



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**“Επεξεργασία και μελέτη δεδομένων γεωμαγνητικού
πεδίου από το δίκτυο αισθητήρων ENIGMA”**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Διονυσία Γαρουφαλιά

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

“Επεξεργασία και μελέτη δεδομένων γεωμαγνητικού πεδίου από το δίκτυο αισθητήρων ENIGMA”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Διονυσία Γαρουφαλιά

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουλίου 2024.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2024

.....
Αγγελική Διονυσία Γαρουφαλιά
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αγγελική Διονυσία Γαρουφαλιά, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη και επεξεργασία δεδομένων γεωμαγνητικού πεδίου από το δίκτυο αισθητήρων ENIGMA, του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ). Αρχικά, παρουσιάζονται σε θεωρητικό επίπεδο το γεωμαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικοί αισθητήρες και, συγκεκριμένα, οι αισθητήρες Fluxgate, καθώς και οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος median filtering, Kalman filtering και Empirical Mode Decomposition (EMD). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός εργαλείου για την εξαγωγή και την επεξεργασία των δεδομένων του ENIGMA, η οποία έγινε με τη χρήση Python. Το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων, περιείχε δεδομένα για 3 περιοχές της Ελλάδας για το έτος 2015, καλύπτοντας διαφορετικά χρονικά διαστήματα διαθέσιμων μετρήσεων σε κάθε περιοχή. Η επεξεργασία των δεδομένων του γεωμαγνητικού πεδίου, περιλαμβάνει την εφαρμογή median filtering στο σύνολό τους, καθώς και Kalman filtering και EMD σε επιλεγμένες χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν γραφικά για το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων και περιπτώσεις μεγάλου ενδιαφέροντος παρουσιάζονται αναλυτικά στα αποτελέσματα της εργασίας. Η μελέτη που έγινε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επέτρεψε και τον εντοπισμό αρκετών περιπτώσεων γεωμαγνητικών καταιγίδων, οι οποίες έχουν διασταυρωθεί με αντίστοιχη βιβλιογραφία. Το εργαλείο που αναπτύχθηκε, δίνει πολύτιμες πληροφορίες τόσο για τα ίδια τα δεδομένα στα οποία έγινε η επεξεργασία, αλλά και για τη μελέτη της εξέλιξης και της συμπεριφοράς του γεωμαγνητικού πεδίου.

Λέξεις κλειδιά: Γεωμαγνητικό πεδίο, Αισθητήρας πύλης-ροής, Φίλτρο median, Φίλτρο Kalman, Empirical Mode Decomposition

Abstract

In the current thesis the study and processing of geomagnetic field data from the ENIGMA sensor network of the National Observatory of Athens (NOA) is conducted. Initially, the geomagnetic field, the magnetic sensors and, specifically, the Fluxgate sensors, as well as the median filtering, Kalman filtering and Empirical Mode Decomposition (EMD) signal processing techniques are presented at a theoretical level. Then, the development of a tool for extracting and processing the data of ENIGMA, which was done using Python, is presented. The available dataset, contained data for 3 areas in Greece for the year 2015, covering different time spans for each area. The processing of the geomagnetic field data includes the application of median filtering to the entire dataset, as well as Kalman filtering and EMD to selected time periods. The results were graphically illustrated for the entire set of available measurements and cases of great interest are presented in detail in the results section of this thesis. The study conducted in the context of this work, allowed also the identification of several cases of geomagnetic storms, which were cross referenced with the relevant literature. The developed tool provides valuable information not only about the processed dataset, but also for the study of the evolution and the behavior of the geomagnetic field.

Key words: Geomagnetic field, Fluxgate sensor, Median filtering, Kalman filtering, Empirical Mode Decomposition

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία σε συνεργασία με το Sensors Lab και πάνω στο συγκεκριμένο θέμα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κυρία Κτενά, στην οποία είμαι ευγνώμων για τη συνεχή καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και για τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου σε όλα τα στάδιά της. Ο χρόνος που αφιέρωσε και οι συμβουλές που μου παρείχε ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Λήδα Τζαννέτου και το Λευτέρη Μπακόγλου για την εξαιρετική συνεργασία, τη συχνή επικοινωνία και την υποστήριξη τους όλους αυτούς τους μήνες.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μπαλάση και την κυρία Μπούση για την παραχώρηση των δεδομένων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, καθώς και για τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το γεωμαγνητικό πεδίο.

Τέλος, θέλω να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου, που όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου και με στήριξαν σε αυτή μου την πορεία. Τους είμαι απεριόριστα ευγνώμων.

Στο Μάκη, το Γιώργο και την Κυριακή.

Πρόλογος

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη και η επεξεργασία δεδομένων γεωμαγνητικού πεδίου από το δίκτυο αισθητήρων ENIGMA. Το ENIGMA πρόκειται για ένα πρότυπο δίκτυο μαγνητομέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), με δεδομένα σε 3 περιοχές της Ελλάδας, και συγκεκριμένα στην Αττική (Διόνυσος), τα Τρίκαλα (Κλοκωτός) και τη Λακωνία (Βελιές).

Η εργασία εκπονήθηκε σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων (Sensors Lab) του Ε.Μ.Π και σκοπός της ήταν η δημιουργία ενός προγραμματιστικού εργαλείου το οποίο επιτρέπει τη μελέτη δεδομένων γεωμαγνητικού πεδίου και όχι η διερεύνηση του ίδιου του πεδίου.

Αρχικά, ξεκινώντας από το θεωρητικό μέρος, στο Κεφάλαιο 1 γίνεται παρουσίαση του γεωμαγνητικού πεδίου. Το κεφάλαιο ξεκινάει με αναφορά στο εσωτερικό μαγνητικό πεδίο της Γης, και περιγράφεται το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα, που αποτελεί την κύρια συνιστώσα του εσωτερικού γεωμαγνητικού πεδίου, καθώς και το λιθοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο, που πρόκειται για τη δευτερεύουσα συνιστώσα του. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο της Γης και στις βασικές συνεισφορές σε αυτό.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι τεχνικές μέτρησης του γεωμαγνητικού πεδίου. Αρχικά, περιγράφονται οι συνιστώσες του πεδίου και παρουσιάζεται η εξίσωση που δίνει την ολική πυκνότητα μαγνητικής ροής βάσει των συνιστωσών του. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις μετρήσεις του γεωμαγνητικού πεδίου, και στις συγκεκριμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό, οι οποίες περιλαμβάνουν τις επίγειες, τις εναέριες, τις θαλάσσιες και τις δορυφορικές μετρήσεις. Στο τέλος του κεφαλαίου, περιγράφονται τα μοντέλα με τα οποία προσεγγίζονται το μαγνητικό πεδίο της Γης, τα οποία αποτελούνται από το πειραματικό και το μαθηματικό μοντέλο.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα όργανα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου και παρουσιάζονται οι μαγνητικοί αισθητήρες, ή μαγνητόμετρα. Στη συνέχεια, γίνεται μια πιο εκτενής παρουσίαση των μαγνητικών αισθητήρων Fluxgate, ή αλλιώς μαγνητομέτρων πύλης – ροής, καθώς είναι το είδος του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των δεδομένων του δικτύου ENIGMA που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τρεις τεχνικές επεξεργασίας σήματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μετρήσεων γεωμαγνητικού πεδίου και που αποτέλεσαν και σημαντικό μέρος της πειραματικής διαδικασίας της εργασίας. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν το Median filtering, το Kalman filtering και το Empirical Mode Decomposition (EMD).

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται εκτενώς η επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη που έγινε πάνω σε αυτά. Το κεφάλαιο ξεκινάει με μια περιγραφή του συνόλου δεδομένων,

καθώς και του δικτύου αισθητήρων ENIGMA από το οποίο τα δεδομένα προέρχονται. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην προεπεξεργασία από την οποία πέρασαν τα δεδομένα, καθώς και σε ορισμένες επιλογές που προτιμήθηκαν σχετικά με τη διαχείριση των δεδομένων. Έπειτα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος, από τις οποίες πέρασαν τα δεδομένα και, συγκεκριμένα, το median filtering, το Kalman filtering και το Empirical Mode Decomposition (EMD), των οποίων η θεωρητική προσέγγιση παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της μελέτης, τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή ενοτήτων με συγκεκριμένες προσεγγίσεις γύρω από τεχνικές και αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση. Η ενότητα αυτή, περιέχει τον εντοπισμό ορισμένων αποτελεσμάτων που αναπαριστούν γεωμαγνητικές καταιγίδες και τη διασταύρωση αυτών με τη σχετική βιβλιογραφία.

Τέλος, γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα και τις μελλοντικές επεκτάσεις του εργαλείου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης και παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και ένα παράρτημα με τον κώδικα που γράφτηκε για την επεξεργασία και τη μελέτη των δεδομένων ENIGMA.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Θεωρητικό Μέρος.....	1
1. Το γεωμαγνητικό πεδίο.....	1
1.1 Το εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο.....	1
1.1.1 Το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα.....	1
1.1.2 Το λιθοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο.....	2
1.2 Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.....	3
2. Τεχνικές μέτρησης του γεωμαγνητικού πεδίου.....	7
2.1 Συνιστώσες γεωμαγνητικού πεδίου.....	7
2.2 Μετρήσεις γεωμαγνητικού πεδίου.....	7
2.3 Μοντέλα γεωμαγνητικού πεδίου.....	9
3. Όργανα μέτρησης γεωμαγνητικού πεδίου.....	13
3.1 Μαγνητόμετρα.....	13
3.2 Αισθητήρες Fluxgate.....	14
4. Τεχνικές επεξεργασίας σήματος.....	17
4.1 Median filtering.....	17
4.2 Kalman filtering.....	18
4.3 Empirical Mode Decomposition (EMD).....	18
Πειραματικό Μέρος.....	21
5. Επεξεργασία Δεδομένων και Αποτελέσματα.....	21
5.1 Τα δεδομένα ENIGMA.....	21
5.1.1 ENIGMA.....	21
5.1.2 SuperMAG.....	21
5.1.3 Περιγραφή του συνόλου δεδομένων.....	22
5.2 Προεπεξεργασία Δεδομένων.....	23
5.3 Επεξεργασία Δεδομένων.....	26
5.3.1 Median filtering.....	28
5.3.2 Kalman filtering.....	29
5.3.3 Empirical Mode Decomposition (EMD).....	31
5.4 Αποτελέσματα.....	33
5.4.1 Μελέτη της εξέλιξης στο χρόνο κοινών χρονοσειρών για τις 3 περιοχές.....	33
5.4.1.1 Ημερήσια Μελέτη.....	33
5.4.1.2 Εβδομαδιαία Μελέτη.....	40
5.4.1.3 Μηνιαία Μελέτη.....	43
5.4.2 Επίδραση Kalman.....	43
5.4.3 Εντοπισμός spikes μεγάλης διάρκειας.....	48
5.4.3.1 07/2015 Διόνυσος, Λακωνία, Τρίκαλα.....	48
5.4.3.2 03/2015 Διόνυσος, Λακωνία.....	50
5.4.3.3 12/2015 Διόνυσος, Τρίκαλα.....	51
5.4.3.4 06/2015 Διόνυσος, Λακωνία Τρίκαλα.....	52
5.4.4 Ετήσια καταγραφή διαθέσιμων δεδομένων του γεωμαγνητικού πεδίου για τις τρεις περιοχές.....	53
6. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	57
Βιβλιογραφία.....	59
Παράρτημα.....	61
1. Κώδικας για τις συναρτήσεις επεξεργασίας σήματος.....	61
2. Κώδικας για την επεξεργασία ημερήσιων και μηνιαίων μετρήσεων μίας περιοχής.....	63
3. Κώδικας για την επεξεργασία πολλών μηνών και περιοχών.....	69

4. Κώδικας για τη γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.....	71
---	----

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1: Το Γεωμαγνητικό Πεδίο

1.1 Το μαγνητικό πεδίο της Γης

Το συνολικό γεωμαγνητικό πεδίο, πρόκειται κατά βάση για ένα δίπολο με μεταβαλλόμενη κλίση από τον άξονα περιστροφής της Γης. Το μαγνητικό πεδίο της Γης αποτελείται από ένα σύνολο συνιστωσών, ο βασικός διαχωρισμός των οποίων είναι στο εσωτερικό και στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Οι συνιστώσες αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.3.1 Το εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο

Η πρώτη εικόνα του εσωτερικού της Γης, προήλθε από τη μελέτη του χρόνου διάδοσης και της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων. Η ανακάλυψη πως η μέση πυκνότητα της Γης είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του φλοιού, οδήγησε στο συμπέρασμα πως στα βαθύτερα στρώματά της, η Γη αποτελείται από πυκνότερα υλικά [7].

Το εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο, αποτελείται από το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα και το λιθοσφαιρικό πεδίο.

1.3.1.1 Το γεωμαγνητικό πεδίο του πυρήνα

Στις αρχές του 20ου αιώνα, η εικόνα για την εσωτερική δομή της Γης άρχισε εμμέσως να διαμορφώνεται μέσω της μελέτης του χρόνου διάδοσης και της ταχύτητας των διαθλασμένων και ανακλασμένων σεισμικών κυμάτων. Οι αλλαγές στην ταχύτητα των P (επιμηκών ή πρώτων / compression) και S (εγκάρσιων ή δευτερευόντων / shear) σεισμικών κυμάτων καθώς ταξιδεύουν μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων της Γης, προκαλούν διάθλαση των κυμάτων αυτών, η οποία περιγράφεται σύμφωνα με το νόμο των Snell-Descartes. Η ανάκλαση, προκαλείται από μεγάλη αύξηση στην ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων. Με αυτό τον τρόπο, οι σεισμολόγοι μπόρεσαν να βρουν και να χαρακτηρίσουν τις βασικές σεισμικές ασυνέχειες μεταξύ των διαφορετικών εσωτερικών στρωμάτων της Γης [8].

Το εσωτερικό της Γης αποτελείται από τον φλοιό (crust), το μανδύα (mantle -inner and outer), τον εξωτερικό πυρήνα (outer core) και τον εσωτερικό πυρήνα (inner core).

Ο φλοιός είναι το εξωτερικό στρώμα του εσωτερικού της Γης και βρίσκεται πάνω από την ασυνέχεια Mohorovicic (Moho). Η ασυνέχεια αυτή, η οποία βρίσκεται σε βάθος 10 - 60 χλμ, πρόκειται για μία απότομη αύξηση της ταχύτητας των σεισμικών P κυμάτων, και ορίζει το όριο μεταξύ φλοιού και μανδύα [9]. Ο φλοιός αποτελείται κυρίως από ενώσεις πυριτίου και αργίλου με άλλα στοιχεία, καθώς και από ιζηματογενή πετρώματα που σχηματίζονται στις θάλασσες και τους ωκεανούς.

Ο μανδύας είναι ένα παχύ στρώμα πετρωμάτων, μέχρι το όριο μανδύα-πυρήνα περίπου στα 2900 χλμ βάθος. Διακρίνεται σε ανώτερο και κατώτερο μανδύα, μέσω μιας ασυνέχειας που εντοπίζεται στα 660 χλμ βάθος. Υπάρχουν και άλλες ασυνέχειες στον μανδύα, μερικών από τις οποίες η φύση όμως δεν είναι απόλυτα εντοπισμένη και μπορεί να οφείλεται είτε σε ορυκτολογικές διαφορές και μεταβάσεις, είτε σε όρια μεταξύ διαφορετικών χημικών συνθέσεων [8].

Σε βάθος μεγαλύτερο από το όριο μανδύα-πυρήνα, βρίσκεται ο εξωτερικός πυρήνας της Γης ο οποίος δεν επιτρέπει τη διέλευση εγκάρσιων κυμάτων, γεγονός το οποίο υποδεικνύει την υγρή του κατάσταση. Το 1936, αποδείχτηκε και η ύπαρξη ενός στερεού εσωτερικού πυρήνα [8].

Ο πυρήνας της Γης συνίσταται από δύο στρώματα, αποτελούμενα κυρίως από σίδηρο και νικέλιο. Τον εσωτερικό στερεό πυρήνα, έκτασης ~1222 χλμ και τον εξωτερικό υγρό πυρήνα, έκτασης ~2200 χλμ. Αυτό σημαίνει πως από βάθος ~6371 χλμ μέχρι και σε βάθος ~2900 χλμ, η σύσταση της Γης είναι κυρίως σίδηρος και νικέλιο σε στερεή και υγρή μορφή. Το γεωμαγνητικό πεδίο σχηματίζεται από την περιστροφή και μεταγωγή θερμότητας του εξωτερικού υγρού μαγνητικού πυρήνα [1].

Το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα αναφέρεται και ως κύριο πεδίο, καθώς αποτελεί το ~90% του γεωμαγνητικού πεδίου που μετράται στη γήινη επιφάνεια και έτσι πρόκειται για την επικρατέστερη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της Γης. Οι τιμές του κύριου μαγνητικού πεδίου βρίσκονται σε ένα εύρος περίπου από 25000-30000 nT στον Ισημερινό, μέχρι 60000-65000 nT στους πόλους.

Το κύριο μαγνητικό πεδίο δεν είναι στατικό και υπόκειται τόσο σε χρονικές όσο και σε χωρικές μεταβολές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών των συνεχών μεταβολών, αποτελεί το γεγονός του ότι οι πόλοι του μαγνητικού πεδίου δεν είναι σταθεροί. Ενδεικτικά, το 2005 είχαν απόκλιση 10.3 μοίρες από τους πόλους περιστροφής του πλανήτη, ενώ εν έτει 2024 η απόκλιση αυτή είναι στις 11 μοίρες. Το πιο ενδεικτικό παράδειγμα αυτών των μεταβολών, είναι η αντιστροφή των μαγνητικών πόλων και κατ' επέκταση της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου, η οποία συμβαίνει ανά μεταβαλλόμενα χρονικά διαστήματα. Οι αλλαγές αυτές καταγράφονται στη λιθόσφαιρα της Γης και δίνουν πληροφορίες για το παρελθόν της [1].

1.3.1.2 Το λιθосφαιρικό μαγνητικό πεδίο

Ο φλοιός και τα ανώτερα στρώματα του μανδύα, αποτελούν τη λιθόσφαιρα, η οποία πρόκειται για το εξωτερικό, συμπαγές και βραχώδες μέρος της Γης.

Το λιθосφαιρικό μαγνητικό πεδίο είναι ~400 φορές μικρότερο σε ένταση από το πεδίο του πυρήνα, και παίρνει τιμές από 0 έως |1000| nT. Το πεδίο αυτό εντοπίζεται στον φλοιό και στα ανώτερα στρώματα του μανδύα, σε ένα στρώμα έκτασης από 10 χλμ έως 70 χλμ, ανάλογα με την τοποθεσία.

Η βασική πηγή του λιθοσφαιρικού πεδίου είναι κυρίως ο μαγνητισμός των πετρωμάτων σε αυτά τα στρώματα. Από βάθος 70 χλμ έως 2900 χλμ, δεν παρατηρούνται μαγνητικές πηγές, καθώς οι θερμοδυναμικές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη διατήρηση του μαγνητισμού των βραχωδών πετρωμάτων. Αυτό έχει να κάνει με τη θερμοκρασία Curie, δηλαδή τη θερμοκρασία από την οποία και πάνω τα μαγνητικά χάνουν το μαγνητισμό τους, λόγω των πολύ γρήγορων ταλαντώσεων των ατόμων, οι οποίες χαλάνε που εμποδίζουν τη σωστή ευθυγράμμιση τους ώστε να διατηρηθεί ο μαγνητισμός [1].

Η θερμοκρασία στη λιθόσφαιρα και στα εξωτερικά στρώματα της Γης, είναι μικρότερη από ό, τι στα πιο εσωτερικά της στρώματα. Επίσης, ο μαγνητίτης που είναι το βασικό μαγνητικό υλικό που συναντάται στο φλοιό της Γης, έχει θερμοκρασία Curie 580 °C [1], μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στη λιθόσφαιρα, και έτσι ο μαγνητίτης είναι σε θέση να διατηρεί το μαγνητισμό του.

Ο υπολειμματικός αυτός μαγνητισμός (remanent magnetisation) που διατηρούν τα μαγνητικά υλικά καθώς ψύχονται κάτω από τη θερμοκρασία Curie τους, είναι η βασική πηγή του λιθοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου, και επίσης η πιο μόνιμη. Κατά κάποιο τρόπο, λοιπόν, το περασμένο γεωμαγνητικό πεδίο, είναι αποτυπωμένο στον φλοιό της Γης.

Στο λιθοσφαιρικό πεδίο υπάρχει επίσης μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από το μαγνητισμό των βράχων από το γεωμαγνητικό πεδίο του πυρήνα (induced magnetisation), παρόλα αυτά ο μαγνητισμός αυτός είναι ασθενέστερος και όχι τόσο μόνιμος όσο ο remanent.

1.3.2 Το εξωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον Ήλιο, κυριαρχεί στο διαπλανητικό χώρο. Η βασική συνεισφορά στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο της Γης, προέρχεται από τον Ήλιο, ο οποίος αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο της Γης μέσω του ηλιακού ανέμου, ο οποίος κουβαλάει μαζί του τις μαγνητικές γραμμές και κατ' επέκταση το μαγνητικό πεδίο του ήλιου, και μέσω αυτής της αλληλεπίδρασης δημιουργεί τη μαγνητόσφαιρα.

Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, προστίθεται στην εικόνα του λιθοσφαιρικού και την αλλοιώνει, κυρίως την ημέρα, στους (μαγνητικούς ή γεωγραφικούς) πόλους και κοντά στον μαγνητικό ισημερινό [1].

Πάνω από την επιφάνεια της Γης βρίσκονται η ατμόσφαιρα, η ιονόσφαιρα και η μαγνητόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα αποτελείται από την τροπόσφαιρα, τη στρατόσφαιρα, τη μεσόσφαιρα, τη θερμοσφαιρα και την εξώσφαιρα. Η ιονόσφαιρα περιλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και το διάστημα που ξεκινάει ακριβώς έξω από αυτήν. Η μαγνητόσφαιρα ορίζεται ως η περιοχή πάνω από την ιονόσφαιρα, η οποία περιβάλλει τη Γη.

Στη μαγνητόσφαιρα, η κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων καθορίζεται κατά βάση από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Στην περιοχή αυτή, οι συγκρούσεις των σωματιδίων είναι πολύ σπάνιες, γεγονός που δημιουργεί μία άπειρη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Λόγω αυτού, μαγνητικά πεδία και σωματίδια πολύ χαμηλής ενέργειας είναι συνδεδεμένα, και έτσι η κίνηση του πλάσματος οδηγεί και στην κίνηση των μαγνητικών γραμμών στην περιοχή. Το γεγονός πως αυτές οι κινήσεις εξαρτώνται από φορτία και ενέργεια, συνεπάγεται τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων, τα οποία παράγουν μαγνητικά πεδία που προστίθενται στο προερχόμενο από το εσωτερικό της Γης γεωμαγνητικό πεδίο.

Το εξωτερικό όριο της μαγνητόσφαιρας, σε αντίθεση με την ιονόσφαιρα, είναι καλά ορισμένο και απόλυτο, σε μια ακτίνα περίπου 10 φορές την ακτίνα της Γης. Δημιουργείται από ένα φύλλο ηλεκτρικού ρεύματος (sheet of electric current) που ακυρώνει σχεδόν όλο το πεδίο της Γης έξω από αυτό το όριο, ενώ το διπλασιάζει εσωτερικά. Αυτό το επίπεδο ηλεκτρικού ρεύματος αποκαλείται μαγνητόπαυση (magnetopause), και διαχωρίζει το μαγνητικό πεδίο της Γης από το πεδίο και το πλάσμα του ηλιακού ανέμου. Στη μαγνητόπαυση, ο ηλιακός άνεμος αλληλεπιδρά με το πεδίο της Γης με 2 βασικές διαδικασίες: ιξώδη αλληλεπίδραση (viscous interaction) και μαγνητική επανασύνδεση (magnetic reconnection), μηχανισμοί οι οποίοι με διαφορετικό τρόπο ο καθένας δημιουργούν μαγνητικές γραμμές με ορισμένες κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται με τον όρο μαγνητοσφαιρική ροή (magnetospheric convection).

Η αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου με τη μαγνητόσφαιρα και η μεταβαλλόμενη μαγνητοσφαιρική μεταγωγή, δημιουργεί έναν δακτύλιο ρεύματος, το ring current, δυτικής φοράς γύρω από τον Ισημερινό, ο οποίος επίσης δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που μετράται στην επιφάνεια της Γης.

Συγκεκριμένα, το γεγονός πως η γωνία αλληλεπίδρασης του ηλιακού ανέμου και του μαγνητικού πεδίου είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη, δημιουργεί μια συνθήκη κατά την οποία το μέγεθος της μαγνητοσφαιρικής μεταγωγής είναι επίσης μεταβαλλόμενο. Οι διακυμάνσεις αυτές, οδηγούν με τη σειρά τους σε μια ταχεία κίνηση πρωτονίων δυτικά και ηλεκτρονίων ανατολικά, δημιουργώντας έτσι το ring current με δυτική φορά γύρω από τον Ισημερινό [12].

Η ιονόσφαιρα διακρίνεται σε 3 περιοχές, D, E και F, ανάλογα με τον ιονισμό από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία σε κάθε μία από αυτές.

Η D περιοχή είναι η κατώτερη περιοχή της ιονόσφαιρας, και καλύπτει ύψη από 50 χλμ έως 90 χλμ. Η E βρίσκεται μεταξύ των 90 χλμ και των 150 χλμ και η F βρίσκεται πάνω από τα 150 χλμ. Το ανώτερο μέρος της ιονόσφαιρας εκτείνεται περίπου ως τα 1000 χλμ, αλλά δεν υπάρχει ακριβές όριο μεταξύ του πλάσματος της ιονόσφαιρας και της μαγνητόσφαιρας [10].

Η περιοχή μεσόσφαιρας - θερμόσφαιρας - ιονόσφαιρας είναι το σημείο 'μετάβασης' της ουδέτερης γήινης ατμόσφαιρας στο ιονισμένο πλάσμα του διαστήματος. Αυτή η

περιοχή μεσόσφαιρας - θερμόσφαιρας - ιονόσφαιρας υπόκειται σε διαρκείς μεταβολές, τόσο λόγω της ηλιακής δραστηριότητας και του διαστήματος που περιβάλλει τον πλανήτη μας, όσο και από αλλαγές στο κατώτερο μέρος της γήινης ατμόσφαιρας [11].

Ο ιονισμός των ατόμων του φωτεινού ημισφαιρίου της ιονόσφαιρας από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, οδηγεί στη δημιουργία έντονων ηλεκτρικών ρευμάτων, τα οποία δημιουργούν και τα δικά τους μαγνητικά πεδία, καθώς αυτό το ημισφαίριο καθίσταται πολύ πιο αγώγιμο από το μη φωτεινό ημισφαίριο.

2. Τεχνικές μέτρησης γεωμαγνητικού πεδίου

2.1. Συνιστώσες γεωμαγνητικού πεδίου

Το γεωμαγνητικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί πλήρως από τις καρτεσιανές συνιστώσες της μαγνητικής ροής B_X , B_Y , και B_Z , την κλίση I (Inclination) και την απόκλιση (Declination).

Η συνιστώσα B_X αναπαριστά το Βορρά (True North), η B_Y την Ανατολή (True East) και η B_Z την κατακόρυφη συνιστώσα (Vertical), με θετική κατεύθυνση προς το εσωτερικό της Γης (Ναδίρ).

Η κλίση I , πρόκειται για τη γωνία μεταξύ του B και της προβολής του στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ η απόκλιση D είναι η γωνία μεταξύ του B_X και της προβολής του B στο οριζόντιο επίπεδο.

Η ολική ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου, ή αλλιώς η ολική πυκνότητα μαγνητικής ροής, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$B = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2} \quad (2.1)$$

Στο πλαίσιο της εργασίας και ιδιαίτερα στο πειραματικό μέρος, το B στο εξής θα αναφέρεται για απλότητα ως το συνολικό ή ολικό μαγνητικό πεδίο.

2.2 Μετρήσεις γεωμαγνητικού πεδίου

Η μέτρηση του γεωμαγνητικού πεδίου γίνεται με διάφορες τεχνικές, οι οποίες συνδυαστικά παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του ανά τη Γη. Στις τεχνικές αυτές ανήκουν οι επίγειοι σταθμοί μέτρησης, οι μετρήσεις από δορυφόρους, οι θαλάσσιες μετρήσεις και οι μετρήσεις από αεροσκάφη.

Οι επίγειοι σταθμοί, τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες τοποθεσίες ανά τη Γη, παρέχουν συνεχή δεδομένα για το γεωμαγνητικό πεδίο. Οι μεγάλες χρονοσειρές που καταγράφηκαν σε αυτά τα παρατηρητήρια από την αρχή της ιστορίας τους περίπου δύο αιώνες πριν, επέτρεψαν τον εντοπισμό της κοσμικής διακύμανσης (secular variation) του μαγνητικού πεδίου του πυρήνα. Οι πιο ταχείες μεταβολές που μετρούν τα παρατηρητήρια, συνδέονται με το εξωτερικό πεδίο στο σημείο στο οποίο είναι τοποθετημένα. Επομένως, ο βασικός σκοπός ενός μαγνητικού παρατηρητηρίου είναι η μέτρηση του γεωμαγνητικού πεδίου του πυρήνα και του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, και όχι τόσο του λιθοσφαιρικού πεδίου [1].

