

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση παραγωγής σε πολλαπλούς αγρούς σίτου στη διάρκεια δυο καλλιεργητικών περιόδων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2

Yield estimation in multiple wheat fields during two growing seasons using Sentinel-2 satellite imagery

Σηφάκης Μάριος

Επιβλέπων καθηγητής: Άρης Κυπαρίσσης

Ιούλιος 2020

Βόλος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση παραγωγής σε πολλαπλούς αγρούς σίτου στη διάρκεια δυο καλλιεργητικών περιόδων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2

Yield estimation in multiple wheat fields during two growing seasons using Sentinel-2 satellite imagery

Σηφάκης Μάριος

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.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
1. Εισαγωγή.....	2
1.1. Αξία σιταριού	2
1.2. Μοντέλα πρόβλεψης παραγωγής.....	2
1.3. Αξία τηλεπισκόπησης	3
1.4. Δείκτες Βλάστησης	4
1.5. Landsat.....	6
1.6. NOAA-AVHRR.....	7
1.7. MODIS.....	8
1.8. Sentinel-2	8
1.9. Σκοπός	9
2. Υλικά και Μέθοδοι.....	10
2.1. Περιοχή Μελέτης.....	10
2.2. Δεδομένα παραγωγής.....	13
2.3. Δορυφορικά δεδομένα	13
2.3.1. Δείκτες βλάστησης	14
2.3.2. Δείκτες ποιότητας εδάφους	15
3. Αποτελέσματα.....	17
3.1. Χρονοσειρές	17
3.2. Εκτίμηση παραγωγής με δείκτες βλάστησης	18
3.3. B12 και παραγωγή	29
4. Συζήτηση	35
4.1. Χωρική Μεταβλητότητα.....	35
4.2 Εκτίμηση παραγωγής με δείκτες βλάστησης	36
4.2.1 Εκτίμηση με βάση ολοκληρώματα των διαστημάτων	36
4.2.2 Εκτίμηση με βάση μία μεμονωμένη ημερομηνία.....	37
4.2.3 Συγχώνευση των δύο καλλιεργητικών περιόδων.....	38

4.2.4 B12 και παραγωγή	38
4.3 NDVI και EVI	39
5. Συμπεράσματα.....	41
6. Βιβλιογραφία	42
7. Παράρτημα	48
7.1 Διαδικασία στο QGIS για εξαγωγή των δορυφορικών δεδομένων.....	48
7.1.1. Εισαγωγή χωραφιών	48
7.1.2. Μετατροπή vector σε raster.....	48
7.1.3. Καθάρισμα Pixel.....	49
7.1.4. Εξαγωγή δεδομένων.	50
7.2 Διαδικασία SNAP.....	50
7.2.1. Resampling	50
7.2.2. Εξαγωγή δεδομένων.	50

Περίληψη

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους δορυφόρους Sentinel 2 (A και B) με τα οποία κατασκευάστηκαν χρονοσειρές δύο δεικτών βλάστησης, των NDVI και EVI, σε 26 συνολικά χωράφια του κάμπου της Θεσσαλίας, για δύο χρονιές 2017-2018 και 2018-2019. Τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών συσχετίστηκαν με την τελική παραγωγή, με στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης και πρόβλεψής της.

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.

Τα αποτελέσματα που έδωσε η έρευνα αυτή ήταν αρκετά ικανοποιητικά με τις καλύτερες συσχετίσεις και για τους δύο δείκτες να εμφανίζονται στα ολοκληρώματα των διαστημάτων από 25 Μαρτίου μέχρι την συγκομιδή και για το εικοσαήμερο 11 - 30 Απριλίου, με ελαφρά υπεροχή του EVI έναντι του NDVI. Επίσης, πολύ καλές συσχετίσεις με την τελική παραγωγή έδωσαν και οι δύο δείκτες στις 29 Απριλίου.

Για περεταίρω βελτίωση των αποτελεσμάτων εξετάστηκε η επίδραση της ποιότητας του εδάφους μέσω της ανακλαστικότητας στα 2190 nm, με τα αποτελέσματα όμως να μην βελτιώνονται αισθητά.

Keywords: σκληρό σιτάρι, παραγωγή, Sentinel-2, τηλεπισκόπηση, NDVI, EVI.

1. Εισαγωγή

1.1. Αξία σιταριού

Μια από τις πιο διαδεδομένες καλλιέργειες σε ολόκληρο τον κόσμο είναι η καλλιέργεια του σιταριού καθώς είναι πολύ σημαντικό για την διατροφή του ανθρώπου και καταλαμβάνει έκταση περίπου 219 εκατομμυρίων εκταρίων στον πλανήτη (Rojo et al. 2017). Από το σιτάρι παράγονται άλευρα και ζυμαρικά, τα οποία αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι της βιομηχανίας τροφίμων λόγω της κατανάλωσης τους. Η τελική παραγωγή της καλλιέργειας επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, με το ποιο ευαίσθητο στάδιο να είναι το στάδιο γεμίσματος του σπόρου (Diacono et al. 2012). Λόγω λοιπόν της σημαντικότητας που έχει αυτή η καλλιέργεια, καλό θα ήταν να μπορεί να γίνει πρόβλεψη της παραγωγής που θα πάρει ο παραγωγός με την συγκομιδή στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, όσο το δυνατόν πιο νωρίς για να γνωρίζει και η βιομηχανία πως να κινηθεί.

1.2. Μοντέλα πρόβλεψης παραγωγής

Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που μπορούν να κάνουν εκτίμηση της τελικής απόδοσης μιας καλλιέργειας. Κάποια από αυτά τα μοντέλα είναι τα Crop Environment Resource Synthesis models (CERES) (Ritchie and Otter 1985), World Food Studies model (WOFOST), (Vandiepen et al., 1989), και Cropping Systems Simulation Model (CropSyst), (Van Evert and Campbell 1994). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια, πάνω από τριάντα και πλέον, με επιτυχία ανά τον κόσμο για διάφορες καλλιέργειες όπως ρύζι, καλαμπόκι, σιτάρι, κ.α. (Basso et al. 2016) όμως προκύπτουν διάφορα προβλήματα λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας που προκύπτει από περιοχή σε περιοχή και από κλίμα σε κλίμα (Jones et al. 1998). Για παράδειγμα, μοντέλα όπως τα Sirius (Jamieson et al. 1998), SUCROS2 (van Laar et al. 19992), STICS (Brisson et al. 2003) είναι αποτελεσματικά μόνο σε τοπικό επίπεδο λόγω του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που απαιτούν, οι οποίες σχετίζονται με το περιβάλλον της καλλιέργειας (Battude et al. 2016). Ακόμη ένα σημαντικό μειονέκτημα και ίσως το κυριότερο πρόβλημα αυτών των μοντέλων είναι ο τεράστιος όγκος δεδομένων που απαιτούν ώστε να δώσουν μια ακριβή πρόβλεψη. Τέτοια δεδομένα μπορεί να είναι διάφορες ημερομηνίες με βάση τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (π.χ. ημερομηνία σποράς, έκπτυξης, άνθισης κ.α.), μετεωρολογικά δεδομένα, (βροχόπτωση, θερμοκρασίες, κ.α.), καθώς και διάφορες καλλιεργητικές πρακτικές όπως είναι η άρδευση, η λίπανση, η κατεργασία του εδάφους κ.α. (Basso et al. 2016). Οι Johnen et al. 2013 βάσισαν το μοντέλο τους σε δεδομένα εδάφους και πιο συγκεκριμένα στα αποθέματα νερού του

εδάφους καθώς και το βαθμό διάβρωσης του, την ταχύτητα ανέμου και την μέση ημερήσια θερμοκρασία. Ακόμη συμπεριέλαβαν και την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR-Photosynthetic Active Radiation) δίνοντας την δυνατότητα στο μοντέλο να κάνει μια εκτίμηση της τελικής παραγωγής σε ποσοστό 60% περίπου. Επίσης ένα άλλο μοντέλο χρησιμοποιεί ως παραμέτρους την αποτελεσματικότητα χρήσης νερού η οποία είναι η ποσότητα άνθρακα ανά μονάδα νερού που καταναλώνεται από το φυτό (Beer et al. 2009). Όλα τα προηγούμενα μοντέλα βασίζονται σε δεδομένα τα οποία έχουν συλλεχθεί με κάποιο όργανο ή υπολογίζονται βάση εξισώσεων που έχουν ως παραμέτρους τους κάποια χαρακτηριστικά του φυτού. Υπάρχουν όμως και μοντέλα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά δορυφορικά δεδομένα ή και συνδυασμό δορυφορικών και μη. Κάποια μοντέλα βέβαια όπως το Sirius έχουν παραμέτρους, όπως η PAR, που μπορεί να μετρηθούν και με δορυφόρο. Άλλα μοντέλα επίσης, με πολύ καλά αποτελέσματα στην εκτίμηση παραγωγής, είναι τα Counter-propagation Artificial Neural Network (CPANN), Supervised Kohonen Network (SKN) και XY-fusion network (XYF), τα οποία χρησιμοποιούν άλλα δεδομένα, όπως είναι οι δείκτες βλάστησης και στην συγκεκριμένη περίπτωση τον δείκτη NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ο οποίος ποσοτικοποιεί χαρακτηριστικά της βλάστησης αν και στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν παράμετροι του εδάφους (Pantazi et al. 2016). Υπάρχει και μια άλλη κατηγορία η οποία χρησιμοποιεί δορυφορικά δεδομένα αλλά δεν μπορούν να θεωρηθούν επ' ακριβώς μοντέλα λόγω των ελάχιστων παραμέτρων που χρησιμοποιούν. Σε αυτήν ανήκουν μοντέλα όπως τα LUE (Light Use Efficiency). Τέτοια μοντέλα χρησιμοποιούν την PAR για να υπολογίσουν την πρωτογενή παραγωγικότητα ή την τελική παραγωγή καλλιεργειών (Dong et al. 2020, Wang H. 2020). Οι Nagy et al. (2018) χρησιμοποίησαν απλές συσχετίσεις δεικτών βλάστησης με την παραγωγή για να φτιάξουν το μοντέλο τους και κάτι παρόμοιο έγινε και στην εργασία αυτή.

1.3. Αξία τηλεπισκόπησης

Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό για να μπορούν να λειτουργήσουν τα μοντέλα αυτά απαιτείται ένας πολύ μεγάλος όγκος δεδομένων, τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται ετησίως ώστε να μπορεί να γίνει η εκτίμηση της παραγωγής της κάθε χρονιάς. Η συλλογή των δεδομένων που απαιτούν τα διάφορα μοντέλα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.2 μπορεί να γίνει στο χωράφι με κατάλληλα εργαλεία τα οποία μεταφέρονται πάνω σε drones, γεωργικούς ελκυστήρες κ.α. και φυσικά χειροκίνητα, ωστόσο στην εργασία αυτή λόγω των μεγάλων εκτάσεων, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα, ανάλογα το μοντέλο πάντα, πληροφορίες παλαιότερων

ετών από αρχεία υπηρεσιών που συλλέγουν τέτοια δεδομένα για άλλες χρήσεις (Johnen et al. 2014). Πλέον όμως με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της επιστήμης η διαδικασία συλλογής των δεδομένων αυτών (μετεωρολογικά, δεδομένα εδάφους, χαρακτηριστικά των φυτών) έχει γίνει απλούστερη και ευκολότερη με την χρήση των δορυφόρων και την ανάπτυξη της τηλεπισκόπησης. Τηλεπισκόπηση είναι η καταγραφή πληροφοριών από το υπεριώδες, το ορατό, το εγγύς υπέρυθρο και το μικροκυματικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από απόσταση μέσω οργάνων όπως φωτογραφικές μηχανές, σαρωτές, λέιζερ, γραμμικές και χωρικές συστοιχίες εικονοστοιχείων τοποθετημένες σε πλατφόρμες, όπως αεροσκάφη ή δορυφόροι, και η ανάλυση των πληροφοριών που συλλέχθηκαν μέσα από οπτική και ψηφιακή επεξεργασία εικόνων (Jensen 2015). Η τηλεπισκόπηση έχει διάφορες εφαρμογές στο αστικό περιβάλλον, όπως είναι η οριοθέτηση οικισμών και δήμων, η οριοθέτηση των χωραφιών για το κτηματολόγιο κ.α. Η τηλεπισκόπηση έχει βρει διάφορες εφαρμογές και έχει βοηθήσει πολύ στην συλλογή δεδομένων που σχετίζονται και με πολλές πτυχές του περιβάλλοντος που ήταν δύσκολο να παρατηρηθούν, όπως είναι διάφορα φαινόμενα που σχετίζονται με την ρύπανση υδάτινων ή χερσαίων οικοσυστημάτων, τα αποθέματα νερού και πως επηρεάζονται από τις κλιματικές αλλαγές, η χαρτογράφηση οικοσυστημάτων και μελέτη της σημαντικότητάς τους, μελέτη της βιοποικιλότητας κ.α. (Lassalle et al. 2020, Kivinen et al. 2020, Cui et al. 2019, Randin et al. 2020). Η τηλεπισκόπηση συνέβαλε κιάλας στην ευκολότερη μελέτη του κύκλου του άνθρακα (Xiao et al. 2019) καθώς και στην καταγραφή χρήσεων γης. Φυσικά η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα και στην καθαρά αγροτική παραγωγή για διάφορα θέματα όπως είναι η εκτίμηση της παραγωγής, μέτρηση απορρόφησης αζώτου από τα φυτά, ρυθμός ανάπτυξης κ.α.. Υπάρχουν διάφορες πλατφόρμες πλέον με ποικίλα όργανα τα οποία συλλέγουν δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν για οποιοδήποτε από τους παραπάνω λόγους.

1.4. Δείκτες Βλάστησης

Ένα πολύ σημαντικό για την τηλεπισκόπηση χαρακτηριστικό της βλάστησης είναι η ιδιότητα που έχουν τα φυτά να ανακλούν διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος, ανάλογα και με το στάδιο ανάπτυξης τους. Οι δείκτες βλάστησης είναι αδιάστατες ραδιομετρικές μετρήσεις που ποσοτικοποιούν παραμέτρους της βλάστησης σχετικές με τη βιομάζα και/ή την λειτουργική κατάσταση και σε αυτές περιλαμβάνονται ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI), το ποσοστό φυτικής κάλυψης, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η πράσινη βιομάζα και απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Absorbed Photosynthetic Active Radiation, APAR) (Jensen 2015).

Ένας καλός δείκτης βλάστησης θα πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευαίσθητος στις διάφορες βιοφυσικές παραμέτρους που σχετίζονται με τα φυτά και φυσικά να σχετίζεται άμεσα με κάποια από αυτές 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). Οι δείκτες βλάστησης λειτουργούν χρησιμοποιώντας κανάλια ως σήμα και ως reference. Για παράδειγμα οι NDVI και EVI χρησιμοποιούν ως σήμα το κόκκινο και ως reference το εγγύς υπέρυθρο. Αυτό σημαίνει ότι ένα υγιές και πράσινο φυτό ανακλά πολύ στο πράσινο και στο υπέρυθρο και απορροφά πολύ στο κόκκινο και στο μπλε. Άρα μετρώντας χαμηλές τιμές στα δύο αυτά κανάλια σημαίνει ότι το φυτό είναι πολύ πράσινο και αντίστροφα. Οι δείκτες βλάστησης χρησιμοποιούνται για να δώσουν πολλές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση μιας καλλιέργειας σε μεγάλη κλίμακα αλλά και σε επίπεδο αγρού. Μπορούν να εκτιμήσουν αν τα φυτά μας υποφέρουν από υδατικό στρες, αν υπάρχει έλλειψη σε κάποιο θρεπτικό στοιχείο, και να συσχετιστούν με την τελική παραγωγή. Ακόμη είναι δυνατόν να γίνει έγκαιρη αναγνώριση κάποιου προβλήματος στο χωράφι, όπως κάποια ασθένεια ή ένας εχθρός και να ληφθούν μέτρα για να μην γίνει εξάπλωσή του. Ως πρώτος δείκτης βλάστησης σύμφωνα με τον Cohen (1991) μπορεί να θεωρηθεί ο απλός λόγος (SR-Simple Ratio), ο οποίος χρησιμοποιεί την ανακλώμενη ακτινοβολία από δυο περιοχές του φάσματος, το κόκκινο και το κοντινό υπέρυθρο (Birth and Mcvey 1968). Στην συνέχεια οι Rouse et al. (1974) με βάση τον SR ανέπτυξαν τον Δείκτη Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς NDVI, ο οποίος αποτελεί πλέον έναν από τους πιο πολυχρησιμοποιημένους δείκτες βλάστησης με εφαρμογές σε πολλές και διαφορετικές έρευνες. Ο NDVI χρησιμοποιεί ακτινοβολία από τις ίδιες περιοχές του φάσματος του SR, με διαφορετικό τρόπο όμως δίνοντας έτσι την δυνατότητα παρακολούθησης είτε ετήσιων είτε εποχικών μεταβολών της βλάστησης των φυτών καθώς και την μείωση θορύβων που προκύπτουν από διάφορους παράγοντες της ατμόσφαιρας και όχι μόνο (Huete et al. 2002b). Προκύπτουν όμως και διάφορα προβλήματα από τον δείκτη αυτό, με τα κυριότερα να είναι ο κορεσμός του σε υψηλές τιμές του LAI και το γεγονός ότι είναι ευαίσθητος σε διάφορους θορύβους όπως η επίδραση του εδάφους (Huete et al. 2002a, Wang et al. 2005). Λόγω των προβλημάτων αυτών έγινε προσπάθεια βελτίωσης του εισάγοντας στην εξίσωση του NDVI παραμέτρους που εξισορροπούσαν τους θορύβους του υποβάθρου με αποτέλεσμα να προκύψει ο Εδαφικά Προσαρμοσμένος Δείκτης Εδάφους (SAVI-Soil Adjusted Vegetation Index) (Huete and Liu 1994). Με παρόμοιο τρόπο και με την χρήση παραμέτρων που διόρθωναν ατμοσφαιρικούς θορύβους προέκυψε ο Ανθεκτικός στην Ατμόσφαιρα Δείκτης Βλάστησής (ARVI-Atmospherically Resistant Vegetation Index)

(Huete and Liu 1994), ενώ με συνδυασμό των δύο παραπάνω δεικτών σχηματίστηκε ο (SARVI-Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index) ο οποίος είναι δείκτης βλάστησης ανθεκτικός σε εδαφικούς και ατμοσφαιρικούς θορύβους (Huete and Liu 1994). Από την ομάδα MODIS Land Discipline Group δημιουργήθηκε ο Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης (EVI-Enhanced Vegetation Index), ο οποίος αποτελεί παράγωγο του NDVI καθώς στην εξίσωση του εισάγεται το μπλε κανάλι και κάποιες ακόμη παράμετροι με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο εύκολος ο κορεσμός του EVI στις υψηλές τιμές του LAI και να μειώνονται πολλά προβλήματα ατμοσφαιρικού και εδαφικού θορύβου (Huete et al. 2002a). Ακόμη υπάρχουν και οι δείκτες νερού οι οποίοι μπορούν μας δείξουν την υδατική κατάσταση ενός φυτού.

