπός

Ο σκοπός της εργασίας είναι η διαμόρφωση ενός μοντέλου μικτής πρωτογενούς παραγωγικότητας για την εκτίμηση της παραγωγής χωραφιών με χειμερινό σιτάρι, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον δορυφόρο Sentinel-2. Ο υπολογισμός του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, στοιχείο απαραίτητο για την κατασκευή ενός μοντέλου GPP, έγινε χρησιμοποιώντας τους δείκτες EVI και NDVI. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες νερού NDWI και NMDI, με τον δεύτερο να λαμβάνει χρήση στην προσπάθεια δημιουργίας σήματος για την ποιότητα του εδάφους. Ακόμα, για την δημιουργία σήματος εδάφους χρησιμοποιήθηκε το φασματικό κανάλι B12 του δορυφόρου. Και οι δύο δείκτες ποιότητας εδάφους συνδυάστηκαν με τα μοντέλα που βασίστηκαν στην αποδοτικότητα της χρήσης φωτός της καλλιέργειας. Η έρευνα έλαβε χώρα σε 26 χωράφια για 2 καλλιεργητικές περιόδους, και τα κατασκευασμένα μοντέλα συγκρίθηκαν με την τελική παραγωγή των χωραφιών, η οποία μετρήθηκε με θεριζοαλωνιστική μηχανή με σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1 Περιοχή μελέτης

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε χωράφια του κάμπου της Θεσσαλίας, στην Ελλάδα, τα οποία καλλιεργήθηκαν με χειμερινό σιτάρι. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τις καλλιεργητικές περιόδους 2017-2018 και 2018-2019. Ο αριθμός των χωραφιών, για κάθε περίοδο ήταν 21, εκ των οποίων 16 χωράφια ήταν ίδια για της δύο περιόδους ενώ τα 5 διέφεραν επειδή υπήρχαν δεδομένα για την πρώτη αλλά όχι την δεύτερη χρονιά. Τελικά ο συνολικός αριθμός των χωραφιών ήταν 26. Η συνολική έκταση για την πρώτη χρονιά ήταν 102,2 ha ενώ για την επόμενη 104,25 ha, δίνοντας 5316 και 5031 pixel (10 x 10 m) αντίστοιχα. Για την επιλογή των χωραφιών έπρεπε να ληφθούν υπ' όψη 2 παράγοντες. Πρώτον, η συγκομιδή τους να έχει πραγματοποιηθεί με ειδική μηχανή με δυνατότητα χαρτογράφησης της παραγωγής και δεύτερον, τα χωράφια να είναι αρκετά μεγάλης έκτασης ώστε να μπορούν να δώσουν ικανοποιητικό αριθμό pixel. Η καλλιέργεια του χειμερινού σιταριού στον κάμπο της Θεσσαλίας ξεκινάει συνήθως από Νοέμβρη-Δεκέμβρη και η συγκομιδή γίνεται τον Ιούνιο. Τα υπό μελέτη χωράφια έχουν εξεταστεί επίσης από τους Ανατολίτη (2020) και Σηφάκη (2020), με στόχο την πρόβλεψη της παραγωγής τους χρησιμοποιώντας μόνο δείκτες βλάστησης.

2.2 Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη λειτουργία του μοντέλου (θερμοκρασία, βροχόπτωση, ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου) αντλήθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Χάλκης του δικτύου meteo.gr του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<https://www.meteo.gr/>).

2.3 Δεδομένα παραγωγής

Τα δεδομένα παραγωγής που χρησιμοποιήθηκαν, λήφθηκαν από προηγούμενες μελέτες από τις οποίες προέκυψαν οι χάρτες παραγωγής σε ανάλυση (10 x 10 m) και χωροθέτηση ίδια με του Sentinel-2 (Ανατολίτης 2020, Σηφάκης 2020).

2.4 Δορυφορικά δεδομένα
Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν 35 και 26 δορυφορικές εικόνες των Sentinel-2 (Α και Β) για τις αναπτυξιακές περιόδους 2017-2018 και 2018-2019 αντίστοιχα, με κριτήριο να έχουν όσο το δυνατό λιγότερα σύννεφα. Η λήψη των εικόνων έγινε από

τον ιστότοπο Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>), ο οποίος είναι ανοιχτός για το κοινό με δωρεάν δεδομένα. Οι δορυφόροι Sentinel-2 περιλαμβάνουν τον αισθητήρα Multi Spectral Instrument (MSI), ο οποίος παρέχει εικόνες με δεκατρία φασματικά κανάλια, με εύρος μήκους κύματος από 443 nm έως 2190 nm και χωρική ανάλυση που διαφέρει ανάλογα με το κανάλι και τιμές 10 m, 20 m και 60 m. Η λήψη των εικόνων έγινε με διάστημα πέντε μερών, αν και υπάρχουν κενά λόγω απόρριψης μερικών εξαιτίας της ύπαρξης σύννεφων. Οι εικόνες αυτές είναι επιπέδου επεξεργασίας Level2A, που σημαίνει ότι είναι γεωμετρικά, ατμοσφαιρικά και ραδιομετρικά διορθωμένες και αφορούν ανακλαστικότητα στην επιφάνεια της γης. Η διόρθωσή των εικόνων έγινε από την ESA (European Space Agency).

Πίνακας 1: Κανάλια, μήκη κύματος και χωρική ανάλυση του αισθητήρα MSI των δορυφόρων Sentinel-2.

Band	λ centre, nm	Εύρος, nm	λ start	λ end	Χωρική Ανάλυση, m
1	443	20	433	453	60
2	490	65	457.5	522.5	10
3	560	35	542.5	577.5	10
4	665	30	650	680	10
5	705	15	697.5	712.5	20
6	740	15	732.5	747.5	20
7	783	20	773	793	20
8	842	115	784.5	899.5	10
9	940	20	935	955	60
10	1375	30	1360	1390	60
11	1610	90	1565	1655	20
12	2190	180	2100	2280	20
8a	865	20	855	875	20

2.5 Δείκτες βλάστησης και δείκτες νερού

Οι δείκτες βλάστησης υπολογίστηκαν με βάση τις εξισώσεις:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \quad (1)$$

$$EVI = G * \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + C1R_{red} - C2R_{blue} + L} \quad (2)$$

$$NDWI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}} \quad (3)$$

$$NDWB11 = \frac{B8 - B11}{B8 + B11} \quad (3.1)$$

$$NDWB12 = \frac{B8 - B12}{B8 + B12} \quad (3.2)$$

$$NMDI = \frac{R_{860nm} - (R_{1640nm} - R_{2130nm})}{R_{860nm} + (R_{1640nm} - R_{2130nm})} \quad (4)$$

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα κανάλια B8, B4 και B2 για τον υπολογισμό των δύο δεικτών βλάστησης NDVI και EVI. Το B8 αντιπροσωπεύει την εγγύς υπέρυθρη (NIR), το B4 την κόκκινη (RED) και το B2 την μπλε περιοχή του φάσματος (BLUE). (Πίνακας 1).

Για τον υπολογισμό του δείκτη NDWI χρησιμοποιήθηκε σαν κανάλι αναφοράς το B8, ενώ για το μικροκυματικό υπέρυθρο επιλέχθηκαν τα κανάλια B11 και B12, δίνοντας έτσι δύο διαφορετικές εκδοχές του δείκτη (3.1 και 3.2).

Για τον υπολογισμό του NMDI χρησιμοποιήθηκαν το κανάλι B8 σαν κανάλι αναφοράς, και τα κανάλια B11 και B12 για την διαφορά του υπέρυθρου.

Ο υπολογισμός των δεικτών NDVI και EVI για το σύνολο των χωραφιών αποτέλεσε έργο του Ανατολίτης (2000) και Σηφάκης (2020).

Πέρα από τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης και νερού και την ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο εκτίμησης της παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν κάποια επιπλέον δεδομένα προκειμένου να εκφραστεί η οποιαδήποτε επίδραση του εδάφους στην εκτίμηση της τελικής παραγωγής. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το κανάλι B12 του δορυφόρου, με μήκος κύματος 2190 nm το οποίο απεικονίζει καλά το νερό στη βλάστηση και στο έδαφος, καθώς επίσης και ο δείκτης NMDI του γυμνού εδάφους. Έτσι

χρησιμοποιήθηκε μια ημερομηνία κατά την οποία η επιφάνεια του εδάφους να είναι γυμνή από φυτική κάλυψη, ώστε οι μετρήσεις να μην επηρεάζονται από το νερό το οποίο περιέχεται στα φυτά.

Οι Meti et al. (2019) συσχέτισαν το κανάλι B12 του δορυφόρου με το pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (Electric Conductivity-EC) και τα αποτελέσματα έδειξαν πως τελικά σχετίζονται μεταξύ τους, ακολουθώντας την επίδραση που έχει η υψηλή αγωγιμότητα στην παραγωγή λόγω ύπαρξης αλάτων.

Οι Bannari et al. (2018) απέδειξαν πως τα κανάλια B11 και B12 που ανήκουν στο μικροκυματικό μήκος της ακτινοβολίας (SWIR-Short Wave Infrared) ήταν ικανά να αποτυπώσουν την αλατότητα σε διάφορους τύπους εδαφών. Από την Μεγγούδη (2020) διαπιστώθηκε πως για υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας η παραγωγή του σκληρού σιταριού ήταν χαμηλή. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως η ανακλαστικότητα του εδάφους στο κανάλι B12 του δορυφόρου σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με την παραγωγή. Για την επίδραση λοιπόν της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην παραγωγή, υπολογίστηκε το πηλίκιο των μοντέλων με την ανακλαστικότητα στο κανάλι B12.

2.6 Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI, Leaf Area Index)

Για τον υπολογισμό του FAPAR, ήταν αναγκαίος ο υπολογισμός του LAI για κάθε pixel. Ο υπολογισμός του έγινε εμπειρικά, χρησιμοποιώντας τους δείκτες βλάστησης NDVI και EVI. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκαν οι εξισώσεις που προέκυψαν μετά από συσχέτιση των μετρημένων, με κατάλληλο όργανο, τιμών LAI με τους συγκεκριμένους δείκτες. Η παραπάνω διαδικασία αποτέλεσε άλλη μελέτη, πάνω στο σκληρό σιτάρι, που διεξήχθη και αυτή στη Θεσσαλία και αφορούσε την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με την αξιοποίηση μετρημένων παραμέτρων αλλά και δορυφορικών δεδομένων (Μεγγούδη 2020). Γενικότερα η χρήση δεικτών βλάστησης, από δορυφορικά δεδομένα, για τον υπολογισμό του LAI είναι μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος (Myneni and Williams 1994, Moreno et al. 2012, Myneni et al. 1995, Carlson and Ripley 1997).