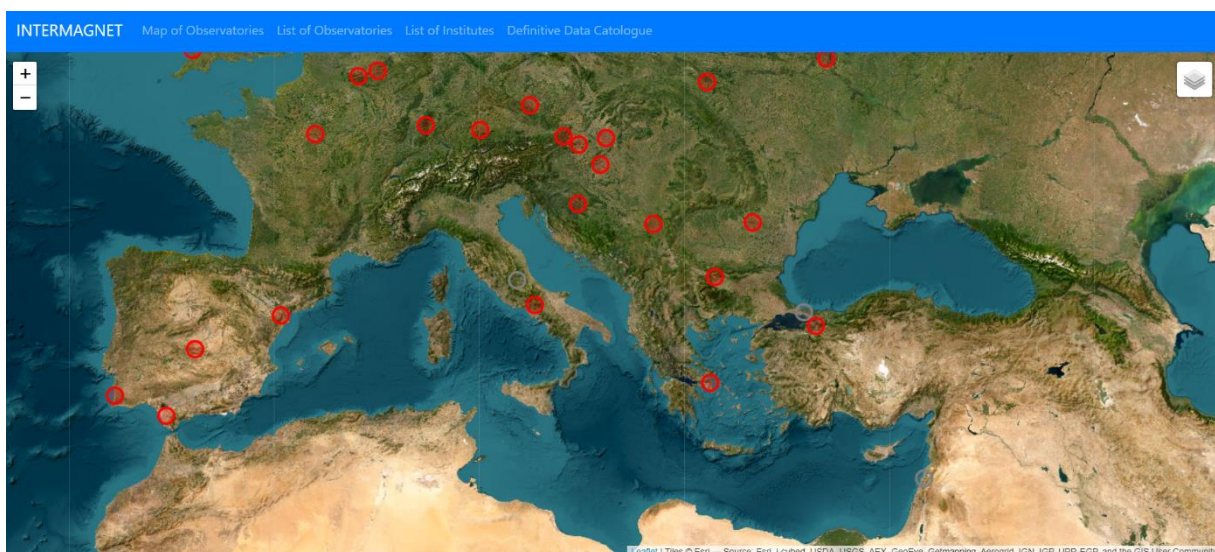
Τα μαγνητικά παρατηρητήρια είναι άνισα κατανομημένα ανά τον πλανήτη, καθώς πολλές περιοχές είναι δυσπρόσιτες και η τοποθέτηση επίγειων σταθμών για λήψη

μετρήσεων δεν είναι εύκολη. Αυτό σημαίνει πως σε ορισμένες περιοχές τα δεδομένα είναι πυκνότερα και οι πληροφορίες πιο ακριβείς, σε σχέση με άλλες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων περιπτώσεων αποτελούν οι ωκεανοί.

Υπάρχουν και οι λεγόμενοι repeat stations, οι οποίοι είναι σταθμοί τοποθετημένοι σε θέσεις οι οποίες συνήθως λειτουργούν συμπληρωματικά με τους μόνιμους σταθμούς. Οι μετρήσεις των συνιστωσών του γεωμαγνητικού πεδίου σε αυτούς τους σταθμούς γίνονται συνήθως κάθε 5 χρόνια και δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για το λιθοσφαιρικό πεδίο, λόγω του ότι παρέχουν μοναδικές μετρήσεις για ένα μεγάλο εύρος επιφάνειας γύρω από την τοποθεσία τους.

Το INTERMAGNET (Internation Real Time Magnetic Observatory Network), αποτελεί ένα παγκόσμιο δίκτυο μαγνητικών παρατηρητηρίων που συντονίζει τις μετρήσεις ανά την υδρόγειο και παρέχει δεδομένα υψηλής ποιότητας για το γεωμαγνητικό πεδίο, για ένα ευρύ πεδίο επιστημονικών και πρακτικών εφαρμογών. Το SuperMAG, το οποίο θα παρουσιαστεί και πιο αναλυτικά στο πλαίσιο της περιγραφής των δεδομένων στο πειραματικό μέρος, πρόκειται για μία πρωτοβουλία με την οποία συγκεντρώνονται δεδομένα από διάφορους επίγειους σταθμούς του πλανήτη, με σκοπό τη διευκόλυνση της μελέτης σε παγκόσμιο επίπεδο του γεωμαγνητικού πεδίου και των φαινομένων που σχετίζονται με αυτό.

Οι αερομαγνητικές μετρήσεις είναι βαθμωτές, καθώς η αποτύπωση σταθερής κατεύθυνσης του πεδίου δεν είναι εύκολη λόγω της φύσης τους, και καλύπτουν συνήθως κατά τη διεξαγωγή τους, περιοχές εύρους έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Οι μετρήσεις που δίνουν είναι χρήσιμες σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, στο οποίο ανήκει και η κατανόηση των γεωλογικών και τεκτονικών διαδικασιών, καθώς παρέχουν πληροφορίες για την κατανομή πετρωμάτων και βράχων στη λιθόσφαιρα.



Σχήμα 2.1.1: Το δίκτυο σταθμών του INTERMAGNET, στο οποίο απεικονίζεται και ο σταθμός του Διονύσου ως μέρος του (στιγμιότυπο οθόνης από το επίσημο site του INTERMAGNET) [19]

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό τους είναι πως πρόκεινται για ταχείες μετρήσεις, γεγονός το οποίο μειώνει τον παράγοντα της κοσμικής διακύμανσης στο πλαίσιο της εκάστοτε έρευνας. Τα αερομαγνητικά δεδομένα συμβάλλουν στη λιθοσφαιρική αποτύπωση, καθώς επικεντρώνονται στον εντοπισμό μαγνητισμού στη λιθόσφαιρα σε διάφορες κλίμακες.

Οι θαλάσσιες μετρήσεις αποτελούνται από διάφορες τεχνικές μέτρησης του γεωμαγνητικού πεδίου και παρέχουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες για τον ωκεάνιο φλοιό και γενικότερα για τη λιθοσφαιρική αποτύπωση. Οι τεχνικές μέτρησης αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση θαλάσσιων μαγνητομέτρων, συνήθως fluxgates ή μαγνητόμετρα πρωτονίων, μέσω μεθόδων όπως η σύνδεση με πλοίο στην επιφάνεια της θάλασσας και η δημιουργία μόνιμων υποβρύχιων σταθμών.

Παράδειγμα μαγνητόμετρου που έχει πραγματοποιήσει καταγραφές όντας δεμένο σε πλοίο αποτελεί το SeaSpry, ένα μαγνητόμετρο πρωτονίων (Proton Precession Magnetometer – PPM) που έχει δώσει υψηλής ακρίβειας, αν και βαθμωτές, μετρήσεις του συνολικού μαγνητικού πεδίου της Γης, πολύτιμες σε έρευνες της κινηματικής εξέλιξης των τεκτονικών πλακών στο ρήγμα Αυστραλίας – Ανταρκτικής [18]. Το GEOSTAR (Geophysical and Oceanographic Station for Abyssal Research) αποτελεί ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα που περιέχει πολλούς αισθητήρες, μεταξύ αυτών και μαγνητόμετρο fluxgate (three component fluxgate magnetometer) για τη μέτρηση του γεωμαγνητικού πεδίου, τοποθετημένους σε μία πλατφόρμα στο βυθό της θάλασσας [1].

Οι μετρήσεις των δορυφορικών αποστολών ξεκίνησαν μετά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, με ποιότητα καταγραφής και όργανα που ολοένα και βελτιώνονται και σε ύψη καταγραφών που κυμαίνονται συνήθως από 400 χλμ έως 800 χλμ. Έχουν τα σημαντικά πλεονεκτήματα ότι μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις από ένα σχετικά σταθερό ύψος, και επίσης για πιο σύντομες περιόδους σε σχέση με τις αερομαγνητικές μετρήσεις. Με τις μετρήσεις αυτές εξασφαλίζεται ομοιογενής κατανομή των δεδομένων, καθώς και μετρήσεις με κοινά χαρακτηριστικά οργάνων. Η 1^η διαστημική αποστολή που παρείχε δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου, ήταν ο δορυφόρος MAGSAT της NASA. Μία από τις πιο επιτυχημένες αποστολές, αποτελεί ο δορυφόρος CHAMP, του οποίου τα χαρακτηριστικά τροχιάς τον κατέστησαν ιδανική επιλογή για χαρτογράφηση της λιθόσφαιρας [1].

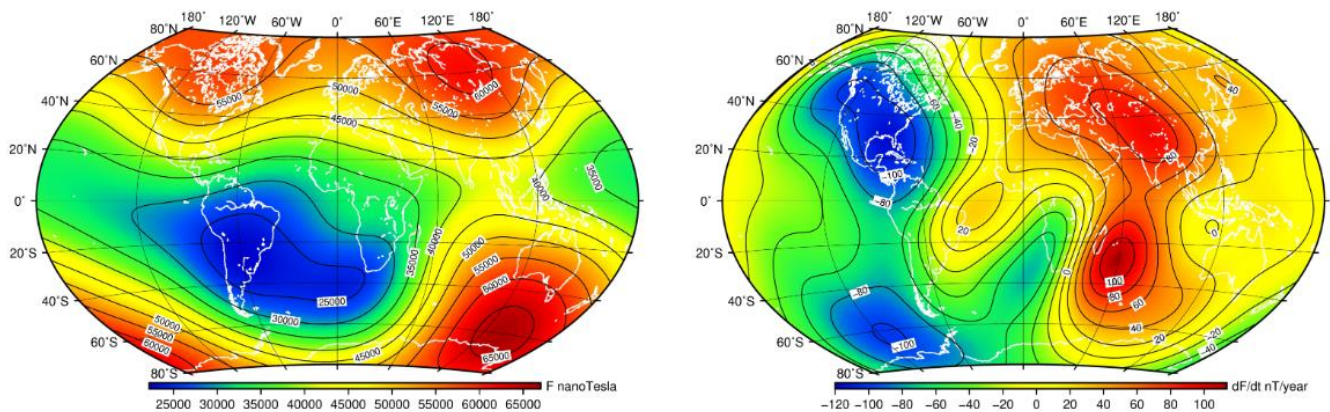
2.3 Μοντέλα γεωμαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά μοντέλα, το μαθηματικό και το πειραματικό, με τα οποία μοντέλα μπορεί να προσεγγιστεί η προέλευση, η δομή και οι μεταβολές του. Το πειραματικό μοντέλο είναι πιο ακριβές από το μαθηματικό, καθώς οι μετρήσεις συγκεντρώνονται από επίγειους σταθμούς και αεροπλάνα, συνυπολογίζοντας και την επίδραση που μπορεί να έχουν κτίρια, γέφυρες και άλλες ανθρώπινες κατασκευές και δραστηριότητες. Παρόλα αυτά, το πειραματικό μοντέλο παρέχει απλώς ένα χάρτη του γεωμαγνητικού πεδίου για μια δεδομένη

χρονική στιγμή, και δεν μπορεί να δώσει προβλέψεις για επόμενες καταστάσεις του, όπως μπορεί το μαθηματικό [14].

Στο μαθηματικό μοντέλο ανήκουν μοντέλα όπως το International Geomagnetic Reference Field (IGRF) και το World Magnetic Model (WMM), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα και από τους επιστημονικούς φορείς που ασχολούνται με τη μελέτη του γεωμαγνητικού πεδίου. Στα μοντέλα αυτά, οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση του γεωμαγνητικού πεδίου εξάγονται από μετρήσεις που συγκεντρώνονται από μαγνητικά παρατηρητήρια και από δορυφόρους και έτσι υπολογίζεται το πεδίο της για τα επόμενα 5 χρόνια.

Το IGRF πρόκειται για ένα μοντέλο που περιγράφει το κύριο γεωμαγνητικό πεδίο της Γης, καθώς και την κοσμική του διακύμανση, δηλαδή την ετήσιο ρυθμό μεταβολής του. Η ανανέωση των δεδομένων του γίνεται κάθε 5 χρόνια και η τελευταία του έκδοση είναι το IGRF-13 που έγινε διαθέσιμο το 2019, από το International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). Το IGRF-13 μοντελοποιεί το γεωμαγνητικό πεδίο από το 1900 έως και το 2020, και παρέχει δυνατότητα πρόβλεψής του για το διάστημα 2020-2025. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη του εσωτερικού της Γης, του φλοιού, της ιονόσφαιρας και της μαγνητόσφαιρας [15]. Συχνή επίσης εφαρμογή του μοντέλου είναι η αξιοποίησή του για συστήματα πλοήγησης, όπως η αεροπλοΐα και η ναυσιπλοΐα.

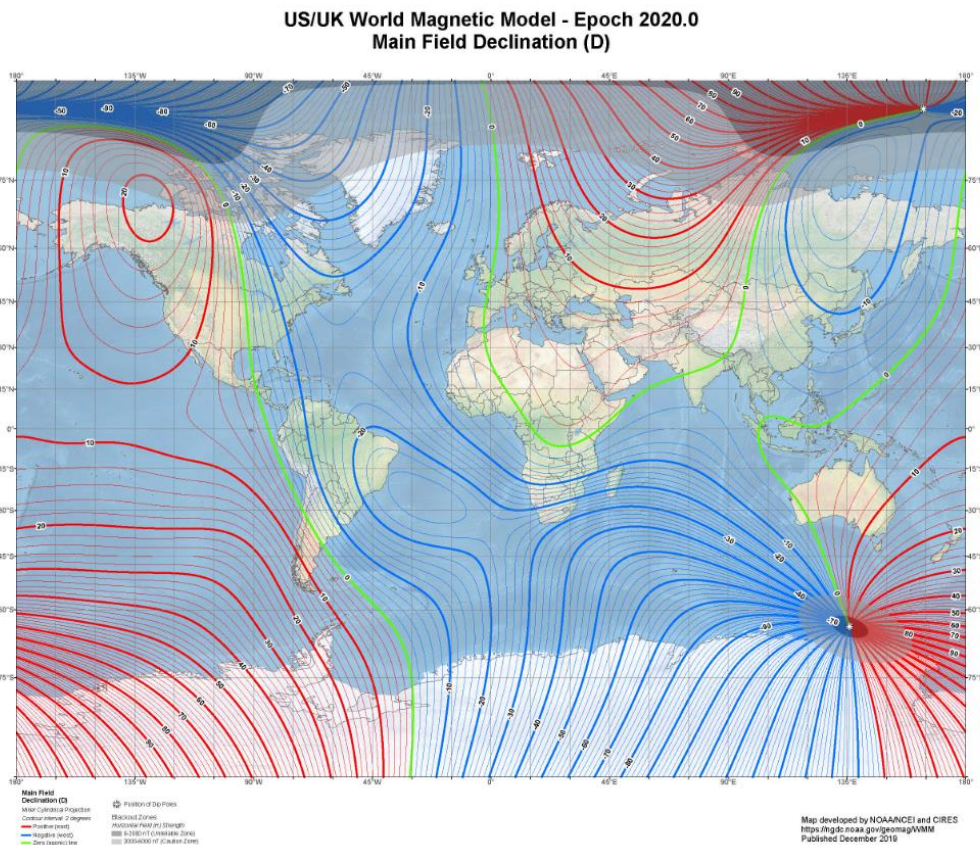


Σχήμα 2.2.1: Η συνολική ένταση του μαγνητικού πεδίου B (αριστερά) και ο ετήσιος ρυθμός μεταβολής του B (δεξιά) (στιγμιότυπο οθόνης από το επίσημο του IGRF) [15]

Το WMM είναι ένα επίσης ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την περιγραφή του γεωμαγνητικού πεδίου, του οποίου η κάθε έκδοση ισχύει για διαστήματα 5 ετών, με την τελευταία του έκδοση να ισχύει μέχρι και την 31^η Δεκεμβρίου 2024. Παρέχεται από τα National Centers for Environmental Information (NCEI) του National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) και στην επίσημη σελίδα του μοντέλου,

αναφέρεται ως μοντέλο πρόβλεψης, με παραπομπή στο IGRF για περασμένες χρονολογίες. Χρησιμοποιείται κατεξοχήν σε εφαρμογές στις οποίες γίνεται αξιοποίηση πληροφοριών για το μαγνητικό πεδίο, ως πρότυπο μοντέλο για συστήματα πλοήγησης, αναφοράς κατεύθυνσης, καθώς και προσανατολισμού [16]. Στην εικόνα 2.2.2 φαίνεται ο χάρτης της απόκλισης του μαγνητικού πεδίου για το Epoch 2020, σύμφωνα με το WMM.

Το World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) πρόκειται για ένα διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα υπό την αιγίδα του IAGA και του CGMW (Commission for the Geological Map of the World), το οποίο παρέχει ένα χάρτη που αναπαριστά τις μαγνητικές ανωμαλίες λόγω διακυμάνσεων τόσο στον ηπειρωτικό όσο και στον ωκεάνιο φλοιό της Γης [17]. Το πρότζεκτ αυτό ξεκίνησε το 2003 και κάνει χρήση δεδομένων που προέρχονται από επίγειους σταθμούς, δορυφορικές αποστολές, αλλά και από θαλάσσιες και εναέριες μετρήσεις.



Σχήμα 2.2.2: Η απόκλιση (declination) του μαγνητικού πεδίου για το Epoch 2020, σύμφωνα με το WMM [16]

3. Όργανα μέτρησης γεωμαγνητικού πεδίου

3.1 Μαγνητόμετρα

Οι μαγνητικοί αισθητήρες -ή αλλιώς μαγνητόμετρα- εντοπίζουν και μετρούν την επιβολή μαγνητικού πεδίου γύρω τους σε μία ή περισσότερες διαστάσεις και αποδίδουν ένα σήμα εξόδου. Κάποιες από τις βασικές κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων είναι οι αισθητήρες SQUID, οι αισθητήρες GMR και AMR, οι αισθητήρες Hall, καθώς επίσης και οι αισθητήρες Fluxgate.

Οι αισθητήρες SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), έχουν πολύ υψηλή σταθερότητα και ευαισθησία. Παρόλα αυτά, για τη λειτουργία τους απαιτείται η χρήση υγρού ηλίου, γεγονός το οποίο τους καθιστά εύχρηστους για αρκετά συγκεκριμένες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, δεν χρησιμοποιούνται τόσο σε καταναλωτικές εφαρμογές, αλλά κυρίως σε ερευνητικό εξοπλισμό, όπως στο μικροσκόπιο SQUID και στη Βιοϊατρική (MRI).

Σχετικά με τους GMR (Giant Magnetoresistance) και AMR (Anisotropic Magnetoresistance) αισθητήρες, γιγαντιαίας και ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης αντίστοιχα, το φαινόμενο στο οποίο στηρίζεται η αρχή λειτουργίας τους είναι η αλλαγή της αντίστασης των υλικών όταν σε αυτά επιβάλλεται μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κατεξοχήν σε χαμηλές θερμοκρασίες, όμως σε υλικά όπως τα φερρομαγνητικά, μπορεί να παρατηρηθεί και σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτές οι κατηγορίες αισθητήρων, χρησιμοποιούνται σε κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης RAM, σε βιοαισθητήρες, ρομποτικές διατάξεις, αλλά και σε μεταφορικά μέσα ως αισθητήρες προσανατολισμού [5].

Οι μαγνητικοί αισθητήρες Hall, αποτελούν μια κατηγορία αισθητήρων με πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, καθώς έχουν μεγάλη ευκολία χρήσης και χαμηλό κόστος. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες αισθητήρων Hall, ανάλογα με τις μετρήσεις που είναι ικανοί να πραγματοποιήσουν. Η πρώτη είναι οι latch Hall sensors, οι οποίοι εντοπίζουν την ύπαρξη ή μη μαγνητικού πεδίου, και χρησιμοποιούνται κατά βάση σε εφαρμογές μέτρησης αριθμού περιστροφών και ταχύτητας περιστροφής. Η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία αποτελούνται από τους γραμμικούς αισθητήρες Hall, τους μονοπολικούς (linear unipolar) και τους διπολικούς (linear bipolar), των οποίων η τάση εξόδου σχετίζεται γραμμικά με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι μονοπολικοί αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται η γνώση μόνο της απόλυτης τιμής του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου, ενώ οι διπολικοί όταν χρειάζεται η γνώση τόσο της τιμής όσο και της κατεύθυνσης της επιβολής του μαγνητικού πεδίου ως προς τον αισθητήρα [5].

Τα μαγνητόμετρα Hall, παρόλα αυτά, δεν μπορούν να συγκριθούν με τη σταθερότητα και την ακρίβεια που παρέχουν τα fluxgate μαγνητόμετρα [6]. Τα δεδομένα που αναλύονται στην παρούσα εργασία, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια, προέρχονται από επίγειους μαγνητικούς αισθητήρες fluxgate. Μια πιο

εκτεταμένη αναφορά, επομένως, θα γίνει σε αυτή την κατηγορία αισθητήρων στην επόμενη ενότητα.

3.2 Αισθητήρες Fluxgate

Οι αισθητήρες Fluxgate, ή μαγνητόμετρα πύλης-ροής, αποτελούν μία από τις βασικές κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων, τα οποία εντοπίζουν και μετρούν την επιβολή μαγνητικού πεδίου γύρω τους σε μία ή περισσότερες διαστάσεις και αποδίδουν ένα σήμα εξόδου. Οι αισθητήρες Fluxgate, μετρούν τόσο την ένταση, όσο και την κατεύθυνση του επιβαλλόμενου γύρω τους μαγνητικού πεδίου.

Έχουν υψηλή ευαισθησία και μπορούν να καταγράφουν πολύ μικρές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, χωρίς να απαιτούν ειδικές συνθήκες λειτουργίας για να πραγματοποιήσουν ακριβείς μετρήσεις. Αυτό το χαρακτηριστικό τους καθιστά πολύ καλή επιλογή για εφαρμογές που αφορούν τη χρήση σε όργανα πλοήγησης και μέτρησης μαγνητικού πεδίου, καθώς και τη χρήση για τη μέτρηση θέσης και ταχύτητας.

Οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν βάσει της αρχής του μαγνητικού κορεσμού. Ο μαγνητικός κορεσμός είναι το φαινόμενο που παρατηρείται όταν με αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, ο ρυθμός αύξησης της μαγνητικής επαγωγής αρχίζει να μειώνεται, ενώ αρχικά αυξανόταν με μεγάλο ρυθμό.

Τα μαγνητόμετρα Fluxgate είναι διατάξεις που τυπικά αποτελούνται από σιδηρομαγνητικούς πυρήνες που φτιάχνονται σε μορφή σύρματος ή ταινίας, από το πηνίο διέγερσης και από το πηνίο λήψης. Γύρω από τον πυρήνα υψηλής διαπερατότητας, βρίσκεται συνήθως τυλιγμένο το πηνίο διέγερσης, στο οποίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Το ρεύμα αυτό μεταβάλλει τη μαγνητική ροή του πυρήνα και εκείνος περιοδικά φτάνει σε κατάσταση κορεσμού και φεύγει από αυτήν. Τα πηνία ανίχνευσης τοποθετούνται γύρω από τον πυρήνα και λαμβάνουν τις μεταβολές της μαγνητικής ροής που προκαλούνται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Τέλος, από το σήμα εξόδου με επεξεργασία εξάγεται η τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, βάσει των μεταβολών που προκαλεί στην αναμενόμενη καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα.

Οι πυρήνες των αισθητήρων Fluxgate φτιάχνονται από άμορφα μαγνητικά υλικά χαμηλής υστέρησης και υψηλής ευαισθησίας. Τα άμορφα υλικά πρόκεινται για υλικά των οποίων οι ατομικές δομές δεν έχουν τακτική και περιοδική διάταξη, όπως στα κρυστάλλινα υλικά. Η χαμηλή υστέρηση, σημαίνει χαμηλές απώλειες ενέργειας κατά την εναλλαγή μαγνητικών πεδίων. Συνήθη υλικά που επιλέγονται για τον πυρήνα των αισθητήρων Fluxgate είναι τα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB, τα οποία πληρούν τις προϋποθέσεις που μόλις αναφέρθηκαν [5].

Οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες πυρήνα των Fluxgates είναι ο πυρήνας σχήματος δακτυλίου (open loop topology) και η χρήση δύο παράλληλων πηνίων διέγερσης

(closed loop ή racetrack topology) [13]. Ο πυρήνας σχήματος δακτυλίου (open loop topology) χρησιμεύει για την αντιμετώπιση της ασυμμετρίας της διάταξης, ενώ η χρήση δύο παράλληλων πηνίων διέγερσης (closed loop ή racetrack topology), χρησιμεύει για τη διαχείριση της επίδρασης του σήματος διέγερσης στο πηνίο λήψης [5]. Υπάρχουν και σχεδιασμοί αισθητήρων που βασίζονται στην απευθείας διέγερση του πυρήνα χωρίς πηνίο διέγερσης (orthogonal fluxgate) ή στην κατασκευή εκτυπωμένων αισθητήρων και πηνίων πάνω σε ένα PCB (Printed Circuit Board) [24, 26].

4. Τεχνικές επεξεργασίας σημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται κάποιες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, οι οποίες στη συνέχεια στο πειραματικό μέρος εφαρμόζονται στις μετρήσεις του υπό μελέτη συνόλου δεδομένων γεωμαγνητικού πεδίου.

4.1 Median filtering

Το median filtering, πρόκειται για μια πολύ διαδεδομένη μη γραμμική τεχνική επεξεργασίας σήματος και εικόνας, που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του θορύβου από το σήμα. Είναι γνωστό για τη δυνατότητά του να διατηρεί καλά τις άκρες του σήματος και λειτουργεί ιδιαίτερα καλά για την απομάκρυνση θορύβου ειδικά όταν έχει τη μορφή Gaussian θορύβου, “salt and pepper” θορύβου και τυχαίου θορύβου [23].

Η τεχνική του median filtering αποτελείται από την επιλογή ενός παραθύρου, συνήθως μονού μήκους, το οποίο μετακινείται επί του σήματος κατά μία θέση τη φορά και για κάθε θέση αυτού του παραθύρου υπολογίζεται το median, το οποίο και αντικαθιστά την τιμή στο εκάστοτε σημείο υπό επεξεργασία με το median που υπολογίστηκε για το παράθυρο.

Μια συγκεκριμένη κατηγορία median filtering, είναι το **median filtering with spike detection and replacement** (φιλτράρισμα median με εντοπισμό και αντικατάσταση των spikes). Πρόκειται για μία βασική κατηγορία median filtering, η οποία στοχεύει συγκεκριμένα στην απομάκρυνση του θορύβου που υπάρχει σε μορφή spikes ή outliers στο σήμα, αντικαθιστώντας τιμές που ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο threshold, με το διάμεσο (median) ενός ορισμένου παραθύρου γειτονικών τιμών, όπως και στη standard τεχνική του median filtering που περιγράφηκε προηγουμένως.

Με την εφαρμογή του median filtering with spike detection and replacement, πέρα από την απομάκρυνση και αντικατάσταση των μεμονωμένων τιμών που η τεχνική αναγνωρίζει ως outliers, το σήμα παραμένει στην αρχική του μορφή.

Πέρα από το median filtering with spike detection and replacement, υπάρχουν και άλλες κατηγορίες του median filtering. Αυτές περιλαμβάνουν το adaptive median filtering, που προσαρμόζει το μέγεθος του παραθύρου ανάλογα με το θόρυβο στην συγκεκριμένη περιοχή του σήματος, το weighted median filtering που επιτρέπει πιο ευέλικτο φιλτράρισμα αναθέτοντας βάρη στις τιμές εντός του παραθύρου πριν τον υπολογισμό του median και το recursive median filtering στο οποίο μετά από κάθε επανάληψη, το φιλτραρισμένο σημείο χρησιμοποιείται σαν είσοδος για την επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, και όπου γίνεται αναφορά σε median filtering, θα εννοείται median filtering with spike detection and replacement, χάριν ευκολίας και συντομίας στην περιγραφή των αποτελεσμάτων, ειδικά στα σχήματα και τις γραφικές παραστάσεις.

4.2 Kalman filtering

Το Kalman filtering είναι μια τεχνική ομαλοποίησης του σήματος. Οι εφαρμογές στις οποίες συναντάται η χρήση του περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την πλοήγηση και την επεξεργασία σήματος και τα ρομποτικά συστήματα. Η τεχνική του Kalman filtering είναι ιδιαίτερα αποδοτική στο να εντοπίζει θόρυβο στο αρχικό σήμα και να παρέχει μια ομαλοποιημένη εκτίμησή του και χρησιμοποιείται κατεξοχήν σε δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου.

Το Kalman filter ταιριάζει ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που χρειάζεται μια συνεχής και ομαλοποιημένη μορφή του αρχικού σήματος, στις οποίες τα δεδομένα έχουν θόρυβο αλλά τα χαρακτηρίζει και μια προβλεψιμότητα. Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά η τεχνική του Kalman filtering, χρειάζεται η υπό μελέτη διαδικασία να μπορεί να περιγραφεί από ένα γραμμικό σύστημα [24].

Πρόκειται για έναν επαναληπτικό αλγόριθμο που, βάσει της τωρινής κατάστασης του συστήματος και ενός μοντέλου του συστήματος, προβλέπει την επόμενη κατάσταση. Έπειτα, ενημερώνει την πρόβλεψη με τη νέα μέτρηση, βελτιώνοντας έτσι την εκτίμηση της κατάστασης και επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία για όλα τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα.

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του Kalman filter εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συνόλου δεδομένων. Αυτό σημαίνει πως οι παράμετροί του χρειάζεται να προσαρμοστούν στις συγκεκριμένες μετρήσεις και στο σύστημα το οποίο κάθε φορά μελετάται και στο οποίο χρειάζεται να εφαρμοστεί η τεχνική αυτή.

Όταν αναφερόμαστε στην εφαρμογή του Kalman filtering για επεξεργασία σήματος, ο αριθμός των παραμέτρων που χρειάζεται να προσδιοριστούν μπορεί να διαφέρει, καθώς μερικά πακέτα προσφέρουν επιπλέον παραμέτρους. Παρόλα αυτά, οι κοινές παράμετροι μεταξύ των πακέτων συνήθως περιλαμβάνουν την Εκτίμηση Αρχικής Κατάστασης (Initial State Estimate), την Αρχική Συνδιακύμανση (Initial Covariance), τη Συνδιακύμανση Θορύβου Διαδικασίας (Process Noise Covariance) και τη Συνδιακύμανση Θορύβου Μέτρησης (Measurement Noise Covariance).

Υπάρχουν και άλλες εκδοχές του απλού Kalman filter. Το Extended Kalman filter και το Unscented Kalman filter πρόκεινται για επεκτάσεις του Kalman filter, κατάλληλες για το χειρισμό μη γραμμικών σημάτων. Οι δύο τεχνικές αυτές, γραμμικοποιούν το υπό επεξεργασία σήμα με διαφορετική προσέγγιση και διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας σε κάθε περίπτωση, ο οποίος όμως και στις 2 τεχνικές είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το απλό Kalman filter.

4.3 Empirical Mode Decomposition (EMD)

Το Empirical Mode Decomposition (EMD), πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και επεξεργασία μη στάσιμων και μη γραμμικών

σημάτων. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, ευρεία χρήση στην επεξεργασία σήματος και τη γεωφυσική.

