



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ, ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ,  
ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

### **Πτυχιακή Εργασία**

*Μελέτη της αναπαράστασης των  
ιονοσφαιρικών και μαγνητοσφαιρικών  
πηγών στα μοντέλα του μαγνητικού πεδίου  
της Γης, με χρήση μετρήσεων του επίγειου  
δικτύου μαγνητομέτρων ENIGMA*

**Μυρτώ Κωλέττη**  
Α.Μ.: 1110201100093

### **Επιβλέπων**

**Καθ. Ιωάννης Α. Δαγκλής**  
*Καθηγητής, Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας Και Μηχανικής,  
Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ*

### **Συνεπιβλέπων**

**Δρ. Γεώργιος Μπαλάσης**  
*Διευθυντής Ερευνών, Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής,  
Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης, Εθνικό  
Αστεροσκοπείο Αθηνών*

**Αθήνα, 2018**

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

*Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών την περίοδο 09/2017-9/2018.*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες μου για το πολύ ενδιαφέρον θέμα το οποίο μου εμπιστεύτηκαν, αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια τους καθ' όλη την διαδικασία της εργασίας.*

*Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω και την υποψήφια διδάκτορα Ζωή Μπούτση, που με καθοδήγησε και με συμβούλεψε καθοριστικά σε όλη την διαδικασία εκπόνησης της εργασίας.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της αναπαράστασης των ιονοσφαιρικών και μαγνητοσφαιρικών πηγών στα μοντέλα του μαγνητικού πεδίου της Γης, με χρήση μετρήσεων του επίγειου δικτύου μαγνητομέτρων ENIGMA. Χρησιμοποιούμε επίσης μετρήσεις από δύο μαγνητομετρικούς σταθμούς σε μεσαίο και υψηλό γεωγραφικό πλάτος εκτός Ελλάδας, για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας.

Να αναφερθεί ότι η παρούσα εργασία αποτελεί πρώτη προσπάθεια λεπτομερούς επεξεργασίας και εφαρμογής μοντέλων του μαγνητικού πεδίου στα δεδομένα του ENIGMA.

Το μαγνητικό πεδίο της Γης παράγεται στο ρευστό αγώγιμο πυρήνα της. Μαγνητίζοντα πετρώματα και επαγόμενα ρεύματα στο εσωτερικό της συμβάλλουν στην συνολική ένταση και μεταβολή αυτού, ενώ παράλληλα η αλληλεπίδραση της Γης με τον ηλιακό άνεμο οδηγεί στην δημιουργία επιλέον συνιστωσών στο πεδίο. Μάλιστα η περιστροφή της Γης αλλά και η κίνηση της σε σχέση με τον Ήλιο και την Σελήνη δημιουργούν περιοδικές διακυμάνσεις στην ένταση του πεδίου. Η περίπλοκη αυτή φύση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί από διάφορα μοντέλα, τα οποία εστιάζουν σε όλες ή επιμέρους συνιστώσες του.

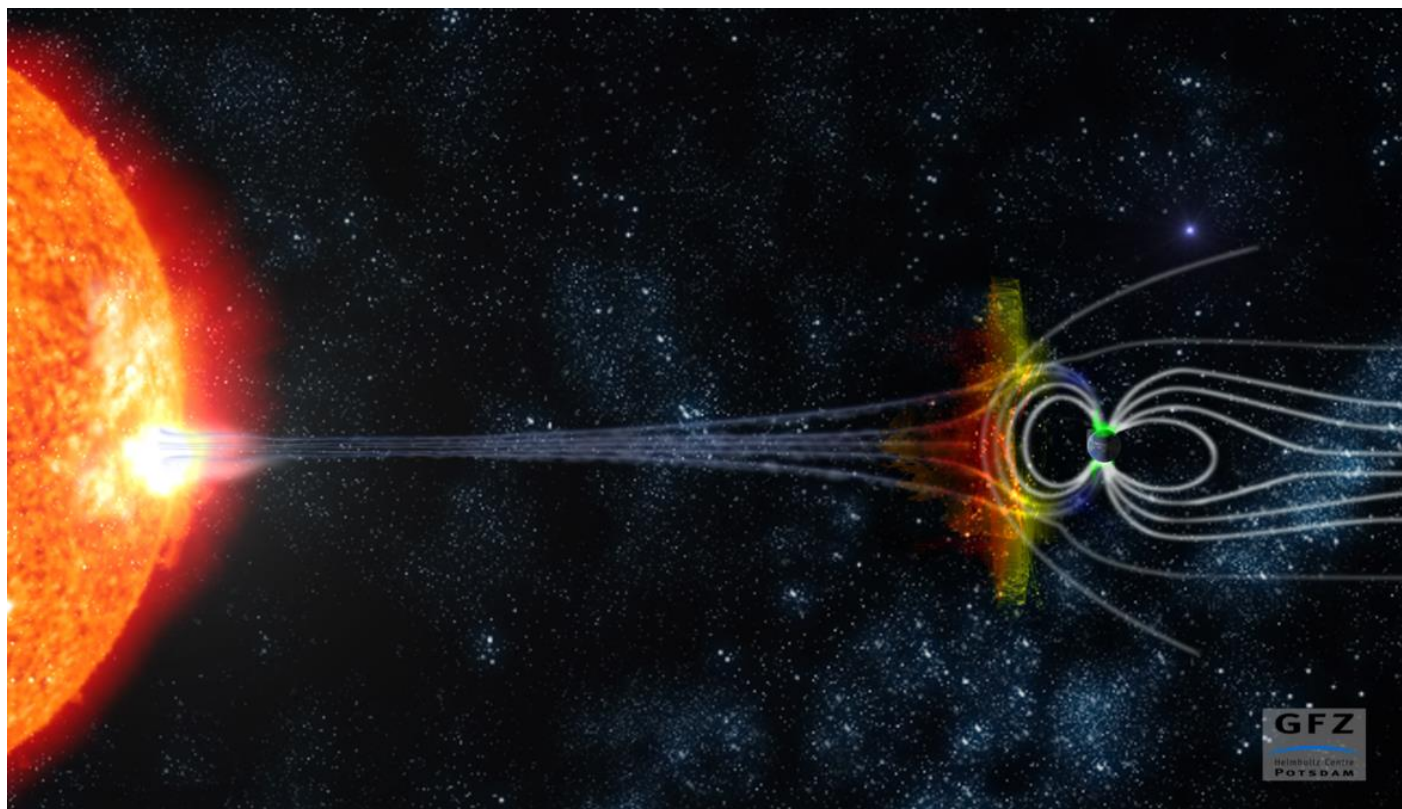
Στην παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρωνόμαστε σε τρεις βασικές συνεισφορές: αυτήν του πυρήνα, της ιονόσφαιρας και αυτήν εξωτερικών πηγών που βρίσκονται στην μαγνητόσφαιρα. Χρησιμοποιούμε δύο διαδεδομένα μοντέλα: το IGRF-12 και το CHAOS-6. Το πρώτο περιγράφει το πεδίο που παράγεται στον πυρήνα και τον φλοιό της Γης, ενώ το δεύτερο το πεδίο που παράγεται στον πυρήνα και το πεδίο τριών πηγών που προέρχονται από την μαγνητόσφαιρα: του δακτυλιοειδούς ρεύματος, της μαγνητόπαυσης και της μαγνητούρας. Επιπλέον, χρησιμοποιούμε μία απλή μέθοδο, με την οποία απομονώνουμε και αφαιρούμε από την χρονοσειρά των δεδομένων μας την ημερήσια μεταβολή που οφείλεται στο ρεύμα  $S_q$  της ιονόσφαιρας.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας αναφερόμαστε εν συντομία σε βασικά κομμάτια του θεωρητικού υποβάθρου που απαιτείται στην κατανόηση του αντικειμένου της. Αναλύουμε τις διεργασίες που δημιουργούν και συντηρούν το μαγνητικό πεδίο της Γης, καθώς και τις πηγές των χρονικών μεταβολών αυτού. Επίσης, δίνουμε λεπτομερή αναφορά στα μοντέλα περιγραφής του πεδίου, τα οποία χρησιμοποιούμε.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των σταθμών που χρησιμοποιούμε, καθώς και τη μέθοδο την οποία ακολουθήσαμε ώστε να επεξεργαστούμε σε αρχικό στάδιο τα δεδομένα. Επικεντρωνόμαστε στον τρόπο με τον οποίο διαχειριστήκαμε τα σφάλματα που προκύπτουν στα ανεπέξεργαστα δεδομένα του ENIGMA.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύουμε την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων μας με την χρήση των μοντέλων και στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εξηγούμε την μέθοδο εξαγωγής της ημερήσιας μεταβολής λόγω του  $S_q$ .

Στο τέλος κάθε κεφαλαίου εκ των 2<sup>ου</sup>, 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup>, δίνεται σύντομη αναφορά στα συμπεράσματα που προκύπτουν από την κάθε διαδικασία και σχολιάζονται τα αποτελέσματά μας. Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, τέλος, παραθέτουμε ολοκληρωμένα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	1
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	2
<b>ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ</b> .....	4
<b>1. ΘΕΩΡΙΑ</b> .....	5
<b>1.1. Το μαγνητικό πεδίο της Γης</b> .....	5
<b>1.1.1.</b> Η μαγνητόσφαιρα της Γης.....	5
<b>1.1.2.</b> Συνιστώσες του γεωμαγνητικού πεδίου.....	5
<b>1.1.3.</b> Μαθηματική Περιγραφή του γήινου μαγνητικού πεδίου.....	9
α) Προσέγγιση διπόλου.....	9
β) Αναλυτική περιγραφή του μαγνητικού πεδίου.....	10
<b>1.1.4.</b> Συστήματα Συντεταγμένων.....	12
α) Βασικά συστήματα συντεταγμένων.....	12
β) Σχέση γεωμαγνητικών και γεωγραφικών συντεταγμένων.....	13
<b>1.1.5.</b> Χρονικές Μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου.....	14
α) Χρονικές μεταβολές του κύριου πεδίου-Secular Variation.....	15
β) Μεταβολές μικρής χρονικής κλίμακας-Μαγνητικές Καταιγίδες και Υποκαταιγίδες.....	16
γ) Οι μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου και ο δείκτης F10.7.....	16
<b>1.1.6.</b> Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης.....	17
<b>1.2. Δείκτες γεωμαγνητικής δραστηριότητας</b> .....	18
<b>1.2.1.</b> $D_{st}$ .....	18
<b>1.2.2.</b> $K_p$ .....	18
<b>1.2.3.</b> RC.....	18
<b>1.3. Μοντέλα περιγραφής του μαγνητικού πεδίου και των μεταβολών του</b> .....	19
<b>1.3.1.</b> International Geomagnetic Reference Field.....	19
<b>1.3.2.</b> CHAOS.....	20
<b>1.3.3.</b> Κριτήρια επιλογής δεδομένων.....	22
<b>2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ</b> .....	23
<b>2.1. Το πρόγραμμα MATLAB</b> .....	23
<b>2.2. Μαγνητομετρικοί Σταθμοί</b> .....	23
<b>2.2.1.</b> ENIGMA.....	24
<b>2.2.2.</b> SuperMAG.....	24
<b>2.3. Επεξεργασία των δεδομένων</b> .....	25
<b>2.3.1.</b> Είδη σφαλμάτων.....	25
<b>2.3.2.</b> Τα δεδομένα του ENIGMA.....	25
<b>2.3.3.</b> Τα δεδομένα του SuperMAG.....	31
<b>2.3.4.</b> Αποτελέσματα.....	32
<b>3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ</b> .....	43
<b>3.1. Εφαρμογή των μοντέλων</b> .....	43
<b>3.1.1.</b> IGRF12.....	43
<b>3.1.2.</b> CHAOS-6.....	44
<b>3.1.3.</b> Αποτελέσματα.....	46
α) Secular Variation.....	46
β) Πεδίο εξωτερικών πηγών.....	56
γ) Ολικό Πεδίο.....	60
<b>3.2. Αφαίρεση του <math>S_q</math></b> .....	62
<b>3.3. Μέθοδος</b> .....	62
<b>3.3.1.</b> Αποτελέσματα.....	67
<b>3.4. Συσχέτιση με τον δείκτη F10.7</b> .....	88
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	90
<b>5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	91
<b>5.1. Τύποι Μαγνητομέτρων</b> .....	91
<b>5.2. Ώρα UTC</b> .....	91
<b>5.3. Συστήματα καταγραφής χρόνου</b> .....	91
<b>5.4. Διαστημικές Αποστολές</b> .....	92
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	94
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	95
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	96
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ</b> .....	96

## Ιστορικό Σημείωμα

Το μαγνητικό πεδίο της Γης χρησιμοποιείται ως μέσο πλοήγησης για τουλάχιστον 1000 χρόνια και θεωρείται ότι η πρώτη πυξίδα κατασκευάστηκε στην Κίνα περίπου την περίοδο 200-300 π.Χ. από μαγνητισμένο πέτρωμα.

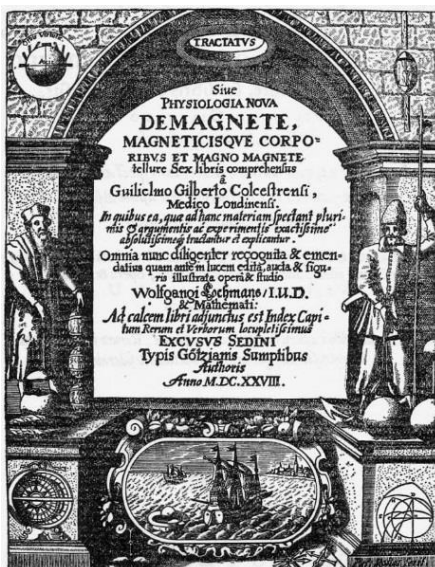
Γύρω στον 15<sup>ο</sup> αιώνα ήταν ξεκάθαρο ότι η βελόνα της πυξίδας δεν κατεθύνεται προς τον γεωγραφικό Βορρά, αλλά η διεύθυνση της σχηματίζει γωνία που ονομάστηκε απόκλιση (*declination*). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η απόκλιση διέφερε από τόπο σε τόπο. Ήταν το 1634 όταν ανακαλύφθηκε ότι η απόκλιση μεταβάλλεται και με το χρόνο από τον Henry Gellibrand (1597–1637). Αυτή ήταν και η πρώτη ένδειξη των χρονικών μεταβολών που υφίσταται το πεδίο. Το πρώτο μοντέλο του μαγνητικού πεδίου της Γης αναπτύχθηκε το 1600 από τον William M. Gilbert στο βιβλίο “*De Magnete*” (“*Ο Μαγνήτης*”), όπου παρουσιάζει την Γη ως έναν μεγάλο μαγνήτη, η πηγή του οποίου βρίσκεται στο εσωτερικό της.

Το 18<sup>ο</sup> αιώνα ήταν πλέον γνωστό ότι το γεωμαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά. Σημαντική συμβολή στην ανάπτυξη της γνώσης γύρω από τους μηχανισμούς παραγωγής του, είχε μεταξύ άλλων ο νορβηγός Hans Christian Ørsted (1777-1851) ο οποίος ανακάλυψε ότι ηλεκτρικά ρεύματα παράγουν μαγνητικά πεδία.

Συστηματικές παρατηρήσεις του γήινου μαγνητικού πεδίου ξεκίνησαν στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, περίοδο όπου ο Johann Carl Friedrich Gauss ανέπτυξε το πρώτο ρεαλιστικό μαθηματικό μοντέλο του πεδίου. Μελετήθηκαν οι διάφορες χρονικές μεταβολές του και πολλές από αυτές συνδέθηκαν με την δυναμική των ηλιακών κηλίδων. Καθοριστική ήταν συμβολή του νορβηγού Kristian Olaf Bernhard Birkeland (1867–1917), με την μελέτη του για το σέλας.

Η «περιπέτεια» της εξερεύνησης του μαγνητικού πεδίου της Γης συνεχίζεται με μια σειρά αποστολών για την εύρεση του μαγνητικού Βορρά: αποστολή Victory (John Ross: 1818, 1829-1833) και αποστολή Gjøra (Roald Amundsen: 1903-1906).

Με την εξέλιξη της επιστήμης και τεχνολογίας, η μελέτη του μαγνητικού πεδίου εξελίχθηκε ποιοτικά. Το πρώτο μαγνητόμετρο που πήρε μετρήσεις από το διάστημα, ήταν τοποθετημένο στο σοβιετικό δορυφόρο Sputnik-3<sup>1</sup> το 1958. Ορόσημα στην μελέτη του γεωμαγνητικού πεδίου αποτελούν οι δορυφόροι Magsat (1979-1980), τα σκάφη Van Allen (2012-σήμερα), ο δορυφόρος Ørsted (1999-σήμερα), η αποστολή Swarm (2013-σήμερα). Σήμερα, συνδυασμός επίγειων και δορυφορικών μετρήσεων χρησιμοποιείται ώστε να βαθύνει η γνώση μας γύρω από τους μηχανισμούς παραγωγής του γεωμαγνητικού πεδίου και των παραγόντων μεταβολής του.



Εικόνα 2:Εξώφυλλο του *De Magnete*, έκδοση 1628 (Πηγή: Wikipedia)



Εικόνα 3: Ο Roald Amundsen και η ομάδα του στον βόρειο μαγνητικό πόλο (Πηγή: Wikipedia)

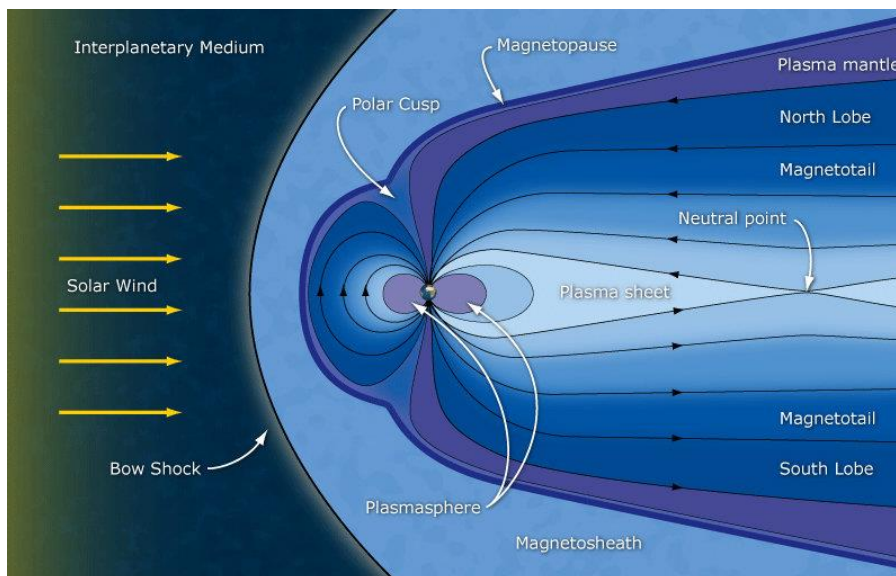
<sup>1</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft\\_magnetometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_magnetometer)

# 1. ΘΕΩΡΙΑ

## 1.1. ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

### 1.1.1. Η μαγνητόσφαιρα της Γης

Η μαγνητόσφαιρα της Γης αποτελεί το χώρο γύρω από τον πλανήτη στον οποίο κυριαρχεί το μαγνητικό πεδίο της και οφείλεται στην αλληλεπίδραση αυτού με τον ηλιακό άνεμο. Προς την πλευρά του Ήλιου εκτείνεται έως 10 γήινες ακτίνες, ενώ προς την σκοτεινή πλευρά έως μερικές εκατοντάδες γήινες ακτίνες. Αυτή η μορφή της μαγνητόσφαιρας οφείλεται στην πίεση του ηλιακού ανέμου, που την συμπιέζει προς την πλευρά του Ήλιου και την παρασέρνει προς την σκοτεινή πλευρά της Γης.