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

$$LAI_{NDVI} = 0.00807 * e^{\frac{NDVI}{0.15004}} \quad (5)$$

$$LAI_{EVI} = 0.01882 * e^{\frac{EVI}{0.13463}} \quad (6)$$

2.7 Μοντέλα εκτίμησης παραγωγής LUE

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

$$GPP = \epsilon_0 * PAR * FAPAR * scalars \quad (7)$$

όπου:

ϵ_0 , ο βέλτιστος συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε φωτοσυνθετικά προϊόντα (απουσία καταπονήσεων), ο οποίος υπολογίστηκε από άλλη μελέτη για σκληρό σίτο, στον κάμπο της Θεσσαλίας, σε 0,47 (Μαξούρη 2020)

PAR, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που προσπίπτει στο θόλο (από μετεωρολογικά δεδομένα)

FAPAR, το ποσοστό της PAR που απορροφάται από το θόλο

και η βασική του έκφραση περιλάμβανε ένα scalar θερμοκρασίας (T_{scalar}).

Για τον υπολογισμό του FAPAR υιοθετήθηκε η προσέγγιση των Ruimy et al. (1999):

$$FAPAR = (1 - e^{-kd * LAI}) * 0,95 \quad (8)$$

όπου το kd είναι ο συντελεστής απόσβεσης του φωτός στο θόλο και έχει υπολογιστεί στο 0.5 (Kukal & Irmak 2020) και το LAI υπολογίζεται από δορυφορικά δεδομένα. Ο LAI μπορεί να υπολογιστεί από οποιοδήποτε δορυφορικό δείκτη που σχετίζεται με την παρουσία πράσινης βιομάζας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο LAI υπολογίστηκε με τη χρήση των δεικτών NDVI και EVI, δίνοντας δύο ομάδες μοντέλων ως εξής:

$$GPP = \epsilon_0 * PAR * FAPAR_{(ndvi)} * scalars \quad (9)$$

$$\text{και } GPP = \epsilon_0 * PAR * FAPAR_{(evi)} * scalars \quad (10)$$

Το scalar της θερμοκρασίας υπολογίστηκε με βάση την παρακάτω εξίσωση (Raich et al. 1991):

$$T_{scalar} = \frac{(T_{day} - T_{min})(T_{day} - T_{max})}{[(T_{day} - T_{min})(T_{day} - T_{max})] - (T_{day} - T_{opt})^2} \quad (11)$$

όπου

T_{day} , η μέση ημερήσια θερμοκρασία, υπολογίζεται από τις καθημερινές διαφορές ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασία που λήφθηκαν από το σταθμό της Χάλκης.

T_{min} , η ελάχιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης που μετρήθηκε στους 6 °C

T_{max} , η μέγιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης, 44 °C

T_{opt} , η βέλτιστη θερμοκρασία της φωτοσύνθεσης, 25 °C

Οι θερμοκρασίες T_{min} , T_{max} , και T_{opt} που αφορούν αποκλειστικά το σκληρό σιτάρι, υπολογίστηκαν από μελέτη που διεξήχθη στο κάμπο της Θεσσαλίας. (Μαζούρη 2020).

Ως επιπρόσθετος παράγοντας στο μοντέλο προστέθηκε και ένα scalar νερού (W_{scalar}). Το scalar νερού υπολογίστηκε με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, εκ των οποίων η μία βασίστηκε σε μετεωρολογικά δεδομένα και οι άλλες δύο σε δορυφορικά.

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

$$W_{scalar\,meteo} = 1 - e^{-(WB+60) / 36} \quad (12)$$

όπου WB η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (ET_0) για διάστημα 10 ημερών. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε από τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιώντας την μέθοδο FAO Penman-Monteith (Allen et al. 1998).

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

$$W_{scalar} = \frac{1 + NDWI}{1 + NDWI_{max}} \quad (13)$$

$$W_{scalar\,B11} = \frac{1 + NDWB11}{1 + NDWB11_{max}} \quad (13.1)$$

$$W_{scalar\,B12} = \frac{1 + NDWB12}{1 + NDWB12_{max}} \quad (13.2)$$

όπου ο δείκτης NDWI υπολογίστηκε εις διπλούν σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.1 και 3.2) από δεδομένα Sentinel-2 και το $NDWI_{max}$ αφορά τη μέγιστη τιμή του σε όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου.

Η επίδραση του εδάφους στην παραγωγικότητα ενσωματώθηκε στο μοντέλο με δυο τρόπους: μέσω του δείκτη NMDI και μέσω της ανακλαστικότητας του καναλιού B12 σε ημερομηνίες πριν την έναρξη της καλλιέργειας (γυμνό έδαφος). Για τον πρώτο πολλαπλασιάστηκαν τα μοντέλα με τον NMDI γυμνού εδάφους, ενώ για τον δεύτερο

τα μοντέλα διαιρέθηκαν με την ανακλαστικότητα του γυμνού εδάφους στο κανάλι B12 του δορυφόρου.

Ακόμα, για τις πιθανές επιδράσεις από το ανάγλυφο των υπό μελέτη χωραφιών κατασκευάστηκε scalar για την κλίση (slope), σαν το ποσοστό της μέγιστης κλίσης για κάθε pixel . Τέτοιες επιδράσεις θα μπορούσαν να είναι η συσσώρευση λιμναζόντων υδάτων στην επιφάνεια των χωραφιών, εκπλύσεις θρεπτικών συστατικών από μετακινήσεις υδάτων κλπ.

Πίνακας 2: Οι παράμετροι των διαφόρων εκδόσεων του μοντέλου.

#	Παράμετροι
1	$\epsilon_0 * PAR * FAPAR$
2	$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar$
3	$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * Wscalar$ (meteo, B11, B12)
4	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar] * NMDI$
5	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar] / B12$
6	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * Wscalar$ (meteo, B11, B12)] * NMDI
7	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * Wscalar$ (meteo, B11, B12)] / B12
8	$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * SLOPEscalar$
9	$\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * Wscalar$ (meteo, B11, B12) * SLOPEscalar
10	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * SLOPEscalar] * NMDI$
11	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * SLOPEscalar] / B12$
12	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * Wscalar$ (meteo, B11, B12)] * SLOPEscalar * NMDI
13	$[\epsilon_0 * PAR * FAPAR * Tscalar * Wscalar$ (meteo, B11, B12)] * SLOPEscalar / B12

3. Αποτελέσματα

3.1 Εκτίμηση παραγωγής με μοντέλα LUE

Σύμφωνα με τους Cossani et al. 2009, Diacono et al. 2012 το σιτάρι, μετά την ανθοφορία, δίνει σχεδόν όλα του τα φωτοσυνθετικά του προϊόντα στον καρπό. Συνεπώς, το διάστημα αυτό είναι το πιο κρίσιμο καθώς και το πιο πιθανό να δώσει καλύτερες συσχετίσεις μεταξύ δεικτών βλάστησης και τελικής παραγωγής. Για τον έλεγχο της υπόθεσης αυτής, υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των μοντέλων για διάφορα διαστήματα της καλλιεργητικής περιόδου ή μεμονωμένες ημερομηνίες και εξετάστηκε η συσχέτισή τους με την τελική παραγωγή. Από όλα τα διαστήματα / ημερομηνίες που εξετάστηκαν, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά και πιο συγκεκριμένα:

- Το ολοκλήρωμα του διαστήματος από 1 Δεκεμβρίου έως 31 Μαΐου, δηλαδή για το σύνολο της καλλιέργειας.
- Το ολοκλήρωμα του διαστήματος από 20 Απριλίου μέχρι 31 Μαΐου, δηλαδή από την ανθοφορία έως το τέλος της καλλιέργειας.
- Το ολοκλήρωμα του διαστήματος 20 ημερών από 15 Απριλίου έως 5 Μαΐου, δηλαδή κατά το αρχικό διάστημα γεμίσματος του σπόρου.
- Η ημερομηνία κατά την οποία οι δείκτες βλάστησης NDVI και EVI παρουσιάζουν τη μέγιστη συσχέτιση με την τελική παραγωγή (29 Απρίλη).

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων εκδόσεων του μοντέλου για τα διαφορετικά διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες έγινε μέσω σύγκρισης με την τελική παραγωγή που μετρήθηκε με θεριζοαλωνιστική μηχανή με σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής.

Προέκυψαν 25 μοντέλα παραγωγικότητας για LAI υπολογισμένο από NDVI και 25 μοντέλα για LAI υπολογισμένο από EVI. Η συσχέτιση της εκτιμημένης παραγωγής με την μετρημένη από το σύστημα της θεριζοαλωνιστικής μηχανής, έγινε και για τις δύο χρονιές ενιαία, αλλά πραγματοποιήθηκε και η μεμονωμένη συσχέτιση των δύο καλλιεργητικών περιόδων (Παράρτημα).

Για την ευκρίνεια των αποτελεσμάτων στους πίνακες που παρουσιάζονται, τα κατασκευασμένα μοντέλα έχουν διαφορετικό χρωματισμό, με βάση την προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του scalar νερού.