Με το EMD το σήμα αναλύεται σε ένα σύνολο Intrinsic Mode Functions (IMFs) και στο residual σήμα. Οι IMFs αποτυπώνουν τις διάφορες συχνότητες που υπάρχουν στο αρχικό σήμα. Η τεχνική αυτή πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία σε κάθε επανάληψή της οποίας εξάγεται και μία IMF και η οποία συνεχίζεται μέχρι να μην μπορεί να εξαχθεί άλλη IMF. Το σήμα που μένει μετά από αυτή τη διαδικασία και την εξαγωγή όλων των IMFs, είναι το residual. Το άθροισμα των IMFs και του residual, ανασυνθέτει το αρχικό σήμα.

Το residual αναπαριστά τη μακροπρόθεσμη τάση του σήματος μετά την αφαίρεση των συνιστωσών που αναπαριστούν ταλαντώσεις. Με αυτή την ανάλυση, δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστούν οι διάφορες συνεισφορές στο αρχικό σήμα. Ο θόρυβος συνήθως αναπαρίσταται από τις πρώτες και πιο υψίσυχνες IMFs. Δίνεται έτσι η δυνατότητα να διαχωριστεί σε ικανοποιητικό βαθμό ο θόρυβος από το αρχικό σήμα, και, ανάλογα με την εφαρμογή, μπορεί και να ανασκευαστεί το σήμα χωρίς τις πιο υψίσυχνες IMFs αν αυτό έχει κάποια σημασία στο πλαίσιο του υπό μελέτη συστήματος και των εκάστοτε σκοπών της επεξεργασίας

Πειραματικό μέρος

5. Παρουσίαση και επεξεργασία των δεδομένων ENIGMA

5.1. Τα δεδομένα ENIGMA

5.1.1. ENIGMA

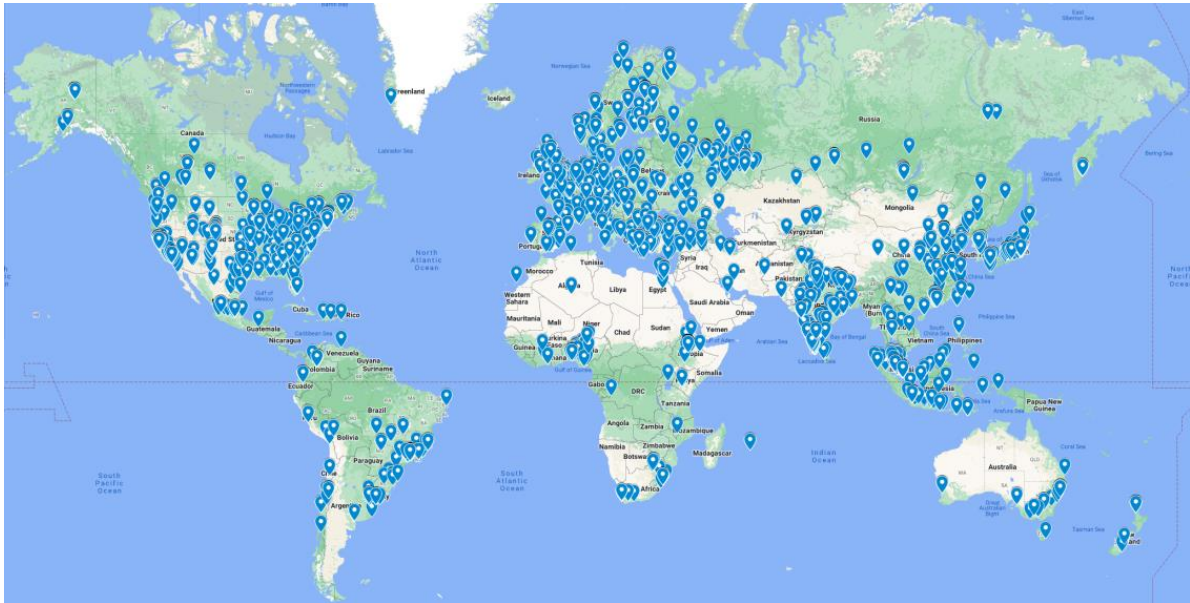
Τα δεδομένα που μελετώνται στην παρούσα εργασία προέρχονται από το ENIGMA (Hellenic GeoMagnetic Array), ένα πρότυπο δίκτυο μαγνητομέτρων στην Ελλάδα, το οποίο αποτελείται από 3 επίγειους σταθμούς και μέσω των οποίων το Εθνικό Αστεροσκοπείο Ελλάδας (ΕΑΑ) μελετάει τις διακυμάνσεις του μαγνητικού προφίλ της Ελλάδας [2].

Το ENIGMA χρησιμοποιείται σε ένα ευρείας κλίμακας πείραμα που διεξάγει το ΕΑΑ για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης στην Ελλάδα, με στόχο τη μελέτη των μαγνητικών καταιγίδων. Οι μετρήσεις των επίγειων σταθμών του δικτύου, παρέχουν πληροφορίες για τη σύζευξη ηλιακού ανέμου - μαγνητόσφαιρας (και κατ' επέκταση τους γεωμαγνητικούς παλμούς), τη σύζευξη μαγνητόσφαιρας - ιονόσφαιρας και για την τηλεπισκόπηση της γεωδυναμικής του διαστήματος και κατ' επέκταση για την παρακολούθηση του διαστημικού καιρού [2].

Ο όρος διαστημικός καιρός αναπαριστά τις συνθήκες που επικρατούν στον ήλιο, τον ηλιακό άνεμο, τη γήινη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα. Οι συνθήκες αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν την απόδοση και την αξιοπιστία των διαστημικών και επίγειων τεχνολογικών συστημάτων, αλλά και να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή και υγεία. Ενδεικτικά, ορισμένες από αυτές τις επιρροές αφορούν βλάβες ή καταστροφή οργάνων δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά, ανάπτυξη επαγωγικών ρευμάτων σε αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου, διακοπές των τηλεπικοινωνιών που βασίζονται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων στην περιοχή της ιονόσφαιρας, βλάβες ή και καταστροφή μετασχηματιστών των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και αύξηση των ποσοστών ακτινοβολίας που δέχονται οι άνθρωποι κατά τη διάρκεια μιας αεροπορικής πτήσης ή οι αστροναύτες που βρίσκονται σε τροχιά [4].

5.1.2. SuperMAG

Το ENIGMA είναι μέρος του SuperMAG, μιας διεθνούς συνεργασίας οργανισμών και εθνικών υπηρεσιών που τις τελευταίες 6 δεκαετίες έχουν λειτουργήσει περισσότερα από 600 επίγεια μαγνητόμετρα σε παγκόσμια κλίμακα, και επί του παρόντος λειτουργούν πάνω από 300. Σκοπός του SuperMAG είναι να καταστήσει εύκολα διαθέσιμες μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου της Γης σε επιστήμονες, καθηγητές, μαθητές/φοιτητές και στο ευρύ κοινό [3].



Σχήμα 5.1.1: SuperMAG registered users (Στιγμιότυπο οθόνης από το επίσημο site) [3]

Το SuperMAG επικεντρώνεται στις μεταβολές που προέρχονται από τα ηλεκτρικά ρεύματα που υπάρχουν (ρέουν/κινούνται) στην ιονόσφαιρα και τη μαγνητόσφαιρα και, επομένως, αφαιρεί το επικρατές και αργά μεταβαλλόμενο εσωτερικό μαγνητικό πεδίο της Γης [3].

Στο SuperMAG περιέχονται δύο διαφορετικές κατηγορίες δεδομένων: αυτά με καταγραφή ανά λεπτό ('Low Fidelity'), και ανά δευτερόλεπτο ('High Fidelity'). Τα δεδομένα του ENIGMA ανήκουν στην κατηγορία δεδομένων με μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, καθώς όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια, ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν μεταξύ μίας και πέντε μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με την περιοχή.

5.1.3. Περιγραφή του συνόλου δεδομένων

Σχετικά με τους επίγειους Ελληνικούς σταθμούς του ENIGMA, ένας σταθμός βρίσκεται στην Αττική (Διόνυσος), ένας στα Τρίκαλα (Κλοκωτός) και ένας στη Λακωνία (Βελιές).

Τα αρχικά δεδομένα τα οποία υπέστησαν επεξεργασία και ανάλυση στην παρούσα διπλωματική, είναι από το 2015 και για τις 3 περιοχές.

Στις περιοχές αυτές, αισθητήρες Fluxgate είναι τοποθετημένα σε σημεία με υψόμετρο εντός του εδάφους, ώστε να μειωθούν όσο γίνεται οι αλλοιώσεις των μετρήσεων λόγω συσκευών, οχημάτων και εν γένει ανθρώπινων δραστηριοτήτων οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν παρεμβολές με τις εν λόγω μετρήσεις.

Για το **Διόνυσο**, το σύνολο δεδομένων περιέχει μετρήσεις και για τους 12 μήνες του 2015, με εξαίρεση 2 ημερήσια αρχεία από τον Ιανουάριο.

Για τη **Λακωνία (Βελιές)**, υπάρχουν μετρήσεις για 10 μήνες του 2015, από το Φεβρουάριο μέχρι και το Νοέμβριο, με κάποια αρχεία ημερήσιων μετρήσεων να λείπουν στο ενδιάμεσο.

Για τα **Τρίκαλα (Κλοκωτός)**, το σύνολο δεδομένων αφορά τους 6 τελευταίους μήνες του 2015. Συγκεκριμένα, από τη συγκεκριμένη περιοχή έχουμε μετρήσεις από τον Ιούνιο μέχρι και το Δεκέμβριο του 2015 και πάλι με ορισμένες ημερήσιες μετρήσεις που απουσίαζαν από τα διαθέσιμα δεδομένα.

5.2. Προεπεξεργασία δεδομένων

Τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε αρχεία .dat, με μετρήσεις που κατά κανόνα ξεκινάνε στις 00.00 το βράδυ κάθε ημέρας, και έχουν 24ωρη διάρκεια.

Σε κάθε αρχείο υπάρχουν οι ημερήσιες μετρήσεις, οι οποίες έχουν 7 στήλες δεδομένων:

Date, Time, X (nT), Y (nT), Z (nT), Ts (C), Te(C)

Σε κάποιους μήνες υπήρχαν διπλότυπα αρχεία (20/9 THL), ή απουσίαζε κάποιο αρχείο μετρήσεων και βρισκόταν στο φάκελο άλλου μήνα (το 30/11 THL βρισκόταν στα δεδομένα του Δεκεμβρίου).

Υπάρχουν μήνες των οποίων τα δεδομένα δεν είναι πλήρη (απουσία ημερήσιων μετρήσεων ή ώρα έναρξης καταγραφής των μετρήσεων μετά τις 00.00).

Στο σχήμα 5.1.1 οι παύλες αντιστοιχούν σε μήνες για τους οποίους δεν υπήρχαν καθόλου διαθέσιμα δεδομένα για τη συγκεκριμένη περιοχή.

Οι αστερίσκοι αντιστοιχούν σε μήνες των οποίων τα δεδομένα και οι μετρήσεις δεν ήταν πλήρεις.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας, είναι 1 μέτρηση / δευτερόλεπτο για τις περιοχές του Διονύσου (DIO) και της Λακωνίας (VLI), συγκεκριμένα σε κάθε αρχή δευτερολέπτου της μορφής:

xx:xx:xx.000.

Στην περιοχή των Τρικάλων (THL) παρατηρήθηκε πως ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 5 μετρήσεις / δευτερόλεπτο, συγκεκριμένα κάθε 200 ms, που οδηγεί σε μετρήσεις της μορφής:

xx:xx:xx.000, xx:xx:xx.200, xx:xx:xx.400, xx:xx:xx.600, xx:xx:xx.800.

Μήνες \ Περιοχές	Διόνυσος	Τρίκαλα	Λακωνία
01	Ναι*	—	—
02	Ναι	—	Ναι*
03	Ναι	—	Ναι
04	Ναι	—	Ναι*
05	Ναι	—	Ναι*
06	Ναι	Ναι*	Ναι*
07	Ναι	Ναι	Ναι
08	Ναι	Ναι	Ναι
09	Ναι	Ναι	Ναι
10	Ναι	Ναι	Ναι*
11	Ναι	Ναι*	Ναι*
12	Ναι	Ναι	—

Σχήμα 5.1.1: Τα διαθέσιμα δεδομένα του dataset σε επίπεδο μήνα, για Διόνυσο, Κλοκωτό και Βελιές

Λόγω των περισσότερων μετρήσεων των Τρικάλων, έγινε επιλογή για περαιτέρω επεξεργασία μόνο των μετρήσεων κάθε αρχής δευτερολέπτου: **xx.xx.xx.000**. Αυτό έγινε για 2 λόγους:

- Ένας κοινός ρυθμός δειγματοληψίας διευκολύνει την επεξεργασία των δεδομένων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των περιοχών.
- Ορισμένες βιβλιοθήκες που στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν για άλλους λόγους, δεν μπορούσαν να χειριστούν την ποσότητα δεδομένων των Τρικάλων.

Η επιλογή δεδομένων, οδήγησε και στην έγκαιρη διαχείριση μιας ιδιαιτερότητας στα δεδομένα των Τρικάλων, που πιθανώς να οδηγούσε σε μη ορθά αποτελέσματα.

Μεγάλο μέρος των μετρήσεων των Τρικάλων, δεν είναι καταγεγραμμένες με τη σωστή χρονική συνέχεια.

Αντίθετα, προηγούνταν οι μετρήσεις xx.xx.xx.200/400/600/800, και μετά ακολουθεί το xx.xx.xx.000 του ίδιου δευτερολέπτου, το οποίο προηγούταν χρονικά.

Η επιλογή που έγινε, διασφάλισε τη σωστή χρονική εξέλιξη των εξαγόμενων δεδομένων.

```
00:00:00.000,  
00:00:01.200,  
00:00:01.400,  
00:00:01.600,  
00:00:01.800,  
00:00:01.000,  
00:00:02.200,  
00:00:02.400,  
00:00:02.600,  
00:00:02.800,  
00:00:02.000,  
00:00:03.200,  
00:00:03.400,  
00:00:03.600,  
00:00:03.800,  
00:00:03.000,
```

Αρχικά, η εξαγωγή, η επεξεργασία και η καταγραφή των δεδομένων, γίνονταν με την built in βιβλιοθήκη της Python.

Στη συνέχεια, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **pandas**, η οποία διευκόλυνε πολύ τους χειρισμούς των δεδομένων, και κυρίως μείωσε δραματικά το χρόνο επεξεργασίας, λόγω:

- της μεγάλης της χρησιμότητας στο χειρισμό και την επεξεργασία χρονοσειρών,
- της μεγάλης της αποδοτικότητας σε πολύ μεγάλα σετ δεδομένων, όπως τα δεδομένα ENIGMA.

Ενδεικτικά, για το ίδιο σύνολο δεδομένων (DIO), ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας ήταν:

Χωρίς pandas: ~5.30 ώρες

Με pandas: ~2.30 ώρες

δηλαδή βελτίωση ταχύτητας ~3 ωρών.

Η εξαγωγή και το φιλτράρισμα των δεδομένων, γίνονται μέσα από τη συνάρτηση `read_daily_measurements()`, η οποία πραγματοποιεί την εξαγωγή των δεδομένων μέσω της `extract_csv_data()`, η οποία φαίνεται στη συνέχεια στον Κώδικα 5.1.

```
def extract_csv_data(path):
    """ Extracts the data from the csv of the given path and returns a data
    frame with that data. """
    df = pd.read_csv(
        path,
        comment=';',
        header="infer",
        names=['date', 'time', 'x_axis', 'y_axis', 'z_axis',
        'sensor_temperatures', 'environment_temperatures'],
        on_bad_lines='skip',
        skip_blank_lines=True
    )
    # Keep only rows whose time value ends with '000', for alignment purposes
    # between the different areas datasets.
    df = df[df['time'].str.endswith('000')]
    df = df.dropna()
    return df
```

Κώδικας 5.1: Η συνάρτηση για την εξαγωγή των δεδομένων από τα ημερήσια αρχεία

5.3 Επεξεργασία Δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων, μπορεί να γίνει είτε σε επίπεδο ενός συγκεκριμένου μήνα, είτε σε επίπεδο πολλών μηνών για μία ή παραπάνω περιοχές.

Σε κάθε περίπτωση, η συνάρτηση που καλείται είναι η `read_monthly_measurements()` η οποία φαίνεται και στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας και η οποία διαβάζει και επεξεργάζεται τα αρχεία `.dat` του μηνιαίου φακέλου μιας περιοχής, καλώντας την `read_daily_measurements()` για κάθε ένα από αυτά επαναληπτικά.

Η `read_daily_measurements()` περιέχει τη βασική επεξεργασία των μετρήσεων του κάθε ενός αρχείου ξεχωριστά. Μόλις διαβάσει, επεξεργαστεί και απεικονίσει όλα δεδομένα χρειάζεται, με τις τεχνικές που αναφέρονται στη συνέχεια, επιστρέφει ένα pandas DataFrame στην `read_monthly_measurements()` η οποία συνενώνει αυτά τα DataFrames, φροντίζοντας να διατηρείται η σωστή χρονική αλληλουχία με τον τρόπο που δίνονται.

Το DataFrame που επιστρέφεται για τη συνένωση σε επίπεδο μήνα είναι της μορφής:

```
month_df = pd.DataFrame(columns = ['time', 'Bx', 'By', 'Bz', 'B', 'Ts', 'Te'])
```

Στη βασική υλοποίηση του κώδικα, στα Bx, By, Bz αποθηκεύονται τα δεδομένα μετρήσεων που έχουν περάσει από median filtering. Παρόλα αυτά, ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα στη θέση τους να χρησιμοποιηθούν, αν είναι επιθυμητό και έχει νόημα

στο πλαίσιο της εκάστοτε επεξεργασίας, και τα σήματα που έχουν περάσει από Kalman, τα αρχικά σήματα χωρίς καμία επεξεργασία, ή ακόμα και τα residuals.

Η παρούσα διαμόρφωση του κώδικα και η οποία χρησιμοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, υποστηρίζει το να επιστρέφεται σε επίπεδο μήνα μόνο ένα DataFrame, αντί για μία λίστα από όλα τα DataFrames με τις διαθέσιμες πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, για λόγους διατήρησης της πολυπλοκότητας του κώδικα σε επίπεδα που δε θα έκανε δύσκολη τη διατήρησή του και την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων σε επίπεδα πολλών μηνών και πολλαπλών περιοχών.

Αν η *read_monthly_measurements()* κληθεί από το αρχείο που κάνει την επεξεργασία σε επίπεδο ενός συγκεκριμένου μήνα, μετά τη συνένωση των δεδομένων των επιμέρους ημερών προχωράει στη γραφική αναπαράσταση των μηνιαίων δεδομένων, και έπειτα ολοκληρώνεται η εκτέλεση του κώδικα. Σε αυτή την περίπτωση, χρειάζεται πριν τρέξει ο κώδικας να προσδιοριστεί το destination path (path προορισμού) στο οποίο θα γίνει η αποθήκευση των αποτελεσμάτων στο σύστημα αρχείων του εκάστοτε χρήστη.

Να σημειωθεί, πως σε αυτή την περίπτωση μόλις ξεκινήσει η εκτέλεση, ο χρήστης χρειάζεται να αλληλεπιδράσει με ένα παράθυρο του αρχείου συστήματος που ανοίγει μέσω του *tkinter* και να επιλέξει το μήνα με τα δεδομένα που επιθυμεί να περάσει από επεξεργασία.

Αν έχει κληθεί από το αρχείο που κάνει την επεξεργασία σε επίπεδο πολλών μηνών, και για μία ή περισσότερες περιοχές, τότε εκτός από τον προσδιορισμό του destination path, τότε η συνάρτηση που καλούνταν σε αυτή την περίπτωση ήταν η *read_all()*. Μέσα σε αυτήν είχαν προσδιοριστεί κάθε φορά πριν την εκτέλεση του κώδικα τα *areas_names* και τα *source paths* για κάθε μία ή περισσότερες περιοχές, καθώς το συγκεκριμένο αρχείο δεν περιείχε αλληλεπίδραση με το χρήστη για είσοδο δεδομένων, όπως στην προηγούμενη περίπτωση.

Φυσικά, και οι 2 παραπάνω περιπτώσεις μπορούν αν χρειάζεται να προσαρμοστούν ώστε είτε να γίνονται και οι 2 με αλληλεπίδραση από το χρήστη, είτε χωρίς. Το ίδιο ισχύει και για την επιλογή του destination path, αν και αυτό δεν έχει υλοποιηθεί στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς δεν παρουσιάστηκε η ανάγκη και δεν κρίθηκε να είναι μια προσθήκη που χρειάστηκε κατά τη μελέτη των δεδομένων.

Τέλος, να σημειωθούν τρία ακόμα σημεία.

Αρχικά, η *read_daily_measurements()* η οποία αναφέρθηκε παραπάνω, περιέχει και τις βασικές λειτουργίες της προεπεξεργασίας, παρόλα αυτά υλοποιεί και τις βασικές τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων, για αυτό και έγινε η αναφορά της στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ενότητας.

Επίσης, μετά την επεξεργασία των δεδομένων είτε σε επίπεδο ημέρας είτε σε επίπεδο μήνα, υπάρχει η δυνατότητα να γραφτούν τα αποτελέσματα σε καινούρια αρχεία csv, ώστε σε περίπτωση που χρειαστεί περαιτέρω επεξεργασία, να είναι πιο γρήγορη η

εξαγωγή των αποτελεσμάτων και να μη χρειαστεί να γίνει ξανά όλη η προεπεξεργασία και η εφαρμογή των τεχνικών που περιγράφονται στη συνέχεια.

Τέλος, οι τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων για το median filtering και το Kalman filtering, κατά τη μελέτη των δεδομένων, ήταν τοποθετημένες σε ξεχωριστό αρχείο για να είναι πιο καλά ορισμένη η λειτουργία του κάθε αρχείου. Το ίδιο ισχύει και για το Empirical Mode Decomposition. Σε ξεχωριστό αρχείο βρίσκονταν επίσης οι συναρτήσεις για την επεξεργασία σε επίπεδο πολλών μηνών, οι οποίες καλούν τη `read_monthly_measurements()` για την επεξεργασία κάθε ενός μήνα ξεχωριστά.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε, φαίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Κώδικα στο τέλος της εργασίας.

5.3.1. Median filtering

Σε κάθε σετ ημερήσιων δεδομένων μετά την προεπεξεργασία τους, εφαρμόστηκε median filtering with spike detection and replacement για κάθε έναν άξονα του μαγνητικού πεδίου, το οποίο θα αναφέρεται στο εξής απλώς ως median filtering.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4, το median filtering απομακρύνει το θόρυβο που υπάρχει σε μορφή spikes ή outliers στο σήμα, αντικαθιστώντας τιμές που ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο threshold, με το διάμεσο ενός ορισμένου παραθύρου γειτονικών τιμών.

Στη συγκεκριμένη επεξεργασία, οι τιμές που επιλέχθηκαν μετά από μια σειρά δοκιμών, ήταν:

- `threshold = 3`
- `window_size = 3`

Με την εφαρμογή του median filtering, πέρα από την απομάκρυνση των μεμονωμένων spikes, το σήμα παραμένει στην αρχική του μορφή.

Να σημειωθεί ότι για κάθε ημερήσιο σύνολο μετρήσεων που πέρασε από επεξεργασία, δημιουργήθηκε αντίγραφο του αρχικού σήματος και δεν επηρεάστηκαν τα αρχικά δεδομένα του άξονα.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του median filtering στο σήμα φαίνεται στον Κώδικα 5.2 της επόμενης σελίδας.


```

def median_filtering(signals):
    """
    Performs median filtering with spike detection and replacement to a given
    list of signals,
    without modifying the original signals.

    Parameters
    -----
    signal : list of list of float
        The signals to which median filtering with spike detection and
        replacement will be applied.
    Returns
    -----
    list of list of float
        The signals to which median filtering with spike detection and
        replacement has been applied.
    """

    # Define a threshold for the spike detection and a window size for the
    filtering process
    spike_threshold = 3
    window_size = 3

    median_filtered_signal = []
    for s in signals:
        # Do not modify the original signal
        filtered_signal = s.copy()

        # Iterate through the data points of the signal, skipping edges based
        on the window size
        for i in range(window_size, len(filtered_signal) - window_size):
            # Create a local window of data points around the current point
            local_window = filtered_signal[i - window_size:i + window_size + 1]
            median_local = pd.Series(local_window).median()
            # If the value of the data point is identified as a spike,
            # replace it with the median of the current local window
            if abs(filtered_signal[i] - median_local) > spike_threshold:
                filtered_signal[i] = median_local
        median_filtered_signal.append(filtered_signal)
    return median_filtered_signal

```

Κώδικας 5.2: Η συνάρτηση για την εφαρμογή median filtering στο σήμα

5.3.2. Kalman Filtering

Σε ημερήσιο επίπεδο εφαρμόστηκε σε ένα σύνολο δεδομένων Kalman filtering, αντί για median filtering. Αυτό έγινε μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και όχι σε όλα τα διαθέσιμα δεδομένα.

Για το Kalman filtering, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **pykalman** [25].

Για την εφαρμογή του Kalman filtering στα δεδομένα, χρειάστηκε πρώτα να βρεθούν οι πιο κατάλληλες παράμετροι για το συγκεκριμένο σήστημα. Μετά από αρκετές δοκιμές για τον προσδιορισμό των πιο κατάλληλων παραμέτρων για το υπό μελέτη σύνολο δεδομένων, επιλέχθηκαν οι τιμές παραμέτρων που φαίνονται στον Κώδικα 5.3 στη συνέχεια. Η επιλογή αυτή έγινε βάσει του αποτελέσματος στο σήμα σε σχέση με το median και με το αρχικό, με κριτήριο να το φίλτρο να είναι σε θέση να εντοπίζει

και να απομακρύνει αποτελεσματικά τα spikes, αλλά να μη γίνεται περισσότερη ομαλοποίηση από όσο χρειάζεται και να χάνονται δεδομένα και πληροφορία που χρειαζόμαστε και μας ενδιαφέρει.

Το Kalman filter εφαρμόστηκε με τη χρήση της συνάρτησης `kf.smooth()` της βιβλιοθήκης `pykalman`, όπως φαίνεται στον Κώδικα 5.3.

```
def kalman_filtering(signals):
    """
    Performs kalman filtering to a given list of signals, without modifying the
    original signals.

    Parameters
    -----
    signals : list of list of float
        The signal to which kalman filtering will be applied.
    Returns
    -----
    list of float
        The signal to which kalman filtering has been applied.
    """
    filtered_signals = []

    for s in signals:
        signal = s.copy()
        signal = np.array(signal)
        signal_series = pd.Series(signal, dtype=np.float32)

        initial_state_mean = signal[0]
        observation_covariance = signal_series.astype(float).var()
        transition_covariance = 0.005

        kf = KalmanFilter(
            initial_state_mean = initial_state_mean,
            observation_covariance = observation_covariance,
            transition_covariance = transition_covariance,
            transition_matrices = [1]
        )

        smoothed_signal, state_covariances = kf.smooth(signal)

        smoothed_df = pd.DataFrame(smoothed_signal, columns=['state_means'])
        smoothed_signal = smoothed_df['state_means'].tolist()
        filtered_signals.append(smoothed_signal)

    return filtered_signals
```

Κώδικας 5.3: Η συνάρτηση για την εφαρμογή Kalman filtering στο σήμα

Ένας βασικός λόγος που το Kalman filtering δεν εφαρμόστηκε στο σύνολο των δεδομένων, είναι πως τουλάχιστον με τη βιβλιοθήκη που επιλέχθηκε, αυξανόταν πού σημαντικά ο χρόνος επεξεργασίας και έτσι δυσχεραινόταν και καθυστερούσε ιδιαίτερα η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, η φύση της ενσωμάτωσης του Kalman στην εργασία ήταν αφενός προκειμένου να δημιουργηθεί η δυνατότητα εφαρμογής του στο σύνολο δεδομένων

που μελετήθηκε και αφετέρου να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση με το median filtering.

Επιπλέον, όπως εξηγήθηκε και στην ενότητα 4, για περιπτώσεις μη γραμμικών σημάτων όπως οι μετρήσεις του γεωμαγνητικού πεδίου, συνήθως χρησιμοποιούνται είτε το Extended Kalman Filter είτε το Unscented Kalman Filter. Στο πλαίσιο της εργασίας, επιλέχθηκε το απλό Kalman Filter για 2 λόγους. Αρχικά, επειδή η τεχνική του Kalman filtering ήταν μία συμπληρωματική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε σε συγκεκριμένες περιπτώσεις δεδομένων και έτσι σε αυτό το πλαίσιο δεν υπήρχε ανάγκη για το σημαντικά πιο περίπλοκο fine tuning των παραμέτρων των άλλων 2 τεχνικών. Δεύτερον, επειδή το απλό Kalman filter σε αυτό το σύνολο δεδομένων, έδωσε ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τόσο η συνάρτηση με την οποία εφαρμόζεται το Kalman filtering, όσο και η χρήση της συνάρτησης αυτής, υπάρχουν στον κώδικα ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Η κλήση της συνάρτησης από το βασικό σώμα του κώδικα που βρίσκεται στο Παράρτημα, μπορεί να γίνει comment out (να σχολιαστεί), έτσι ώστε το Kalman να εφαρμόζεται μόνο όταν είναι επιθυμητό να μελετηθεί συγκεκριμένα.

5.3.3 Empirical Mode Decomposition (EMD)

Σε ημερήσιο επίπεδο εφαρμόστηκε σε ένα μέρος ημερήσιων μετρήσεων και η τεχνική EMD, για την οποία χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **PyEMD** [26]. Πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και επεξεργασία μη στάσιμων και μη γραμμικών σημάτων, με την οποία το σήμα αναλύεται σε ένα σύνολο IMFs και στο residual σήμα, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.3.

Το EMD εφαρμόστηκε στα σήματα των 3 αξόνων του γεωμαγνητικού πεδίου, αφού είχαν πρώτα περάσει από median filtering, έτσι ώστε πριν την ανάλυση του Empirical Mode Decomposition να έχουν απομακρυνθεί τα spikes του θορύβου. Το residual αναπαριστά τη μακροπρόθεσμη τάση του σήματος μετά την αφαίρεση των συνιστωσών που αναπαριστούν ταλαντώσεις και ήταν αυτό που χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση, στην παρούσα εργασία.