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση της γήινης μαγνητόσφαιρας (Πηγή: ResearchGate)

**Κάποια από τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά της μαγνητόσφαιρας είναι τα εξής<sup>[1]</sup>:**

- Το τοξοειδές κρουστικό κύμα (bow shock): η περιοχή όπου αρχίζει η αλληλεπίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου με τον ηλιακό άνεμο.
- Η μαγνητόπαυση (magnetopause): το όριο της περιοχής στην οποία κυριαρχεί το μαγνητικό πεδίο της Γης, καθώς εκεί η πίεση του ηλιακού ανέμου και η μαγνητική πίεση του γήινου μαγνητικού πεδίου εξισορροπούνται.
- Η μαγνητοθήκη (magnetosheath): η περιοχή μεταξύ του κρουστικού κύματος και της μαγνητόπαυσης, στην οποία υπάρχουν ενεργητικά σωματίδια ενέργειας 3-5keV και πυκνότητας 0.3-0.5 ιόντα/cm<sup>3</sup>. Οι ιδιότητες αυτές ποικίλλουν και μεταβάλλονται, ειδικά κατά την διάρκεια μαγνητικών καταιγίδων όπου η μαγνητοθήκη συμπιέζεται προς την μαγνητοουρά.
- Το φύλλο πλάσματος (plasma sheet): περιοχή σε σχήμα που μοιάζει με σεντόνι, στην οποία βρίσκεται πολύ πυκνό και θερμό πλάσμα. Εκτείνεται στην διεύθυνση της μαγνητοουράς παράλληλα στο ισημερινό επίπεδο και χωρίζει τη μαγνητόσφαιρα σε δύο λοβούς.
- Το δακτυλιοειδές ρεύμα (ring current-RC): τοξοειδές σύστημα ρευμάτων γύρω από την Γη, με κέντρο της πάνω στον ισημερινό, στην οποία βρίσκονται παγιδευμένα φορτισμένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια ηλιακής και ιονοσφαιρικής προέλευσης.
- Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen (Van Allen Belts): ζώνες ενεργητικών σωματιδίων, προερχόμενων από την κοσμική ακτινοβολία και τον ηλιακό άνεμο, τα οποία παγιδεύονται στην μαγνητόσφαιρα της Γης.
- Η μαγνητοουρά (magnetic tail): η προέκταση της μαγνητόσφαιρας στην σκοτεινή πλευρά της Γης με μήκος έως και μερικές εκατοντάδες γήινες ακτίνες.

### 1.1.2. Συνιστώσες του γεωμαγνητικού πεδίου

Το παρατηρούμενο μαγνητικό πεδίο της Γης αποτελεί υπέρθεση πεδίων από πολλές διαφορετικές πηγές. Το κυρίαρχο πεδίο είναι αυτό που παράγεται στον πυρήνα της Γης και ονομάζεται κύριο πεδίο. Μαγνητισμένα πετρώματα και φαινόμενα επαγωγής στον φλοιό, το μανδύα και τη λιθόσφαιρα συμβάλουν επίσης στην συνολική ένταση του μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα και του φλοιού συγκροτούν το εσωτερικό (ενδογενές) μαγνητικό πεδίο.

Διάφοροι ακόμα εξωτερικοί μηχανισμοί και παράγοντες συμβάλουν στην συνολική ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου και προέρχονται από την ιονόσφαιρα και την μαγνητόσφαιρα, αλλά και από μακρινές πηγές, όπως είναι η μαγνητοουρά και η μαγνητόπαυση. Μαγνητικά πεδία παραγόμενα στην ιονόσφαιρα και τη μαγνητόσφαιρα συγκροτούν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Ακόμα, τα περίπλοκα δίκτυα ρευμάτων που αναπτύσσονται στην μαγνητόσφαιρα της Γης επάγουν πεδία στους ωκεανούς, στο μανδύα κ.ά και μπορούν να χαρακτηριστούν ως επαγόμενα μαγνητικά πεδία<sup>[12]</sup>.

Παρακάτω αναφέρουμε συνοπτικά κάποιες από αυτές τις συνιστώσες:

### Το κύριο πεδίο

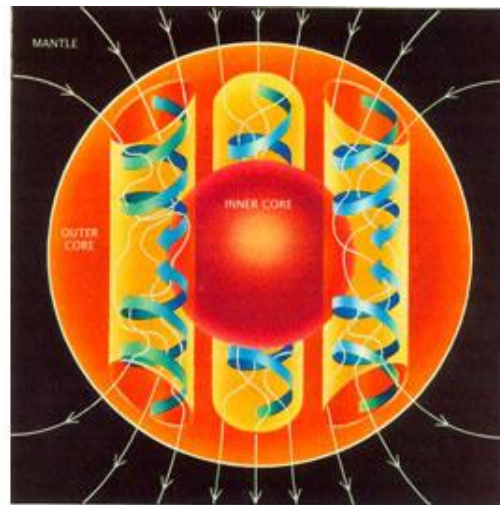
Ο πυρήνας της Γης αποτελείται από δύο στρώματα: το εσωτερικό στρώμα το οποίο θεωρείται ότι είναι στερεό, και το εξωτερικό, το οποίο αποτελείται από ρευστό σίδηρο και νικέλιο, καθώς και άλλα στοιχεία σε μικρότερες ποσότητες.

Τα ρεύματα μεταφοράς θερμότητας που δημιουργούνται καθώς και η περιστροφή της Γης λειτουργούν ως παράγοντες παραγωγής και συντήρησης του ενδογενούς (κύριου) μαγνητικού πεδίου της Γης, μέσω του μηχανισμού του γεωδυναμό.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{B}, \text{ Εξίσωση 1: Εξίσωση του δυναμό}$$

η: συντελεστής μαγνητικής διάχυσης

Κοντά στην επιφάνεια της Γης το 97% του μαγνητικού πεδίου που μετρείται είναι αυτό του πυρήνα<sup>[2]</sup>.



Εικόνα 5: Απεικόνιση του μηχανισμού του δυναμό. Οι σπείρες αναπαριστούν την μορφή των ρευμάτων στον πυρήνα λόγω της δύναμης Coriolis. (Πηγή: Wikipedia)

### Το μαγνητικό πεδίο της λιθόσφαιρας

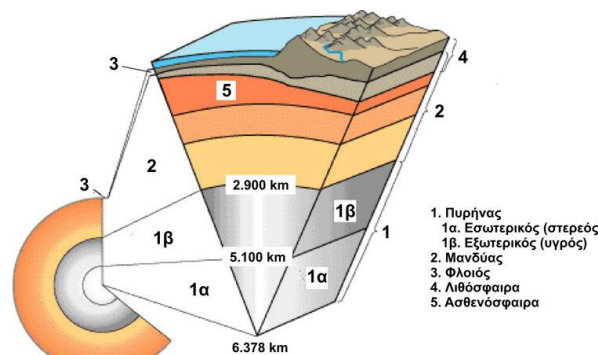
Στη λιθόσφαιρα το μαγνητικό πεδίο παράγεται λόγω επαγωγής αλλά και από μαγνητισμένα πετρώματα (π.χ. ηφαιστειογενή), τα οποία συντηρούν τη μαγνήτισή τους και έτσι το πεδίο παραμένει σχεδόν σταθερό.

### Το μαγνητικό πεδίο του μανδύα

Ο μανδύας, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας του, δεν μπορεί να συντηρήσει μαγνητικό πεδίο. Φαινόμενα επαγωγής βέβαια δημιουργούν μικρής έντασης πεδίο κοντά στον πυρήνα.

### Το μαγνητικό πεδίο των ωκεανών

Το θαλασσινό νερό αποτελεί ένα εξαιρετικά αγωγίμο υλικό και έτσι η κίνηση των ωκεανών διαμέσου του κύριου πεδίου παράγει, σύμφωνα με το μηχανισμό του δυναμό, μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό όμως είναι σχετικά ασθενές και η ένταση του πάνω από την επιφάνεια της Γης είναι μικρή σε σύγκριση με άλλους παράγοντες<sup>2</sup>.



Εικόνα 6: Το εσωτερικό της Γης. (Πηγή: Wikipedia)

### Το μαγνητικό πεδίο της ιονόσφαιρας<sup>[4]</sup>

Η ιονόσφαιρα αποτελεί στρώμα της ανώτερης ατμόσφαιρας, το οποίο συγκροτείται κατά κύριο λόγο από ιονισμένα σωματίδια. Χωρίζεται σε τρεις περιοχές (layers): D, E και F. Η κάθε περιοχή διαφέρει στο μήκος κύματος ακτινοβολίας το οποίο απορροφά. Η περιοχή-D εκτείνεται από 60km-90km και απορροφά σκληρές ακτίνες X, ενώ η περιοχή F αποτελεί το ανώτατο όριο της ιονόσφαιρας (150km-600km) και απορροφά υπεριώδη ακτινοβολία.

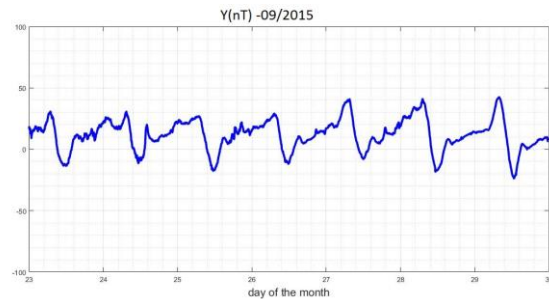
Η περιοχή-E της ιονόσφαιρας αποτελεί το ενδιάμεσο στρώμα της ιονόσφαιρας και εκτείνεται από 90km με 150km από την επιφάνεια της Γης. Η περιοχή αυτή αποτελείται από σωματίδια, τα οποία έχουν ιονιστεί από μαλακές ακτίνες X και υπεριώδη ακτινοβολία, με μέγιστη πυκνότητα φορτισμένων σωματιδίων στα 110km.

Καθώς η ουδέτερη ατμόσφαιρα κινείται λόγω της περιστροφής της Γης, προκαλούνται συγκρούσεις μεταξύ ουδέτερων σωματιδίων και ιόντων πλάσματος στην περιοχή-E. Η κίνηση του πλάσματος στο υπάρχον γεωμαγνητικό πεδίο οδηγεί, σύμφωνα με το μηχανισμό του δυναμό, στην δημιουργία επιπλέον συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου.

<sup>2</sup> <https://svs.gsfc.nasa.gov/12450>

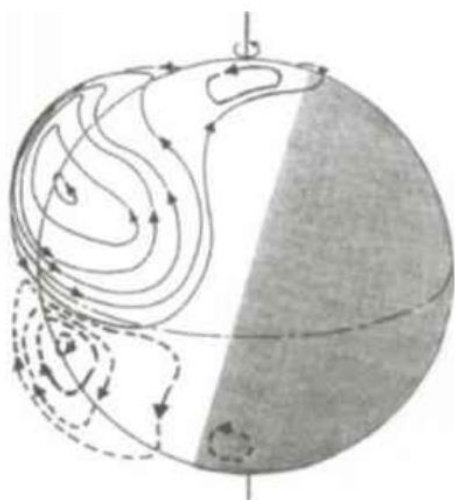
Σε συνθήκες στις οποίες δεν υπάρχει ηλιακή δραστηριότητα, το μαγνητικό πεδίο αυτό ονομάζεται Sq (Solar quiet), έχει ημερήσια περίοδο μεταβολής και πλάτος μεταβολής της τάξης των 10nT. Η ύπαρξη του είναι εμφανής σε επίγεια μαγνητομετρικά δεδομένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.

Γενικά το πλάτος του Sq αλλά και το μοτίβο της μεταβολής μεταβάλλονται με το γεωγραφικό πλάτος. Μάλιστα, το πλάτος πολύ κοντά στον μαγνητικό ισημερινό είναι 2-3 φορές μεγαλύτερο αυτού σε περιοχές χαμηλού γεωγραφικού πλάτους, λόγω της ύπαρξης ισχυρών ρευμάτων εκεί, τα οποία ονομάζονται equatorial electrojets (EEJ).



Εικόνα 7: Ημερήσια μεταβολή στην Y-συνιστώσα τις τελευταίες 7 ημέρες του 9/2015-Σταθμός Διόνυσος του ENIGMA

Η περιοχή-E της ιονόσφαιρας είναι ηλεκτρικά αγώγιμη μόνο από την πλευρά του ήλιου, και έτσι το σύστημα ρευμάτων Sq που παράγεται αποτελείται από δύο «δίνες»: στο βόρειο ημισφαίριο με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού και στο νότιο με φορά ίδια με αυτήν των δεικτών του ρολογιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8:Απεικόνιση του συστήματος ρευμάτων Sq

Λόγω της κλίσης του άξονα περιστροφής της Γης ως προς την εκλειπτική (το επίπεδο που ορίζεται από την τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο), το Sq εξαρτάται από την εποχή. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα ρευμάτων Sq είναι το επίπεδο αγωγιμότητας της ιονόσφαιρας, λόγω της συγκέντρωσης και πυκνότητας ιόντων σε αυτήν. Βασικό ρόλο επίσης παίζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ευθύνεται για τον ιονισμό των ατόμων στην ιονόσφαιρα και εξαρτάται από την απόσταση Γης-Ήλιου, τη θέση της Σελήνης, την φάση του ενδεκαετή κύκλου του Ήλιου, φαινόμενα έκλειψης κ.ά.

Να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός παραγωγής του ρεύματος Sq όπως περιγράφηκε παραπάνω αφορά μεσαία και χαμηλά γεωγραφικά πλάτη, καθώς μελέτες δείχνουν πως διαφέρει στις πολικές περιοχές. Για την ακρίβεια, θεωρείται ότι δημιουργείται επιπλέον σύστημα ρευμάτων, παρόμοιο με το Sq, το οποίο ονομάζεται Sq<sup>p</sup>. Μάλιστα, τα περίπλοκα ρεύματα που δημιουργούνται στην πολική περιοχή της μαγνητόσφαιρας αλληλεπιδρούν με την ιονόσφαιρα, με αποτέλεσμα το σύστημα Sq<sup>p</sup> να είναι ενισχυμένο, ακόμα και σε περιόδους που δεν υπάρχει γεωμαγνητική δραστηριότητα. Για αυτό το λόγο θεωρείται αρκετά πιο περίπλοκος ο προσδιορισμός της συνεισφοράς Sq στις πολικές περιοχές<sup>[7]</sup>.

Η ημερήσια μεταβολή του γεωμαγνητικού πεδίου περιλαμβάνει μία ακόμα συνιστώσα, η οποία ονομάζεται σεληνιακή μεταβολή (lunar variation) και συχνά συμβολίζεται με το γράμμα L. Η μεταβολή L οφείλεται στην βαρυτική επίδραση της Σελήνης στην ατμόσφαιρα της Γης, η οποία δημιουργεί φαινόμενα ατμοσφαιρικών παλιρροιών με διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της Γης και φορά προς τα επάνω. Το σύστημα ρευμάτων που δημιουργείται αποτελείται συνήθως από δύο δίνες στο βόρειο ημισφαίριο και δύο στο νότιο.

Η μεταβολή L του γεωμαγνητικού πεδίου εμφανίζει πλάτος ίσο περίπου με το ένα δέκατο της μεταβολής Sq. Υπάρχουν περιπτώσεις βέβαια που το πλάτος του L παρατηρείται να αυξάνεται σημαντικά, ακόμα και να ξεπερνά αυτό του Sq, κυρίως σε περιοχές πάνω στον μαγνητικό ισημερινό ή σε χειμερινές ισημερινές.

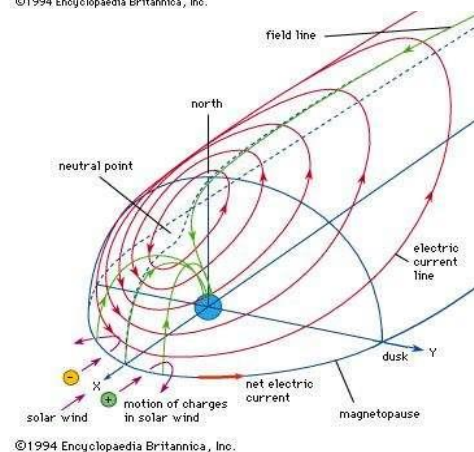
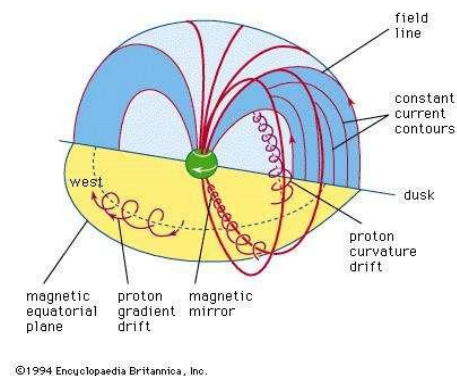


### Το μαγνητικό πεδίο της μαγνητόσφαιρας<sup>3</sup>

Βασικότερη μαγνητοσφαιρική συνεισφορά αποτελεί το δακτυλιοειδές ρεύμα. Συμβολή έχουν και μακρινότερες πηγές, εκ των οποίων οι κυριότερες είναι τα ηλεκτρικά ρεύματα που αναπτύσσονται στην μαγνητόπαυση και την μαγνητοουρά. Άλλο σύστημα ρευμάτων, το οποίο συναντάται στους πόλους είναι το σύστημα ρευμάτων Birkeland (free-aligned currents).

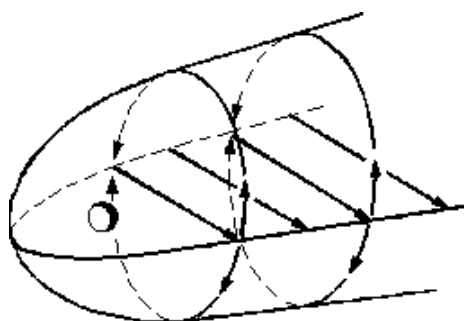
Το δακτυλιοειδές ρεύμα (ring current-RC), όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.1.1, αποτελεί τοροειδές σύστημα ρευμάτων γύρω από την Γη, με κέντρο πάνω στον ισημερινό, στο οποίο βρίσκονται παγιδευμένα φορτισμένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια ηλιακής και ιονοσφαιρικής προέλευσης. Το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παράγει η κίνηση των σωματιδίων επάγει μαγνητικό πεδίο, το οποίο στην επιφάνεια της Γης έχει κατεύθυνση αντίθετη με αυτήν του κύριου πεδίου. Κοντά στη Γη, το πεδίο αυτό έχει κατεύθυνση Βορρά προς Νότο, μειώνοντας το πεδίο στις μη-πολικές περιοχές. Κατά την διάρκεια γεωμαγνητικών καταιγίδων η ένταση του αυξάνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου.

Το σύστημα ρευμάτων της μαγνητόπαυσης ή σύστημα ρευμάτων Charman-Ferraro δημιουργείται στην μαγνητόπαυση, καθώς φορτισμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου απωθούνται από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Το ρεύμα αυτό βρίσκεται πάνω σε μια επιφάνεια, που μοιάζει με σεντόνι, και θέτει τα όρια μεταξύ της γήινης μαγνητόσφαιρας και του ηλιακού ανέμου. Η ένταση του είναι τέτοια, που το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο αναιρεί το κύριο πεδίο έξω από τη μαγνητόσφαιρα. Σε σημείο πάνω στην επιφάνεια της μαγνητόπαυσης, το πεδίο της είναι διπλάσιο από το κύριο πεδίο. Η κατεύθυνση του ρεύματος είναι προς τα ανατολικά, προς την πλευρά του Ήλιου, παράλληλα στο ισημερινό επίπεδο και γύρω από ένα «ουδέτερο» σημείο (ονομάζεται έτσι γιατί εκεί το ολικό πεδίο είναι σχεδόν 0).