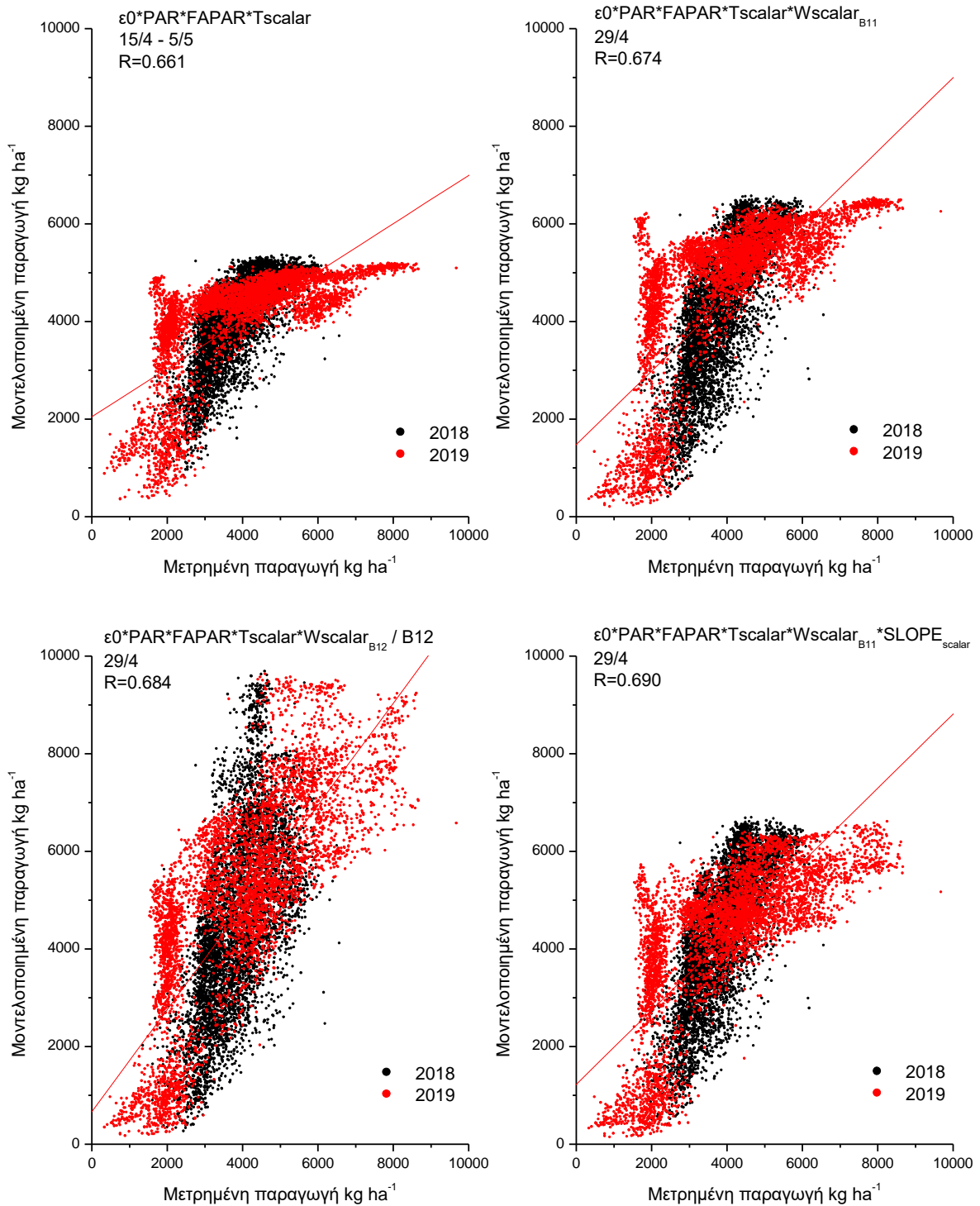
3.1.1 Ομάδα μοντέλων που προέκυψαν από NDVI

Το μοντέλο το οποίο δεν περιλαμβάνει κανένα scalar (νερό, θερμοκρασία κλπ.) παρουσιάζει σχετικά χαμηλές συσχετίσεις με την μετρημένη παραγωγή, με καλύτερο το ολοκλήρωμα 15/4 – 5/5 (Πίνακας 3). Με την προσθήκη του scalar της θερμοκρασίας παρατηρείται αισθητή βελτίωση στη συσχέτιση της μετρημένης παραγωγής με την μοντελοποιημένη, και πιο συγκεκριμένα, για την 29/4 αλλά και το διάστημα 20/4 – 31/05 που είναι και το πιο κρίσιμο. Με την προσθήκη των scalar νερού, παρατηρούνται βελτιώσεις μόνο για το scalar που προέκυψε από την εξίσωση 13.1. (WscalarB11). Όσον αφορά το έδαφος μόνο το κανάλι B12 του δορυφόρου φαίνεται να βελτιώνει το αποτέλεσμα για την 29/04 και το ολοκλήρωμα 20/04 – 31/5, ενώ ο δείκτης NMDI δεν βελτίωσε τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα από την ένταξη της κλίσης εδάφους βελτιώθηκαν την 29/04, μόνο για τα μοντέλα με θερμοκρασία και νερό. Από εκεί και έπειτα παρατηρήθηκε βελτίωση στα μοντέλα που χρησιμοποίησαν σαν δείκτη εδάφους τον NMDI, χωρίς όμως να αποτελούν τον καλύτερο συνδυασμό (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από NDVI.

LUE #	ΣΗΜΑ ΦΥΤΟΥ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/5	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR	-	-	-	0.585	0.554	0.624	0.663
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	-	0.628	0.632	0.625	0.661
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	-	0.597	0.570	0.644	0.660
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	-	0.546	0.654	0.674	0.633
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	-	0.601	0.568	0.656	0.667
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	-	0.641	0.494	0.538	0.585
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	-	0.642	0.504	0.584	0.589
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	-	0.642	0.579	0.624	0.651
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	-	0.665	0.563	0.587	0.642
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	-	0.591	0.640	0.671	0.645
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	-	0.561	0.642	0.648	0.638
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	-	0.515	0.645	0.677	0.597
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	-	0.551	0.654	0.684	0.632
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	SLOPE	0.608	0.602	0.671	0.661
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	SLOPE	0.572	0.608	0.657	0.654
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	SLOPE	0.518	0.632	0.690	0.605
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	SLOPE	0.563	0.637	0.690	0.649
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	SLOPE	0.669	0.547	0.604	0.638
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	SLOPE	0.657	0.557	0.638	0.640
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	SLOPE	0.630	0.620	0.673	0.662
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	SLOPE	0.665	0.609	0.644	0.672
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	SLOPE	0.565	0.647	0.668	0.620
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	SLOPE	0.534	0.646	0.630	0.612
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	SLOPE	0.489	0.634	0.662	0.567
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	SLOPE	0.525	0.648	0.678	0.604

Το καλύτερο μοντέλο αποτέλεσε το LUE 16 (Πίνακας 3) για την 29/4 (R=0,690), το οποίο απεικονίζεται και στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Συσχετίσεις μεταξύ μοντελοποιημένης (με FAPAR από NDVI) και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου που υποδεικνύονται σε κάθε διάγραμμα..

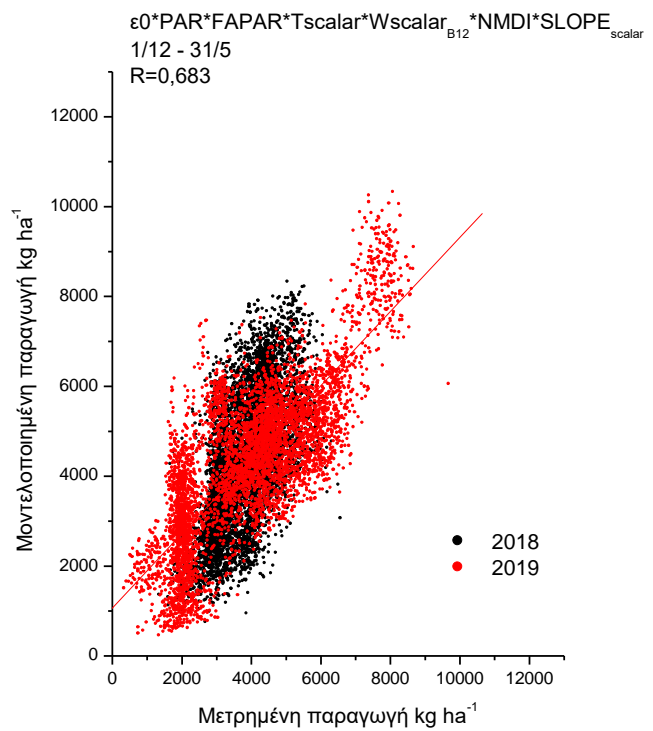
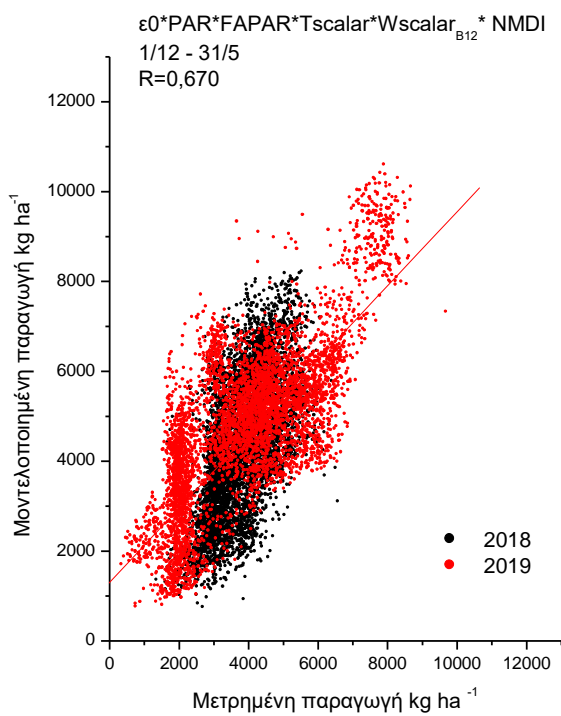
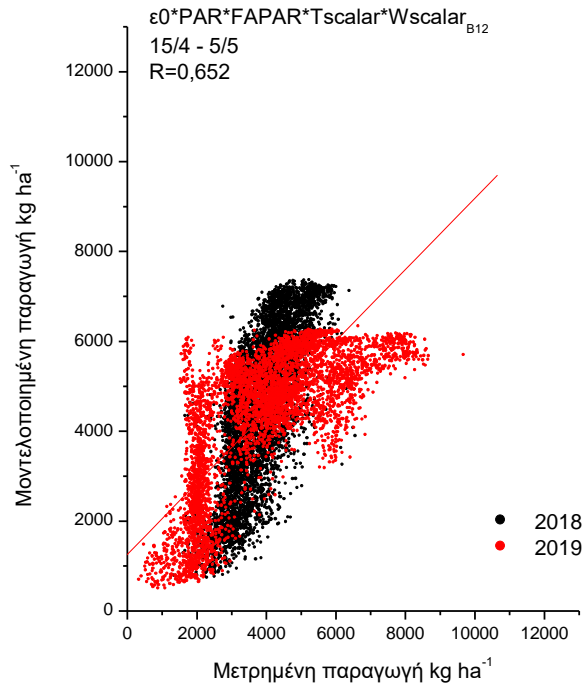
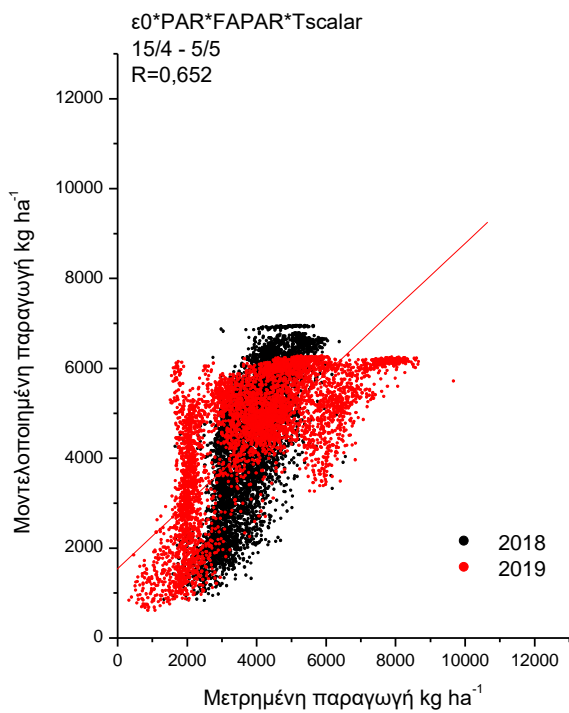
3.1.2 Ομάδα μοντέλων που προέκυψαν από EVI