1.5. Landsat

Με την εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου του προγράμματος Landsat το 1972 από την NASA ήταν πλέον δυνατή η συλλογή και αξιοποίηση πληροφοριών σχετικά με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης παραγωγής. Ο Landsat με χαρακτηριστικά 16 ημέρες χρονική ανάλυση, πλάτος 185 km, 11 φασματικά κανάλια και χωρική ανάλυση 30 m, αποτέλεσε σημαντικό όργανο στην τηλεπισκόπηση, καθώς τα δεδομένα του χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορα πειράματα ανά τα έτη (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-1/>). Οι Rudorff et al. (1991) προσπάθησαν να κάνουν εκτίμηση της παραγωγής σε επίπεδο αγρού, στο Σάο Πάολο με χρήση δεδομένων από το όργανο TM-Landsat (Thematic Mapper-Landsat) σε συνδυασμό με αγρομετεωρολογικά δεδομένα, για δύο χρονιές 1986 και 1987, σε 125 και 127 αγρούς αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο χρησιμοποιεί την θερμοκρασία σε συνδυασμό με την ανακλαστικότητα των καλλιεργειών η οποία μετατρέπεται στον δείκτη βλάστησης RVI (Ratio Vegetation Index), και θεωρώντας πάντα ότι οι συνθήκες στον αγρό ήταν οι ιδανικές για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Στην εργασία αυτή όμως χρησιμοποιήθηκαν μόνο τρεις ημερομηνίες για το 1986 και δύο για το 1987 με εικόνες χωρίς σύννεφα. Η έρευνα έδειξε ότι η υψηλή χωρική ανάλυση του TM-Landsat ήταν ικανή να ξεχωρίσει την διακύμανση της ανακλαστικότητας και σε επίπεδο μικρών αγρών. Σε άλλες έρευνες έγινε προσπάθεια εκτίμησης της τελικής παραγωγής μέσω της απλής συσχέτισης του δείκτη βλάστησης NDVI με την τελική παραγωγή σε επίπεδο αγρού πάλι (Lyle et al. 2013), ενώ οι Satir and Berberoglu (2016) προσπάθησαν να κάνουν εκτίμηση της παραγωγής με παρόμοιο με τους προηγούμενους τρόπο χρησιμοποιώντας επτά διαφορετικούς δείκτες βλάστησης, σε εδάφη όμως τα οποία υπέφεραν από αλατότητα, και πως αυτά σχετίζονται με απώλειες στην τελική παραγωγή. Εφάρμοσαν την έρευνα τους σε διάφορες καλλιέργειες όπως

καλαμπόκι, βαμβάκι και σιτάρι και οι NDVI και NDWI έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την εκτίμηση στην παραγωγή. Το καλαμπόκι φάνηκε να είναι το πιο ευαίσθητο στην αλατότητα του εδάφους καθώς είχε απώλειες της τελικής παραγωγής πάνω από 55% ενώ το βαμβάκι μόνο 15%. Παράλληλα όμως με αυτό χρησιμοποιήσαν τα δεδομένα τους για να κάνουν χαρτογράφηση των καλλιεργειών της υπό μελέτη περιοχής καθώς και χάρτες της αλατότητας του εδάφους. Οι Prey και Schmidhalter (2019) χρησιμοποίησαν δεδομένα του Landsat, τα οποία μεταφράστηκαν πάλι σε δείκτες βλάστησης, πρώτον για εκτίμηση της τελικής παραγωγής και δεύτερον για να υπολογιστεί το άζωτο που απορροφούν από το έδαφος φυτά καλλιέργειας χειμερινού σίτου με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Οι Lai et al. (2018) εκτέλεσαν παρόμοια με την παρών μελέτη χρησιμοποιώντας τον δείκτη NDVI και πιο συγκεκριμένα ολοκληρώματα του, και 60 χάρτες παραγωγής από το 2001 έως το 2016 σε 17 αγρούς με σιτάρι σε Αυστραλία και Ουαλία.

1.6. NOAA-AVHRR

Το Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) είναι ένα φασματοραδιόμετρο το οποίο έχει 4-6 φασματικά κανάλια, ανάλογα το μοντέλο, που μετράνε την ακτινοβολία στο ορατό, στο κοντινό και στο θερμικό υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και έχει χωρική ανάλυση 1 km. Έχει πλάτος σάρωσης 2900 km και χρονική ανάλυση μία ημέρα. Το πρώτο AVHRR εκτοξεύτηκε με το πρόγραμμα National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) στους δορυφόρους Polar Orbiting Environmental Satellites (POES), το 1978 (USGS) https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-advanced-very-high-resolution-radiometer-avhrr-sensor?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects). Η βασική διαφορά που υπάρχει σε σχέση με τον Landsat είναι η χαμηλή χωρική ανάλυση που έχει το NOAA-AVHRR. Ο Prince (1991) έκανε έρευνα με ένα ήδη υπάρχον μοντέλο για εκτίμηση της πρωτογενούς παραγωγής για να διαπιστώσει κατά πόσο είναι δυνατόν να πάρει το ίδιο ποσοστό ακρίβειας εκτίμησης χρησιμοποιώντας μεγάλο μεγέθους pixels. Το μοντέλο στο οποίο βασίστηκε για να δημιουργήσει το δικό του, έκανε εκτίμηση της πρωτογενούς παραγωγής με χρήση της φωτοσυνθετικά ενεργής απορροφόμενης ακτινοβολίας (APAR) από το φυτό. Όμως οι Kumar και Monteith (1982) έδειξαν σε έρευνα τους ότι η APAR έχει γραμμική συσχέτιση με τους δείκτες βλάστησης NDVI και Simple Ratio (SR) και έτσι ανέπτυξε ένα μοντέλο που συσχετίζει τις δύο παραμέτρους αυτές για να εκτιμήσει την πρωτογενή παραγωγή. Το NOAA-AVHRR βρήκε αργότερα κι άλλες εφαρμογές καθώς οι Hayes και Decker (1996), το χρησιμοποίησαν για

να κάνουν εκτίμηση της παραγωγής στις Ηνωμένες Πολιτείες σε καλλιέργειες καλαμποκιού ενώ οι Salazar et al. (2007) σε πείραμα τους συσχέτισαν τις πληροφορίες του οργάνου με διάφορους δείκτες βλάστησης και δείκτες θερμοκρασίας για να κάνουν εκτίμηση της παραγωγής σε καλλιέργειες χειμερινού σιταριού. Στην Ιταλία οι Moriondo et al., (2007) εκτέλεσαν παρόμοια έρευνα πάλι σε καλλιέργεια σιταριού με την χρήση του NDVI που υπολογίστηκε από το φασματικά δεδομένα του φασματοραδιόμετρου.

1.7. MODIS

Ένα ακόμη πολύ χρήσιμο όργανο είναι και το Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) το οποίο φέρεται πάνω σε δύο δορυφόρους τους Terra (EOS AM) και Aqua (EOS PM) με χαρακτηριστικά χρονικής ανάλυσης 1-3 μερών, πλάτος σάρωσης 2330km, χωρική ανάλυση 1km (500m και 250m) καθώς και 36 φασματικά κανάλια (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>). Και ο MODIS έχει βρει διάφορες εφαρμογές σε μελέτες που σχετίζονται με την χρήση δεικτών βλάστησης για εκτίμηση της τελικής παραγωγής. Στον ποταμό Τίζα έγινε προσπάθεια εκτίμησης της τελικής παραγωγής σε καλλιέργειες σιταριού και καλαμποκιού με την χρήση χρονοσειρών του NDVI και στατιστικά της παραγωγής ώστε να γίνει και επαλήθευση (Nagy et al. 2018), ενώ στα λιβάδια του Καναδά οι Johnson et al. (2016) χρησιμοποίησαν δεδομένα του Modis για τον EVI και πληροφορίες από το NOAA-AVHRR για τον NDVI ώστε να κάνουν εκτίμηση της παραγωγής σε διάφορες καλλιέργειες όπως κριθάρι, ελαιοκράμβη και ανοιξιάτικο σιτάρι. Οι Huete et al. (2002a) έκαναν αξιολόγηση της διαθεσιμότητας εικόνων ικανών να δώσουν πληροφορίες για τους δείκτες NDVI και EVI, των πρώτων δώδεκα μηνών. Ακόμη για την επαλήθευση τους τα σύγκριναν με δεδομένα που λήφθηκαν από άλλους δορυφόρους όπως ο Landsat και NOAA-AVHRR. Στο Μπουένος Άιρες της Αργεντινής οι Lorpesti et al. (2015) εκτέλεσαν παρόμοια έρευνα με τον NDVI από το Modis για εκτίμηση της παραγωγής σε καλλιέργεια σιταριού. Επίσης δεδομένα του χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή μοντέλου πρόβλεψης παραγωγής για χειμερινό σιτάρι σε Κάνσας και Ουκρανία (Becker-Reshef, et al. 2010). Οι Huete et al. (2002a) διεξήγαγαν έρευνα ώστε να αξιολογήσουν πως συμπεριφέρονται οι δείκτες βλάστησης του.

1.8. Sentinel-2

Ένα νέο ζεύγος δορυφόρων αποτελούν οι Sentinel-2 (A και B) που μπορεί να αποδειχθούν πολύ χρήσιμοι λόγω των ευνοϊκών χαρακτηριστικών τους. Πιο συγκεκριμένα έχουν μια μέτρια χρονική ανάλυση δέκα ημερών αλλά επειδή είναι ζεύγος ουσιαστικά

γίνεται πέντε, πλάτος σάρωσης 290 km και χωρική ανάλυση στα 60 m, 30 m και 10 m και δεκατρία φασματικά κανάλια (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>). Ένα ακόμη πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που έχει όπως και οι προηγούμενοι δορυφόροι φυσικά, είναι ότι τα δεδομένα του είναι δωρεάν και ανοιχτά για το κοινό. Εικόνες του Sentinel-2 έχουν χρησιμοποιηθεί και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σε έρευνες όπως ήταν ένα μοντέλο για την επιφανειακή υγρασία του εδάφους (Sadeghi et al. 2017), η κατασκευή ενός μοντέλου που σχετίζονταν με τα χαρακτηριστικά της κόμης του φυτού στα διάφορα στάδια ανάπτυξής του (Gara et al. 2019), την παρακολούθηση της απορρόφησης του εδαφικού αζώτου από τα φυτά και φυσικά μελέτες για εκτίμηση της παραγωγής σε καλλιέργειες σιταριού με βάση δείκτες βλάστησης (Prey and Schmidhalter 2019). Οι Ανατολίτης κ.α. (2019) χρησιμοποίησαν εικόνες του δορυφόρου για να κατασκευάσουν χρονοσειρές τριών δεικτών βλάστησης και προσπάθησαν να κάνουν εκτίμηση της τελικής παραγωγής σε καλλιέργεια σιταριού.

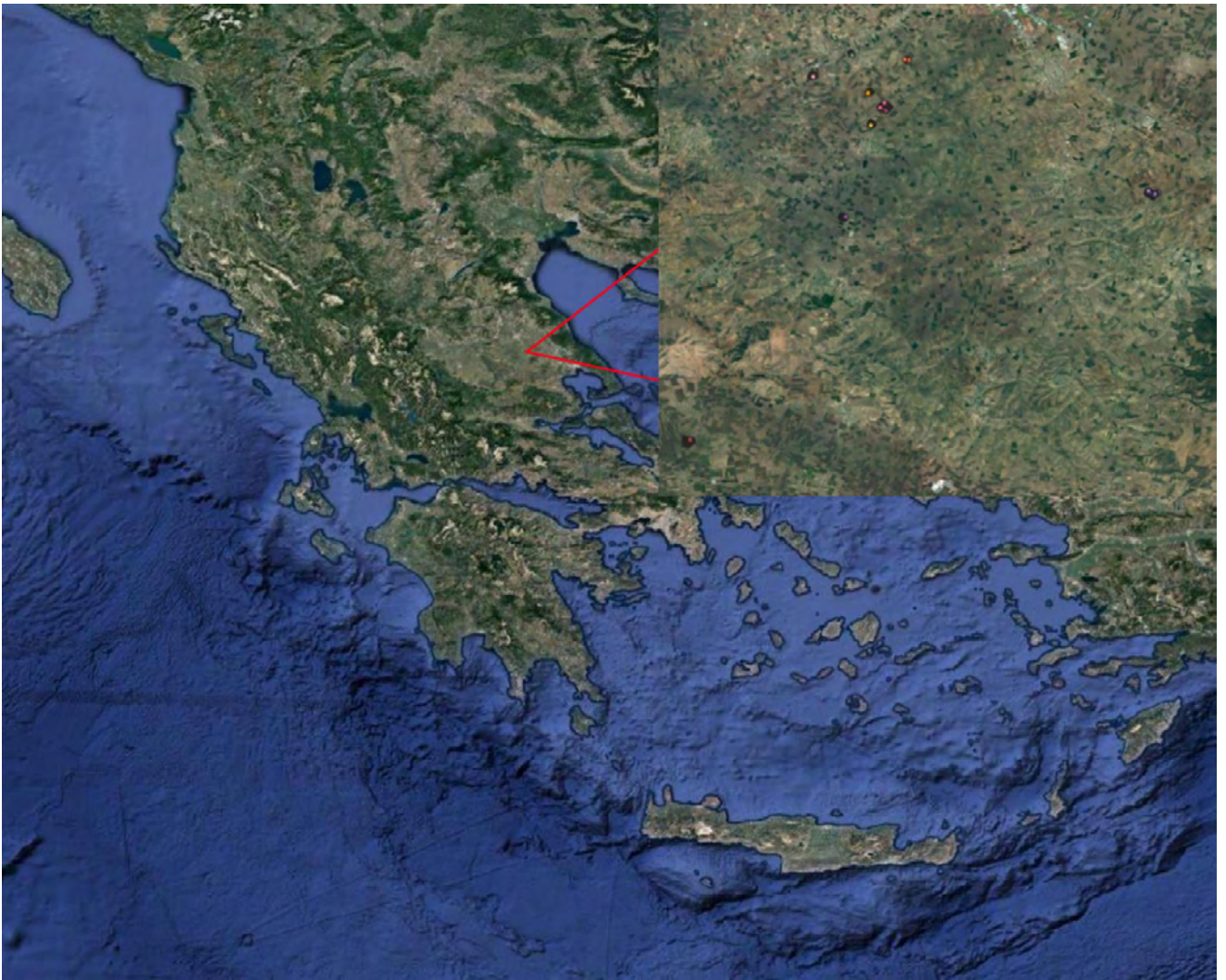
1.9. Σκοπός

Σκοπός αυτής της έρευνας ήταν η διερεύνηση για το κατά πόσο ήταν εφικτή η χρήση των δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-2 για την εκτίμηση της τελικής παραγωγής σε καλλιέργεια χειμερινού σιταριού μέσω ενός απλούστατου μοντέλου. Η έρευνα έγινε για 26 συνολικά χωράφια, και για δύο καλλιεργητικές περιόδους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο δείκτες βλάστησης, οι NDVI και EVI, καθώς και ένας δείκτης ποιότητας εδάφους, το φασματικό κανάλι B12 του δορυφόρου, ο οποίος συνδυάστηκε με τους δύο παραπάνω δείκτες για να βελτιώσει τα αποτελέσματα.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1. Περιοχή Μελέτης

Η μελέτη έλαβε χώρα σε χωράφια του κάμπου της Θεσσαλίας, στην Ελλάδα, τα οποία καλλιεργήθηκαν με χειμερινό σιτάρι. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για δύο καλλιεργητικές περιόδους 2017-2018 και 2018-2019. Ο αριθμός των χωραφιών ήταν για κάθε περίοδο 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 pixels αντίστοιχα. Για την επιλογή των χωραφιών λήφθηκαν δύο παράμετροι υπ' όψιν. Πρώτον να έχουν συλλεχθεί με ειδική μηχανή η οποία καταγράφει την παραγωγή και δεύτερον τα χωράφια να είναι αρκετά μεγάλης έκτασης ώστε να μπορούν να δώσουν ικανοποιητικό αριθμό pixels. Η καλλιέργεια του χειμερινού σιταριού στον κάμπο της Θεσσαλίας ξεκινάει συνήθως από Νοέμβρη-Δεκέμβρη και η συγκομιδή γίνεται τον Ιούνιο.



Εικόνα 1:Χάρτης Ελλάδας με τα υπό μελέτη χωράφια στο ένθετο πάνω δεξιά.

Πίνακας 1: Τα υπό μελέτη χωράφια και κάποια χαρακτηριστικά τους.

2017-2018	Έκταση, ha	Αριθμός Pixel	Ημερομηνία Συγκομιδής
Farm B	8.4	332	3/6/2018
Farm C	6.7	442	2/6/2018
Farm D	7.9	535	7/6/2018
Farm E	3.8	177	4/6/2018
Farm F	7.5	314	6/6/2018
Farm G	3.2	117	5/6/2018
Farm H	4.7	234	5/6/2018
Farm I	2.6	137	5/6/2018
Farm J	7.8	377	5/6/2018
Farm K	2.5	103	8/6/2018
Farm L	2.1	96	5/6/2018
Farm M	2.6	94	31/5/2018
Farm N	1.1	35	5/6/2018
Farm O	2.9	136	7/6/2018
Farm P	3.7	177	1/6/2018
Farm Q	4.9	275	31/5/2018
Farm R	2.7	126	31/5/2018
Farm S	2.3	147	31/5/2018
Farm T	6.7	480	7/6/2018
Farm U	5.3	327	4/6/2018
Farm V	12.8	655	3/6/2018
2018-2019	Έκταση, ha	Αριθμός Pixel	Ημερομηνία Συγκομιδής
Farm B	5	244	19/6/2019
Farm C	7.8	325	15/6/2019
Farm D	7.9	535	22/6/2019
Farm E	8.4	440	20/6/2019
Farm F	7.5	313	15/6/2019
Farm G	3.2	130	13/6/2019
Farm H	5.1	181	10/6/2019
Farm I	2.1	96	14/6/2019
Farm J	2.6	137	14/6/2019
Farm K	6.05	269	13/6/2019
Farm L	2.5	103	22/6/2019
Farm M	2	79	8/6/2019
Farm N	10.1	484	10/6/2019
Farm O	2.6	94	13/6/2019
Farm P	1.1	46	13/6/2019
Farm Q	2.9	136	19/6/2019
Farm R	3.7	177	13/6/2019
Farm S	7.8	468	14/6/2019
Farm T	5.1	266	12/6/2019
Farm U	2.2	81	20/6/2019
Farm V	8.6	427	13/6/2019

2.2. Δεδομένα παραγωγής.

Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε θεριζοαλωνιστική μηχανή John Deere S660i, η οποία έφερε σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής, και στην συνέχεια με την χρήση του λογισμικού MyJD δημιουργήθηκαν οι χάρτες παραγωγής με χωρική ανάλυση 1.5 x 1 m. Η διαδικασία αυτή γίνεται από την John Deere. Στην συνέχεια λήφθηκαν οι έτοιμοι χάρτες και έγινε περεταίρω επεξεργασία των πρωτογενών χαρτών παραγωγής ώστε να αφαιρεθούν ανωμαλίες που προκύπτουν στην παραγωγή λόγω της κίνησης της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα οι ανωμαλίες αυτές εμφανίζονται στα σημεία έναρξης και λήξης, και στο γεγονός ότι μεσολαβεί ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι να φτάσει ο σπόρος από το φυτό στη μηχανή, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η ταχύτητα καταγραφής του σπόρου από το σύστημα χαρτογράφησης παραγωγής. Για να μπορεί να γίνει σύγκριση των δεδομένων των χαρτών παραγωγής με τα δορυφορικά δεδομένα θα πρέπει και τα δυο να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση. Έτσι, οι υψηλής ανάλυσης χάρτες παραγωγής διαμορφώθηκαν στην ανάλυση των pixel του δορυφόρου Sentinel-2 (10 x 10 m) μέσω επαναδειγματοληψίας (resampling). Ο καθαρισμός των ανωμαλιών στα χωράφια καθώς και το resampling έγιναν με την χρήση του προγράμματος QGIS Geographic Information System.

2.3. Δορυφορικά δεδομένα

Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν 35 και 26 δορυφορικές εικόνες των Sentinel-2 (A και B) για τις αναπτυξιακές περιόδους 2017-2018 και 2018-2019 αντίστοιχα, οι οποίες είχαν όσο το δυνατό λιγότερα σύννεφα και τα χωράφια περιέχονταν σε αυτές. Η λήψη των εικόνων έγινε από το site Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>) το οποίο είναι ανοιχτό για το κοινό με δωρεάν δεδομένα. Τα όργανα του Sentinel-2 δίνουν εικόνες με δεκατρία φασματικά κανάλια, με μεγάλο 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. Οι εικόνες λήφθηκαν 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). Τέλος έπρεπε να γίνει ένα ακόμη βήμα, το resampling των εικόνων στα 10m μέσω του λογισμικού SNAP που κατασκευάστηκε ειδικά για τις εικόνες του Sentinel-2 με την διαδικασία που παρουσιάζεται στο παράρτημα 7.2.



Εικόνα 2 (α) Πρωτογενή δεδομένα παραγωγής (β)Χάρτης παραγωγής μετά από καθαρισμό των περιθωρίων και resampling στα 10m (γ) εικόνα Sentinel-2 για τις 29/4 όπου απεικονίζεται ο NDVI για το αντίστοιχο χωράφι

Πίνακας 2: Κανάλια και μήκη κύματος των δορυφόρων Sentinel-2.

Sentinel 2					
Band	λ centre, nm	Width, nm	λ start	λ end	Spatial Resolution,
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	945	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

2.3.1. Δείκτες βλάστησης

Τα δεδομένα ανακλαστικότητας των δορυφορικών εικόνων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό δύο δεικτών βλάστησης, των NDVI και EVI. 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, το B4 την κόκκινη και το B2 την μπλε περιοχή του φάσματος.

Οι δείκτες βλάστησης υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις:

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

$$EVI = 2.5 \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + 6R_{red} - 7.5R_{blue} + 1}$$

Μετά τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης κατασκευάστηκαν οι χρονοσειρές τους για κάθε χωράφι ξεχωριστά. Τα δεδομένα εξετάστηκαν για την παρουσία σύννεφων μέσω των σχετικών δεικτών ποιότητας που περιλαμβάνονται στις εικόνες, αλλά και οπτικά και οι προβληματικές τιμές αφαιρέθηκαν. Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής και δημιουργήθηκαν χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης με ημερήσιες τιμές από την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου μέχρι το τέλος της. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για να υπολογιστούν τα ολοκληρώματα διάφορων χρονικών διαστημάτων για κάθε καλλιεργητική περίοδο και να συγκριθούν με την τελική παραγωγή.

2.3.2. Δείκτες ποιότητας εδάφους

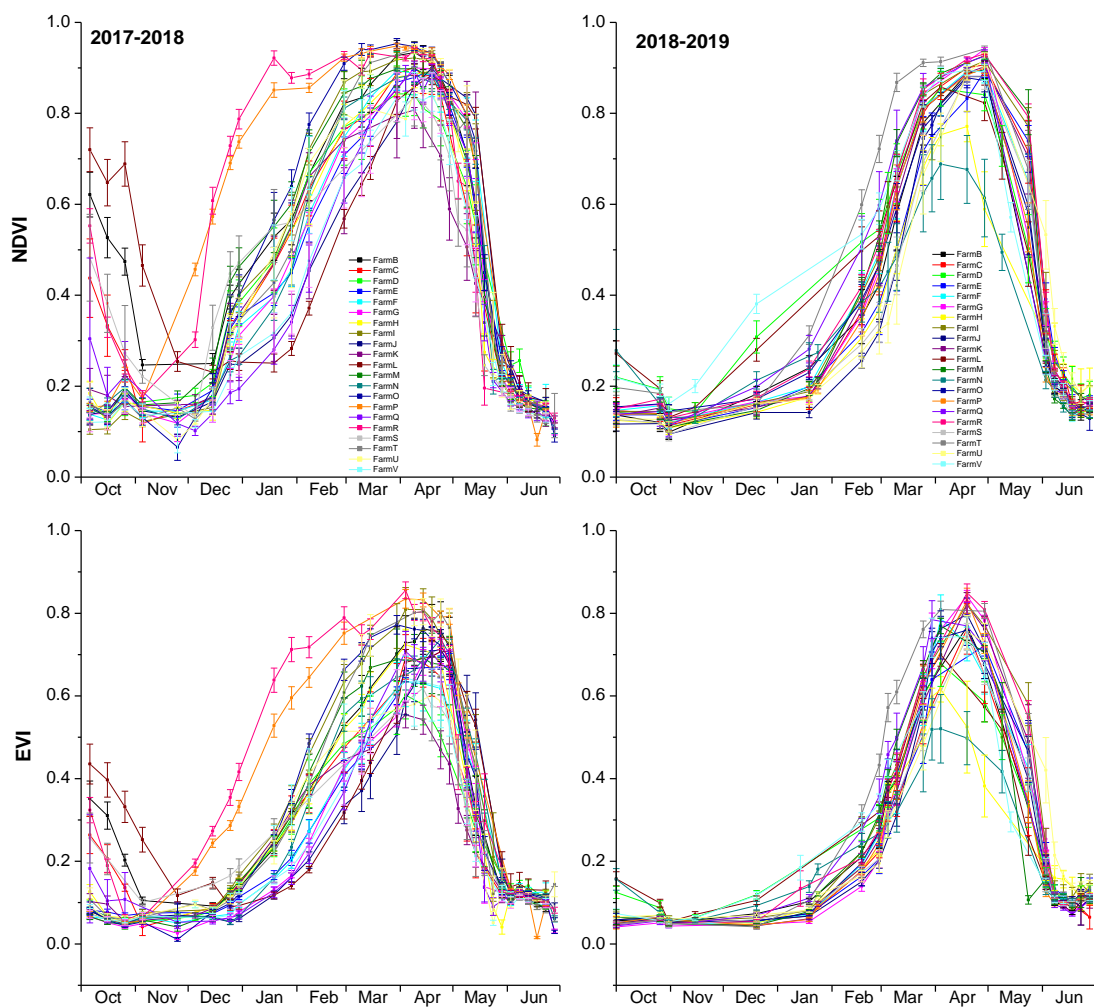
Εκτός από την απ' ευθείας συσχέτιση των δεικτών βλάστησης με την παραγωγή, χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα δεδομένα με στόχο την ενσωμάτωση των επιδράσεων του εδάφους, προς βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης της τελικής παραγωγής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το κανάλι B12, το οποίο έχει μήκος κύματος 2190nm και για τον λόγο αυτό μπορεί να απεικονίσει πολύ καλά το νερό στο φυτό αλλά και στο έδαφος. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιήθηκε μία μόνο ημερομηνία κατά την οποία το έδαφος ήταν γυμνό από βλάστηση (η οποία επιλέχτηκε με βάση τις δορυφορικές εικόνες), ώστε να μην επηρεάζει τις μετρήσεις το νερό των φυτών (Lin Y., et al. 2020). Καθώς οι ιδιότητες του εδάφους δεν μεταβάλλονται εύκολα από χρονιά σε χρονιά, χρησιμοποιήθηκε μια μόνο εικόνα και για τις δύο περιόδους και πιο συγκεκριμένα η εικόνα που λήφθηκε στις 31/10/2018. Οι Meti S., 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. Δεδομένου ότι το κανάλι B12 σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα

με την αγωγιμότητα, υπολογίστηκε το πηλίκο των ολοκληρωμάτων των δεικτών βλάστησης με το κανάλι B12 για τα διαστήματα που υπολογίστηκαν παραπάνω και συσχετίστηκαν πάλι με την τελική παραγωγή, ενσωματώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις επιδράσεις του εδάφους στην εκτίμηση της παραγωγής.

3. Αποτελέσματα

3.1. Χρονοσειρές

Οι χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης φαίνονται να απεικονίζουν ικανοποιητικά την εξέλιξη της καλλιέργειας του χειμερινού σιταριού μέσα στην καλλιεργητική περίοδο (Σχήμα 1). Και οι δυο δείκτες ξεκινούν με πολύ χαμηλές τιμές κατά τα τέλη Οκτωβρίου με αρχές Νοέμβρη, στην περίοδο σποράς δηλαδή, σταδιακά αυξάνονται καθώς αναπτύσσεται η καλλιέργεια, στα τέλη Απριλίου εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους, αφού η καλλιέργεια έχει φτάσει στην κορύφωση της και αμέσως μετά ακολουθούν μία απότομη πτώση, καθώς αρχίζει το «γέμισμα» του σπόρου και το κιτρίνισμα των φυτών.



Σχήμα 1: Χρονοσειρές των χωραφιών για τις δύο αναπτυξιακές περιόδους και για τους δύο δείκτες βλάστησης NDVI και EVI.

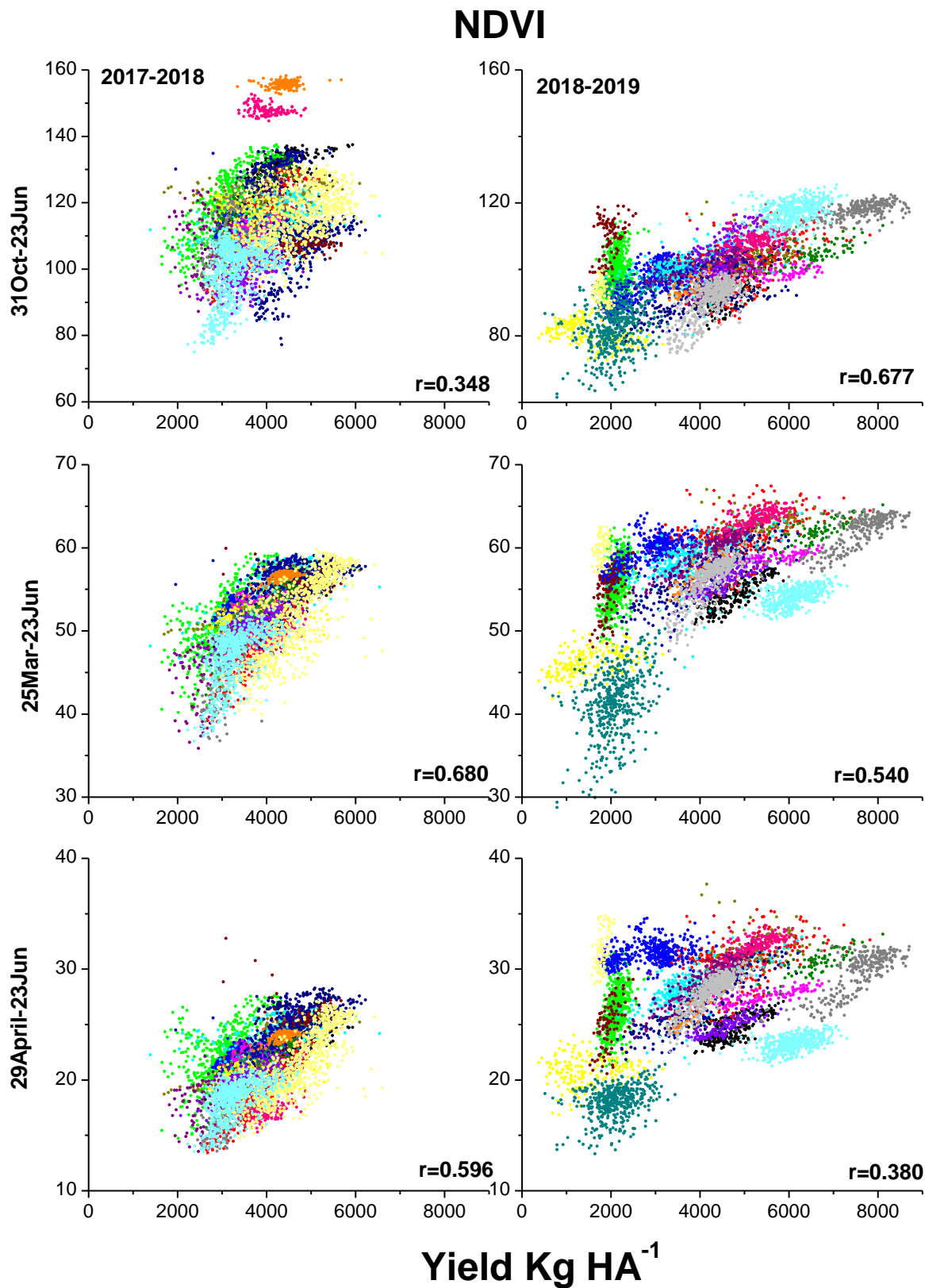
3.2. Εκτίμηση παραγωγής με δείκτες βλάστησης

Το σιτάρι, μετά την ανθοφορία δίνει σχεδόν όλα τα φωτοσυνθετικά του προϊόντα στον καρπό (Cossani et al. 2009, Diacono et al. 2012). Συνεπώς, το διάστημα αυτό είναι το πιο κρίσιμο και πιθανότερο να δώσει καλύτερες συσχετίσεις μεταξύ δεικτών βλάστησης και τελικής παραγωγής. Για τον έλεγχο της υπόθεσης αυτής, υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των δεικτών βλάστησης για διάφορα διαστήματα της καλλιεργητικής περιόδου και εξετάστηκε η συσχέτισή τους με την τελική παραγωγή. Τα διαστήματα ολοκλήρωσης σταματούσαν στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, μετά την συγκομιδή και στην προκυμμένη περίπτωση στις 23 Ιουνίου. Το πρώτο διάστημα που υπολογίστηκε ήταν από την αρχή της καλλιέργειας δηλαδή 31 Οκτωβρίου, ενώ υπολογίστηκαν επίσης τα διαστήματα από 25 Μάρτιου (πλήρης ανάπτυξη του θόλου) και από 29 Απριλίου (ανθοφορία) μέχρι το τέλος της καλλιέργειας.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, τόσο για τον NDVI (Σχήμα 2) όσο και για τον EVI (Σχήμα 3), η υπόθεση φαίνεται να επαληθεύεται για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018, αλλά όχι για την περίοδο 2018-2019. Κατά την περίοδο 2017-2018 οι συσχετίσεις βελτιώνονται για το διάστημα από 29 Απριλίου έως το τέλος της καλλιέργειας συγκριτικά με το συνολικό διάστημα της καλλιέργειας, ενώ κατά την περίοδο 2018-2019 ισχύει το αντίστροφο. Ωστόσο και για τις δυο περιόδους το διάστημα από 25 Μαρτίου έως το τέλος της καλλιέργειας εμφανίζει υψηλές συσχετίσεις με την τελική παραγωγή.

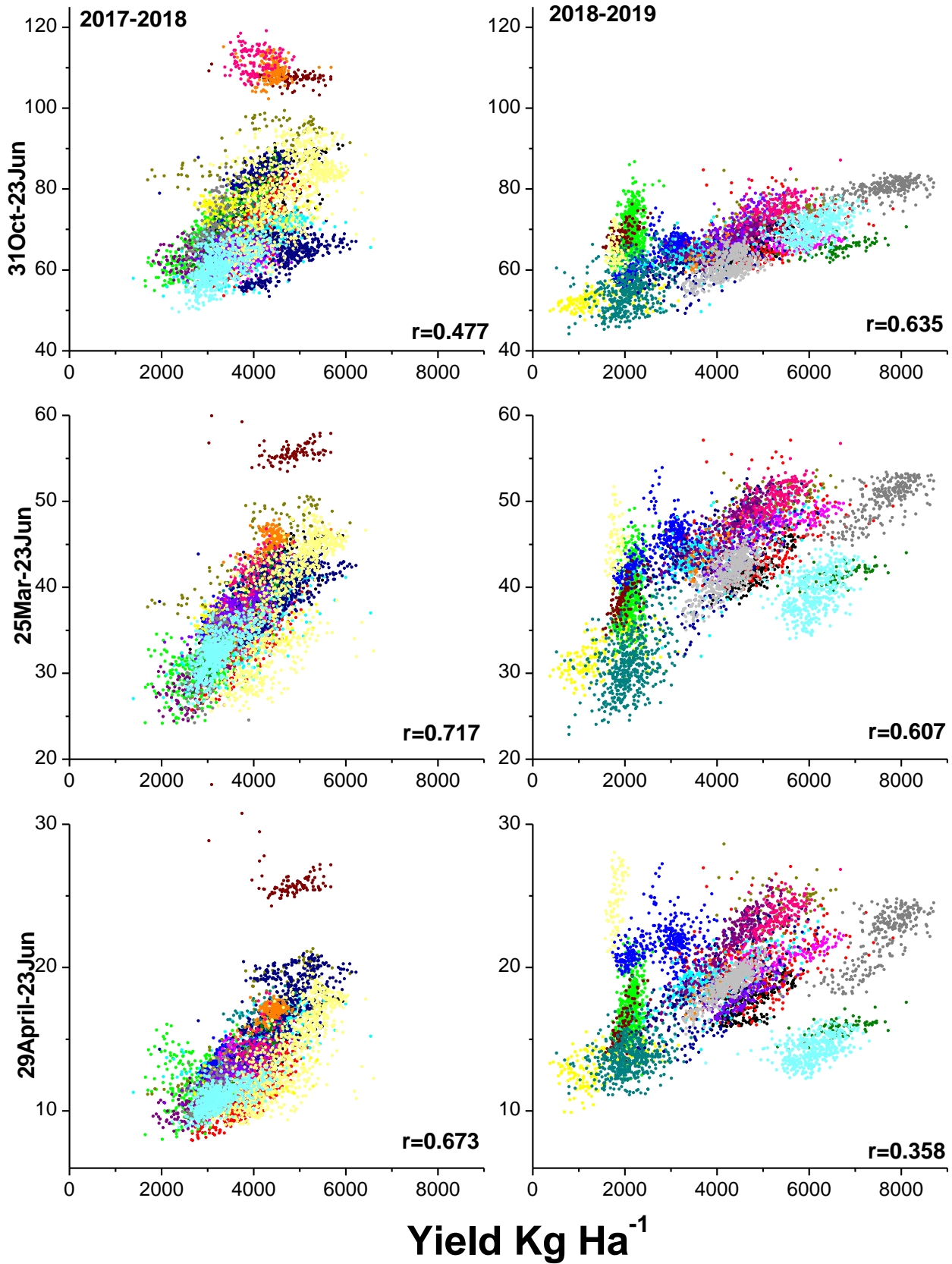
Ακόμη μια υπόθεση ήταν ότι μεταξύ των δύο δεικτών βλάστησης, του NDVI και του EVI, ο EVI αναμενόταν να δίνει καλύτερα αποτελέσματα, λόγω του μικρότερου κορεσμού που έχει στις υψηλές τιμές LAI και των καλύτερων διορθώσεων των περιβαλλοντικών θορύβων. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2 και 3 και αυτή η υπόθεση επαληθεύεται σαφώς για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018, ενώ κατά την περίοδο 2018-2019 οι επιδόσεις των δύο δεικτών είναι παραπλήσιες.

