



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ  
ΟΠΤΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL-2

ΜΑΝΤΖΑΝΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS  
ENGINEERING

Department of Topography

Laboratory of Remote Sensing

THESIS

STUDY OF TIME SERIES MODELING TECHNIQUES OF  
SENTINEL – 2 OPTICAL REMOTE SENSING DATA

MANTZANAS KONSTANTINOS

JULY 2022

## Περίληψη

Σήμερα, υπάρχει αρκετά μεγάλος όγκος τηλεπισκοπικών δεδομένων λόγω των πολυάριθμων πολυφασματικών δεκτών που παρέχουν συνεχώς δεδομένα για κάθε σημείο στη Γη, για κάθε χρονική στιγμή. Η γνώση του δείκτη βλάστησης NDVI, κρίνεται αναγκαία ειδικά όταν αυτή εμπεριέχεται σε χρονοσειρές δεδομένων, στις οποίες δεν διατίθενται δεδομένα από ύπαρξης σύννεφων κυρίως τους χειμερινούς μήνες που λόγω αυτών αποκρύπτεται πολύτιμη πληροφορία. Κάποιες απεικονίσεις κρίνονται ως μη κατάλληλες με αποτέλεσμα να συναντάμε πολύ μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων τους καλοκαιρινούς μήνες σε σχέση με τους υπόλοιπους πιο ψυχρούς μήνες. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι ο προσδιορισμός των τιμών αυτών μέσα από την προσαρμογή (Fit approach) αρμονικών γραμμικών και μη μοντέλων σε μία χρονοσειρά δεδομένων. Το σύνολο των δεδομένων που εμπεριέχει απεικονίσεις έχον χρονική έκταση ενός έτους, από 26 Οκτωβρίου του 2018 έως τις 26 Οκτωβρίου του 2019. Εφαρμόστηκαν 2 μέθοδοι παρεμβολής και 3 διαφορετικά αρμονικά μοντέλα, από τα οποία τα δύο είναι γραμμικά μοντέλα και το τελευταίο είναι μη γραμμικό, προκειμένου να βρεθεί το καλύτερο μοντέλο που μπορεί να προσαρμοστεί στα παραπάνω δεδομένα. Τέλος, δημιουργήθηκαν συνθετικές απεικονίσεις για χρονικές στιγμές που ενώ ήταν ήδη γνωστές, θεωρήθηκαν ως άγνωστες για να υπολογιστεί η εγκυρότητα του μοντέλου και η αποχή του από τις πραγματικές τιμές.



**RSLab**

**Remote Sensing Laboratory  
National Technical University of Athens**

✓ Sensing ✓ Analytics ✓ Monitoring



## Abstract

Today, there is a fairly large volume of satellite data due to the numerous multispectral receivers that continuously provide for every point on Earth, for every given moment in time. The knowledge of the NDVI vegetation index is considered necessary especially when it is included in time series of data, in which no data is available due to the existence of clouds, mainly in the winter months, because of which valuable information is hidden. Some visualizations are judged to be unsuitable, resulting in discrepancy between the amount of data in the summer months and the winter months. The purpose of this paper is to determine these values through the Fit approach of harmonic linear and non-linear models to a time series of data. The dataset's timetable ranges from 26 October of 2018 up to 26 October. In our data, there has been implemented three different variations of harmonic models, 2 of those are linear and the last one is non – linear. Finally, synthetic images have been created, in times when we consider we didn't have any available data in order to compare them to the existing ones (True data).



**RSLab**

Remote Sensing Laboratory  
National Technical University of Athens

✓ Sensing ✓ Analytics ✓ Monitoring



## Ευχαριστίες

Η υπάρχον διπλωματική εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής (ΣΑΤΜ – ΜΓ).

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Καράντζαλο, που ήταν και ο επιβλέπωντας καθηγητής, για την δυνατότητα και την ευκαιρία που μου παρήσχε να εμβαθύνω στον τομέα της Τηλεπισκόπησης και πιο συγκεκριμένα στην χρήση μεγάλων δεδομένων μέσω χρονοσειρών, μέσω της έρευνας αυτής, αποκομίζοντας σημαντικές γνώσεις εις βάθος για την ακαδημαϊκή μου καριέρα και σταδιοδρομία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Βασίλη Τσιρώνη και τη Αθηνά Ψαλτά για την συνεχή βοήθεια τους και την διαρκή παροχή των γνώσεων τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τους ανθρώπους που με στήριξαν καθόλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και πιο συγκεκριμένα τους γονείς μου που δίχως την δικια τους στήριξη και βοήθεια δεν θα είχα την δυνατότητα να εκπονήσω την συγκεκριμένη έρευνα σε τέτοιος βάθος.



**RSLab**

Remote Sensing Laboratory  
National Technical University of Athens

✓ Sensing ✓ Analytics ✓ Monitoring



## Πίνακας περιεχομένων

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	1
1.1 Σκοπός .....	1
1.2 Αφορμή συγγραφής.....	2
1.3 Περιοχή μελέτης .....	2
<b>2. Θεωρητικό υπόβαθρο</b> .....	3
2.1 Βασικές Έννοιες - Ορισμοί.....	6
2.2 Χρονοσειρές.....	7
2.3 Πληροφορίες Sentinel-2.....	9
1. Γενικά Χαρακτηριστικά .....	10
2. Εφαρμογές.....	11
3. Σκοπός των αποστολών .....	11
4. Γενικά Χαρακτηριστικά .....	12
5. Ανάλυση .....	13
2.4 Σειρές Fourier .....	16
2.5 Αρμονικά Μοντέλα.....	17
2.4.1 Γραμμικό Μοντέλο 5 Παραμέτρων.....	17
2.4.2 Μη Γραμμικό Μοντέλο 5 Παραμέτρων .....	17
2.4.2.1 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης COBYLA .....	18
<b>3. Μεθοδολογία</b> .....	19
<b>4. Πειράματα</b> .....	24
<b>5. Αποτελέσματα</b> .....	40
<b>6. Συμπεράσματα</b> .....	49
<b>7. Βιβλιογραφία</b> .....	53

## Κατάλογος Πινάκων

2.5.1.1 Πίνακας Χωρικής Ανάλυσης Καναλιών(1).....	15
4.4.1 Πίνακας Παραμέτρων Κατηγορίας 23 .....	33
4.4.2 Πίνακας Παραμέτρων Κατηγορίας 25 .....	35
4.4.3 Πίνακας Παραμέτρων Κατηγορίας 27 .....	36
4.4.4 Πίνακας Παραμέτρων Κατηγορίας 30 .....	37
4.4.5 Πίνακας Παραμέτρων Κατηγορίας 33 .....	38
4.4.6 Πίνακας Συγκετρωτικών τιμών .....	38
5.1 Πίνακας τιμών εικονοστοιχείων .....	40
5.2 Πίνακας τιμών εικονοστοιχείων .....	40

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός

Μέσα από τη πάροδο του χρόνου, την εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και τον ολοένα αυξανόμενο αριθμό διάφορων δορυφόρων που εκτοξεύονται σε τροχιά γύρω από τη Γη, βελτιώνεται η διαθεσιμότητα, η ποιότητα αλλά και η συχνότητα με την οποία εξάγονται δεδομένα. Μία τέτοια πρόοδος βοηθάει αρκετά την χρήση χρονοσειρών για την εξαγωγή συμπερασμάτων αλλά και προσδιορισμό μεταβολών καθώς οι δορυφόροι μπορούν να προσφέρουν δεδομένα με μεγάλη ακρίβεια και ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Ένα από τα προβλήματα που παραμένουν, παραδόξως, είναι η απουσία απεικονίσεων σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, ειδικά τους χειμερινούς μήνες. Τα καιρικά φαινόμενα, λειτουργούν ως ένας καταλυτικός παράγοντας για την εξαγωγή δεδομένων και απεικονίσεων, παρόλο την εξέλιξη που υπάρχει στην τεχνολογία και στην δημιουργία μασκών σύννεφων ή αλγορίθμων που έχουν τη δυνατότητα να δώσουν την κρυμμένη πληροφορία. Για το λόγο αυτό στην συγκεκριμένη ερευνητική εργασία, αποσκοπείτε ο υπολογισμός συνθετικών τιμών για τον δείκτη βλάστησης NDVI για χρονικές στιγμές που δεν υπάρχουν διαθέσιμες απεικονίσεις, μέσα από προσαρμογή αρμονικών μοντέλων, γραμμικών και μη, σε μία χρονοσειρά δεδομένων. Η χρονοσειρά που μελετάται έχει έκταση ενός έτους, από τις 26 Οκτωβρίου του 2018 έως τις 26 Οκτωβρίου του 2019. Μέσα από τον υπολογισμό αυτών των συνθετικών τιμών υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα που βασίζονται σε ακριβή δεδομένα και όχι σε υποθέσεις λόγω της έλλειψης απεικονίσεων. Επίσης, είναι φυσικό οι συνθετικές τιμές που θα υπολογιστούν να έχουν απόκλιση από τις πραγματικές τιμές καθώς δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν 100%.

Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι η συχνότητα με την οποία οι δορυφόροι «σαρώνουν» την υπό μελέτη περιοχή. Οι δορυφόροι Sentinel 2A και Sentinel 2B που λειτουργούν ως ένα ζεύγος δορυφόρων έχουν την δυνατότητα να παρέχουν απεικονίσεις το λιγότερο ανά 5 ημέρες και για αυτό οι δορυφόροι αυτοί ενδείκνυνται για μελέτες και παρατηρήσεις μεταβολών βλάστησης. Ο μεγάλος αριθμός απεικονίσεων εξαλείφει τυχαία σφάλματα ή τιμές που μπορεί να έχουν εισαχθεί λανθασμένα κάνοντας το τελικό αποτέλεσμα εγκυρότερο και πιο αξιόπιστο, αλλά και επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στον ερευνητή για την επιλογή των καταλληλότερων απεικονίσεων καθώς πολλές φορές κάποιες απεικονίσεις είναι μη χρήσιμες λόγω του μεγάλου ποσοστού σύννεφων που αποκρύπτουν την πολύτιμη πληροφορία που χρειαζόμαστε. Για αυτό το λόγο στο τελικό πείραμα μπορεί να υπάρχει μικρότερος αριθμός δεδομένων από τα αρχικά αλλά είναι όλα κατάλληλα για χρήση.



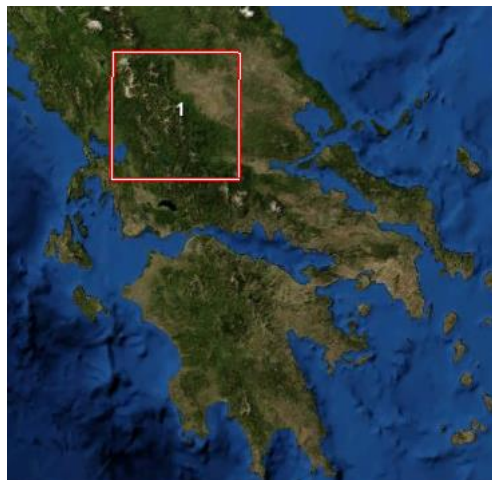
## 1.2 Αφορμή συγγραφής

Ένας τοπογράφος μηχανικός που θέλει να διεκδικεί κάθε αξίωμα στο να χαρακτηρίζεται ως «σύγχρονος» χρειάζεται να εξελίσσεται συνεχώς, να ενημερώνεται και να προσαρμόζεται στα νέα εργασιακά δεδομένα. Η ανάπτυξη του τομέα της Τηλεπισκοπήσης, έχει δώσει εναύσματα σε πολυάριθμους τοπογράφους σε όλο το κόσμο να μελετήσουν την Γήινη επιφάνεια μέσα από μία μη παρεμβατική μέθοδο, που δεν προϋποθέτει φυσική παρουσία στην υπό μελέτη περιοχή, μέσα από την χρήση των δορυφόρων. Ειδικά τον τελευταίο καιρό, σε παγκόσμιο επίπεδο, μηχανικοί κάθε ειδικότητας προσπαθούν να λύσουν το θέμα της έλλειψης απεικονίσεων λόγω καιρικών φαινομένων ή άλλων γεγονότων, για να έχουν τη δυνατότητα να εξαγουν σαφή συμπεράσματα για τις αλλαγές που συμβαίνουν πάνω στη γήινη επιφάνεια δίχως να χρειάζεται να βασίζονται σε αβάσιμες υποθέσεις. Για αυτό το λόγο έχουν γίνει πολλές προσεγγίσεις πρόβλεψης τιμών σε χρονικές στιγμές για τις οποίες δεν διατίθενται δεδομένα. Μία προσέγγιση, από την οποία βασίστηκε και αυτή η εργασία, έγινε από τους Lin Yan και David P. Roy οι οποίοι χρησιμοποίησαν την Fill and Fit προσέγγιση. Αναλυτικότερα, αποτελείται από δύο διαδοχικά βήματα, πρώτο βήμα είναι το «γέμισμα» των κενών μέσα από τη χρήση αλγορίθμων ενώ το δεύτερο βήμα είναι η «προσαρμογή» γραμμικών και μη αρμονικών μοντέλων σε κάθε εικονοστοιχείου απεικόνισης για το οποίο ήταν γνωστό πως υπήρχαν πάνω από 8 απεικονίσεις.

Στην συγκεκριμένη εργασία εφαρμόστηκε μόνο το 2<sup>ο</sup> σκέλος, μόνο η προσέγγιση της «προσαρμογής» (Fit), η προσαρμογή των αρμονικών μοντέλων στα δεδομένα με απώτερο σκοπό την πρόβλεψη τιμών του δείκτη βλάστησης NDVI. Σημαντικός παράγοντας κρίνεται το πλήθος των δεδομένων καθώς όπως φάνηκε, δεν μπορούσε να εξαχθεί σαφή και έγκυρο αποτέλεσμα αν υπήρχαν κάτω από 7 απεικονίσεις

## 1.3 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή που μελετήθηκε ανήκει στον Ελλαδικό χώρο και πιο συγκεκριμένα εντοπίζεται στην Στερεά Ελλάδα και εμπεριέχει περιοχές όπως είναι η Καρδίτσα, τα Τρίκαλα, τα Φάρσαλα, το Καρπενήσι και ένα μεγάλο μέρος της οροσειράς της Πίνδου. Μετά και την επεξεργασία που ακολουθήθηκε, επιλέχθηκε η ευρύτερη περιοχή του δήμου Καρδίτσας, στην οποία εντοπίζεται και ο θεσσαλικός κάμπος που είναι κατεξοχήν αγροτική περιοχή.



Εικόνα 1.1 Περιοχή μελέτης

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Βασικές Έννοιες - Ορισμοί

Σε αυτό το κομμάτι της ερευνητικής εργασίας, παρατίθενται κάποιοι ορισμοί προκειμένου να βοηθήσουν τον αναγνώστη να εξοικειωθεί με τις έννοιες που θα συναντηθούν σε όλη την έκταση της.

**Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing)** : Η επιστήμη παρατήρησης φαινομένων και χαρακτηριστικών από απόσταση. Η λέξη είναι σύνθετη και αποτελείται από το επίρρημα τηλε- και το ρήμα επισκοπέω/-ώ, δηλαδή παρατηρώ από μακριά. Συχνά αναφέρεται και ως «Τηλεανίχνευση».

Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Εταιρία Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης (ASPRS- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) ο επίσημος ορισμός της είναι :

«Η μέτρηση ή συλλογή πληροφοριών για κάποια ιδιότητα ενός αντικειμένου ή φαινομένου μέσω κάποιου οργάνου καταγραφής, το οποίο δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο ή φαινόμενο» (Colwell, 1983)

Τα **πλεονεκτήματα** της είναι πως δεν είναι παρεμβατική, διότι ο δέκτης που χρησιμοποιείται καταγράφει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ανακλά ή εκπέμπει το υπό μελέτη αντικείμενο. Επίσης, η συλλογή δεδομένων γίνεται με συστηματικό τρόπο εξαλείφοντας το δειγματοληπτικό σφάλμα που συχνά εμφανιζόταν σε επιτόπιες έρευνες. Τέλος, μπορεί να παρέχει ουσιώδεις καινούργιες επιστημονικές πληροφορίες και βιοφυσικά δεδομένα όπως είναι οι συντεταγμένες  $x$ ,  $y$ , υψόμετρο ή βάθος  $z$ , βιομάζα, θερμοκρασία και περιεκτικότητα σε υγρασία.

Οι **περιορισμοί** της είναι πως πολλές φορές υπάρχει μια υπερβολή σχετικά με τις δυνατότητες της τηλεπισκόπησης. Επιπλέον, τα ενεργητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται, εκπέμπουν τα ίδια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ενδεχομένως να λειτουργήσει παρεμβατικά και να επηρεάσει το υπό εξέταση φαινόμενο. Ένα συχνό φαινόμενο είναι να χάνεται η ακρίβεια βαθμονόμησης και το τελικό αποτέλεσμα να είναι μη βαθμονομημένα δεδομένα. Τέλος, η συλλογή δεδομένων μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να απαιτεί μεγάλο χρηματικό ποσό.

**Παθητικά συστήματα** : οι παθητικοί αισθητήρες, καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από το έδαφος (Shippert,2004)

**Ενεργητικά συστήματα** : οι ενεργητικοί αισθητήρες σαρώνουν το έδαφος με τεχνητή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και στη συνέχεια καταγράφουν και μετρούν την ισχύς της ακτινοβολίας που οπισθοσκοδάζεται προς τον αισθητήρα. Κάποια από τα πιο γνωστά ενεργητικά συστήματα είναι οι μικροκυματικοί σαρωτές(RADAR), οι σαρωτές λέιζερ(LIDAR) και τα ηχοβολιστικά συστήματα (SONAR).

**Αισθητήρας** : Τα περισσότερα όργανα καταγράφουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (EMR – ElectroMagnetic Radiation) που μεταδίδεται με ταχύτητα  $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  είτε άμεσα από το κενό του διαστήματος, είτε έμμεσα από ανάκλαση ή επανεκπομπή προς τον αισθητήρα.

**Φασματική διακριτική ικανότητα :** αναφέρεται στον αριθμό και τη διάσταση συγκεκριμένων διαστημάτων μήκους κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στα οποία είναι ευαίσθητο το όργανο.

**Χωρική διακριτική ικανότητα :** είναι το μέτρο της μικρότερης γωνιακής ή γραμμικής απόστασης ανάμεσα σε δύο αντικείμενα που μπορεί να διακριθεί από το σύστημα.

**Χρονική διακριτική ικανότητα :** αναφέρεται στην συχνότητα με την οποία ο αισθητήρας καταγράφει εικόνες από μία συγκεκριμένη περιοχή.

**Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα :** ορίζεται η ευαισθησία ενός τηλεπισκοπικού ανιχνευτή σε διαφορές στην ένταση των σημάτων που λαμβάνει καθώς καταγράφει την ισχύς της ακτινοβολίας που ανακλάται, εκπέμπεται ή οπισθοσκεδάζεται από το έδαφος. Αυτή είναι που καθορίζει τον αριθμό των διακριτών επιπέδων του σήματος.

**Δείκτης βλάστησης :** Είναι αδιάστατες ραδιομετρικές μετρήσεις που λειτουργούν ως δείκτες σχετικής αφθονίας της πράσινης βλάστησης και περιλαμβάνουν τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI), το ποσοστό φυτικής κάλυψης, την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, την πράσινη βιομάζα και την απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία.

Προκειμένου ένας δείκτης βλάστησης να είναι έγκυρος και ορθός χρειάζεται να :

1. Παρουσιάζει μέγιστη ευαισθησία ως προς τις βιοφυσικές παραμέτρους των φυτών ώστε αυτή η ευαισθησία να είναι διαθέσιμη για ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών συνθηκών βλάστησης και να διευκολύνει την αξιοπιστία και την βαθμονόμηση του δέκτη.
2. Να κανονικοποιεί ή να μοντελοποιεί τους εξωγενείς παράγοντες (γωνία του ήλιου, γωνία παρατήρησης του δέκτη) ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των τιμών των δεικτών για δεδομένα κατανεμημένα στο χώρο και στον χρόνο.
3. Να κανονικοποιεί επιδράσεις των ενδογενών παραμέτρων διαμόρφωσης της ψηφιακής τιμής της βλάστησης (διαφορετικό υπόβαθρο της φυτικής κόμης, της τοπογραφίας)
4. Να συνδυάζεται άμεσα με κάποια συγκεκριμένη μετρήσιμη βιοφυσική παράμετρο όπως είναι η βιομάζα, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας ή η απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία ως μέρος της προσπάθειας για την αξιοπιστία και τον έλεγχο της ποιότητας του δείκτη.

#### **Ιδιότητες Φασματικών περιοχών**

- **Μπλε - Blue (0.45 έως 0.52μm) :** Επιτρέπει την διείσδυση στις υδάτινες μάζες και συνεισφέρει σημαντικά στην ανάλυση της χρήσης γης, διάκριση των εδαφών και διαφόρων στα χαρακτηριστικά της βλάστησης.
- **Πράσινο – Green ( 0.52 έως 0.60 μm) :** Αντιστοιχεί στο ανακλώμενο πράσινο της υγιούς βλάστησης και είναι αυτό που συνδέει την περιοχή μεταξύ των φασματικών ζωνών του μπλε και του κόκκινου, που απορροφούνται από την χλωροφύλλη των φυτών.
- **Κόκκινο - Red ( 0.63 έως 0.69μm ) :** Είναι η σημαντικότερη φασματική ζώνη για την διάκριση της βλάστησης λόγω της μεγάλης απορρόφησης του συγκεκριμένου

μήκους κύματος από την χλωροφύλλη στην περίπτωση υγιούς βλάστησης. Ακόμα, είναι η ζώνη που βοηθάει στην οριοθέτηση των εδαφών και γεωλογικών σχηματισμών.