Το βασικό μοντέλο ($\epsilon_0 \cdot \text{PAR} \cdot \text{FAPAR}$) παρουσιάζει σχετικά χαμηλές συσχετίσεις με την μετρημένη παραγωγή. Με την ένταξη του scalar της θερμοκρασίας δεν παρατηρείται αισθητή βελτίωση στη συσχέτιση της μετρημένης παραγωγής με την μοντελοποιημένη. Με την ένταξη των scalar νερού, παρατηρούνται βελτιώσεις μόνο για το scalar που προέκυψε από την εξίσωση 13.2. ($W_{\text{scalarB12}}$). Όσον αφορά το έδαφος και οι δύο προστιθέμενοι παράγοντες βελτιώνουν τα αποτελέσματα με το κανάλι B12 του δορυφόρου να βελτιώνει καλύτερα την 29/4 και το ολοκλήρωμα 20/04-31/5. Η προσθήκη του slope εδάφους βελτίωσε αισθητά τη συσχέτιση για το ολοκλήρωμα 20/4-31/5, πέραν των μοντέλων με παράγοντα εδάφους το κανάλι B12 του δορυφόρου (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από EVI.

LUE #	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/05	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR	-	-		0.603	0.551	0.633	0.657
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-		0.626	0.555	0.633	0.652
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-		0.612	0.562	0.613	0.651
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-		0.581	0.602	0.644	0.627
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-		0.614	0.601	0.649	0.652
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI		0.636	0.517	0.605	0.627
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI		0.640	0.526	0.625	0.629
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI		0.658	0.593	0.655	0.663
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI		0.670	0.580	0.637	0.659
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12		0.622	0.631	0.651	0.656
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12		0.602	0.634	0.613	0.653
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12		0.558	0.640	0.640	0.611
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12		0.591	0.648	0.657	0.640
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	SLOPE	0.626	0.588	0.645	0.653
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	SLOPE	0.606	0.593	0.608	0.651
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	SLOPE	0.562	0.614	0.640	0.609
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	SLOPE	0.599	0.620	0.655	0.642
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	SLOPE	0.673	0.565	0.645	0.665
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	SLOPE	0.670	0.574	0.648	0.666
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	SLOPE	0.660	0.628	0.677	0.672
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	SLOPE	0.683	0.620	0.668	0.681
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	SLOPE	0.603	0.637	0.638	0.635
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	SLOPE	0.581	0.637	0.593	0.631
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	SLOPE	0.535	0.631	0.621	0.585
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	SLOPE	0.568	0.644	0.642	0.617

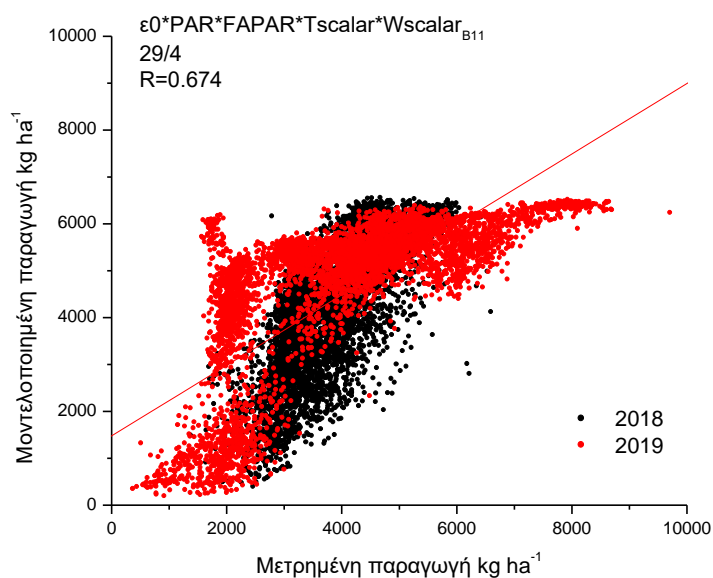
Η καλύτερη συσχέτιση, με τη μετρημένη παραγωγή, για αυτή την ομάδα μοντέλων δόθηκε από το LUE 21 (Πίνακας 4) για το ολοκλήρωμα 1/12-31/5 ($R=0,683$), το οποίο απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Συσχετίσεις μεταξύ μοντελοποιημένης (με FAPAR από EVI) και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου που υποδεικνύονται σε κάθε διάγραμμα.

3.2 Απομάκρυνση «προβληματικών χωραφιών»

Κατά την αξιολόγηση των μοντέλων παρατηρούνται κάποια σημεία τα οποία δεν συσχετίζονται καλά με την μετρημένη παραγωγή. Βλέποντας το Σχήμα 3, φαίνεται πως ορισμένα χωράφια, κατά βάση για το έτος 2018-2019 (κόκκινο), παρουσιάζουν είτε πολύ υψηλές τιμές παραγωγής, είτε πολύ χαμηλές, σε καμία περίπτωση όμως, σχετιζόμενες με την μετρημένη παραγωγή. Το γεγονός αυτό παρατηρείται και για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018 αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Στην ουσία, αυτά τα νέφη σημείων που παρατηρούνται χωρίς να σχετίζονται με την μετρημένη παραγωγή, είναι χωράφια που παρουσιάζουν, είτε πολύ μεγάλη παραγωγή, είτε πολύ μικρή. Για την εξασφάλιση λοιπόν ενός καλύτερου αποτελέσματος συσχέτισης της μοντελοποιημένης παραγωγής, με την μετρημένη, κρίθηκε αναγκαία η αφαίρεση αυτών των χωραφιών. Πιο συγκεκριμένα αφαιρέθηκαν 2 χωράφια από τα δεδομένα της καλλιεργητικής περιόδου 2017-2018 και 9 χωράφια από τα δεδομένα της καλλιεργητικής περιόδου 2018-2019.



Σχήμα 3: Συσχέτιση μεταξύ μοντελοποιημένης (με FAPAR από NDVI) και μετρημένης παραγωγής, με τους αναγραφόμενους παράγοντες.

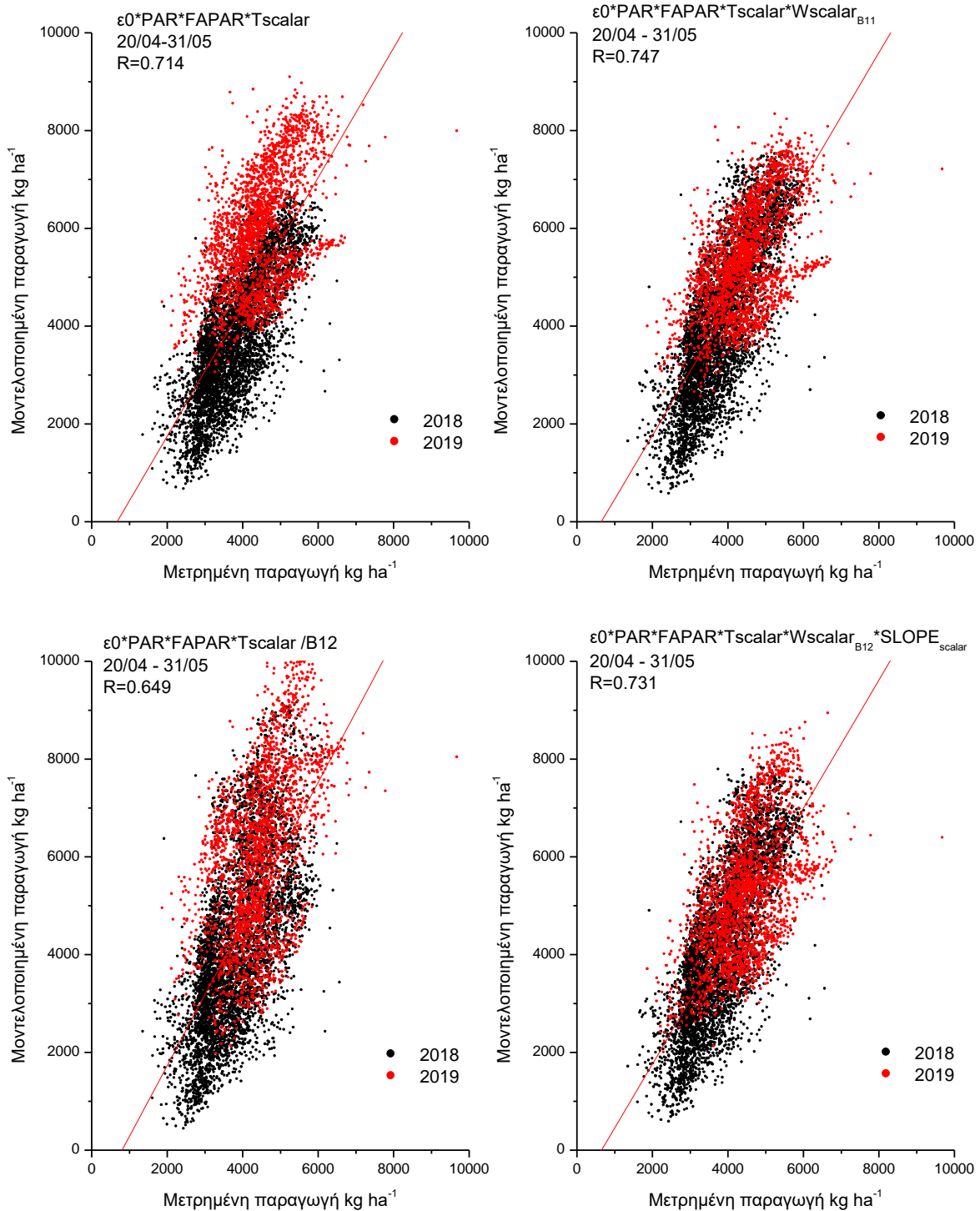
Μετά την απομάκρυνση των προβληματικών χωραφιών προέκυψαν 25 μοντέλα για κάθε τρόπο που υπολογίστηκε το FAPAR. Η συσχέτιση των δύο ετών βελτιώθηκε αισθητά για το ολοκλήρωμα 20/04-31/05 τόσο για NDVI όσο και για EVI.