Εκτός από τα ολοκληρώματα των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων έγινε και προσπάθεια συσχέτισης μιας μεμονωμένης ημερομηνίας με την παράγωγή. Η ημερομηνία αυτή επιλέχθηκε βάσει των χρονοσειρών και ήταν η ημερομηνία για την οποία οι καμπύλες εμφανίζουν το μέγιστο στις τιμές των δεικτών. Στην συγκεκριμένη έρευνα η ημερομηνία αυτή ήταν η 29 Απριλίου (Σχήμα 4). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 και στον Πίνακα 3 οι δυο δείκτες και για τις δυο χρονιές εμφανίζουν υψηλές συσχετίσεις με την τελική παραγωγή, καλύτερες ή παραπλήσιες με αυτές που επιτυγχάνονται από τα ολοκληρώματα των διαφορετικών διαστημάτων.

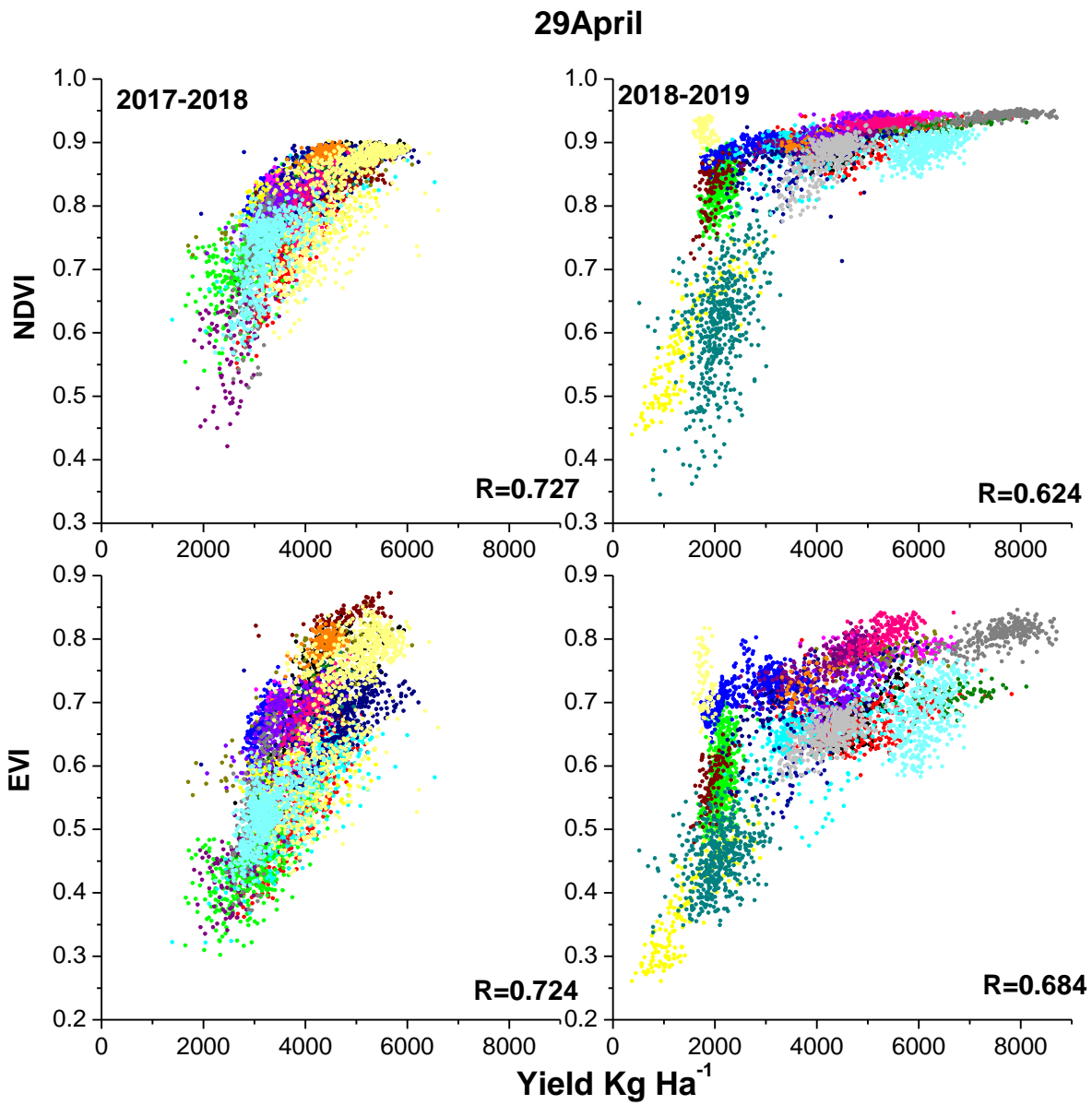


Σχήμα 2: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων NDVI για τρία χρονικά διαστήματα και τελικής παραγωγής για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

EVI



Σχήμα 3: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων EVI για τρία χρονικά διαστήματα και τελικής παραγωγής για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.



Σχήμα 4: Συσχέτιση μεταξύ δεικτών βλάστησης (NDVI και EVI) στις 29 Απριλίου και τελικής παραγωγής για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

Πίνακας 3: Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ολοκληρωμάτων δεικτών βλάστησης (NDVI, EVI) και τελικής παραγωγής για τα διάφορα χρονικά διαστήματα ολοκλήρωσης και για τις δύο αναπτυξιακές περιόδους ξεχωριστά.

Διάστημα	2017-2018		2018-2019		2017-2018		2018-2019	
	NDVI	NDVI/B12	NDVI	NDVI/B12	EVI	EVI/B12	EVI	EVI/B12
31/10 – 23/6	0.348	0.295	0.677	0.643	0.477	0.421	0.635	0.654
25/3 – 23/6	0.680	0.424	0.540	0.635	0.717	0.575	0.607	0.670
29/4 – 23/6	0.596	0.454	0.380	0.584	0.673	0.588	0.358	0.562
29/4	0.727	0.470	0.624	0.664	0.724	0.610	0.684	0.710
11/4 – 30/4	0.704	0.413	0.664	0.656	0.702	0.566	0.724	0.714

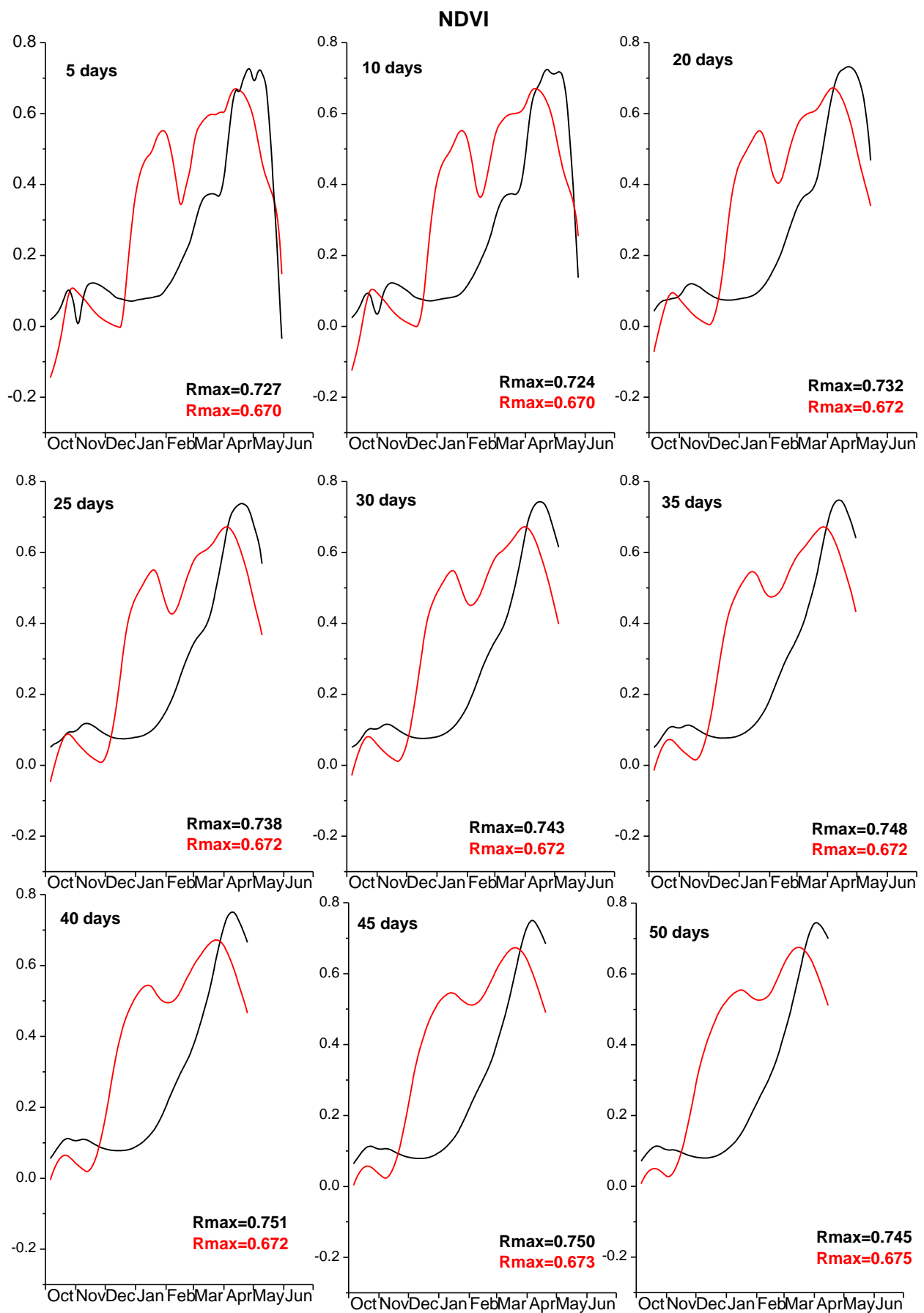
Πίνακας 4: Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ολοκληρωμάτων δεικτών βλάστησης (NDVI, EVI) και τελικής παραγωγής για τα διάφορα χρονικά διαστήματα ολοκλήρωσης και για τις δύο αναπτυξιακές περιόδους μαζί.

Διάστημα	NDVI	NDVI / B12	EVI	EVI / B12
31/10 – 23/6	0.400	0.465	0.410	0.497
25/3 – 23/6	0.541	0.552	0.571	0.608
29/4 – 23/6	0.370	0.495	0.376	0.504
29/4	0.618	0.590	0.663	0.651
11/4 – 30/4	0.663	0.571	0.678	0.651

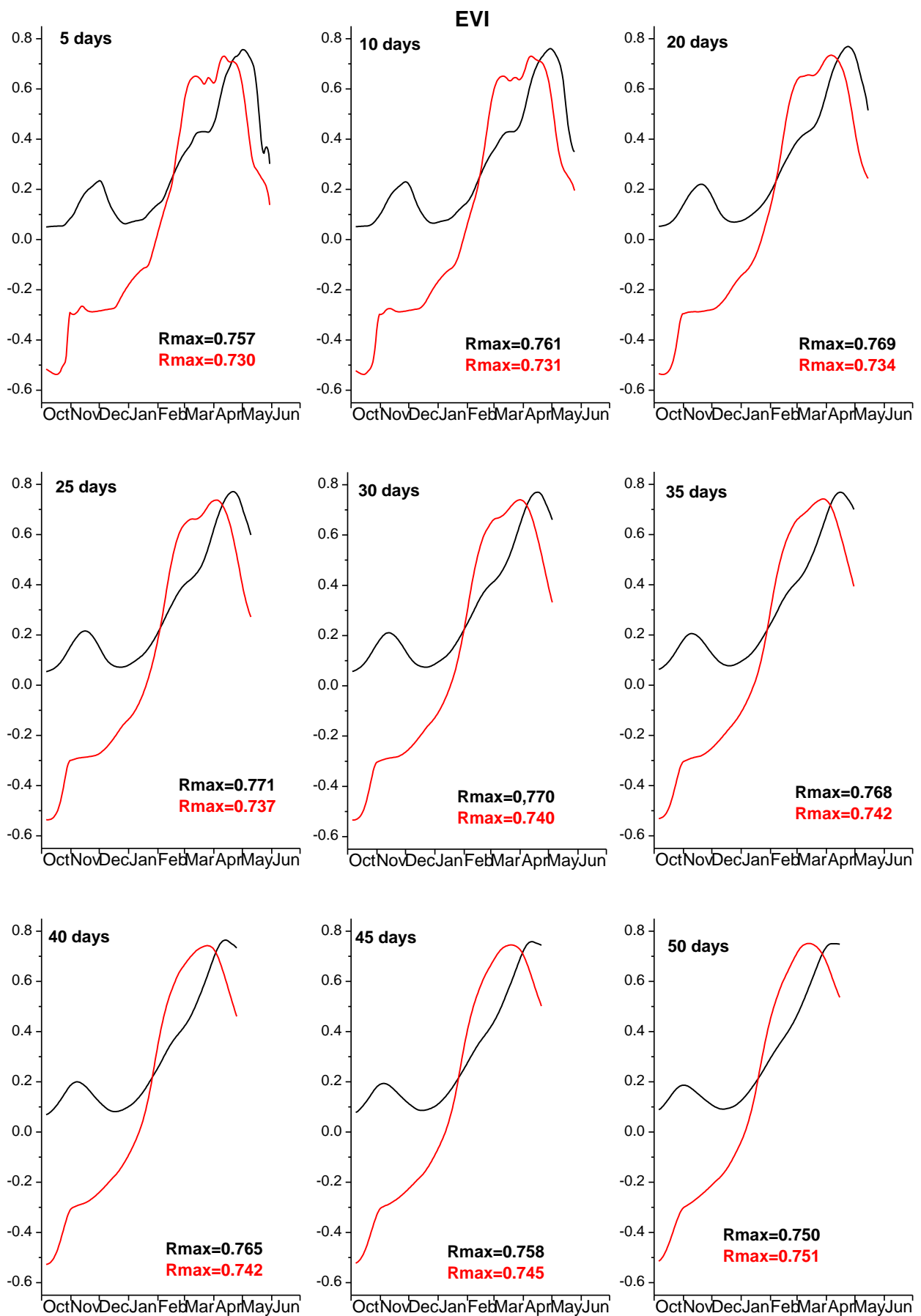
Όπως υποδηλώνουν τα Σχήματα 2 και 3, μεταξύ των δύο καλλιεργητικών περιόδων και των δυο δεικτών βλάστησης δε φαίνεται να υπάρχει κοινό διάστημα ολοκλήρωσης για την βέλτιστη εκτίμηση της τελικής παραγωγής. Έτσι, έγινε μια προσπάθεια να βρεθεί ένα διάστημα ολοκλήρωσης στο οποίο αφενός να εμφανίζονται υψηλές συσχετίσεις και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους και στους δυο δείκτες και αφετέρου το διάστημα αυτό να είναι όσο το δυνατό νωρίτερα στην καλλιεργητική περίοδο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόγνωση της παραγωγής. Για την εύρεση του διαστήματος αυτού υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα 5, 10, 20, 25, 30, 35, 40, 45 και 50 μερών και εξετάστηκε η συσχέτισή τους με την τελική παραγωγή. Τα Σχήματα 5 και 6, παρουσιάζουν τις καμπύλες συσχέτισης για τα διαφορετικά διαστήματα ολοκλήρωσης για τους δύο δείκτες μεταξύ των δυο ετών. Όπως φαίνεται στα Σχήματα αυτά για όλα τα διαστήματα ολοκλήρωσης και για τους δυο δείκτες, η μέγιστη συσχέτιση εμφανίζεται περίπου 20 μέρες νωρίτερα για το 2018-2019 σε σχέση με το 2017-2018, ενώ όλα τα διαστήματα ολοκλήρωσης εμφανίζουν μέγιστες συσχετίσεις κατά τα μέσα με τέλη Απριλίου και μάλιστα παραπλήσιες μεταξύ τους. Έτσι, επιλέχθηκε το 20ήμερο διάστημα ολοκλήρωσης από 11 έως 30 Απριλίου, περίοδος που απέχει περίπου 2 μήνες από την συγκομιδή, ώστε να

μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόγνωση της τελικής παραγωγής, αλλά και επεμβάσεις στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας (Σχήμα 7).