- **Κοντινό Υπέρυθρο** - Near Infrared ( 0.76 έως 0.90 μm ) : Χρησιμοποιείται καθώς έχει πολύ καλή απόκριση για την διάκριση του περιεχομένου της βιομάζας που αποτυπώνετε σε μία εικόνα. Επίσης, βοηθάει στην αναγνώριση των καλλιεργειών και στην μεγιστοποίηση της αντίθεσης μεταξύ γυμνού εδάφους - καλλιέργειας και μεταξύ εδάφους – υδάτινων μαζών.

**Δείκτης Φυλλικής επιφάνειας ( Leaf Area Index )** : είναι η συνολική μονόπλευρη ( ή το ήμισυ του συνόλου όλων των όψεων) πράσινη επιφάνεια φύλλων ανά μοναδιαία επιφάνεια εδάφους. Ο δείκτης αυτός κρίνεται αρκετά σημαντικός καθώς :

1. Ορίζει την επιφάνεια η οποία αλληλεπιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία και παρέχει μεγάλο μέρος του τηλεπισκοπικού σήματος
2. Είναι η επιφάνεια που είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα και για την ελευθέρωση οξυγόνου στην ατμόσφαιρα.

**Απλός λόγος (SR – Simple Ratio)** : Πρώτος ο Cohen ( 1991 ) τον υπέδειξε ως πραγματικό δείκτη βλάστησης. Ουσιαστικά είναι ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος ακτινοβολίας στο ερυθρό ( $\rho_{red}$ ) προς την ισχύ ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο( $\rho_{nir}$ ).

$$SR = \rho_{red} / \rho_{nir} \text{ (εξίσωση 2.1)}$$

Μέσω του δείκτη, παρέχονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την βιομάζα της βλάστησης ή το δείκτη φυλλικής επιφάνειας, καθώς παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις παραπάνω μεταβλητές.

**Δείκτης βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς – NDVI** : Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι από τους διαδομένους και χρησιμοποιήσιμους δείκτες στο πεδίο της τηλεπισκόπησης. Αναπτύχθηκε από τους Rouse et al(1974) που πρακτικά είναι ισοδύναμος με τον απλό λόγο, το οποίο συνεπάγεται πως δεν υπάρχει κάποια σκέδαση σε ένα γράφημα όπου γίνεται σύγκριση του απλού λόγου(SR) με τον δείκτη NDVI και κάθε τιμή του SR έχει μία σταθερή τιμή NDVI. Διαπιστώνεται πως ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς είναι μία μη γραμμική μετατροπή του απλού λόγου. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από -1 έως 1 και πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές με υψηλές θετικές τιμές βλάστησης είναι αυτές που συνδέονται με περιοχές με υγιή βλάστηση. Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται ως υδάτινες, καλυπτόμενες από σύννεφα ή χιόνι, εντοπίζεται να έχουν τιμές κοντά στο μηδέν ή αρνητικές τιμές λόγω της ελάχιστης ανακλώμενης ενέργειας στο εγγύς υπέρυθρο. Περιοχές που χαρακτηρίζονται ως βραχώδης ή «γυμνές» καθώς σε αυτές δεν παρουσιάζεται βλάστηση, έχουν τιμές κοντά στο μηδέν.

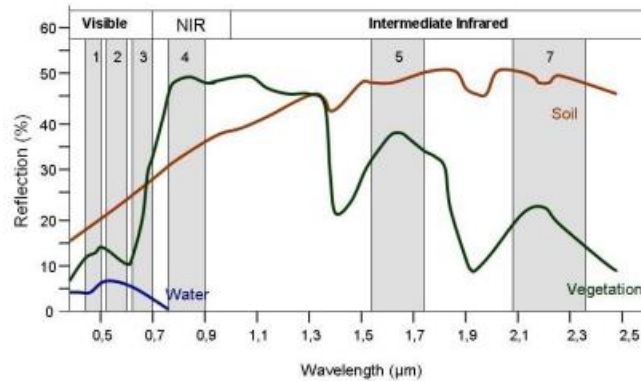
Ο παραπάνω δείκτης είναι σημαντικός για την τηλεπισκόπηση για τους παρακάτω λόγους :

- Καθιστά δυνατή την παρακολούθηση εποχικών και ετήσιων μεταβολών στην ανάπτυξη της βλάστησης.
- Η αναλογική σχέση μειώνει πολλές μορφές πολλαπλασιαστικού θορύβου, όπως είναι, διαφορές στον ηλιακό φωτισμο, σκιές από νέφη, τοπογραφικές μεταβολές.

Τα μειονεκτήματα που εντοπίζονται είναι τα εξής :

- Καθώς ο δείκτης βασίζεται στον απλό λόγο, δεν είναι γραμμικός με αποτέλεσμα να ενδέχεται υψηλή συσχέτιση με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας(LAI).
- Είναι αρκετά ευαίσθητος σε οποιαδήποτε μεταβολή διενεργηθεί στο υπόβαθρο της φυτικής κόμης( μεταβολές του εδάφους που διακρίνονται μέσα από την φυτική κόμη). Οι τιμές του δείκτη NDVI θα είναι ιδιαίτερα υψηλές όταν το υπόβαθρο είναι πιο σκούρο.
- Διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, η οπτική γωνία με την οποία υπολογίζεται ο δείκτης αλλά και η διακριτική ικανότητα που με την οποία έχουν παρθεί τα δεδομένα.
- Η υπό μελέτη δορυφορική εικόνα χρειάζεται να μην έχει καθόλου σύννεφα καθώς εισάγουν σφάλμα στον υπολογισμό του δείκτη.

Όπως προκύπτει, για να εξαχθούν οι σωστές τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI, χρειάζεται πολλές φορές να διατίθενται περισσότερες από μία απεικονίσεις για την ίδια περιοχή είτε σε διαφορετική χρονική στιγμή είτε από την δημιουργία μάσκας νεφών για να εξαλειφθεί και το εισαγόμενο σφάλμα από την ύπαρξη συννέφων.



Εικόνα 2.1 Γράφημα τιμών ανακλαστικότητας (Reflectance Values)

Η εξίσωση του δείκτη βλάστησης NDVI αναγράφεται παρακάτω :

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \text{ (εξίσωση 2.2)}$$

## 2.2 Χρονοσειρές

Μία χρονοσειρά αποτελείται από ένα σύνολο απεικονίσεων που καταγράφονται ανά γνωστά χρονικά διαστήματα με μία γνωστή συχνότητα. Η συχνότητα με την οποία γίνεται η καταγραφή τους είναι προκαθορισμένη και συνήθως είναι κατηγοριοποιημένη σε συγκεκριμένο αριθμό μερών, μηνών ή ετών. Στην περίπτωση μας, το χρονικό βήμα είναι τουλάχιστον 5 ημέρες, με κάποιες απεικονίσεις να έχουν διαφορετικό χρονικό βήμα λόγω της επεξεργασίας που ακολουθήθηκε παρακάτω στην διπλωματική εργασία.

Ένα από τα βασικά στοιχεία της χρονοσειράς είναι η τάση που χαρακτηρίζεται από την αύξηση ή μείωση των δεδομένων που είναι συνήθως δύσκολο να περιγράφεται μέσω γραμμικότητας. Το στοιχείο που παίζει σημαντικό ρόλο είναι η εποχικότητα καθώς συντελεί σημαντικό παράγοντα για την συγκέντρωση έγκυρων δεδομένων, λόγω του ότι λαμβάνονται υπόψη οι εποχικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, τους χειμερινούς μήνες, είναι λογικό να υπάρχουν πολύ λιγότερες απεικονίσεις σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες καθώς, τότε, εντοπίζονται μεγάλες αέρινες μάζες και αναλόγως την υπό μελέτη περιοχή. Τους καλοκαιρινούς μήνες, είναι ασυνήθιστο να εντοπίζονται πολλές απεικονίσεις που εμπεριέχουν μεγάλο ποσοστό νεφοκάλυψης καθώς τα δυσμενή καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι βροχές, τα χιόνια ή χαλαζοπτώσεις είναι απών. Μία περίπτωση στην οποία μπορεί τους «θερμούς» μήνες να μην υπάρχουν έγκυρα δεδομένα είναι λόγω της ύπαρξης καπνών από την ύπαρξη εστιών φωτιάς σε διπλανές περιοχές από την υπό εξεταζόμενη περιοχή ή καταιγίδων μικρής διάρκειας που όπως συν έπεσαν χρονικά με την επισκεψιμότητα του δορυφόρου.

Μία χρονοσειρά αποτελείται από ένα σύνολο δεδομένων για τα οποία η συλλογή τους γίνεται σε σταθερά χρονικά διαστήματα (Π.χ. μέρες, μήνες). Μέσω αυτών γίνεται ο προσδιορισμός της μεταβλητής  $Y$ , η οποία αποκαλείται χρονοσειρά ή χρονολογική σειρά. Είναι σημαντικό τα διαστήματα να είναι ίσα, δηλαδή να θεωρούνται ως σταθερά και αποτελούν το χρονικό βήμα ή το χρόνο δειγματοληψίας.

Μέσω της ανάλυσης μίας σειράς διαχρονικών εικόνων καθίσταται δυνατόν η συλλογή πληροφοριών προκειμένου να διευκολυνθεί η κατανόηση των διεργασιών που επηρεάζουν τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών. Άλλες χρήσιμες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι χρονοσειρές σε μεγάλο βαθμό είναι στην παρακολούθηση πυρκαγιών και φυσικών καταστροφών.. Μέσα από τη χρήση πολλαπλών και διαφορετικών μοντέλων επιλέγεται και προσαρμόζεται το καταλληλότερο μοντέλο μετά τα απαραίτητα πειράματα και δοκιμές. Οι μέθοδοι πρόβλεψης μέσω ποσοτικών μεθόδων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ([Data Analysis](#)) :

1. Αιτιοκρατικές (casual) : οι αιτιοκρατικές μέθοδοι αποσκοπούν στην εξήγηση της συμπεριφοράς μίας μεταβλητής συσχετίζοντας την με άλλες.
2. Οικονομετρικές (econometric) : Στηρίζονται αποκλειστικά στις ιστορικές τιμές της ίδιας υπό εξέταση μεταβλητής.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η χρονοσειρά έχει έκταση ενός έτους, από 26<sup>η</sup> Οκτωβρίου του 2018 έως 26<sup>η</sup> Οκτωβρίου του 2019 ενώ συνολικά εντοπίζονται πενήντα έξι(56) απεικονίσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η περιοχή που μελετάται, που είναι το δυτικό κομμάτι του Θεσσαλικού Κάμπου, χαρακτηρίζεται από συχνές βροχοπτώσεις ειδικά τους χειμερινούς μήνες, το οποίο αποτυπώνεται και στην χρονοσειρά λόγω του ότι εντοπίζονται

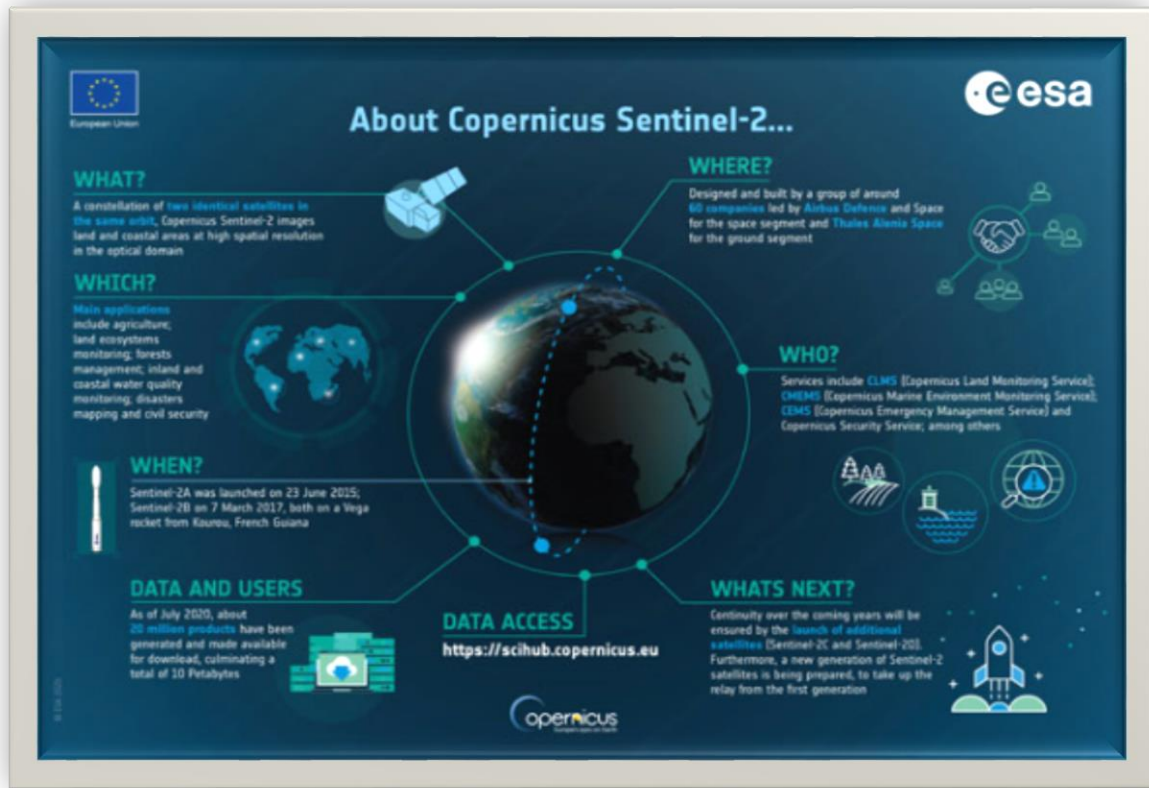
διαστήματα για τα οποία οι χρονικές αποστάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών απεικονίσεων είναι μεγαλύτερος από 5 ή 10 ημέρες. Προτού γίνει η απαλοιφή ορισμένων απεικονίσεων λόγω του χαρακτηρισμού τους ως μη κατάλληλες, το χρονικό βήμα μεταξύ δύο διαφορετικώς απεικονίσεων είναι τουλάχιστον 5 ημέρες. Αυτό που μελετήθηκε είναι οι τιμές του NDVI και οι αλλαγές του μέσα στη πάροδο του χρόνου για συγκεκριμένες καλλιέργειες. Προκειμένου οι απεικονίσεις της χρονοσειράς να παρέχουν την δυνατότητα έγκυρων αποτελεσμάτων, έγιναν ορισμένες διορθώσεις, όπως είναι η τοποθέτηση μίας μάσκας σύννεφων για την απαλλαγή τους.

Λόγω της απαλοιφής κάποιον απεικονίσεων, κρίνεται αναγκαία η σωστή διαχείριση του χρονικού βήματος που τοποθετείται στην χρονοσειρά καθώς πρέπει να διατηρείται πιστά προκειμένου να μην εισάγονται περαιτέρω σφάλματα. Για αυτό το σκοπό το βήμα διατηρείται σταθερό ανεξαρτήτως αν υπάρχει την συγκεκριμένη χρονική στιγμή κάποια απεικόνιση με το ίδιο χρονικό αποτύπωμα.

## 2.3 Πληροφορίες Sentinel-2

### 1. Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι δορυφόροι Sentinel ανήκουν σε μία αποστολή που προσφέρει απεικονίσεις ευρείας περιοχής με αρκετή μεγάλη ανάλυση διαθέτοντας πολλαπλές φασματικές υπογραφές, η οποία είναι μέρος του προγράμματος Copernicus, που ασχολείται με την παρακολούθηση καλλιεργειών, καλύψεων Γης, καλυπτόμενης επιφάνειας νερού καθώς και παρατηρήσεις πλωτών οδών και παράκτιων περιοχών.



Εικόνα 2.3.1 Στοιχεία Sentinel – (Sentinel-2)

Κάθε ένας από τους δορυφόρους Sentinel – 2 ζυγίζει περίπου 1.2 τόνους και έχουν εκτοξευθεί με τον Ευρωπαϊκό εκτοξευτή VEGA τα οποία διαθέτουν συνολική διάρκεια ζωής 7.25 χρόνια. Οι δύο δορυφόροι που έχουν εκτοξευθεί σε τροχιά είναι πανομοιότυποι σε απόσταση 180° μεταξύ τους σε μία ηλιακή – σύγχρονη τροχιά διατηρώντας ένα μέσο υψόμετρο της τάξης των 785 χιλιομέτρων (km). Η θέση κάθε δορυφόρου μετριέται μέσω ενός δέκτη διπλής συχνότητας GNSS (Global Navigation Satellite System) . Τα δεδομένα λαμβάνονται στο όργανο καθώς ο εκάστοτε δορυφόρος κινείται κατά μήκος της τροχιακής του διαδρομής ενώ η εισερχόμενη δέσμη φωτός χωρίζεται σε ένα φίλτρο και χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά μέρη εντός του οργάνου, ένα για τις ορατές και κοντινές υπέρυθρες ζώνες (VNIR) και ένα για τις ζώνες υπέρυθρων βραχέων κυμάτων (SWIR). Προκειμένου να γίνει ο φασματικός διαχωρισμός σε κάθε ζώνη σε μεμονωμένα μήκη κύματος, χρησιμοποιούνται λωρίδες με φίλτρα τοποθετημένα στην κορυφή των ανιχνευτών.



Το πολυφασματικό όργανο Multispectral Instrument (MSI) χρησιμοποιεί την τεχνολογία push-broom που λειτουργεί ως μία «σκούπα» που λειτουργεί συλλέγοντας σειρές δεδομένων εικόνας κατά μήκος της τροχιακής λωρίδας και χρησιμοποιεί την προς τα εμπρός κίνηση του διαστημικού σκάφους κατά μήκος της διαδρομής της τροχιάς προκειμένου να παρέχει νέες σειρές για απόκτηση. Το ανακλώμενο φως από την Γη, μέχρι το όργανο MSI συλλέγεται από ένα τηλεσκόπιο τριών κατόπτρων (M1, M2 και M3) και εστιάζεται μέσω ενός διαχωριστή δέσμης σε δύο διαφορετικά συγκροτήματα εστιακού επιπέδου.



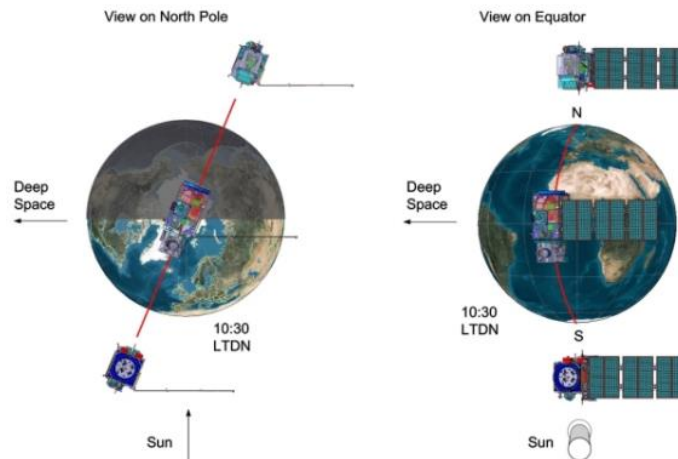
Εικόνα 2.3.2 Δορυφόρος Sentinel-2A ([SENTINEL-2 Satellite. \(Astrium GmbH, Germany\)](#))

Λαμβάνει συνολικά δείγματα σε 13 διαφορετικές φασματικές ζώνες, οι οποίες έχουν διαφορετικές χωρικές αναλύσεις που παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω :

- Τέσσερις ζώνες (4) στα 10 μέτρα.
- Έξι ζώνες (6) στα 20 μέτρα.
- 3 ζώνες (3) στα 60 μέτρα

Λόγω της μεγάλης κάλυψης Γης, της συχνής επισκεψιμότητας και τον μεγάλο όγκο δεδομένων που συσσωρεύεται, παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας μίας βάσης δεδομένων με γεναναφερμένα δεδομένα, δηλαδή είναι δυνατόν η δημιουργία γεωπληροφοριών σε τοπικό, εθνικό και διεθνή επίπεδο. Τα δεδομένα που συλλέγονται, έχουν σχεδιαστεί έτσι προκειμένου οι να παρέχεται η δυνατότητα στους χρήστες να τροποποιούν και να πειραματίζονται με αυτά. Κάποιες από τις θεματικές περιοχές που μπορούν οι χρήστες να πειραματιστούν είναι :

- Χωροταξία
- Αγροπεριβαλλοντική
- Παρακολούθηση νερών
- Παγκόσμια παρακολούθηση καλλιεργειών
- Παρακολούθηση φυσικών πόρων
- Παρακολούθηση δασών και βλάστησης



Εικόνα 2.3.4 Τροχιακή Απεικόνιση του Sentinel – 2([Sentinel-2 Overview](#))

## 2. Εφαρμογές

Η αποστολή Sentinel-2 προϋποθέτει την συνύπαρξη 2 “δίδυμων” δορυφόρων, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο Sentinel-2A και ο Sentinel-2B, οι οποίοι έχουν υψηλή συχνότητα επισκεψιμότητας που μπορούν να παράσχουν εικόνες με υψηλή ανάλυση που υποστηρίζουν το ευρύτερο πρόγραμμα Copernicus. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και διαχείριση εκτάκτων αναγκών, διαχείριση δασών, υδάτων, γεωργία ή και την ασφάλεια μερικών τροφίμων σε διεθνές επίπεδο.