3.2.1 Ομάδα μοντέλων με FAPAR μετρημένο από NDVI

Όσον αφορά την ομάδα μοντέλων NDVI, αυτή έδωσε τη μεγαλύτερη καταγεγραμμένη τιμή γραμμικής συσχέτισης και συγκεκριμένα το LUE 4 20/04 – 31/05 (Σχήμα 4, Πίνακας 5). Το βασικό μοντέλο και μετά την αφαίρεση χωραφιών βελτιώνεται τόσο με την πρόσθεση του scalar θερμοκρασίας όσο και με scalar νερού και πιο συγκεκριμένα με αυτό που προέκυψε από την εξίσωση 13.1 ($W_{scalarB11}$). Η προσθήκη παραγόντων εδάφους δεν προκάλεσε βελτίωση των αποτελεσμάτων για κανέναν από τους δύο. Ακόμα το scalar κλίσης εδάφους δεν έδωσε δείγματα καλύτερης εκτίμησης παραγωγής πέρα από το γεγονός ότι βελτίωσε τα μοντέλα που χρησιμοποιούσαν δείκτη εδάφους, που ούτως η άλλως δεν δίνουν καλές συσχετίσεις. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η συσχέτιση της μετρημένης με την μοντελοποιημένη παραγωγή, για τις διάφορες εκδόσεις του μοντέλου.

Πίνακας 5: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από NDVI.

LUE #	ΣΗΜΑ ΦΥΤΟΥ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/05	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR	-	-	-	0.516	0.706	0.707	0.718
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	-	0.601	0.714	0.708	0.709
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	-	0.536	0.722	0.713	0.700
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	-	0.448	0.747	0.737	0.634
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	-	0.507	0.744	0.728	0.686
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	-	0.509	0.573	0.525	0.493
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	-	0.465	0.578	0.546	0.488
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	-	0.415	0.637	0.590	0.514
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	-	0.463	0.623	0.566	0.527
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	-	0.448	0.649	0.607	0.525
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	-	0.401	0.647	0.569	0.512
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	-	-0.056	0.642	0.612	0.479
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	-	0.403	0.645	-0.110	0.139
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	SLOPE	0.519	0.721	0.718	0.652
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	SLOPE	0.451	0.724	0.681	0.634
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	SLOPE	0.504	0.724	0.716	0.556
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	SLOPE	0.436	0.731	0.730	0.620
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	SLOPE	0.467	0.596	0.559	0.496
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	SLOPE	0.409	0.600	0.560	0.486
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	SLOPE	0.354	0.646	0.609	0.480
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	SLOPE	0.408	0.638	0.597	0.515
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	SLOPE	0.396	0.630	0.582	0.473
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	SLOPE	0.350	0.624	0.527	0.459
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	SLOPE	-0.057	0.608	0.576	0.428
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	SLOPE	0.358	0.635	-0.110	0.115



Σχήμα 4: Συσχετίσεις μεταξύ μοντελοποιημένης (με FAPAR από NDVI) και μετρημένης παραγωγής, μετά την αφαίρεση χρωαφιών, για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου που υποδεικνύονται σε κάθε διάγραμμα.

Την καλύτερη συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή έδωσε το LUE 4 (Πίνακας 5) για το διάστημα ολοκλήρωσης 20/4-31/5 (R=0,747), το οποίο απεικονίζεται και στο Σχήμα 4.

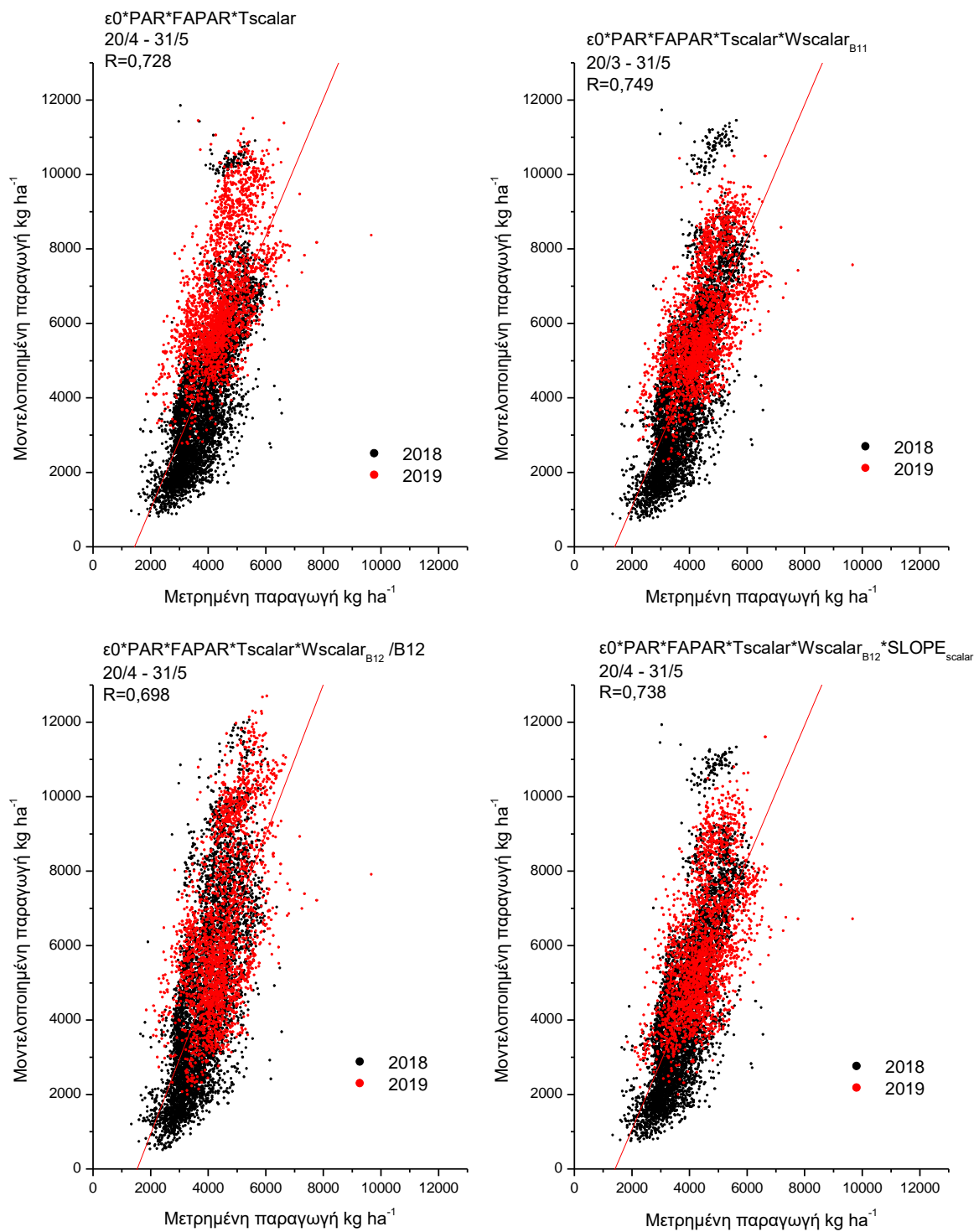
3.2.2 Ομάδα μοντέλων με FAPAR μετρημένο από EVI

Η ομάδα μοντέλων EVI έδωσε και αυτή καλές συσχετίσεις με την μετρημένη παραγωγή, βέβαια, παρατηρήθηκαν μόνο για το διάστημα 20/4 – 31/5. Και σε αυτή την ομάδα, παρατηρήθηκε βελτίωση των αποτελεσμάτων με την πρόσθεση scalar για θερμοκρασία και νερό. (Σχήμα 5) Το WscalarB11 δίνει την καλύτερη συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή για το διάστημα 20/4 – 31/5, ενώ το WscalarB12 έδωσε και αυτό καλές συσχετίσεις για τα υπόλοιπα διαστήματα. Οι παράγοντες του εδάφους και εδώ δεν βελτίωσαν τα αποτελέσματα καθώς επίσης το ίδιο ίσχυσε και για το slope. (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από EVI.

LUE #	ΣΗΜΑ ΦΥΤΟΥ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/5	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR	-	-	-	0.654	0.722	0.694	0.712
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	-	0.683	0.728	0.693	0.701
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	-	0.653	0.733	0.656	0.696
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	-	0.590	0.749	0.686	0.658
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	-	0.630	0.748	0.702	0.691
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	-	0.591	0.633	0.596	0.578
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	-	0.570	0.638	0.588	0.572
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	-	0.547	0.685	0.624	0.588
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	-	0.573	0.671	0.621	0.597
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	-	0.611	0.694	0.617	0.607
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	-	0.584	0.694	0.572	0.602
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	-	0.528	0.694	0.605	0.567
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	-	0.563	0.698	0.625	0.598
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	SLOPE	0.645	0.731	0.675	0.669
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	SLOPE	0.609	0.733	0.620	0.662
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	SLOPE	0.541	0.733	0.655	0.610
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	SLOPE	0.584	0.738	0.680	0.652
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	SLOPE	0.585	0.654	0.604	0.581
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	SLOPE	0.555	0.658	0.576	0.574
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	SLOPE	0.512	0.691	0.616	0.565
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	SLOPE	0.549	0.684	0.625	0.589
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	SLOPE	0.569	0.678	0.587	0.567
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	SLOPE	0.538	0.676	0.534	0.561
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	SLOPE	0.485	0.666	0.571	0.524
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	SLOPE	0.520	0.674	0.594	0.557

Την καλύτερη συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή έδωσε το LUE 4 (Πίνακας 6) για το διάστημα ολοκλήρωσης 20/4-31/5 (R=0,749) το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Συσχετίσεις μεταξύ μοντελοποιημένης (με FAPAR από EVI) και μετρημένης παραγωγής, μετά την αφαίρεση χωραφιών, για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου που υποδεικνύονται σε κάθε διάγραμμα.