Παρόλα αυτά, η πληροφορία για τις IMFs υπάρχει και μπορεί να αξιοποιηθεί και να αναπαρασταθεί γραφικά, αν στο πλαίσιο κάποιας συγκεκριμένης μελέτης έχει περισσότερο νόημα να εξαχθούν οι πληροφορίες που περιέχουν οι IMFs. Αυτό παρουσιάζεται και στον Κώδικα 5.4, στον οποίο φαίνεται πως η `perform_EMD()` γυρνάει μόνο το residual, η `emd.emd()` της βιβλιοθήκης που χρησιμοποιήθηκε, παρόλα αυτά, επιστρέφει τις IMFs οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν αν χρειάζεται. Το residual, με χρήση της PyEMD, υπολογίζεται ως η τελευταία IMF που επιστρέφει η `emd.emd()`.

Να σημειωθεί πως η συμπερίληψη του EMD στην επεξεργασία των ημερήσιων μετρήσεων οδηγούσε σε σημαντική αύξηση του συνολικού χρόνου επεξεργασίας. Για

αυτό το λόγο, όπως και το Kalman filtering, μπορεί να γίνει comment out και να συμπεριληφθεί μόνο σε όποια περίπτωση κριθεί χρήσιμο.

```
def EMD_filtering(data):
    """
    Performs EMD to each item of the data list, which represents a signal.

    Parameters
    -----
    data : list of list of float
        An array of the values across the axis

    Returns
    -----
    list of list of float
        A list of the residual signals for each original signal passed through
the data parameter.
        The residual signals are appended to the return list, in the same order
that the original signals
        lists were passed to the data parameter.
    """
    emd_data = []

    for d in data:
        filtered_data = d.copy()
        residual_df = perform_EMD(filtered_data)
        residual_signal = residual_df['Residual'].tolist()
        emd_data.append(residual_signal)

    return emd_data

def perform_EMD(signal):
    """
    Performs Empirical Mode Decomposition (EMD) to the given signal,
    using emd.emd() from the PyEMD package.

    Parameters
    -----
    signal : list of float
        The signal to which EMD will be applied.

    Returns
    -----
    pandas.DataFrame
        The residual signal that is extracted after EMD is performed to the
original signal.
    """
    np_signal = np.array(signal)

    emd = EMD()
    imfs = emd.emd(np_signal)

    residual_signal = imfs[-1]
    residual_df = pd.DataFrame(residual_signal, columns=['Residual'])

    return residual_df
```

Κώδικας 5.4: Οι συναρτήσεις για την εφαρμογή EMD στο σήμα

5.4 Αποτελέσματα

5.4.1. Μελέτη της εξέλιξης στο χρόνο χρονοσειρών για τις 3 περιοχές

Αρχικά, από το σύνολο δεδομένων επιλέχθηκε μια χρονική περίοδος η οποία ήταν πλήρης από άποψη δεδομένων και για τις 3 περιοχές, δηλαδή δεν έλειπαν αρχεία ημερήσιων μετρήσεων από κανέναν σταθμό του δικτύου ENIGMA. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό αυτής της περιόδου, είναι ότι επιλέχθηκε ως μια περίοδος στην οποία δεν παρουσιάζονταν πολλές ανωμαλίες ή μη αναμενόμενα χαρακτηριστικά του σήματος. Ήταν έτσι δυνατό να δοθεί έμφαση στη χρονική εξέλιξη του σήματος μεταξύ των 3 περιοχών σε μια περίοδο χωρίς πολλά φαινόμενα που να χρήζουν ξεχωριστής μελέτης.

Η χρονική αυτή εξέλιξη μελετήθηκε εκτεταμένα, σε επίπεδο μέρας, βδομάδας και μήνα, για τις 3 περιοχές.

Συγκεκριμένα:

- **26/7/2015** για την ημερήσια μελέτη,
- Από **26/7/2015** μέχρι και **2/8/2015** για την εβδομαδιαία μελέτη,
- Από **26/7/2015** μέχρι και **25/8/2015** για τη μηνιαία μελέτη

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα για τις 3 αυτές χρονικές περιόδους, ξεκινώντας από το μικρότερο διάστημα και συνεχίζοντας προς το μεγαλύτερο.

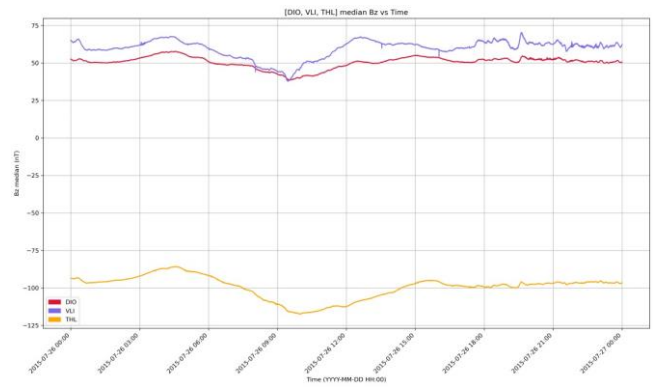
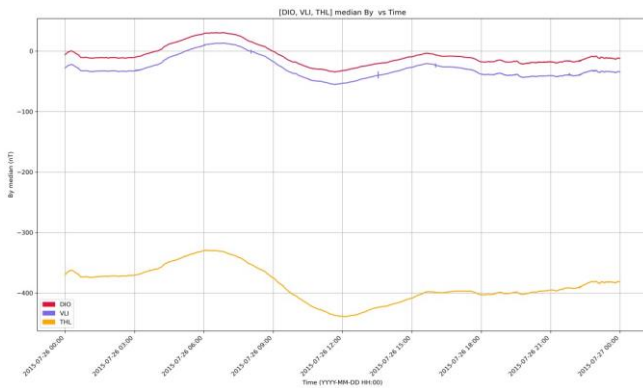
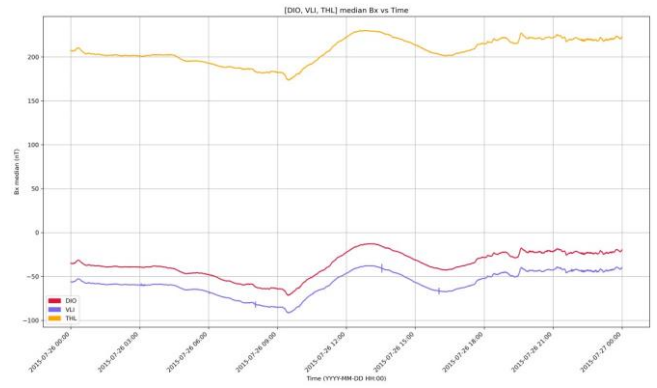
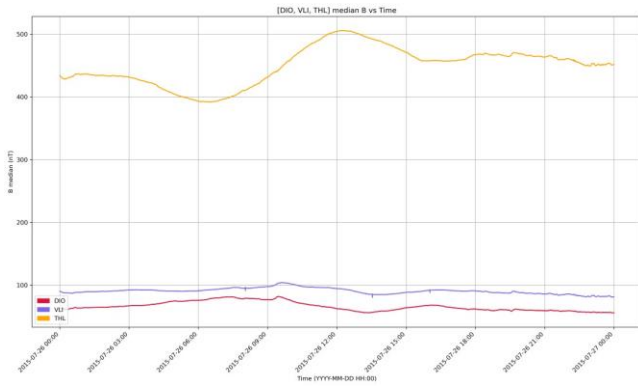
5.4.1.1 Ημερήσια μελέτη

Στις εικόνες της επόμενης σελίδας, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των τριών περιοχών για το συνολικό μαγνητικό πεδίο B , τις συνιστώσες B_x , B_y , B_z , καθώς και για τη θερμοκρασία αισθητήρα T_s (sensor temperature) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_e (environment temperature) για το διάστημα αυτό.

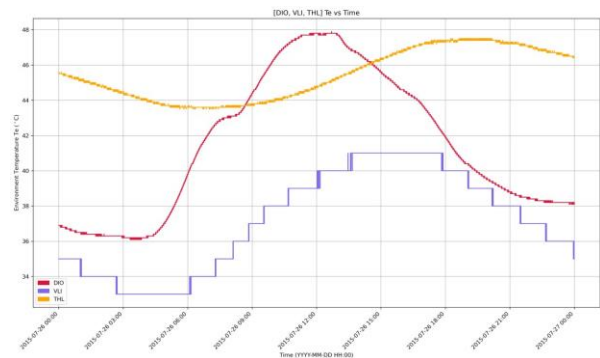
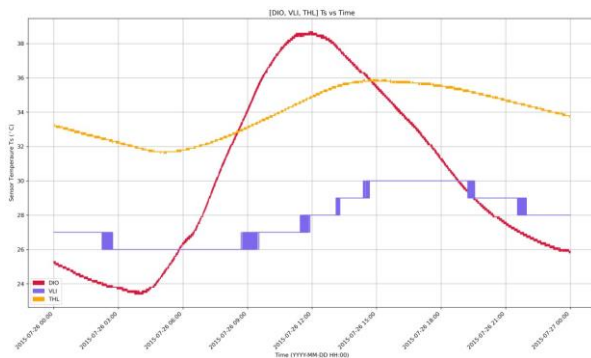
Στο σχήμα 5.4.1, πάνω αριστερά απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις για το συνολικό μαγνητικό πεδίο B , πάνω δεξιά για τη συνιστώσα B_x , κάτω αριστερά για τη συνιστώσα B_x και κάτω δεξιά για τη συνιστώσα B_z .

Σε κάθε γραφική παράσταση που απεικονίζονται αποτελέσματα για πάνω από μία περιοχή, με κόκκινο αναπαρίστανται τα δεδομένα για το Διόνυσο, με μπλε για τη Λακωνία και με πορτοκαλί για τα Τρίκαλα.

Να σημειωθεί, ότι σε όλες τις εικόνες που απεικονίζεται το B μαζί με τις 3 συνιστώσες του, η διάταξη και η χρωματική αντιστοιχία είναι αυτή που μόλις αναφέρθηκε, τόσο σε αυτήν, όσο και στις ενότητες που ακολουθούν.



Σχήμα 5.4.1: $[DIO, VLI, THL] B, B_x, B_y, B_z$ vs Time – 1 day (26/07/2015)



Σχήμα 5.4.2: $[DIO, VLI, THL] T_s, T_e$ vs Time – 1 day (26/07/2015)

Παρατηρούμε πως και στο συνολικό πεδίο και στις συνιστώσες του, υπάρχει μια ομοιότητα στα μέγιστα και στα ελάχιστα, καθώς και στην εξέλιξη στο χρόνο των γραφικών παραστάσεων μεταξύ των 3 περιοχών.

Παρατηρούμε επίσης πως οι γραφικές του Διονύσου και της Λακωνίας, κινούνται σε κοντινές τιμές σε όλες τις περιπτώσεις που απεικονίζονται. Οι γραφικές των Τρικάλων, έχουν μεγάλη απόσταση στις τιμές τους από τις άλλες 2 γραφικές. Η διαφορά αυτή, δεν είναι κάτι που μπορεί να εξηγηθεί γεωγραφικά, καθώς και οι τρεις υπό μελέτη περιοχές βρίσκονται στην Ελλάδα, με γεωγραφικά πλάτη και μήκη των οποίων οι διαφορές δεν γίνεται να ερμηνεύσουν τις αποκλίσεις στις τιμές των παραστάσεων. Αυτό σημαίνει πως χρειάζεται να ελεγχθεί ο αισθητήρας και να γίνει διακρίβωση των δεδομένων που καταγράφει.

Κάτι ακόμα που χρειάζεται να σημειωθεί, είναι πως οι τιμές τις οποίες παίρνουν όλες οι γραφικές παραστάσεις, δεν ανήκουν στο αναμενόμενο διάστημα μεταξύ (προσεγγιστικά) των 25000 nT – 65000 nT, αλλά η τάξη μεγέθους τους είναι αρκετά μικρότερη και φτάνει τις εκατοντάδες nT, αντί για δεκάδες χιλιάδες nT.

Και οι δύο αυτές παρατηρήσεις σχετικά με τις αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές, οφείλονται είτε στον τρόπο με τον οποίο είναι καταγεγραμμένα τα δεδομένα στις βάσεις δεδομένων, είτε στη διακρίβωση των αισθητήρων από τους οποίους προέρχονται οι μετρήσεις ή και στα δύο.

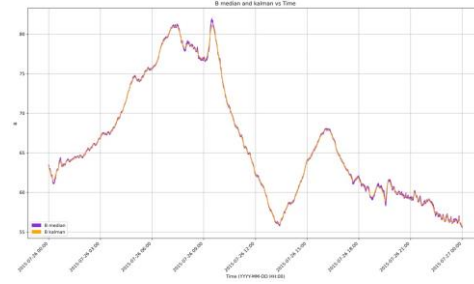
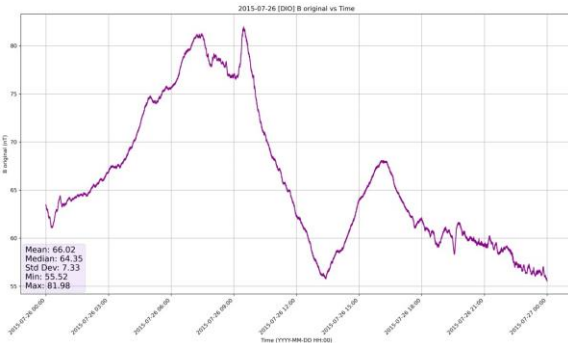
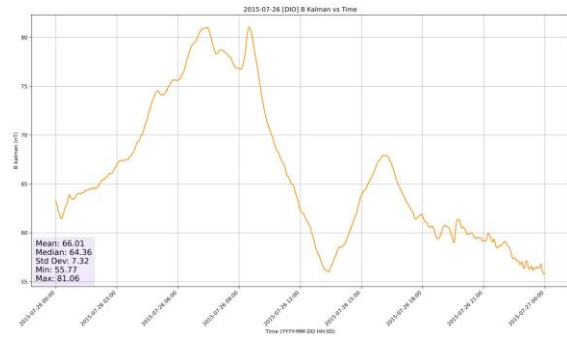
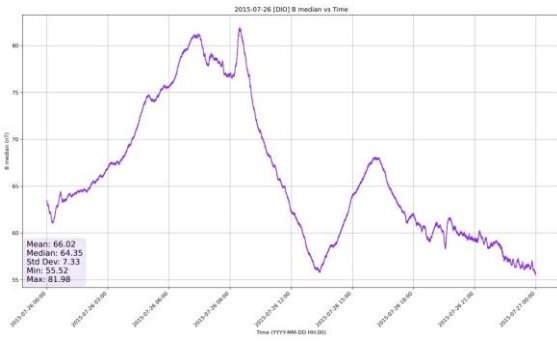
Σε κάθε περίπτωση, αντικείμενο της διπλωματικής δεν είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για το πεδίο, αλλά η παρουσίαση ενός εργαλείου που καθιστά εύκολη και δυνατή την επεξεργασία των μετρήσεών του και επιτρέπει την παρακολούθηση της εξέλιξής του έτσι ώστε να εντοπίζονται ανάλογα σφάλματα και δυσλειτουργίες των καταγραφικών.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 5.4.2 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας αισθητήρα (αριστερά) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (δεξιά).

Σχετικά με τη διάταξη των 2 γραφημάτων, σε όσα σημεία του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες μαζί, θα είναι πάντα αριστερά η θερμοκρασία αισθητήρα T_s και δεξιά η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_e .

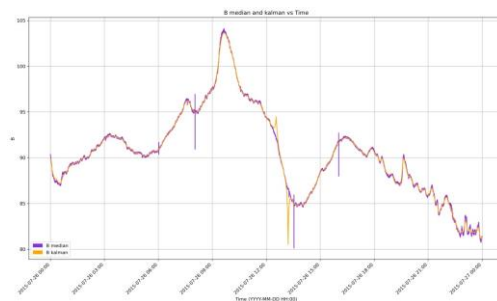
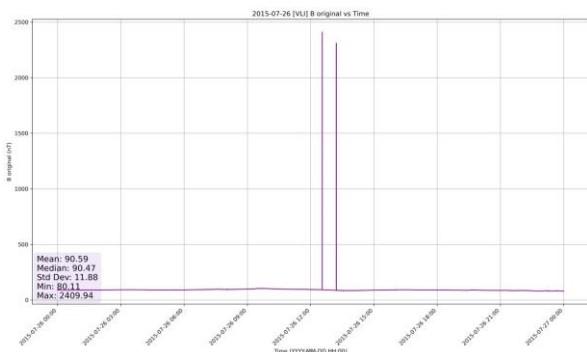
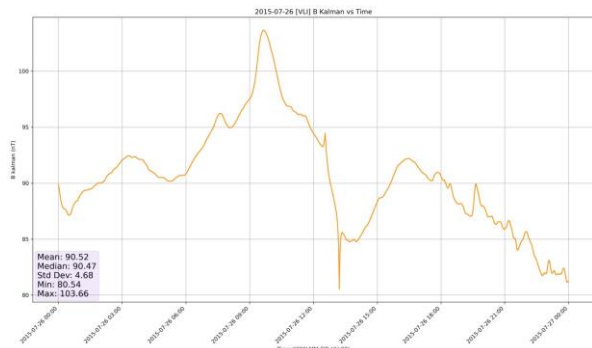
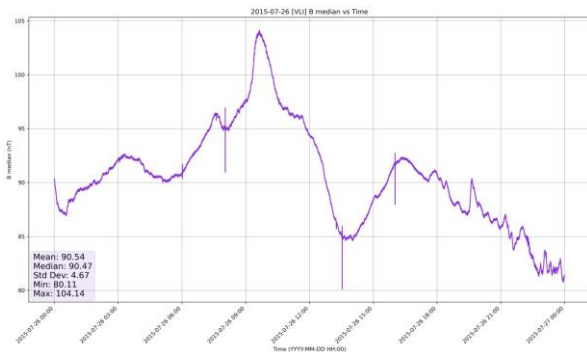
Οι θερμοκρασίες φαίνεται να έχουν παρόμοια χρονική εξέλιξη μεταξύ τους, με τις θερμοκρασίες T_s και T_e για το Διόνυσο να είναι υψηλότερες και με μεγαλύτερη ημερήσια διακύμανση. Στη Λακωνία, η όχι τόσο ομαλή αυξομείωση των γραφικών σε σχέση με το Διόνυσο και τα Τρίκαλα, ενδεχομένως να οφείλεται στις μετρήσεις που καταγράφουν οι αισθητήρες, στην ευαισθησία τους, και στο αν στρογγυλοποιούν τις τιμές που μετράνε ή τις γυρνάνε αυτούσιες, καθώς στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, δε φάνηκαν ενδείξεις έλλειψης δεδομένων για τις θερμοκρασίες.

Μία ακόμα παρατήρηση σε σχέση με τις θερμοκρασίες, είναι ότι κυμαίνονται όλες σε αρκετά υψηλές τιμές, ακόμα και για μήνα Ιούλιο. Παρόλα αυτά, μια απλή έρευνα δείχνει πως το καλοκαίρι του 2015 ήταν ένα από τα θερμότερα καλοκαίρια στην Ελλάδα των τελευταίων πολλών ετών, υποδεικνύοντας πως οι καταγραφές των θερμοκρασιών είναι, τουλάχιστον εν μέρει -καθώς η ολοκληρωμένη ερμηνεία τους δεν είναι στο αντικείμενο της εργασίας, δικαιολογημένα υψηλές.



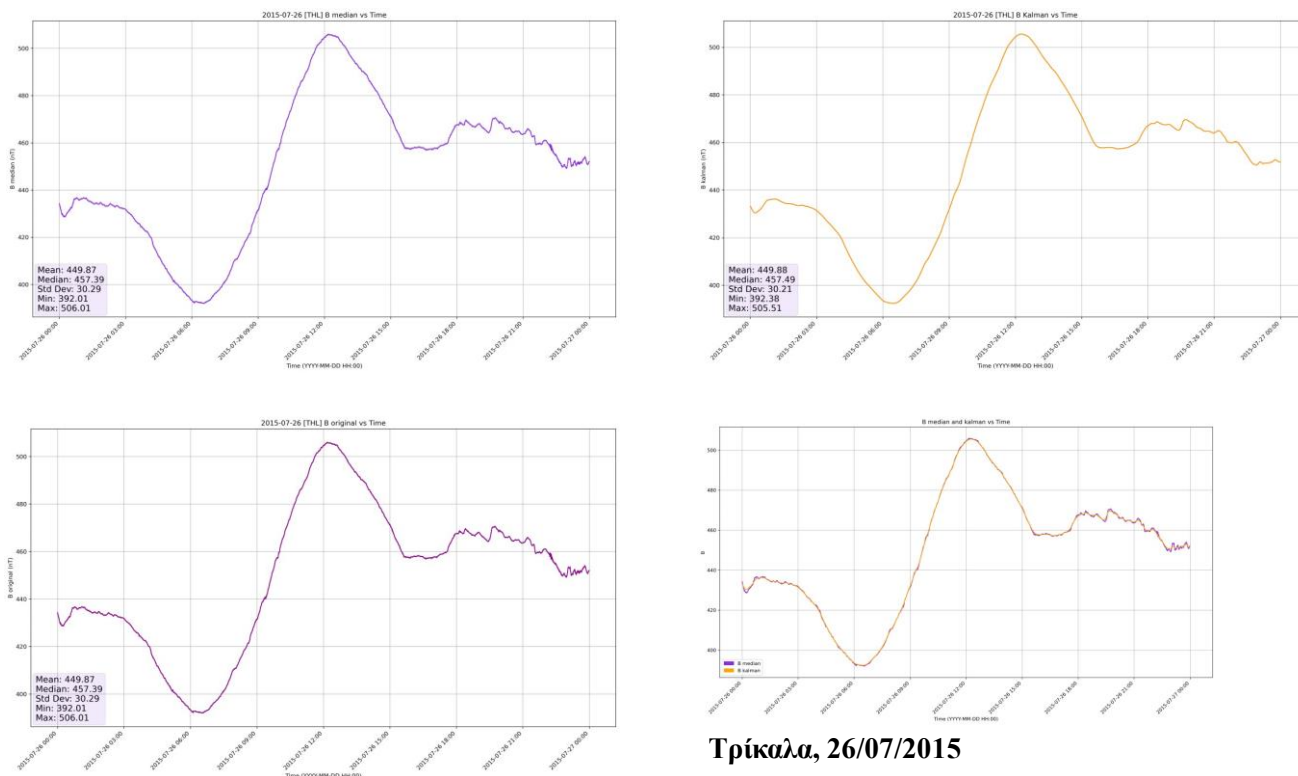
Διόνυσος, 26/07/2015

Σχήμα 5.4.3: [DIO] B [original, median, Kalman, median & Kalman] vs Time – 1 day (26/07/2015)



Λακωνία, 26/07/2015

Σχήμα 5.4.4: [VLI] B [original, median, Kalman, median & Kalman] vs Time – 1 day (26/07/2015)



Τρίκαλα, 26/07/2015

Σχήμα 5.4.5: [THL] B [original, median, Kalman, median & Kalman] vs Time – 1 day (26/07/2015)

Στις εικόνες 5.4.3 – 5.4.5, παρουσιάζονται για κάθε μία περιοχή ξεχωριστά και για διάστημα 24 ωρών, οι γραφικές παραστάσεις του αρχικού σήματος (original), του σήματος που έχει περάσει από median filtering, του σήματος που έχει περάσει από Kalman filtering (αντί για median), καθώς και μία σύγκριση του median και του Kalman, από άποψη επίδρασης στο αρχικό σήμα.

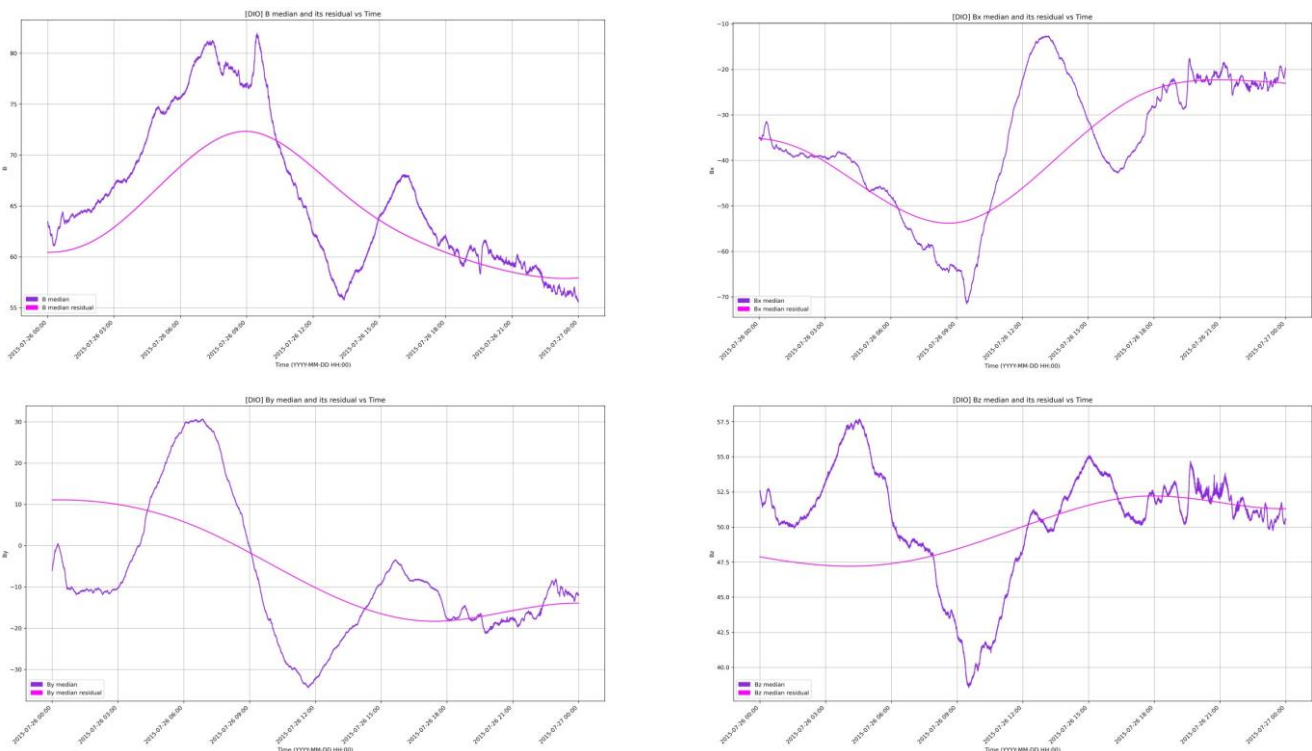
Για τις εικόνες 5.3 και 5.5, για Διόνυσο και Τρίκαλα αντίστοιχα, μπορούν να γίνουν παρόμοιες παρατηρήσεις, καθώς φαίνεται πως οι τεχνικές που εφαρμόζονται στο αρχικό σήμα έχουν αρκετά αντίστοιχη επίδραση και στις 2 περιπτώσεις.

Αρχικά, για κάθε περιοχή ξεχωριστά, στις γραφικές του αρχικού σήματος και του median (θα αναφέρεται ως median για απλότητα στο εξής, το σήμα που έχει περάσει από median filtering with spike detection and replacement) παρατηρούμε πως οι στατιστικές τιμές που έχουν υπολογιστεί για κάθε περίπτωση και που βρίσκονται στο κάτω αριστερά μέρος των γραφικών παραστάσεων, έχουν ακριβώς ίδιες τιμές. Αυτό επιβεβαιώνει το ότι το median filtering δεν αλλάζει καθόλου το αρχικό σήμα, πέρα από την απομάκρυνση του θορύβου σε μορφή spikes και outliers, όταν αυτός υπάρχει. Εφόσον για τη συγκεκριμένη μέρα, λοιπόν, δεν εντοπίζεται τέτοιος θόρυβος, το αρχικό και το median σήμα είναι πανομοιότυπα, όπως φαίνεται τόσο από τις γραφικές όσο και από τις στατιστικές τους τιμές.

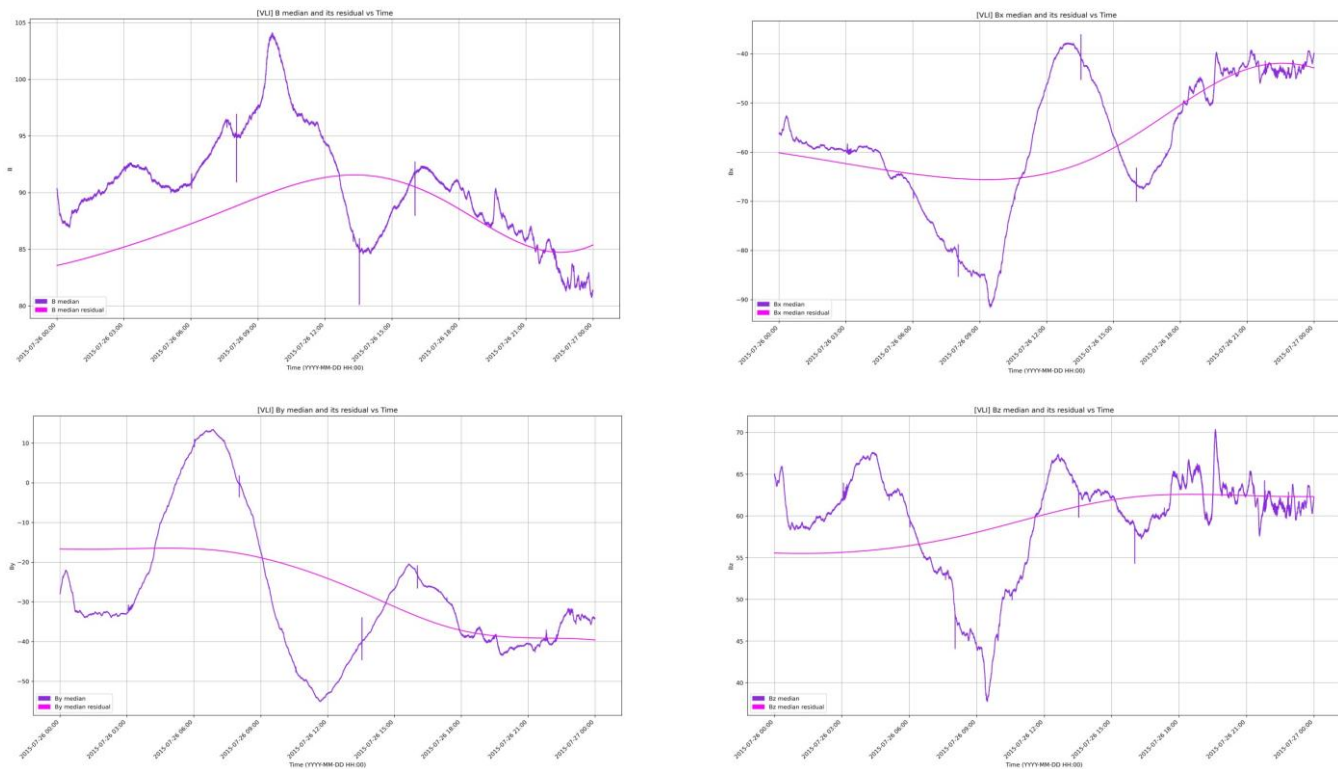
Το Kalman filtering, όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις, αλλά και από τις στατιστικές τιμές που έχουν υπολογιστεί για τα σήματα, αλλάζει τη μορφή και τις τιμές του σήματος, εφαρμόζοντας μια ομαλοποίηση σε αυτό, και όχι μόνο απομάκρυνση θορύβου. Για το Διόνυσο και τα Τρίκαλα στις 26/7, παρόλο που δεν υπάρχουν μεμονωμένα spikes για να αφαιρέσει το Kalman, επιδρά στο αρχικό signal και δίνει στατιστικές τιμές και γραφικές, κοντινές αλλά όχι ταυτόσημες με τις αρχικές.