## 3. Σκοπός των αποστολών

Μέσω του ζεύγους Landsat 2-A και 2-B, είναι δυνατόν η απόκτηση συστηματικών λήψεων υψηλής ανάλυσης πολυφασματικών εικόνων που συνδέονται με την ύπαρξη υψηλής συχνότητας επανεπίσκεψης που παρέχονται από το όργανο USGS Landsat Thematic Mapper. Με τη χρήση όλων των 13 καναλιών που διαθέτουν και την εδαφική κάλυψη της τάξης των 290 χιλιομέτρων, οι δορυφόροι αυτοί υποστηρίζουν ένα μεγάλο εύρος από εδαφικές μελέτες και προγράμματα, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για την δημιουργία καθαρών και έγκυρων απεικονίσεων . Τα δεδομένα αυτά, προσφέρονται στην ευρωπαϊκή διαστημική υπηρεσία για να προσδιορίζουν τις αλλαγές σε καλύψεις γη.

#### 4. Τύποι προϊόντων

Τα προϊόντα που εξάγονται είναι μία συλλογή από στοιχειώδους κόκκους σταθερού μεγέθους σε μία ενιαία τροχιά. Ένας κόκκος είναι η ελάχιστη αδιαίρετη κατανομή ενός προϊόντος που εμπεριέχει όλες τις φασματικές ζώνες.

Τα προϊόντα χωρίζονται σε δύο επίπεδα που είναι τα εξής :

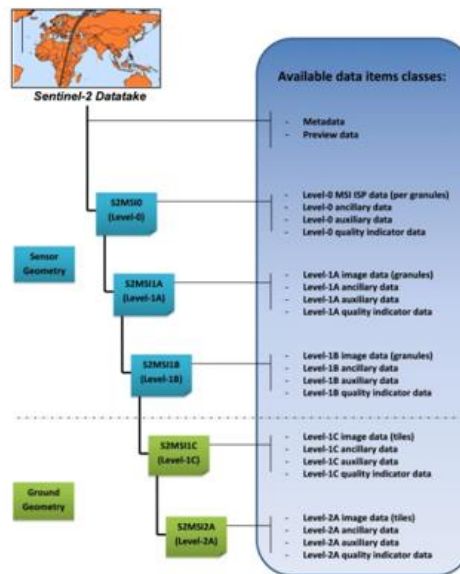
1. Επίπεδο 1C – Level 1C
2. Επίπεδο 2A – Level 2A

Name	High-level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution	600 MB (each 100x100 km <sup>2</sup> )
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectance in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution and generation on user side (using Sentinel-2 Toolbox)	800 MB (each 100x100 km <sup>2</sup> )

Πίνακας 2.3.1 Επίπεδα προϊόντων([Sentinel-2 MSI Spatial Resolution](#))

Για τα επίπεδα αυτά, οι κόκκοι ή πλακίδια είναι ορθοεικόνες με διαστάσεις 100x100 χλμ<sup>2</sup> στην προβολή του συστήματος UTM/WGS84.

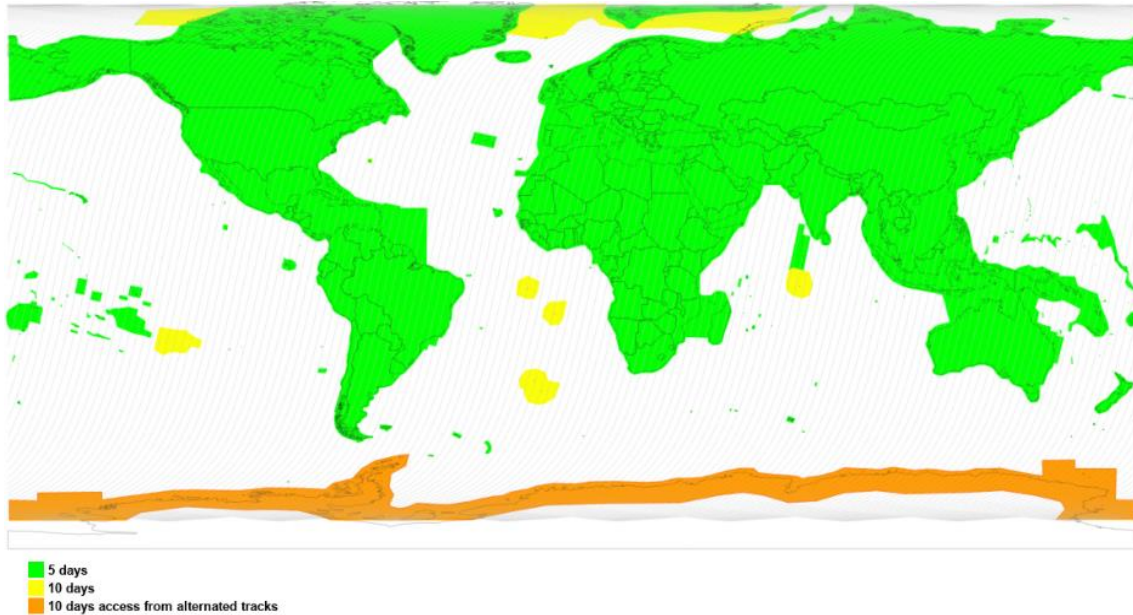
Το σύστημα UTM είναι αυτό που νοητά χωρίζει την Γη σε 60 ζώνες με κατακόρυφο πλάτος 6 μοιρών γεωγραφικού μήκους και οριζόντιο πλάτος 8 μοιρών γεωγραφικού πλάτους. Τέλος αρκετά συχνά μπορεί να υπάρχει αλληλοκάλυψη μεταξύ των πλακιδίων για λόγους επαλήθευσης και εξάλειψης σφαλμάτων.



Εικόνα 2.3.6 Στάδια επεξεργασίας δεδομένων([Sentiel-2 MSI : User Guide](#))

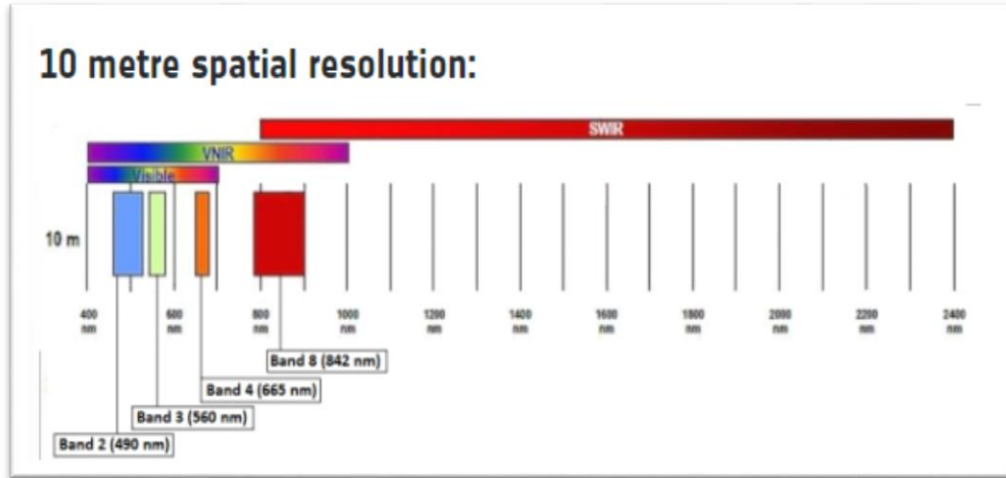
## 5. Ανάλυση

Η **χρονική ανάλυση** που διαθέτει ο εκάστοτέ δορυφόρος Sentinel-2 είναι 10 ημέρες, ενώ λόγω της αλληλοκάλυψης των δύο «δίδυμων» δορυφόρων η επισκεψιμότητα τους είναι ανά 5 ημέρες. Υπό προϋποθέσεις και ανάλογα την επιλογή περιοχής και παραμέτρων η εξαγωγή δεδομένων μπορεί να συμβεί και νωρίτερα από τις πέντε (5) ημέρες. Η κάλυψη που έχει είναι για όλες τις εκτάσεις γης μεταξύ γεωγραφικού πλάτους 56° νότια και 83° βόρεια, για την Μεσόγειο θάλασσα αλλά και για όλες τις κλειστές θάλασσες (Π.χ. Κασπία θάλασσα), όλα τα Ευρωπαϊκά νησιά και για ύδατα μέχρι 20 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή.



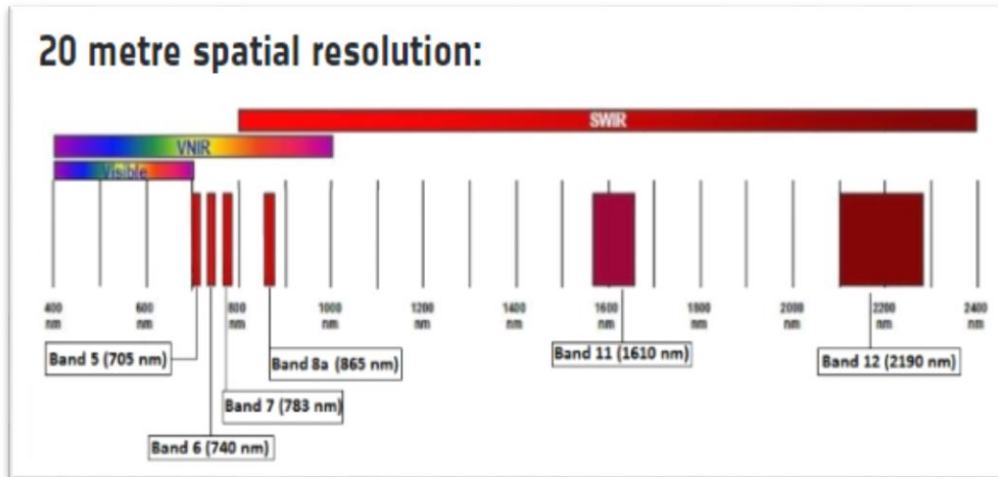
Εικόνα 2.5.1 Μοντέλο συχνότητας κάλυψης του Sentinel – 2([Sentinel-2 Revisit Coverage](#))

Η **χωρική ανάλυση** τους εξαρτάται από το κανάλι το οποίο είναι υπό εξέταση. Πιο αναλυτικά, από τα δεκατρία (13) κανάλια που διαθέτει ο δορυφόρος, τα κανάλια B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) και B8 (842 nm) έχουν χωρική ανάλυση της τάξης των δέκα μέτρων (10m).

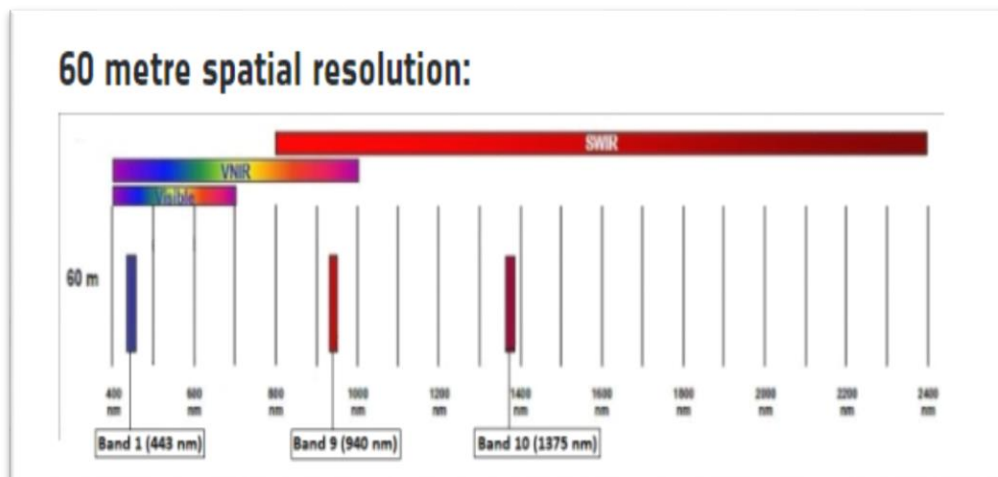


Εικόνα 2.5.2 Χωρική Ανάλυση 10m.([Sentinel-2 Spatial Resolution](#))

Με είκοσι μέτρα (20m) χωρική ανάλυση είναι τα κανάλια B5(705 nm), B6(740 nm), B7(783 nm), B11(1610 nm) και B12(2190 nm) ενώ τα υπόλοιπα B1(443 nm), B9(940 nm) και B10(1375 nm) έχουν χωρική ανάλυση εξήντα μέτρων (60m).



Εικόνα 2.5.3 Χωρική Ανάλυση 20m.([Sentinel-2 Spatial Resolution](#))



Εικόνα 2.5.4 Χωρική Ανάλυση 60m.([Sentinel-2 Spatial Resolution](#))

Η **ραδιομετρική ανάλυση** που διαθέτει ο Landsat-2 είναι 12-bit, που σημαίνει ότι δίνεται η δυνατότητα η εικόνα να έχει ένα εύρος τιμών φωτεινότητας από 0 έως 4.095. Η ραδιομετρική ακρίβεια είναι λιγότερο από 5% και είναι εξαρτώμενη από την αναλογία σήματος προς θόρυβο ( Signal to Noise Ration SNR) για τον ανιχνευτή.

Band Number	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Lref (Reference Radiance)	SNR @ Lref
2	490	65	128	154
3	560	35	128	168
4	665	30	108	142
8	842	115	103	172
5	705	15	74-5	117
6	740	15	68	89
7	783	20	67	105
8 A	865	20	52.5	72
11	1610	90	4	100
12	2190	180	1.5	100
1	443	20	129	129
9	945	20	9	114
10	1375	30	6	50

Πίνακας 2.5.1.1 Χωρική Ανάλυση Καναλιών ([Sentinel-2 Radiometric Resolution](#))

## 2.4 Σειρές Fourier

Οι σειρές Fourier χρησιμοποιήθηκαν από τον Γάλλο μαθηματικό Fourier τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, ο οποίος προσπαθούσε να μελετήσει την διάδοση της θερμότητας.

Στον κόσμο των μαθηματικών, μία σειρά Fourier, είναι ένας τρόπος περιγραφής ενός κύματος που μοιάζει να λειτουργεί ως ένας συνδυασμός απλών ημιτονοειδών κυμάτων. Πιο αναλυτικά, μία σειρά αποσυνθέτει κάθε περιοδική συνάρτηση ή περιοδικό σήμα στο άθροισμα ενός συνόλου απλών συναρτήσεων ταλάντωσης, είτε ημιτόνων είτε συνημιτόνων. Η πιο βασική ιδιότητα μίας ημιτονοειδούς καμπύλης της μορφής  $f(x) = \sin(\omega x + \phi)$  είναι η περιοδικότητα της και προκύπτει πως είναι δυνατόν μία περιοδική συνάρτηση όπως είναι η  $f(x)$  να γραφτεί σαν άθροισμα τέτοιων στοιχειωδών περιοδικών συναρτήσεων, όπως αποδείχθηκε από τον *Dirichlet* και η εξίσωση είναι η εξής :

$$f(t) = a_0/2 + \sum_{m=1}^{\infty} a_n \sin x(n\omega x - \phi_n) \quad (1)$$

Αν τώρα υπάρχουν πολλά προβλήματα συνοριακών τιμών για τα οποία πρέπει να αναπτυχθεί μία λύση σε τριγωνομετρική σειρά, τότε είναι επιθυμητό να αναπτυχθεί μία περιοδική συνάρτηση, της οποίας οι όροι είναι τριγωνομετρικές συναρτήσεις ημιτόνων και συνημιτόνων . Η μορφή που επιζητείται είναι οι εξής :

$$f(t) = \sum_{m=0}^{\infty} [a_n \cos(A_n x) + b_n \sin(B_n x)] \quad (2)$$

Η παραπάνω συνάρτηση είναι προφανώς περιοδική και ορίζεται σε ένα διάστημα  $(-L, L)$ . Προκειμένου η παραπάνω σχέση να ισχύει θα πρέπει :

$$\cos(A_n x) = \cos[A_n(x + 2L)] \text{ και } \sin(B_n x) = \sin [ B_n (x + 2L)]$$

Αναλύοντας περαιτέρω τις παραπάνω εξισώσεις και διαιρώντας τον σταθερό όρο με για λόγους ομοιομορφίας, η  $f(x)$  παίρνει την μορφή :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{m=0}^{\infty} [a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + \beta_n \sin \frac{n\pi x}{L}] \quad (3)$$

Επόμενο βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός των παραγόντων  $a_n$ ,  $\beta_n$  και  $a_0$ . Υποθέτοντας πως η παραπάνω συνάρτηση συγκλίνει ομοιόμορφα, τότε ο σταθερός όρος  $a_0$  προσδιορίζεται από την ολοκλήρωση ως προς  $x$  με την (3) και καταλήγει πως ο τύπος που υπολογίζει τον σταθερό όρο είναι  $a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) dx$ . Έτσι, ο σταθερός όρος  $a_0/2$  ισούται με την μέση τιμή της  $f(x)$  στο διάστημα μίας περιόδου.

Για να υπολογιστούν οι συντελεστές  $a_n$  αν πολλαπλασιαστεί η (3) με  $\cos(\frac{n\pi x}{L})$  και τέλος ολοκληρώνεται στο διάστημα  $(-L, L)$ . Προκύπτει πως οι συντελεστές  $a_n$  και  $\beta_n$  βρίσκονται από τους εξής τύπους :

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \text{ και } \beta_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx$$

## 2.5 Αρμονικά Μοντέλα

### 2.5.1 Γραμμικό μοντέλο με 5 και 7 παραμέτρους

$$\text{Ο μαθηματικός τύπος είναι } f(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \left( a_m \cos \frac{2\pi t}{L} + b_m \sin \frac{2\pi t}{L} \right)$$

όπου  $f(t)$  είναι η μοντελοποιημένη δορυφορική ανάλυση ή ο δείκτης βλάστησης για μία δεδομένη pixel (D.P. Roy, L. Yan) <sup>(1)</sup>. Το  $a_0$  είναι ένας συντελεστής της σειράς Fourier που περιγράφει τη μέση τιμή της  $f(t)$  σε μία χρονική σειρά, που ορίζεται από το  $a_m$  μέχρι το  $b_m$ , με αρμονική συνιστώσα  $m$  με  $M$  να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του ενός (1),  $t$  είναι η χρονική συνιστώσα ενώ  $L$  είναι η διάρκεια της χρονικής περιόδου που έχει οριστεί. Τα δεδομένα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συλλέγονται με ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα λόγω έλλειψης δεδομένων ή ύπαρξη μεγάλου ποσοστού νεφοκάλυψης. Όσον αφορά την συνιστώσα  $M$ , χρειάζεται να αποφεύγεται η χρήση μεγάλων τιμών καθώς δημιουργείται το πρόβλημα της υπερπροσαρμογής το οποίο με τη σειρά του προκαλεί ταλαντώσεις που γίνονται εντονότερες αν εμπιερέχεται θόρυβος ή αν υπάρχουν χρονικά κενά στην σειρά ή λόγω αλλαγών στις χρήσεις γης. Προκειμένου να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα, η επιλογή της συνιστώσας  $M$  κρίνεται αρκετά σημαντική για την εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων και για αυτό χρειάζεται να υπάρχουν τουλάχιστον 3 φορές περισσότερα από τις παραμέτρους, έγκυρα και αξιόπιστα δεδομένα. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν οι τιμές  $M = 2$  και  $M = 3$  για την εξέταση αποτελεσμάτων μέσα από δύο διαφορετικά γραμμικά μοντέλα.

### 2.5.2 Μη γραμμικό μοντέλο με 5 παραμέτρους

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες τα γραμμικά μοντέλα αποτυγχάνουν να προσαρμόσουν αξιόπιστα τις χρονοσειρές καθώς υπάρχουν μη γραμμικές παραλλαγές που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν με την γραμμική προσέγγιση. Τα μη γραμμικά μοντέλα είναι πιο περίπλοκα από τα γραμμικά λόγω των τριγωνομετρικών μεταβλητών που εμπιερύχονται. Η εξίσωση του μη γραμμικού μοντέλου είναι η εξής :

$$f(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{L} t + \varphi + \alpha \cdot \sin \left( \frac{2\pi}{L} t + \varphi \right) \right]$$

Όπου  $f(t)$  η μοντελοποιημένη δορυφορική ανάκλαση ή δείκτης βλάστησης, για την προκειμένη περίπτωση για μία δεδομένη θέση εικονοστοιχείου,  $a_0$  είναι το μέσο του  $f(t)$  για την χρονοσειρά που εξετάζεται, το  $a_1$  διορθώνει την απόκλιση από τον ετήσιο μέσο όρο, το  $\varphi$  είναι η ετήσια φάση που συνδέεται με την εποχικότητα του κύματος, το  $\alpha$  είναι αυτό που ρυθμίζει το σχήμα του κύματος για  $\alpha$  μεγαλύτερο του μηδενός,  $t$  είναι ο χρόνος και  $L$  είναι το συνολικό χρονικό μήκος της περιόδου. Το μη γραμμικό μοντέλο έχει 5 παραμέτρους αλλά είναι αρκετοί προκειμένου να εξάγουν ίδια ή και καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα γραμμικά μοντέλα. (D.P. Roy, L. Yan) <sup>(1)</sup>.