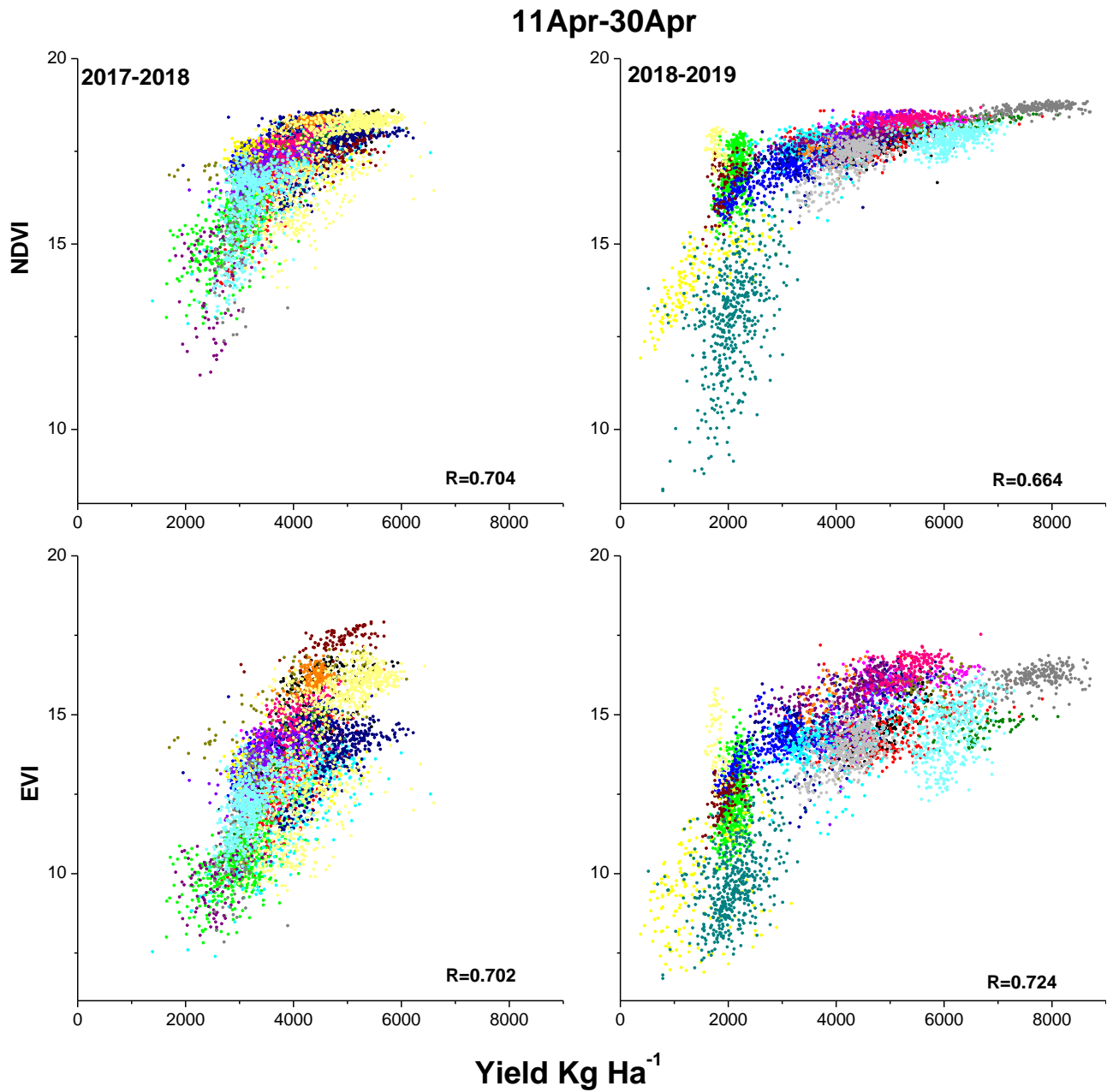
Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο περιόδων μεταξύ τους και συσχέτιση των τιμών με την τελική παραγωγή και για τις δύο χρονιές ταυτόχρονα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 8 και 9 δείχνουν ότι αν και μεμονωμένες οι δύο χρονιές δίνουν παρόμοιες συσχετίσεις, τελικά όταν συνδυαστούν δεν είναι και τόσο αποδοτικές, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο μάλλον δε δουλεύει από χρονιά σε χρονιά. Υπολογίζοντας όμως το 20ήμερο διάστημα που επιλέχθηκε βάση του κοινού τους r , τελικά η συσχέτιση των δύο περιόδων βελτίωσε τα αποτελέσματα κατά πολύ σε σχέση με τα άλλα διαστήματα και μάλιστα ξεπέρασε και το r της μεμονωμένης ημερομηνίας, πράγμα πολύ ενθαρρυντικό.



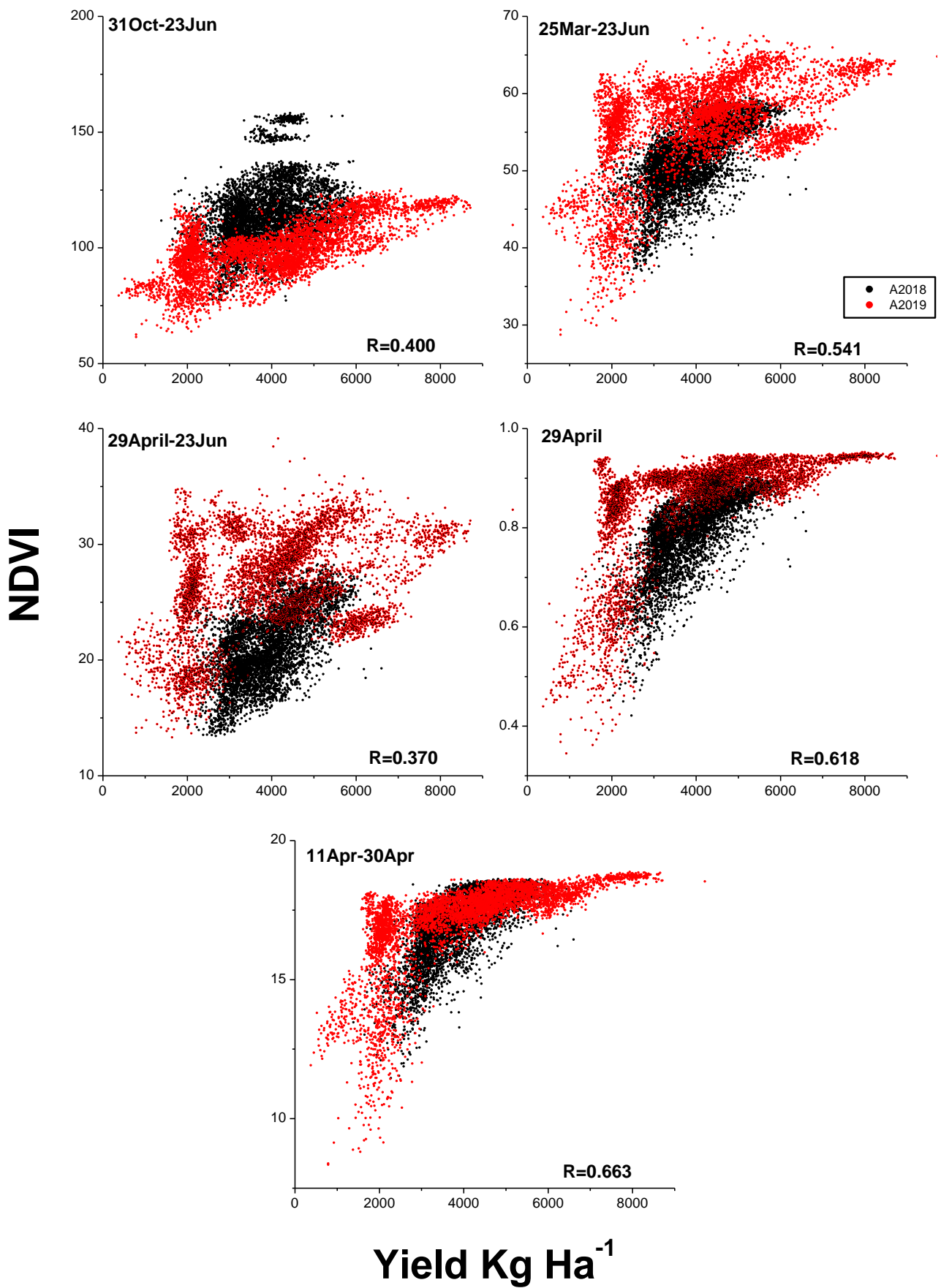
Σχήμα 5: Εποχιακή διακύμανση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ ολοκληρωμάτων NDVI για 5 έως 50 ημέρες και τελικής παραγωγής για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους. Με μαύρο απεικονίζεται η καλλιεργητική περίοδος 2017-2018 ενώ με κόκκινο η περίοδος 2018-2019.



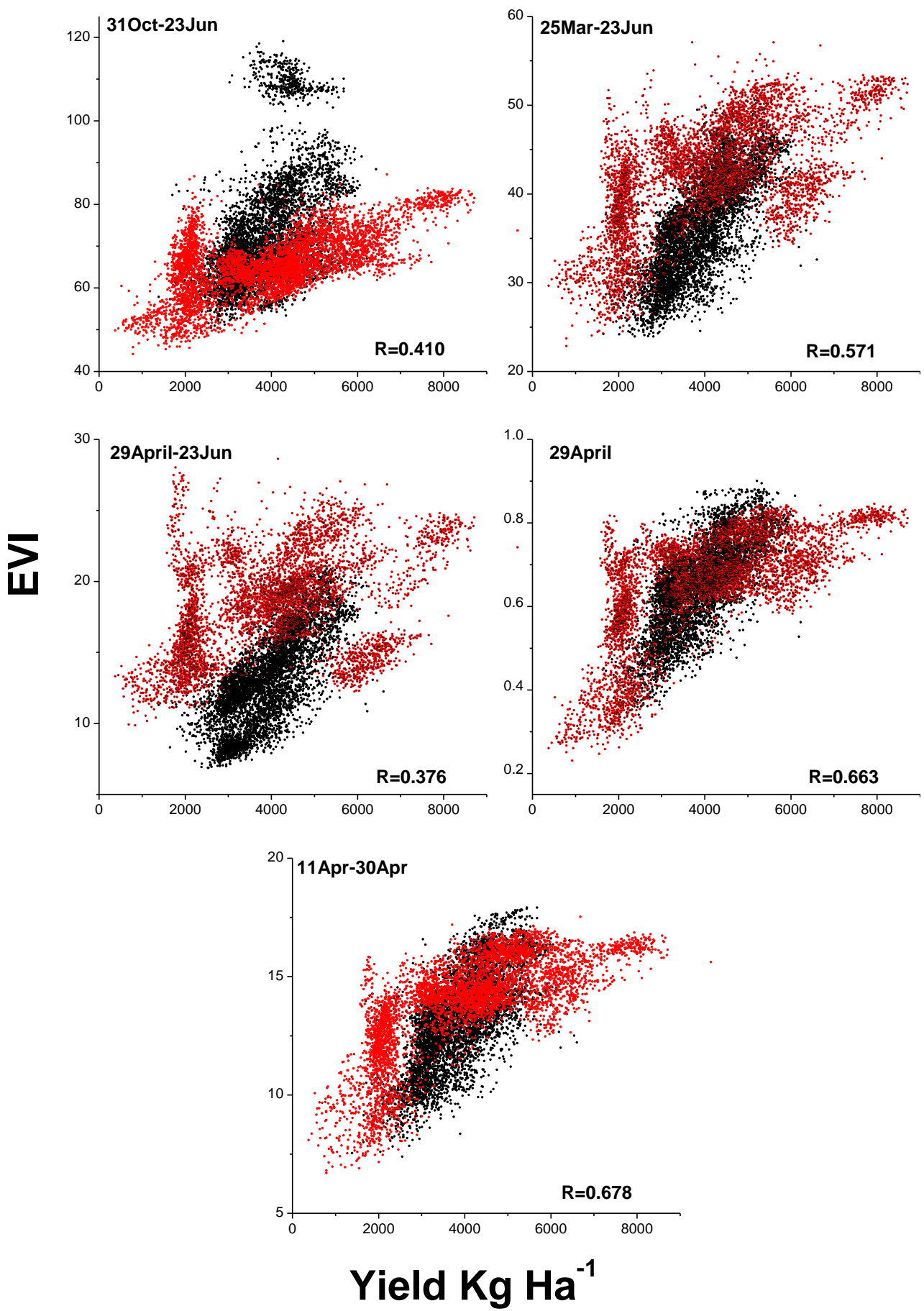
Σχήμα 6: Εποχιακή διακύμανση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ ολοκληρωμάτων EVI για 5 έως 50 ημέρες και τελικής παραγωγής για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους. Με μαύρο απεικονίζεται η καλλιεργητική περίοδος 2017-2018 ενώ με κόκκινο η περίοδος 2018-2019.



Σχήμα 7: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων NDVI και EVI για το διάστημα 11-30 Απριλίου με την τελική παραγωγή για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.



Σχήμα 8: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων του NDVI με την τελική παραγωγή για διάφορα χρονικά διαστήματα και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους μαζί.

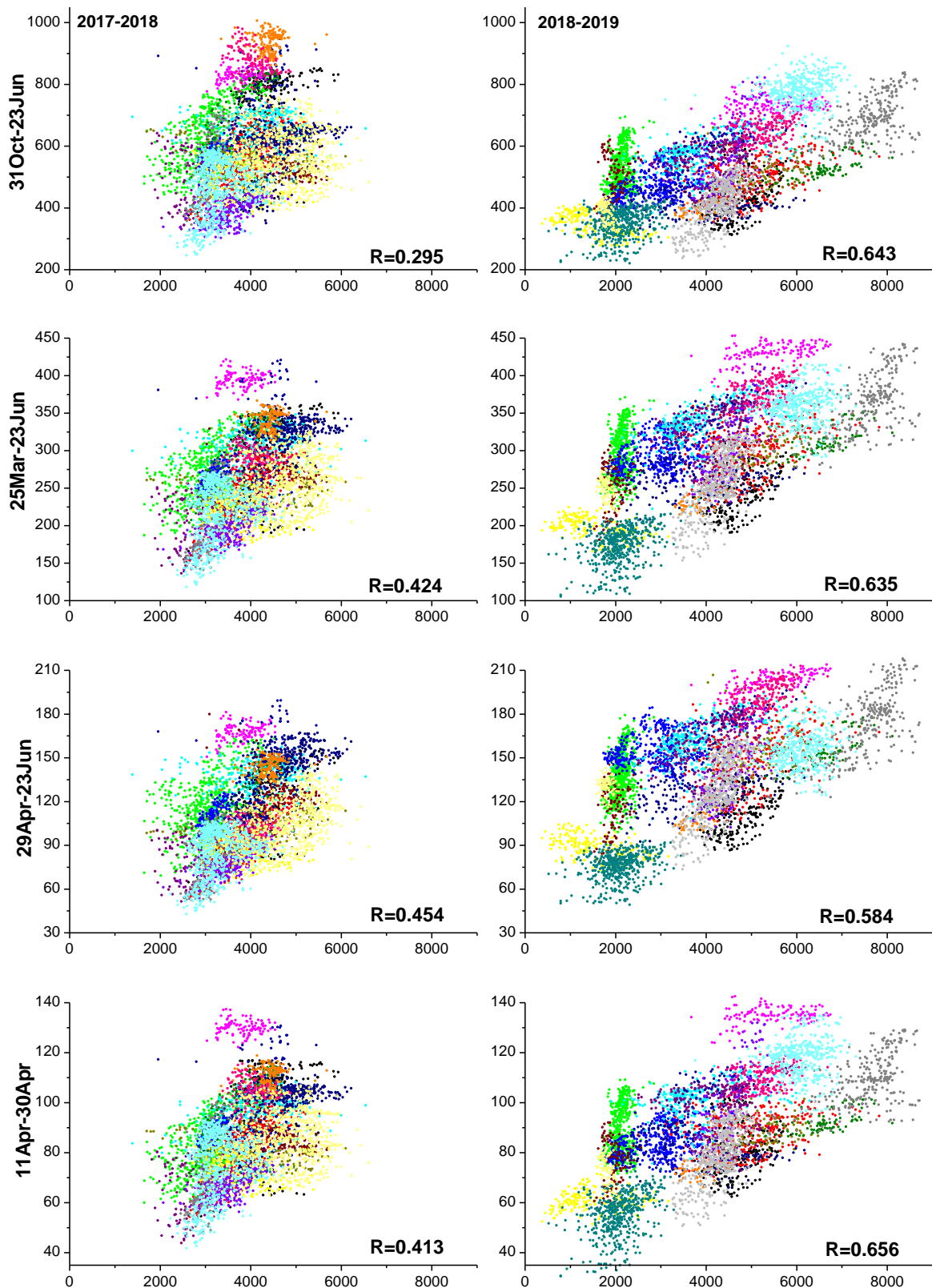


Σχήμα 9: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων του EVI με την τελική παραγωγή για διάφορα χρονικά διαστήματα και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους μαζί.

3.3. B12 και παραγωγή

Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της εκτίμησης της τελικής παραγωγής ενσωματώθηκαν δεδομένα εδάφους μέσω του καναλιού B12 του Sentinel-2 για ημερομηνία πριν την έκπτυξη της καλλιέργειας (γυμνό έδαφος). Πραγματικά, όταν το κανάλι B12 συνδυαστεί με τους δείκτες βλάστησης ο συντελεστής συσχέτισης με την τελική παραγωγή βελτιώνεται, ωστόσο αυτό συμβαίνει μόνο για την καλλιεργητική περίοδο του 2018-2019, ενώ αντίθετα για την περίοδο του 2017-2018 οι τιμές των r μειώνονται αρκετά (Σχήματα 10 και 11, Πίνακας 3). Ακόμη τα συνδυασμένα αποτελέσματα των δύο περιόδων περιπλέκονται, καθώς όπως φαίνεται από την σύγκριση των Σχημάτων 13,14 και 8,9, καθώς επίσης και στον Πίνακα 4, για κάποια διαστήματα η συσχέτιση βελτιώνεται ενώ σε άλλα μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε κοινά διαστήματα μεταξύ των δύο δεικτών αφού και στις δύο περιπτώσεις τα διαστήματα ολόκληρης της περιόδου, από 25 Μαρτίου και από 29 Απριλίου δίνουν βελτιωμένο συντελεστή συσχέτισης, ενώ για τις 29 Απριλίου καθώς και το διάστημα από 11-30 Απριλίου παρατηρείται μείωση του. Βέβαια πρέπει να τονιστεί πως ενώ η βελτίωση που παρατηρείται στα τρία αυτά διαστήματα είναι αρκετά μεγάλη, η μείωση είναι μικρότερη και δεν αλλάζει αισθητά το τελικό αποτέλεσμα.