Εικόνα 9: Το δακτυλιοειδές ρεύμα (πάνω) και το σύστημα Charman-Ferraro (κάτω), (Πηγή: Britannica)

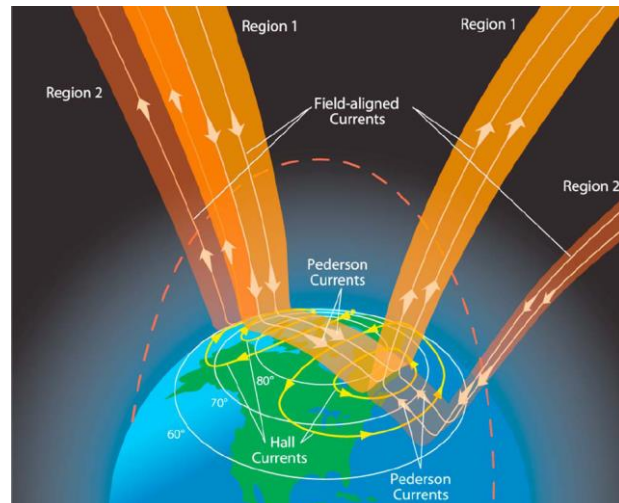
Το ρεύμα της μαγνητοουράς εκτείνεται από 10 έως 200 γήινες ακτίνες σε κατεύθυνση ανατολή προς δύση (dawn to dusk). Όμοια με το ρεύμα της μαγνητόπαυσης, αποτελεί όριο της μαγνητόπαυσης στην νυχτερινή πλευρά. Μάλιστα, παράγεται από τον ίδιο μηχανισμό με το ρεύμα μαγνητόπαυσης. Η διαφορά είναι ότι το ρεύμα της μαγνητοουράς ρέει και στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας, στο φύλλο πλάσματος. Για έναν παρατηρητή στην νυχτερινή πλευρά της Γης, κοιτώντας προς την αντίθετη πλευρά του Ήλιου, το ρεύμα της μαγνητοουράς ρέει δυτικά διαμέσου του φύλλου πλάσματος και μετά χωρίζεται πάνω και κάτω πάνω στην μαγνητόπαυση. Η κίνηση του δηλαδή έχει σχήμα το γράμμα «Θ» (εικόνα 10).



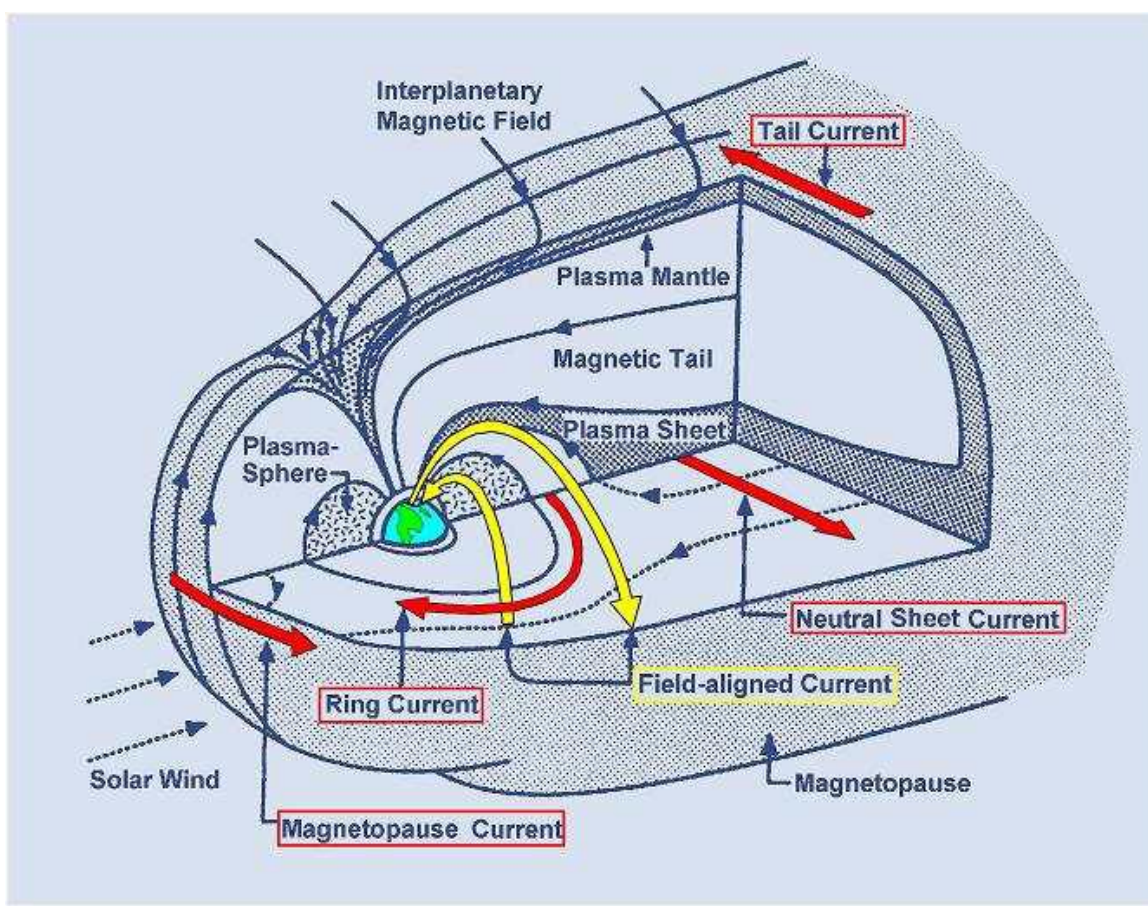
Εικόνα 10: Το ρεύμα της μαγνητοουράς

<sup>3</sup> <https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field/Sources-of-the-steady-magnetic-field#ref9359>

Τα ρεύματα Birkeland ( ή field-aligned currents) είναι σύστημα ρευμάτων, τα οποία ρέουν παράλληλα προς τις δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου και ενώνουν την μαγνητόσφαιρα με την ιονόσφαιρα σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη. Τροφοδοτούνται από σωματίδια του ηλιακού ανέμου, του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου καθώς και σωματίδια της μαγνητόσφαιρας. Παρατηρούνται στις πολικές μαγνητικές περιοχές καθώς εκεί οι δυναμικές γραμμές είναι σχεδόν κάθετες στην ιονόσφαιρα. Αυτά τα ρεύματα χωρίζονται σε δύο περιοχές. Τα ρεύματα της περιοχής 1 (region 1 currents) είναι στα πιο υψηλά πλάτη και ρέουν από την ιονόσφαιρα στην νυχτερινή πλευρά και προς την ιονόσφαιρα στην ημερήσια πλευρά. Τα ρεύματα της περιοχής 2 εμφανίζονται σε χαμηλότερα πλάτη και έχουν κατεύθυνση ροής αντίθετη της περιοχής 1. Τα ρεύματα της περιοχής 1 συζευγνύονται με τα ρεύματα της μαγνητόπαισης, ενώ τα ρεύματα της περιοχής 2 με το δακτυλιοειδές ρεύμα. Τα ρεύματα Birkeland αυξάνονται σε περιόδους γεωμαγνητικών υποκαταιγίδων.



Εικόνα 11: Το σύστημα ρευμάτων Birkeland (Πηγή: Wikipedia)



Εικόνα 12: Τα βασικότερα συστήματα ρευμάτων της μαγνητόσφαιρας (Πηγή: Britannica)

### 1.1.3. Μαθηματική Περιγραφή του γήινου μαγνητικού πεδίου

#### 1.1.3.α) Προσέγγιση διπόλου<sup>[1]</sup>

Το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη μας κοντά στην επιφάνεια της Γης μπορεί να θεωρεί προσεγγιστικά ως διπολικό και περιγράφεται από την εξίσωση:

$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{3(\vec{\mu} \cdot \vec{r}) - \vec{r}}{|\vec{r}|^5}$ , όπου  $\mu = 7.9 \cdot 10^{15} \text{ Tm}^3$  η μαγνητική διπολική ροπή με φορά Βορρά προς Νότο. (Εξίσωση 2: Εξίσωση μαγνητικού διπόλου)

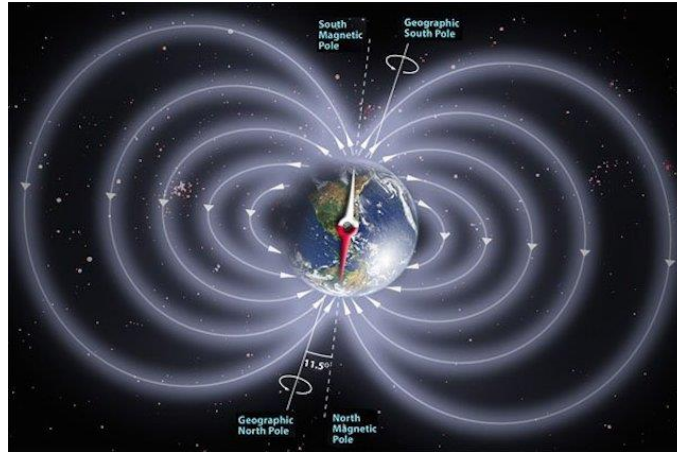
Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης έχει τιμή περίπου  $3 \cdot 10^{-4} \text{ nT}$  στον ισημερινό έως  $5 \cdot 10^{-4} \text{ nT}$  στους πόλους.

Ο γεωμαγνητικός άξονας σχηματίζει περίπου  $11^\circ$  γωνία με τον άξονα περιστροφής της Γης.

Το μέγεθος του πεδίου στο ισημερινό επίπεδο είναι:

$B = B_{\oplus} \left(\frac{R_{\oplus}}{r}\right)^3$ , όπου  $B_{\oplus} = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$  (τιμή του πεδίου στον ισημερινό) και  $R_{\oplus}$  η γήινη ακτίνα.

(Εξίσωση 3: Το μέγεθος του πεδίου στο ισημερινό επίπεδο)



Εικόνα 13: Απεικόνιση του διπολικού γεωμαγνητικού πεδίου

### 1.1.3.β) Αναλυτική περιγραφή του μαγνητικού πεδίου<sup>[5]</sup>

Το μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να περιγραφεί με την χρήση των σφαιρικών αρμονικών

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) \cdot e^{im\varphi}, \text{ (Εξίσωση 4: Spherical harmonics)}$$

λύνοντας τις εξισώσεις του Maxwell για το μαγνητικό πεδίο:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Εξίσωση 5: απουσία μονοπόλων)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \text{ (Εξίσωση 6: νόμος Ampère)}$$

Θεωρώντας ότι στην επιφάνεια της Γης η ένταση των ηλεκτρικών ρευμάτων και η χρονική μεταβολή των ηλεκτρικών πεδίων είναι κατά προσέγγιση ασήμαντες, ο νόμος του Ampère δίνει:  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \Leftrightarrow \vec{B} = -\vec{\nabla}V$  (Εξίσωση 7: το μαγνητικό πεδίο ως κλίση βαθμωτού δυναμικού)

Σε συνδιασμό με την εξίσωση (5), έχουμε πλέον ότι  $\vec{\nabla}^2 V = 0$ , (Εξίσωση 8: εξίσωση Laplace)

Σε σφαιρικές συντεταγμένες παίρνει την μορφή:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0, \text{ (Εξίσωση 9: εξίσωση Laplace σε σφαιρικές)}$$

Η λύση αυτής της εξίσωσης μας δίνει:

$$V = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \cdot P_n^m(\cos\theta), \text{ (Εξίσωση 10: εξίσωση του δυναμικού)}$$

$a$ : ακτίνα Γης

$\varphi$ : γεωγραφικό μήκος (Longitude)

$\theta$ : γεωγραφικό πλάτος (Latitude)

$r$ : απόσταση από το κέντρο της Γης

Οι συναρτήσεις  $P_n^m(\cos\theta)$  ονομάζονται κανονικοποιημένες συναρτήσεις Schmidt (Schmidt functions) και δίνονται από τη σχέση

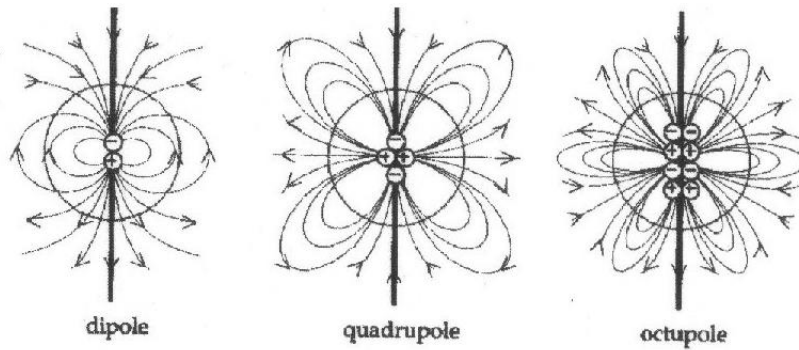
$$\left. \begin{aligned} m = 0: P_n^0(x) &= P_{n,0}(x) \\ m \neq 0: P_n^m(x) &= (-1)^m \sqrt{\frac{2(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(x) \end{aligned} \right\} \text{(Εξίσωση 11: κανονικοποιημένες συναρτήσεις Schmidt)}$$

όπου οι συναρτήσεις  $P_{n,m}(x)$  ονομάζονται μη κανονικοποιημένες συναρτήσεις Legendre και δίνονται με τη σειρά τους από τη σχέση:

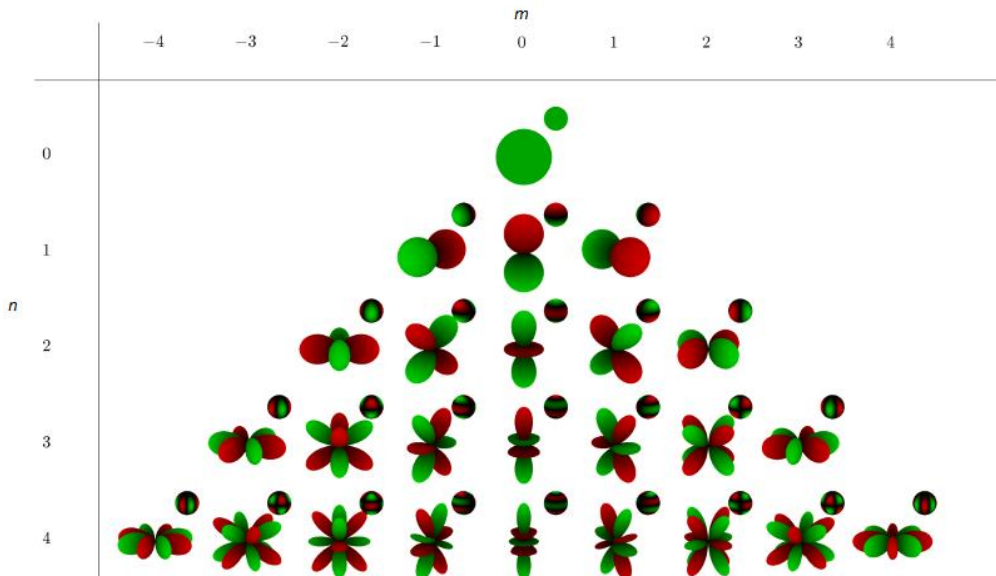
$$P_{n,m}(x) = (1-x^2)^{1/2m} \frac{d^m}{dx^m} (P_n(x)), \text{ με } P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \left(\frac{d}{du}\right)^n (x^2-1)^n \text{ (Εξίσωση 12: μη κανονικοποιημένες συναρτήσεις Legendre)}$$

Οι παράγοντες  $g_n^m$  και  $h_n^m$  ονομάζονται παράμετροι Gauss (Gauss coefficients).

Οι ακέραιοι παράμετροι  $n$  και  $m$  ονομάζονται βαθμός (degree) και τάξη (order) του πολωνύμου αντίστοιχα. Όλοι οι όροι για  $n=1$  αντιστοιχούν σε δίπολο, για  $n=2$  σε τετράπολο, για  $n=3$  σε οκτάπολο κ.ό.κ. Η παράμετρος  $m$  συνδέεται με τον προσανατολισμό. Πρακτικά η επιλογή της τάξης των πολωνύμων εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία επιθυμούμε σε κάθε περίπτωση να προσδιορίσουμε το μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 14: Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου της Γης ως δίπολο, τετράπολο και οκτάπολο (Πηγή: <http://helios.fmi.fi/~juusola/geomagnetism/Lectures/>)



Εικόνα 15: Μορφή και προσανατολισμός των 4 πρώτων σφαιρικών αρμονικών (Πηγή: <https://www.ti.uni-bielefeld.de/html/people/ddiffert/libShc/manual/fouriertransform.html>)

Μετρήσιμο μέγεθος αποτελεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου και οι μεταβολές του, όχι το δυναμικό  $V$ . Οι τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου, σε σφαιρικές συντεταγμένες, δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} (\alpha), \quad Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi} (\beta), \quad Z = \frac{\partial V}{\partial r} (\gamma) \text{ (Εξισώσεις 13 } (\alpha), (\beta), (\gamma): \text{ Συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου)}$$

### Υποθέσεις για τη λύση

- ✓ Κάθε συνάρτηση που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace (3) ονομάζεται σφαιρική αρμονική. Η λύση που βρίσκουμε για το γεωμαγνητικό πεδίο απαιτεί ο πλανήτης να είναι σφαιρικός.
- ✓ Δεύτερον, η εξίσωση (3) διαφοροποιείται, εάν λάβουμε υπόψιν μας την επίδραση εξωτερικών πεδίων. Όμως, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, στην επιφάνεια της Γης αυτά μπορούν να θεωρηθούν σε πρώτη προσέγγιση αμελητέα.

### 1.1.4. Συστήματα συντεταγμένων

#### α) Βασικά συστήματα συντεταγμένων

Η περιγραφή του κύριου μαγνητικού πεδίου της Γης, αλλά και των παραγόντων που συμβάλουν στην συνολική ένταση και τη μεταβολή του, γίνεται σε διάφορα συστήματα συντεταγμένων. Τα πιο βασικά συστήματα συντεταγμένων<sup>4</sup> είναι τα εξής:

- Γεωγραφικό Σύστημα Συντεταγμένων (geographic coordinate system-GEO)

Αυτό το σύστημα μπορεί να οριστεί με αρκετούς τρόπους. Παρακάτω θα αναφέρουμε το πιο διαδεδομένο, ο οποίος αφορά τα δεδομένα της εργασίας. Το σύστημα αυτό ονομάζεται **North East Down (NED)** και ορίζεται ως εξής: η X συνιστώσα ακολουθεί τη νοητή γραμμή γεωγραφικού νότου-βορρά, η Y συνιστώσα τη γραμμή δύσης-ανατολής, ενώ η Z συνιστώσα τη γραμμή ζενιθ-κέντρου Γης.

Σημείο πάνω στην σφαίρα ορίζεται από ζευγάρι συντεταγμένων: το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος. Το γεωγραφικό πλάτος είναι η γωνιακή απόσταση του σημείου από τον Ισημερινό, παίρνει τιμές από 0°-90° και συμβολίζεται ως θ°N για το βόρειο ημισφαίριο και θ°S για το Νότιο. Αντίστοιχα το γεωγραφικό μήκος είναι η γωνιακή απόσταση του σημείου από τον ισημερινό του Greenwich. Συνήθως συμβολίζεται ως φ°E ή φ°W, εάν το σημείο είναι στα ανατολικά του Greenwich ή στα δυτικά του αντίστοιχα. Το ίδιο μπορεί να συμβολιστεί με + ή - αντί για °E ή °W αντίστοιχα.