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 το σύνολο των παραμέτρων που χρειάστηκαν για την κατασκευή του, λήφθηκαν τηλεσκοπικά. Για την κατασκευή αυτού του μοντέλου δημιουργήθηκαν μια σειρά από παράγοντες (scalars), προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν όσο το δυνατό περισσότερο, οι παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγική συμπεριφορά της καλλιέργειας. Για να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη συσχέτιση της μοντελοποιημένης παραγωγής με την μετρημένη, δημιουργήθηκαν κάποια διαστήματα ολοκλήρωσης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προερχόντουσαν από το δορυφόρο Sentinel-2, ενώ αξιοποιήθηκαν παρόμοιες μελέτες με δεδομένα που λήφθηκαν από αγρούς πάλι στον κάμπο της Θεσσαλίας. Η ενσωμάτωση της επίδρασης της θερμοκρασίας έγινε με τη μορφή scalar και για την κατασκευή του, αξιοποιήθηκε προηγούμενη εργασία που υπολόγισε την ελάχιστη, τη μέγιστη και τη βέλτιστη θερμοκρασία φωτοσύνθεσης για σκληρό σιτάρι στην περιοχή του Μόδεστου Λάρισας (Μαξούρη 2020). Για την ενσωμάτωση της επίδρασης του νερού στο μοντέλο έγιναν 3 δοκιμές, οι δύο ήταν από δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τον κανονικοποιημένο δείκτη νερού NDWI από τον δορυφόρο Sentinel-2, με δύο τρόπους, και η τρίτη από μετεωρολογικά δεδομένα μέσω της διαφοράς της ημερήσιας βροχόπτωσης με την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή. Για να υπολογιστεί η επίδραση του εδάφους στην παραγωγή της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης NMDI για το γυμνό έδαφος και η ανακλαστικότητα του εδάφους στο κανάλι B12 του δορυφόρου.

4.1 Σύγκριση ομάδων μοντέλων NDVI και EVI

Για την κατασκευή του μοντέλου, ο υπολογισμός του FAPAR (ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας που απορροφάται από το θόλο) έγινε υπολογίζοντας το LAI (δείκτης φυλλικής επιφάνειας) από τους δείκτες βλάστησης NDVI και EVI, λαμβάνοντας έτσι δύο ομάδες μοντέλων.

Όπως παρατηρήθηκε από τους Πίνακες 3,4,5,6 καθώς και από τα Σχήματα 1,2,4,5 τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν FAPAR υπολογισμένο από NDVI συσχετίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό, με την μετρημένη παραγωγή, για το διάστημα ολοκλήρωσης 20/4 – 31/5 και την 29/4 (μέρα όπου οι δείκτες NDVI και EVI παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συσχέτιση με τη μετρημένη παραγωγή), επιβεβαιώνοντας την υπόθεση ότι

το σιτάρι μετά την ανθοφορία δίνει όλα τα φωτοσυνθετικά του προϊόντα στον καρπό. Η ομάδα EVI και αυτή δίνει καλές συσχετίσεις μετρημένης με μοντελοποιημένη παραγωγή, για τα διαστήματα ολοκλήρωσης 20/4-31/5 και 15/4 – 5/5 , όχι όμως για την 29/4. Στα αρχικά δεδομένα, η ομάδα NDVI δίνει καλύτερες συσχετίσεις από την EVI ενώ μετά την αφαίρεση χωραφιών η ομάδα EVI είναι αυτή με την καλύτερη συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή (Σχήμα 4, 5). Από την ομάδα NDVI, η καλύτερη συσχέτιση, με την μετρημένη παραγωγή, έχει $R=0,747$ ενώ από την ομάδα EVI έχει $R=0,749$. Η καλύτερη μονοήμερη (29/4) εκτίμηση, προκύπτει από την ομάδα NDVI και δίνει συσχέτιση με τη μετρημένη παραγωγή με συντελεστή $R=0,737$. Δεδομένων των παραπάνω, η ομάδα των μοντέλων NDVI ίσως αποτελεί και την καλύτερη, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι μια κοινή έκδοση του μοντέλου (Πίνακας 5), δίνει δύο ικανοποιητικές συσχετίσεις, με την μετρημένη παραγωγή, και για το διάστημα 20/4-21/5 αλλά και χρησιμοποιώντας μία μόνο μέρα, την 29/4.

4.2 Διάφορες εκδόσεις του μοντέλου

Αυτό που παρατηρήθηκε είναι πως οι διαφορές μεταξύ $W_{\text{scalarB11}}$ και $W_{\text{scalarB12}}$ (από δορυφορικά δεδομένα) είναι μικρές ενώ το $W_{\text{scalarmeteo}}$ δεν δίνει καλά αποτελέσματα σε σχέση με τα προηγούμενα.

Οι παράγοντες που εντάχθηκαν με σκοπό να προσδιορίσουν την επίδραση του εδάφους προέβλεψαν καλύτερα την παραγωγή για τα αρχικά δεδομένα από τα οποία δεν αφαιρέθηκαν χωράφια. Συγκεκριμένα για την ομάδα NDVI αυτός ο παράγοντας που βελτίωσε τη συσχέτιση ήταν το κανάλι B12 του δορυφόρου ενώ για την ομάδα EVI ο δείκτης NMDI για το γυμνό έδαφος (Σχήμα 1, 2)

Με την πρόσθεση του scalar που δημιουργήθηκε για το slope (κλίση), οι συσχετίσεις της μοντελοποιημένης παραγωγής με την μετρημένη βελτιώθηκαν μόνο για τα αρχικά δεδομένα, που δεν αφαιρέθηκαν χωράφια. (Πίνακας 4, 5) Μετά την αφαίρεση των χωραφιών παρουσιάστηκαν ελάχιστες βελτιώσεις στις συσχετίσεις μοντελοποιημένης-μετρημένης παραγωγής, κατά βάση στα μοντέλα χωρίς κάποιο παράγοντα για έδαφος και νερό ($\epsilon_0 * PAR * FAPAR * T_{\text{scalar}} * SLOPE_{\text{scalar}}$)

Οι εκδόσεις του μοντέλου με τις καλύτερες συσχετίσεις με την μετρημένη παραγωγή είναι οι παρακάτω:

$$GPP = \epsilon_0 * PAR * FAPAR_{NDVI} * T_{\text{scalar}} * W_{\text{scalarB11}} \quad (14)$$

$$GPP = \epsilon_0 * PAR * FAPAR_{EVI} * T_{\text{scalar}} * W_{\text{scalarB11}} \quad (15)$$

Δίνοντας συντελεστή $R=0,747$ για την ομάδα NDVI και $R=0,749$ για την ομάδα EVI . Και οι δύο αυτές συσχετίσεις, με την μετρημένη παραγωγή, προέκυψαν από το διάστημα ολοκλήρωσης 20/4-31/5, το οποίο επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι το σιτάρι μετά την ανθοφορία δίνει όλα τα φωτοσυνθετικά προϊόντα στον καρπό. Αυτή η έκδοση του μοντέλου (14) δίνει και την καλύτερη μονοήμερη πρόβλεψη (29/4) με $R = 0,737$.

4.3 Συγκρίσεις με παρόμοιες μελέτες

Η συγκεκριμένη μελέτη περιλαμβάνει δεδομένα για 26 συνολικά χωράφια, για δύο καλλιεργητικές περιόδους. Τα συγκεκριμένα δεδομένα παραγωγής αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης των Ανατολίτη (2020) και Σηφάκη (2020). Κατά τον πρώτο έγινε η συσχέτιση της μετρημένης παραγωγής, για 9 συνολικά αγρούς, για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018. Κατά τον δεύτερο, έγινε η συσχέτιση της μετρημένης παραγωγής, για 26 συνολικά αγρούς, (συμπεριλαμβανομένων και των αγρών της μελέτης του Ανατολίτη) για τις καλλιεργητικές περιόδους 2017-2018 και 2018-2019. Και οι δύο συσχέτισαν τη μετρημένη παραγωγή με δείκτες βλάστησης.

Κατά τον Ανατολίτη 2020, την καλύτερη συσχέτιση με τη μετρημένη παραγωγή για το έτος 2017-2018 την έδωσε ο δείκτης EVI για το διάστημα 19/4-3/6, με $R = 0,826$.

Ο Σηφάκης 2020, συσχέτισε τις τιμές δεικτών βλάστησης (NDVI και EVI) των δύο ετών, συνολικά με τη μετρημένη παραγωγή. Το διάστημα ολοκλήρωσης, για την περίοδο κατά την οποία το σιτάρι δίνει όλα του τα φωτοσυνθετικά προϊόντα στον καρπό, δεν έδωσε την καλύτερη συσχέτιση για κανέναν από τους συσχετιζόμενους δείκτες βλάστησης. Οι καλύτερες συσχετίσεις δόθηκαν για το δεκαήμερο διάστημα ολοκλήρωσης 11/4-20/4, με τον NDVI για το συγκεκριμένο διάστημα να δίνει $R=0.663$ και τον EVI να δίνει $R=0.678$. Για την 29/4 στη ίδια μελέτη βρέθηκε πως ο NDVI σχετίζεται με την μετρημένη παραγωγή με $R=0,618$ ενώ ο EVI με $R=0,663$.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, και με το γεγονός ότι η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί τα ίδια δεδομένα με του Σηφάκη (2020), η εκτίμηση της παραγωγής για τα συγκεκριμένα χωράφια βελτιώθηκε. Οι υψηλές συσχετίσεις στην εργασία του Ανατολίτη (2020), και οι χαμηλότερες συσχετίσεις που προέκυψαν από την πρόσθεση χωραφιών από τον Σηφάκη (2020), καθιστούν πιθανό τα χωράφια που αξιοποιήθηκαν από τον πρώτο να παρουσίαζαν παρόμοια αναπτυξιακά χαρακτηριστικά, και σε αυτό το γεγονός να οφείλεται η καλή συσχέτιση του EVI με την μετρημένη παραγωγή.

Σε έρευνα που διεξήχθη σε 6 αγρούς στην πόλη Μαρακές του Μαρόκο, έγινε προσπάθεια να συσχετιστεί η μετρημένη παραγωγή, σε αρδευόμενα χωράφια σιταριού,

με μοντελοποιημένες τιμές παραγωγής. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε με ένα απλό μοντέλο LUE και με την χρήση του μοντέλου AquaCrop (πιο πολύπλοκο μοντέλο) (Khabba et al. 2020). Στη συγκεκριμένη μελέτη λήφθηκαν δύο διαστήματα ολοκλήρωσης, ένα που αφορούσε όλη την ανάπτυξη της καλλιέργειας, και ένα για το στάδιο πριν την ωρίμανση. Η τελική συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή των 6 συνολικά αγρών έδωσε για το απλό μοντέλο LUE $R=0,77$ για όλη την περίοδο ανάπτυξης της καλλιέργειας, και για το στάδιο πριν την ωρίμανση $R=0,61$. Ενώ για το AquaCrop (πολυπλοκότερο μοντέλο) η συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή έδωσε $R=0,93$ για το όλο το διάστημα ανάπτυξης της καλλιέργειας, και $R=0,71$ για το διάστημα πριν την ωρίμανση (Khabba et al. 2020).