Μεταξύ τους το median και το Kalman filtering για Διόνυσο και Τρίκαλα, φαίνονται αρκετά κοντά. Όχι πανομοιότυπα κοντά, όμως τα αποτελέσματά τους και ως προς τη γραφική απεικόνιση, αλλά και ως προς τα στατιστικά για κάθε περιοχή, είναι πολύ κοντά.

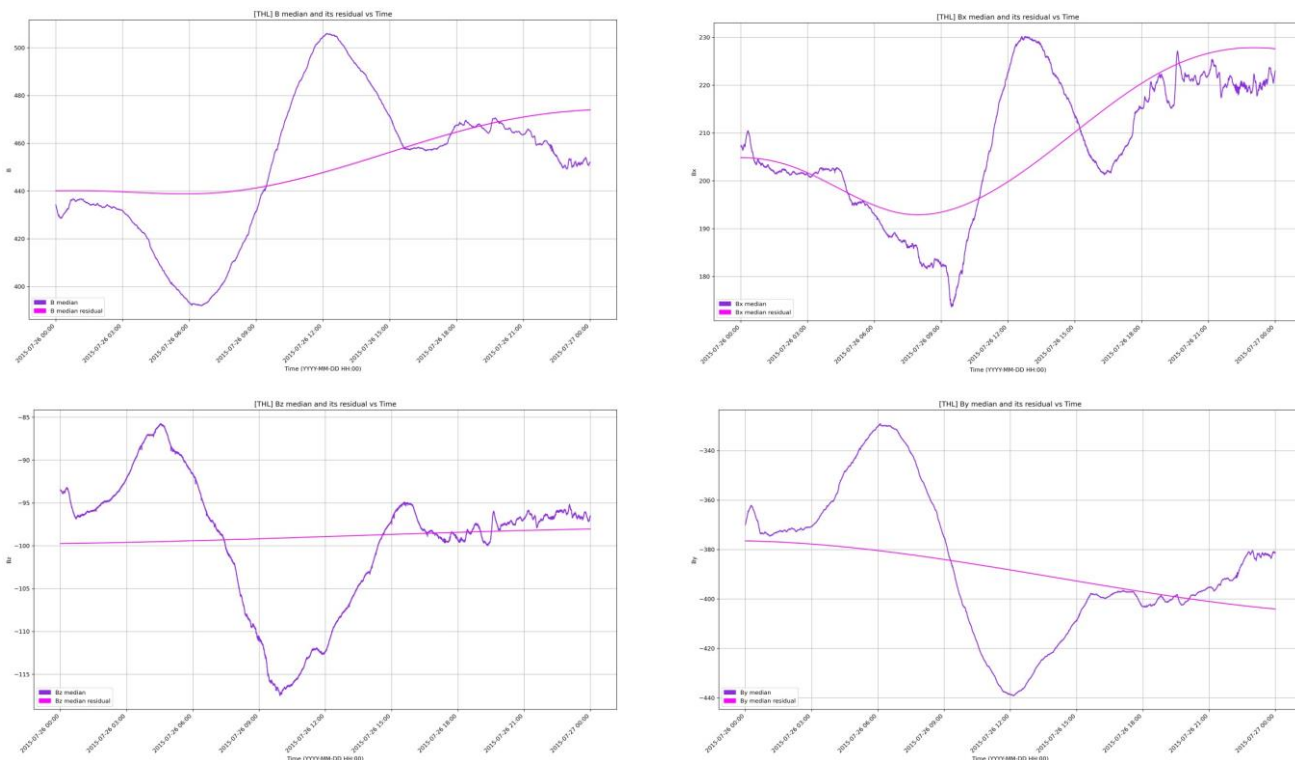
Στην περίπτωση της Λακωνίας, παρόλα αυτά, φαίνεται μια αρκετά διαφορετική εικόνα. Τόσο μεταξύ του median και του Kalman, όσο και μεταξύ της κάθε μίας από αυτές τις τεχνικές και του αρχικού σήματος, που φαίνεται κάτω αριστερά στην εικόνα 5.4.4. Εδώ, υπάρχουν δύο πολύ μεγάλα μεμονωμένα spikes τα οποία αφαιρούνται τόσο από το median όσο και από το Kalman. Επομένως, και οι 2 τεχνικές σε αυτή την περίπτωση κάνουν σωστή αφαίρεση του θορύβου που παρουσιάζεται σε αυτή τη μορφή. Από εκεί και πέρα, φαίνεται μία μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ του median και του Kalman, καθώς υπάρχουν κάποια spikes που το Kalman τα διαχειρίζεται διαφορετικά και τα ομαλοποιεί, σε αντίθεση με το median που αντιστοιχεί στο αρχικό σήμα. Επίσης, εδώ οι τιμές των στατιστικών στοιχείων που έχουν υπολογιστεί μεταξύ των 3 περιπτώσεων γραφικών, διαφέρουν περισσότερο σε σχέση με τις άλλες 2 περιοχές.



Σχήμα 5.4.6: [DIO] B [median & residual] vs Time – 1 day (26/07/2015)



Σχήμα 5.4.7: [VLI] B [median & residual] vs Time – 1 day (26/07/2015)



Σχήμα 5.4.8: [THL] B [median & residual] vs Time – 1 day (26/07/2015)

Στις εικόνες 5.4.6 – 5.4.8, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του B median μαζί με το residual component του, μετά την εφαρμογή της τεχνικής EMD στο median σήμα, για κάθε μία από τις 3 περιοχές. Σε κάθε εικόνα, παρουσιάζεται τόσο το συνολικό μαγνητικό πεδίο B, όσο και οι 3 συνιστώσες του πεδίου Bx, By, Bz. Και στις 3 εικόνες, το residual αναπαριστά τη μακροπρόθεσμη τάση του σήματος, μετά την αφαίρεση των IMFs, δηλαδή των συνιστωσών που αναπαριστούν ταλαντώσεις. Επειδή συνήθως ο θόρυβος αναπαρίσταται από τις πιο υψίσυχνες IMFs, η μελέτη μόνο του residual συνεπάγεται και πως ο θόρυβος έχει αφαιρεθεί από το αρχικό σήμα -μαζί φυσικά και με άλλες συνιστώσες του, καθώς οι IMFs μέσω των ή χαμηλών συχνοτήτων μπορούν να αναπαριστούν φαινόμενα και συγκεκριμένες συνεισφορές στο πεδίο.

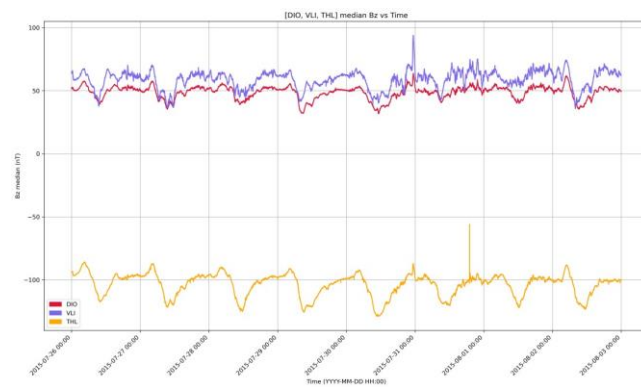
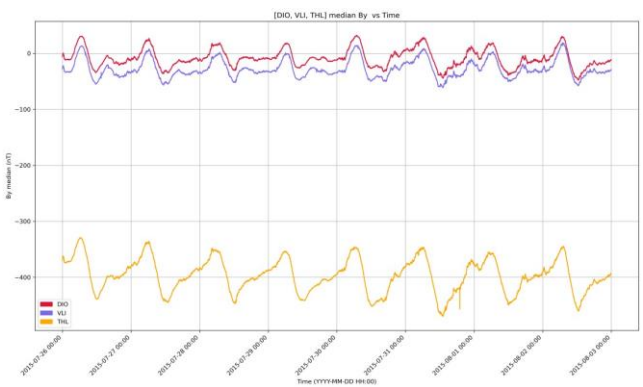
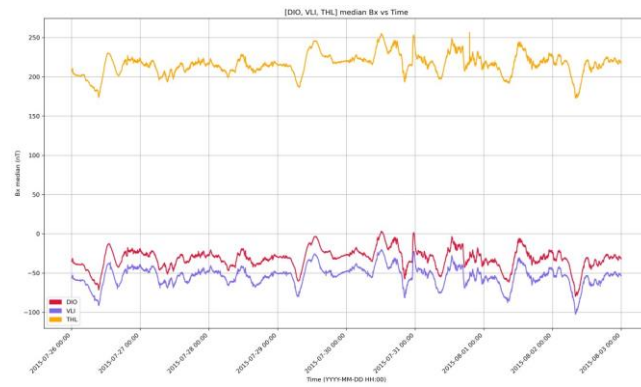
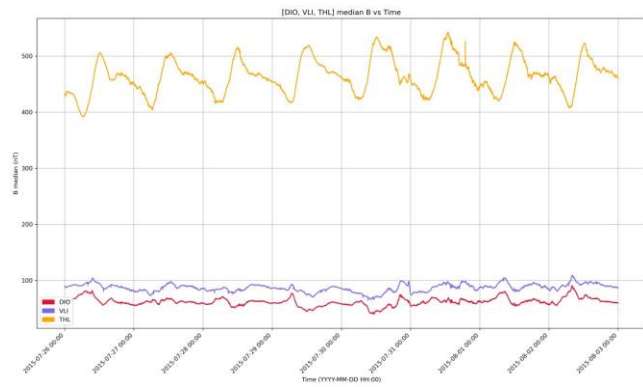
Εδώ, το EMD έχει εφαρμοστεί σε ημερήσιο επίπεδο, μπορεί παρόλα αυτά να εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερα διαστήματα και να δώσει την τάση για ακόμα μεγαλύτερες περιόδους.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, δεν έχει γίνει γραφική αναπαράσταση όλων των IMFs, το οποίο αρκετές φορές συνηθίζεται, καθώς το βασικό σημείο ενδιαφέροντος ήταν το residual και η μακροπρόθεσμη τάση που αυτό μας δίνει. Παρόλα αυτά ο κώδικας αποθηκεύει τις IMFs για κάθε συνιστώσα του πεδίου Bx, By, Bz και δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία και γραφική απεικόνισή τους.

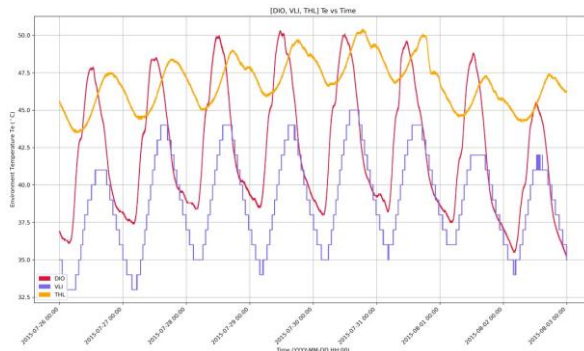
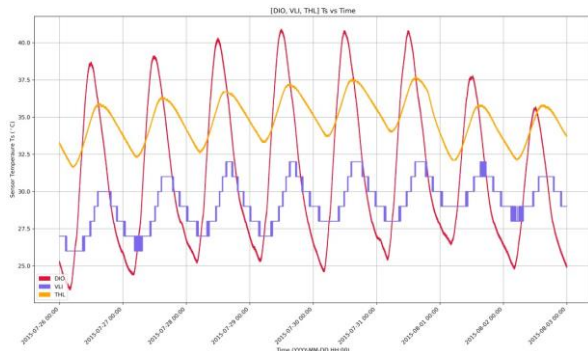
5.4.1.2 Εβδομαδιαία μελέτη (26/07/2015 – 02/08/2015)

Όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση της ημερήσιας μελέτης, στην εικόνα 5.4.9 απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις για το συνολικό μαγνητικό πεδίο B, το Bx, το By και το Bz. Σχετικά με το συνολικό μαγνητικό πεδίο και τις συνιστώσες του, στην εβδομαδιαία μελέτη αρχίζει και διαφαίνεται μια περιοδικότητα στην εξέλιξη της κάθε χρονοσειράς, η οποία μάλιστα είναι σχεδόν κοινή για τις 3 περιοχές. Η περιοδικότητα αυτή σχετίζεται με την εναλλαγή μέρας-νύχτας και τη διαφορετική αλληλεπίδραση που έχει ο ηλιακός άνεμος με τη μαγνητόσφαιρα σε κάθε ένα από τα 2 αυτά διαστήματα. Κατά τη μετάβαση από 30/7 προς 31/7, παρατηρείται και ένα spike που καταγράφουν οι γραφικές και των 3 περιοχών και φαίνεται πιο ξεκάθαρα κυρίως στους άξονες Bx και Bz στα δεξιά της εικόνας.

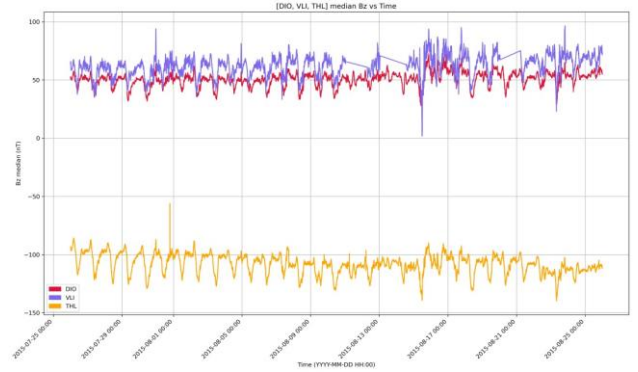
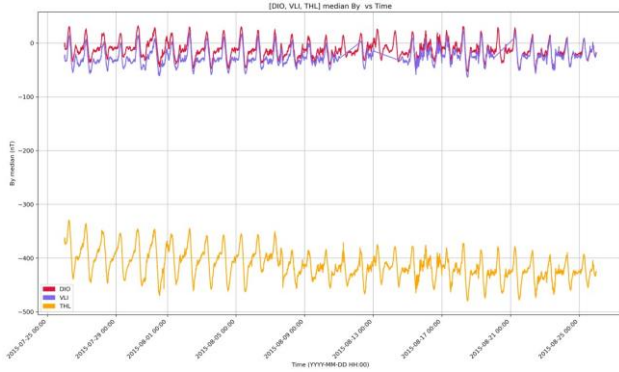
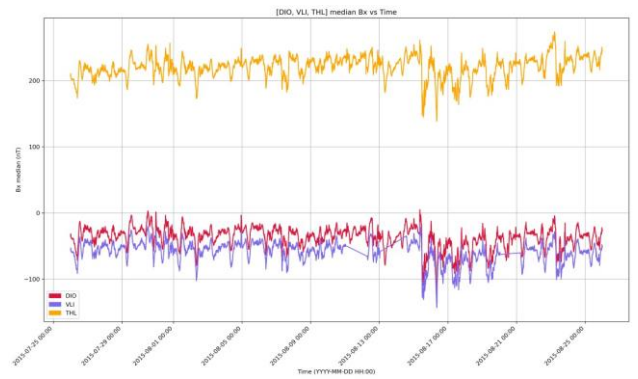
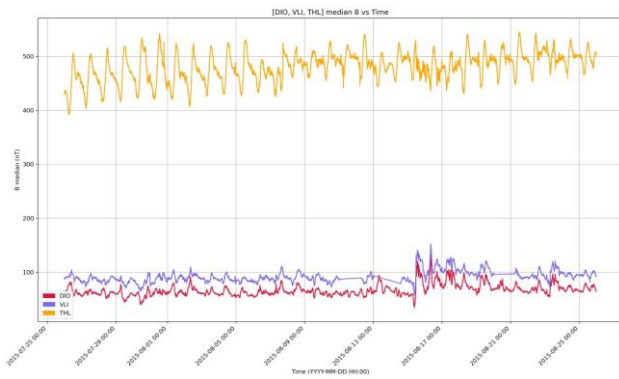
Στην εικόνα 5.4.10 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις που αναπαριστούν για τις 3 περιοχές τις θερμοκρασίες αισθητήρα και περιβάλλοντος, τη μία δίπλα στην άλλη. Πέρα από τις παρατηρήσεις που έγιναν και στην ημερήσια μελέτη σχετικά με τις υψηλές θερμοκρασίες, την εξέλιξη στο χρόνο των γραφικών και τη συνεχή ή όχι αποτύπωση των δεδομένων, υπάρχει και ένα ακόμα χαρακτηριστικό που φαίνεται πιο ξεκάθαρα στην εβδομαδιαία μελέτη σε σχέση με την ημερήσια. Αυτό είναι ότι οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των γραφικών των θερμοκρασιών των Τρικάλων, έχουν μικρότερη διαφορά μεταξύ τους σε σχέση με τις άλλες περιοχές. Αυτό σημαίνει είτε πως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ήταν μικρότερες στα Τρίκαλα για την ορισμένη περίοδο, είτε πως οι αισθητήρες στο συγκεκριμένο παρατηρητήριο από όπου έρχονται τα δεδομένα, για κάποιο λόγο, καταγράφουν μικρότερες διακυμάνσεις.



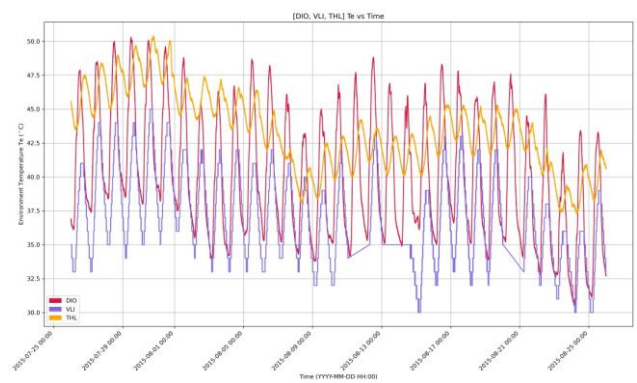
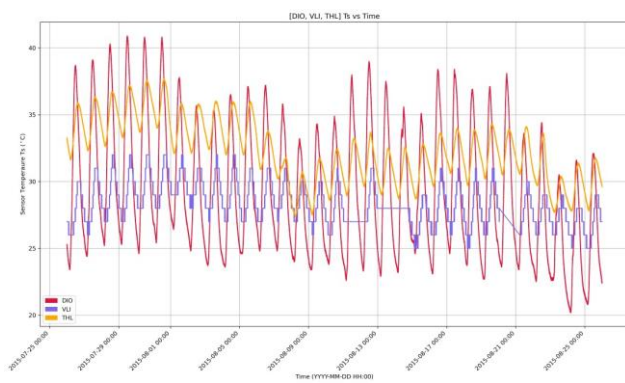
Σχήμα 5.4.9: [DIO, VLI, THL] B, Bx, By, Bz vs Time – 1 week (26/07/2015 - 02/08/2015)



Σχήμα 5.4.10: [DIO, VLI, THL] Ts, Te vs Time – 1 week (26/07/2015 - 02/08/2015)



Σχήμα 5.4.11: [DIO, VLI, THL] B, Bx, By, Bz vs Time – 1 month (26/07/2015 - 25/08/2015)



Σχήμα 5.4.12: [DIO, VLI, THL] Ts, Te vs Time – 1 month (26/07/2015 - 25/08/2015)

5.4.1.3 Μηνιαία μελέτη (26/07/2015 – 25/08/2015)

Στις εικόνες 5.4.11 και 5.4.12 φαίνονται αντίστοιχα οι γραφικές παραστάσεις για το συνολικό μαγνητικό πεδίο B, το Bx, το By και το Bz και οι γραφικές παραστάσεις που αναπαριστούν για τις 3 περιοχές τις θερμοκρασίες αισθητήρα και περιβάλλοντος, τη μία δίπλα στην άλλη.

Για το συνολικό μαγνητικό πεδίο και τις συνιστώσες του στην εικόνα 5.4.11 εξακολουθούν να ισχύουν οι παρατηρήσεις της ημερήσιας και της εβδομαδιαίας μελέτης. Στο διάστημα του ενός μήνα, φαίνεται πολύ πιο ξεκάθαρα η περιοδικότητα που αναφέρθηκε και στο διάστημα της μία εβδομάδας, η οποία όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη ενότητα σχετίζεται με την εναλλαγή μέρας-νύχτας και τη διαφορετική αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου με τη μαγνητόσφαιρα κατά την περιστροφή της Γης με το φωτεινό και το όχι φωτεινό ημισφαίριο.

Στο διάστημα 13/08/2015-17/08/2015, φαίνονται οι περιπτώσεις κάποιων αρκετά εμφανών spikes που απεικονίζουν οι γραφικές και των 3 περιοχών. Συγκεκριμένα, στον Bx πάνω δεξιά φαίνονται 2 σχεδόν συνεχόμενα spikes που πιάνουν ξεκάθαρα οι Bx μετρήσεις για Διόνυσο, Τρίκαλα και Λακωνία, και κάτω δεξιά στον Bz φαίνεται 1 τέτοιο spike που και πάλι απεικονίζεται ξεκάθαρα από τα δεδομένα που έχουν δώσει οι μετρήσεις και των 3 περιοχών.

Στην εικόνα 5.4.12 οι παρατηρήσεις για τις θερμοκρασίες είναι αντίστοιχες και σε αυτό το διάστημα, με τις γραφικές θερμοκρασιών των Τρικάλων να έχουν και πάλι αρκετά μικρότερο πλάτος από τις γραφικές του Διονύσου και της Λακωνίας. Οι τιμές των γραφικών φτάνουν σε πολύ υψηλές τιμές, με το Διόνυσο να φαίνεται να προσεγγίζει σχεδόν σταθερά τα μεγαλύτερα μέγιστα από όλες τις περιοχές, με εξαίρεση το τις πρώτες 5 μέρες του διαστήματος, μέχρι 01/08/2015 περίπου, διάστημα στο οποίο τα μέγιστα της γραφικής των Τρικάλων σχεδόν αγγίζουν τα μέγιστα της γραφικής του Διονύσου για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος Te.

Κάτι που μπορεί ακόμα να αναφερθεί για τις εικόνες 5.4.11 και 5.4.12, είναι πως σε κάποια διαστήματα οι γραφικές της Λακωνίας είναι εμφανές πως αντί να έχουν την ίδια χρονική εξέλιξη με την υπόλοιπη χρονοσειρά τους ή ακόμα και με τις χρονοσειρές των άλλων 2 περιοχών, έχουν κάποιες ευθείες γραμμές. Αυτό οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στο ότι τα αρχεία μετρήσεων εκείνων των ημερών δεν μπόρεσαν να επεξεργαστούν από τον κώδικα, είτε λόγω της εσωτερικής δομής του, είτε λόγω κάποιου άλλου error ή exception που προκλήθηκε κατά την επεξεργασία τους και έτσι στις γραφικές αυτά τα διαστήματα παρουσιάζονται ως ευθείες γραμμές μεταξύ των διαστημάτων όπου υπήρχαν μετρήσεις που επεξεργάστηκε ο κώδικας ολοκληρωμένα.

5.4.2 Επίδραση Kalman

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα διάστημα για τα Τρίκαλα, του οποίου τα αποτελέσματα μετά την επεξεργασία που έγινε σε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων το οποίο πέρασε από median filtering, παρουσίαζε μία αρκετά ακανόνιστη εικόνα η

οποία δεν ξανασυναντήθηκε με αυτό τον τρόπο σε άλλο σημείο των δεδομένων του 2015 για καμία από τις 3 περιοχές. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε το διάστημα αυτό, μαζί με διάστημα μισής ή μία μέρας πριν και μετά για να φανούν πιο ξεκάθαρα οι απότομες μεταβολές σε σχέση με το υπόλοιπο dataset, ώστε να μελετηθεί ξεχωριστά.

Το διάστημα αυτό είναι από 30/06/2015 – 04/07/2015 και παρουσιάζεται στις εικόνες 5.4.13 – 5.4.18.

Στις εικόνες 5.4.13 και 5.4.14 κάτω αριστερά φαίνεται το αρχικό σήμα, πάνω αριστερά το αρχικό σήμα μετά από median filtering και δεξιά το αρχικό σήμα μετά από Kaman filtering, για 30/06/2015 και 01/07/2015 αντίστοιχα.

Σε αυτές, και κυρίως στην εικόνα 5.4.14 για την 01/07/2015 φαίνεται πως το αρχικό σήμα εμφανίζεται με πολλαπλά στιγμιαία spikes που δεν εκτείνονται στο χρόνο, γεγονός το οποίο ενδεχομένως έχει να κάνει με τη διακρίβωση ή τη λειτουργία του αισθητήρα των Τρικάλων σε εκείνες τις ημερομηνίες. Σε κάθε περίπτωση, επειδή η εξήγηση των φαινομένων δεν είναι το αντικείμενο της εργασίας, φαίνεται πως το median filtering κάνει μία μικρή εκκαθάριση σε αυτά τα spikes, παρόλα αυτά τα περισσότερα περνάνε από αυτό, λόγω του ότι η συγκεκριμένη τεχνική δρα ανά κυλιόμενα παράθυρα γειτονικών τιμών, τα οποία περιέχουν σχεδόν σε κάθε περίπτωση spikes και έτσι δεν αντιμετωπίζονται ως outliers.

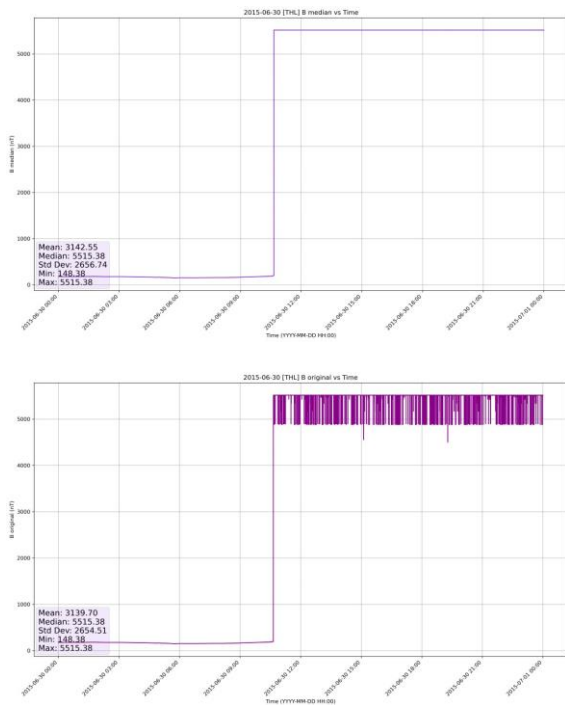
Το Kalman filtering, από την άλλη, στο δεξί μέρος των 2 εικόνων αυτών, φαίνεται πως δίνει μια αρκετά διαφορετική εικόνα, τόσο από το αρχικό σήμα, όσο και από το median filtering. Αυτό φαίνεται και από τις στατιστικές τιμές τους, που είναι πιο κοντινές στις περιπτώσεις του αρχικού σήματος και του median, σε σχέση με τις στατιστικές τιμές του Kalman, αλλά κυρίως φαίνεται από τις γραφικές απεικονίσεις.

Το Kalman φαίνεται πως είναι σε θέση να ομαλοποιήσει ακόμα και ένα τέτοιο σήμα, είτε θεωρηθεί ανωμαλία, είτε θεωρηθεί δυσλειτουργία ή λάθος διακρίβωση του αισθητήρα. Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται πως διαχειρίζεται πολύ διαφορετικά και ενδεχομένως πιο αποδοτικά από το median filtering δεδομένα σαν και αυτά του συγκεκριμένου διαστήματος.

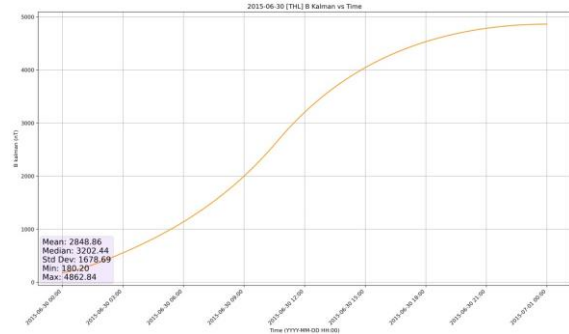
Αυτό, δε σημαίνει πως το Kalman filtering είναι καλύτερη τεχνική από το median filtering, καθώς είναι δύο διαφορετικές τεχνικές με διαφορετικούς σκοπούς και εσωτερικούς υπολογισμούς. Το Kalman στοχεύει στην ομαλοποίηση του σήματος, ενώ το median στην αφαίρεση μεμονωμένων spikes ή outliers και εφόσον εδώ τα περισσότερα spikes δεν ήταν μεμονωμένα, δεν μπόρεσαν να αφαιρεθούν ή να αφαιρεθούν σωστά στην πλειοψηφία τους. Το Kalman από την άλλη, φαίνεται να δουλεύει αρκετά αποδοτικά στη διαχείριση αυτών των μετρήσεων, γεγονός που σημαίνει και ότι ο προσδιορισμός των παραμέτρων του ήταν αρκετά καλός για το σύνολο δεδομένων που μελετήθηκε.