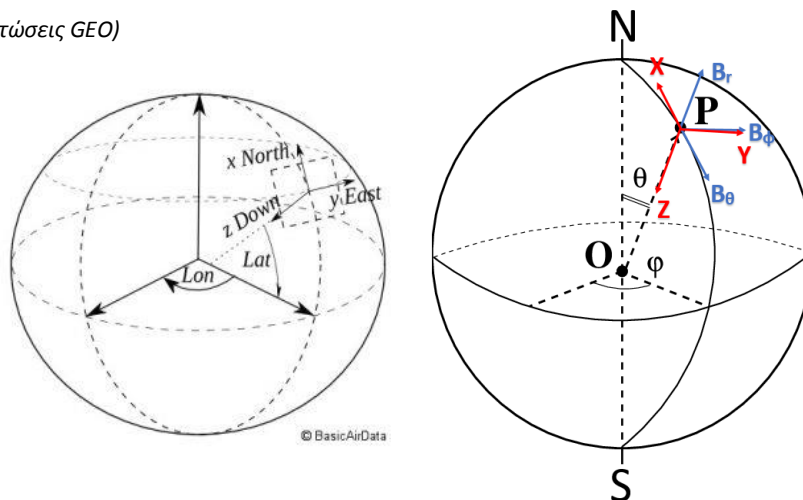
Στο σύστημα GEO οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου συνταντώνται στη βιβλιογραφία ως εξής:

$$X = B_x = -B_\theta (\alpha)$$

$$Y = B_y = B_\varphi (\theta)$$

$$Z = B_z = -B_r (\gamma)$$

(Εξισώσεις 14 (α), (β), (γ): Συνιστώσες GEO)



Εικόνα 16:

Αριστερά: Απεικόνιση των γεωγραφικών συντεταγμένων NED  
Δεξιά: Σύγκριση σφαιρικών ( $B_\theta, B_\varphi, B_r$ ) και γεωγραφικών ( $X, Y, Z$ ) συντεταγμένων.

Σημείωση: Για χάρην ευκολίας, από δω και στο εξής με τον όρο γεωγραφικές συντεταγμένες θα αναφερόμαστε στις γεωγραφικές συντεταγμένες North-East-Down (NED).

<sup>4</sup> [http://helios.fmi.fi/~juusola/geomagnetism/Lectures/Chapter2\\_basics.pdf](http://helios.fmi.fi/~juusola/geomagnetism/Lectures/Chapter2_basics.pdf)

- Γεωμαγνητικό Σύστημα Συντεταγμένων (geomagnetic coordinate system-MAG)

Σε αυτό το σύστημα ο z-άξονας είναι παράλληλος στον μαγνητικό διπολικό άξονα. Πιο συγκεκριμένα για κάθε άξονα:

X: βόρεια συνιστώσα (φορά μαγνητικός νότος-μαγνητικός βορράς)

Y: ανατολική συνιστώσα (φορά δύση-ανατολή)

Z: κάθετη συνιστώσα (φορά ζενίθ-κέντρο Γης)

Και στα δύο συστήματα ορίζουμε τα μεγέθη:

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \text{ (Εξίσωση 15: Οριζόντια ένταση (horizontal intensity))}$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \text{ (Εξίσωση 16: Ολική ένταση (total intensity))}$$

$$D = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right), -180^\circ \leq D \leq 180^\circ \text{ (Εξίσωση 17: Απόκλιση (declination))}$$

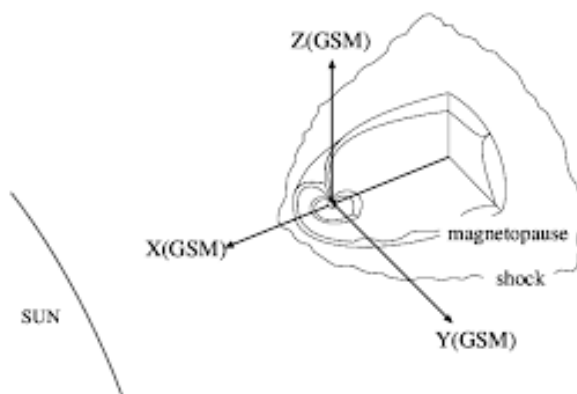
$$I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right), -90^\circ \leq I \leq 90^\circ \text{ (Εξίσωση 18: Έγκλιση (Inclination))}$$

- Ηλιακές μαγνητοσφαιρικές συντεταγμένες (Solar Magnetospheric coordinates-SM)

Σ αυτό το σύστημα ο z-άξονας επιλέγεται παράλληλος στον μαγνητικό βόρειο πόλο της Γης και ο γ-άξονας παράλληλος στην διεύθυνση Γης-Ήλιου προς την σκοτεινή πλευρά.

- Γεωκεντρικές ηλιακές μαγνητοσφαιρικές συντεταγμένες (Geocentric Solar Magnetospheric coordinates-GSM)<sup>5</sup>

Σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων ο x-άξονας κατευθύνεται προς το κέντρο του Ήλιου και ο z-άξονας είναι παράλληλος στον μαγνητικό άξονα της Γης με θετική φορά προς τον μαγνητικό βορρά. Σημείο τομής των τριών αξόνων είναι το κέντρο της Γης.



Εικόνα 17: Απεικόνιση του συστήματος συντεταγμένων GSM

(Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/Figure-B1-The-geocentric-solar-magnetospheric-GSM-coordinates\\_fig12\\_34974646](https://www.researchgate.net/figure/Figure-B1-The-geocentric-solar-magnetospheric-GSM-coordinates_fig12_34974646))

## β) Σχέση γεωμαγνητικών και γεωγραφικών συντεταγμένων

Οι γεωγραφικές συντεταγμένες συνδέονται με τις γεωμαγνητικές μέσω ενός πίνακα μετασχηματισμού:

<sup>5</sup> <https://www.spennis.oma.be/help/background/coortran/coortran.html#GEO>

$r_g = R \cdot r_m$  (Εξίσωση 19: γεωμαγνητικές σε γεωγραφικές συντεταγμένες)  
 $r_m = R^{-1} \cdot r_g$  (Εξίσωση 20: γεωγραφικές σε γεωμαγνητικές συντεταγμένες)

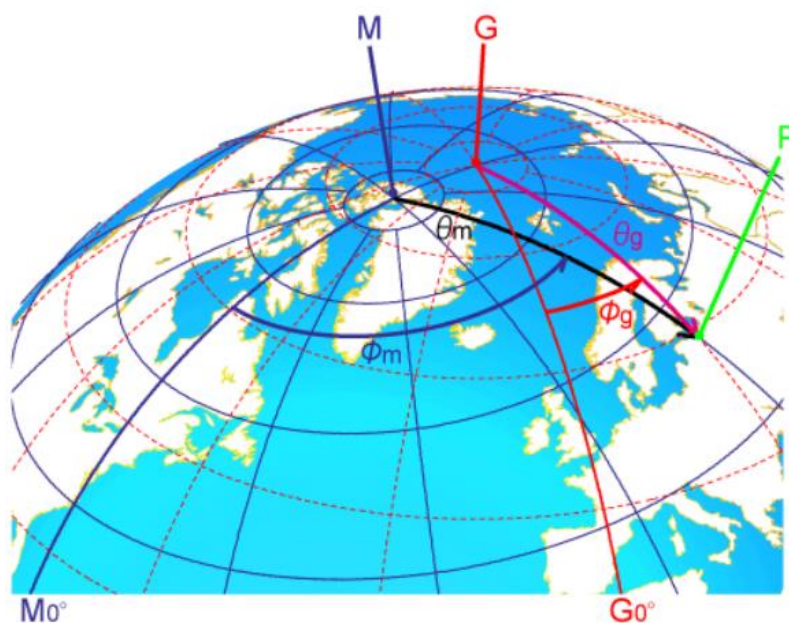
Ο πίνακας R είναι πίνακας στροφής και ορίζεται ως:

$R = R_y(\theta_0(t)) \cdot R_z(\varphi_0(t))$ , (Εξίσωση 21: πίνακας μετασχηματισμού GEO-MAG)  
, όπου

$$R_y(\theta_0(t)) = \begin{pmatrix} \cos\theta_0(t) & 0 & -\sin\theta_0(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_0(t) & 0 & \cos\theta_0(t) \end{pmatrix} \text{ (Εξίσωση 22: πίνακας στροφής στον } \gamma\text{-άξονα κατά γωνία } \theta_0(t)\text{)}$$

$$R_z(\varphi_0(t)) = \begin{pmatrix} \cos\varphi_0(t) & \sin\varphi_0(t) & 0 \\ -\sin\varphi_0(t) & \cos\varphi_0(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ (Εξίσωση 23: πίνακας στροφής στον } z\text{-άξονα κατά γωνία } \varphi_0(t)\text{)}$$

Οι γωνίες  $\theta_0$  και  $\varphi_0$  αντιπροσωπεύουν τις συντεταγμένες του ενός πόλου σε σχέση με τον άλλον. Υπάρχει εξάρτηση με το χρόνο, διότι η θέση των γεωμαγνητικών πόλων μεταβάλλεται με το χρόνο.



Εικόνα 18: Σχέση GEO και MAG.

**G:** γεωγραφικός βόρειος πόλος, **M:** γεωμαγνητικός βόρειος πόλος  
**90- $\theta_g$ :** γεωγραφικό πλάτος, **90- $\theta_m$ :** γεωμαγνητικό πλάτος  
 **$\varphi_g$ :** γεωγραφικό μήκος,  **$\varphi_m$ :** γεωμαγνητικό μήκος  
 **$G_0$ :** μεσημβρινός Greenwich,  **$M_0$ :** γεωμαγνητικός μηδενικός μεσημβρινός  
**P:** τυχαίο σημείο  
(Πηγή: <http://helios.fmi.fi/~juusolal/geomagnetism/Lectures/>)

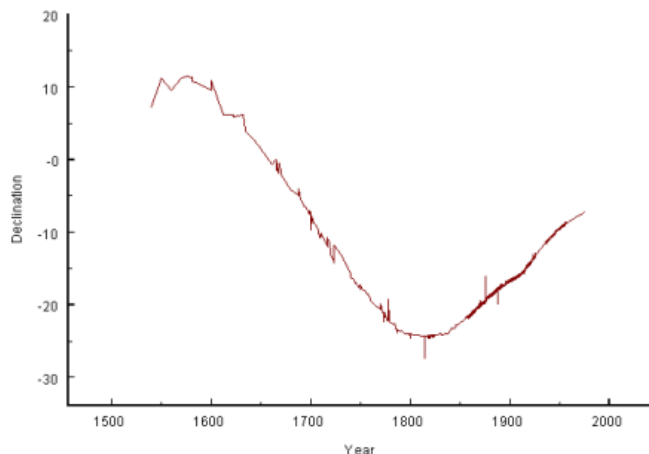
### 1.1.5. Χρονικές Μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο της Γης μεταβάλλεται στο χρόνο λόγω διάφορων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα από τον πυρήνα της μέχρι τη μαγνητόσφαιρα. Μπορούμε να χωρίσουμε τις μεταβολές αυτές σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις μεταβολές μεγάλης χρονικής κλίμακας (long-term variations) και αυτές μικρής χρονικής κλίμακας (short-term variations). Αυτές οι κατηγορίες μεταβολών διαφέρουν όχι μόνο στη χρονική τους διάρκεια, αλλά και στην προέλευση τους, η οποία και καθορίζει τα χαρακτηριστικά τους.

## α) Χρονικές μεταβολές του κύριου πεδίου-Secular Variation<sup>6</sup>

Οι μεταβολές μεγάλης χρονικής κλίμακας, που οφείλονται σε διεργασίες στο εσωτερικό της Γης, απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία ως secular variation και έχουν περίοδο από ένα έτος έως χιλιάδες χρόνια. Παρατηρήθηκαν πρώτη φορά το 1634 στο Λονδίνο από τον Gellibrand, ο οποίος εντόπισε μεταβολές της απόκλισης του πεδίου. Μάλιστα, οι παρατηρήσεις της μεταβολής της απόκλισης στο Λονδίνο αποτελούν μία από τις καλύτερες καταγραφές της χρονικής μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου. Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι χρονικές αυτές μεταβολές οφείλονται σε φαινόμενα μαγνητικής διάχυσης και επαγωγής που λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα, αν και οι ακριβής περιγραφή των διεργασιών αυτών βρίσκεται υπό συνεχή μελέτη.

Οι μεταβολές αυτές αφορούν όλα τα στοιχεία του πεδίου, όχι μόνο την απόκλιση. Οι χρονικές μεταβολές του κύριου πεδίου μπορούν να χωριστούν στις μεταβολές του διπολικού όρου και αυτές των μη-διπολικών όρων (εξίσωση (9)).

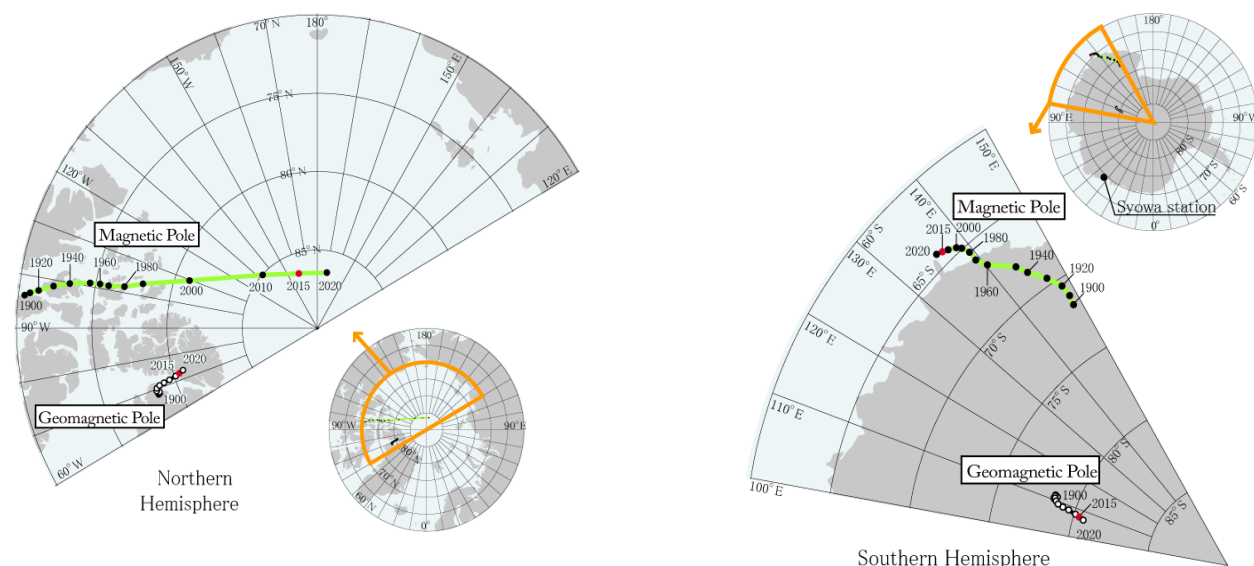


Εικόνα 19: Μεταβολή της απόκλισης στο Λονδίνο (Πηγή: [http://geomag.nrcan.gc.ca/mag\\_fld/sec-en.php](http://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-en.php))

Η ανάλυση των μεταβολών αυτών καταλήγει σε τρεις βασικές παρατηρήσεις:

- Μείωση της έντασης του διπολικού όρου του πεδίου  
Μελέτες υποδεικνύουν ότι ο διπολικός όρος μειώνεται τουλάχιστον τα τελευταία 2000 χρόνια και μάλιστα ότι η ένταση του πεδίου σήμερα έχει μειωθεί σχεδόν στο μισό σε σχέση με πριν 2 εκ. χρόνια. Υπολογίζεται ότι η ένταση μειώνεται περίπου 6.3% κάθε αιώνα. Αυτές οι μεταβολές θεωρείται ότι προέρχονται από τον πυρήνα.
- Ολίσθηση προς τα δυτικά των μη διπολικών όρων (westward drift)  
Υπολογίζεται ότι οι γραμμές ίσης απόκλισης (declination contour lines), όπως και άλλα χαρακτηριστικά των μη διπολικών όρων κινούνται προς τα δεξιά με ταχύτητα περίπου 0.2°/έτος. Θεωρείται ότι οι μεταβολές αυτές οφείλονται σε ροή ηλεκτρικών ρευμάτων στο όριο μανδύα-φλοιού.
- Άλλες μεταβολές στην ένταση τμημάτων των μη διπολικών όρων που δεν υπόκεινται ολίσθηση.

Ενδιαφέρον φαινόμενο αποτελούν ραγδαίες μεταβολές στη δεύτερη χρονική παράγωγο του μαγνητικού πεδίου διάρκειας ενός με δύο ετη, οι οποίες ονομάζονται *geomagnetic jerks* και οφείλονται σε διεργασίες στον πυρήνα της Γης. Παρατηρούνται εντονότερα στην παράγωγο της απόκλισης και της Υ-συνιστώσας, συμβαίνουν ανά ένα ή δύο έτη και διαχωρίζουν περιόδους σχετικά σταθερής χρονικής μεταβολής του πεδίου.



Εικόνα 20: Η ολίσθηση του βόρειου μαγνητικού και νότιου μαγνητικού πόλου (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>)

## β) Μεταβολές μικρής χρονικής κλίμακας-Μαγνητικές Καταιγίδες και Υποκαταιγίδες<sup>[11]</sup>

<sup>6</sup> [http://geomag.nrcan.gc.ca/mag\\_fld/sec-en.php](http://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-en.php)



Μικρότερης χρονικής κλίμακας μεταβολές οφείλονται σε ρεύματα που επάγονται στην ιονόσφαιρα, τους ωκεανούς και την μαγνητόσφαιρα. Κατηγορία αυτών των μεταβολών αποτελούν οι περιοδικές μεταβολές, όπως το S<sub>q</sub> και η μεταβολή L (βλ. Κεφάλαιο 1.1.2).

Μια ακόμα βασική κατηγορία αποτελούν οι βίαιες μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της Γης, οι οποίες ονομάζονται μαγνητικές καταιγίδες και υποκαταιγίδες.

Πιο συγκεκριμένα, η *γεωμαγνητική καταιγίδα* είναι μια παροδική διαταραχή της μαγνητόσφαιρας της Γης, με διάρκεια μερικές ώρες έως και μερικές ημέρες. Είναι αποτέλεσμα της απότομης αύξησης της ταχύτητας, πυκνότητας και άλλων παραγόντων του ηλιακού ανέμου. Η μαγνητική καταιγίδα έχει ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της έντασης του δακτυλιοειδούς ρεύματος, η οποία σε ήρεμες περιόδους είναι πολύ μικρή (περίπου 20nT). Η ένταση του μεταβάλλεται από περίπου 100 έως και 500nT και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης. Οι μαγνητικές καταιγίδες, ανάλογα με την ένταση τους, μπορούν να επιδράσουν πολύ σημαντικά στην ανθρώπινη δραστηριότητα (ηλεκτροδότηση, λειτουργία δορυφόρων, ασφάλεια αστροναυτών κ.ά.).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση καταιγίδας είναι η διαμόρφωση του ηλιακού ανέμου με τέτοιο τρόπο ώστε η κατακόρυφη (z) συνιστώσα του μαγνητικού του πεδίου να έχει νότιο προσανατολισμό για αρκετές ώρες, ώστε να ευνοείται η μαγνητική επανασύνδεση στην προσήλεια μαγνητόπαυση. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρονται ενέργεια και ενεργητικά σωματίδια στην μαγνητοουρά.