Για την εύρεση του καλύτερου μη γραμμικού μοντέλου έγινε πειραματισμός με διάφορες μη γραμμικές βελτιστοποιήσεις.



Αυτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

#### 2.5.2.1 COBYLA

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τον M. J. D. Powell (2007) και είναι μια περιορισμένη βελτιστοποίηση με γραμμική προσέγγιση, είναι μία μέθοδος αριθμητικής βελτιστοποίησης για περιορισμένα προβλήματα όπου η παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης δεν είναι γνωστή. Πρακτικά, ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει το διάνυσμα  $x$  που έχει την ελάχιστη ή μέγιστη  $f(x)$  δίχως να γνωρίζει την κλίση της. (COBYLA)

Ο αλγόριθμος λειτουργεί με επαναληπτική προσέγγιση του πραγματικού περιορισμένου προβλήματος βελτιστοποίησης με προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Κατά την διάρκεια μίας επανάληψης, ένα προσεγγιστικό πρόβλημα γραμμικού σχεδιασμού λύνεται προκειμένου να ληφθεί ένας μοναδικός υποψήφιος για να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Η λύση που προκύπτει, αξιολογείται χρησιμοποιώντας τις αρχικές συναρτήσεις στόχου και περιορισμού δίνοντας ένα νέο σημείο δεδομένων στο χώρο βελτιστοποίησης. Οι πληροφορίες που εξάγονται χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του προβλήματος του γραμμικού προγραμματισμού κατά προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου. Όταν η λύση δεν είναι δυνατόν να βελτιωθεί, τότε το μέγεθος του βήματος μειώνεται ενώ όταν αυτό γίνει αρκετά μικρό, τότε ο αλγόριθμος τελειώνει.

### 3. Μεθοδολογία

Η αρχική κατάσταση των δεδομένων είναι τα πρωταρχικά δεδομένα που εξάγονται από τον Sentinel – 2 και χαρακτηρίζονται ως «ωμά» (raw data) και χρήζουν αρκετές επεξεργασίες προκειμένου βρεθούν σε μία κατάσταση στην οποία θα μπορούν να εξαχθούν έγκυρα αποτελέσματα. Για τις απεικονίσεις, διατίθενται σε 11 διαφορετικά κανάλια.

Από όλα τα διαθέσιμα κανάλια επιλέχθηκαν τα κανάλια B2, B3, B4 και B8. Οι απεικονίσεις που επιλέχθηκαν έχουν μέγεθος 10.980x10.980 εικονοστοιχεία και διαθέτουν διακριτική ικανότητα της τάξης των 10m.

Επόμενο βήμα στην επεξεργασία δεδομένων είναι ο προσδιορισμός της περιοχής μελέτης για την οποία επιλέχθηκε να έχει μέγεθος 1000x1000 εικονοστοιχεία καθώς το αρχικό μέγεθος κρίθηκε αρκετά μεγάλο και δεν υπήρχε κάποιος παραπάνω λόγος να διατηρηθεί ολόκληρη η απεικόνιση. Λόγω της μείωσης του μεγέθους, διατηρώντας βέβαια την διακριτική ικανότητα της απεικόνισης, η επεξεργασία της χρονοσειράς γίνεται αρκετά πιο εύκολη και γρήγορη καθώς δεν απαιτείται αρκετή υπολογιστική δύναμη. Η περιοχή που επιλέχθηκε κρίθηκε ως κατάλληλη καθώς σε αυτήν εντοπίζονταν αρκετές καλλιεργήσιμες εκτάσεις, αστική περιοχή που είναι αρκετά ευδιάκριτη αλλά και περιοχές οι οποίες είναι φανερό πως μπορούν να κριθούν ως ορεινές. Στην συγκεκριμένη έκταση της, δεν εντοπίζεται κάποια μεγάλη υδάτινη μάζα καθώς κρίθηκε πως δεν χρειάζεται για την μελέτη του δείκτη NDVI αλλά και πως στην συνολική έκταση της απεικόνισης, δεν υπήρχε καμία κοντινή μεγάλη υδάτινη μάζα σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή που επιλέχθηκε.

Έπειτα, τοποθετήθηκε μία μάσκα σύννεφων CLM (cloud mask), η οποία εντοπίζει νεφελώδης περιοχές και εικονοστοιχεία χωρίς σύννεφα. Η μάσκα έχει την δυνατότητα να εντοπίσει πυκνά σύννεφα αλλά και να τα διαχωρίσει με βάση τον τύπο του νέφους. Προκειμένου να επιλεχθεί η παραπάνω περιοχή από την συνολική απεικόνιση, συμπεριλήφθηκε και ο παράγοντας της νεφοκάλυψης προκειμένου να υπάρχουν όσο τον δυνατόν περισσότερες έγκυρες απεικονίσεις. Η δυσκολία έγκειται κυρίως τους χειμερινούς μήνες καθώς ο καιρός χαρακτηρίζεται, σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες, ως πιο νεφελώδης λόγω των καιρικών φαινομένων που διαδραματίζονται με αποτέλεσμα πολλές απεικονίσεις να κρίνονται ως μη κατάλληλες.

Συνολικά υπάρχουν 56 διαφορετικά χρονικά απεικονίσεις, με τη λεπτομέρεια όμως πως ο αριθμός τους μειώνεται ανάλογα τη θέση του εικονοστοιχείου και την ύπαρξη σύννεφων στην περιοχή. Πιο αναλυτικά, κάποια εικονοστοιχεία θα έχουν περισσότερες απεικονίσεις σε σχέση με άλλα καθώς σε κάποια δεν θα είναι δυνατόν να καταγραφεί πληροφορία και στις 56 απεικονίσεις με αποτέλεσμα ο αριθμός τους να κυμαίνεται. Ο ελάχιστος αριθμός απεικονίσεων που εντοπίστηκε για τα εικονοστοιχεία που επιλέχθηκαν είναι 34, αριθμός ικανοποιητικός που επιτρέπει την σωστή λειτουργία και εφαρμογή των αρμονικών μοντέλων καθώς για το γραμμικό μοντέλο των 5 παραμέτρων χρειάζονται τουλάχιστον 15 απεικονίσεις – δεδομένα ενώ για το γραμμικό μοντέλο των 7 παραμέτρων απαιτούνται τουλάχιστον 21 απεικονίσεις.

Συνεχίζοντας, προσδιορίστηκαν οι κατηγορίες/χρήσεις γης που ανήκει κάθε εικονοστοιχείο με σκοπό να μπορεί να γίνει μία ακριβής ομαδοποίηση αυτών που ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Μέσω της παράλληλης διαδικασίας εύρεσης θέσεων και κατηγοριών, έγινε η κατάλληλη επιλογή των θέσεων των εικονοστοιχείων προκειμένου αυτά να ανήκουν το κάθε ένα στην ίδια κατηγορία

αλλά ταυτόχρονα, να βρίσκονται σε διαφορετικές πολυγωνικές περιοχές προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποικιλομορφία στις τιμές των δεδομένων. Τα εικονοστοιχεία που είναι υπό διερεύνηση, δεν εντοπίζονται σε κοινά πολύγωνα καθώς μία τέτοια επιλογή θα εισήγαγε σφάλμα στον συνολικό σύνολο δεδομένων καθώς θα υπήρχαν πανομοιότυπα αποτελέσματα και δεν θα έβγαιναν σαφή συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό, σε ορισμένες κατηγορίες έχουν εξαχθεί περισσότερα εικονοστοιχεία σε σχέση με άλλες, ανάλογα και τα διαφορετικά πολύγωνα/περιοχές που βρέθηκαν στην υπό μελέτη περιοχή. Οι κατηγορίες που επιλέχθηκαν είναι οι εξής :

- ✚ Κατηγορία 1 – Rural Area(Αστική περιοχή)
- ✚ Κατηγορία 23 – Nut Trees (καρυδιές)
- ✚ Κατηγορία 25 - Cereals (Σιτηρά)
- ✚ Κατηγορία 27 – Maize (αραβόσιτος – καλαμπόκια)
- ✚ Κατηγορία 30 – Pulses (όσπρια)
- ✚ Κατηγορία 33 – Grass Fodders (γρασίδι - χορτονομές)
- ✚ Κατηγορία 35 – Fallow (περιοχές σε αγρανάπαυση)

Οι περιοχές αυτές, επιλέχθηκαν καθώς κρίθηκαν ως κατάλληλες για μελέτη και στην επιλεγμένη έκταση της περιοχής είναι αυτές που βρέθηκαν με τα περισσότερα πολύγωνα. Όλες οι κατηγορίες είναι σχετικές με την βλάστηση πέρα από την αστική περιοχή που επιλέχθηκε για να εξαχθούν σφαιρικά συμπεράσματα.

Εφόσον επιλέχθηκε το κατάλληλο πλήθος εικονοστοιχείων για τις διαφορετικές κατηγορίες, έγινε εφαρμογή δύο μεθόδων παρεμβολής. Η πρώτη μέθοδος παρεμβολής είναι ο *Akima1DInterpolator*, η οποία δημιουργεί μία καμπύλη που χρησιμοποιεί μία συνεχώς διαφοροποιήσιμη υπό- συνάρτηση, που διέρχεται από κάθε ένα σημείο και φαίνεται ως φυσική και ομαλή. Έπειτα εφαρμόστηκε και η δεύτερη μέθοδος παρεμβολής που είναι *UnivariateSpline*, η οποία είναι μία μονοδιάστατη (1-D) που χρησιμοποιεί μία συνάρτηση εξομάλυνσης η οποία ταιριάζει σε μία δεδομένη ομάδα σημείων δεδομένων. Σημαντικό παράγοντα διαδραματίζει ο αριθμός των κόμβων (σημείων) που χρειάζεται να συμπεριλάβει στον υπολογισμό και προσδιορισμό της καμπύλης. Σε σχέση με την πρώτη μέθοδο, δεν περνάει ακριβώς πάνω από τα σημεία αλλά δημιουργεί μία καμπύλη που περνάει ενδιάμεσα από τα σημεία και έχει ένα ομαλό και φυσικό σχήμα.

Έπειτα, έγινε εφαρμογή των αρμονικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, τα τρία διαφορετικά αρμονικά μοντέλα σε επίπεδο εικονοστοιχείου για τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς κρίθηκε πως η εφαρμογή τους σε ολόκληρη απεικόνιση θα απαιτούσε πολύ περισσότερο χρόνο και υπολογιστική δύναμη, δίχως να δώσει κάποιο συγκεκριμένο αποτέλεσμα.

Εφαρμόστηκαν με τη σειρά :

- I. Γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων
  - ✓ Έγινε υπολογισμός του δείκτη βλάστησης NDVI για όλες τις απεικονίσεις
  - ✓ Δημιουργία λίστας με χρονικό βήμα 5 ημερών για τον προσδιορισμό του χρονικού αποτυπώματος κάθε απεικόνισης.

- ✓ Ταύτιση του χρονικού αποτυπώματος με τον εκάστοτε δείκτη βλάστησης NDVI και απαλοιφή των μηδενικών στοιχείων από το σύνολο των δεδομένων όσον αφορά το χρονικό βήμα.
  - ✓ Ορισμός  $m = 2$
  - ✓ Υπολογισμός του  $a_0, a_n$  και  $\beta_n$
  - ✓ Υπολογισμός του  $f(t)$
  - ✓ Πρόσθεση εκ νέου σε μία συνάρτηση  $f(t)$ , τον μέσο όρο της απόκλισης μεταξύ της  $f(t)$  που υπολογίστηκε με τις τιμές του ndvi για κάθε απεικόνιση προκειμένου να εξαλειφθεί το σφάλμα του σταθερού όρου.
  - ✓ Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων
- II. Γραμμικό μοντέλο 7 παραμέτρων
- ✓ Ακολουθήθηκε ίδια ακριβώς διαδικασία με του γραμμικού μοντέλου 5 παραμέτρων με την μόνη διαφορά πως το  $m$  ορίστηκε ίσο με 3 για να υπάρχουν 7 παράμετροι που υπολογίζονται.
- III. Μη γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων
- ✓ Έγινε υπολογισμός του δείκτη βλάστησης NDVI για όλες τις απεικονίσεις
  - ✓ Δημιουργία λίστας με χρονικό βήμα 5 ημερών για τον προσδιορισμό του χρονικού αποτυπώματος κάθε απεικόνισης.
  - ✓ Ταύτιση του χρονικού αποτυπώματος με τον εκάστοτε δείκτη βλάστησης NDVI και απαλοιφή των μηδενικών στοιχείων από το σύνολο των δεδομένων όσον αφορά το χρονικό βήμα.
  - ✓ Τυχαία επιλογή τιμών για το διάνυσμα  $a_0$
  - ✓ Επίλυση της εξίσωσης του μη γραμμικού μοντέλου τοποθετώντας τον εκάστοτε αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
  - ✓ Υπολογισμός του καλύτερου διανύσματος τιμών
  - ✓ Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων
  - ✓ Επανάληψη της διαδικασίας προκειμένου να τοποθετηθεί στο αρχικό διάνυσμα, που οι αρχικές τιμές ήταν τυχαίες, οι καλύτερες τιμές που βρέθηκαν προκειμένου το μοντέλο να είναι πιο έγκυρο και να προσαρμόζεται καλύτερα στο σύνολο των δεδομένων.
  - ✓ Τέλος της διαδικασίας όταν δεν μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη τιμή στο διάνυσμα.

Στην εφαρμογή του μη γραμμικού μοντέλου, χρειάστηκε να εξετασθούν πολυάριθμοι διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης προκειμένου το μοντέλο να προσαρμόζεται καλύτερα στο σύνολο των δεδομένων και στις τιμές των δεικτών βλάστησης που διαθέτει κάθε εικονοστοιχείο για κάθε χρονική στιγμή. Αναφορικά, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

- Powell ([1](#)) : Προτάθηκε από τον Michael J. D. Powell και χρησιμοποιείται για την εύρεση του τοπικού ελάχιστου μίας συνάρτησης, χωρίς όμως η συνάρτηση που εξετάζεται να μην είναι διαφοροποιήσιμη.

- CG (2) : Η μέθοδος συζυγούς κλίσης προγραμματίστηκε από τους Magnus Hestenes και Eduard Stiefel και είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.
- COBYLA (3)
- BFGS (4) : ο αλγόριθμος έχει ονομαστεί από τους Charles George Broyden, Roger Fletcher, Donald Goldfarb and David Shanno και είναι μία επαναληπτική μέθοδος για την επίλυση μη περιορισμένων μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.
- L-BFGS-B (5) : είναι ένα αλγόριθμος βελτιστοποίησης που ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων BFGS χρησιμοποιώντας περιορισμένη ποσότητα μνήμη υπολογιστή καθώς χαρακτηρίζεται ως BFGS περιορισμένης μνήμης.
- SLSQP (6) : Είναι ένα βελτιστοποιητής προγραμματισμού διαδοχικών ελάχιστων τετραγώνων. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί μία συνάρτηση πολλών μεταβλητών. Εφαρμόστηκε αρχικά από τον Dieter Kraft.
- TNC (7) : ο αλγόριθμος αυτός είναι και γνωστός βελτιστοποιητής χωρίς πίνακα Hessian και περιγράφει μία οικογένεια αλγορίθμων βελτιστοποιητών που έχουν σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων με μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών.
- Nelder – Mead (8) : Είναι μία κοινώς εφαρμοσμένη αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του ελάχιστου ή μέγιστου μίας αντικειμενικής συνάρτησης σε έναν πολυδιάστατο χώρο. Η τεχνική αυτή προτάθηκε από τους John Nelder και Roger Mead το 1965.

Προκειμένου να προσδιοριστεί ποιο μοντέλο είναι το καταλληλότερο χρειάστηκε να εξαχθούν κάποιες μεταβλητές. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι παρακάτω :

- Τυπική απόκλιση τιμών του μοντέλου.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

όπου  $x_i$  είναι το πλήθος των καλύτερων παρατηρήσεων και  $n$  είναι ο αριθμός του πλήθους των παρατηρήσεων

- Τυπική απόκλιση των τιμών του NDVI
- Τυπική Απόκλιση των τιμών της  $f(x)$
- Μέση Διαφορά των τιμών του δείκτη NDVI με το μοντέλο  $f(x)$
- Μέση τετραγωνική διαφορά τιμών της διαφοράς των τιμών του NDVI με τις καλύτερες τιμές του μοντέλου.

Επόμενο βήμα είναι η εξαγωγή των γραφημάτων για κάθε μοντέλο ξεχωριστά, αλλά και όλα μαζί σε ένα γράφημα προκειμένου να γίνει και οπτική σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους.

Μετά το πέρας των διαδικασιών και τον προσδιορισμό του καλύτερου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, έγινε αφαίρεση 5 τυχαίων απεικονίσεων, που είναι ήδη γνωστός ο δείκτης βλάστησης NDVI, προκειμένου να δοθεί η ευκαιρία στο μοντέλο να προβλέψει αυτές τις 5 τιμές.

Η διαδικασία αυτή έγινε και στα τρία αρμονικά μοντέλα και υπολογίστηκε η διαφορά μεταξύ των νέων (συνθετικών) τιμών του δείκτη βλάστησης NDVI με αυτές που είχαν προηγουμένως υπολογιστεί(πραγματικές). Μέσω του υπολογισμού αυτού, δίνεται μία εκτίμηση της απόκλισης στις τιμές των δεδομένων που δίνει κάθε μοντέλο και γίνεται πιο ευδιάκριτη η προσαρμωστικότητα τους στο σύνολο των δεδομένων.

Τελευταίο βήμα είναι η δημιουργία μίας ακολουθία εικόνων μορφής GIF (Generated Interchange Format) με τη χρήση συνθετικών τιμών. Για να δημιουργηθεί, επιλέχθηκε η απεικόνιση να έχει μέγεθος 100x100 εικονοστοιχεία με το κεντρικό να είναι αυτό για το οποίο έχουν γίνει προηγουμένως οι υπολογισμοί. Το μέγεθος της απεικόνισης επιλέχθηκε να μειωθεί καθώς με το συγκεκριμένο μέγεθος γίνεται περισσότερη εστίαση πάνω στο πολύγωνο της καλλιέργειας που έχει επιλεχθεί αλλά παράλληλα είναι δυνατόν να παρατηρηθούν διαφορές στις γειτονικές εκτάσεις. Οι καινούργιες απεικονίσεις προκύπτουν μέσω του υπολογισμού των συνθετικών τιμών του δείκτη βλάστησης για όλα τα εικονοστοιχεία της, και όχι μόνο για συγκεκριμένα όπως είχε γίνει προηγουμένως. Οι συνθετικές τιμές υπολογίζονται για όλες τις χρονικές στιγμές για τις οποίες εντοπιζόταν το εικονοστοιχείο εξαρχής.

Τοποθετώντας την μία απεικόνιση πάνω στην άλλη σε χρονική σειρά, δημιουργείται μία συνθετική κινούμενη απεικόνιση μορφής GIF (graphics interchange format) που τονίζει τις αλλαγές και την «πορεία» του δείκτη βλάστησης NDVI μέσα στη πάροδο του συνολικού χρόνου που έχουν οι απεικονίσεις.

## 4. Πειράματα

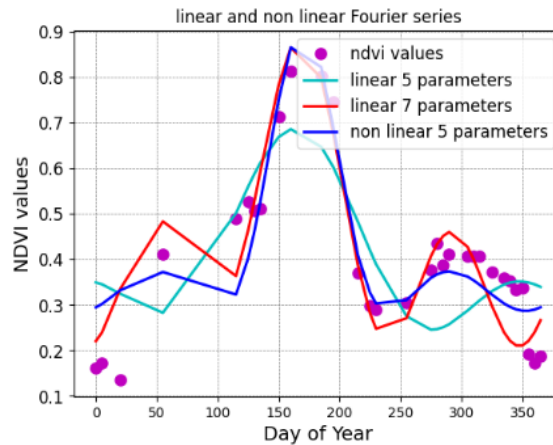
Για την εφαρμογή των πειραμάτων, εξάχθηκαν για κάθε εικονοστοιχείο για κάθε κατηγορία τα διαγράμματα που δείχνουν την προσαρμογή κάθε μοντέλου σε σχέση με τα δεδομένα. Λόγω της μεγάλης ποσότητας διαγραμμάτων και δεδομένων επιλέχθηκαν συγκεκριμένα εικονοστοιχεία και παραθέτονται παρακάτω ενδεικτικά μόνο τα διαγράμματα τα οποία εμπεριέχουν και τα τρία μοντέλα μαζί για να μπορεί να γίνει και οπτική σύγκριση τους.