Μελετώντας αυτή την έρευνα, όπου η περιπλοκότητα των δεδομένων που αξιοποιήθηκαν είναι μεγάλη, παρόλο που το δείγμα των αγρών είναι μικρότερο, γίνεται αντιληπτό πως τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι αρκετά ικανοποιητικά, λαμβάνοντας υπ' όψη, ότι η έκδοση του μοντέλου που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αρκετά απλή.

4.4 Προτάσεις

Από τα παραπάνω παρατηρείται πως το μοντέλο εκτίμησης της παραγωγής που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας μελέτης κατασκευάστηκε με σχετική επιτυχία. Σίγουρα θα μπορούσαν να κατασκευαστούν και να ενταχθούν περισσότεροι παράγοντες στο μοντέλο, ή αυτοί που προστέθηκαν να μπορούσαν να κατασκευαστούν με διαφορετικούς τρόπους. Θα μπορούσε να προσδιοριστεί κάποιος καλύτερος παράγοντας για την επίδραση του εδάφους δεδομένου ότι κανένας από όσους χρησιμοποιήθηκαν δεν βελτίωσαν τα αποτελέσματα στον αναμενόμενο βαθμό.

Όπως παρατηρείται από τις δύο καλλιεργητικές περιόδους (Παράρτημα) δεν υπάρχει κοινό διάστημα ολοκλήρωσης όπου και οι δύο χρονιές να εμφανίζουν καλές συσχετίσεις με την μετρημένη παραγωγή, και αυτό αφορά και τις δύο ομάδες μοντέλων που προέκυψαν. Οι διαφορές που προέκυψαν από τις δύο καλλιεργητικές περιόδους θα μπορούσαν να εξομαλυνθούν με την προσθήκη δεδομένων από επιπρόσθετες καλλιεργητικές περιόδους ή/και περισσότερα χωράφια.

Επίσης, ένα τέτοιο μοντέλο εκτίμησης της παραγωγής θα μπορούσε να βελτιωθεί, εάν ήταν γνωστές οι καλλιεργητικές πρακτικές που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε χωράφι, η μηχανική σύσταση του εδάφους, κατά πόσο το κάθε χωράφι ήταν

απαλλαγμένο από ζιζάνια και ασθένειες, και πιθανότατα εάν υπήρχε ημερολόγιο καλλιέργειας για κάθε χωράφι, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί μια κοινή αφετηρία για την ανάπτυξη του σιταριού σε κάθε αγρό.

5. Συμπεράσματα

Η χρήση των δεδομένων από τους δορυφόρους Sentinel-2 μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην εξ' αποστάσεως παρακολούθηση των αγρών, και να συμβάλει έτσι στην αποτελεσματικότερη διαχείρισή τους. Η χωρική τους ανάλυση, όπως έχει διαπιστωθεί και από άλλες μελέτες, μπορεί να απεικονίσει την παραλλακτικότητα που παρατηρείται τόσο σε επίπεδο αγρού όσο και μεταξύ αγρών.

Όσον αφορά την κατασκευή του μοντέλου για την εκτίμηση της παραγωγής χειμερινού σιταριού, τα δορυφορικά δεδομένα έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια η διαδικασία να παραμείνει όσο το δυνατόν απλούστερη, και η άντληση των δεδομένων να γίνει εξ' αποστάσεως. Οι υποθέσεις ότι η καλύτερη συσχέτιση με τη μετρημένη παραγωγή θα δίνονταν από το διάστημα μετά την άνθιση (20/4-31/5), και τη μέρα όπου οι δείκτες βλάστησης, παρουσιάζουν τη μέγιστη συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή (29/4), επιβεβαιώθηκαν, δίνοντας $R=0,747$ και $R=0,737$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα, δεδομένου ότι οι δύο καλλιεργητικές περίοδοι συσχετίστηκαν στο σύνολο με την μετρημένη παραγωγή, είναι ικανοποιητικά, για την εξαγωγή τους όμως ήταν αναγκαία η αφαίρεση χωραφιών από τα δεδομένα.

Για την διεξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων είναι καλό η μελέτη αυτή να πραγματοποιηθεί για παραπάνω καλλιεργητικές περιόδους, καθώς και μεγαλύτερο αριθμό αγρών. Επίσης, για να δημιουργηθεί μια καλύτερη έκδοση του μοντέλου θα πρέπει οι καλλιεργητικές πρακτικές που εφαρμόζονται να είναι σε έναν βαθμό γνωστές προκειμένου να είναι δεδομένο πως η καλλιέργεια είναι υγιής, απαλλαγμένη από αρρώστιες και ζιζάνια. Επιπλέον, θα μπορούσαν να προσδιοριστούν επιπλέον παράγοντες για την επίδραση του εδάφους και να ενταχθούν σε κάποια μελλοντική έκδοση του μοντέλου.

6. Βιβλιογραφία

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998 - *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements*. Irrigation and Drainage Paper N. 56, FAO, Rome, Italy.
- Bannari A., El-Battay A., Bannari R. and Rhinane H. 2018. Sentinel-MSI VNIR and SWIR bands sensitivity analysis for soil salinity discrimination in an arid landscape. *Remote Sensing*, 10, 855.
- Bauer, M. E. 1975. The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops. *Advanced Agronomy* 27, 271-304.
- Carlson T.N., Ripley D.A. 1997 - *On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index*. *Remote Sensing of Environment*, 62: 241-252. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1).
- Cossani C.M., Slafer G.A. and Savin R. 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Research* 112, 205-213.
- Diacono M., Castrignanò A., Troccoli A., Benedetto D. De, Basso B. and Rubino P. 2012. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research* 131, 49–62.
- EDO (European Drought Observatory). NDWI: Normalized Difference Water Index, 2001.
- ESA, Sentinel online, Missions <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- ESA, Sentinel online, User guides <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>.
- Gao, B.-C. 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58: 257-266.
- Huete A.R. and C. Justice 1999. MODIS Vegetation Index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center.

- Huete A.R., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X. and Ferreira L.G. 2002a. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195-213.
- Jensen J. R. 2015. Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος: Μια προοπτική για τα Φυσικά Διαθέσιμα, Ε.Μ.Π. pp. 4-10, 442-451
- Khabba, Saïd, Salah Er-Raki, Jihad Toumi, Jamal Ezzahar, Bouchra Ait Hssaine, Michel Le Page, and Abdelghani Chehbouni. 2020. "A Simple Light-Use-Efficiency Model to Estimate Wheat Yield in the Semi-Arid Areas" *Agronomy* 10, no. 10: 1524. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101524>
- Kukal M.S., Irmak S. 2020. Light interactions, use and efficiency in row crop canopies under optimal growth conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 284, 107887, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107887>.
- Liu Q., and Huete A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sens.* 33:457-465.
- Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., and Gottlieb, E. W. 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB2005.
- 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*
- Meti S., Lakshmi P., Nagaraja M. and Shreepad V. 2019. Sentinel 2 and Landsat-8 bands sensitivity analysis for mapping of alkaline soil in northern dry zone of Karnataka, India
- Moreno A., Maselli F., Gilabert M.A., Chiesi M., Martinez B., Seufert G. 2012 - Assessment of MODIS imagery to track light-use efficiency in a water-limited Mediterranean pine forest. *Remote Sensing of Environment*, 123: 359-367. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.003>

- Myneni R.B., Williams D.L. 1994 - *On the Relationship between FAPAR and NDVI*. Remote Sensing of Environment, 49: 200-211. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7).
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. 1995 - *The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33: 481-486. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/36.377948>.
- 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.
- Royo C., Soriano J.M. and Alvaro F. 2017. Wheat: A Crop in the Bottom of the Mediterranean Diet Pyramid. Mediterranean Identities - Environment, Society, Culture. Editor. B. Fuerst-Bjelis, IntechOpen.
- Ruimy A., Kergoat L., Bondeau A. 1999 - Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. Global Change Biology, 5: 56-64. doi: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00007.x>.
- Running S.W., Justice C.O., Solomonson V., Hall D., Barker J., Kaufman Y.J., Strahler A.H., Huete A.R., Muller J.P. Vanderbilt V., Wan Z.M., Teillet P. and Carneggie D. 1994. Terrestrial Remote Sensing Science and Algorithms Planned for EOS/MODIS. Intl. Journal of Remote Sensing, 15(17):3587-3620.
- Wang L., Qu J. J. 2007. A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L20405.
- Ανατολίτης Κ., 2020. Εκτίμηση Παραγωγής σε καλλιέργεια Σκληρού Σιταριού με τη χρήση Δεικτών Βλάστησης από το Δορυφόρο Sentinel-2.
- 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»

- Μεγγούδη Σ. 2020. Μετρήσεις αναπτυξιακών παραμέτρων υδατικής κατάστασης σε καλλιέργεια σίτου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2.
- Παπακώστα Δ. 2012. Ειδική Γεωργία: Σιτηρά και Ψυχανθή, Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη
- Περάκης Κ., Φαρασλής Ι. και Μουσιάδης Α. 2015. Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες: Θεωρία, Μέθοδοι και Εφαρμογές. Εκδόσεις ΣΕΑΒ.
- Σηφάκης Μ. 2020. Εκτίμηση παραγωγής σε πολλαπλούς αγρούς σίτου στη διάρκεια δυο καλλιεργητικών περιόδων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2

7. Παράρτημα

7.1 Ομάδα NDVI

7.1.1 Καλλιεργητική περίοδος 2017 - 2018

Για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018 τα μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερες συσχετίσεις στο διάστημα 20/4-31/05, για τη 29/04 καθώς και στο διάστημα 15/04-5/05. Το καλύτερο αποτέλεσμα δόθηκε από το LUE 4 για το διάστημα 20/04-31/05 με $R = 0,775$. Όσον αφορά την κάθε παράμετρο, φαίνεται πως το καλύτερο σήμα νερού είναι αυτό που προέκυψε με την προσέγγιση του WscalarB11, βελτιώνοντας μάλιστα τα αποτελέσματα, σε σύγκριση με την βασική έκφραση του μοντέλου. Καλύτερο παράγοντα για την εκτίμηση της επίδρασης του εδάφους (συγκρίνοντας του δύο που χρησιμοποιήθηκαν μεταξύ τους), αποτέλεσε ο δείκτης NMDI για το γυμνό έδαφος χωρίς να βελτιώνει βέβαια τα αποτελέσματα. Η παράμετρος για την κλίση του εδάφους παρουσίασε βελτιώσεις, κατά βάση στα πρώτα δύο ολοκληρώματα, και αυτές, χωρίς να αφορούν τον παράγοντα B12. Τη μέγιστη τιμή SLOPE παρουσίασε το LUE 16.

Πίνακας 7: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από NDVI, για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018.