Οι *υποκαταιγίδες* αποτελούν σύντομες διαταραχές της μαγνητόσφαιρας, κατά τις οποίες ενέργεια μεταφέρεται από την μαγνητόσφαιρα στην ιονόσφαιρα σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη και έχουν συχνότητα εμφάνισης έως και ανά λίγες ώρες. Ένδειξη υποκαταιγίδας αποτελεί η αύξηση της έντασης του πολικού σέλαος. Σε περιόδους εμφάνισης μαγνητικών καταιγίδων, παρατηρούνται εντονότερες υποκαταιγίδες.

#### γ) Οι μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου και ο δείκτης F10.7

**Ο δείκτης F10.7<sup>7</sup>** αποτελεί ωριαίο δείκτη της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στα 10.7cm (2800 MHz), η οποία προέρχεται από την περιοχή μεταξύ των ανώτερων τμημάτων της χρωμόσφαιρας και των κατώτερων τμημάτων του στέμματος. Συνδέεται στενά με το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας στο οπτικό και υπεριώδες φάσμα, καθώς και τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων, οποίος με τη σειρά του συνδέεται και με γεωμαγνητικές διαταραχές. Βέβαια, η σχέση αυτή δεν είναι απόλυτη, καθώς δεν είναι απαραίτητο ότι η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί φαινόμενα που συμβάλουν σε μαγνητικές καταιγίδες<sup>8</sup>. Ο δείκτης F10.7 μετρείται συστηματικά από το 1947 και ανήκει στους παλιότερους δείκτες της ηλιακής δραστηριότητας. Παρέχεται από το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας Καναδά (National Research Council-NRC<sup>9</sup>) σε συνεργασία με τον Οργανισμό Φυσικών Πόρων Καναδά (Natural Resources Canada-NRCan<sup>10</sup>).

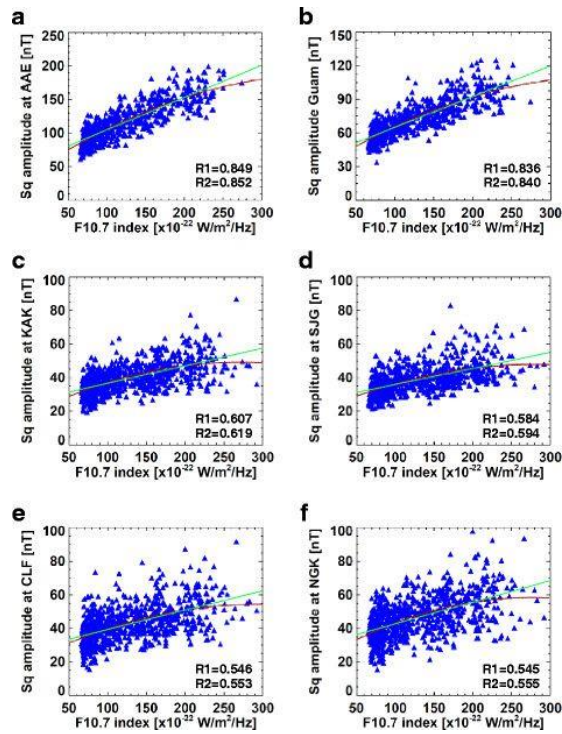
Επίσης, η σχέση του δείκτη με την υπεριώδη ακτινοβολία τον συνδέει με το ρεύμα S<sub>c</sub>, καθώς το τελευταίο οφείλεται στον ιονισμό της περιοχής-E της ιονόσφαιρας λόγω της ακτινοβολίας αυτής. Μάλιστα, αρκετές μελέτες δείχνουν ότι το πλάτος του S<sub>q</sub> στην οριζόντια συνιστώσα H εμφανίζει συνήθως σχεδόν γραμμική σχέση με το δείκτη F10.7<sup>[6]</sup> (βλ. *Εικόνα 20*).

<sup>7</sup> <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>

<sup>8</sup> <http://www.sws.bom.gov.au/Educational/1/2/4>

<sup>9</sup> <https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/index.html>

<sup>10</sup> <https://www.nrcan.gc.ca/home>



Εικόνα 21: Συσχέτιση του δείκτη F10.7 με το Sq για 6 σταθμούς για δεδομένα από το 1947 (η τελική ημερομηνία διαφέρει). Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί σε γραμμική συσχέτιση ενώ η κόκκινη σε πολυώνυμο 2ου βαθμού. [6]

### 1.1.6. Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης

Το μαγνητόμετρο είναι γενικά μια συσκευή που μετρά την ένταση, κατεύθυνση ή σχετική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Το πιο απλό παράδειγμα μαγνητομέτρου αποτελεί η πυξίδα, καθώς μετρά την κατεύθυνση του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου. Το πρώτο σύγχρονο μαγνητόμετρο κατασκευάστηκε από τον C.F.Gauss το 1833.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μαγνητομέτρων, όσον αφορά το μέγεθος το οποίο μετρούν:

- Vector μαγνητόμετρα: μετρούν τις συνιστώσες του πεδίου σε δεδομένο σύστημα συντεταγμένων
- Scalar ή total field μαγνητόμετρα: μετρούν την ένταση του πεδίου.

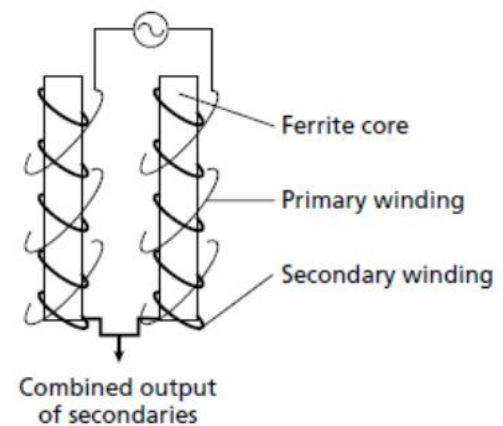
Επίσης μπορούν να διαχωριστούν και ως εξής:

- Βαριόμετρα (variometer): μετρά την σχετική μεταβολή του πεδίου
- Απόλυτα (absolute) μαγνητόμετρα: μετρούν την απόλυτη ένταση του πεδίου

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μαγνητομέτρων, των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε διαφορετικές φυσικές αρχές και διαφοροποιούνται ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους<sup>11</sup>. Συνήθης τύπος μαγνητομέτρου, που χρησιμοποιείται και από το δίκτυο ENIGMA, αποτελούν τα μαγνητόμετρα fluxgate.

Το μαγνητόμετρο τύπου fluxgate βασίζεται στην χαρακτηριστική ιδιότητα υλικών μεγάλης μαγνητικής επιδεικτικότητας να λαμβάνουν μέγιστη τιμή μαγνήτισης κάτω από την επίδραση σχετικά ασθενούς μαγνητικού πεδίου.

Αποτελείται από δύο ράβδους κατασκευασμένες από τέτοιο υλικό, το οποίο να μαγνητίζεται υπό την επίδραση του ασθενούς μαγνητικού πεδίου της Γης. Καθεμία από τις ράβδους περιβάλλεται από ένα πρωτεύον πηνίο, το οποίο έχει τυλιχθεί αντίστροφα γύρω από κάθε ράβδο. Το πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο επάγει μαγνητικό πεδίο στους δύο πυρήνες, ίδιας έντασης και αντίθετης κατεύθυνσης. Οι δύο πυρήνες και το πρωτεύον πηνίο περιβάλλονται από δευτερεύον πηνίο, στο οποίο παράγεται διαφορά δυναμικού. Απουσία εξωτερικού πεδίου, η διαφορά



Εικόνα 22: Σχηματική αναπαράσταση fluxgate μαγνητομέτρου

<sup>11</sup> Ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει πληροφορίες για άλλα γνωστά είδη μαγνητομέτρων στο Παράρτημα.

τάσης είναι μηδέν. Όμως, παρουσία του μαγνητικού πεδίου της Γης, το πεδίο στη μία ράβδο θα ενισχύεται ενώ στην άλλη θα υστερεί, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μετρήσιμη διαφορά δυναμικού στο δευτερεύον πηνίο, η οποία είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου στη διεύθυνση των πυρήνων.

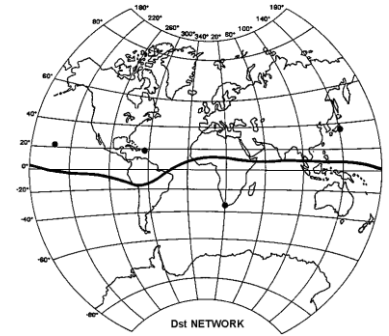
## 1.2. Δείκτες Γεωμαγνητικής Δραστηριότητας

Υπάρχουν αρκετοί δείκτες της γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Πιο χαρακτηριστικοί είναι ο  $D_{st}$ , ο AE, ο SYM-H, ο  $K_p$  κ.ά. Παρακάτω θα εξηγήσουμε τρεις δείκτες οι οποίοι εμφανίζονται στην βιβλιογραφία της παρούσας εργασίας: τον  $D_{st}$ , τον  $K_p$  και τον RC.

### 1.2.1. Disturbance Storm Time index-δείκτης $D_{st}$

Ο  $D_{st}$  είναι ωριαίος δείκτης, ο οποίος παρέχεται από το World Data Center for Geomagnetism, Κγτο από τον Οκτώβριο του 1957. Υπολογίζεται από τέσσερις επίγειους σταθμούς σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη ανά τον κόσμο. Αυτοί οι σταθμοί είναι οι εξής:

- Hermanus (19.22°E -34.40° N)
- Kakioka (140.18°E - 36.23° N)
- Honolulu (201.98- °E 21.32° N)
- San Juan (293.88°E - 18.11° N)



Εικόνα 23: Δίκτυο σταθμών υπολογισμού του  $D_{st}$   
(Πηγή : <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>)

Τα δεδομένα αυτών των σταθμών διορθώνονται με αφαίρεση κατάλληλου baseline και της συνεισφοράς του  $S_q$  με συγκεκριμένη διαδικασία<sup>12</sup>.

Ο δείκτης  $D_{st}$ , που προκύπτει μετά από την παραπάνω διαδικασία, αποτελεί πρακτικά δείκτη της έντασης του δακτυλιοειδούς ρεύματος και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και την κατηγοριοποίηση μαγνητικών καταιγίδων. Για την ακρίβεια, θεωρείται ότι για τιμές του  $D_{st}$  μικρότερες των -30nT έχουμε καταιγίδα.

### 1.2.2. Δείκτης $K_p$

Οι μεταβολές της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου αξιολογούνται με βάση τον δείκτη K, ο οποίος υπολογίζεται από το Γερμανικό Ερευνητικό Κέντρο Γεωεπιστημών (GFZ German Research Centre for Geosciences/ Deutsches GeoForschungsZentrum). Ο δείκτης αυτός παίρνει ακέραιες τιμές 0-9, όπου οι τιμές μεγαλύτερες του 5 αντιστοιχούν σε γεωμαγνητικές καταιγίδες. Κυριώς χρησιμοποιείται ο παγκόσμιος δείκτης  $K_p$ , οποίος προκύπτει από την μέση τιμή των δεικτών K από δίκτυο 13 παρατηρητηρίων ανά τον κόσμο, τα οποία βρίσκονται σε μη πολικές περιοχές. Ο δείκτης  $K_p$  μετριέται 8 φορές κάθε ημέρα.

Ο δείκτης  $K_p$  χρησιμοποιείται για την εύρεση των «πιο ήσυχων» (quietest days/Q-days) και «πιο διαταραγμένων» (most disturbed days/D-days) ημερών των μήνα, με βάση τρία κριτήρια:

1. Το άθροισμα των 8 τιμών του δείκτη  $K_p$
2. Το άθροισμα των τετραγώνων των 8 τιμών του δείκτη  $K_p$ .
3. Η μέγιστη τιμή από τις 8 τιμές του δείκτη  $K_p$ .

Με βάση κάθε ένα από αυτά τα κριτήρια, κάθε ημέρα ταξινομείται κατά αύξοντα αριθμό, με αποτέλεσμα να αντιστοιχούν σε κάθε ημέρα τρεις ακέραιοι αριθμοί. Για κάθε ημέρα, βρίσκεται ο μέσος όρος των τριών αυτών αριθμών και έτσι οι 5 ημέρες με το χαμηλότερο μέσο όρο αντιστοιχούν στις πιο ήσυχες ενώ οι 5 ημέρες με το μεγαλύτερο μέσο μέσο όρο ως οι πιο διαταραγμένες.

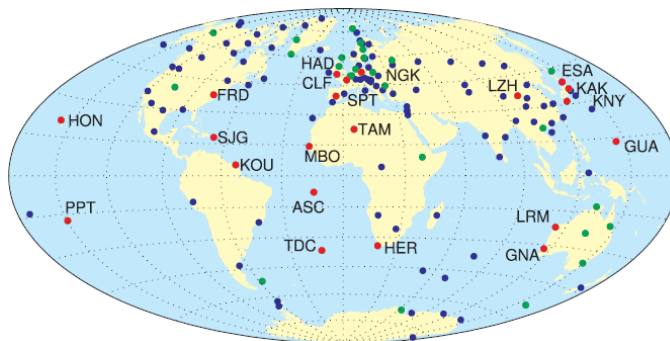
### 1.2.3. Ring Current index-Δείκτης RC<sup>[8]</sup>

Ο RC ονομάζεται δείκτης έντασης μαγνητοσφαιρικού δακτυλιοειδούς ρεύματος (RC index) και εισήχθη το 2002 από τον Nils Olsen με σκοπό να αποφευχθούν προβλήματα που εμφανίζονται στο baseline του  $D_{st}$ . Επίσης ο δείκτης RC θεωρείται πιο ακριβής, γιατί περιγράφει το μαγνητοσφαιρικό πεδίο και σε γεωμαγνητικά ήρεμες περιόδους, σε αντίθεση με το  $D_{st}$ .

<sup>12</sup> <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>

Χωρίζεται σε δύο τμήματα, το εξωτερικό  $\epsilon(t)$  και το επαγόμενο  $i(t)$ :  $RC(t)=\epsilon(t)+i(t)$ .

Ο δείκτης RC υπολογίζεται από 21 παρατηρητήρια σε χαμηλά και μεσαία γεωγραφικά πλάτη (βλ. Εικόνα 4), με σφαιρική αρμονική ανάλυση των ωριαίων μέσων τιμών που προκύπτουν από τα παρατηρητήρια αυτά (βλ. CHAOS-4 model paper).



Εικόνα 24: Παρατηρητήρια που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη RC (κόκκινες τελείες) (Πηγή: [8])

### 1.3. Μοντέλα περιγραφής του μαγνητικού πεδίου και των μεταβολών του

Το πρώτο ρεαλιστικό μοντέλο του μαγνητικού πεδίου της Γης αναπτύχθηκε από τον C.F.Gauss στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, μετά από συστηματικές μελέτες του πεδίου. Τον 20<sup>ο</sup> αιώνα αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα περιγραφής του εδογενούς μαγνητικού πεδίου της Γης, που αφορούν τις χωρικές και χρονικές μεταβολές του. Παράλληλα, παράγονται μοντέλα που περιλαμβάνουν συνιστώσες του γεωμαγνητικού πεδίου κατόπιν μελέτης των διάφορων μηχανισμών που τις παράγουν, όπως για παράδειγμα της λιθόσφαιρας, της ιονόσφαιρας, της μαγνητόσφαιρας κá. Μοντέλα που αναπτύσσουν περιγραφή όλων ή σχεδόν όλων των συνιστωσών ονομάζονται περιεκτικά (comprehensive models). Παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι η σειρά CM.

Στην παρούσα εργασία δουλεύουμε με δύο μοντέλα, το IGRF-12 και το CHAOS-6, όπως θα αναλυθεί στις επόμενες δύο υποενότητες.

#### 1.3.1. International Geomagnetic Reference Field [9]

Το IGRF είναι μαθηματικό μοντέλο περιγραφής του κύριου μαγνητικού πεδίου της Γης και των μεταβολών του. Δημιουργήθηκε το 1965 και παράγεται από δεκάδες διεθνείς ερευνητικές ομάδες και παρατηρητήρια υπό την αιγίδα της Διεθνής Ένωση Γεωδαισίας και Γεωφυσικής (IAGA: International Association of Geomagnetism and Aeronomy <http://www.iaga-aiga.org/>). Οι μετρήσεις παίρνονται από επίγεια παρατηρητήρια και δορυφόρους χαμηλής τροχιάς. Το μοντέλο παρέχει περιγραφή του ενδογενούς μαγνητικού πεδίου από το 1900 μέχρι σήμερα. Σε τακτά χρονικά διαστήματα πρέπει να ανανεώνεται, για να μπορεί να ακολουθεί τις μεταβολές που υφίσταται το πεδίο. Υπάρχουν 12 γενιές του μοντέλου, όπως φαίνεται στον πίνακα.

Πίνακας 1: Γενιές του IGRF (Πηγή: [9])

Full name	Short name	Valid for	Definitive for	Reference
IGRF 12th generation	IGRF-12	1900.0-2020.0	1945.0-2010.0	Thébault et al, this article
IGRF 11th generation	IGRF-11	1900.0-2015.0	1945.0-2005.0	Finlay et al. (2010a)
IGRF 10th generation	IGRF-10	1900.0-2010.0	1945.0-2000.0	Maus et al. (2005)
IGRF 9th generation	IGRF-9	1900.0-2005.0	1945.0-2000.0	Macmillan et al. (2003)
IGRF 8th generation	IGRF-8	1900.0-2005.0	1945.0-1990.0	Mandea and Macmillan (2000)
IGRF 7th generation	IGRF-7	1900.0-2000.0	1945.0-1990.0	Barton (1997)
IGRF 6th generation	IGRF-6	1945.0-1995.0	1945.0-1985.0	Langel (1992)
IGRF 5th generation	IGRF-5	1945.0-1990.0	1945.0-1980.0	Langel et al. (1988)
IGRF 4th generation	IGRF-4	1945.0-1990.0	1965.0-1980.0	Barracough (1987)
IGRF 3rd generation	IGRF-3	1965.0-1985.0	1965.0-1975.0	Peddie (1982)
IGRF 2nd generation	IGRF-2	1955.0-1980.0	-	IAGA (1975)
IGRF 1st generation	IGRF-1	1955.0-1975.0	-	Zmuda (1971)

Κάθε γενιά αποτελείται από τρεις εκδοχές: Μία οριστική (definite), η οποία έχει υποστεί όλες τις απαραίτητες διορθώσεις. Μία μη-οριστική (non-definite) εκδοχή, η οποία έχει υποστεί κάποιες διορθώσεις θα καταστεί οριστική σε μετέπειτα γενιά του IGRF. Η τρίτη αφορά τις χρονικές μεταβολές του κύριου πεδίου (secular variation).