### 4.3 Παράθεση Πειραμάτων

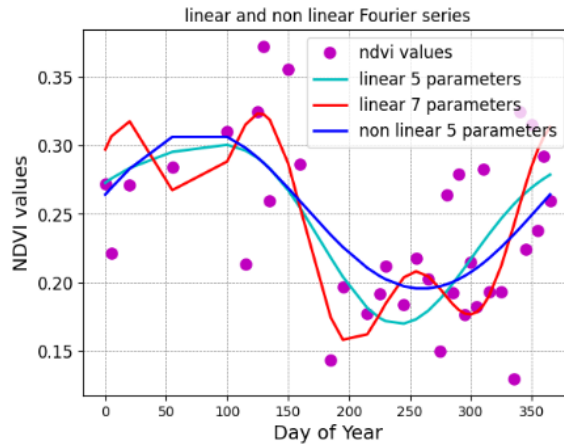
Για να υπάρξει πιο αποτελεσματική οπτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων τοποθετήθηκαν στο ίδιο διάγραμμα τα μοντέλα και τα δεδομένα, δίνοντας μία πρώτη άποψη για την προσαρμοστικότητα των μοντέλων αλλά και για τις μεταξύ τους διαφορές. Πιο αναλυτικά :

- ✚ οι τιμές των δεδομένων απεικονίζονται σημειακά με **μωβ** χρώμα
- ✚ το γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων απεικονίζεται γραμμικά με **γαλάζιο** χρώμα
- ✚ το γραμμικό μοντέλο 7 παραμέτρων απεικονίζεται γραμμικά με **κόκκινο** χρώμα
- ✚ το μη γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων απεικονίζεται γραμμικά με **μπλε** χρώμα.

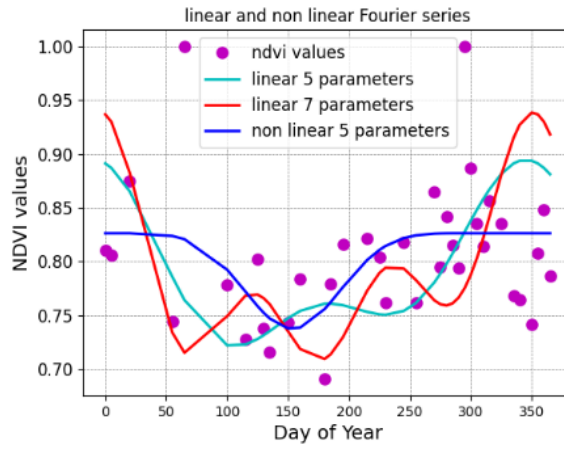
Κατηγορία 1 – Άσφαλτος  
(269,783)



(602,605)



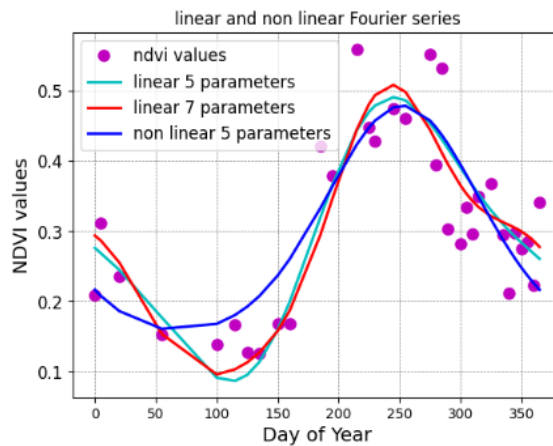
(931,356)



Οι τιμές εντοπίζεται να μην έχουν κάποιο σταθερό μοτίβο μέσα στη πάροδο της χρονοσειράς και οπτικά εντοπίζονται αρκετές αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων.

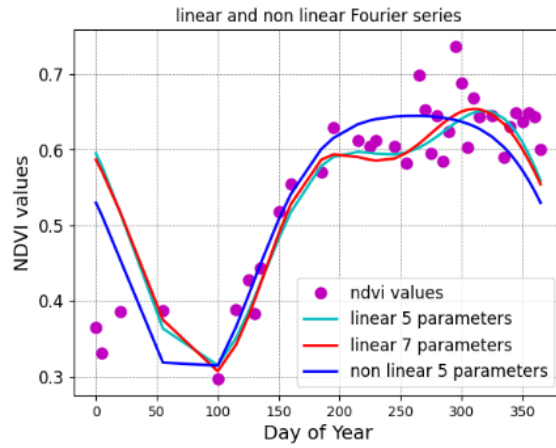
Κατηγορία 23 – Nut Trees (καρυδιές)

(314,271)

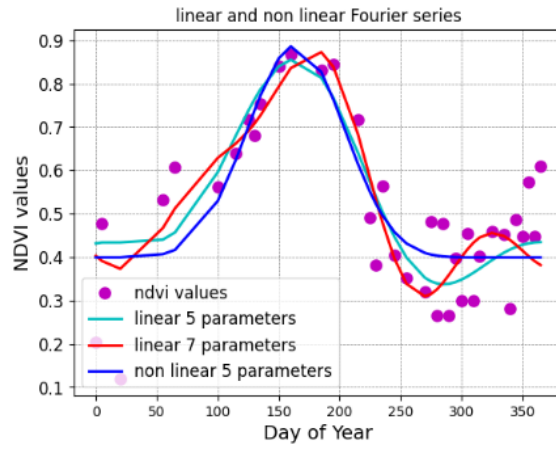




(996,996)

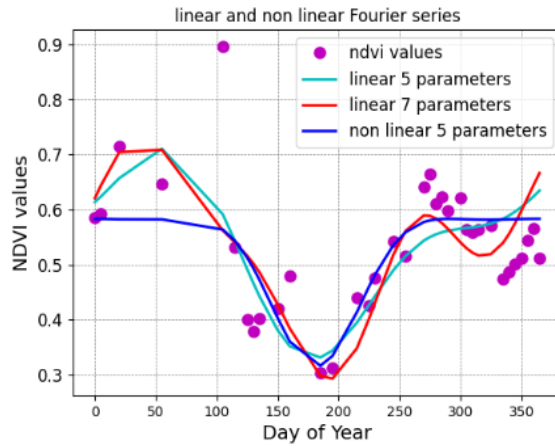


(880,615)

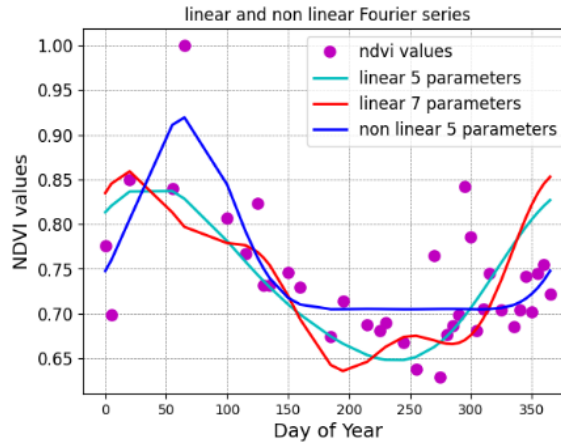


Οι τιμές βρίσκονται σε μία πιο λογική αλληλουχία, με τους χειμερινούς μήνες να έχουν χαμηλές τιμές ενώ στους καλοκαιρινούς μήνες και έπειτα παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση.

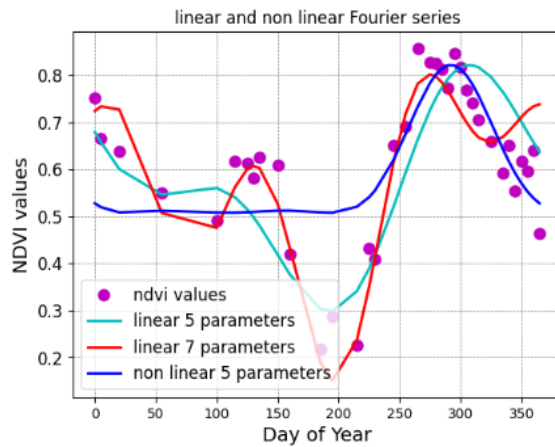
Κατηγορία 25 - Cereals (Σιτηρά)  
(571,210)



(863,333)

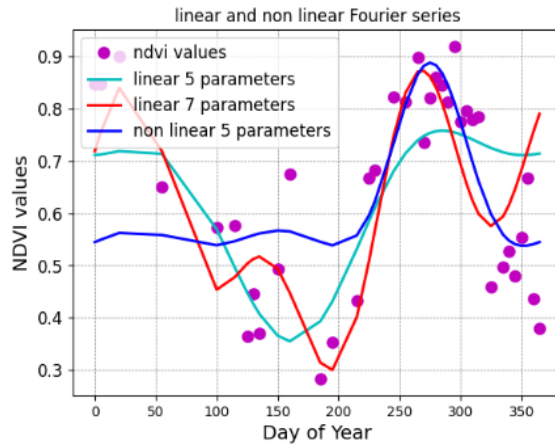


(905,865)

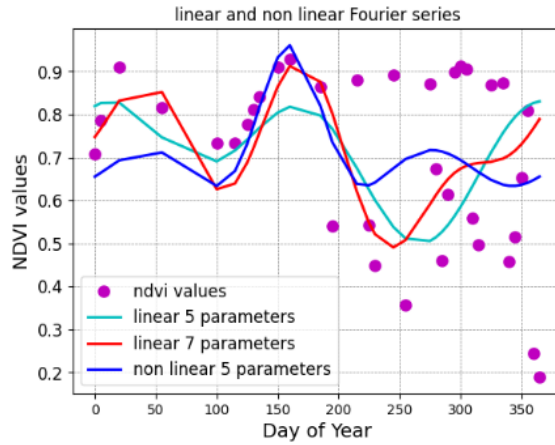


Ο φαινολογικός κύκλος των σιτηρών ερμηνεύεται πως τους χειμερινούς μήνες δίνει υψηλές τιμές ενώ το καλοκαίρι υπάρχει σημαντική μείωση τους

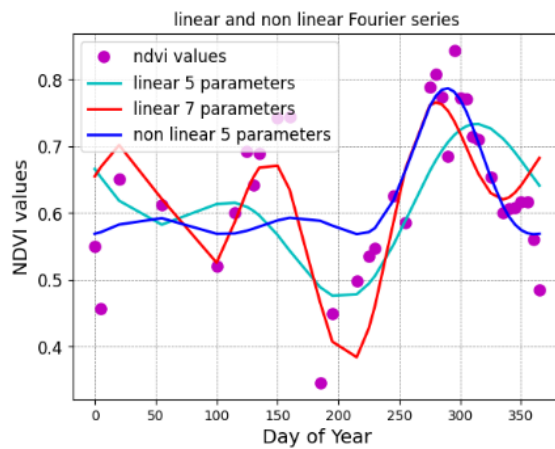
Κατηγορία 27 – Maize (αραβόσιτος – καλαμπόκια)  
(555,666)



(739,552)



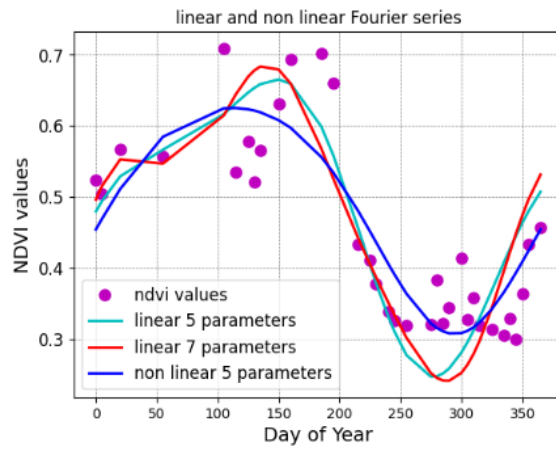
(760,605)



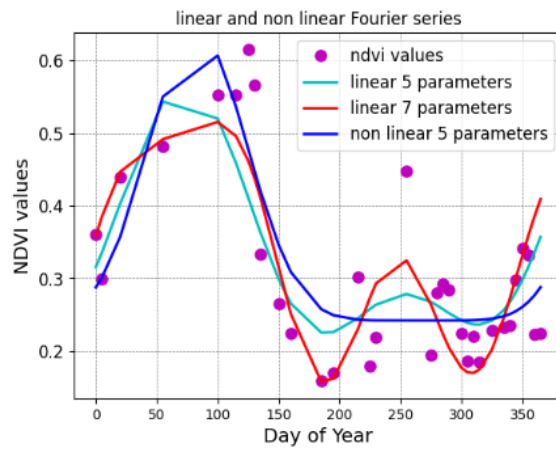
Τους χειμερινούς μήνες παρατηρείται μείωση των τιμών του δείκτη συγκριτικά με τους καλοκαιρινούς μήνες, χωρίς όμως να εντοπίζονται πολλές κοντινές τιμές.

Κατηγορία 30 – Pulses (όσπρια)

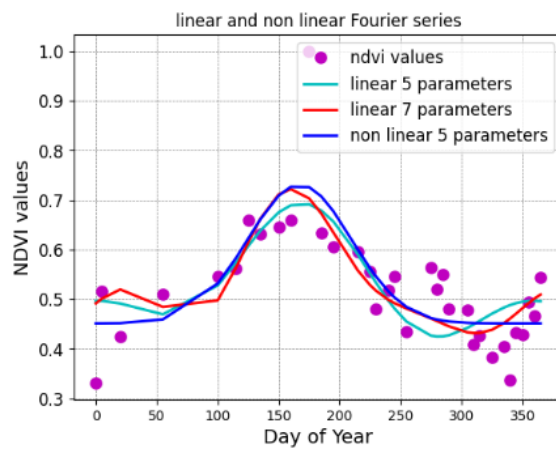
(122,100)



(328,615)



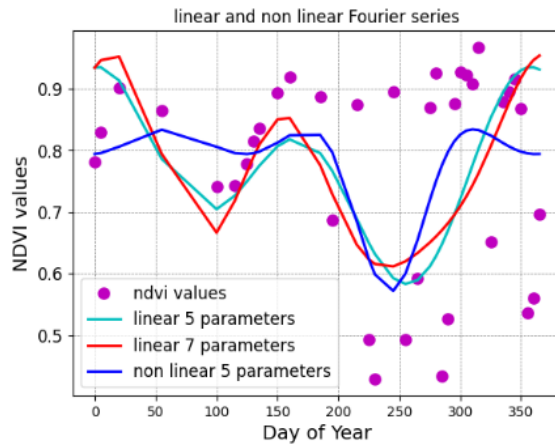
(385,215)



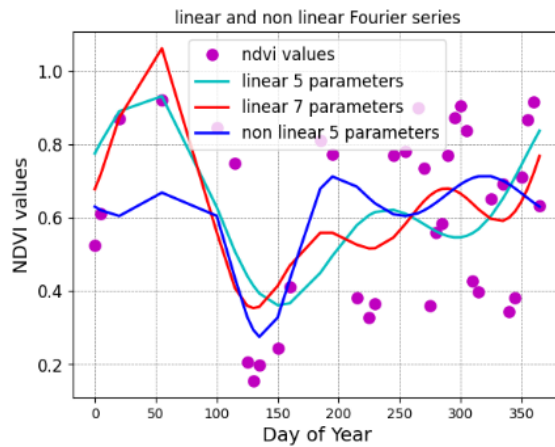
Σχόλια : Στη συγκεκριμένη κατηγορία φαίνεται πως λόγω των εξαγόμενων δεδομένων, τα μοντέλα έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζονται βέλτιστα, διατηρώντας ένα φυσικό σχήμα με ελάχιστες περιπτώσεις που δεν υπήρχαν αρκετές παρατηρήσεις.

Κατηγορία 33 – Grass Fodders (γρασίδι - χορτονομές)

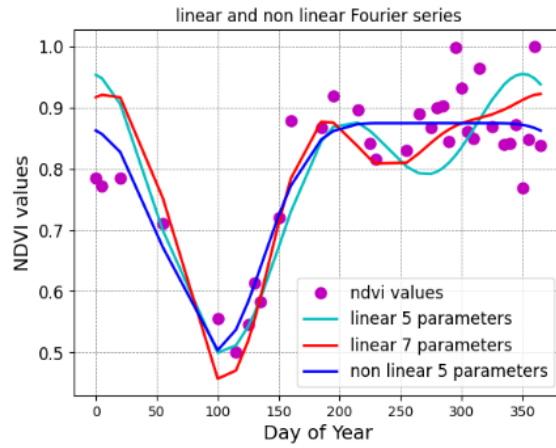
(677,649)



(984,903)



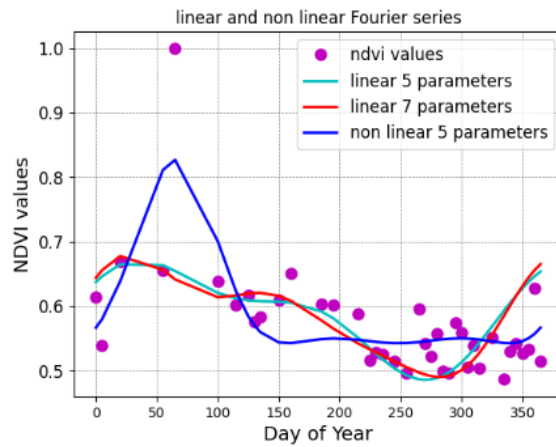
(458,512)



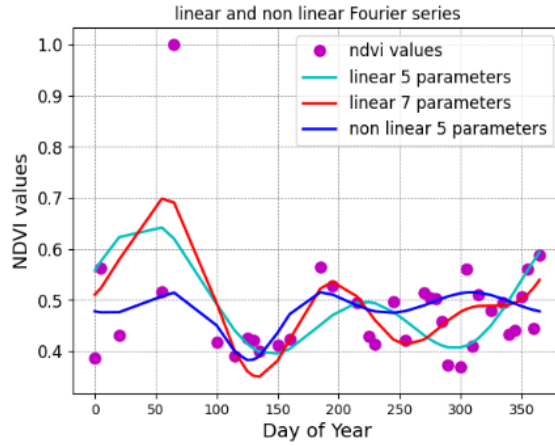
Τον αρχικό μήνα Οκτώβρη φαίνεται πως υπάρχουν υψηλές τιμές και έπειτα οι τιμές έχουν καθοδική πορεία μέχρι να φτάσουν οι καλοκαιρινοί μήνες και έπειτα.

Κατηγορία 35 – Fallow (περιοχές σε αγρανάπαυση)

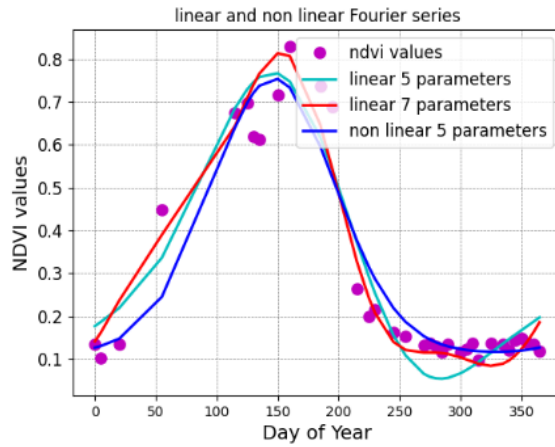
(973,580)



(750,250)



(600,125)



Όπως είναι λογικό, οι περιοχές που βρίσκονται σε αγρανάπαυση, δεν έχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές τους αλλά και ούτε υψηλές τιμές του δείκτη βλάστησης καθώς δεν έχουν καλλιεργηθεί αλλά δεν μπορούν θεωρητικά να χαρακτηριστούν ως γυμνό έδαφος καθώς υπάρχει περίπτωση να παρουσιάσουν θετικές τιμές λόγω της ανάπτυξης χαμηλού τύπου βλάστησης που έγκειται στον μη καθαρισμό της καλλιεργήσιμης έκτασης.

#### 4.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα περιγράφουν τις τιμές που διαθέτει κάθε εικονοστοιχείο για να προσδιοριστεί το βέλτιστο μοντέλο που έχει την δυνατότητα να προσαρμόζεται καλύτερα στις τιμές που έχουν τα δεδομένα. Η ακρίβεια με την οποία υπολογίστηκαν είναι στο επίπεδο του εκατοστού προκειμένου να υπάρχει εγκυρότητα στα συμπεράσματα και την επιλογή του μοντέλου. Επίσης δεν κρίθηκε σκόπιμο να συγκριθούν οι κατηγορίες μεταξύ τους καθώς δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συγκεκριμένο αποτέλεσμα λόγω του ότι κάθε κατηγορία είναι διαφορετική με διαφορετικά στοιχεία να χαρακτηρίζουν κάθε μία. Για την κατηγορία της αστικής περιοχής, δεν εξάχθηκαν στατιστικά δεδομένα καθώς κανέναν μοντέλο δεν είχε την δυνατότητα να προσαρμοστεί ικανοποιητικά στις τιμές που είχαν υπολογιστεί και για να μην δημιουργούν περαιτέρω σύγχυση στα ήδη πολλά δεδομένα, επιλέχθηκαν να παραλειφθούν.