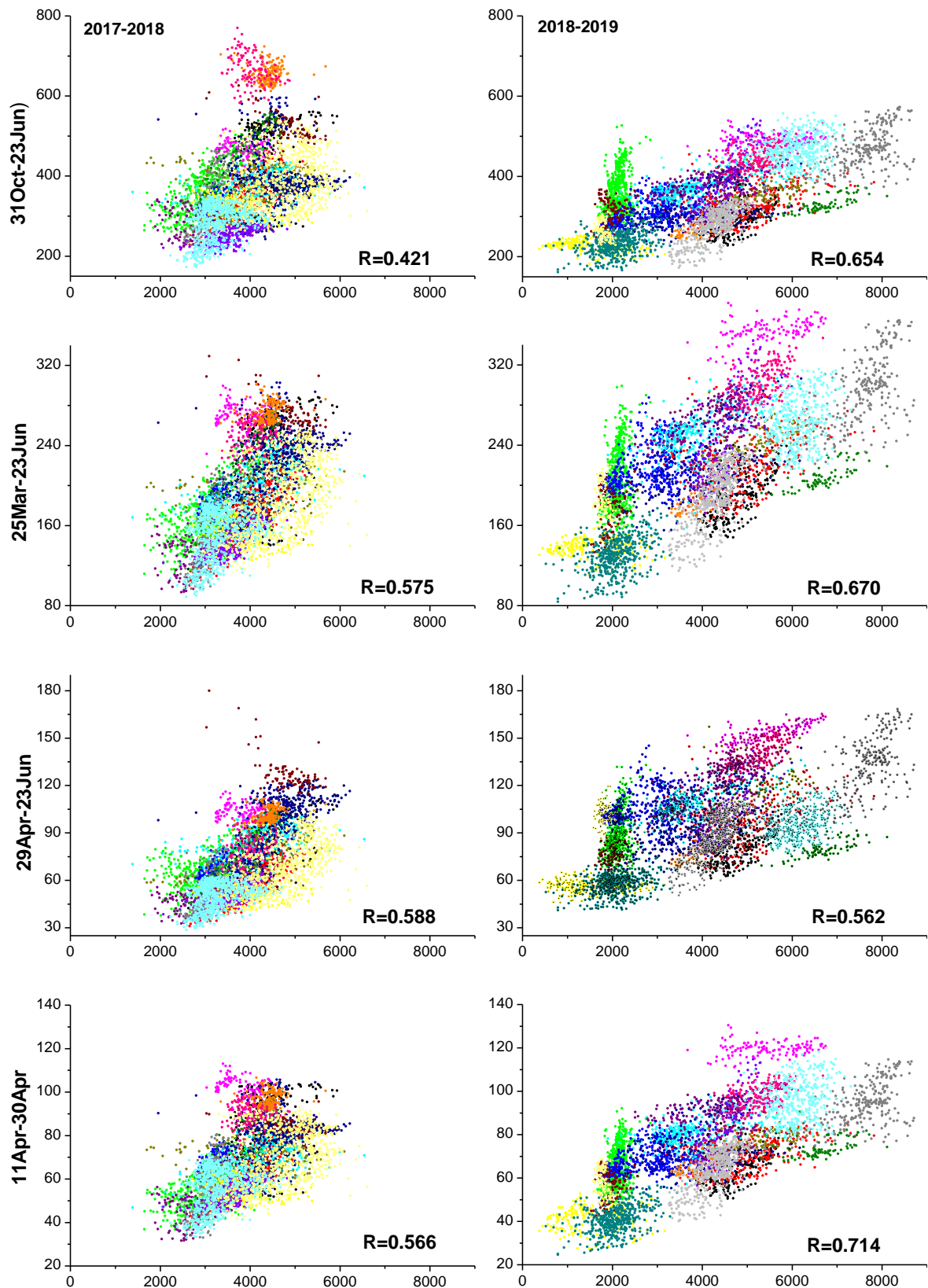
NDVI/B12



Yield Kg Ha⁻¹

Σχήμα 10: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων NDVI/B12 για τέσσερα χρονικά διαστήματα με την τελική παραγωγή για τις 2 καλλιεργητικές περιόδους.

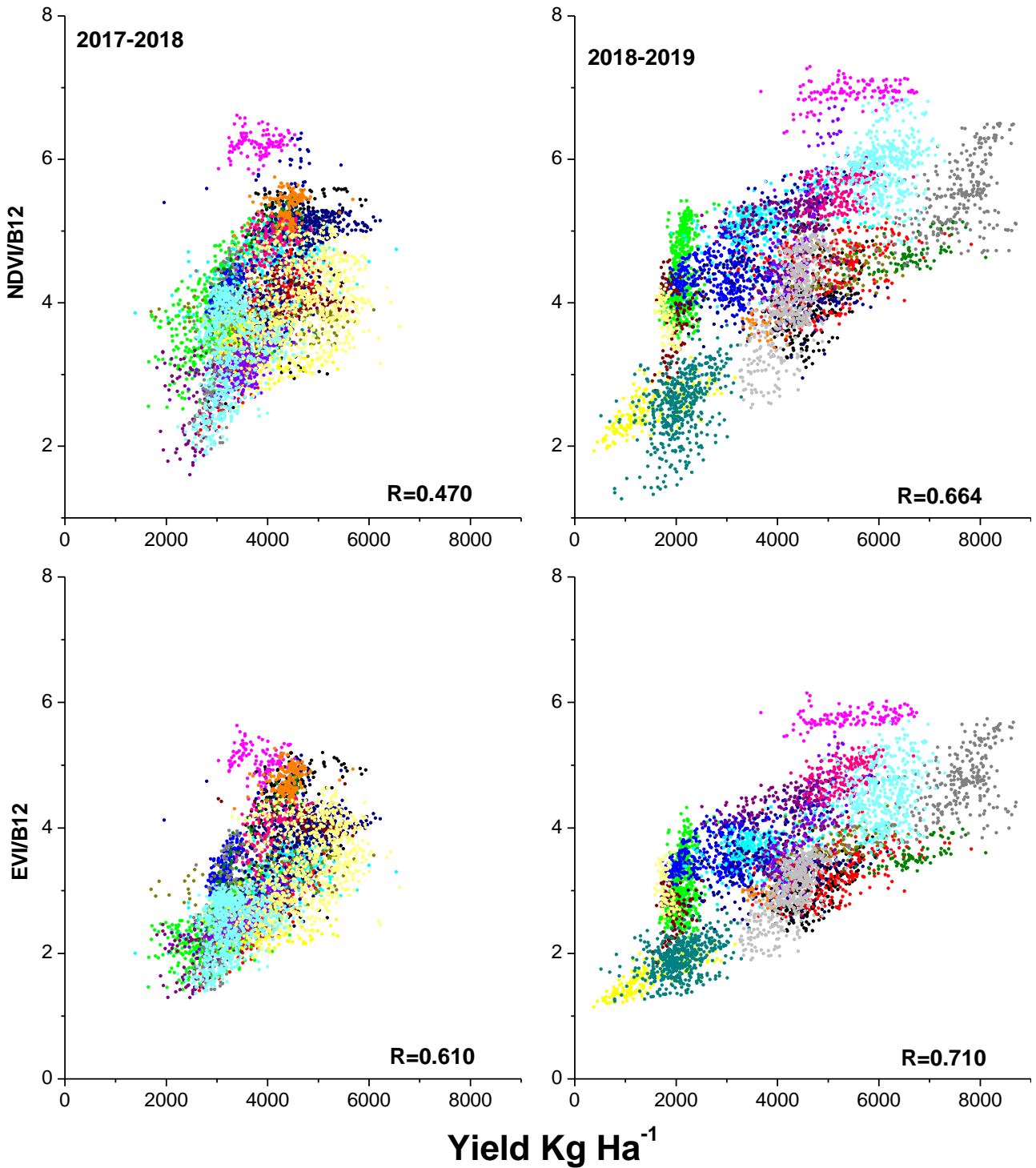
EVI/B12



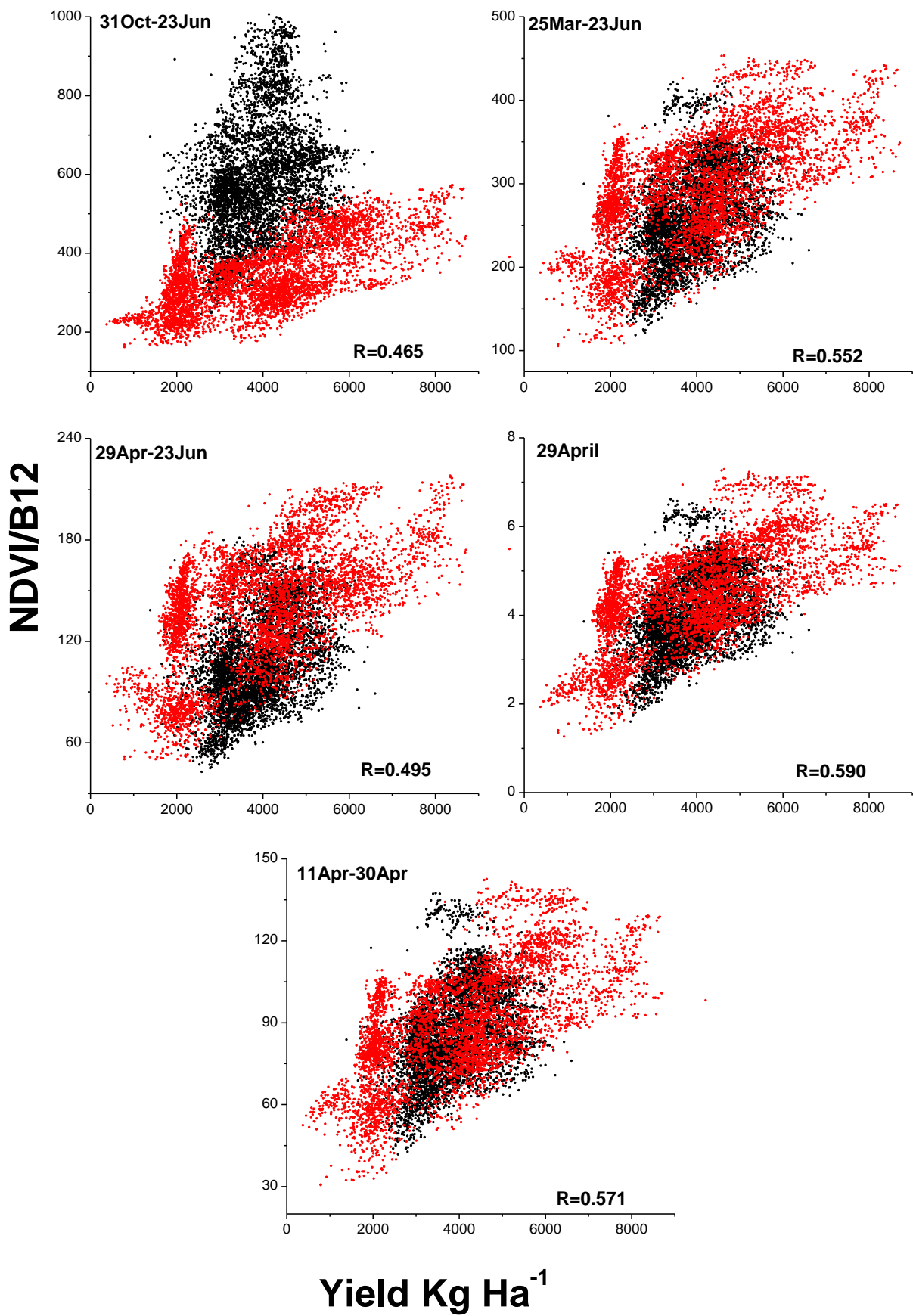
Yield Kg Ha⁻¹

Σχήμα 11: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων EVI/B12 για τέσσερα χρονικά διαστήματα με την τελική παραγωγή για τις 2 καλλιεργητικές περιόδους.

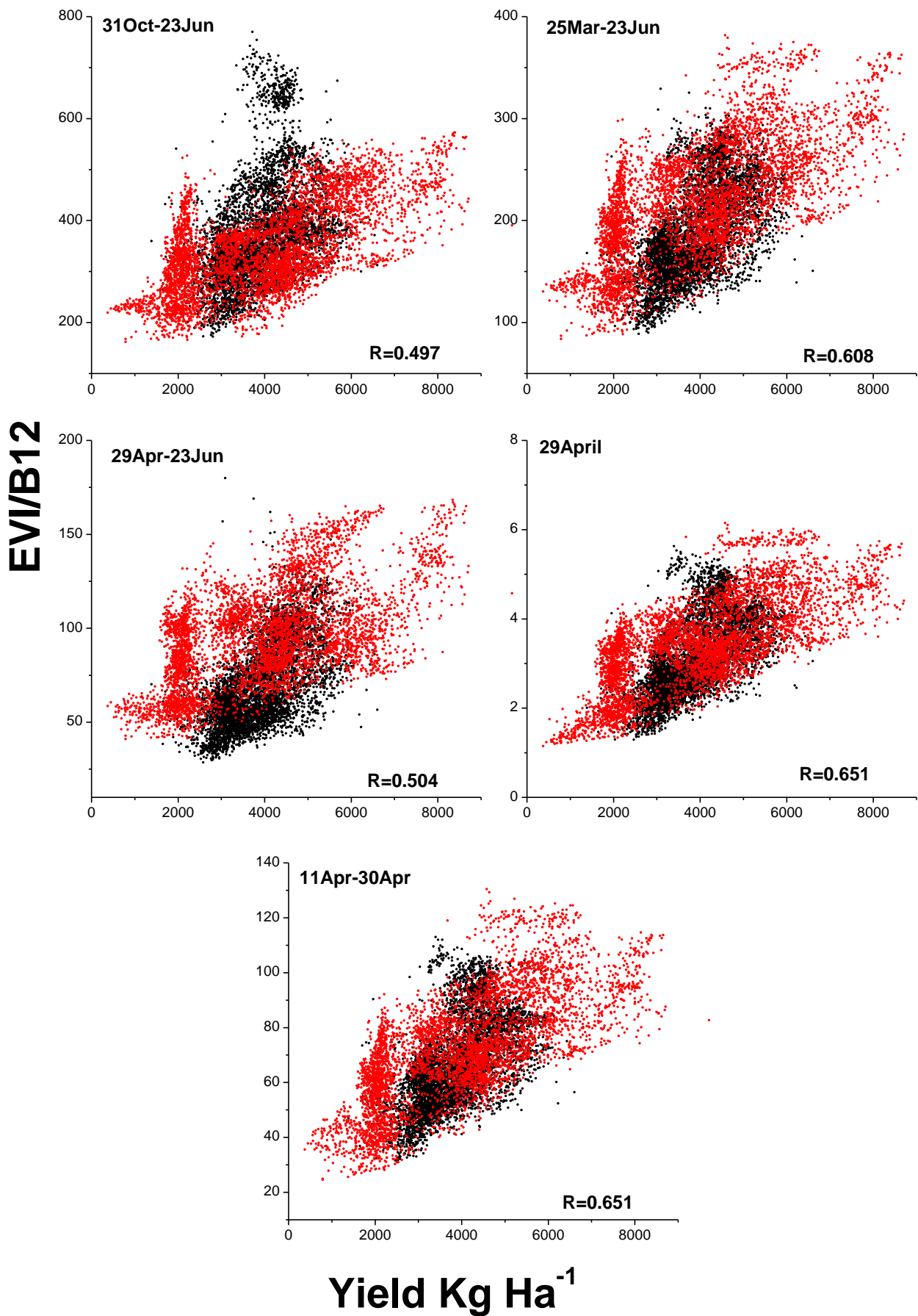
29April



Σχήμα 12: Συσχέτιση μεταξύ NDVI/B12 και EVI/B12 για τις 29 Απριλίου με την τελική παραγωγή για τις 2 καλλιεργητικές περιόδους.



Σχήμα 13: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων του NDVI/B12 με την τελική παραγωγή για διάφορα χρονικά διαστήματα και για τις δύο περιόδους μαζί.



Σχήμα 14: Συσχέτιση μεταξύ ολοκληρωμάτων του EVI/B12 με την τελική παραγωγή για διάφορα χρονικά διαστήματα και για τις δύο περιόδους μαζί.

4. Συζήτηση

Μέσα από την εργασία αυτή έγινε μία προσπάθεια για να δούμε κατά πόσο μπορούν τα δεδομένα δορυφόρων να χρησιμοποιηθούν στην γεωργία ακριβείας. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το ζεύγος δορυφόρων Sentinel 2 για την κατασκευή χρονοσειρών για τους NDVI και EVI και τα ολοκληρώματα τους συσχετίστηκαν με την τελική παραγωγή. Η υπόθεση μας ήταν ότι το σιτάρι μετά την άνθιση δίνει όλα τα φωτοσυνθετικά του προϊόντα στον καρπό και για αυτό τα διαστήματα κοντά σε αυτό το στάδιο αναμένονταν να δώσουν τα καλύτερα αποτελέσματα.

4.1. Χωρική Μεταβλητότητα

Οι χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης δείχνουν με σαφήνεια ότι υπάρχει ποικιλότητα στην καλλιέργεια του σιταριού από έτος σε έτος, μεταξύ διαφορετικών χωραφιών αλλά και μέσα στο ίδιο το χωράφι, και ο δορυφόρος ήταν ικανός να την αντιληφθεί όπως φαίνεται από τα αντίστοιχα σχήματα. Η όλη διαδικασία μας έδωσε 5316 pixels για τα χωράφια τις περιόδου 2017-2018 και 5031 για την περίοδο 2018-2019, με έναν συνολικό αριθμό 10347 pixels τελικά. Για τις δύο περιόδους το εύρος των τιμών παραγωγής κυμάνθηκε από 0.5-7 Mg ha⁻¹ και 0.3-8 Mg ha⁻¹. Αντίστοιχα, το εύρος τιμών για τους NDVI και EVI κυμάνθηκε μεταξύ 0.2-0.92 και 0.2-0.88 για την περίοδο 2017-2018 και 0.2-0.98 και 0.2-0.9 για την περίοδο 2018-2019. Άρα τελικά η υψηλή χωρική ανάλυση των οργάνων του Sentinel-2 είναι πολύ αποτελεσματική και μπορεί να δώσει ακριβείς πληροφορίες σε μικρή κλίμακα όπως είναι ένας αγρός. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες ανά τα έτη οι οποίες είχαν ως στόχο να εκτιμήσουν την δυνατότητα αντίληψης της χωρικής παραλλακτικότητας που υφίσταται σε ένα χωράφι από τα όργανα των δορυφόρων. Οι Gaso et al. (2019) χρησιμοποίησαν τους Landsat 7 και 8, οι οποίοι έχουν χωρική ανάλυση 30 m και έδειξαν ότι παρ' όλο που ήταν ικανοί να αντιληφθούν την μεταβλητότητα της παραγωγής μεταξύ χωραφιών, όταν επρόκειτο για την μεταβλητότητα εντός του χωραφιού δεν είχαν την δυνατότητα να την καταγράψουν. Σε άλλη μελέτη οι Lyle et al. (2013) πάλι με την χρήση του Landsat προσπάθησαν να εντοπίσουν την μεταβλητότητα σε επίπεδο αγρού, με τα αποτελέσματα τους να διαφέρουν ανάλογα με την βροχόπτωση της περιόδου. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά τις περιόδους που η βροχόπτωση ήταν επαρκής. Επίσης έχει τονιστεί από πολλούς (Dang et al. 2011, Lai et al. 2018, Lyle et al. 2013) ότι είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να αναγνωριστεί η ποικιλότητα της παραγωγής και σε επίπεδο αγρού εάν επιθυμούμε να κατασκευάσουμε μοντέλα τα οποία θα μπορούν να δώσουν εκτιμήσεις τις τελικής παραγωγής με υψηλή ακρίβεια.