Όπως περιγράφηκε πιο πάνω (1.1.4 β)), θεωρούμε ότι το στην επιφάνεια της Γης και κοντά σε αυτήν η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης μπορεί να θεωρηθεί ως η κλίση ενός δυναμικού.

$$\vec{B} = -\vec{\nabla}V, \text{ άρα } V = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \cdot P_n^m(\cos\theta)$$

$\alpha$ : ακτίνα Γης=6371,2km

$\phi$ : γεωγραφικό μήκος (Longitude)

$\theta$ : γεωγραφικό πλάτος (Latitude)

$T_0 \leq t \leq T_0+5$  (yr)

Οι παράμετροι Gauss  $g_n^m$  και  $h_n^m$  είναι συναρτήσεις του χρόνου και δίνονται σε nT, παρέχονται από το μοντέλο ανά 5 χρόνια και θεωρείται ότι έχουν γραμμική εξάρτηση με το χρόνο:

$$g_n^m(t) = g_n^m(T_0) + \dot{g}_n^m(T_0)(t - T_0) (\alpha)$$

$$h_n^m(t) = h_n^m(T_0) + \dot{h}_n^m(T_0)(t - T_0) (\beta)$$

Εξισώσεις 24 (α), (β): Παράμετροι Gauss στο IGRF

Όπου οι όροι  $\dot{g}_n^m(T_0)$  και  $\dot{h}_n^m(T_0)$  είναι η 1<sup>η</sup> τάξης παράγωγοι των παραμέτρων Gauss και μετριοούνται σε nT/year.  $t$  είναι το ζητούμενο έτος, ενώ  $T_0$  είναι το έτος που προηγείται ακριβώς κατά 5 έτη ( $T_0 \leq t \leq T_0+5$ )

Μπορούν να υπολογιστούν από την παραπάνω σχέση ως  $\frac{g_n^m(t) - g_n^m(T_0)}{t - T_0}$  και  $\frac{h_n^m(t) - h_n^m(T_0)}{t - T_0}$  αντίστοιχα.

Το IGRF-12, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, είναι η νεότερη γενιά του μοντέλου IGRF. Υιοθετήθηκε το 2014 και δίνει οριστική εκδοχή μέχρι και το 2010, μη-οριστική εκδοχή για το 2015 και πρόβλεψη για την χρονική μεταβολή της χρονικής περιόδου 2015-2020.

### 1.3.2. CHAOS<sup>[10]</sup>

Το CHAOS δημιουργήθηκε το 2006 από τους Olsen et. al. Το όνομα του είναι προς τιμήν της τυχαίας και χαώδους φύσης του γήινου μαγνητικού πεδίου. Εισάγει περιγραφή του κύριου πεδίου και των μεταβολών του, καθώς και του μαγνητοσφαιρικού πεδίου. Το τελευταίο είναι αποτέλεσμα του δακτυλιοειδούς ρεύματος, αλλά και μακρινότερων πηγών, όπως η μαγνητόπαυση και η μαγνητούρα. Οι μετρήσεις του αρχικού μοντέλου προκύπτουν κυρίως από τους δορυφόρους CHAMP, Ørsted και SAC-C, αν και στη συνέχεια οι νεότερες γενιές του μοντέλου εμπλουτίζονται από δεδομένα επίγειων παρατηρητήριων και της αποστολής Swarm. Το CHAOS αποτελεί ανώτερο μοντέλο σε σχέση με άλλα μοντέλα του μαγνητικού πεδίου της Γης, καθώς διαθέτει μεγαλύτερη ακρίβεια στο χώρο και το χρόνο. Αφενός χρησιμοποιεί προηγμένες μεθόδους συλλογής και βελτιωμένα κριτήρια επιλογής δεδομένων, αφετέρου βελτιώνει τη μαθηματική περιγραφή του πεδίου, όπως η χρήση splines.

Το CHAOS-6 υιοθετήθηκε το 2016 και αναβαθμίζει το προηγούμενο μοντέλο με δεδομένα δύο χρόνων από το Swarm από 160 επίγεια παρατηρητήρια και μοντελοποιεί το ενδογενές πεδίο για την περίοδο 1999-2016.5.

Στο μοντέλο αυτό το μαγνητικό πεδίο είναι η κλίση ενός δυναμικού, το οποίο αποτελεί επαλληλία του δυναμικού του κύριου πεδίου και του δυναμικού των εξωτερικών πηγών:  $\vec{B} = -\vec{\nabla}V, V = V^{int} + V^{ext}$ .

Το δυναμικό του πυρήνα προκύπτει ως :

$$V^{int} = a \sum_{n=1}^{N_{int}} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \cdot P_n^m(\cos\theta) \quad (\text{Εξίσωση 25: δυναμικό του κύριου πεδίου στο CHAOS})$$

**α:** ακτίνα Γης=6371,2km

**φ:** γεωγραφικό μήκος (Longitude)

**θ:** γεωγραφικό πλάτος (Latitude)

Εδώ οι συντελεστές Gauss υπολογίζονται ως 6<sup>ου</sup> βαθμού συναρτήσεις B-splines (K=6).

$$g_n^m(t) = \sum_{k=1}^K g_n^{m,k} B_k(t) \quad (\alpha)$$

$$h_n^m(t) = \sum_{k=1}^K h_n^{m,k} B_k(t) \quad (\beta)$$

(Εξισώσεις 26 (α), (β): Παράμετροι Gauss στο CHAOS-6)

Όπου οι όροι  $g_n^{m,k}$  και  $h_n^{m,k}$  είναι οι παράμετροι splines υπολογισμένες για κάθε παράμετρο Gauss,  $B_k$  είναι οι συναρτήσεις βάσης της συνάρτησης spline.

Για το εξωτερικό πεδίο:

$$V^{ext} = a \sum_{n=1}^2 \sum_{m=0}^n [q_n^m \cos(mT_d) + s_n^m \sin(mT_d)] \left(\frac{r}{a}\right)^n P_n^m(\cos\theta_d) + a \sum_{n=1}^2 q_n^{0,GSM} R_n^0(r, \theta, \varphi)$$

(Εξίσωση 27: δυναμικό εξωτερικών πεδίων στο CHAOS)

Ο πρώτος προσθεταίος της εξίσωσης αφορά το πεδίο του δακτυλιοειδούς ρεύματος, όπου η άθροιση των όρων γίνεται μέχρι τον βαθμό n=2. Οι παράμετροι υπολογίζονται σε ηλιακές μαγνητοσφαιρικές συντεταγμένες (SM). Η γωνία  $\theta_d$  είναι συμπληρωματική του γεωγραφικού πλάτους στο σύστημα SM (dipole co-latitude) και  $T_d$  η τοπική ώρα (ή γεωγραφικό μήκος) στο σύστημα SM (dipole local time).

Οι παράμετροι 1<sup>ου</sup> βαθμού στις SM συντεταγμένες εξαρτώνται αποκλειστικά από τον χρόνο και δίνονται ως εξής:

$$q_1^0(t) = \hat{q}_1^0 \left[ \varepsilon(t) + \iota(t) \left(\frac{a}{r}\right)^3 \right] + \Delta q_1^0(t) \quad (\alpha)$$

$$q_1^1(t) = \hat{q}_1^1 \left[ \varepsilon(t) + \iota(t) \left(\frac{a}{r}\right)^3 \right] + \Delta q_1^1(t) \quad (\beta)$$

$$s_1^1(t) = \hat{s}_1^1 \left[ \varepsilon(t) + \iota(t) \left(\frac{a}{r}\right)^3 \right] + \Delta s_1^1(t) \quad (\gamma)$$

Εξίσωση 28: Παράμετροι δυναμικού εξωτερικών πηγών στο CHAOS

Οι παράμετροι  $\hat{q}_1^0$ ,  $\hat{q}_1^1$  και  $\hat{s}_1^1$  ονομάζονται συντελεστές παλινδρόμησης (regression factors) και οι παράμετροι  $\Delta q_1^0(t)$ ,  $\Delta q_1^1(t)$  και  $\Delta s_1^1(t)$  RC baseline corrections.

Να σημειωθεί ότι ο δείκτης RC προτιμήθηκε σε νεότερες εκδόσεις του CHAOS αντί του δείκτη Dst, που παραδοσιακά χρησιμοποιείται στην περιγραφή του μαγνητοσφαιρικού πεδίου, καθώς το baseline του D<sub>st</sub> μεταβάλλεται με το χρόνο και έτσι δυσκολεύει την μοντελοποίηση του μαγνητικού πεδίου.

Ο δεύτερος προσθετέος αφορά το ρεύμα των μακρινών πηγών, δηλαδή της μαγνητόπαυσης και της μαγνητούρας, όπου παίρνουμε τους όρους έως n=2 αλλά μόνο m=0.

Ο δείκτης <sup>GSM</sup> αναφέρεται στις γεωκεντρικές ηλιακές μαγνητοσφαιρικές συντεταγμένες.

Οι συναρτήσεις  $R_n^0(r, \theta, \varphi)$  είναι τροποποιημένες συναρτήσεις Legendre και περιγράφουν αποκλειστικά το επαγόμενο πεδίο λόγω της κλόνισης του z-άξονα στις GSM συντεταγμένες σε σχέση με τον άξονα περιστροφής της Γης.

### 1.3.3. Κριτήρια επιλογής δεδομένων<sup>[10]</sup>

Η επιλογή των δεδομένων για την υποστήριξη των μοντέλων δεν είναι τετριμμένη. Απαιτεί την ανάπτυξη μεθόδων εξάλειψης ανεπιθύμητων παραγόντων (π.χ. μεταβολή του πεδίου λόγω ηλιακών φαινομένων κ.ά) και συστηματικών ή τυχαίων σφαλμάτων. Ακόμα, η χρήση στατιστικών μεθόδων για την αξιολόγηση των δεδομένων είναι απαραίτητη.

Για τα δορυφορικά δεδομένα, μπορούμε να αναφέρουμε πολύ συνοπτικά τα εξής κριτήρια:

- Επιλογή δεδομένων από την σκοτεινή πλευρά της Γης (γωνία Ήλιου τουλάχιστον  $10^\circ$  κάτω από τον ορίζοντα), ώστε να εξαλειφθεί η επίδραση του  $S_q$  αλλά και άλλων φαινομένων που σχετίζονται με την Ήλιο.
- Πολύ μικρή ένταση του δακτυλιοειδούς ρεύματος (όπως καθορίζεται από μικρή μεταβολή του δείκτη  $D_{st}$  ή του δείκτη RC)
- Επιλογή σχετικά χαμηλών γεωγραφικών πλατών
- Σε μη-πολικές περιοχές σχετική μικρή γεωμαγνητική δραστηριότητα (όπως ορίζεται από τον δείκτη  $K_p$ ).
- Μικρή ένταση ρεύματος της μαγνητόπαυσης και της μαγνητοουράς
- Μικρή ταχύτητα ηλιακού ανέμου
- Στο μοντέλο CHAOS-6 επιλέγεται επίσης η κάθετη συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Interplanetary Magnetic Field)  $B_{z,IMF} > 0$ , ώστε να αποφευχθούν γεωμαγνητικές διαταραχές

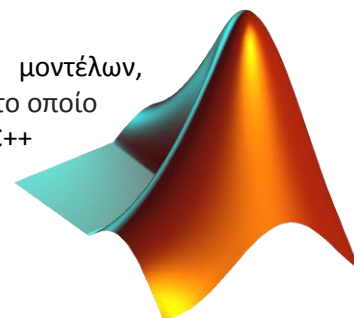
Τα δεδομένα των δορυφόρων αλλά και των επίγειων σταθμών πρέπει να ελεγχθούν για σφάλματα, όπως χονδροειδή σφάλματα λόγω εξωγενών παραγόντων (spikes), σφάλματα οργάνων κ.ά.

Για τα επίγεια δεδομένα, είναι απαραίτητη η αφαίρεση της επίδρασης του  $S_q$  ή/και μαγνητοσφαιρικών συνεισφορών, που γίνεται σε πολλές περιπτώσεις με τη χρήση μοντέλων.

## 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

### 2.3. Το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB

Για την επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και για την εφαρμογή των μοντέλων, χρησιμοποιούμε το προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB (MATrix LABoratory), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την MathWorks ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)). Είναι γραμμένο στην C++ και αποτελεί ένα σύγχρονο και εύχρηστο εργαλείο για πολλούς κλάδους της επιστήμης. Η πρώτη έκδοση της κυκλοφόρησε το 1984<sup>13</sup>. Για την εργασία, χρησιμοποιούμε την έκδοση 2017a.



Εικόνα 25: Λογότυπο της MATLAB  
Πηγή: Wikipedia

### 2.4. Μαγνητομετρικοί Σταθμοί

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε δεδομένα από το 2015 από συνολικά 5 επίγειους σταθμούς μαγνητομέτρων.

Πιο συγκεκριμένα, οι σταθμοί παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σταθμός	Κωδικός	Χώρα	Οργανισμός	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Υψόμετρο (m)	Σύστημα συντεταγμένων
Διόνυσος	DION	Ελλάδα	Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)	38.08°N	23.93°E	460	GEO
Βελιές	VLI	Ελλάδα	Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)	36.72°N	22.95°E	220	GEO
Κλοκωτός	THL	Ελλάδα	Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)	39.56°N	22.01°E	86	GEO
Κακιόκα	KAK	Ιαπωνία	Japan Meterological Agency	53.77°N	140.13°E	46	MAG
Resolute Bay	RES	Καναδάς	Geological Survey of Canada	74.69°N	265.11°E	30	MAG

Πίνακας 2: Πίνακας με πληροφορίες για τους 5 σταθμούς που χρησιμοποιούνται στην εργασία

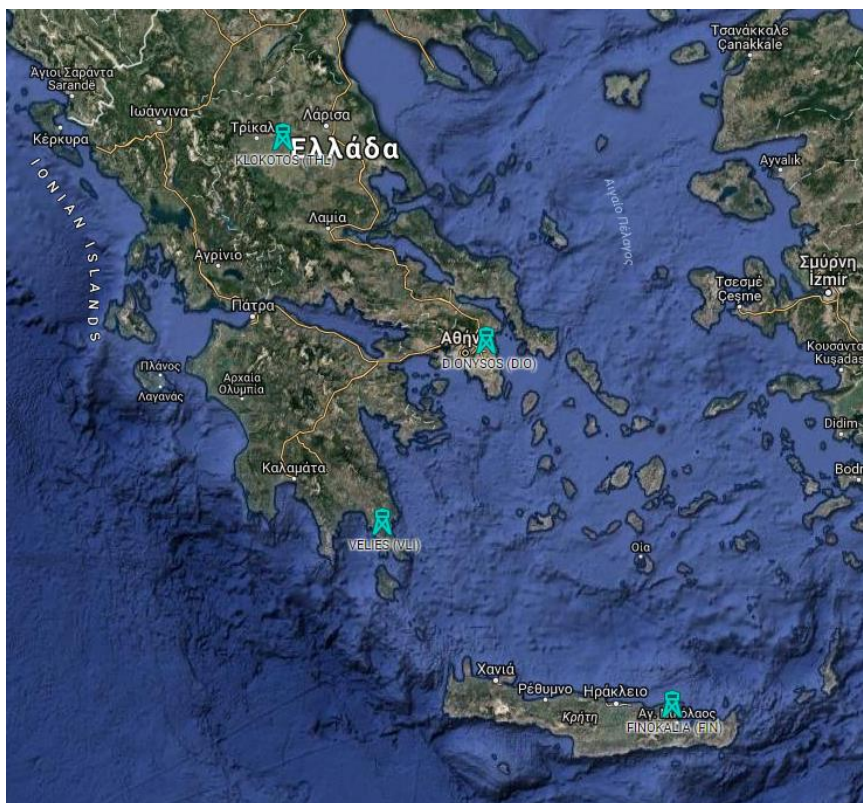
<sup>13</sup> Περισσότερες πληροφορίες για την λειτουργία της MATLAB ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει στην ιστοσελίδα [https://se.mathworks.com/support.html?s\\_tid=gn\\_supp](https://se.mathworks.com/support.html?s_tid=gn_supp)



## 2.2.1. ENIGMA

Οι τρεις πρώτοι υπάγονται στο **Hellenic GeoMagnetic Array (ENIGMA)**, το οποίο αποτελεί δίκτυο 4 μαγνητομετρικών σταθμών στην Ελλάδα και λειτουργεί υπό την αιγίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών-ΕΑΑ (National Observatory of Athens-NOA). Αποτελείται από τους σταθμούς Διόνυσος (Αττική), Βελιές (Λακωνία), Κλοκωτός (Τρίκαλα) και Φινοκάλια (Λασιθί). Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιούμε δεδομένα από τα Φινοκάλια.

Το **ENIGMA** αποτελεί το πρώτο δίκτυο μαγνητομέτρων στην Ελλάδα και παρέχει μετρήσεις γεωμαγνητικών παλμών που προκύπτουν από την μαγνητική επανασύνδεση μεταξύ ηλιακού ανέμου και μαγνητόσφαιρας. Ακόμα, μελετά τις μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο της Γης λόγω γεωμαγνητικών καταιγίδων και τα χαμηλής συχνότητας κύματα που αναπτύσσονται στην μαγνητόσφαιρα. Μάλιστα, ένας βασικός ερευνητικός στόχος του ENIGMA είναι η μελέτη της επίδρασης του διαστημικού καιρού στο έδαφος, για παράδειγμα τα γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα **GIC** (Geomagnetic Induced Currents).

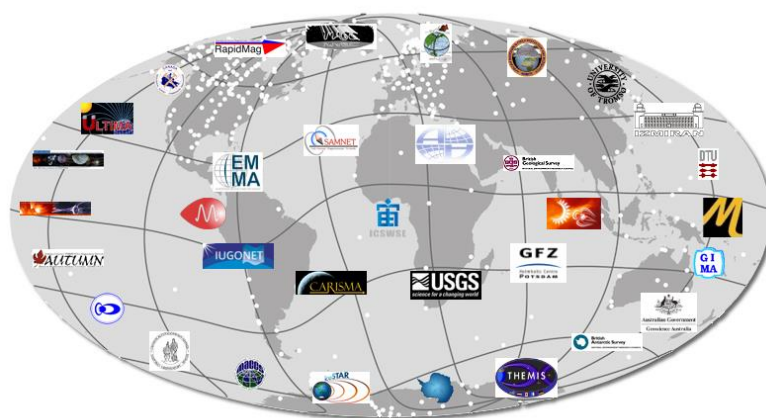


Εικόνα 26: Τοποθεσία των 4 σταθμών του ENIGMA (Πηγή: <http://enigma.space.noa.gr>)

## 2.2.2. SuperMAG

Το ENIGMA υπάγεται στον οργανισμό **SuperMAG**, ο οποίος αποτελεί διεθνή συνεργασία οργανισμών και εθνικών υπηρεσιών, συλλέγει δεδομένα επίγεια μαγνητόμετρα ανά τον κόσμο και παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα των διαταραχών του γεωμαγνητικού πεδίου στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων, στην ίδια χρονική ανάλυση (time resolution) και με κοινή μέθοδο καθορισμού baseline. Επίσης παρέχει δεδομένα του ηλιακού ανέμου, όπως η ταχύτητα και η ένταση του μαγνητικού του πεδίου, η πίεση και η πυκνότητα του.

Το **SuperMAG** παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα από 215 διαθέσιμους σταθμούς μαγνητομέτρων ανά τον κόσμο σε μαγνητοσφαιρικό σύστημα συντεταγμένων (MAG), ενώ συνολικά στον οργανισμό υπάγονται 536 σταθμοί.



Εικόνα 27: Το δίκτυο SUPERMAG (<http://supermag.jhuapl.edu>)

Επιλέγουμε τους δύο σταθμούς Kakioka και Resolute Bay :

Από το 1973, ο σταθμός Kakioka αποτελεί έναν από τους 4 σταθμούς διεθνώς που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη Dst. Πέρα από την συμβολή του σταθμού στην παρατήρηση και μελέτη του γεωμαγνητικού πεδίου, ξεχωρίζει για τα προηγμένα όργανα και τεχνικές. (<http://www.kakioka-jma.go.jp/en/index.html>)

Ο σταθμός Resolute Bay λειτουργεί από το 1948 στον Καναδά, δηλαδή σε μεγάλο γεωγραφικό πλάτος. (<http://www.geomag.nrcan.gc.ca/obs/res-en.php>)



Εικόνα 28:

Αριστερά: Σταθμός resolute Bay, Καναδάς, Δεξιά: σταθμός Kakioka, Ιαπωνία

## 2.5. Επεξεργασία των δεδομένων

Η πορεία της γραφικής απεικόνισης και επεξεργασίας των δεδομένων δεν είναι τετριμένη.