Αυτό που θα μπορούσε να βγει σαν συμπέρασμα, λοιπόν, είναι ότι σε τέτοιες περιπτώσεις μη αναμενόμενων και ακανόνιστων μετρήσεων, το Kalman filtering φαίνεται να είναι πιο κατάλληλη τεχνική από ό,τι το median filtering, λόγω της

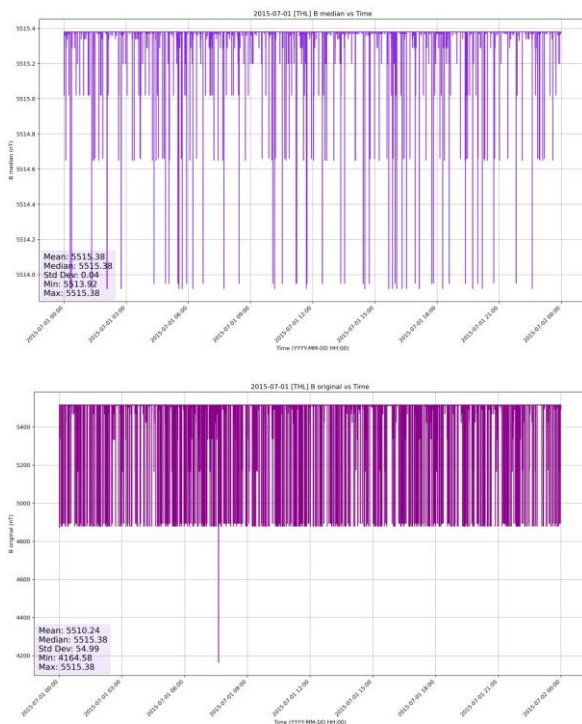
διαφορετικής προσέγγισης που έχει που καθιστούν δυνατή τη διαχείριση αυτών των περιπτώσεων.



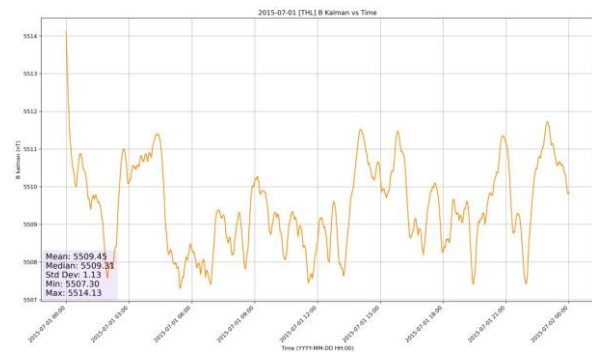
30/06/2015



Σχήμα 5.4.13: [THL] B [median, original & Kalman] vs Time – 30/06/2015



01/07/2015

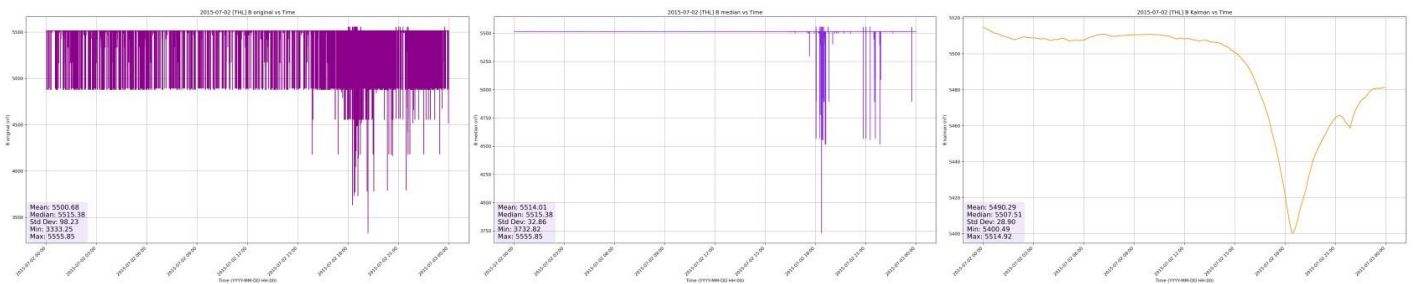


Σχήμα 5.4.14: [THL] B [median, original & Kalman] vs Time – 01/07/2015

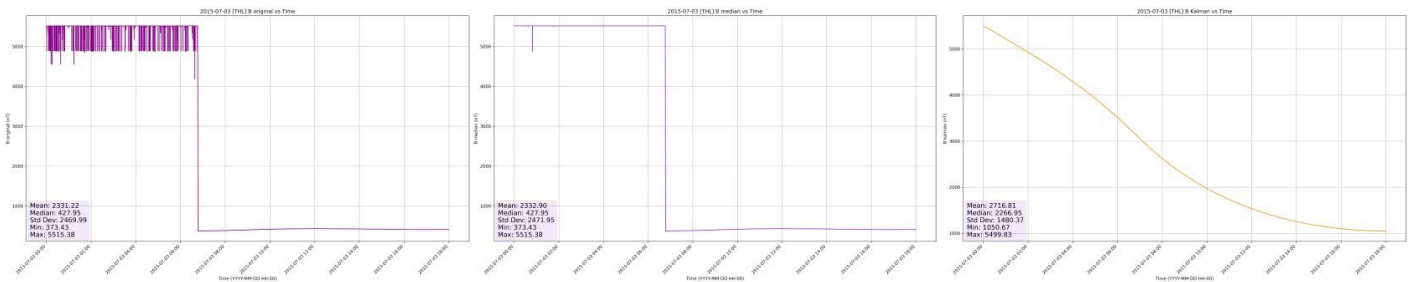
Στην εικόνα 5.4.14 φαίνονται οι αντίστοιχες γραφικές για 02/07/2015 και 03/07/2015, στο πάνω και στο κάτω μισό της θόνης αντίστοιχα. Σε κάθε γραμμή, αριστερά φαίνεται το αρχικό σήμα, στη μέση το σήμα μετά από median filtering και δεξιά το σήμα μετά από Kalman filtering. Η εξήγηση και η ανάλυση για αυτές τις μέρες είναι αντίστοιχη με την εξήγηση που παρουσιάστηκε πιο αναλυτικά για τις 30/06/2015 και 01/07/2015 στις εικόνες 5.4.13 και 5.4.14.

Σε κάθε περίπτωση, οι μετρήσεις πρέπει να συσχετίζονται και με άλλα δεδομένα για την περιοχή και την εποχή, όπως για παράδειγμα μετεωρολογικά ή άλλα συμβάντα. Το εργαλείο που αναπτύχθηκε, βοηθάει και σε αυτήν την κατεύθυνση, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό συμβάντων που πρέπει να διερευνηθούν.

02/07/2015



03/07/2015

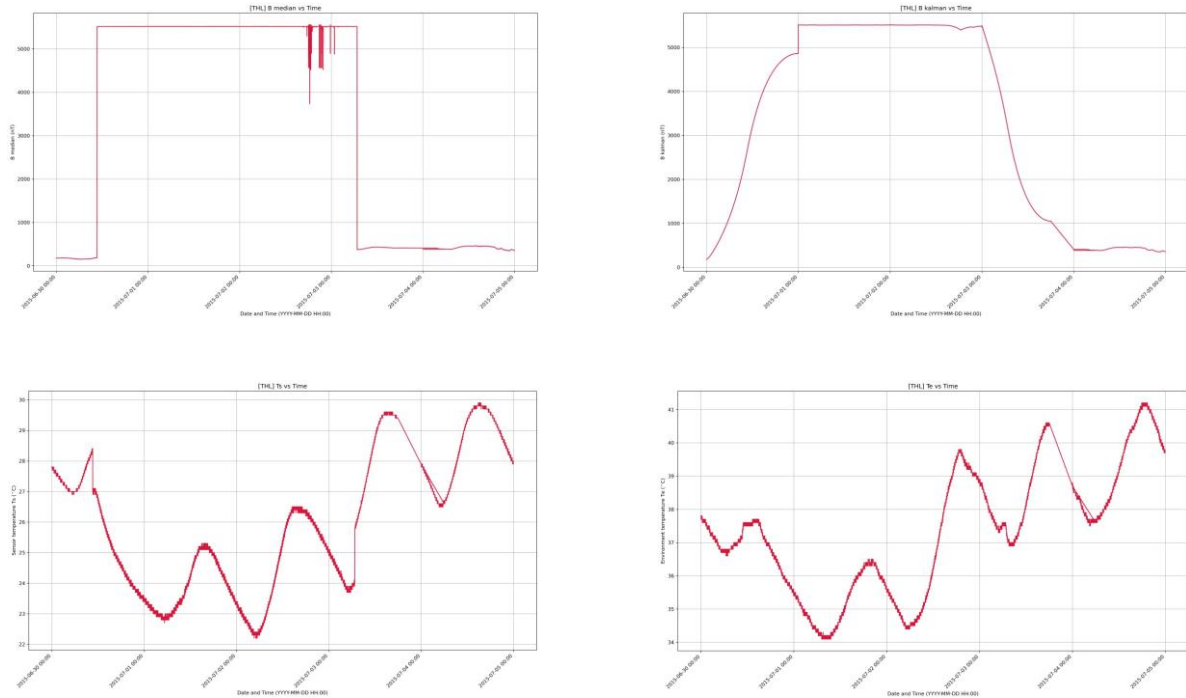


Σχήμα 5.4.14: [THL] B [median, original & Kalman] vs Time – 02/07/2015 & 03/07/2015

Στην εικόνα 5.4.14 παρουσιάζονται στην πάνω γραμμή, αριστερά το B μετά από median filtering για το διάστημα 30/06/2015 – 04/07/2015 και δεξιά το B μετά από Kalman filtering. Η μέρα 04/07/2015 δεν παρουσίαζε κάποια μη αναμενόμενη συμπεριφορά αυτή καθαυτή, αλλά αποτελούσε τη μετάβαση του αμέσως

προηγούμενου διαστήματος στις πιο κανονικές και ομαλές εκφάνσεις του σήματος που επικρατούν στο dataset, οπότε έχει συμπεριληφθεί και αυτή στις γραφικές της εικόνας 5.4.15 της επόμενης σελίδας.

30/06/2015 – 04/07/2015



Σχήμα 5.4.15: [THL] B [median & Kalman] vs Time – 30/06/2015 - 04/07/2015

Στην εικόνα 5.4.15 φαίνεται στην πάνω γραμμή αριστερά το B μετά από median filtering για το διάστημα των 5 ημερών και δεξιά το B μετά από Kalman filtering για το ίδιο διάστημα. Επίσης, στην κάτω γραμμή παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες αισθητήρα και περιβάλλοντος, οι οποίες φαίνεται να έχουν σχετικά αντίστοιχες αυξομειώσεις κατά την εξέλιξη του χρόνου ή τουλάχιστον μια παρόμοια τάση για αυτό το διάστημα των 5 ημερών.

5.4.3 Εντοπισμός spikes μεγάλης διάρκειας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται περιπτώσεις από spikes μεγάλης χρονικής διάρκειας, εννοώντας πως δεν εντοπίζονται σε μια συγκεκριμένη στιγμή στο χρόνο και σε μία μεμονωμένη περιοχή, ώστε να θεωρηθούν outliers, αλλά εκτείνονται σε διάστημα ωρών ή και ημερών.

Επιλέχθηκαν για εκτενέστερη μελέτη 3 περίοδοι στις οποίες εντοπίστηκαν spikes τουλάχιστον σε 2 περιοχές, ή και στις 3, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και την πληρότητα των δεδομένων για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο από κάθε σταθμό του δικτύου ENIGMA.

5.4.3.1 07/2015 Διόνυσος, Λακωνία και Τρίκαλα

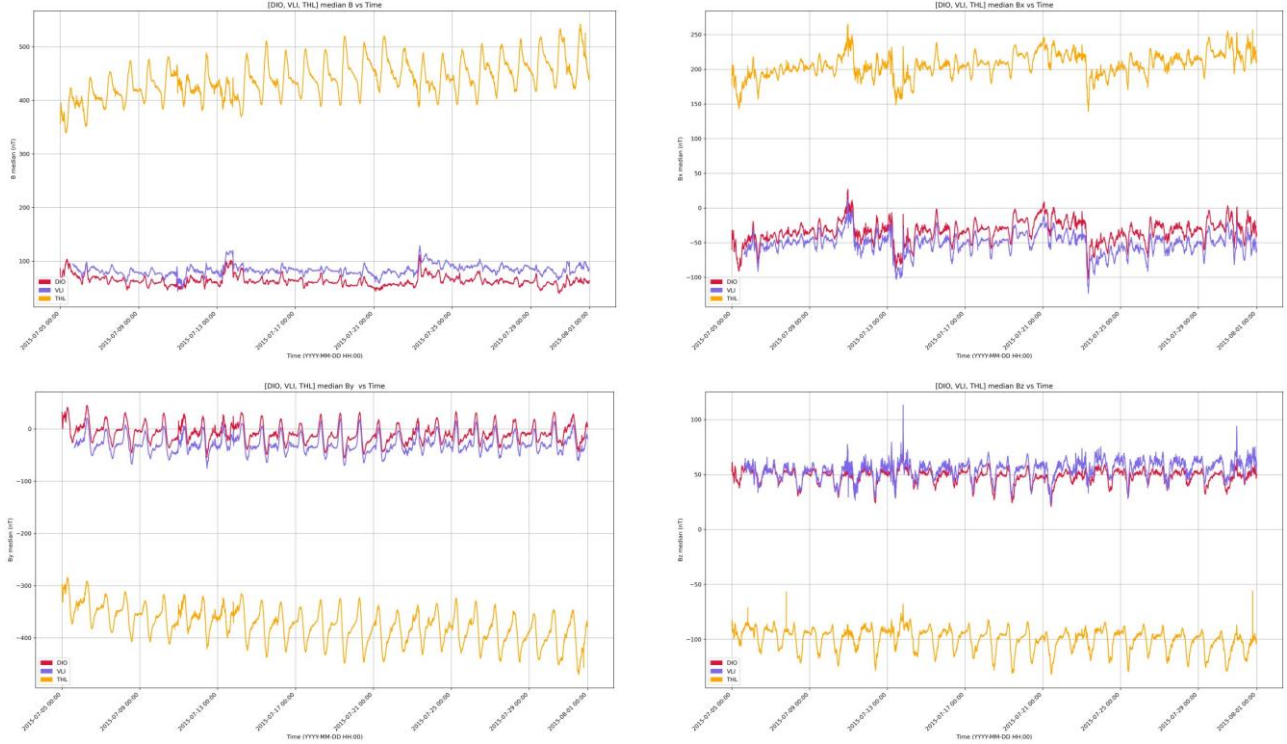
Το πρώτο διάστημα που παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα είναι η χρονική περίοδος 05/07/2015 – 31/07/2015, για τις 3 περιοχές. Δεν παρουσιάζεται το πρώτο πενθήμερο του Ιουλίου στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, γιατί αρχικά πρόκειται για το διάστημα που τα δεδομένα των Τρικάλων παρουσίασαν αυτή την μη αναμενόμενη συμπεριφορά που εξηγήθηκε στην ενότητα 5.4.2 και αφετέρου γιατί κατά την επεξεργασία των δεδομένων της Λακωνίας για αυτό το διάστημα υπήρχαν κάποια ημερήσια αρχεία που γύρναγαν errors κατά την επεξεργασία.

Επίσης, το διάστημα από 5 Ιουλίου έως και 31 Ιουλίου περιέχει τα περισσότερα, αν όχι όλα, τα spikes. Ο βασικός λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος μήνας για περαιτέρω μελέτη και παρουσίαση είναι πως τα spikes του ήταν πολλά και σε σχετικά κοντινά διαστήματα και αγγίζουν μέγιστες τιμές που δε θα μπορούσαν εύκολα να θεωρηθούν αμελητέες.

Επιπλέον, λόγω της διαφοράς που εξηγήθηκε και στην ενότητα 5.4.1 των τιμών των Τρικάλων και της απόστασης των γραφικών τους από τις γραφικές του Διονύσου και της Λακωνίας, παρουσιάζεται στο (b) της εικόνας 5.4.16 και η σύγκριση μόνο του Διονύσου και της Λακωνίας, ώστε να δοθεί η δυνατότητα να φανούν από πιο κοντά και με περισσότερη λεπτομέρεια τα spikes. Στο (b) φαίνεται κάπως πιο ξεκάθαρα αυτή η επαναληψιμότητα ανά κοντινά χρονικά διαστήματα των spikes, η οποία δεν μπορεί να θεωρηθεί περιοδική, όμως τα διαστήματα αυτά είναι αρκετά κοντινά.

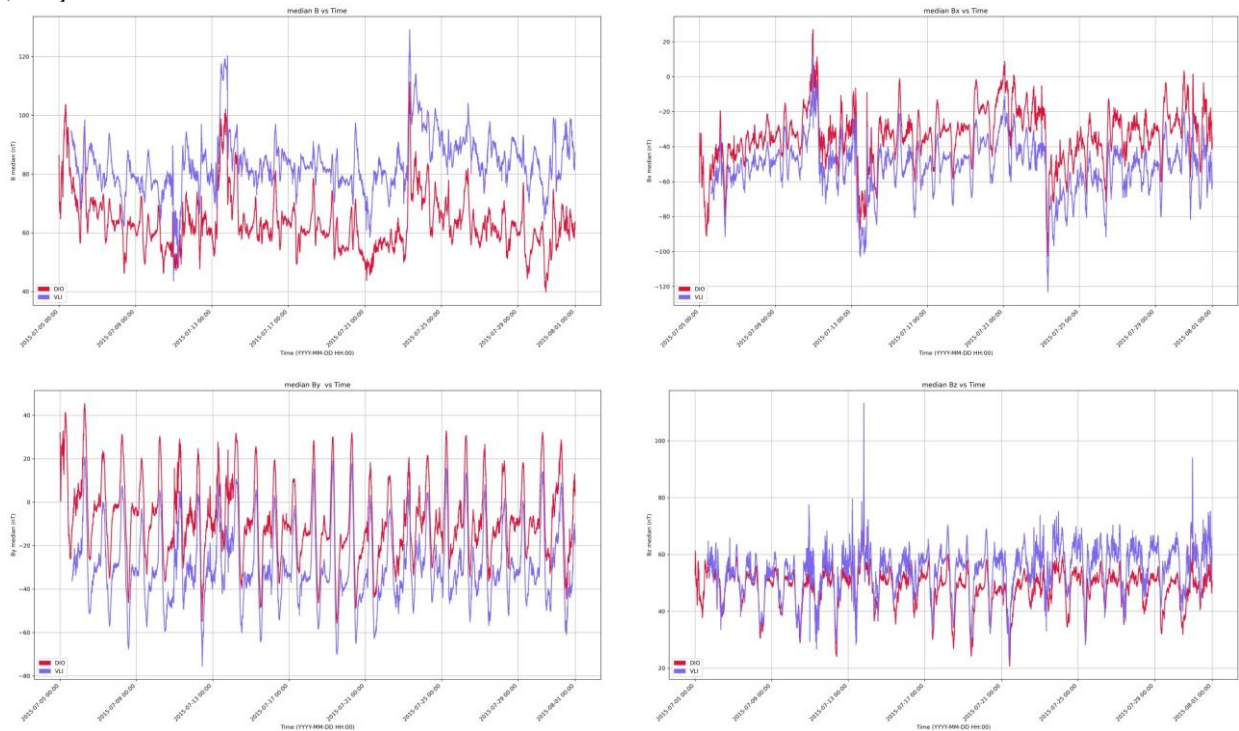
Τόσο στο (a) όσο και στο (b) της εικόνας 5.4.16 τα spikes παρατηρούνται πολύ ξεκάθαρα στους άξονες x και z , σε σχέση με τον y , και φαίνονται επίσης έντονα και στο συνολικό μαγνητικό πεδίο B .

[DIO, VLI, THL] 05/07/2015– 31/07/2015



(a)

[DIO, VLI] 05/07/2015– 31/07/2015



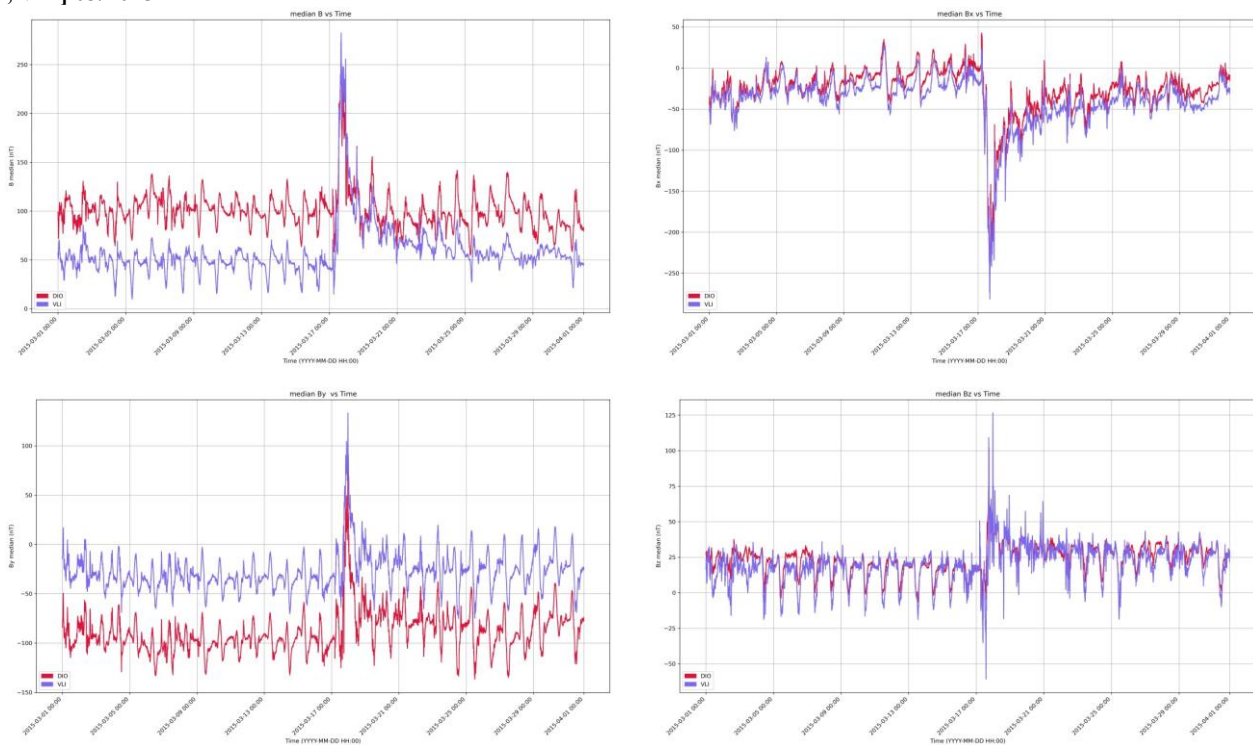
(b)

Σχήμα 5.4.16: (a) [DIO, VLI, THL] B median vs Time – 05/07/2015 - 31/07/2015

(b) [DIO, VLI] B median vs Time – 05/07/2015 - 31/07/2015

5.4.3.1 03/2015 Διόνυσος και Λακωνία

[DIO, VLI] 03/2015



Σχήμα 5.4.17: [DIO, VLI] B median vs Time – 03/2015

Στην εικόνα 5.4.17 παρουσιάζεται ένα από τα μεγαλύτερα, αν όχι το μεγαλύτερο, spikes που παρατηρήθηκαν για το σύνολο δεδομένων του 2015 και για τις 3 περιοχές. Τα δεδομένα του Μαρτίου έλειπαν για τα Τρίκαλα, επομένως παρουσιάζονται μόνο ο Διόνυσος και η Λακωνία για τις οποίες περιοχές υπήρχαν μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια του Μαρτίου.

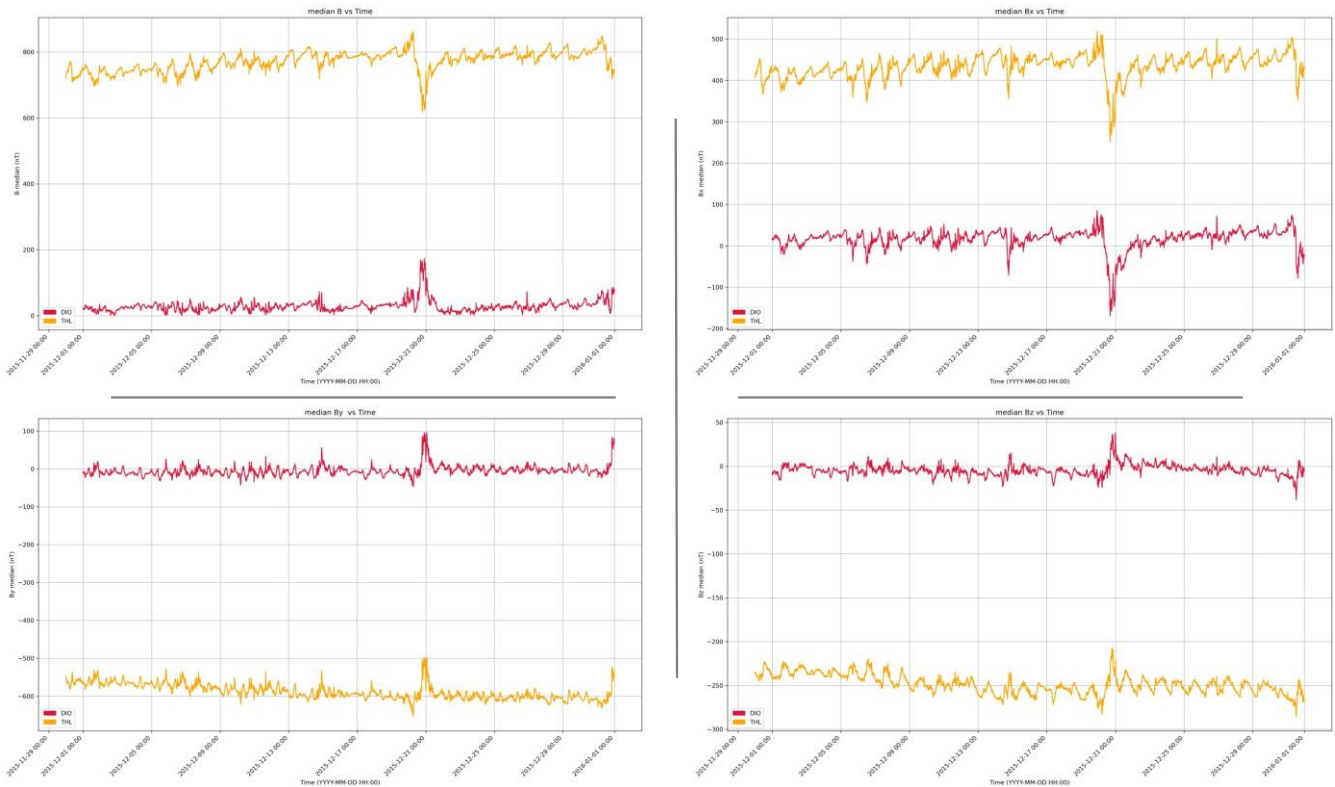
Παρατηρούμε ένα spike τουλάχιστον πολλών ωρών, σχεδόν ολόκληρης ημέρας, που φαίνεται πως πρόκειται σίγουρα για κάποιο φυσικό φαινόμενο λόγω και της μορφής του, αλλά και του γεγονότος ότι έχει εντοπιστεί και από τις 2 περιοχές της Ελλάδας.

Πράγματι, το συγκεκριμένο φαινόμενο που είναι αποτυπωμένο στις παραπάνω γραφικές και καταγεγραμμένο από τα δεδομένα του ENIGMA, φαίνεται να πρόκειται για τη **μαγνητική καταιγίδα του St Patrick's Day**, που συνέβη στις **17 Μαρτίου του 2015**, με διάρκεια 18 ωρών και για την οποία υπάρχει αρκετή σχετική βιβλιογραφία. Αποκαλείται και ως “The first super geomagnetic storm (Dst < -200nT) of solar cycle 24”. Ως πηγή της μαγνητικής αυτής καταιγίδας εντοπίζεται ένα ηλιακό φαινόμενο που έλαβε χώρα στις 15 Μαρτίου του 2015 [20].

Κάθε ηλιακός κύκλος (solar cycle) έχει διάρκεια περίπου 11 ετών. Ο ηλιακός κύκλος 24 (solar cycle 24) στον οποίο ανήκει η μαγνητική καταιγίδα του St Patrick's Day, είχε διάρκεια από το 2008 μέχρι και το 2019.

Το Dst πρόκειται για το geomagnetic activity index και, ανάλογα με τη βιβλιογραφία, όταν η ελάχιστη τιμή του είναι κάτω από -200 nT ($Dst < -200$ nT) η γεωμαγνητική καταιγίδα μπορεί να θεωρηθεί πως ανήκει στην κατηγορία των πολύ ισχυρών γεωμαγνητικών καταιγίδων [20].

5.4.3.3. 12/2015 Διόνυσος και Τρίκαλα



Σχήμα 5.4.18: [DIO, THL] B median vs Time – 12/2015

Στην εικόνα 5.4.18 φαίνεται μία διαταραχή που έχει καταγραφεί στο Διόνυσο και στα Τρίκαλα από τους αισθητήρες του δικτύου ENIGMA, περίπου μεταξύ 19 και 21 Δεκεμβρίου. Η διαταραχή αυτή έχει καταγραφεί και από τους 3 άξονες, και αρκετά πιο έντονα στον άξονα x και φαίνεται να πρόκειται για φυσικό φαινόμενο.

Πράγματι, μεταξύ 19 και 21 Δεκεμβρίου 2015 είχε υπάρξει μια ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα η οποία προκλήθηκε από δύο διαδοχικές CMEs (Coronal Mass Ejections) που έφτασαν στη Γη στις 19/12/2015 [21].