##### Κατηγορία 23 Nut Trees (καρυδιές)

##### Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(314,271)	(996,996)	(975 ,580)	(805,140)	(755,250)
standard deviation of the model	0.119	0.093	0.056	0.081	0.071
standard deviation of NDVI	0.123	0.114	0.067	0.062	0.106
average standard deviation	0.047	0.045	0.044	0.073	0.066
Mean Square Difference	0.003	0.005	0.004	0.010	0.009
Average Difference	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

##### Linear Harmonic model with 7 parameters

Position of pixels selected	(314,271)	(996,996)	(975 ,580)	(805,140)	(755,250)
standard deviation of the model	0.1160	0.094	0.067	0.169	0.0748
standard deviation of NDVI	0.1234	0.114	0.067	0.062	0.1061
average standard deviation	0.0476	0.046	0.052	0.154	0.0626
Mean Square Difference	0.0036	0.005	0.006	0.033	0.0074
Average Difference	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.0000

##### Non-Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(314,271)	(996,996)	(975 ,580)	(805,140)	(755,250)
standard deviation of the model	0.1037	0.096	0.052	0.018	0.0655
standard deviation of NDVI	0.1234	0.114	0.067	0.062	0.1061
average standard deviation	0.0534	0.047	0.030	0.043	0.0606
Mean Square Difference	0.0045	0.004	0.002	0.003	0.0070
Average Difference	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.0000



### Average Values

Harmonic model	Linear 5 parameters	Linear 7 parameters	Non-Linear 5 parameters
standard deviation of the model	0.084	0.104	0.070
standard deviation of NDVI	0.094	0.095	0.106
average standard deviation	0.055	0.072	0.063
Mean Square Difference	0.006	0.011	0.008
Average Difference	0.000	0.000	0.000

#### 4.4.1 Πίνακας Παραμέτρων – Κατηγορία 23

Οι τιμές προκύπτουν αρκετά κοντά, με το μη γραμμικό μοντέλο των 5 παραμέτρων να παρουσιάζει ελάχιστα μικρότερες τιμές πέρα από την τυπική απόκλιση στις τιμές του δείκτη NDVI που υπολογίστηκε ίση με 0.106 συγκριτικά με τα γραμμικά μοντέλα των 5 και 7 παραμέτρων που υπολογίστηκαν ίσα με 0.094 και 0.095 αντίστοιχα.

#### Κατηγορία 25 Cereals (Σιτηρά)

##### Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(764,318)	(905,865)	(863,333)	(571,210)	(290,540)
standard deviation of the model	0.1525	0.1598	0.0634	0.0926	0.0941
standard deviation of NDVI	0.1690	0.1638	0.0697	0.1134	0.1267
average standard deviation	0.0925	0.0823	0.0485	0.0618	0.0776
Mean Square Difference	0.0138	0.0097	0.0042	0.0069	0.0080
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

##### Linear Harmonic model with 7 parameters

Position of pixels selected	(764,318)	(905,865)	(863,333)	(571,210)	(290,540)
standard deviation of the model	0.1775	0.1692	0.0714	0.0999	0.1037
standard deviation of NDVI	0.1690	0.1638	0.0697	0.1134	0.1267
average standard deviation	0.0913	0.0598	0.0575	0.0648	0.0749
Mean Square Difference	0.0127	0.0063	0.0056	0.0075	0.0088
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

##### Non-Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(764,318)	(905,865)	(863,333)	(571,210)	(290,540)
standard deviation of the model	0.1408	0.1191	0.0534	0.0780	0.0803
standard deviation of NDVI	0.1690	0.1638	0.0697	0.1134	0.1267
average standard deviation	0.0760	0.0851	0.0350	0.0559	0.0826
Mean Square Difference	0.0087	0.0126	0.0020	0.0068	0.0096
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

#### Average Values

Harmonic model	Linear 5 parameters	Linear 7 parameters	Non-Linear 5 parameters
standard deviation of the model	0.084	0.104	0.067
standard deviation of NDVI	0.094	0.095	0.095
average standard deviation	0.055	0.072	0.047
Mean Square Difference	0.006	0.011	0.004
Average Difference	0.000	0.000	0.000

#### 4.4.2 Πίνακας Παραμέτρων – Κατηγορία 25

Στην περίπτωση των σιτηρών, το μη γραμμικό μοντέλο παρουσιάζει σε όλα τα στατιστικά μεγέθη που υπολογίστηκαν μικρότερες τιμές και κατ' επέκταση καλύτερες τιμές.

#### Κατηγορία 27 Maize (αραβόσιτος – καλαμπόκια)

##### Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(555,666)	(666,715)	(739,552)	(760,605)
standard deviation of the model	0.1319	0.2174	0.1103	0.0787
standard deviation of NDVI	0.1866	0.2440	0.2032	0.1122
average standard deviation	0.1189	0.1248	0.1744	0.0788
Mean Square Difference	0.0212	0.0232	0.0525	0.0090
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

##### Linear Harmonic model with 7 parameters

Position of pixels selected	(555,666)	(666,715)	(739,552)	(760,605)
standard deviation of the model	0.1553	0.2372	0.1016	0.0978
standard deviation of NDVI	0.1866	0.2440	0.2032	0.1122
average standard deviation	0.1094	0.0897	0.1568	0.0624
Mean Square Difference	0.0188	0.0135	0.0433	0.0063
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

##### Non-Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(555,666)	(666,715)	(739,552)	(760,605)
standard deviation of the model	0.1269	0.2094	0.0773	0.0799
standard deviation of NDVI	0.1866	0.2040	0.2032	0.1122
average standard deviation	0.1071	0.0992	0.1548	0.0572
Mean Square Difference	0.0187	0.0157	0.0353	0.0062
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

### Average Values

Harmonic model	Linear 5 parameters	Linear 7 parameters	Non-Linear 5 parameters
standard deviation of the model	0.131	0.138	0.123
standard deviation of NDVI	0.171	0.171	0.167
average standard deviation	0.106	0.089	0.105
Mean Square Difference	0.022	0.017	0.019
Average Difference	0.000	0.000	0.000

#### 4.4.3 Πίνακας Παραμέτρων – Κατηγορία 27

Στις καλλιέργειες των καλαμποκιών φαίνεται πως τα στατιστικά μεγέθη αυξάνονται ανεξαρτήτως του μοντέλου που εφαρμόζεται και αυτό έγκειται στο γεγονός πως εξ αρχής οι τιμές του δείκτη βλάστησης παρουσίαζαν μεγάλες διακυμάνσεις και δεν ακολουθούσαν πιστά τις λογικές τιμές, όπως δηλαδή γίνεται στις προηγούμενες κατηγορίες.

#### Κατηγορία 30 Pulses (όσπρια)

##### Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(122,100)	(328,615)
standard deviation of the model	0.1392	0.0816
standard deviation of NDVI	0.1293	0.1254
average standard deviation	0.0630	0.0592
Mean Square Difference	0.0057	0.0058
Average Difference	0.0000	0.0000

##### Linear Harmonic model with 7 parameters

Position of pixels selected	(122,100)	(328,615)
standard deviation of the model	0.1467	0.1073
standard deviation of NDVI	0.1293	0.1254
average standard deviation	0.0698	0.0561
Mean Square Difference	0.0073	0.0055
Average Difference	0.0000	0.0000

##### Non-Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(122,100)	(328,615)
standard deviation of the model	0.1120	0.1020
standard deviation of NDVI	0.1293	0.1254
average standard deviation	0.0544	0.0611
Mean Square Difference	0.0042	0.0053
Average Difference	0.0000	0.0000

### Average Values

Harmonic model	Linear 5 parameters	Linear 7 parameters	Non-Linear 5 parameters
standard deviation of the model	0.131	0.138	0.123
standard deviation of NDVI	0.171	0.171	0.167
average standard deviation	0.106	0.089	0.105
Mean Square Difference	0.022	0.017	0.019
Average Difference	0.000	0.000	0.000

#### 4.4.4 Πίνακας Παραμέτρων – Κατηγορία 30

Στην περιοχή δεν βρέθηκαν αρκετές εκτάσεις στις οποίες καλλιεργούνται όσπρια με αποτέλεσμα να καταγραφούν μόνο δύο διαφορετικές για τα οποία το μη γραμμικό μοντέλο παρουσιάζει μικρότερες τιμές, πέρα από την τυπική απόκλιση που ισούται με 0.105 σε σχέση με την 0.089 που έχει το γραμμικό μοντέλο των 7 παραμέτρων.

#### Κατηγορία 33 Grass Fodders (γρασίδι - χορτονομές)

##### Linear Harmonic model with 5 parameters

Position of pixels selected	(458,512)	(984,903)	(884,800)	(704,204)	(677,649)
standard deviation of the model	0.1635	0.1387	0.0385	0.2840	0.1150
standard deviation of NDVI	0.1662	0.2349	0.0417	0.3020	0.1602
average standard deviation	0.0507	0.1851	0.0341	0.0461	0.1367
Mean Square Difference	0.0042	0.0454	0.0019	0.0036	0.0292
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

##### Linear Harmonic model with 7 parameters

Position of pixels selected	(458,512)	(984,903)	(884,800)	(704,204)	(677,649)
standard deviation of the model	0.1669	0.1364	0.0363	0.2933	0.1125
standard deviation of NDVI	0.1662	0.2349	0.0417	0.3020	0.1602
average standard deviation	0.0519	0.1724	0.0281	0.0416	0.1379
Mean Square Difference	0.0041	0.0352	0.0014	0.0027	0.0295
Average Difference	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Non-Linear Harmonic model with 5 parameters**

<b>Position of pixels selected</b>	<b>(458,512)</b>	<b>(984,903)</b>	<b>(884,800)</b>	<b>(704,204)</b>	<b>(677,649)</b>
<b>standard deviation of the model</b>	0.1593	0.1210	0.0271	0.2961	0.0725
<b>standard deviation of NDVI</b>	0.1662	0.2349	0.0417	0.3020	0.1602
<b>average standard deviation</b>	0.0372	0.1719	0.0267	0.0489	0.1165
<b>Mean Square Difference</b>	0.0022	0.0405	0.0010	0.0035	0.0204
<b>Average Difference</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Average Values**

<b>Harmonic model</b>	<b>Linear 5 parameters</b>	<b>Linear 7 parameters</b>	<b>Non-Linear 5 parameters</b>
<b>standard deviation of the model</b>	0.148	0.149	0.135
<b>standard deviation of NDVI</b>	0.181	0.181	0.181
<b>average standard deviation</b>	0.091	0.086	0.080
<b>Mean Square Difference</b>	0.017	0.015	0.014
<b>Average Difference</b>	0.000	0.000	0.000

4.4.5 Πίνακας Παραμέτρων – Κατηγορία 33

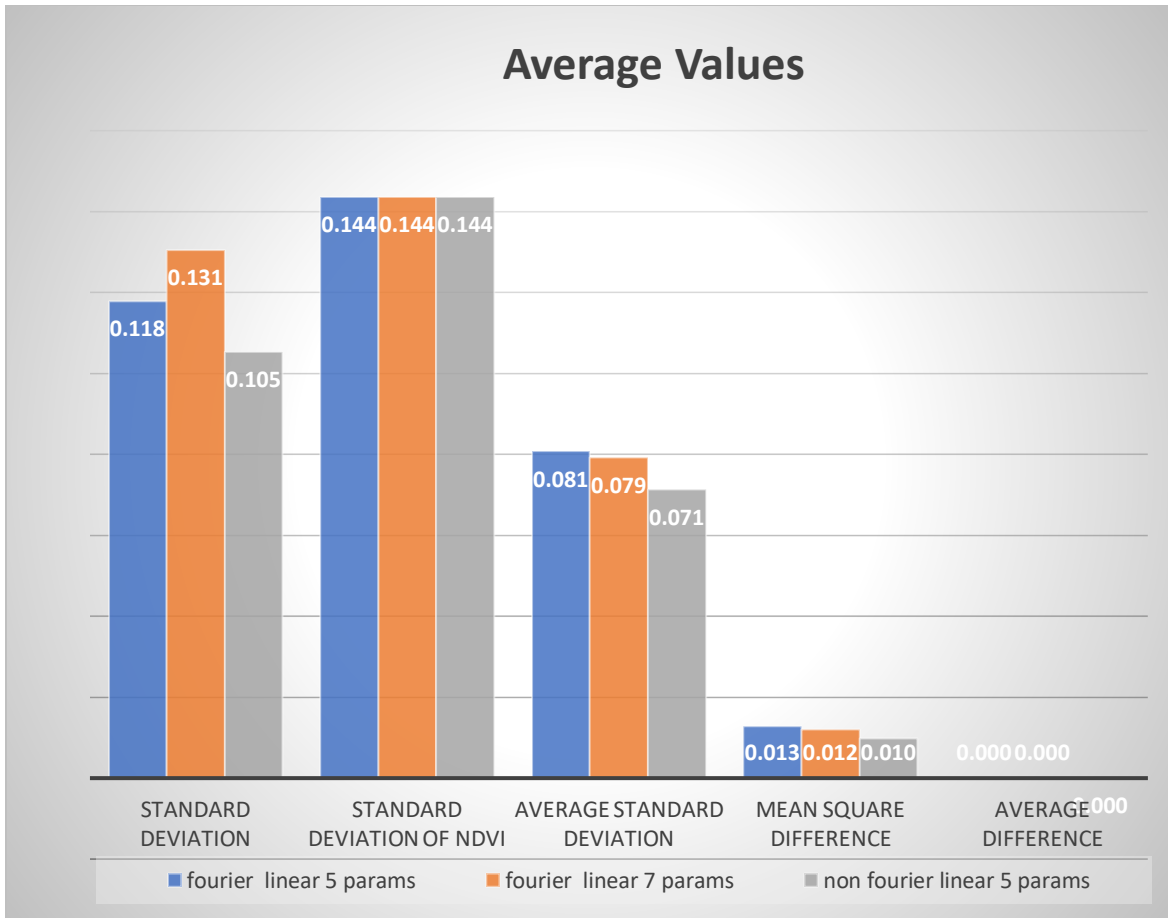
Οι τιμές στην περίπτωση χορτονομών εμφανίζονται αυξημένες συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Μία τέτοια αλλαγή οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος φαινολογικός κύκλος και οι τιμές μπορεί να ποικίλουν αρκετά.

Συνολικά για όλα τα εικονοστοιχεία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :

**Average Values**

<b>Harmonic model</b>	<b>Linear 5 parameters</b>	<b>Linear 7 parameters</b>	<b>Non-Linear 5 parameters</b>
<b>standard deviation of the model</b>	0.118	0.131	0.105
<b>standard deviation of NDVI</b>	0.144	0.144	0.144
<b>average standard deviation</b>	0.081	0.079	0.071
<b>Mean Square Difference</b>	0.013	0.012	0.010
<b>Average Difference</b>	0.000	0.000	0.000

4.4.6 Πίνακας συγκεντρωτικών τιμών



Γράφημα 4.1 Μέσες τιμές

Κοιτώντας τις συμπερασματικές τιμές, το μη γραμμικό μοντέλο έχει τυπική απόκλιση στις τιμές της συνάρτησης ίσο με 0.105 συγκριτικά με τα γραμμικά μοντέλα των 5 και 7 παραμέτρων που έχουν 0.118 και 0.131 αντίστοιχα. Μέσω αυτής της τιμής, η καμπύλη του μοντέλου έχει ένα πιο φυσικό σχήμα χωρίς να εντοπίζονται αρκετά σπασίματα σε σχέση με τις καμπύλες των γραμμικών μοντέλων που ανά διαστήματα παρουσιάζουν αρκετά σπασίματα αλλά και μεγάλες αλλαγές στην πορεία που ακολουθάνε λόγω της προσπάθειας του να προσαρμοστούν καλύτερα στα δεδομένα.

## 5. Αποτελέσματα

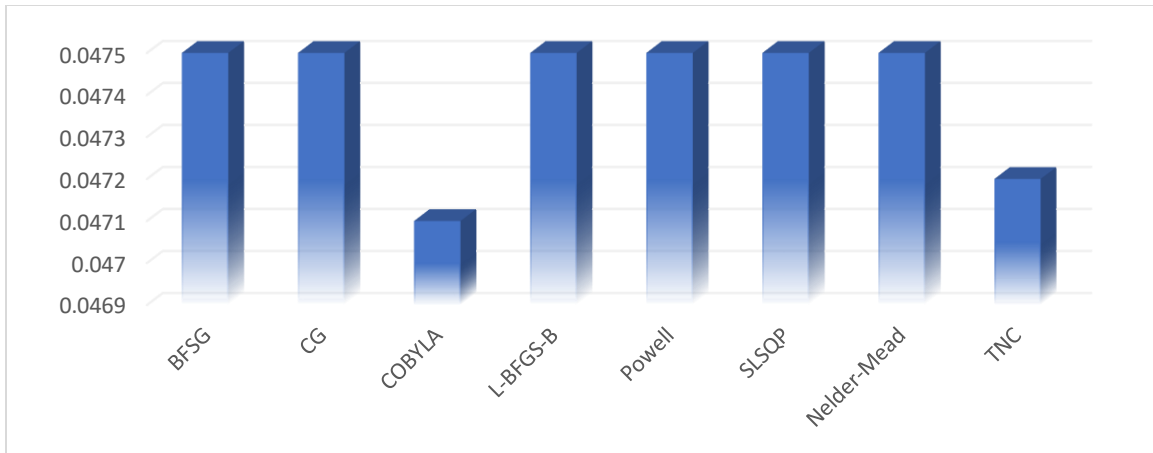
Κύριο αποτέλεσμα της διαδικασίας και εύρεσης καταλληλότερου αρμονικού μοντέλου είναι η δημιουργία συνθετικών απεικονίσεων χρησιμοποιώντας βέβαια, τον καλύτερο αλγόριθμο βελτιστοποίησης που εμπεριέχεται μέσα στο μη γραμμικό μοντέλο. Η κατηγορία η οποία μελετήθηκε, είναι η κατηγορία 23 - Nut Trees (καρυδιές) και ο λόγος είναι πως είναι από τις λίγες κατηγορίες για τις οποίες βρέθηκαν πολυάριθμα πολύγωνα και ήταν δυνατό να εξαχθούν πολύ περισσότερα εικονοστοιχεία σε σχέση με άλλες κατηγορίες. Έγινε αφαίρεση 5 χρονικών στιγμών από το αρχικό σύνολο δεδομένων προκειμένου οι τιμές του δείκτη βλάστησης να προκύψουν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και έπειτα να συγκριθούν με τις πραγματικές τιμές που είναι ήδη γνωστές. Ο καλύτερος αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι αυτός που οι τιμές του απέχουν λιγότερο από τις πραγματικές τιμές που φαίνονται παρακάτω για κάθε εικονοστοιχείο που επιλέχθηκε :

MODEL	Average of Difference					
	PIXEL					
	(314,271)	(996,996)	(975 ,580)	(805,140)	(755,250)	(913,875)
BFSG	0.004	0.011	0.015	0.073	0.063	0.074
CG	0.004	0.011	0.016	0.073	0.063	0.074
COBYLA	<u>0.002</u>	<u>0.011</u>	<u>0.008</u>	<u>0.067</u>	<u>0.060</u>	0.075
L-BFSG-B	0.004	0.014	0.016	0.073	0.063	0.074
POWELL	0.004	0.011	0.016	0.072	0.063	0.075
SLSQP	0.004	0.011	0.016	0.073	0.063	0.074
NELDER-MEAD	0.004	0.011	0.016	0.073	0.063	0.074
TNC	0.004	0.011	0.016	0.073	0.063	0.074

5.1 Πίνακας τιμών εικονοστοιχείων

MODEL	Average of Difference				
	PIXEL				
	(880,615)	(786,313)	(690,675)	(600,123)	ALL TOGETHR
BFSG	0.065	0.044	0.105	0.020	0.0475
CG	0.065	0.044	0.105	0.020	0.0475
COBYLA	0.074	0.049	0.104	0.017	<u>0.0461</u>
L-BFSG-B	0.065	0.044	0.105	0.020	0.0475
POWELL	0.064	0.044	0.105	0.020	0.0475
SLSQP	0.065	0.044	0.105	0.020	0.0475
NELDER-MEAD	0.065	0.044	0.105	0.020	0.0475
TN C	0.065	0.044	0.105	0.015	0.0472

5.2 Πίνακας τιμών εικονοστοιχείων



Γράφημα 6.2 Μέση Διαφορά Τιμών

Προκύπτει πως οι διαφορές των αλγορίθμων είναι αρκετά μικρές και τα περισσότερα μοντέλα δίνουν σχεδόν ίδιες τιμές. Παρόλο που επιλέχθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης COBYLA, θα μπορούσε να επιλεχθεί και ο αλγόριθμος TNC (Truncated Newton method) με μέση διαφορά τιμών της τάξης του 0.0471.

Πιο αναλυτικά και σε υπολογιστικό επίπεδο, με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης COBYLA, προκύπτει πως το μοντέλο διαθέτει τη μικρότερη τυπική απόκλιση στις τιμές του δείκτη βλάστησης (NDVI) της τάξεως του 0.105 συγκριτικά με τα γραμμικά μοντέλα των 5 και 7 παραμέτρων με τιμές ίσες με 0.118 και 0.131 αντίστοιχα.