4.2 Εκτίμηση παραγωγής με δείκτες βλάστησης

4.2.1 Εκτίμηση με βάση ολοκληρώματα των διαστημάτων

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1 οι χρονοσειρές που παρήχθησαν (Σχήμα 1) απεικονίζουν ικανοποιητικά την χωρική παραλλακτικότητα στην εξέλιξη της καλλιέργειας του σιταριού σε διάφορα χωράφια στον κάμπο της Θεσσαλίας. Οι χρονοσειρές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της τελικής παραγωγής δια μέσου του υπολογισμού ολοκληρωμάτων των δεικτών βλάστησης για διάφορα χρονικά διαστήματα και συσχέτισή τους με την τελική παραγωγή. Το πρώτο ολοκλήρωμα που υπολογίστηκε και συσχετίστηκε με την παραγωγή ήταν αυτό που αφορούσε ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο, από την σπορά μέχρι το τέλος της. Επειδή, για την παραγωγή του σπόρου χρησιμοποιούνται τα φωτοσυνθετικά προϊόντα από την ανθοφορία και έπειτα, το αναμενόμενο ήταν να μην μπορεί να γίνει εκτίμηση της παραγωγής μέσω του διαστήματος αυτού. Πράγματι, την περίοδο του 2017-2018 τα αποτελέσματα επαληθεύουν την υπόθεση αυτή, καθώς η συσχέτιση ήταν χαμηλή (0.348 για τον NDVI και 0.448 για τον EVI). Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τον Ανατολίτη (2020), ο οποίος βρήκε ακόμη μικρότερη συσχέτιση (0.177 και 0.263 για τους δύο δείκτες αντίστοιχα). Την περίοδο όμως του 2018-2019 τα πράγματα αλλάζουν καθώς το ολοκλήρωμα της συνολικής περιόδου δίνει τελικά τις υψηλότερες συσχετίσεις μεταξύ των τριών διαστημάτων (Σχήματα 2 και 3, Πίνακας 3). Στην συνέχεια υπολογίστηκαν δύο διαστήματα κοντά στο τέλος της καλλιέργειας, από 25 Μαρτίου και από 29 Απριλίου μέχρι την συγκομιδή. Το πιο κρίσιμο στάδιο για την ανάπτυξη του σιταριού είναι το στάδιο της ανθοφορίας (Aparicio et al. 2002), το οποίο στον Θεσσαλικό κάμπο συμβαίνει περίπου στα μέσα του Απρίλη. Για τον λόγο αυτό το διάστημα του Απρίλη αναμένονταν να δώσει πολύ καλές συσχετίσεις. Στην περίπτωση του Ανατολίτη (2020) η υπόθεση αυτή βρέθηκε να ισχύει για την καλλιεργητική περίοδο 2017-2018, με τον NDVI να αποδίδει συντελεστή συσχέτισης 0.753 και τον EVI να φτάνει το 0.826. Ωστόσο, στη μελέτη αυτή όπου προστέθηκαν άλλα 16 χωράφια οι συσχετίσεις μειώθηκαν αισθητά, καθώς ο NDVI έπεσε στο 0.596 και ο EVI στο 0.673. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η υψηλή ακρίβεια στην εργασία του Ανατολίτη (2020) οφείλονταν πιθανώς στην επιλογή μικρού αριθμού χωραφιών με παρόμοια αναπτυξιακά χαρακτηριστικά. Ακόμα, την επόμενη περίοδο (2018-2019) τα αποτελέσματα μειώθηκαν περαιτέρω αφού και για τους δύο δείκτες ο συντελεστής συσχέτισης του διαστήματος του Απριλίου δεν ξεπερνά το 0.4. Το διάστημα όμως του Μαρτίου έρχεται να βελτιώσει λίγο τα πράγματα καθώς αυξάνει τους συντελεστές συσχέτισης αρκετά όπως απεικονίζεται και στον Πίνακα

3. Την περίοδο του 2018-2019 τα πράγματα δεν δείχνουν τόσο καλά αφού τα ποσοστά και για το διάστημα αυτό μειώνονται. Το γεγονός αυτό είναι κάπως περίεργο καθώς η δεύτερη χρονιά πήγε καλύτερα για τους παραγωγούς. Αυτό ενδεχομένως να συμβαίνει διότι μερικά χωράφια παρ' όλο που αναπτύχθηκαν κανονικά όπως δείχνει το Σχήμα 1, τελικά έδωσαν πολύ μικρές ποσότητες παραγωγής. Το Σχήμα 4 δείχνει αναλυτικότερα πως κάποια χωράφια ενώ αγγίζουν τιμές πάνω από 0.9 του δείκτη, που μεταφράζεται ως πολύ καλά ανεπτυγμένα φυτά, δίνουν τελικά μια παραγωγή 1-3 Mg ha⁻¹, υποδηλώνοντας έτσι ότι κάποιος περιοριστικός παράγοντας όπως κάποια ασθένεια ή και αβιοτικοί παράγοντες όπως είναι η έλλειψη νερού και οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στην περιοχή, επηρέασε την καλλιέργεια (Shi et al. 2014).

4.2.2 Εκτίμηση με βάση μία μεμονωμένη ημερομηνία.

Ακόμη δοκιμάστηκε και μία μεμονωμένη ημερομηνία, η 29^η Απριλίου, διότι με βάση τις χρονοσειρές, οι καλλιέργειες ήταν στο στάδιο όπου θα άρχιζε το κιτρίνισμα των φυτών και το γέμισμα του σπόρου, η οποία σύμφωνα με τους (Cossani et al. 2009, Diacono et al. 2012), αποτελεί ένα πολύ κρίσιμο στάδιο τις καλλιέργειας. Τελικά όπως αποδεικνύεται η μεμονωμένη αυτή ημερομηνία έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα καθώς επιτεύχθηκαν συντελεστές συσχέτισης πάνω από 0.6 με την περίοδο 2017-2018 να έχει πάλι τα καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 4). Οι Ren et al. (2008) και Becker-Reshef et al. (2010) έδειξαν ότι τελικά η περίοδος που θα δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι όταν ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) αποκτήσει την μέγιστη τιμή του, ενώ οι Lopresti et al. (2016) έδειξαν πως η καλύτερη πρόβλεψη επιτυγχάνεται από ένα διάστημα τριάντα ημερών περίπου πριν από την συγκομιδή, μετά το στάδιο της άνθισης. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με το γεγονός ότι οι υψηλότερες συσχετίσεις λήφθηκαν τελικά από το 20ήμερο διάστημα του Απριλίου, όμως έρχονται σε αντιπαράθεση με το γεγονός ότι και το διάστημα από 25 Μαρτίου, δηλαδή 15 μέρες περίπου νωρίτερα δίνει παρόμοια αποτελέσματα. Με την μελέτη των Lopresti et al. (2016) όμως μπορεί να θεωρηθεί ότι συμφωνεί και η μεμονωμένη ημερομηνία η οποία έχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα και στην συγκεκριμένη μέρα έχει γίνει η άνθιση και αρχίζει σταδιακά το γέμισμα του σπόρου. Πρέπει να τονιστεί βέβαια το γεγονός ότι για να απλοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η μέθοδος συσχέτισης, δεν έγινε σε αυτήν καμία διαδικασία ομαλοποίησης της, πέρα από την διαδικασία για την συμπλήρωση των ημερομηνιών μεταξύ των διαστημάτων των εικόνων που ακολούθησαν και οι Becker-Reshef et al. (2010). Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4, την περίοδο 2018-2019 υπάρχουν αρκετά χωράφια τα οποία ενώ έχουν πολύ υψηλές τιμές δεικτών αποδίδουν τελικά πολύ χαμηλή παραγωγή.

4.2.3 Συγχώνευση των δύο καλλιεργητικών περιόδων

Σε μία προσπάθεια να διαπιστωθεί κατά πόσο η συσχέτιση των δεικτών με την τελική παραγωγή αποδίδει ικανοποιητικά μεταξύ διαφορετικών καλλιεργητικών περιόδων, εξετάστηκαν όλα τα δεδομένα μαζί (Σχήματα 8 και 9). Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ήταν μετρίως ικανοποιητικά καθώς για τις 29 Απριλίου αλλά και το διάστημα του Μάρτιου οι συντελεστές συσχέτισης και για τους δύο δείκτες ήταν περίπου 0.6 με τις 29 Απριλίου να δίνουν τελικά την καλύτερη συσχέτιση. Το διάστημα του Απριλίου έδωσε τελικά την μικρότερη συσχέτιση, όμως για όλα τα διαστήματα ο EVI έδωσε σταθερά καλύτερα αποτελέσματα από τον NDVI (Πίνακας 4). Όταν όμως λήφθηκε υπ' όψιν και το 20ήμερο διάστημα η κατάσταση πήρε καλύτερη τροπή καθώς τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 8 και 9 και στον Πίνακα 4 βελτιώθηκαν και είναι πολύ ικανοποιητικά. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η μέθοδος συσχέτισης ίσως και να μπορεί να μεταφερθεί από χρονιά σε χρονιά αν και απαιτείται περαιτέρω έρευνα. Οι Rudorff και Batista (1991) σε δικιά τους έρευνα είδαν ότι οι καλύτερες συσχετίσεις λήφθηκαν από διαστήματα παρόμοια με τα δικά μας. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4 την περίοδο 2018-2019 υπάρχουν αρκετά χωράφια τα οποία ενώ δίνουν πολύ υψηλές τιμές δεικτών η παραγωγή τελικά είναι πολύ χαμηλή. Οι Rudorff και Batista (1991) έκανα παρόμοιο πείραμα για δύο χρονιές 1986 και 1987. Αυτό που παρατήρησαν ήταν πως ενώ το 1986 είχαν υψηλότερες τιμές δεικτών τελικά πήραν χαμηλότερη παραγωγή από την επόμενη χρονιά. Το γεγονός αυτό οφείλονταν στην απώλεια βροχής που είχε την πρώτη χρονιά τριάντα μέρες περίπου πριν την ημερομηνία που μελέτησαν. Αυτό ίσως να μπορεί να εξηγήσει και την δική μας περίπτωση, εάν δηλαδή τα χωράφια αυτά δεν ποτίστηκαν όταν άρχιζε το γέμισμα του σπόρου.

4.2.4 B12 και παραγωγή

Οι συσχετίσεις που αναφέρθηκαν στο 4.2 έγιναν με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσο ήταν δυνατό μία απλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ δεικτών βλάστησης και παραγωγής, να δώσει εκτίμηση της τελικής παραγωγής με μεγάλη ακρίβεια, ώστε να αναπτυχθεί μοντέλο το οποίο δεν απαιτεί πολλά και δύσκολα στην εύρεση δεδομένα. Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της ικανότητας εκτίμησης της τελικής παραγωγής προστέθηκε η ανακλαστικότητα του καναλιού B12 του Sentinel-2, ενσωματώνοντας έτσι χαρακτηριστικά του εδάφους, δεδομένου ότι αυτή η φασματική περιοχή σχετίζεται με την αγωγιμότητα / αλατότητα του εδάφους. Το B12 έχει μήκος κύματος 2190 nm και ανήκει στο λεγόμενο μικροκυματικό μήκος κύματος της ακτινοβολίας, όπου τα μόρια του νερού έχουν έντονη απορρόφηση (Harmel et al. 2018). Ωστόσο, τα αποτελέσματα και πάλι ήταν διαφορετικά

μεταξύ των δυο καλλιεργητικών περιόδων, με τις συσχετίσεις να βελτιώνονται κατά την περίοδο 2018-2019, αλλά να επιδεινώνονται για την περίοδο 2017-2018 (Σχήματα 10 και 11, Πίνακας 3). Οι Akanji et al. (2018), σε μελέτη που διεξήγαγαν σε καλλιέργεια γιαμ, πήραν πολύ ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ανώτερου στρώματος εδάφους (βάθος 0-15 cm) και της τελικής παραγωγής με συντελεστές συσχέτισης περίπου 0.8. Σε βαθύτερο στρώμα δεν υπήρχε αξιόλογη συσχέτιση και αυτό είχε να κάνει με το γεγονός ότι τα θρεπτικά συγκεντρώνονται στο ανώτερο στρώμα του εδάφους. Ένας παράγοντας που μπορεί να επηρέασε τα αποτελέσματα ήταν και η επιλογή της εικόνας. Παρ' όλα τα παραπάνω, όταν τα δεδομένα των δυο περιόδων εξεταστούν μαζί, το κανάλι B12 βελτιώνει τις συσχετίσεις των ολοκληρωμάτων των δεικτών βλάστησης για τα διάφορα διαστήματα, με εξαίρεση τη μεμονωμένη ημερομηνία (29/04) και το εικοσαήμερο διάστημα όπου η συσχέτιση επιδεινώνεται ελαφρώς (Σχήματα 13 και 14, Πίνακας 4). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι για την εκτίμηση της παραγωγής σε πολλά διαφορετικά χωράφια καθώς και μεταξύ διαφορετικών καλλιεργητικών περιόδων η ενσωμάτωση χαρακτηριστικών του εδάφους μέσω του καναλιού B12 μπορεί να συνεισφέρει θετικά. Ωστόσο, περαιτέρω έρευνα με περισσότερα χωράφια και αναπτυξιακές περιόδους για την επίδραση του εδάφους θα βοηθούσε στη διασαφήνιση του ρόλου του.

4.3 NDVI και EVI

Ακόμη μία παρατήρηση που έγινε από τον Ανατολίτη (2020) ήταν το γεγονός ότι μεταξύ των δύο δεικτών ο NDVI έφτανε πρώτος στις μέγιστες τιμές του με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο αποτελεσματικός στα μεταγενέστερα στάδια της καλλιέργειας και άρα τελικά ο EVI να θεωρηθεί καλύτερος δείκτης. Αυτό εν μέρει ίσχυσε αφού ο NDVI όντως έφτασε πρώτος τις μέγιστες τιμές του (Σχήμα 1) και όπως φαίνεται στον Πίνακα 3 ο NDVI δίνει αρκετά χαμηλότερες οι παραπλήσιες τιμές με τον EVI. Τα ευρήματα αυτά συμφωνούν και με την μελέτη του Ανατολίτη (2020) αν και στην δική του περίπτωση ο EVI είχε σταθερά μεγαλύτερες τιμές από τον NDVI. Οι Huete et al. (2002) βρήκαν πως ο EVI δεν κορέννεται τελικά τόσο εύκολα όσο ο NDVI, πράγμα που ισχύει και στην δική μας περίπτωση. Οι δείκτες απορροφούν ακτινοβολία στο φάσμα της PAR την οποία χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας. Η διαφορά στον κορεσμό μεταξύ των δύο δεικτών οφείλεται στον συνδυασμό τριών και όχι δύο καναλιών στον EVI με αποτέλεσμα να διορθώνει προβλήματα περιβαλλοντικού θορύβου. Ο Πίνακας 4 δείχνει πως και με συνδυασμό των δύο καλλιεργητικών περιόδων ο EVI δίνει καλύτερα αποτελέσματα χωρίς όμως να έχουν μεγάλη διαφορά από αυτά του NDVI. Για τον λόγο αυτό δε νομίζω ότι είναι σωστό να

«κρατήσουμε» μόνο τον EVI και να αποκλείσουμε τον NDVI ο οποίος είναι και πιο απλός καθώς απαιτεί ένα κανάλι λιγότερο για τον υπολογισμό του.

5. Συμπεράσματα

Η χρήση του δορυφόρου Sentinel-2 μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες και να συμβάλει στην παρακολούθηση των καλλιεργειών με μεγαλύτερη ευκολία αλλά και να βοηθήσει πολύ στην γεωργία ακριβείας. Είναι μια αξιόπιστη μέθοδος και η χρήση της είναι σχετικά απλή και δωρεάν. Η χωρική ανάλυση του δορυφόρου όπως αποδείχθηκε μπορεί να απεικονίσει την παραλλακτικότητα που υφίσταται μεταξύ αγρών αλλά και σε επίπεδο αγρού.

Όσον αφορά την πρόβλεψη της παραγωγής του χειμερινού σιταριού έδωσε μέτρια προς ικανοποιητικά αποτελέσματα. Βέβαια έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η μέθοδος εκτίμησης όσο το δυνατόν πιο απλή, χωρίς να απαιτεί την χρήση πολλών δεδομένων. Και οι δύο δείκτες που εξετάστηκαν φαίνεται να μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με τον EVI να υπερέχει ελαφρώς έναντι του NDVI. Η υπόθεση ότι το διάστημα μετά την άνθιση θα έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα επαληθεύτηκε, αφού οι καλύτερες συσχετίσεις βρέθηκαν για το εικοσαήμερο διάστημα 11 - 30 Απριλίου και τη μεμονωμένη ημερομηνία 29/4, με συντελεστές συσχέτισης περίπου 0.7 και για τους δύο δείκτες. Ακόμη, μετά τον συνδυασμό των δύο καλλιεργητικών περιόδων το διάστημα με την καλύτερη συσχέτιση παρέμεινε αυτό από 11-30 Απριλίου, το οποίο απέχει μεγάλο χρονικό διάστημα από την συγκομιδή, παρέχοντας τη δυνατότητα επεμβάσεων στην καλλιέργεια εάν κριθεί αναγκαίο. Από αυτό γίνεται εμφανές πως η μέθοδος αυτή μπορεί να μεταφερθεί από χρονιά σε χρονιά, στην περίπτωση και των δύο δεικτών. Επίσης, η χρήση του καναλιού B12 του δορυφόρου ως δείκτης ποιότητας εδάφους δεν έδωσε ξεκάθαρα αποτελέσματα αφού για την καλλιεργητική περίοδο του 2017-2018 μείωσε τους συντελεστές συσχέτισης ενώ για την χρονιά του 2018-2019 τους βελτίωσε.

Εάν θέλουμε να διατηρήσουμε την μέθοδο μας απλή τότε για να σιγουρευτούμε ότι δουλεύει πρέπει να την εφαρμόσουμε σε μεγαλύτερο αριθμό χωραφιών και για περισσότερες καλλιεργητικές περιόδους. Επίσης, είναι πιθανό πως με τον συνδυασμό περισσότερων δεδομένων που σχετίζονται με την φύση της καλλιέργειας, όπως είναι οι βροχοπτώσεις, η θερμοκρασία, η κλίση του εδάφους, το υψόμετρο κ.α., η μέθοδος να γίνει πολύ πιο αποτελεσματική.