5.4.3.4 06/2015 Διόνυσος, Λακωνία, Τρίκαλα

Στην εικόνα 5.4.19 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του B και των συνιστωσών του x , y , z για το διάστημα από 13/06/2015 – 29/06/2015. Δεν έχει συμπεριληφθεί ολόκληρος ο μήνας για 3 λόγους:

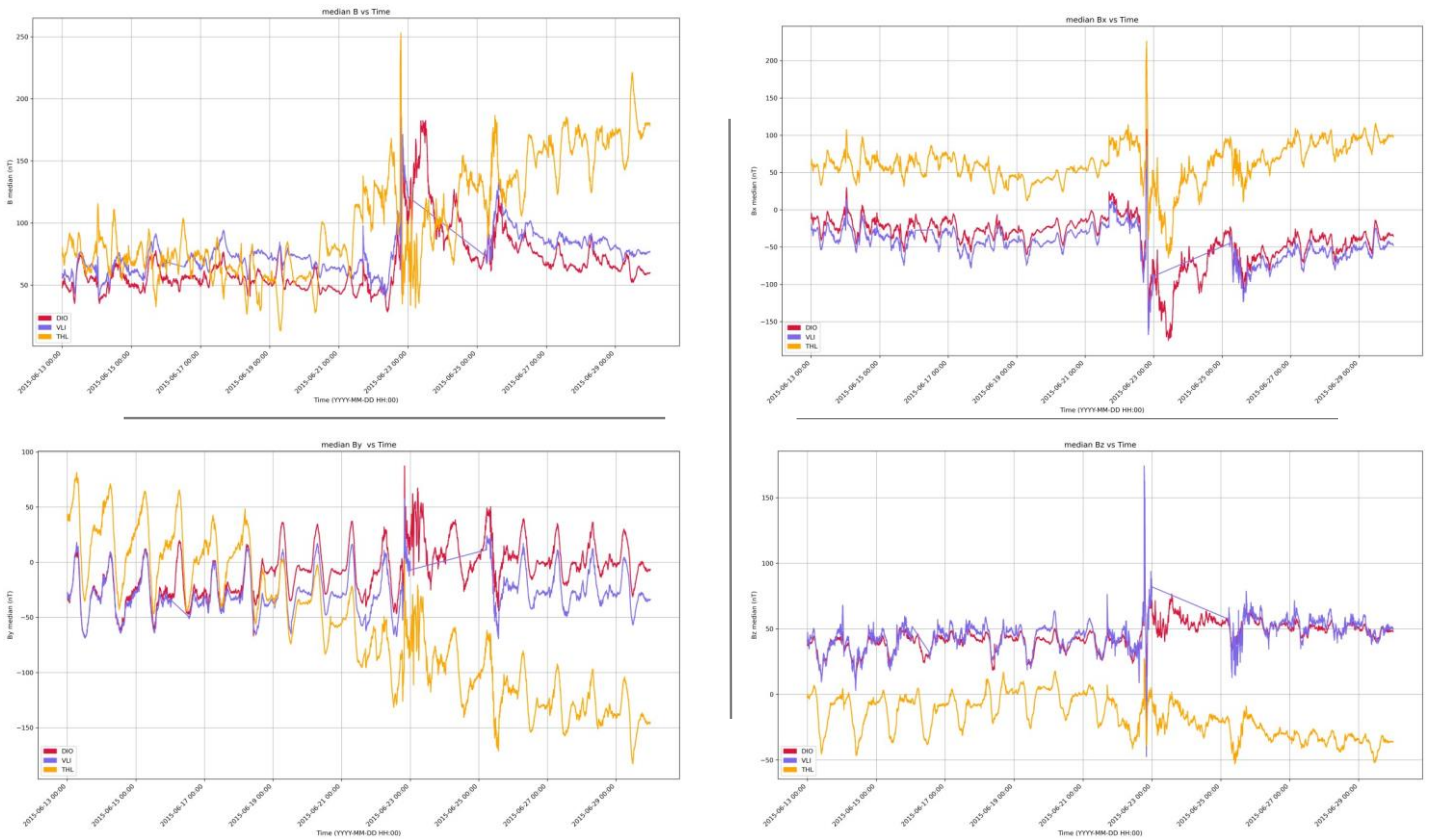
- Αρχικά, στις 3 Ιουνίου παρουσιάζεται για τα Τρίκαλα μία πολύ μεγάλη πτώση της τιμής του πεδίου, που οδηγεί το να απεικονίζονται σαν μία σχεδόν ευθεία γραμμή οι μετρήσεις του υπόλοιπου μήνα λόγω σημαντικής διαφοράς τάξης μεγέθους, συγκεκριμένα από τα 140000 nT περίπου στα 100 nT.
- Στις 30 Ιουνίου, επίσης για την περιοχή των Τρικάλων, παρουσιάζεται μία πολύ απότομη αύξηση τάξης μεγέθους 10^3 , η οποία αν συμπεριληφθεί στο υπό μελέτη διάστημα, θα έχει και αυτή σαν αποτέλεσμα οι υπόλοιπες τιμές να εμφανίζονται σαν μια ευθεία γραμμή.
- Η μεγάλης διάρκειας ανωμαλία που εντοπίστηκε ήταν στο τελευταίο δεκαήμερο του μήνα, οπότε η περαιτέρω επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις 3 περιοχές έγινε περίπου στο δεύτερο μισό του μήνα διάστημα, ώστε να φανεί και πιο ολοκληρωμένα η εξέλιξη του πεδίου τον υπόλοιπο μήνα, απουσία φαινομένου.

Να σημειωθεί ότι στο διάστημα μεταξύ 23/06 και 25/06, τα δεδομένα της Λακωνίας παρόλο που υπάρχουν στο σύνολο δεδομένων, δεν έχουν καταφέρει να περάσουν από την επεξεργασία του κώδικα, έχοντας κατά πάσα πιθανότητα εγείρει κάποια εξαίρεση ή σφάλμα, που οδηγεί στο να παραληφθούν αυτά τα αρχεία ημερήσιων μετρήσεων.

Παρατηρούμε στην εικόνα 5.4.19 που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, ένα αποτέλεσμα με αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον:

- Οι γραφικές των Τρικάλων δεν απέχουν από τις γραφικές του Διονύσου και της Λακωνίας, όπως σε όλους τους άλλους μήνες που μελετήθηκαν μέχρι τώρα, αλλά κινούνται στις ίδιες τιμές.
- Παρατηρείται μια ανωμαλία που φαίνεται να ξεκινάει μεταξύ της 21^{ης} και της 23^{ης} Ιουνίου, και έχει μεγάλη διάρκεια, περίπου μέχρι την 25^η Ιουνίου.
- Η ανωμαλία φαίνεται πιο ξεκάθαρα και έντονα στους άξονες x και y .
- Ειδικά η σύνθεση των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό γεωμαγνητικό πεδίο B , που φαίνεται στο πάνω αριστερά μέρος της εικόνας, έχει αρκετά περίπλοκη και σύνθετη εικόνα, σε σχέση με άλλα φαινόμενα που εντοπίστηκαν σε προηγούμενες υποενότητες, τα οποία είχαν παρόμοια εικόνα και στις 3 περιοχές.

Πράγματι, όπως αποδεικνύεται και επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία, μεταξύ 21 και 25 Ιουνίου έλαβε χώρα μία έντονη και περίπλοκη γεωμαγνητική καταιγίδα που προκλήθηκε από 3 διαδοχικές CMEs (coronal mass ejections) [22].

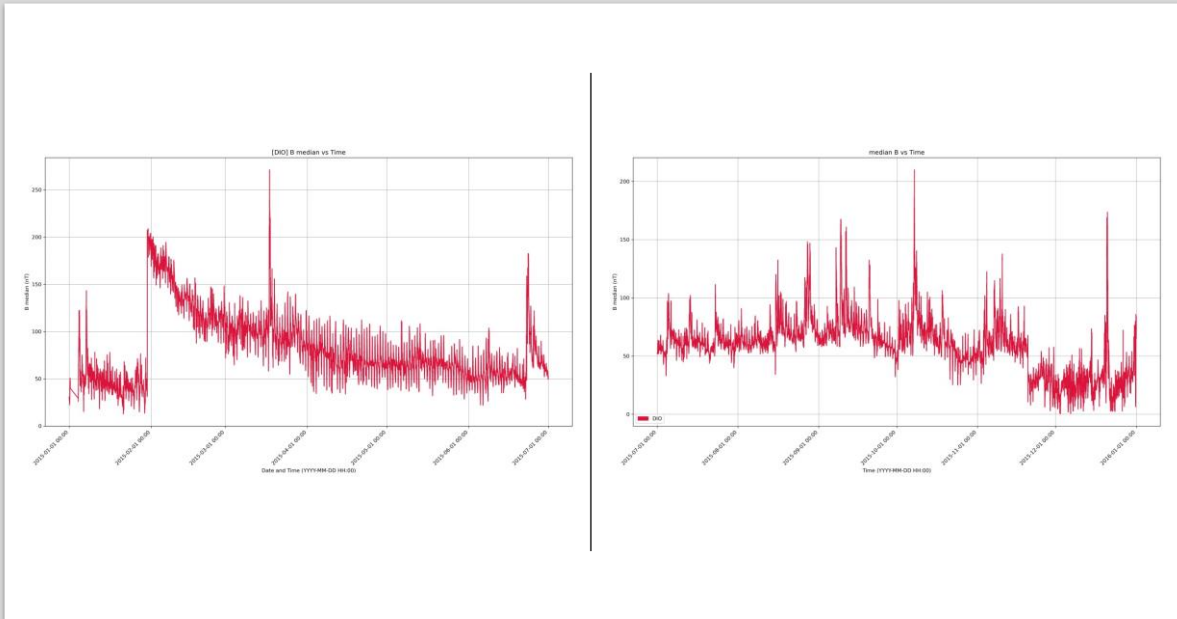


Σχήμα 5.4.19: [DIO, VLI, THL] B median vs Time – 06/2015

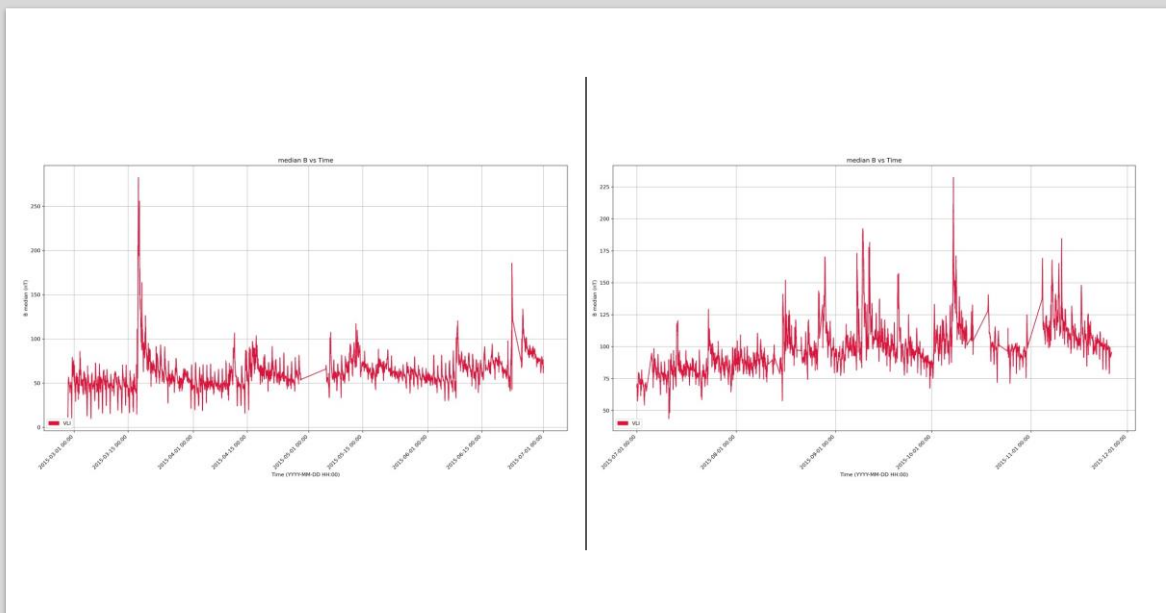
5.4.4 Ετήσια καταγραφή διαθέσιμων δεδομένων του γεωμαγνητικού πεδίου για τις 3 περιοχές

Τέλος, σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για όλους τους μήνες που είχαμε για την κάθε περιοχή. Για κάθε μία από τις 3 περιοχές, το σύνολο των διαθέσιμων μηνών έχει διασπαστεί στα 2, γιατί η συνολική ποσότητα δεδομένων ήταν πολύ μεγάλη και η μνήμη δεν επαρκούσε για τη συνένωση όλων των μηνών με διαθέσιμες πληροφορίες για κάθε περιοχή. Παρουσιάζονται, επομένως, δίπλα δίπλα, οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την εξέλιξη στο χρόνο του συνολικού γεωμαγνητικού πεδίου B, για Διόνυσο, Λακωνία και Τρίκαλα.

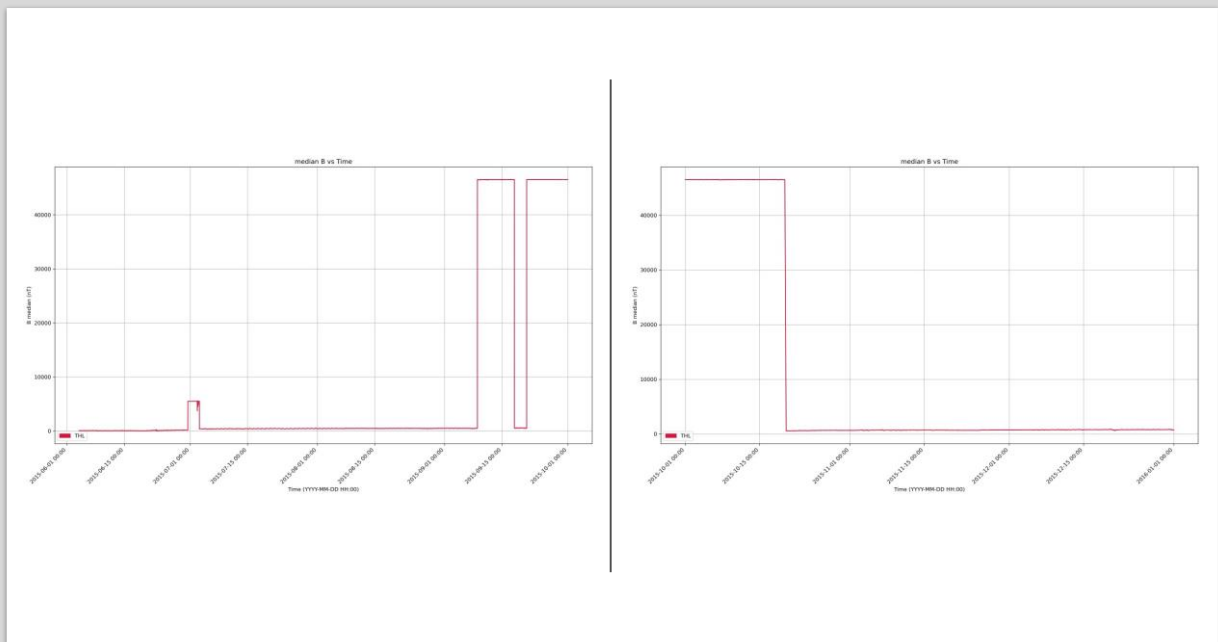
Να σημειωθεί πως, επειδή η επεξεργασία των δεδομένων έχει γίνει ξεχωριστά για κάθε μισό μέρος των δεδομένων που αντιστοιχεί σε μία περιοχή, οι τιμές στον κατακόρυφο άξονα y μεταξύ της αριστερά και της δεξιά γραφικής σε κάθε περίπτωση, διαφέρουν λίγο. Επίσης, με εξαίρεση τον Διόνυσο του οποίου τα δεδομένα είναι σχεδόν πλήρη, υπάρχουν διαστήματα που λείπουν για τη Λακωνία και το Διόνυσο. Τέλος, με εξαίρεση πάλι το Διόνυσο για τον οποίο υπήρχαν δεδομένα και για τους 12 μήνες του 2015, για τη Λακωνία παρουσιάζονται οι μήνες Φεβρουάριος με Νοέμβριος, ενώ για τα Τρίκαλα οι μήνες Ιούνιος με Δεκέμβριος.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 5.4.20: (a.) [DIO] B median vs Time – 01/2015 to 12/2015

(b) [VLI] B median vs Time – 02/2015 to 11/2015

(c) [THL] – 06/2015 to 12/2015

6. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Σκοπός της εργασίας ήταν να δημιουργηθεί ένα εργαλείο επεξεργασίας μετρήσεων γεωμαγνητικού πεδίου από αισθητήρες και όχι η διερεύνηση του ίδιου του πεδίου. Ο κώδικας που γράφτηκε μπορεί, με την κατάλληλη προσαρμογή των παραμέτρων του, να επεξεργαστεί είτε μεμονωμένες ημερήσιες μετρήσεις, είτε μετρήσεις πολλών μηνών. Η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει τόσο για μια μεμονωμένη περιοχή, όσο και για πολλές περιοχές ταυτόχρονα.

Η τωρινή μορφή του κώδικα έχει διαμορφωθεί γύρω από τη δομή των αρχείων μετρήσεων του ENIGMA, μπορεί όμως με ορισμένες προσαρμογές να χρησιμοποιηθεί και για δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου διαφορετικής προέλευσης.

Σε κάθε περίπτωση, οι μετρήσεις πρέπει να συσχετίζονται και με άλλα δεδομένα για την περιοχή και την εποχή, όπως για παράδειγμα μετεωρολογικά ή άλλα συμβάντα. Το εργαλείο που αναπτύχθηκε, βοηθάει και σε αυτήν την κατεύθυνση, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό συμβάντων που πρέπει να διερευνηθούν.

Στην ενότητα 5.4 των αποτελεσμάτων, φάνηκε πως το εργαλείο που αναπτύχθηκε έχει επιτρέψει να εντοπιστούν επιτυχώς γεωμαγνητικές καταιγίδες, μεταξύ άλλων, οι οποίες έχουν διασταυρωθεί με την αντίστοιχη βιβλιογραφία που αναφέρεται σε κάθε περίπτωση.

Παρατηρήθηκε πως το πεδίο παρουσιάζει μια περιοδικότητα στις γραφικές παραστάσεις, η οποία συνδέεται με την περιστροφή της Γης και την αλληλεπίδραση του μαγνητικού της πεδίου με τον ηλιακό άνεμο κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Παρατηρήθηκε, επίσης, πως οι τιμές των γραφικών παραστάσεων του γεωμαγνητικού πεδίου των Τρικάλων είναι κατά κανόνα μακριά από τις τιμές του Διονύσου και της Λακωνίας.

Σχετικά με τις τεχνικές που εφαρμόστηκαν στα δεδομένα, το median filtering εντοπίζει και απομακρύνει επιτυχημένα τα μεμονωμένα spikes και outliers στη συντριπτική πλειοψηφία των υπό μελέτη δεδομένων. Σε περιπτώσεις που οι αισθητήρες δεν είναι σωστά διακριβωμένοι ή οι μετρήσεις δεν έχουν την αναμενόμενη μορφή και τα spikes είναι πολλαπλά, το Kalman filtering φαίνεται να είναι καταλληλότερη τεχνική για την επεξεργασία των δεδομένων από το median filtering. Η χρήση του Kalman στην παρούσα υλοποίηση, αυξάνει σημαντικά το συνολικό χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων, στις περιπτώσεις στις οποίες εφαρμόστηκε, όμως, δίνει ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το ίδιο ισχύει και για τη χρήση του Empirical Mode Decomposition. Η τεχνική EMD δίνει επιτυχώς τη μακροπρόθεσμη τάση του γεωμαγνητικού πεδίου, ξεχωρίζοντας τις ταλαντώσεις και τις ανωμαλίες από το αρχικό σήμα.

Μια ενδιαφέρουσα επέκταση του εργαλείου θα ήταν το να υποστηριχθεί η συνένωση σε επίπεδο μήνα τόσο των αρχικών δεδομένων, όσο και των δεδομένων που έχουν περάσει επεξεργασία είτε από median, Kalman ή EMD, είτε από οποιαδήποτε άλλη τεχνική που θα είχε νόημα να εφαρμοστεί σε αυτά, αλλά παράλληλα, χωρίς να

χρειάζεται να επιλεγεί μία από αυτές τις τεχνικές για μελέτη σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους.

Στο πλαίσιο του πώς είναι στημένη η εργασία και διαμορφωμένος ο κώδικας, θα είχε επίσης αρκετή αξία η δημιουργία μίας διεπαφής χρήστη (UI), η οποία να δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες, να μπορούν να προσαρμόζουν ορισμένες παραμέτρους όπως θέλουν εκείνοι, χωρίς να απαιτούνται γνώσεις ή χρήση προγραμματισμού για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι αυτοί θα μπορούσαν ενδεικτικά να αφορούν το χρονικό διάστημα το οποίο αφορά η επεξεργασία, τις περιοχές και τις τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων, για παράδειγμα median ή Kalman filtering. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τις γραφικές για τα αντίστοιχα δεδομένα, την καταγραφή των αποτελεσμάτων, την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων, καθώς επίσης και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία θα είχε νόημα να εξαχθεί από την επεξεργασία.

Η καταγραφή σε βάσεις δεδομένων του συνόλου των μετρήσεων που έχουν περάσει από επεξεργασία, θα επιτάχυνε σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία της εξαγωγής αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να μη χρειάζονται επιπλέον υπολογιστικές διαδικασίες κάθε φορά που ο χρήστης θα ήθελε να θέσει καινούριες παραμέτρους και να πάρει τα αποτελέσματα που θα τον ενδιέφεραν. Φάνηκε ήδη σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην ενότητα 5.4.4, πως σε τοπικό επίπεδο η μνήμη δεν επαρκούσε για τη συνένωση πολύ μεγάλων χρονικών περιόδων. Αυτό φυσικά εξαρτάται και από τη χωρητικότητα του εκάστοτε υπολογιστή, όμως σε κάθε περίπτωση ένας server θα έδινε τη δυνατότητα πολύ καλύτερης διαχείρισης και αποθήκευσης των δεδομένων.

Πέρα από την αυτοματοποίηση των διαδικασιών, μεγάλο ενδιαφέρον έχει και η ίδια η φύση των αποτελεσμάτων και των γραφικών παραστάσεων, καθώς φαίνεται να παρέχουν πολλές πληροφορίες και πολύτιμα αποτελέσματα, τα οποία θα μπορούσαν να συνδυαστούν και με άλλα πεδία φυσικών επιστημών.

Ένα πεδίο στο οποίο θα είχε νόημα να διερευνηθεί περαιτέρω η χρησιμότητα του εργαλείου, είναι η μελέτη της σεισμικής δραστηριότητας. Ο εντοπισμός συσχέτισης συγκεκριμένων διακυμάνσεων ή ανωμαλιών στα αποτελέσματα των μετρήσεων των γεωμαγνητικών δεδομένων με την τεκτονική δραστηριότητα μιας περιοχής, θα μπορούσε να επιτρέψει ακόμα και την αποστολή έγκαιρων ειδοποιήσεων για επερχόμενους σεισμούς στην συγκεκριμένη περιοχή και σε ένα εύρος γύρω από αυτήν. Στον έγκαιρο αυτό εντοπισμό μιας τέτοιας συσχέτισης, θα μπορούσε να χρησιμεύσει και η τεχνητή νοημοσύνη, σε συνδυασμό ενδεχομένως και με δεδομένα άλλων πεδίων που θα μπορούσαν να έχουν συσχέτιση με τη σεισμική δραστηριότητα.

Σε κάθε περίπτωση, είτε πρόκειται για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δεδομένων με άλλα πεδία φυσικών επιστημών, είτε με την εξαγωγή αναφορών για τα δεδομένα του γεωμαγνητικού πεδίου αυτά καθ' αυτά, το εργαλείο που αναπτύχθηκε έχει πολλές ενδιαφέρουσες επεκτάσεις και ακόμα και στην τωρινή του μορφή, δίνει αποτελέσματα με πολύτιμες πληροφορίες.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Mandea and E. Thébault, The Changing Faces of the Earth's Magnetic Field – A glance at the magnetic lithospheric field from local and regional scales to a planetary view, Commission for the Geological Map of the World, 2007
- [2] "Δίκτυο Επίγειων Μαγνητομέτρων ENIGMA," ΙΑΑΔΕΤ. [Online]. Available: <https://www.astro.noa.gr/ypodomies/geomagnetic-array-enigma/>. [Accessed: Jun. 24, 2024].
- [3] «EMY – Διαστημικός Καιρός,» Newportal. [Online]. Available: <https://newportal.emy.gr/space-weather>. [Accessed: Jun. 24, 2024].
- [4] «EMY – Διαστημικός Καιρός,» Newportal.emy.gr, 2024. <https://newportal.emy.gr/space-weather>
- [5] Σπυρίδων Αγγελόπουλος, Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων και διατάξεων χαρακτηρισμού των, με χρήση μαγνητικών φαινομένων, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής, Ε.Μ.Π., 2019.
- [6] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 12, no. 4, pp. 241–253, Apr. 1979
- [7] B. Gutenberg, *Physics of the Earth's Interior*. Elsevier, 2016.
- [8] J.-P. Montagner, "Earth's Structure, Global," in *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 2nd ed., Springer International Publishing, 2021.
- [9] C. Lithgow-Bertelloni, "Mohorovičić Discontinuity (Moho)," *Encyclopedia of Marine Geosciences*, pp. 1–7, 2014
- [10] D. Anderson, *The Ionosphere*, vol. 55, Space Environment Center, U.S., Ed. Space Environment Center, 1999.
- [11] "Ionosphere, Thermosphere & Mesosphere - NASA Science," [Online]. Available: https://science.nasa.gov/heliophysics/focus-areas/ionosphere_thermosphere_mesosphere/. [Accessed: Jul. 8, 2024].
- [12] "A1: The Magnetosphere, Ionosphere, and Atmosphere," in *The National Geomagnetic Initiative*, Washington, DC: National Academies Press, 1993.
- [13] S. Angelopoulos, Panagiotis Priftis, A. Anastasopoulos, Aphrodite Ktena, and Evangelos Hristoforou, "Design and Development of a High-Sensitivity, Portable, and Low-Cost Fluxgate Magnetometer," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 59, no. 2, pp. 1–8, Feb. 2023.
- S. Angelopoulos, P. Priftis, A. Anastasopoulos, A. Ktena, and E. Hristoforou, "Design and Development of a High-Sensitivity, Portable, and Low-Cost Fluxgate Magnetometer," *IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 59, no. 2, pp. 1–8, Feb. 2023.

- [14] K. Kianfar, A. Jafarpour Mahalleh, and A. Moridi, "Select the Appropriate Model for the Earth's Magnetic Field," in *2011 UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, Cambridge, U.K., 2011.
- [15] NOAA National Centers for Environmental Information, "International Geomagnetic Reference Field (IGRF)," [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>. [Accessed: Jul. 8, 2024].
- [16] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model," [Online]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>. [Accessed: Jul. 8, 2024].
- [17] World Data Center for Magnetic Variations, "World Data Center for Magnetic Variations," [Online]. Available: <https://wdmam.org/>. [Accessed: Jul. 8, 2024].
- [18] H. Choi, S.-S. Kim, and S.-H. Park, "Comparative analysis of shipboard three-component magnetometer (STCM) and proton precession magnetometer (PPM) datasets in the Australian-Antarctic Ridge," **Data in Brief**, vol. 49, p. 109351, 2023.
- [19] Intermagnet, "IntermagNet Metadata," [Online]. Available: <https://intermagNet.org/metadata/#/map>. [Accessed: Jul. 8, 2024].
- [20] C.-C. Wu *et al.*, "The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: The St. Patrick's Day event (17 March 2015)," **Earth, Planets and Space**, vol. 68, pp. 1-12, 2016.
- [21] S. V. Thampi and V. Mukundan, "The global response of terrestrial ionosphere to the December 2015 space weather event," **Advances in Space Research**, vol. 71, no. 1, pp. 286-297, 2023.
- [22] E. P. Macho *et al.*, "Ionospheric response to the June 2015 geomagnetic storm in the South American region," **Advances in Space Research**, vol. 65, no. 9, pp. 2172-2183, 2020.
- [23] C. Poynton, **Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces**, Burlington, MA: Elsevier, 2012.
- [24] D. Simon, "Kalman filtering," **Embedded Systems Programming**, vol. 14, no. 6, pp. 72-79, 2001.
- [25] "pykalman — pykalman 0.9.2 documentation," pykalman.github.io. [Online]. Available: <https://pykalman.github.io/#unscented-kalman-filter-user-s-guide>. [Accessed: Jul. 8, 2024].
- [26] "PyEMD Documentation," [Online]. Available: <https://pyemd.readthedocs.io/en/latest/intro.html>.