Ένα από τα τελευταία βήματα είναι η αφαίρεση 5 τυχαίων παρατηρήσεων με σκοπό να δοθεί η ευκαιρία στα υπό μελέτη μοντέλα να προβλέψουν όσο τον δυνατόν καλύτερα αυτές τις τιμές. Ουσιαστικά γνωρίζοντας τις ήδη υπάρχουσες τιμές, γίνεται σύγκριση μεταξύ αυτών, των πραγματικών τιμών, και αυτών που προκύπτουν από την εφαρμογή των μοντέλων, οι συνθετικές τιμές. Πιο αναλυτικά :

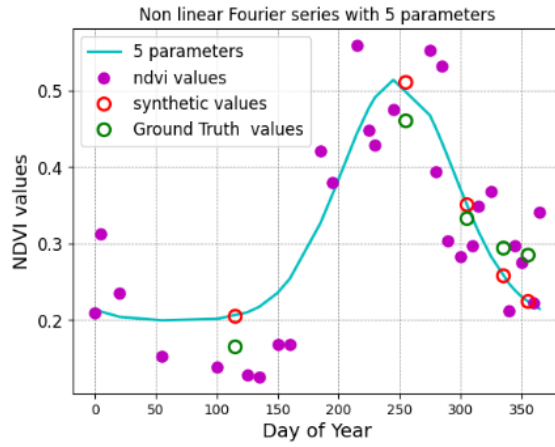
- ✚ οι τιμές των δεδομένων απεικονίζονται σημειακά με **μωβ** χρώμα
- ✚ οι τιμές που έχουν αφαιρεθεί (πραγματικές) απεικονίζονται με **πράσινο** χρώμα
- ✚ οι τιμές που έχουν προβλεφθεί (συνθετικές) από το εκάστοτε μοντέλο απεικονίζονται με **κόκκινο** χρώμα
- ✚ Η καμπύλη του μοντέλου απεικονίζεται με **γαλάζιο** χρώμα

Τα μοντέλα δεν ήταν δυνατόν να απεικονιστούν σε ένα γράφημα καθώς κάθε ένα προβλέπει διαφορετικές τιμές και η πληροφορία που θα εμπειρευόταν, δεν θα ήταν ευδιάκριτη με αποτέλεσμα να μην υπάρχει, οπτικά τουλάχιστον, ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Ένα στατιστικό το οποίο είναι αρκετά ενδιαφέρον είναι η διαφορά των τιμών μεταξύ αυθεντικών και συνθετικών καθώς μέσω αυτού προκύπτει ότι το μη γραμμικό μοντέλο παρέχει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα άλλα δύο γραμμικά μοντέλα.

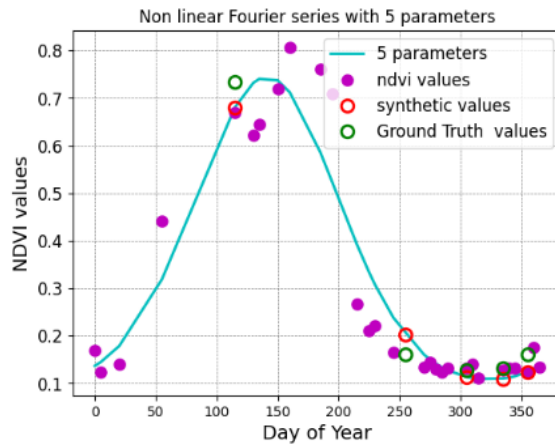


# Μη γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων

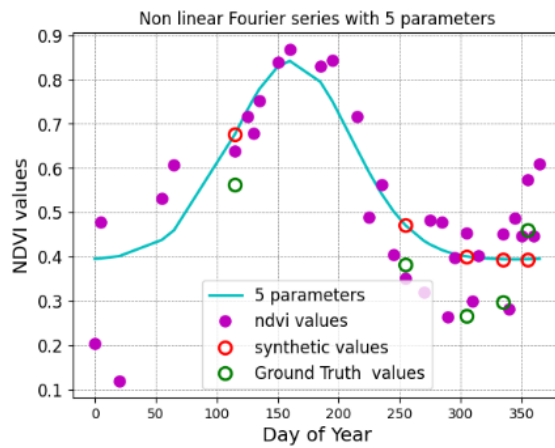
(677,649)



(600,123)

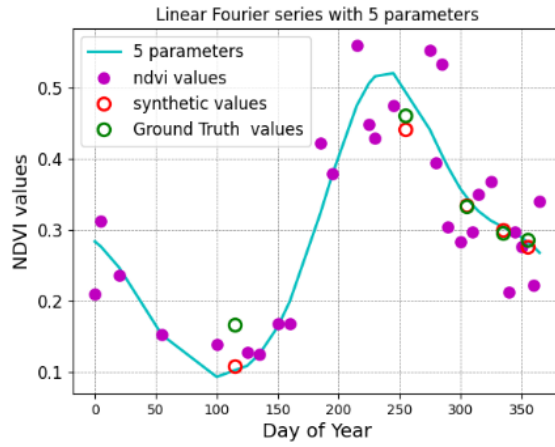


(458,512)

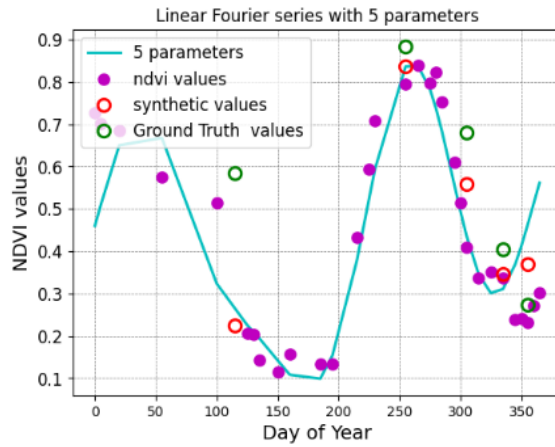


# Γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων

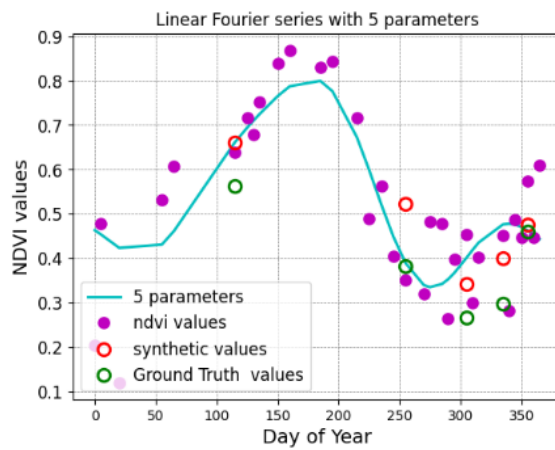
(677,649)



(984,903)

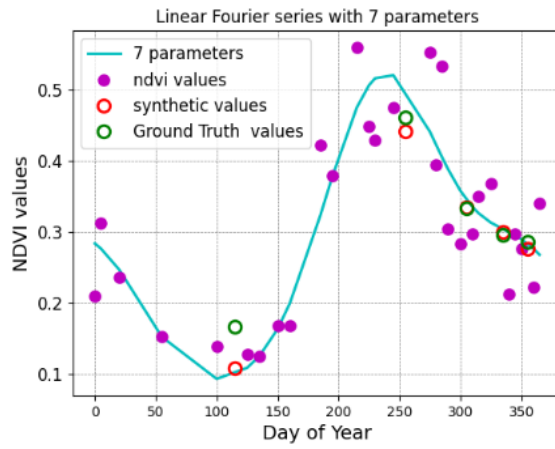


(458,512)

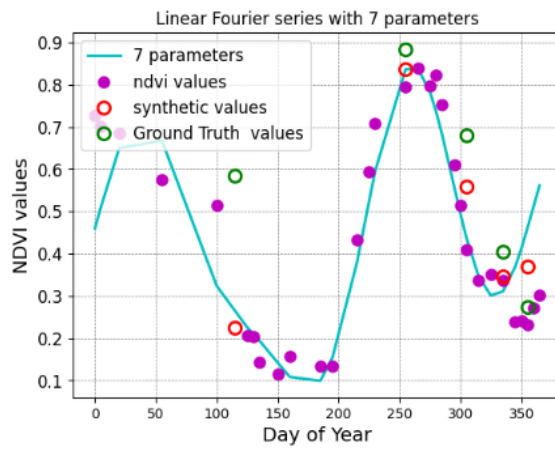


# Γραμμικό μοντέλο 7 παραμέτρων

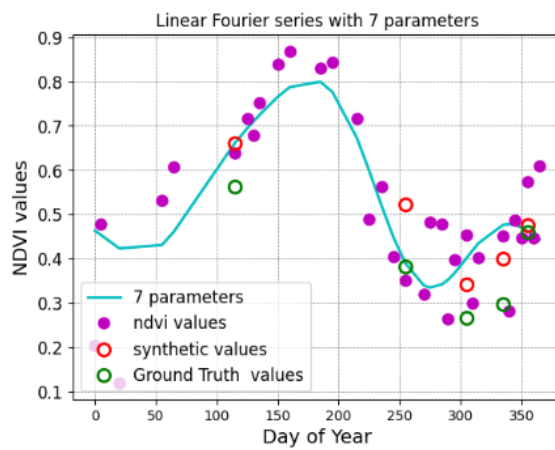
(314,271)



(690,675)



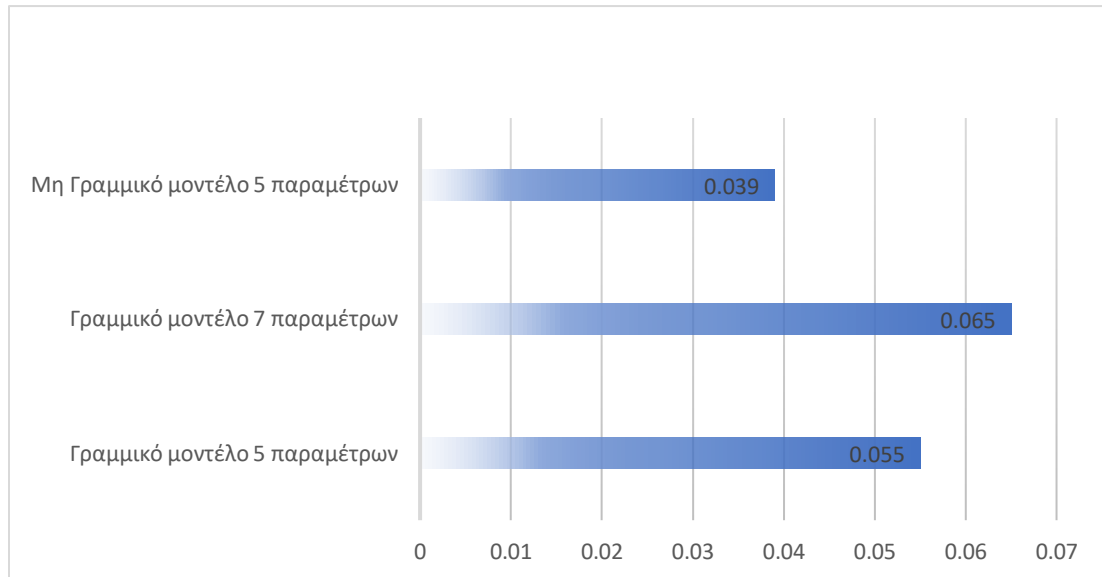
(880,615)



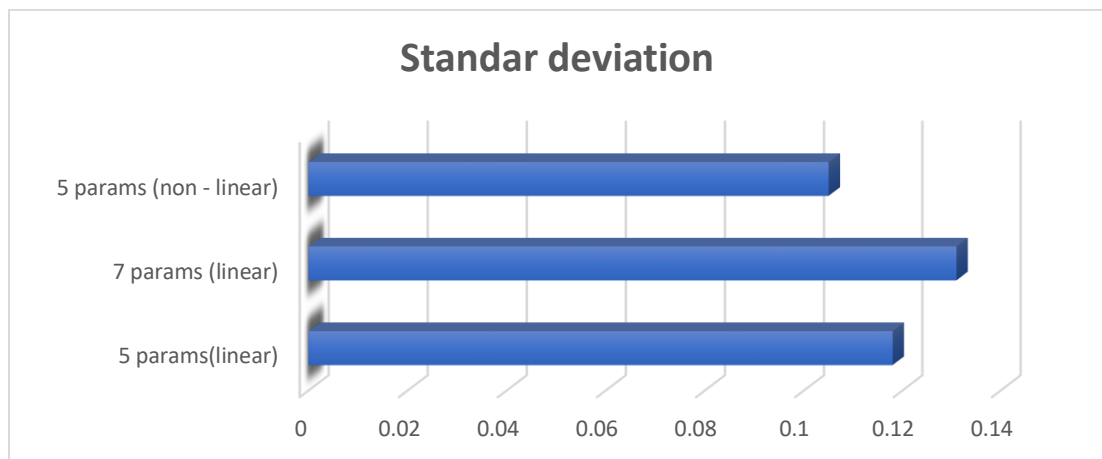
Παρατηρώντας τα διαγράμματα, οπτικά και μόνο γίνεται εμφανές

Μέσος όρος Απόλυτης διαφοράς πραγματικών τιμών με συνθετικών τιμών :

- Μη Γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων: 0.039
- Γραμμικό μοντέλο 5 παραμέτρων: 0.055
- Γραμμικό μοντέλο 7 παραμέτρων: 0.065

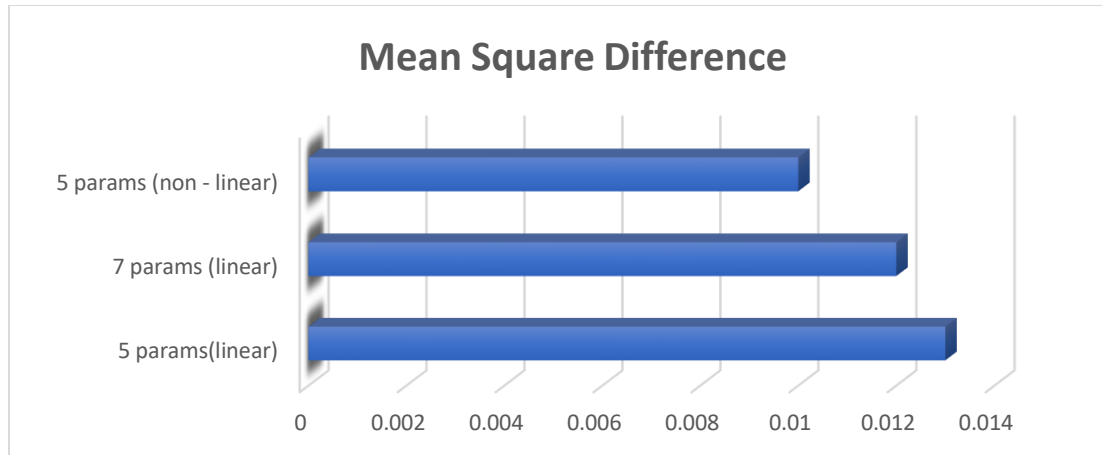


Γράφημα 6.1 Μέσος όρος Απόλυτης διαφοράς πραγματικών τιμών με συνθετικών τιμών



Γράφημα 6.3 Τυπική Απόκλιση

Επιπροσθέτως, μελετώντας τις τιμές που προκύπτουν από τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλμα, το μη γραμμικό μοντέλο είναι αυτό που παρουσιάζει τις κοντινότερες τιμές σε σχέση με τις αληθινές καθώς το σφάλμα είναι ίσο με 0.10 ενώ τα γραμμικά μοντέλα έχουν 0.013 και 0.012 αντίστοιχα.

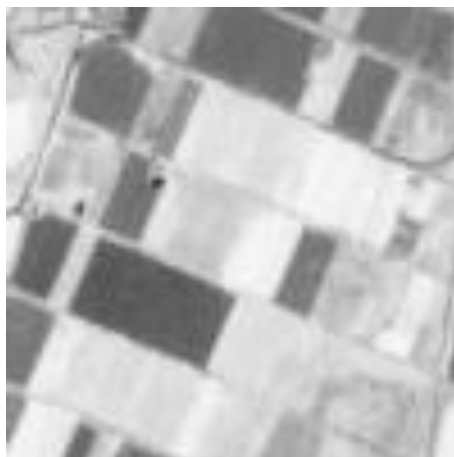


Γράφημα 6.4 Μέση Τετραγωνική Διαφορά

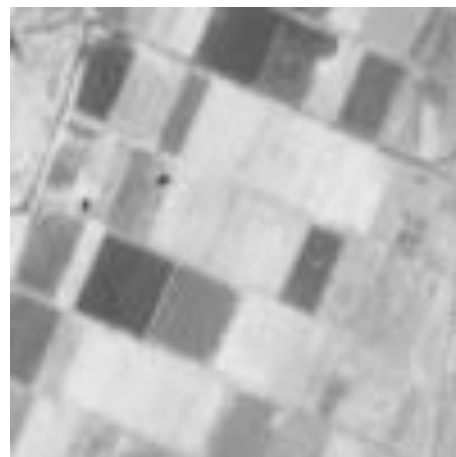
Στο τέλος της διαδικασίας, δημιουργήθηκε μία συνθετική απεικόνιση στην οποία υπολογίστηκαν όλες οι νέες τιμές μέσω του μη γραμμικού μοντέλου για όλα τα εικονοστοιχεία της και όχι μόνο για ένα μοναδικό όπως είχε γίνει προηγουμένως. Η νέα απεικόνιση που δημιουργείται έχει μέγεθος 100x100 εικονοστοιχεία με το κεντρικό να είναι αυτό που μελετήθηκε προηγουμένως. Η θέση του εικονοστοιχείου που παραθέτονται παρακάτω είναι το 677,649 και έχει κατηγοριοποιηθεί ως Grass Fodders (γρασίδι - χορτονομές).

Συγκρίνοντας για τις ίδιες χρονικές στιγμές τις πραγματικές με τις συνθετικές απεικονίσεις, παρατηρείται πως οι συνθετικές απεικονίσεις περιέχουν πιο ανοιχτούς τόνους του γκρι που συνεπάγεται πως αυτές εκφράζουν υψηλότερες τιμές του δείκτη βλάστησης του NDVI. Η απόκλιση αυτή είναι λογική καθώς το μοντέλο δεν μπορεί να προσαρμοστεί βέλτιστα στο σύνολο των δεδομένων και να δώσει ακριβώς τις τιμές που υπάρχουν στην πραγματικότητα, παρόλα ταύτα δεν εντοπίζονται μεγάλες διαφορές κάτι που υποδεικνύει και την αποτελεσματικότητα του μη γραμμικού αρμονικού μοντέλου.