LUE #	ΣΗΜΑ ΦΥΤΟΥ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΛΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/05	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR	-	-	-	0.574	0.761	0.746	0.737
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	-	0.658	0.762	0.746	0.738
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	-	0.634	0.763	0.746	0.737
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	-	0.632	0.775	0.759	0.744
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	-	0.636	0.770	0.754	0.738
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	-	0.530	0.676	0.623	0.541
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	-	0.506	0.675	0.623	0.538
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	-	0.534	0.706	0.662	0.592
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	-	0.537	0.701	0.653	0.583
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	-	0.480	0.625	0.583	0.546
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	-	0.463	0.624	0.583	0.545
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	-	0.481	0.643	0.609	0.571
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	-	0.482	0.639	0.602	0.565
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	SLOPE	0.658	0.760	0.744	0.735
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	SLOPE	0.635	0.762	0.744	0.735
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	SLOPE	0.632	0.773	0.756	0.742
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	SLOPE	0.636	0.769	0.751	0.736
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	SLOPE	0.534	0.676	0.623	0.542
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	SLOPE	0.510	0.675	0.623	0.540
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	SLOPE	0.538	0.706	0.662	0.593
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	SLOPE	0.541	0.701	0.652	0.584
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	SLOPE	0.477	0.621	0.579	0.541
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	SLOPE	0.460	0.620	0.579	0.540
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	SLOPE	0.478	0.639	0.604	0.567
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	SLOPE	0.480	0.635	0.598	0.561

7.1.2 Καλλιεργητική περίοδος 2018 - 2019

Για την καλλιεργητική περίοδο 2018-2019 τα μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερες συσχετίσεις στο διάστημα 1/12 - 31/05, στην 29/04, καθώς και στο διάστημα 15/04 – 5/05. Το καλύτερο αποτέλεσμα δόθηκε από το LUE 13 για το διάστημα 1/12 – 31/5 με $R = 0,796$. Όσον αφορά την κάθε παράμετρο, φαίνεται πως καλύτερο σήμα νερού αποτελεί το WscalarB11, ενώ το WscalarB12 έδινε καλύτερα αποτελέσματα στο διάστημα 15/05 – 5/05. Και οι δύο εδαφικοί παράγοντες βελτίωσαν τα αποτελέσματα για όλα τα ολοκληρώματα με καλύτερο τον B12. Η παράμετρος για την κλίση του εδάφους βελτίωσε όλα τα αποτελέσματα πλην των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκε σαν σήμα εδάφους το B12.

Πίνακας 8: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από NDVI, για την καλλιεργητική περίοδο 2018-2019.

LUE #	ΣΗΜΑ ΦΥΤΟΥ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΛΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/5	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR	-	-	-	0.709	0.546	0.645	0.667
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	-	0.688	0.540	0.645	0.663
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	-	0.697	0.544	0.645	0.668
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	-	0.734	0.587	0.686	0.705
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	-	0.737	0.589	0.674	0.703
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	-	0.682	0.537	0.629	0.642
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	-	0.690	0.540	0.629	0.644
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	-	0.726	0.586	0.678	0.692
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	-	0.728	0.587	0.666	0.688
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	-	0.775	0.683	0.752	0.764
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	-	0.779	0.686	0.752	0.766
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	-	0.795	0.711	0.771	0.778
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	-	0.796	0.714	0.764	0.776
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar	-	-	SLOPE	0.714	0.571	0.675	0.691
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	-	SLOPE	0.723	0.574	0.675	0.695
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	-	SLOPE	0.754	0.612	0.711	0.724
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	-	SLOPE	0.757	0.614	0.700	0.721
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar	-	NMDI	SLOPE	0.715	0.573	0.667	0.680
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	NMDI	SLOPE	0.723	0.576	0.667	0.682
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	NMDI	SLOPE	0.752	0.617	0.709	0.720
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	NMDI	SLOPE	0.754	0.618	0.699	0.716
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar	-	B12	SLOPE	0.769	0.686	0.741	0.751
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	METEO	B12	SLOPE	0.772	0.689	0.741	0.752
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	B11	B12	SLOPE	0.788	0.711	0.761	0.763
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	B12	B12	SLOPE	0.788	0.713	0.754	0.761

7.2 Ομάδα μοντέλων EVI

7.2.1 Καλλιεργητική περίοδος 2017-2018

Για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018 καλύτερο ολοκλήρωμα αποτέλεσε το 20/04-31/05 με δεύτερο, και σε αυτή την ομάδα, το 15/04 – 5/05. Η ημέρα με τη μέγιστη συσχέτιση με την μετρημένη παραγωγή, και αυτή να έδωσε καλά αποτελέσματα. Το καλύτερο αποτέλεσμα δόθηκε από το LUE 4 με $R = 0,768$ (βλ. Πίνακας 5). Όσον αφορά την κάθε παράμετρο που χρησιμοποιήθηκε, καλύτερο σήμα νερού αποτέλεσε το WscalarB11 του μοντέλου με ελάχιστες διαφορές από το WscalarB12. Καλύτερος παράγοντας εδάφους αποτελεί ο NMDI χωρίς βέβαια να βελτιώνει κάπως τα αποτελέσματα. Ο δείκτης της κλίσης βελτίωσε τα αποτελέσματα για τα ολοκληρώματα 1/12-31/05 και 20/04-31/05 εκτός των μοντέλων που περιλάμβαναν τον B12 σαν δείκτη εδάφους

Πίνακας 9: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από EVI, για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018.

LUE #	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/05	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR		-		0.618	0.751	0.712	0.733
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar		-		0.670	0.750	0.712	0.734
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	-		0.654	0.752	0.712	0.733
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	-		0.658	0.768	0.723	0.740
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	-		0.661	0.765	0.720	0.737
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar		NMDI		0.593	0.707	0.641	0.629
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	NMDI		0.575	0.707	0.641	0.627
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	NMDI		0.595	0.731	0.666	0.654
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	NMDI		0.597	0.728	0.660	0.648
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar		B12		0.552	0.676	0.605	0.616
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	B12		0.536	0.675	0.605	0.614
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	B12		0.542	0.687	0.619	0.624
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	B12		0.545	0.684	0.615	0.621
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar		-	SLOPE	0.670	0.750	0.709	0.732
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	-	SLOPE	0.654	0.752	0.709	0.731
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	-	SLOPE	0.657	0.767	0.721	0.738
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	-	SLOPE	0.660	0.764	0.717	0.735
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar		NMDI	SLOPE	0.595	0.707	0.641	0.629
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	NMDI	SLOPE	0.578	0.707	0.641	0.627
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	NMDI	SLOPE	0.597	0.731	0.665	0.654
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	NMDI	SLOPE	0.599	0.728	0.659	0.648
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar		B12	SLOPE	0.548	0.671	0.600	0.610
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	B12	SLOPE	0.532	0.671	0.600	0.609
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	B12	SLOPE	0.538	0.682	0.614	0.619
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	B12	SLOPE	0.541	0.680	0.610	0.616

7.2.2 Καλλιεργητική περίοδος 2018-2019

Για την καλλιεργητική περίοδο 2018-2019 καλές συσχετίσεις με την μετρημένη παραγωγή, έδειξαν τα ολοκληρώματα 1/12 - 31/05, για την 29/4, καθώς και στο διάστημα 15/04 – 5/05. Το καλύτερο αποτέλεσμα δόθηκε από το LUE 13 για το διάστημα 1/12-31/05 με $R = 0,790$. Όσον αφορά την κάθε παράμετρο που χρησιμοποιήθηκε, καλύτερο σήμα νερού αποτέλεσε το WscalarB12 στα ολοκληρώματα 1/12-31/05 και 20/04-31/05 ενώ στα άλλα δύο έδειξε καλύτερα αποτελέσματα το WscalarB11. Και οι δύο παράγοντες βελτίωσαν τα αποτελέσματα για όλα τα ολοκληρώματα με τον B12 να είναι καλύτερος. Ο δείκτης της κλίσης βελτίωσε όλα τα μοντέλα πλην αυτών που χρησιμοποίησαν για σήμα εδάφους τον παράγοντα B12.

Πίνακας 10: Συντελεστές συσχέτισης (R) μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης παραγωγής για διάφορες εκδόσεις του μοντέλου και για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης / ημερομηνίες, με το FAPAR υπολογισμένο από EVI, για την καλλιεργητική περίοδο 2018-2019.

LUE #	ΣΗΜΑ ΦΥΤΟΥ	ΣΗΜΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1/12-31/5	20/4-31/5	29/4	15/4-5/5
LUE 1	PAR * FAPAR		-		0.710	0.543	0.676	0.689
LUE 2	PAR * FAPAR * Tscalar		-		0.691	0.536	0.676	0.686
LUE 3	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	-		0.702	0.540	0.676	0.691
LUE 4	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	-		0.734	0.581	0.704	0.708
LUE 5	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	-		0.739	0.584	0.694	0.706
LUE 6	PAR * FAPAR * Tscalar		NMDI		0.703	0.557	0.676	0.688
LUE 7	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	NMDI		0.712	0.561	0.676	0.691
LUE 8	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	NMDI		0.741	0.603	0.708	0.713
LUE 9	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	NMDI		0.744	0.605	0.699	0.709
LUE 10	PAR * FAPAR * Tscalar		B12		0.768	0.656	0.753	0.764
LUE 11	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	B12		0.774	0.660	0.753	0.767
LUE 12	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	B12		0.787	0.684	0.767	0.770
LUE 13	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	B12		0.790	0.688	0.761	0.769
LUE 14	PAR * FAPAR * Tscalar		-	SLOPE	0.713	0.562	0.689	0.700
LUE 15	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	-	SLOPE	0.724	0.566	0.689	0.705
LUE 16	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	-	SLOPE	0.751	0.601	0.714	0.718
LUE 17	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	-	SLOPE	0.755	0.604	0.705	0.716
LUE 18	PAR * FAPAR * Tscalar		NMDI	SLOPE	0.732	0.588	0.698	0.712
LUE 19	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	NMDI	SLOPE	0.740	0.592	0.698	0.715
LUE 20	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	NMDI	SLOPE	0.764	0.628	0.726	0.732
LUE 21	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	NMDI	SLOPE	0.767	0.631	0.718	0.729
LUE 22	PAR * FAPAR * Tscalar		B12	SLOPE	0.760	0.656	0.737	0.747
LUE 23	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (METEO)	B12	SLOPE	0.766	0.659	0.737	0.750
LUE 24	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B11)	B12	SLOPE	0.778	0.681	0.752	0.754
LUE 25	PAR * FAPAR * Tscalar	WATER (B12)	B12	SLOPE	0.781	0.684	0.746	0.752