Πρώτο βήμα είναι η κατανόηση του συστήματος συντεταγμένων στα οποία απεικονίζονται οι μετρήσεις και η απεικόνιση όλων των δεδομένων σε κοινό σύστημα συντεταγμένων (GEO).

Παράλληλα, είναι απαραίτητη η εύρεση σφαλμάτων και η επιλογή του βέλτιστου τρόπου αντιμετώπισης. Στην 1<sup>η</sup> ενότητα αυτού του κεφαλαίου παραθέτουμε τα βασικά είδη σφαλμάτων, η επίλυση των οποίων σε κάθε περίπτωση αναλύεται στις επόμενες ενότητες.

### 2.3.1. Είδη σφαλμάτων

Τα σφάλματα αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο μιας πραγματικής μέτρησης. Οφείλονται σε σφάλματα των οργάνων, τυχαίους εξωτερικούς παράγοντες, την ανθρώπινη διακριτική ικανότητα κ. Ά. Μπορούμε να τα χωρίσουμε στις εξής κατηγορίες:

- Τυχαία: οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες, δηλαδή δεν μπορούν να προβλεφθούν και να εξαλειφθούν πλήρως. Η μέση τιμή τους τείνει στο μηδέν και συνδέονται με θόρυβο στα όργανα ή τυχαίους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις.
- Συστηματικά: μεταπορίζουν τις μετρήσεις κατά μία τιμή και οφείλονται συνήθως σε κακό υπολογισμό εξωτερικών παραγόντων (π.χ. θερμοκρασία), λάθος βαθμονόμηση οργάνων ή πρόβλημα στο όργανο.
- Χονδροειδή: εμφανίζονται ως πολύ ακραίες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες του δείγματος και δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο δείγμα. Σχετίζονται συνήθως με ανθρώπινο λάθος αλλά συνδέονται και με τα όργανα και εξωτερικούς παράγοντες.

Στις δύο επόμενες ενότητες παραθέτουμε αναλυτικά την μέθοδο επεξεργασίας των δεδομένων μας και τα σφάλματα τα οποία συναντάμε.

### 2.3.2. Τα δεδομένα του ENIGMA

Τα δεδομένα από τους 3 σταθμούς του ENIGMA παρέχονται κατευθείαν από τα μαγνητόμετρα χωρίς πρότερη επεξεργασία. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται κατάλληλη διόρθωση των δεδομένων από σφάλματα.

Τα αρχεία δίνονται ανά ημέρα σε μορφή \*.pc για τους σταθμούς DION και VLI και σε μορφή \*.TXT για τον σταθμό THL. Για τους σταθμούς DION και VLI έχουμε 1 μέτρηση το δευτερόλεπτο, άρα έχουμε 86400 σημεία ανά ημέρα και για τον σταθμό THL έχουμε 5 μετρήσεις το δευτερόλεπτο, άρα 432000 σημεία ανά ημέρα.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, για τον σταθμό DION έχουμε καταγραφή για όλους τους μήνες, ενώ για στο σταθμό VLI λείπουν οι μήνες Ιανουάριος και Δεκέμβριος και για τον THL λείπουν οι μήνες Ιανουάριος-Μάιος.

DIONYSOS (DION)	VELIES (VLI)	KLOKOTOS (THL)
• Μετρήσεις ανά ημέρα	• Μετρήσεις ανά ημέρα	• Μετρήσεις ανά ημέρα
• Μέτρηση ανά sec	• Μέτρηση ανά sec	• Μέτρηση ανά 0.2 sec
• 86400 σημεία ανά ημέρα	• 86400 σημεία ανά ημέρα	• 432000 σημεία ανά ημέρα
• 2419200/2592000/ 2678400 ανά μήνα	• 2419200/2592000/ 2678400 ανά μήνα	• 12960000/1339200 ανά μήνα
• 12 μήνες	• 10 μήνες (όχι 1 <sup>ος</sup> και 12 <sup>ος</sup> )	• 7 μήνες (όχι 1 <sup>ος</sup> -5 <sup>ος</sup> )

Εικόνα 29: Στοιχεία των δεδομένων των τριών σταθμών του ENIGMA

Κάθε αρχείο (\*.pc και \*.TXT) αποτελείται από 11 στήλες, όπως φαίνεται στην εικόνα 30.

```

MS_29_151028000000 - Σημειωματάριο
-----
Αρχείο  Επεξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια
: MS:GEOMAG-02 #29-2014
: Date: 2015/10/27; Time: 00:00:00
: Sampling: 0.20 sec
: Latitude: 39 33'53.2"N; Longitude: 022 00'51.9"E; Altitude: -----
: Total Field: X = +26076nT; Y = -01196nT; Z = +38450nT
:
:      Date      Time      X [nT]    Y [nT]    Z [nT]    Ts[c]    Te[c]
:
: 2015 10 28    00 00 00.20 +0242.97 -0396.21 -0129.92 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 00.40 +0242.97 -0396.24 -0129.90 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 00.60 +0242.95 -0396.23 -0129.92 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 00.80 +0242.97 -0396.24 -0129.92 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 00.00 +0242.97 -0396.22 -0129.92 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 01.20 +0242.99 -0396.24 -0129.88 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 01.40 +0242.97 -0396.25 -0129.91 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 01.60 +0242.98 -0396.20 -0129.91 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 01.80 +0242.98 -0396.21 -0129.89 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 01.00 +0242.99 -0396.20 -0129.92 +18.9 +26.0
: 2015 10 28    00 00 02.70 +0242.99 -0396.22 -0129.93 +18.9 +26.0

```

Εικόνα 30: Αρχείο \*.TXT του THL. Οι στήλες από αριστερά προς τα δεξιά είναι: Έτος, Μήνας, Ημέρα, Ωρα, Λεπτό, Δευτερόλεπτο, Συνιστώσες X, Y, Z του πεδίου και μετρήσεις θερμοκρασίας που αφορούν το όργανο και το περιβάλλον

Τα αρχεία μπορούν να διαβαστούν κατευθείαν στο MATLAB ως πίνακες.

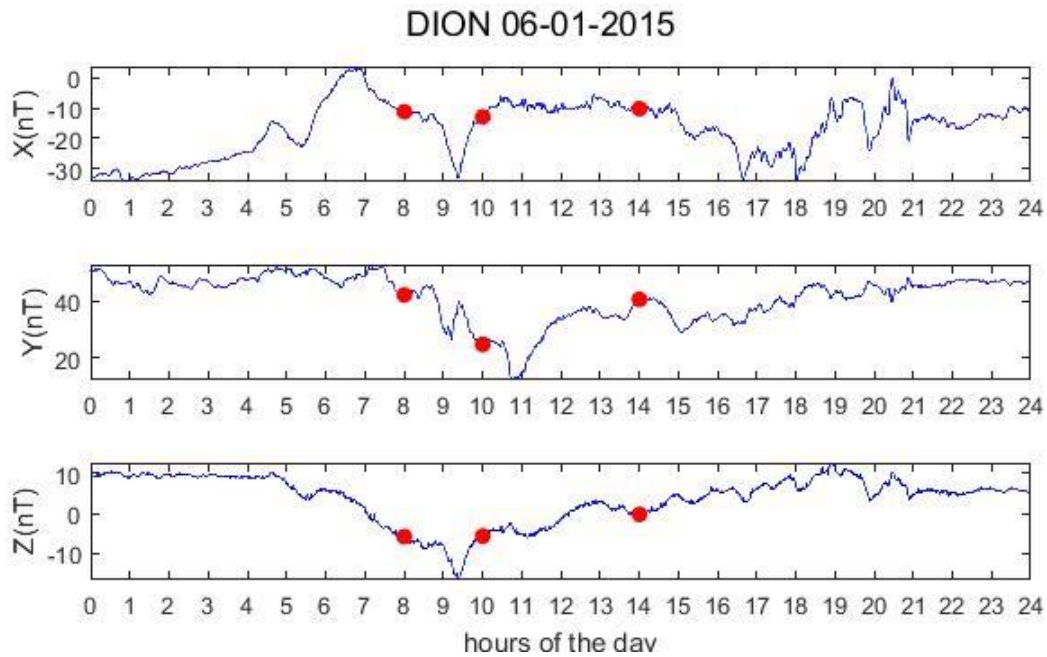
### Βήμα 1<sup>ο</sup>: Διόρθωση σφαλμάτων

Παρακάτω παραθέτουμε βασικές κατηγορίες σφαλμάτων και τη μέθοδο επεξεργασίας τους:

#### 1. Κενά στις μετρήσεις

Αντιλαμβανόμαστε την ύπαρξη κενών, καθώς ο αριθμός των σειρών κάθε πίνακα είναι μικρότερος από τον προβλεπόμενο.

- Μπορεί να είναι μεμονωμένα, δηλαδή να λείπει μία μέτρηση δευτερολέπτου, όπως φαίνεται στην εικόνα 29.



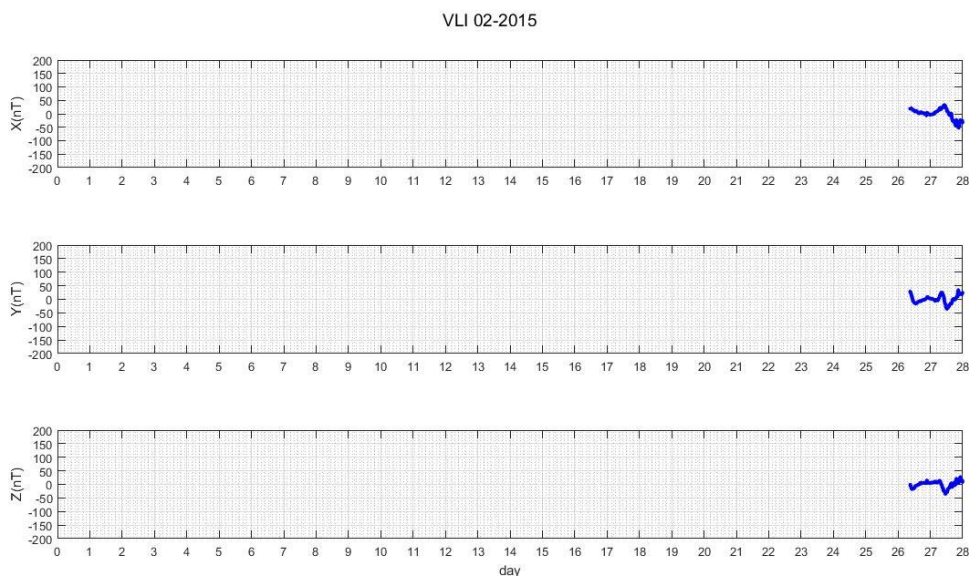
Εικόνα 31:Μεμονωμένα κενά σε ημέρα του DION. Σημειώνονται με κόκκινο κύκλο.

Για να τα βρούμε, ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Με το πρόγραμμα MATLAB καταγράφουμε την διαφορά των δευτερολέπτων κάθε σειράς. Εάν η διαφορά είναι μεγαλύτερη του 1, ή ίση με -58 (εάν λείπει το 0 δευτερόλεπτο ή το 1), αντικαθιστούμε την ενδιάμεση σειρά με NaN. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αποδειχτεί πολύ χρονοβόρα και δεν έχει ιδιαίτερη αξία, καθώς σε έκταση 1440 ή 86400 σημείων, ένα μεμονωμένο κενό σημείο είναι το 0.1% ή 0.01% επί του συνόλου. Γι' αυτό το λόγο, απλά προσθέτουμε ίσο αριθμό στοιχείων NaN στην αρχή ή το τέλος.

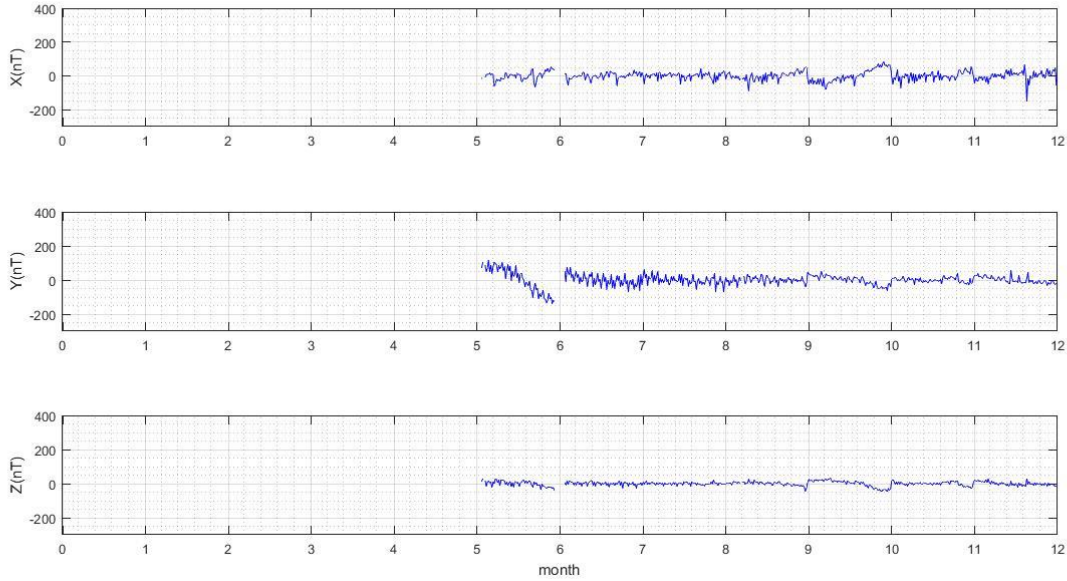
- ο Πιο σημαντικά είναι τα κενά που αφορούν ολόκληρα λεπτά, ώρες, ημέρες ακόμα και μήνες.

Σε αυτήν την περίπτωση επιλέγουμε να εντοπίσουμε το κενό στο αρχείο, είτε παρόμοια διαδικασία με παραπάνω ή χειροκίνητα, και το να αντικαταστήσουμε με κατάλληλο πίνακα-στήλη NaN.



Εικόνα 320: Κενό 26 ημερών στα δεδομένα του VLI

THL 2015

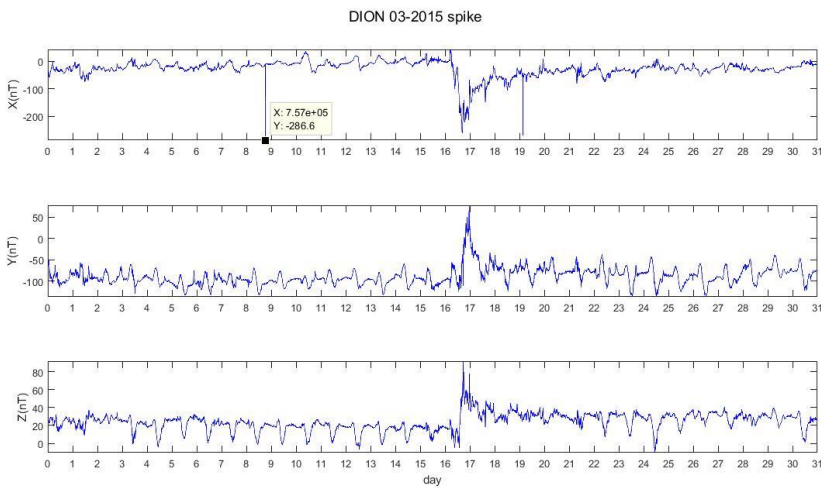


Εικόνα 33: Κενό 5 μηνών στα δεδομένα του THL

2) Ακραίες τιμές (spikes)

Οφείλονται πιθανώς σε σφάλματα του οργάνου ή παρεμβολές από τον περιβάλλοντα χώρο και δεν έχουν φυσική σημασία.

Για την διόρθωση μιας ακραίας τιμής (spike) ή περισσότερων, την αντικαθιστούμε με τον μέσο όρο των δύο διπλανών τιμών.



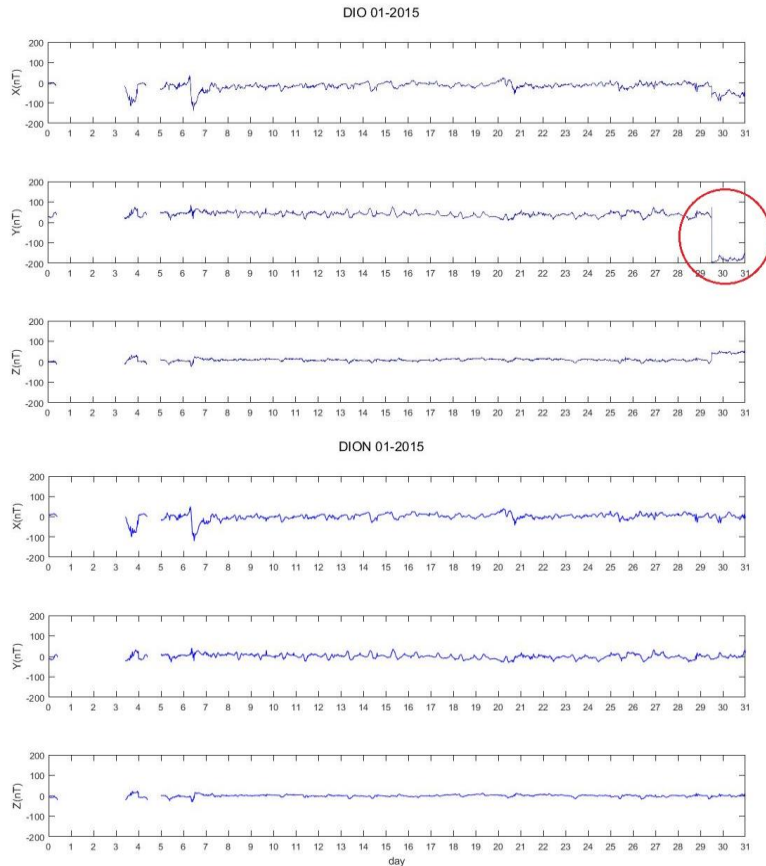
2015 03 09 18 16 56.00	-0011.41	-0107.43	+0022.39
2015 03 09 18 16 57.00	-0011.43	-0107.44	+0022.41
2015 03 09 18 16 58.00	-0011.41	-0107.39	+0022.41
2015 03 09 18 16 59.00	-0011.40	-0107.35	+0022.38
2015 03 09 18 17 00.00	-0286.63	-0107.34	+0022.40
2015 03 09 18 17 01.00	-0011.40	-0107.34	+0022.41
2015 03 09 18 17 02.00	-0011.38	-0107.33	+0022.39
2015 03 09 18 17 03.00	-0011.38	-0107.34	+0022.41
2015 03 09 18 17 04.00	-0011.39	-0107.34	+0022.40

Εικόνα 34: Spike στα δεδομένα του DION. Αριστερά: εμφάνιση του spike στο γράφημα. Δεξιά: Η τιμή του spike στο αρχείο

3) Μετατόπιση του μέσου όρου μεταβολής (συστηματικό σφάλμα)

Στην περίπτωση αυτή συναντάμε τμήμα της χρονοσειράς μετατοπισμένο κατά μία τιμή.

Για την αντιμετώπιση αυτού του σφάλματος, χωρίζουμε τον πίνακα των δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να απομονώσουμε το κομμάτι αυτό που είναι μετατοπισμένο κατά μία τιμή. Στη συνέχεια φέρνουμε τις τιμές γύρω από τον ίδιο μέσο όρο, το 0.



4) Άλλα σφάλματα των οργάνων ή/και κακή καταγραφή στα αρχεία

Σε λίγες περιπτώσεις συναντάμε και άλλα σφάλματα, που αφορούν κυρίως τον τρόπο καταγραφής των δεδομένων στα αρχεία, όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (36-39).