Ημερομηνία : 26-10-2018

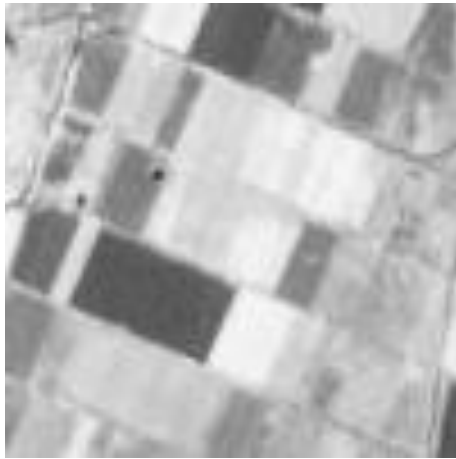


Πραγματική

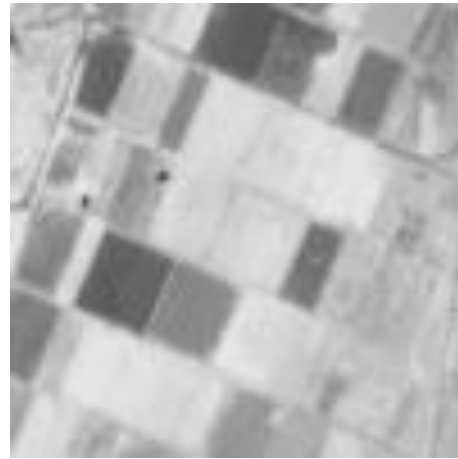


Συνθετική

Ημερομηνία : 26-10-2019

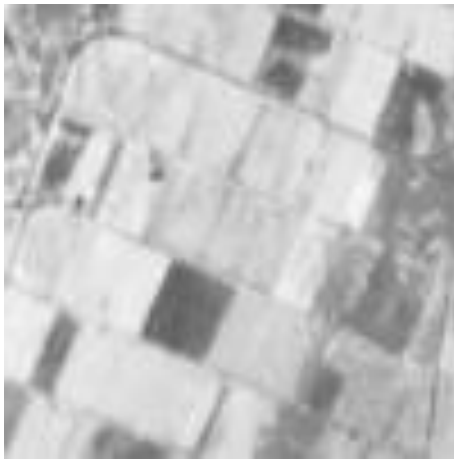


Πραγματική

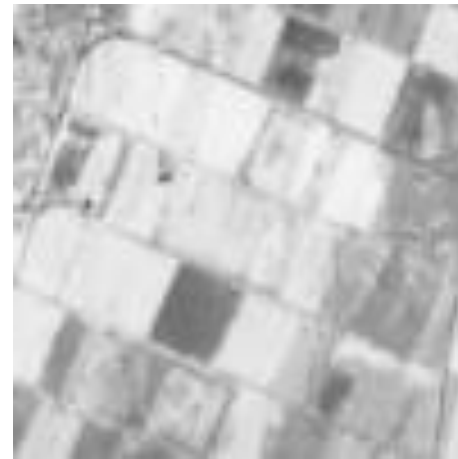


Συνθετική

Ημερομηνία : 12-8-2019

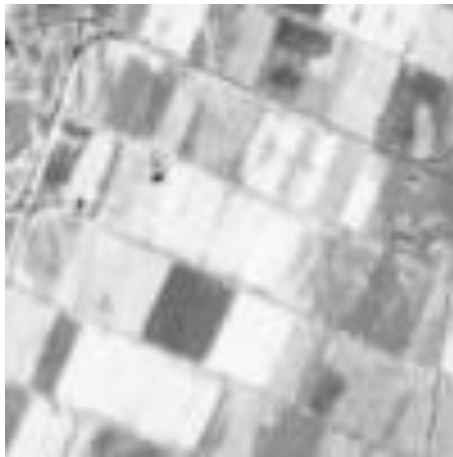


Πραγματική

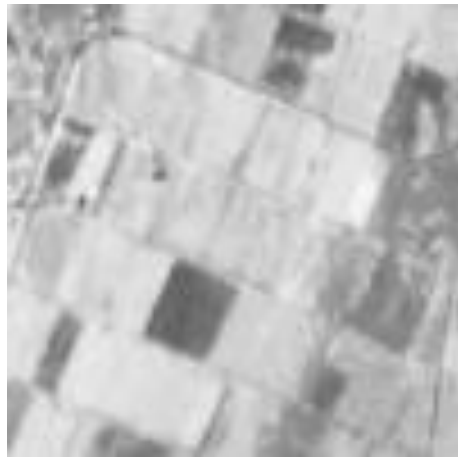


Συνθετική

Ημερομηνία : 22-8-2019

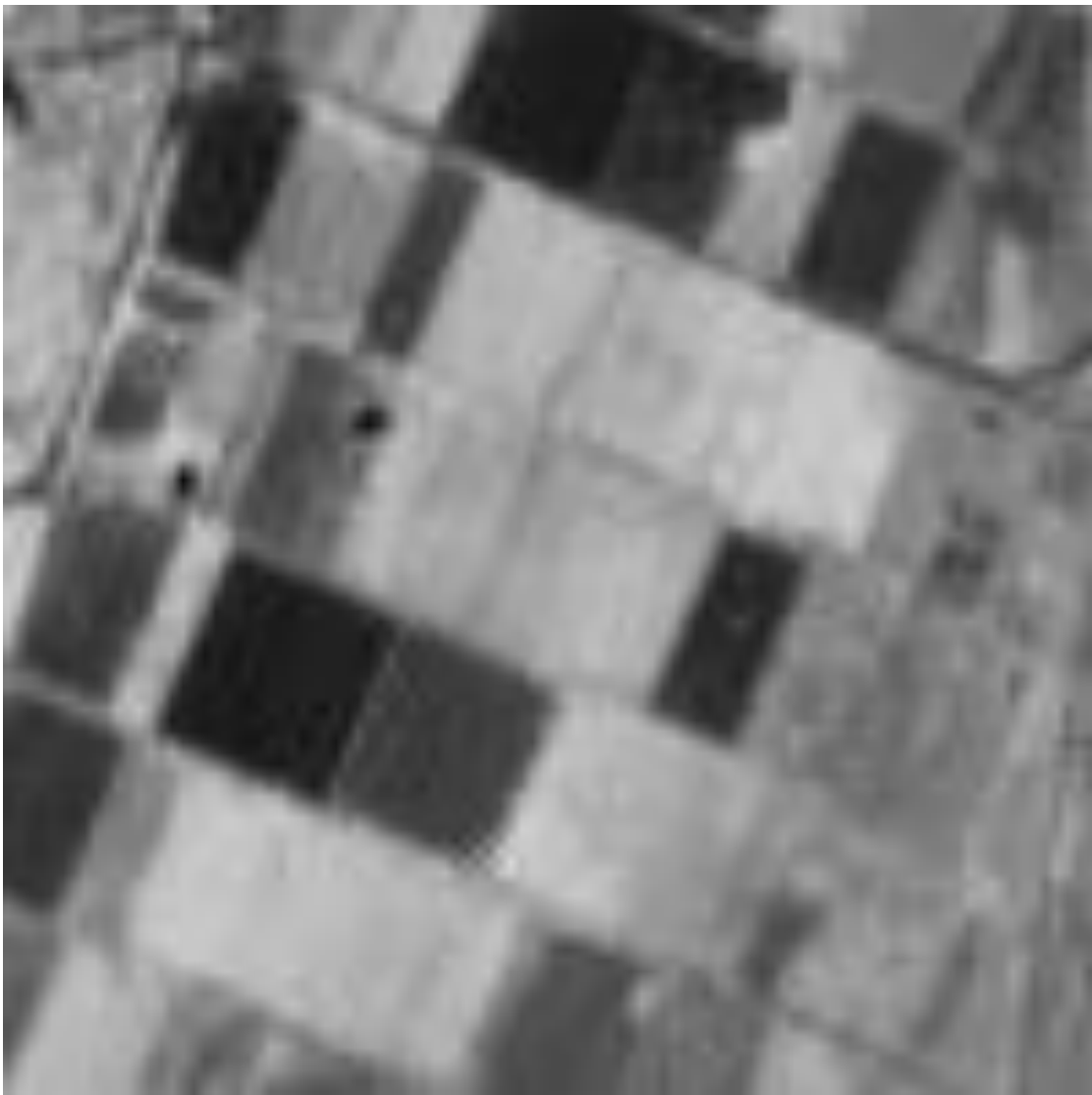


Πραγματική



Συνθετική

Στις παραπάνω απεικονίσεις φαίνεται η διακύμανση των τιμών στο πέρας ενός έτους αλλά και η επαναληψιμότητα τους αν η χρονοσειρά είναι πάνω από 1 χρόνο και καταγράφονται δεδομένα για ίδιες ημερομηνίες με τη μόνη διαφορά να έγκειται στην χρονιά που πάρθηκαν οι απεικονίσεις. Πιο ειδικά, στις 26 Οκτωβρίου του 2018, που αποτελεί την αρχική χρονική στιγμή, και στις 26 Οκτωβρίου του 2019, που αποτελεί και την τελευταία χρονικά απεικόνιση, γίνεται φανερό πως τα εικονοστοιχεία της απεικόνισης διαθέτουν παραπλήσιες τιμές λόγω του ότι απέχουν χρονικά ένα έτος και «βλέπουν» την βλάστηση στο ίδιο βήμα του φαινολογικού κύκλου της. Τους καλοκαιρινούς μήνες οι απεικονίσεις περιέχουν αρκετά πιο ανοιχτούς τόνους του γκρι, για τον λόγο ότι τότε είναι που παρατηρούνται και οι υψηλότερες τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI. Για την δημιουργία της κινούμενης απεικόνισης, χρησιμοποιήθηκαν 34 διαφορετικά χρονικά απεικονίσεις για τις οποίες δεν εισάγονταν σφάλματα λόγω ύπαρξης σύννεφων.



Απεικόνιση 6.1 (GIF)

## 6. Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε και παρουσιάστηκαν αρμονικά μοντέλα τα οποία έχουν την δυνατότητα να προβλέψουν με την ελάχιστη δυνατή απόκλιση τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI για χρονικές στιγμές που δεν διατίθεται κάποια απεικόνιση, λόγω απόκρυψης της πληροφορίας από την ύπαρξη σύννεφων, καπνών, χιονιού ή άλλων παραγόντων, με τη χρήση μίας χρονοσειράς δεδομένων με συνολική χρονική διάρκεια ενός έτους. Μία τέτοια προσέγγιση δεν μπορεί να συγκριθεί με άλλες που εμπεριέχουν πολύ περισσότερα δεδομένα και με μεγαλύτερα χρονικά όρια καθώς η συγκεκριμένη έχει περιορισμένη χρονική διάρκεια ενός έτους. Πάραυτα, το αρχικό συμπέρασμα είναι πως τα αρμονικά μοντέλα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν σε ικανοποιητικό βαθμό σε ένα σύνολο δεδομένων, με την μόνη λεπτομέρεια ότι τα δεδομένα που εξάγονται χρειάζεται να είναι σχετικά με κάποιο είδος βλάστησης. Όπως αποδείχθηκε, δεδομένα που ανήκουν σε κατηγορίες που δεν ανήκουν στην γενική οικογένεια της βλάστησης, όπως είναι οι αστικές περιοχές, παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στις υπολογισμένες τιμές του, με αποτέλεσμα να εντοπίζονται μεγάλες ταλαντώσεις και κοψίματα στην καμπύλη που περιγράφει την πορεία του αρμονικού μοντέλου, αναιρώντας την ομαλότητα και το φυσικό σχήμα που χρειάζεται να διατηρηθεί.

Αυτό που κρίνεται απαραίτητο για την αποφυγή αρκετών σφαλμάτων είναι η σωστή προετοιμασία και επεξεργασία των δεδομένων. Μέσα από την τοποθέτηση μασκών σύννεφων και το σωστό προσδιορισμό των κατηγοριών που ανήκει κάθε εικονοστοιχείο, αποφεύγονται αρκετά σφάλματα και γίνεται πιο εύκολος ο προσδιορισμός των εικονοστοιχείων για την μετέπειτα επεξεργασία και εφαρμογή των μοντέλων.

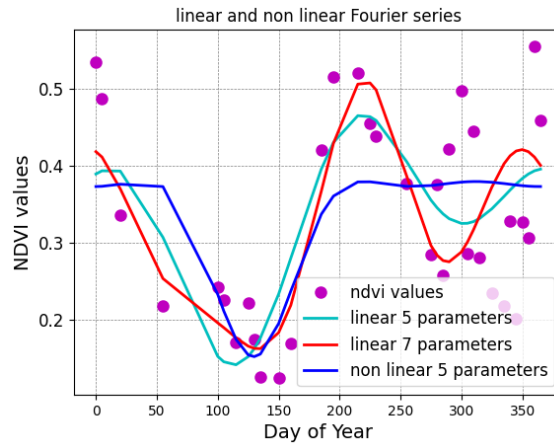
Από την βιβλιογραφία που μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε, ο προσδιορισμός της σωστής κατηγορίας και το συνολικό πλήθος των δεδομένων κρίνεται πως είναι καταλυτικοί παράγοντες για τον σωστή εφαρμογή των αρμονικών μοντέλων, περισσότερο από τι το χρονικό διάστημα για το οποίο επιλέγεται. Όσο περισσότερα είναι τα δεδομένα που συμπεριλαμβάνονται στην εφαρμογή των μοντέλων, τόσο πιο έγκυρα θα είναι τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν με το αρνητικό να είναι πως θα απαιτούν αρκετό χρόνο, αρκετά μεγάλη υπολογιστική δύναμη αλλά και έναν έμπειρο χειριστή για να τα διαχειριστεί όπως αρμόζει. Τα παραδείγματα που μελετήθηκαν είχαν εφαρμοστεί σε πολύ μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων αλλά και σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερου του ενός έτους, όπως επιλέχθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, και όπως είναι λογικό, παρέχουν αρκετά καλύτερα και ακριβή αποτελέσματα.

Από όλες τις κατηγορίες που μελετήθηκαν, αυτή της ασφάλτου εξήγε με διαφορά τα χειρότερα αποτελέσματα καθώς υπήρχε αρκετά μεγάλη διακύμανση των τιμών ακόμα και σε διαδοχικές απεικονίσεις. Ένα τέτοιο εύρος τιμών δημιουργεί μεγάλες ταλαντώσεις ειδικά στα γραμμικά μοντέλα καθώς προσπαθούν να προσαρμοστούν σε αυτά, αλλά και στο μη γραμμικό μοντέλο που έχει μία ομαλότερη πορεία αλλά και αυτό έχει πολύ μεγαλύτερα σφάλματα στον υπολογισμό τιμών. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέχθηκε κατηγορίες εκτός της γενικής οικογενείας της βλάστησης να μην επιλεχθούν για μελέτη καθώς δεν μπορούσαν να εξαχθούν σαφή αποτελέσματα.

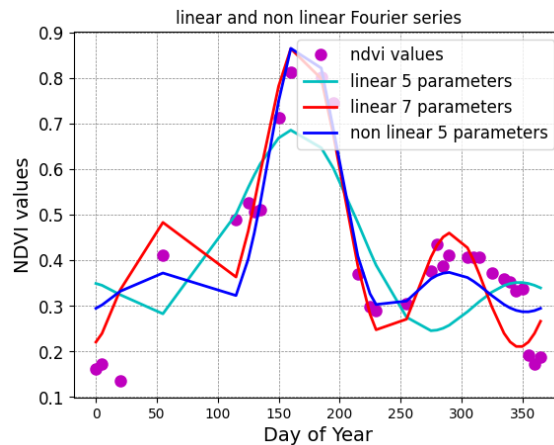
Ακόμα, καταλυτικό παράγοντα διαδραματίζει η επιλογή του σωστού αλγορίθμου βελτιστοποίησης για το μη γραμμικό αρμονικό μοντέλο των 5 παραμέτρων καθώς μέσου αυτού,



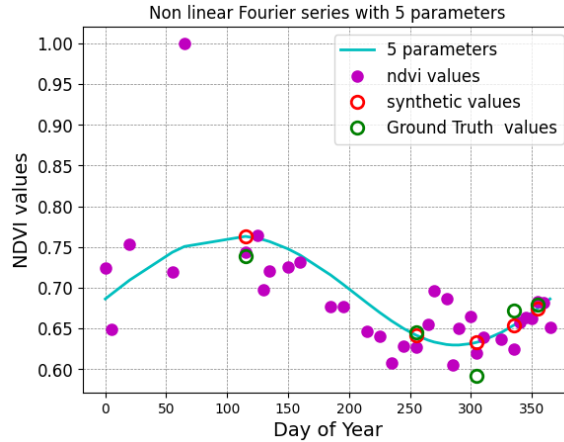
δίνεται η δυνατότητα στην μη γραμμική προσέγγιση που γίνεται, να εναρμονιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα στο σύνολο των δεδομένων. Για αυτό το λόγο, δοκιμάστηκαν πολυάριθμοι αλγόριθμοι και δοκιμάστηκαν αρκετές τιμές στο διάνυσμα καλύτερων τιμών για να μειωθεί όσο τον δυνατόν η απόκλιση των τιμών του μοντέλου σε σχέση με τις τιμές που παρουσιάζουν τα δεδομένα. Στα διαγράμματα γίνεται φανερό πως το μη γραμμικό μοντέλο των 5 παραμέτρων εντοπίζονται αρκετά «σπασίματα».



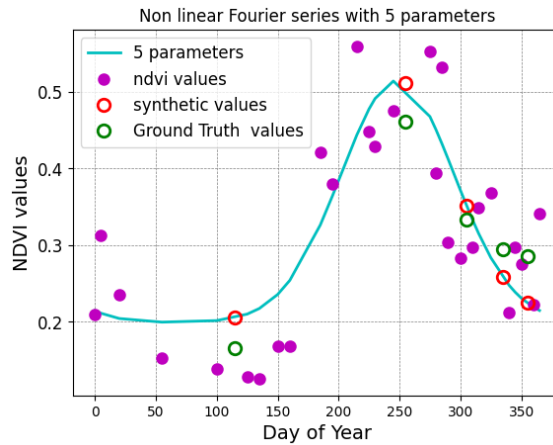
Γραφήματα 6.1 Απεικόνιση αρμονικών μοντέλων



Γραφήματα 6.2 Απεικόνιση αρμονικών μοντέλων



Γραφήματα 6.3 Απεικόνιση συνθετικών τιμών



Γραφήματα 6.4 Απεικόνιση συνθετικών τιμών

Κρίθηκε πως και τα τρία μοντέλα εμφάνισαν ικανοποιητική προσαρμοστικότητα πάνω στο σύνολο των δεδομένων για τα οποία υπήρχε η γνώση πως ανήκουν σε κατηγορίες βλάστησης. Παρόλο τις κοντινές τιμές, το μη γραμμικό μοντέλο των 5 παραμέτρων με τη χρήση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης COBYLA, εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τις γραμμικές προσεγγίσεις τόσο στις αρχικές δοκιμές, όπου δοκιμάστηκε το επίπεδο της προσαρμογής των μοντέλων στο σύνολο των δεδομένων, αλλά και στην περίπτωση που χρειάστηκε κάθε αρμονικό μοντέλο να προβλέψει τις τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI, εκεί πάλι η μη γραμμική προσέγγιση είναι πιο αποτελεσματική.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η χωρική ανάλυση της απεικόνισης αλλά και το χρονικό βήμα με το οποίο έχουν παρθεί από τον εκάστοτε δορυφόρο, ενώ χρειάζεται και μία δόση τύχης όσον αφορά τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν στην περιοχή. Ειδικότερα, τους χειμερινούς μήνες υπάρχουν πολύ λιγότερες παρατηρήσεις συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες λόγω των έντονων και δυσμενών καιρικών φαινομένων που προκαλούν επικάλυψη της υπό μελέτη

έκτασης με μάζες χιονιού ή με τις αέρινες μάζες σύννεφων που αποκρύπτουν την πολύτιμη πληροφορία που επιζητείτε.

Μετά το πέρας όλης της διαδικασίας καταλήγει το συμπέρασμα πως σε ένα πεπερασμένο χρονικά σύνολο δεδομένων, το μη γραμμικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα από οποιαδήποτε γραμμική προσέγγιση δοκιμάστηκε με την εφαρμογή του σωστού αλγορίθμου βελτιστοποίησης, που στην δεδομένη περίπτωση είναι ο COBYLA.

Εν κατακλείδι, η πρόβλεψη τιμών για χρονικές στιγμές που δεν διατίθενται είναι δυνατόν μέσα από την προσαρμογή αρμονικών μοντέλων και ειδικότερα αυτού του μη γραμμικού με 5 παραμέτρους σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό με την εκπλήρωση των παραμέτρων που χρειάζονται για να εξασφαλίσουν έγκυρα αποτελέσματα. Μερικοί από τις παραμέτρους είναι πως χρειάζονται τουλάχιστον 8 απεικονίσεις για να μπορέσει να εφαρμοστεί σε ικανοποιητικό βαθμό το μοντέλο, με το βέλτιστο αριθμό απεικονίσεων να κρίνεται στις είκοσι μία (21) ως τον ελάχιστο δυνατό για την εξαγωγή των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων. Σημαντικό ρόλο παίζει και η διάρκεια της χρονοσειράς στο πλήθος των διαθέσιμων απεικονίσεων αλλά και για τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων στο τέλος.

## 7. Βιβλιογραφία

1. D.P. Roy, L. Yan, 2020. Robust Landsat-based crop time series modelling. *Remote Sensing of Environment* 238 (2020) 110810
2. Lin Yana, David P. Roy, 2020. Spatially and temporally complete Landsat reflectance time series modelling: The fill-and-fit approach. *Remote Sensing of Environment* 241 (2020) 111718
3. Jie ZHOU, Guangcheng HU, Li JIA, Massimo MENENTI. Evaluation of Harmonic Analysis of Time Series (HANTS): impact of gaps on time series reconstruction. 2012 Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications
4. Hugo Carrao, Mário Caetano, Paulo Gonçalves. A Nonlinear Harmonic Model for Fitting Satellite Image Time Series: Analysis and Prediction of Land Cover Dynamics.
5. D.P. Roy, L. Yan. Robust Landsat-based crop time series modelling. *Remote Sensing of Environment* 238 (2020) 110810
6. Brian D. Wardlow, Stephen L., Egbert, Jude H. Kastens Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains, Volume 108, Issue 3, 15 June 2007
7. Zhe Zhu, Curtis E. Woodcock, Christopher Holden, Zhiqiang Yang. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time. *Remote Sensing of Environment* 162 (2015) 67–83.
8. Toshihiro Sakamoto, Masayuki Yokozawa, Hitoshi Toritani, Michio Shibayama, Naoki Ishitsuka, Hiroyuki Ohno. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 96 (2005) 366 – 374.
9. SUHET, Sentinel-2 User Handbook

10. Alan Prahutama et al 2018 J. Modelling fourier regression for time series data- a case study: modelling inflation in foods sector in Indonesia. Conf. Ser. 974 012067
11. Kovalskyy, V., Roy, D.P., Zhang, X., Ju, J., 2012. The suitability of multi-temporal Web-Enabled Landsat Data (WELD) NDVI for phenological monitoring - a comparison with flux tower and MODIS NDVI. Remote Sens. Lett. 3 (4), 325–334.
12. Adusei, B., Stehman, S.V., Hansen, M.C., 2017. National-scale soybean mapping and area estimation in the United States using medium resolution satellite imagery and field survey. Remote Sens. Environ. 190, 383–395.
13. Wardlow, B.D., Egbert, S.L., Kastens, J.H., 2007. Analysis of time-series MODIS 250m vegetation index data for crop classification in the US Central Great Plains. Remote Sens. Environ. 108 (3), 290–310.
14. Masek, J.G., Vermote, E.F., Saleous, N.E., Wolfe, R., Hall, F.G., Huemmrich, K.F., Gao, F., Kutler, J., Lim, T.K., 2006. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 3 (1), 68–72