6. Βιβλιογραφία

- Akanji M., Oshunsanya S. and Alomran A., 2018. Electrical conductivity method for predicting yields of two yam (*Dioscorea alata*) cultivars in a coarse textured soil. *International Soil and Water Conservation Research*, 6:230-236
- Aparicio N., Villegas D., Araus J.L., Casadesus J. and Royo C., 2002. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science* 42(5), 1547–1555.
- 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.
- Basso B., Liu L. and Ritchie J.T., 2016. A Comprehensive Review of the CERES-Wheat, Maize and Rice Models Performances. *Advances in Agronomy* 136, 27-132.
- Battude M., Al Bitar A., Morin D., Cros J., Huc M., Marais-Sicre C., Le Dantec V. and Demarez V., 2016. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 184:668-681.
- Bhattacharya B.K., Mallick K., Nigam R., Dakore K. and Shekh A.M., 2011. Efficiency based wheat yield prediction in a semi-arid climate using surface energy budgeting with satellite observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1394–1408.
- Birth G.S. and Mcvey G., 1968. Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60:640-643
- Becker-Reshef I., Vermote E., Lindeman M., Justice C., 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 114, 1312–1323.
- Brisson N., Gar C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudill re J. P., H nault C., Maraux F., Seguin B. and Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18:309-332.
- Cohen W. B., 1991. Response of Vegetation Indices to Changes in Three Measures of Leaf Water Stress. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(2):195-202.
- 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.

- Cui X., Guo X., Wang Y., Wang X., Zhu W., Shi J., Lin C. and Gao X., 2019. Application of remote sensing to water environmental processes under a changing climate. *Journal of Hydrology*, 574: 892-902.
- Dang Y., Pringle M., Schmidt M., Dalal R. and Apan A., 2011. Identifying the spatial variability of soil constraints using multi-year remote sensing. *Field Crops Research* 123, 248–258.
- 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.
- Dong J., Lu H., Wang Y., Ye T. and Yuan W., 2020. Estimating winter wheat yield based on a light use efficiency model and wheat variety data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 160:18-32.
- 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>.
- Gara T., Darvishzadeh R., Skidmore A., Wang T. and Heurich M., 2019. Accurate modelling of canopy traits from seasonal Sentinel-2 imagery based on the vertical distribution of leaf traits. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 157:108-123.
- Gaso D.V., Berger A.G., and Ciganda V.S., 2019. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images. *Computers and Electronics in Agriculture* 159:75–83.
- Harmel T., Chami M., Tormos T., Reynaud N. and Danis P., 2018. Sun glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, 204:308-321.
- Hayes M.J. and Decker W.L., 1996. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing* 17:3189–3200.
- 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.
- Huete A.R., Didan K., and Yin Y., 2002b. MODIS Vegetation Workshop, Missoula, Montana, July 15-18, Terrestrial Biophysics and Remote Sensing (TBRs) MODIS Team, University of Arizona.

- Huete A.R. and Liu H.Q., 1994. An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric and Soil-Correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4):897-905.
- Jamieson P., Semenov M., Brooking I. and Francis G., 1998. Sirius: A mechanistic model of wheat response to environmental variation. *European Journal of Agronomy*, 8(3-4) pp:161-179.
- Jensen J. R., 2015. Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος: Μια προοπτική για τα Φυσικά Διαθέσιμα, Ε.Μ.Π. pp. 4-10, 442-451
- Johnen T., Boettcher U. and Kage H., 2014. An analysis of factors determining spatial variable grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy* 52:297–306.
- Johnson M.D., Hsieh W.W., Cannon A.J., Davidson A. and Bédard F., 2016. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 218–219, 74–84.
- Jones J., Tsuji G., Hoogenboom G., Hunt L., Thornton P., Wilkens P., Imamura D., Bowen W. and Singh U., 1998. Decision support system for agrotechnology transfer. DSSAT v3, Publisher: Springer, Dordrecht, pp:157-177.
- Kivinen S., Koivisto E., Keski-Saari S., Poikolainen L., Tanhuanpää T., Kuzmin A., Viinikka A., Heikkinen R., Pykälä J., Virkkala R., Vihervaara P. and Kumpula T., 2020. A keystone species, European aspen (*Populus tremula L.*), in boreal forests: Ecological role, knowledge needs and mapping using remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 462:
- Kumar M. and Monteith J.L., 1982. Remote Sensing of Plant Growth In Plants and the Daylight Spectrum. Edited by H.Smith (London: Academic Press), pp. 133-144.
- Lai Y.R., Pringle M.J., Kopittke P.M., Menzies N.W., Orton T.G. and Dang Y.P., 2018. An empirical model for prediction of wheat yield, using time-integrated Landsat NDVI. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72:99-108. 414.
- Lassalle G., Fabre S., Credo A., Dubucq D. and Elger A., 2020. Monitoring oil contamination in vegetated areas with optical remote sensing. A comprehensive review, *Journal of Hazardous Materials*, 393:122-427.
- Lin Y., Zhu Z., Guo W., Sun Y., Yang X. and Kovalskyy V., 2020. Continuous Monitoring of Cotton Stem Water Potential using Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing* 12(7):1176
- Lopresti M.F., Di Bella C.M. and Degioanni A.J., 2015. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. *Information Processing in Agriculture* 2:73–84.

- Lyle G., Lewis M. and Ostendorf B., 2013. Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale. *Remote Sensing* 5(4):1549–1567.
- 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
- Moriondo M., Maselli F. and Bindi M., 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy* 26:266–274.
- Nagy A., Fehér J. and Tamás J., 2018. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Computers and Electronics in Agriculture* 151:41–49.
- NASA, Landsat, Landsat 1 <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-1/>
- NASA, MODIS, Home, About, Specifications
<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>
- Pantazi X.E., Moshou D., Alexandridis T., Whetton R.L. and Mouazen A.M., 2016. Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques. *Computer and Electronics in Agriculture* 121:57–65.
- Prince S.D., 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 12:1313–1330.
- Prey L. and Schmidhalter U., 2019. Simulation of satellite reflectance data using high-frequency ground based hyperspectral canopy measurements for in-season estimation of grain yield and grain nitrogen status in winter wheat. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 149:176–187.
- Randin C., Ashcroft M., Bolliger J., Cavender-Bares J., Coops N., Dullinger S., Dirnböck T., Eckert S., Ellis E., Fernández N., Giuliani G., Guisan A., Jetz W., Joost S., Karger D., Lembrechts J., Lenoir J., Luoto M., Morin X., Price B., Rocchini D., Schaepman M., Schmid B., Verburg P., Wilson A., Woodcock P., Yoccoz N. and Payne D., 2020. Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models. *Remote Sensing of Environment*, 239:111-626.
- Ren J., Chen Z., Zhou Q. and Tang H., 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10:403–413.
- Ritchie J.T. and Otter, S., 1985. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat 453 yield model. ARS wheat yield project. University of Chicago Interlibrary Loan. Springfield, 454 Virginia: USDA ARS. 159–175.

- Rouse J. W, Haas R. H, Schell J.A. and Deering D.W., 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-3017.
- Running S.W., Justice C.O., Solomonson V., Hall D., Barker J., Kaufman Y.J., Strahler A.H., Huete A.R., Muller J.P. Vanderbirt V., Wan Z.M., Teillet P. and Carnegie D., 1994. Terrestrial Remote Sensing Science and Algorithms Planned for EOS/MODIS. Intl. Journal of Remote Sensing, 15(17):3587-3620.
- 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.
- Rudorff B.F.T. and Batista G.T., 1991. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. International Journal of Remote Sensing 12:2477–2484.
- Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M. and Jones S., 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. Remote Sensing of Environment, 198:52-68.
- Salazar L., Kogan F. and Roytman L., 2007. Use of remote sensing data for estimation of winter wheat yield in the United States. International Journal of Remote Sensing 28:3795–3811.
- Satir O. and Berberoglu S., 2016. Crop yield prediction under soil salinity using satellite derived vegetation indices. Field Crops Research 192:134–143.
- Sentinel – User Guides <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>.
- Shi J., Yasuor H., Yermiyahu U., Zuo Q. and Ben-Gal A., 2014. Dynamic responses of wheat to drought and nitrogen stresses during re-watering cycles. Agricultural Water Management 146:163–172.
- USGS EROS Archive - Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) - Sensor Characteristics (https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-advanced-very-high-resolution-radiometer-avhrr-sensor?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
- Vandiepen C.A., Wolf J., Vankeulen H., and Rappoldt C., 1989. WOFOST - A simulation model of crop production. Soil Use and Management 5:16–24..
- Van Evert F. K., and G. S. Campbell., 1994. CropSyst: A Collection of Object-Oriented Simulation Models of Agricultural Systems. Agronomy Journal 86:325-331.

- Van Laar H. H., Goudriaan J. and van Keulen H., 1992. Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations (as applied to spring wheat). Simulation Reports CABO-T T.
- Wang H., Jia G., Epstein H., Zhao H. and Zhang A., 2020. Integrating a PhenoCam-derived vegetation index into a light use efficiency model to estimate daily gross primary production in a semi-arid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 288-289.
- Wang Q., Adiku S., Tenhunen J. and Ganier A., 2005. On the Relationship of NDVI with Leaf Area Index in a Deciduous Forest Site. *Remote Sensing of Environment*, 94:244-255.
- Xiao J., Chevallier F., Gomez C., Guanter L., Hicke J., Huete A., Ichii K., Ni W., Pang Y., Rahman A., Sun G., Yuan W., Zhang L. and Zhang X., 2019. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 233:111-383
- Ανατολίτης Κ., 2020. Εκτίμηση παραγωγής σε καλλιέργεια Σκληρού Σιταριού με την χρήση Δεικτών Βλάστησης από το Δορυφόρο Sentinel-2. Πτυχιακή εργασία,

7. Παράρτημα

7.1 Διαδικασία στο QGIS για εξαγωγή των δορυφορικών δεδομένων

Για να ξεκινήσει η διαδικασία έπρεπε πρώτα να επιλέγουν τα χωράφια με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το πρόβλημα όμως ήταν πως τα δεδομένα αυτά ήταν σημειακά και έπρεπε να μετατραπούν σε ψηφιδωτά και μάλιστα στις ίδιες διαστάσεις με αυτά του δορυφόρου Sentinel-2. Αυτό επιτεύχθηκε με μία σειρά διαδικασιών που ακολουθήθηκε στο πρόγραμμα και η οποία αναφέρεται παρακάτω

7.1.1. Εισαγωγή χωραφιών

Για την επιλογή των χωραφιών αρχικά εισήχθησαν στο QGIS τα shapefile (.shp) αρχεία τα οποία περιείχαν τα πρωτογενή δεδομένα παραγωγής των χωραφιών. Η εισαγωγή τους έγινε ακολουθώντας την εξής διαδικασία: Layer->Add layer->Add vector layer. Ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο υπάρχει μία κενή μπάρα με τρεις τελείες στο πλάι και κάνοντας κλικ σε αυτές μπορεί να γίνει η εισαγωγή των αρχείων. Αρχικά εισήχθησαν όλα τα αρχεία και αργότερα έγινε επιλογή των χωραφιών με βάση τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν και τοποθετήθηκαν σε νέο gis για λόγους ευκολίας. Στην συνέχεια πρέπει να γίνει μετατροπή τους σε raster και σε διαστάσεις 10x10 m ώστε να είναι συγκρίσιμα με τα pixel του Sentinel-2.

7.1.2. Μετατροπή vector σε raster

Βήμα 1: Ξεκινώντας τα χωράφια πρέπει να αλλάξουν προβολικό σύστημα από το EPSG:4326 σε UTM zone 34 N. Αυτό γίνεται πατώντας **Vector-> Data-> Reproject -> UTM zone 34N**.

Βήμα 2: Αμέσως μετά φτιάχνουμε ένα πρώτο raster με pixel που έχουν το μέσο όρο των γύρω σημείων, που όμως δεν είναι σε διαστάσεις Sentinel-2. Στο περιβάλλον του QGIS κάνεις κλικ στο Processing tools και ψάχνεις το εργαλείο Grid (Moving average). Κάνοντας κλικ σε αυτό ανοίγει το αντίστοιχο παράθυρο. Αν δεν έχει επιλέξει αυτόματα το χωράφι που θέλουμε το επιλέγουμε χειροκίνητα στην πρώτη γραμμή με την ένδειξη **Input Layer**. Στα παράθυρα **Radius 1** και **Radius 2** επιλέχθηκε ως ακτίνα το νούμερο 2. Στην συνέχεια ζητήσαμε να βγάλει τον μέσο όρο με βάση την υγρή μάζα βάζοντας στο πλαίσιο **Average-> Wet mass**.

Βήμα 3: Στην συνέχεια πρέπει να φέρουμε το raster στις διαστάσεις του δορυφόρου. Για να γίνει αυτό πρώτα απ' όλα φτιάχνουμε ένα νέο shapefile, την λεγόμενη μάσκα. Πηγαίνοντας στο **Layer->Create layer -> New shapefile** ανοίγει πάλι το αντίστοιχο

παράθυρο. Επιλέγουμε το όνομα αρχείου και που θα σωθεί πατώντας στις τρεις τελείες δίπλα από την πρώτη κενή μπάρα, και στο **Geometry type** επιλέγουμε το **Polygon** και πατάμε **ok**.

Βήμα 4: Τώρα πρέπει να σχηματιστεί η μάσκα κάνοντας κλικ στο **edit** με το εικονίδιο του **μολυβιού** και σχηματίζοντας με το χέρι το περίγραμμά, βάσει του χάρτη παραγωγής. Μόλις ολοκληρωθεί το περίγραμμά, κάνοντας διπλό κλικ ανοίγει ένα παραθυράκι που ζητάει **όνομα** και εκεί μπαίνει οτιδήποτε (π.χ. ο αριθμός 1). Η διαδικασία τελειώνει με κλικ στο **μολυβί** για να απενεργοποιηθεί το **edit** και να σωθεί η μάσκα.

Βήμα 5: Στη συνέχεια πρέπει να γίνει το λεγόμενο κόψιμο του layer. Από το Processing tools επιλέγουμε το **Clip raster by mask layer** και εμφανίζεται πάλι το παράθυρο του. Στο πεδίο **Input layer** επιλέγεται ένα raster που να είναι στις ίδιες ακριβώς διαστάσεις με αυτές του Sentinel-2. Στο **Mask layer** επιλέγεται το όνομα της μάσκας που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Τέλος επιλέγεται και το πλαίσιο που αναφέρει **Keep resolution of output raster** και πατάς **run**.

Βήμα 6: Ακολουθεί το τελευταίο βήμα στο οποίο χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο **r.resample.stats**. Στο πλαίσιο **input** μπαίνει το αρχείο **Grid** που δημιουργήθηκε στο βήμα 3. Στο πλαίσιο **resample aggregated->layer extent** εισάγεται το αρχείο που δημιουργήθηκε στο βήμα 5. Στο πλαίσιο **Quantile to calculate for method** μπαίνει ο αριθμός 10 και πατάμε **run** και πλέον το raster είναι έτοιμο για την εξαγωγή των δεδομένων. Μετά το τέλος του κάθε βήματος ακολουθεί σώσιμο των νέων layers (αρχείων) με δεξί κλικ στο layer και **export->save as**.

7.1.3. Καθάρισμα Pixel

Βήμα 1: Στα Processing tools γίνεται αναζήτηση του **raster.out.xyz**. Στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγεται στο **Input raster(s)** το resampled αρχείο και σώζεται σαν .txt (tab delimited text) αρχείο.

Βήμα 2: Το νέο αρχείο πρέπει να εισαχθεί στο qgis. Κλικ στο **Layer-> add layer-> add delimited text layer**. Στο **File name** πατάς στις τρεις τελείες πάλι, επιλέγεται το αρχείο και στην συνέχεια **File format** κλικ στο custom delimiters και επιλέγεται να γίνει διαχωρισμός βάση | στο **Others**. Τέλος το κουμπί **add** θα εισάγει το αρχείο στο project.

Βήμα 3: Το νέο αυτό αρχείο επειδή είναι σε μορφή .txt δεν μπορεί να τροποποιηθεί και για αυτό μετατρέπεται σε shapfile με τον ίδιο τρόπο για το σώσιμο των αρχείων. Το νέο αρχείο εισάγεται αυτόματα στο qgis και σε αυτό το layer πλέον γίνεται ο καθαρισμός των

pixel. Ενεργοποιείται το **edit** και τα σημεία επιλέγονται με το μάτι για να αφαιρεθούν (αφαιρούνται κυρίως τα ακριανά σημεία τριών η και περισσότερων σειρών και γενικά όποια σημεία τείνουν να επηρεάζονται από γειτονικά χωράφια ή τις ανωμαλίες της μηχανής).

7.1.4. Εξαγωγή δεδομένων.

Το καθαρισμένο πλέον χωράφι σώζεται σαν .csv (comma separated value) πηγαίνοντας στο **layer->δεξί κλικ->export->save as** και στο αντίστοιχο παράθυρο επιλέγουμε το όνομα και τον τύπο αρχείου, το προβολικό σύστημα να είναι το EPSG:4326 και στο **Geometry->As XY** και γίνεται save. Το αρχείο αυτό τέλος υφίσταται κάποιες μετατροπές ώστε να έχει ένα συγκεκριμένο format και ξανά μετατρέπεται σε csv για να μπορεί να διαβαστεί από το snap. Η διαδικασία αυτή έγινε για κάθε χωράφι ξεχωριστά.

7.2 Διαδικασία SNAP

7.2.1. Resampling

Για το resampling των εικόνων του Sentinel-2 χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAP - ESA Sentinels Application Platform v6.0.4 (<http://step.esa.int/main/>) free open source software. Πριν το resample οι εικόνες έπρεπε να γίνουν subsets. Για να μην επαναληφθεί λοιπόν η διαδικασία για τις πενήντα εικόνες επειδή θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο χρησιμοποιήθηκε ένα γράφημα το οποίο έκανε αυτόματα τα δύο βήματα του subsetting και resampling ταυτόχρονα για όλες τις εικόνες. Μετά το resampling οι εικόνες ήταν έτοιμες για την εξαγωγή των δεδομένων.

7.2.2. Εξαγωγή δεδομένων.

Για την εξαγωγή δεδομένων ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα: **Raster-> Export-> Extract pixel values** και ανοίγει ένα παράθυρο με δύο καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα εισάγονται οι δορυφορικές εικόνες και καθορίζεται ο φάκελος που θα σωθεί το αρχείο, ενώ στην δεύτερη εισάγεται το txt αρχείο που αναφέρθηκε στο 7.1.3 με τις συντεταγμένες του χωραφιού. Τελικά το πρόγραμμα μας φτιάχνει ένα excel με όλα τα δεδομένα που συλλέγει ο δορυφόρος για τις συντεταγμένες του κάθε χωραφιού. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε χωράφι ξεχωριστά.