Παράρτημα

1. Κώδικας για την επεξεργασία σήματος

Αρχείο signal_filtering.py

```
import pandas as pd
import numpy as np
from pykalman import KalmanFilter

def median_filtering(signals):
    """
    Performs median filtering with spike detection and replacement to a given list
    of signals,
    without modifying the original signal.

    Parameters
    -----
    signals : list of list of float
        The signal to which median filtering with spike detection and replacement
    will be applied.
    Returns
    -----
    list of float
        The signal to which median filtering with spike detection and replacement
    has been applied.
    """

    # Define a threshold for the spike detection and a window size for the
    filtering process
    spike_threshold = 3
    window_size = 3

    median_filtered_signal = []
    for s in signals:
        # Do not modify the original signal
        filtered_signal = s.copy()

        # Iterate through the data points of the signal, skipping edges based on
        the window size
        for i in range(window_size, len(filtered_signal) - window_size):
            # Create a local window of data points around the current point
            local_window = filtered_signal[i - window_size:i + window_size + 1]
            median_local = pd.Series(local_window).median()
            # If the value of the data point is identified as a spike,
            # replace it with the median of the current local window
            if abs(filtered_signal[i] - median_local) > spike_threshold:
                filtered_signal[i] = median_local
        median_filtered_signal.append(filtered_signal)
    return median_filtered_signal

def kalman_filtering(signals):
    """
    Performs kalman filtering to a given list of signals, without modifying the
    original signals.

    Parameters
    -----
    signals : list of list of float
        The signal to which kalman filtering will be applied.
    Returns
    -----
    list of float
        The signal to which kalman filtering has been applied.
    """
    filtered_signals = []

    for s in signals:
        signal = s.copy()
        signal = np.array(signal)
        signal_series = pd.Series(signal, dtype=np.float32)
```

```

initial_state_mean = signal[0]
observation_covariance = signal_series.astype(float).var()
transition_covariance = 0.005

kf = KalmanFilter(
    initial_state_mean = initial_state_mean,
    observation_covariance = observation_covariance,
    transition_covariance = transition_covariance,
    transition_matrices = [1]
)

smoothed_signal, state_covariances = kf.smooth(signal)

smoothed_df = pd.DataFrame(smoothed_signal, columns=['state_means'])
smoothed_signal = smoothed_df['state_means'].tolist()
filtered_signals.append(smoothed_signal)

return filtered_signals

```

Αρχείο emd_dec.py

```

import numpy as np
import pandas as pd
from PyEMD import EMD

def EMD_filtering(data):
    """
    Performs EMD to each item of the data list, which represents a signal.

    Parameters
    -----
    data : list of list of float
        An array of the values across the axis

    Returns
    -----
    list of list of float
        A list of the residual signals for each original signal passed through the
    data parameter.
    The residual signals are appended to the return list, in the same order
    that the original signals
    lists were passed to the data parameter.
    """
    emd_data = []

    for d in data:
        filtered_data = d.copy()
        residual_df = perform_EMD(filtered_data)
        residual_signal = residual_df['Residual'].tolist()
        emd_data.append(residual_signal)

    return emd_data

def perform_EMD(signal):
    """
    Performs Empirical Mode Decomposition (EMD) to the given signal,
    using emd.emd() from the PyEMD package.

    Parameters
    -----
    signal : list of float
        The signal to which EMD will be applied.

    Returns
    -----
    pandas.DataFrame
        The residual signal that is extracted after EMD is performed to the
    original signal.
    """
    np_signal = np.array(signal)

```

```

emd = EMD()
imfs = emd.emd(np_signal)

residual_signal = imfs[-1]
residual_df = pd.DataFrame(residual_signal, columns=['Residual'])

return residual_df

```

2. Κώδικας για την επεξεργασία ημερήσιων και μηνιαίων μετρήσεων μίας περιοχής

Αρχείο `daily_processing.py`

```

import os
import time
import csv
import tkinter as tk
import pandas as pd
from tkinter import filedialog

import enigma_plots
import signal_filtering
import emd_dec

def main():
    """
    Main function that selects the directory and reads measurements
    from the folder that is returned from select_directory().
    """

    start_time = time.time()

    full_month_path = select_directory()
    read_monthly_measurements(full_month_path, "VLI")

    end_time = time.time()
    print(end_time - start_time)

def select_directory():
    """ Opens a file system dialog for the user to select a directory
    interactively and returns its path. """

    root = tk.Tk()
    root.withdraw()
    folder_path = filedialog.askdirectory()
    return folder_path

def read_monthly_measurements(folder_path, area_name):
    """
    Reads the measurement from all .dat files from the selected month folder path
    and processes them.

    Parameters
    -----
    folder_path : string
        The path of the month folder which contains all the .dat daily measurement
    files to be processed.
    area_name : string
        The name of the area to which the data of the month folder belong to. In
    the context of this project,
        the area_name is represented as the area_id {'DIO', 'VLI', 'THL'} in order
    to match the naming and the
        structure of the ENIGMA data folders.

    Returns
    -----
    (string, pandas.DataFrame)
    """

```

```

"""
monthly_data_csv_path = None

# initialize the monthly dataframe
month_median_df = pd.DataFrame(columns = ['time', 'Bx', 'By', 'Bz', 'B', 'Ts',
'Te'])

# Process the daily csv files one by one.
for filename in sorted(os.listdir(folder_path)):
    if filename.endswith('.dat'):
        daily_measurements_csv_path = os.path.join(folder_path, filename)
        # the path returned here is the month_xx_data csv file path
        m_d_csv_path, month, daily_median_df =
read_daily_measurements(daily_measurements_csv_path, area_name)
        # If an error or exception has been thrown for the daily measurements
file, it gets skipped.
        if (m_d_csv_path, daily_median_df) == (-1, -1):
            continue
        monthly_data_csv_path = m_d_csv_path
        if month_median_df.empty:
            month_median_df = daily_median_df
        else:
            month_median_df = pd.concat([month_median_df, daily_median_df],
ignore_index = True)

        month_median_df.to_csv(monthly_data_csv_path, index=False)
        enigma_plots.plot_monthly_df_data(monthly_data_csv_path, month_median_df,
month, "median", 'violet')

    if monthly_data_csv_path == None:
        return -1, -1

return monthly_data_csv_path, month_median_df

def read_daily_measurements(day_file_path, area_name):
"""
Reads measurement data from a given file and processes it.

Parameters
-----
day_file_path : string
    The path of the dat file containing the daily measurements.
area_name : string
    The name of the area of the daily measurements.

Returns
-----
(string, pandas.DataFrame)
"""
try:
    df = extract_csv_data(day_file_path)

    df['x_axis'] = df['x_axis'].astype(str).str.strip().replace('',
float('nan')).astype(float)
    df['y_axis'] = df['y_axis'].astype(str).str.strip().replace('',
float('nan')).astype(float)
    df['z_axis'] = df['z_axis'].astype(str).str.strip().replace('',
float('nan')).astype(float)
    df['sensor_temperatures'] =
df['sensor_temperatures'].astype(str).str.strip().replace('',
float('nan')).astype(float)
    df['environment_temperatures'] =
df['environment_temperatures'].astype(str).str.strip().replace('',
float('nan')).astype(float)

    dates = df['date'].tolist()
    x_axis = df['x_axis'].tolist()
    y_axis = df['y_axis'].tolist()
    z_axis = df['z_axis'].tolist()
    sensor_temperatures = df['sensor_temperatures'].tolist()
    environment_temperatures = df['environment_temperatures'].tolist()

    datetime_strings = df['date'].str.strip() + ' ' + df['time'].str.strip()
    datetime_objects = pd.to_datetime(datetime_strings, format='%Y/%m/%d
%H:%M:%S.%f')

```

```

        unix_timestamps = datetime_objects.apply(lambda dt:
time.mktime(dt.timetuple()))
        timestamps = unix_timestamps.tolist()

        # Determine the day and month from the first date of the daily
measurements file
        dmy = dates[0] if dates else "N/A"
        dmy = dmy.replace('/', '-')
        partsdmy = dmy.split('-')
        month = partsdmy[1]

        # Define the folder path for saving the results of the processing
        local_path = r'C:\yourPath\toSave\theResults'
        area_path = os.path.join(local_path, area_name)
        month_folder_path = os.path.join(area_path, month)
        day_folder_path = os.path.join(month_folder_path, dmy)

        # Create directories if they do not exist
        if not os.path.exists(day_folder_path):
            os.makedirs(day_folder_path)

        # Median filtering
        x_median, y_median, z_median, median_magnitude = handle_median_filtering(
            datetime_objects, x_axis, y_axis, z_axis, sensor_temperatures,
            environment_temperatures, dmy, month, month_folder_path, area_name)
        median_df = create_dataframe(
            datetime_objects, x_median, y_median, z_median,
            median_magnitude, sensor_temperatures, environment_temperatures)
        # Create a data frame with unix timestamps in order to write the data to a
CSV.
        timestamps_df = create_dataframe(
            timestamps, x_median, y_median, z_median,
            median_magnitude, sensor_temperatures, environment_temperatures)
        create_daily_data_csv(day_folder_path, f'daily_data_{dmy}.csv',
timestamps_df)

        # EMD on median
        handle_emd_with_median_filtering(
            datetime_objects, x_median, y_median, z_median, median_magnitude,
sensor_temperatures,
            environment_temperatures, dmy, month, month_folder_path, area_name)

        # Kalman filtering
        x_kalman, y_kalman, z_kalman, kalman_magnitude = handle_kalman_filtering(
            datetime_objects, x_axis, y_axis, z_axis, sensor_temperatures,
            environment_temperatures, dmy, month, month_folder_path, area_name)
        kalman_df = create_dataframe(
            datetime_objects, x_kalman, y_kalman, z_kalman,
            kalman_magnitude, sensor_temperatures, environment_temperatures)

        # Compare original data to median-filtered data
        compare_original_signal_to_median_filtering(
            datetime_objects, x_axis, y_axis, z_axis, x_median, y_median,
z_median, sensor_temperatures,
            environment_temperatures, median_magnitude, dmy, month,
month_folder_path, area_name)

        enigma_plots.plot_multiple_data_with_same_x_axis(
            datetime_objects, [median_magnitude, x_median, y_median, z_median],
            ["B", "Bx", "By", "Bz"], ["B", "Bx", "By", "Bz"], dmy, "B, Bx, By, Bz
[median] vs Time",
            month_folder_path, ['magenta', 'darkmagenta', 'violet',
'mediumorchid'])
        enigma_plots.plot_multiple_data_with_same_x_axis(
            datetime_objects, [median_magnitude, sensor_temperatures,
environment_temperatures],
            ["B", "Ts", "Te"], "B, Ts, Te", dmy, "B median, Ts, Te vs Time",
            month_folder_path, ['red', 'darkred', 'firebrick'])

        month_data_csv_path = get_csv_path(month_folder_path, f'month_{month}')

        return month_data_csv_path, month, median_df

    except FileNotFoundError:
        print(f"Error: The file '{day_file_path}' was not found.")
        return (-1, -1, -1)
    except Exception as e:

```

```

        print(f"An error occurred: {e}")
        return (-1, -1, -1)

def handle_median_filtering(
    datetime_objects, x_axis, y_axis, z_axis,
    t_s, t_e, dmy, month, month_folder_path, area_name):
    """ Apply median filtering with spike detection and replacement to the
    magnetic field values. """
    x_median, y_median, z_median = signal_filtering.median_filtering([x_axis,
    y_axis, z_axis])
    median_magnitude = [round(((x**2 + y**2 + z**2) ** 0.5), 2) for x, y, z in
    zip(x_median, y_median, z_median)]

    daily_color = 'blueviolet'
    suffix = 'median'
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, x_median, f'Bx {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] Bx
    {suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Bx', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, y_median, f'By {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] By
    {suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'By', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, z_median, f'Bz {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] Bz
    {suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Bz', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, median_magnitude, f'B {suffix} (nT)', f'{dmy}
    [{area_name}] B {suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'B', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, t_s, 'Sensor Temperature Ts ($^\circ$C)', f'{dmy}
    [{area_name}] Ts vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Ts', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, t_e, 'Environment Temperature Te ($^\circ$C)', f'{dmy}
    [{area_name}] Te vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Te', daily_color)

    return x_median, y_median, z_median, median_magnitude

def handle_kalman_filtering(
    datetime_objects, x_axis, y_axis, z_axis,
    t_s, t_e, dmy, month, month_folder_path, area_name):
    """ Apply kalman filtering to the axis of the original data. """
    x_kalman, y_kalman, z_kalman = signal_filtering.kalman_filteringg([x_axis,
    y_axis, z_axis])
    kalman_magnitude = [round(((x**2 + y**2 + z**2) ** 0.5), 2) for x, y, z in
    zip(x_kalman, y_kalman, z_kalman)]

    kalman_color = 'darkorange'
    k_suffix = 'kalman'
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, x_kalman, f'Bx kalman (nT)', f'{dmy} [{area_name}] Bx
    {k_suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Bx', kalman_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, y_kalman, f'By kalman (nT)', f'{dmy} [{area_name}] By
    {k_suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'By', kalman_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, z_kalman, f'Bz kalman (nT)', f'{dmy} [{area_name}] Bz
    {k_suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Bz', kalman_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, kalman_magnitude, f'B kalman (nT)', f'{dmy} [{area_name}]
    B {k_suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'B', kalman_color)

    return x_kalman, y_kalman, z_kalman, kalman_magnitude

def handle_emd_with_median_filtering(
    datetime_objects, x_median, y_median, z_median,
    b_median, t_s, t_e, dmy, month, month_folder_path, area_name):
    x_median_emd, y_median_emd, z_median_emd = emd_dec.EMD_filtering([x_median,
    y_median, z_median], datetime_objects)

```

```

median_emd_magnitude = [round(((x**2 + y**2 + z**2) ** 0.5), 2) for x, y, z in
zip(x_median_emd, y_median_emd, z_median_emd)]

# Plot the tendency of the residual component with the median signal VS time
enigma_plots.plot_multiple_data(
    [datetime_objects, datetime_objects], [x_median, x_median_emd], ['Bx
median', 'Bx median residual'], "Bx",
    dmy, f"[{area_name}] Bx median and its residual vs Time",
month_folder_path, ['blueviolet', 'magenta'])
enigma_plots.plot_multiple_data(
    [datetime_objects, datetime_objects], [y_median, y_median_emd], ['By
median', 'By median residual'], "By",
    dmy, f"[{area_name}] By median and its residual vs Time",
month_folder_path, ['blueviolet', 'magenta'])
enigma_plots.plot_multiple_data(
    [datetime_objects, datetime_objects], [z_median, z_median_emd], ['Bz
median', 'Bz median residual'], "Bz",
    dmy, f"[{area_name}] Bz median and its residual vs Time",
month_folder_path, ['blueviolet', 'magenta'])
enigma_plots.plot_multiple_data(
    [datetime_objects, datetime_objects], [b_median, median_emd_magnitude],
['B median', 'B median residual'], "B",
    dmy, f"[{area_name}] B median and B residual vs Time", month_folder_path,
['blueviolet', 'magenta'])

def compare_original_signal_to_median_filtering(
    datetime_objects, x_axis, y_axis, z_axis, x_median, y_median, z_median,
    t_s, t_e, median_magnitude, dmy, month, month_folder_path, area_name):
    magnitude = [round(((x**2 + y**2 + z**2) ** 0.5), 2) for x, y, z in
zip(x_axis, y_axis, z_axis)]

    suffix = "original"
    daily_color = 'darkmagenta'
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, x_axis, f'Bx {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] Bx
{suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Bx', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, y_axis, f'By {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] By
{suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'By', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, z_axis, f'Bz {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] Bz
{suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'Bz', daily_color)
    enigma_plots.create_and_save_daily_plot(
        datetime_objects, magnitude, f'B {suffix} (nT)', f'{dmy} [{area_name}] B
{suffix} vs Time',
        dmy, month, month_folder_path, 'B', daily_color)

    return magnitude

def extract_csv_data(path):
    """ Extracts the data from the csv of the given path and returns a data frame
with that data."""

    df = pd.read_csv(
        path,
        comment=';',
        header="infer",
        names=['date', 'time', 'x_axis', 'y_axis', 'z_axis',
'sensor_temperatures', 'environment_temperatures'],
        on_bad_lines='skip',
        skip_blank_lines=True
    )
    # Keep only rows whose time value ends with '000', for alignment between the
different areas datasets.
    df = df[df['time'].str.endswith('000')]
    df = df.dropna()
    return df

def create_dataframe(times, x_values, y_values, z_values, magnitudes, ts, te):
    data = {'time': times, 'Bx': x_values, 'By': y_values, 'Bz': z_values, 'B':
magnitudes,
'Ts': ts, 'Te': te}
    df = pd.DataFrame(data)
    return df

```

```

def create_daily_data_csv(folder_path, filename, processed_df):
    """
    Writes the daily magnetic field values to a CSV file for a specific day
    This is the .csv inside the day-folder.

    Parameters
    -----
    folder_path : string
        Path to the folder for saving the CSV file.
    filename : string
        The name of the CSV file.
    processed_df : pandas.DataFrame
        The dataframe whose contents will be written to the CSV file.
    """
    # Sanitize the filename
    filenamecsv = filename.replace(':', '-').replace('/', '-').replace(' ', '_')
    full_path = os.path.join(folder_path, filenamecsv)

    processed_df.to_csv(full_path, index=False)

def calculate_statistics(values):
    return {
        'mean': pd.Series(values).mean(),
        'median': pd.Series(values).median(),
        'std_dev': pd.Series(values).std(),
        'min': pd.Series(values).min(),
        'max': pd.Series(values).max()
    }

def get_csv_path(directory_path, filename):
    """
    Creates a csv file or retrieves the correct csv and returns the path

    Parameters
    -----
    directory_path : string
        The directory folder path of the csv that will be created
    filename : string
        The name of the csv to be created
    """
    csv_path = os.path.join(directory_path, filename + '_' + 'data' + '.csv')
    return csv_path

def create_month_data_csv(path):
    columns = ['time', 'Bx', 'By', 'Bz', 'B', 'Ts', 'Te']

    with open(path, mode='w', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        writer.writerow(columns)

if __name__ == "__main__":
    main()

```

3. Κώδικας για την επεξεργασία μετρήσεων πολλών μηνών και περιοχών

Αρχείο `yearly_processing.py`

```

import os
import pandas as pd
import time

from daily_processing import read_monthly_measurements

```



```

import enigma_plots

def main():
    """ Main function that selects the directory and reads measurements from
    folder. """
    start_time = time.time()
    read_all()
    end_time = time.time()
    print(f'elapsed time: {end_time - start_time}')

def read_all():
    """
    Reads all the monthly measurements for each area of the paths defined inside
    its scope
    and plots them in the same graph.
    """
    dionysos_folder_path = r'C:\yourFirst\FolderPath'
    lakonia_folder_path = r'C:\yourSecond\FolderPath'
    trikala_folder_path = r'C:\yourThird\FolderPath'

    all_paths = [dionysos_folder_path, lakonia_folder_path, trikala_folder_path]

    comparisons_path = None
    datetimes = []
    areas_Bx = []
    areas_By = []
    areas_Bz = []
    areas_B = []
    areas_Te = []
    areas_Ts = []
    areas_names = ["DIO", "VLI", "THL"]

    for i, path in enumerate(all_paths):
        year_dir_path, area_name, area_median_df =
read_measurements_of_multiple_months(path, areas_names[i])
        areas_Bx.append(area_median_df['Bx'])
        areas_By.append(area_median_df['By'])
        areas_Bz.append(area_median_df['Bz'])
        areas_B.append(area_median_df['B'])
        areas_Te.append(area_median_df['Te'])
        areas_Ts.append(area_median_df['Ts'])
        areas_names.append(area_name)
        datetime = pd.to_datetime(area_median_df['time'], unit='s')
        datetimes.append(datetime)
        comparisons_path = year_dir_path

    colors = ['crimson', 'mediumslateblue', 'orange']
    suffix = "median"
    enigma_plots.plot_multiple_data(datetimes, areas_Bx, areas_names, f"Bx
{suffix} (nT)", None, f'{suffix} Bx vs Time', comparisons_path, colors)
    enigma_plots.plot_multiple_data(datetimes, areas_By, areas_names, f"By
{suffix} (nT)", None, f'{suffix} By vs Time', comparisons_path, colors)
    enigma_plots.plot_multiple_data(datetimes, areas_Bz, areas_names, f"Bz
{suffix} (nT)", None, f'{suffix} Bz vs Time', comparisons_path, colors)
    enigma_plots.plot_multiple_data(datetimes, areas_B, areas_names, f"B {suffix}
(nT)", None, f'{suffix} B vs Time', comparisons_path, colors)
    enigma_plots.plot_multiple_data(datetimes, areas_Te, areas_names, "Environment
Temperature Te ($^\circ$C)", None, 'Te vs Time', comparisons_path, colors)
    enigma_plots.plot_multiple_data(datetimes, areas_Ts, areas_names, "Sensor
Temperaure Ts ($^\circ$C)", None, 'Ts vs Time', comparisons_path, colors)

def read_measurements_of_multiple_months(area_folder_path, area_name):
    """
    Reads all the monthly measurements of a specific area.

    Parameters
    -----
    area_folder_path : string
        The path to the folder containing the monthly measurements of a specific
    area.
        The directory to which it points, can contain anything from 1 month to 12
    months.
    area_name : string
        The name of the area to which the data of the path correspond.

    Returns
    -----

```

```

(string, string, pandas.DataFrame)
"""

# initialize the yearly dataframe
year_median_df = pd.DataFrame(columns = ['time', 'Bx', 'By', 'Bz', 'B', 'Ts',
'Te'])

for item in sorted(os.listdir(area_folder_path)):
    # Construct full path of the item
    item_full_path = os.path.join(area_folder_path, item)
    # m_d_csv_path is the .csv path of the last processed month
    m_d_csv_path, monthly_median_df =
read_monthly_measurements(item_full_path, area_name)
    if (m_d_csv_path, monthly_median_df) == (-1, -1):
        continue
    if year_median_df.empty:
        year_median_df = monthly_median_df
    else:
        year_median_df = pd.concat([year_median_df, monthly_median_df],
ignore_index = True)
    # Extract the area name from the area_folder_path
    source_path_components = area_folder_path.split(os.sep)
    area_name = source_path_components[-2]

    # extract the year directory of the area
    year_path = os.path.dirname(os.path.dirname(m_d_csv_path))
    year_directory_path = os.path.dirname(year_path)

    plot_yearly_df_data(year_path, year_median_df, area_name, 'median', 'crimson')

return year_directory_path, area_name, year_median_df

def plot_yearly_df_data(destination_path, df, area_name, suffix, plot_color):
    """
    Plots yearly magnetic field data from the given dataframe.

    Parameters
    -----
    destination_path : string
        The path where the plot will be saved.
    df : pandas.DataFrame
        The dataframe of the month which will be plotted.
    area_name : string
        The name of the area to which the data correspond.
    suffix : string
        This will be added in the title and the name of the plot and represents
        the method which was used for the processing, for example median or
kalman.
    plot_color : string
        The color of the plot.
    """

    datetime_objects = df['time']
    x = df['Bx']
    y = df['By']
    z = df['Bz']
    B = df['B']
    ts = df['Ts']
    te = df['Te']

    color = plot_color
    enigma_plots.create_and_save_yearly_plot(datetime_objects, x, f'Bx {suffix}
(nT)', f'[{area_name}] Bx {suffix} vs Time', area_name, destination_path, color)
    enigma_plots.create_and_save_yearly_plot(datetime_objects, y, f'By {suffix}
(nT)', f'[{area_name}] By {suffix} vs Time', area_name, destination_path, color)
    enigma_plots.create_and_save_yearly_plot(datetime_objects, z, f'Bz {suffix}
(nT)', f'[{area_name}] Bz {suffix} vs Time', area_name, destination_path, color)
    enigma_plots.create_and_save_yearly_plot(datetime_objects, B, f'B {suffix}
(nT)', f'[{area_name}] B {suffix} vs Time', area_name, destination_path, color)
    enigma_plots.create_and_save_yearly_plot(datetime_objects, ts, 'Sensor
temperature Ts ($^\circ$C)', f'[{area_name}] Ts vs Time', area_name,
destination_path, color)
    enigma_plots.create_and_save_yearly_plot(datetime_objects, te, 'Environment
temperature Te ($^\circ$C)', f'[{area_name}] Te vs Time', area_name,
destination_path, color)

if __name__ == "__main__":

```

```
main()
```

4. Κώδικας για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Αρχείο `enigma_plots.py`

```
import os
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import matplotlib.patches as mpatches
import pandas as pd

def create_and_save_daily_plot(times, values, ylabel, plotname, dmy, month,
month_folder_path, i, plot_color):
    """ Plots the daily data and saves the plot inside the directory of
    month_folder_path. """

    plt.figure(figsize=(15, 9))
    plt.plot(times, values, color = plot_color)
    x_formatter = mdates.DateFormatter('%Y-%m-%d %H:%M')
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(x_formatter)

    plt.xticks(rotation=45)
    plt.xlabel('Time (YYYY-MM-DD HH:00)')
    plt.ylabel(ylabel)
    plt.title(plotname)
    plt.grid(True)
    plt.gcf().autofmt_xdate(rotation=45)
    plt.tight_layout()

    statistics_text = create_statistics_text(values)

    plt.text(
        0.008, 0.17, statistics_text, transform=plt.gca().transAxes, fontsize=15,
        verticalalignment='top',
        bbox=dict(boxstyle='round', facecolor='blueviolet', alpha=0.1))

    # Create the filename for the plot image
    day_folder_path = os.path.join(month_folder_path, dmy)
    filenameplot = plotname.replace(':', '-').replace('/', '-').replace(' ', '_')
+ '.png'

    # Create directories for each axis and for the tempratures
    i_folder_path = os.path.join(month_folder_path, f'{month}_{i}')
    if not os.path.exists(i_folder_path):
        os.makedirs(i_folder_path)
    i_file_path = os.path.join(i_folder_path, filenameplot)
    plt.savefig(i_file_path, dpi=300, bbox_inches='tight')

    full_path = os.path.join(day_folder_path, filenameplot)
    # Save the plot with a high resolution to the daily folder
    plt.savefig(full_path, dpi=300, bbox_inches='tight')

    plt.close()

def plot_monthly_df_data(destination_path, df, month, suffix, plot_color):
    """
    Plots the monthly magnetic field data from the given dataframe and stores
    the results inside the destination_path.
    """
    datetime_objects = df['time']
    x = df['Bx']
    y = df['By']
    z = df['Bz']
    B = df['B']
    ts = df['Ts']
    te = df['Te']

    create_and_save_monthly_plot(
        datetime_objects, x, f'Bx {suffix} (nT)', f'Bx {suffix} vs Time',
```

```

    month, destination_path, plot_color)
create_and_save_monthly_plot(
    datetime_objects, y, f'By {suffix} (nT)', f'By {suffix} vs Time',
    month, destination_path, plot_color)
create_and_save_monthly_plot(
    datetime_objects, z, f'Bz {suffix} (nT)', f'Bz {suffix} vs Time',
    month, destination_path, plot_color)
create_and_save_monthly_plot(
    datetime_objects, B, f'B {suffix} (nT)', f'B {suffix} vs Time',
    month, destination_path, plot_color)
create_and_save_monthly_plot(
    datetime_objects, ts, 'Sensor temperature Ts ($^\circ C)', 'Ts vs Time',
    month, destination_path, plot_color)
create_and_save_monthly_plot(
    datetime_objects, te, 'Environment temperature Te ($^\circ C)', 'Te vs
Time',
    month, destination_path, plot_color)

def create_and_save_monthly_plot(times, values, ylabel, plotname, month,
destination_path, color):
    """
    Plots the monthly data for a specific area and saves the plots
    inside the specified destination_path.
    """
    plt.figure(figsize=(15, 9))
    plt.plot(times, values, color)
    x_formatter = mdates.DateFormatter('%Y-%m-%d %H:%M')
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(x_formatter)

    plt.xticks(rotation=45) # Rotate date labels for better readability
    plt.xlabel('Date and Time (YYYY-MM-DD HH:00)')
    plt.ylabel(ylabel)
    plt.title(f'{month} {plotname}')
    plt.grid(True)
    plt.gcf().autofmt_xdate(rotation=45) # Adjust date labels
    plt.tight_layout()

    stats_text = create_statistics_text(values)

    plt.text(
        0.008, 0.17, stats_text,
        transform=plt.gca().transAxes, fontsize=15, verticalalignment='top',
        bbox=dict(boxstyle='round', facecolor='blueviolet', alpha=0.1) #peachpuff
    )

    directory = os.path.dirname(destination_path)
    plot_filename = f'{month}_' + plotname.replace(' ', '_') + '.png'
    plot_full_path = os.path.join(directory, plot_filename)

    plt.savefig(plot_full_path, dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.close() # Close the plot to free up memory

def create_and_save_yearly_plot(times, data, ylabel, plotname, area_name,
destination_path, color):
    """
    Plots the data of multiple months for a specific area and saves the plots to a
    directory
    inside the specified destination_path.
    """
    plt.figure(figsize=(15, 9))
    plt.plot(times, data, color)
    x_formatter = mdates.DateFormatter('%Y-%m-%d %H:%M')
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(x_formatter)

    plt.xticks(rotation=45) # Rotate date labels for better readability
    plt.xlabel('Date and Time (YYYY-MM-DD HH:00)')
    plt.ylabel(ylabel)
    plt.title(plotname)
    plt.grid(True)
    plt.gcf().autofmt_xdate(rotation=45) # Adjust date labels
    plt.tight_layout()

    # directory = os.path.dirname(destination_path)
    plot_filename = plotname.replace(' ', '_') + '.png'
    plot_full_path = os.path.join(destination_path, plot_filename)

    plt.savefig(plot_full_path, dpi=300, bbox_inches='tight')

```

```

plt.close() # Close the plot to free up memory

def plot_multiple_data_with_same_x_axis(time, data, legend_labels, ylabel, dmy,
plot_title, destination_path, colors):
    """ Plots multiple data in the same graph when the data have the same
length. """
    patches = []
    plt.figure(figsize=(15, 9))

    for i, d in enumerate(data):
        plt.plot(time, d, label=legend_labels[i], color = colors[i])
        patches.append(mpatches.Patch(color=colors[i], label=legend_labels[i]))

    x_formatter = mdates.DateFormatter('%Y-%m-%d %H:%M')
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(x_formatter)

    plt.ylabel(ylabel)
    plt.xticks(rotation=45)
    plt.xlabel('Time (YYYY-MM-DD HH:00)')
    plt.title(plot_title)
    plt.legend(handles = patches, loc='lower left')
    plt.grid(True)
    plt.gcf().autofmt_xdate(rotation=45)
    plt.tight_layout()

    plot_filename = plot_title.replace(':', '-').replace('/', '-').replace(' ',
'_') + '.png'

    # dmy == None indicates that the multiple data are being plotted
# on a yearly level and not for a specific month
    if dmy!=None:
        day_folder_path = os.path.join(destination_path, dmy)
    else:
        day_folder_path = destination_path
    plot_full_path = os.path.join(day_folder_path, plot_filename)
    plt.savefig(plot_full_path, dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.close()

def plot_multiple_data(times, data, legend_labels, ylabel, dmy, plot_title,
destination_path, colors):
    """
Plots multiple data together in the same plot.
The times and the data lists need to have the same length, so that in case the
items of data have different lengths, so that they can be plotted together.
This is the case especially when plotting data for the same period between
different areas.
    """
    patches = []
    plt.figure(figsize=(15, 9))

    for i, d in enumerate(data):
        plt.plot(times[i], d, label=legend_labels[i], color = colors[i])
        patches.append(mpatches.Patch(color=colors[i], label=legend_labels[i]))

    x_formatter = mdates.DateFormatter('%Y-%m-%d %H:%M')
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(x_formatter)

    plt.ylabel(ylabel)
    plt.xticks(rotation=45)
    plt.xlabel('Time (YYYY-MM-DD HH:00)')
    plt.title(plot_title)
    plt.legend(handles = patches, loc='lower left')
    plt.grid(True)
    plt.gcf().autofmt_xdate(rotation=45)
    plt.tight_layout()

    plot_filename = plot_title.replace(':', '-').replace('/', '-').replace(' ',
'_') + '.png'

    # dmy == None indicates that the multiple data are being plotted on a yearly
level and not for a specific month
    if dmy!=None:
        day_folder_path = os.path.join(destination_path, dmy)
    else:
        day_folder_path = destination_path
    plot_full_path = os.path.join(day_folder_path, plot_filename)
    plt.savefig(plot_full_path, dpi=300, bbox_inches='tight')

```

```
plt.close()

def create_statistics_text(values):
    """
    Creates the text with the statistics calculations
    that is placed inside the text box of the plots.
    """
    mean = pd.Series(values).mean()
    median = pd.Series(values).median()
    standard_deviation = pd.Series(values).std()
    min_value = pd.Series(values).min()
    max_value = pd.Series(values).max()

    return (
        f'Mean: {mean:.2f}\n'
        f'Median: {median:.2f}\n'
        f'Std Dev: {standard_deviation:.2f}\n'
        f'Min: {min_value:.2f}\n'
        f'Max: {max_value:.2f}'
    )
```