2015	06	30	23	59	59.00	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	00.20	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	00.40	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	00.60	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	00.80	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	00.00	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	01.20	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	01.40	-3200.53	-3200.53	-1920.32	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	01.60	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	01.80	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	01.00	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	02.20	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	02.40	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5
2015	07	01	00	00	02.60	-3200.53	-3200.53	-3200.53	+23.4	+35.5

Εικόνα 36: THL 1,2,3/7: Εμφανίζεται η ίδια μέτρηση. Την αγνοούμε γιατί δεν περιέχει μεταβολή.

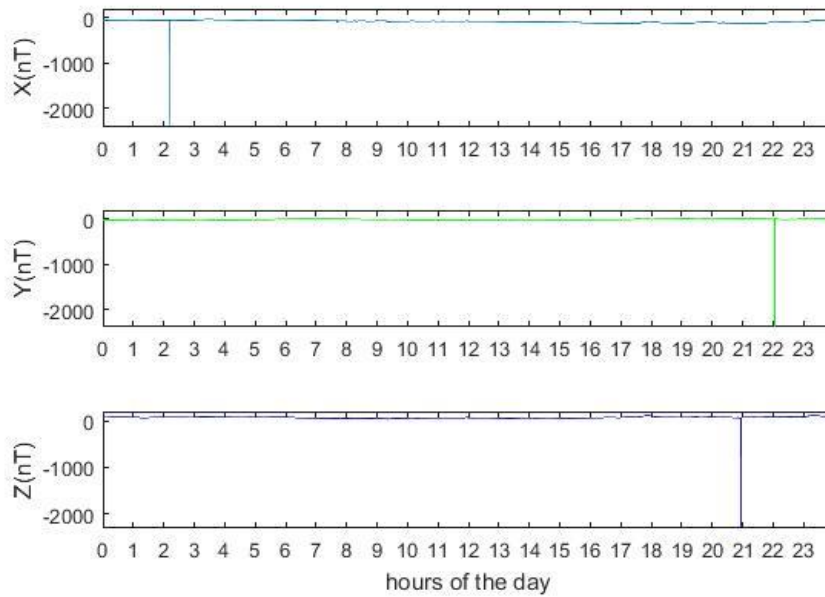
29	2015	03	04	09	20	25	+0011.18	-0020.91	+0011.38	-39.197	-02.399	+12	+19
30	2015	03	04	09	20	26	+0011.15	-0020.89	+0011.33	-39.207	-02.399	+12	+19
31	2015	03	04	09	20	27	+0011.12	-0020.83	+0011.34	-39.213	-02.399	+12	+19
32	2015	03	04	09	20	28	+0011.08	-0020.86	+0011.31	-39.198	-02.399	+12	+19
33	2015	03	04	09	20	27	+0011.12	-0020.83	+0011.34	-39.213	-02.399	+12	+19
34	2015	03	04	09	20	28	+0011.08	-0020.86	+0011.31	-39.198	-02.399	+12	+19
35	2015	03	04	09	20	29	+0011.08	-0020.86	+0011.28	-39.187	-02.399	+12	+19
36	2015	03	04	09	20	30	+0011.01	-0020.88	+0011.21	-39.175	-02.399	+12	+19

Εικόνα 37: Επανάληψη του ίδιων σημείων VLI 4/3

Εικόνα 35:

Πάνω: Συστηματικό σφάλμα στα δεδομένα του DION (σημειώνεται με κόκκινο κύκλο) Κάτω: Τα ίδια δεδομένα διορθωμένα

### VLI 26-08-2015 spike



Εικόνα 38: Spike στα δεδομένα του VLI

39278	2015	08	27	10	44	02	-0095.51	-0020.63	+0057.11	-53.247	-53.443	+27	+36						
39279	2015	08	27	10	44	03	-0095.45	-0020.63	+0057.10	-86.015	-53.448	+27	+36						
39280	2015	08	27	10	44	04	-0095.41	-0020.63	+0057.11	-20.479	-53.447	+27	+36						
39281	2015	08	27	10	44	05	-0095.43	-0020.63	+0057.12	-61.439	-53.445	+27	+36						
39282	2015	08	27	10	44	02	2015	08	27	10	43	02	-0094.88	-0020.55	+0057.51	-61.439	-53.608	+27	+36
39283	2015	08	27	10	43	03	-0094.87	-0020.53	+0057.49	-69.631	-53.614	+27	+36						
39284	2015	08	27	10	43	04	-0094.90	-0020.55	+0057.48	-61.439	-53.611	+27	+36						
39285	2015	08	27	10	43	05	-0094.90	-0020.55	+0057.51	-61.439	-53.606	+27	+36						

Εικόνα 39: Κακή καταγραφή. Απεικονίζεται ως spike. Διορθώνουμε το αρχείο χειροκίνητα

### Βήμα 2<sup>ο</sup>: Γραφική Απεικόνιση των δεδομένων

Για να απεικονίσουμε τα δεδομένα, πρώτα μικραίνουμε τον αριθμό των σημείων κάθε πίνακα με την εντολή `downsample(A,n)`, όπου `A` είναι ο πίνακας που θέλουμε να μικρύνουμε και `n` ακέραιος αριθμός, τέτοιος ώστε να προκύπτει πίνακας μήκους ίσου με το μήκος του `A` διαιρεμένο κατά `n`. Επιλέγουμε `n=60`, ώστε να έχουμε δειγματοληψία ανά λεπτό.

### 2.3.3. Τα δεδομένα του SuperMAG

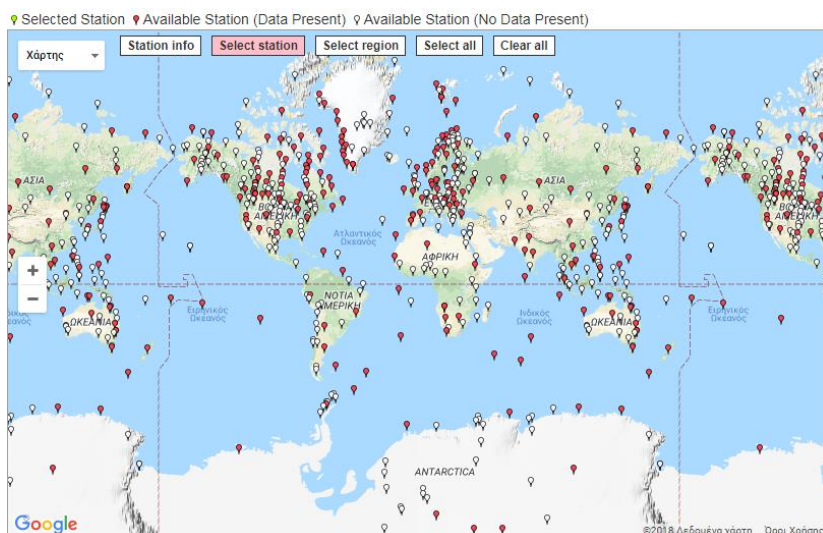
Για τους σταθμούς Kakiooka και Resolute Bay κατεβάζουμε τα δεδομένα κατευθείαν από την ιστοσελίδα του SuperMAG <http://supermag.jhuapl.edu/mag/>.

Στην περίπτωση αυτήν αρκετά σφάλματα έχουν διορθωθεί πριν ανέβουν στην ιστοσελίδα.

Για να ξεκινήσουμε απαιτείται εγγραφή, δηλώνοντας όνομα χρήστη (username), διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομίου (email) και υπαγωγή σε οργανισμό/πανεπιστήμιο κτλ (affiliation).

Στη συνέχεια μπορούμε να προχωρήσουμε το κατέβασμα των αρχείων.

Μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα σε 215 σταθμούς που έχουν διαθέσιμα αρχεία, από σύνολο 536 σταθμών.



Εικόνα 40: Τοποθεσία των 536 σταθμών του δικτύου SuperMAG (Πηγή: <http://supermag.jhuapl.edu/mag/>)

#### Επιλογές στο κατέβασμα των δεδομένων:

- Ημερομηνία και χρονική διάρκεια (δίνονται σε UTC<sup>14</sup>)
- Επιλογές επιπέδου αναφοράς (baseline)  
Ανάλογα με το σκοπό της μελέτης, προσφέρεται η δυνατότητα στον χρήστη των δεδομένων να επιλέξει baseline, δηλαδή τιμή ή και μεταβολή που επιθυμεί να αφαιρεθεί από τα δεδομένα. Οι επιλογές είναι οι εξής:
- Αφαίρεση των ημερήσιων μεταβολών και της ετήσιας μεταβολής (yearly trend)<sup>15</sup>
- Αφαίρεση της ετήσιας μεταβολής (yearly trend)
- Καμία αφαίρεση
- Αφαίρεση της μέσης τιμής

Επιλέγουμε να μην αφαιρέσουμε κάποιο baseline, ώστε η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων να προσεγγίζει αυτήν του ENIGMA.

#### Μορφή αρχείου:

- ASCII (self documented): \*.txt
- CSV (comma separated): \*.csv

Επιλέγουμε την 2<sup>η</sup> μορφή και μπορούμε να ανοίξουμε κατευθείαν τα αρχεία με το matlab και να «διαβάσουμε» τις στήλες.

<sup>14</sup> Βλ. Παράρτημα

<sup>15</sup> Οι ημερήσιες μεταβολές αναφέρονται στο  $S_q$  και η ετήσια μεταβολή στις χρονικές μεταβολές του πυρήνα



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	supermag								
	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number
1	Date.UTC	IAGA	MLT	MLAT	IGRF_DECL	SZA	N	E	Z
2	2015-01-01 ...	RES	16.41	82.93	-25.88	110.69	-8.4	-1.5	-2.7
3	2015-01-01 ...	RES	16.42	82.93	-25.88	110.76	-8.0	-0.1	-2.4
4	2015-01-01 ...	RES	16.44	82.93	-25.88	110.82	-8.7	1.2	-2.4
5	2015-01-01 ...	RES	16.46	82.93	-25.88	110.89	-8.8	2.1	-2.1
6	2015-01-01 ...	RES	16.47	82.93	-25.88	110.95	-8.5	2.4	-1.8
7	2015-01-01 ...	RES	16.49	82.93	-25.88	111.02	-6.5	3.0	-1.1
8	2015-01-01 ...	RES	16.51	82.93	-25.88	111.08	-4.5	3.3	-0.5
9	2015-01-01 ...	RES	16.52	82.93	-25.88	111.15	-5.0	2.2	-1.3
10	2015-01-01 ...	RES	16.54	82.93	-25.88	111.21	-5.3	2.6	-1.5
11	2015-01-01 ...	RES	16.56	82.93	-25.88	111.28	-7.2	2.6	-2.3
12	2015-01-01 ...	RES	16.57	82.93	-25.88	111.34	-8.8	3.8	-2.4
13	2015-01-01 ...	RES	16.59	82.93	-25.88	111.41	-10.8	6.4	-2.1
14	2015-01-01 ...	RES	16.61	82.93	-25.88	111.47	-11.9	7.1	-2.0
15	2015-01-01 ...	RES	16.62	82.93	-25.88	111.54	-12.3	5.9	-1.9
16	2015-01-01 ...	RES	16.64	82.93	-25.88	111.60	-12.2	4.2	-1.7
17	2015-01-01 ...	RES	16.66	82.93	-25.88	111.67	-10.0	2.6	-0.5
18	2015-01-01 ...	RES	16.67	82.93	-25.88	111.73	-6.7	-0.9	0.4
19	2015-01-01 ...	RES	16.69	82.93	-25.88	111.80	-2.5	-5.4	1.2

Εικόνα 41: Τα δεδομένα του RES στο MATLAB

Μετά το κατέβασμα των αρχείων, απαιτείται η μετατροπή των δεδομένων από γεωμαγνητικές σε γεωγραφικές, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 1.1.5. β) .

Να αναφέρουμε, τέλος, ότι στους σταθμούς Κακιοκα και Resolute Bay τα σφάλματα είναι αρκετά περιορισμένα. Στον σταθμό ΚΑΚ δεν βρίσκουμε κενά, ενώ στον σταθμό RES υπάρχει ένα κενό 600 σημείων περίπου.

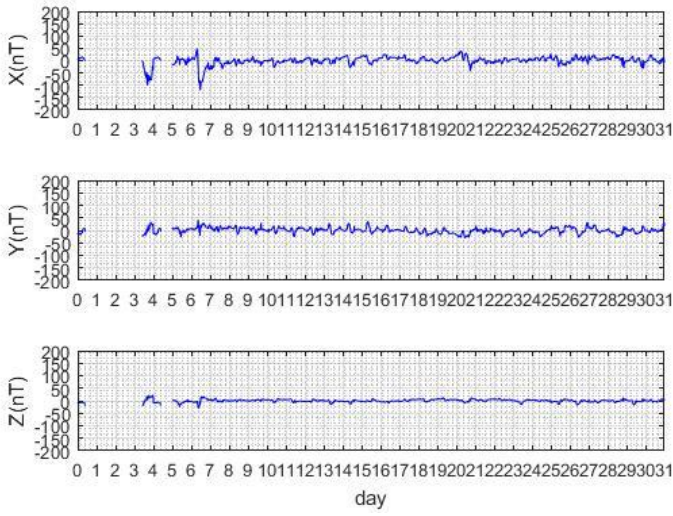
### 2.3.4. Αποτελέσματα

Παρακάτω παραθέτουμε τα διαγράμματα όλων των μηνών από τους 5 σταθμούς.

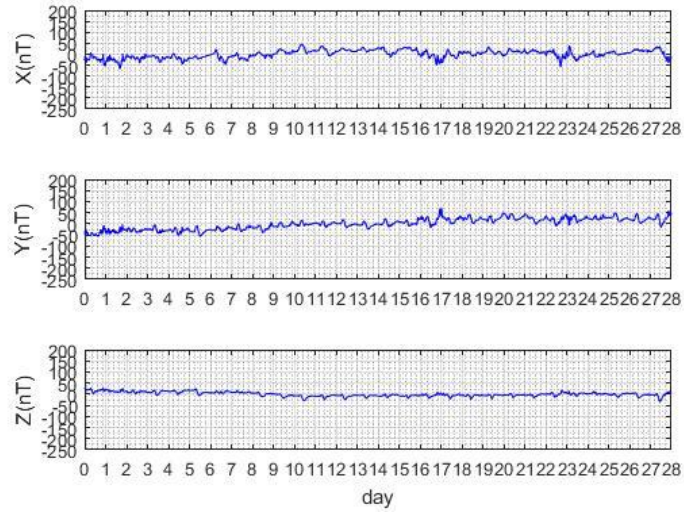
Παρατηρούμε ότι, όπως είναι αναμενόμενο, στο σταθμό RES παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις του πεδίου, καθώς βρίσκεται σε πολική περιοχή.

Εικόνα 42: Διαγράμματα των δεδομένων του DION

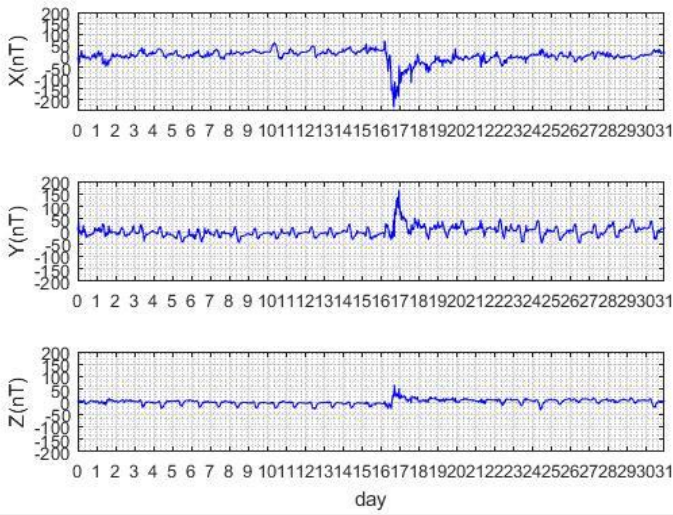
DION 01-2015



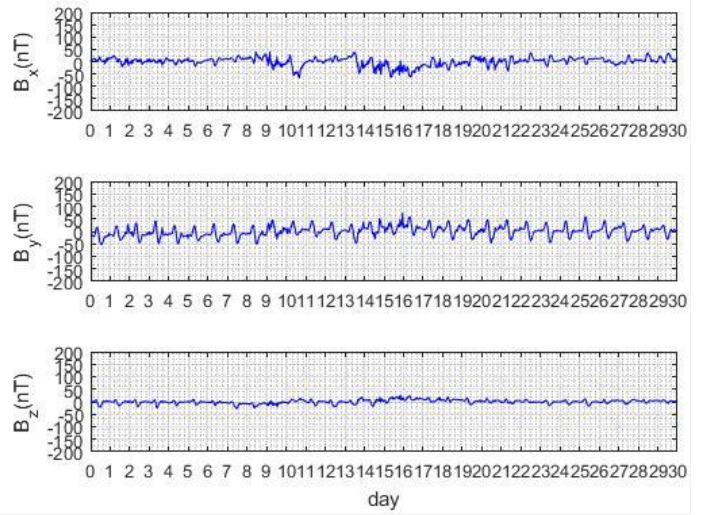
DION 02-2015



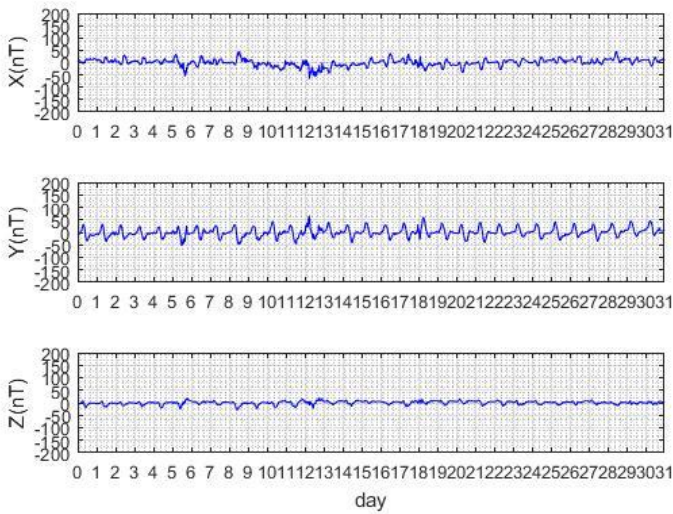
DION 03-2015



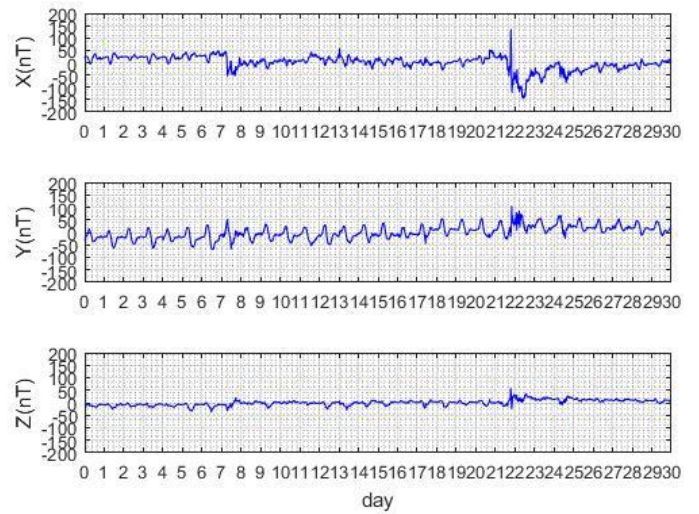
DION 04-2015



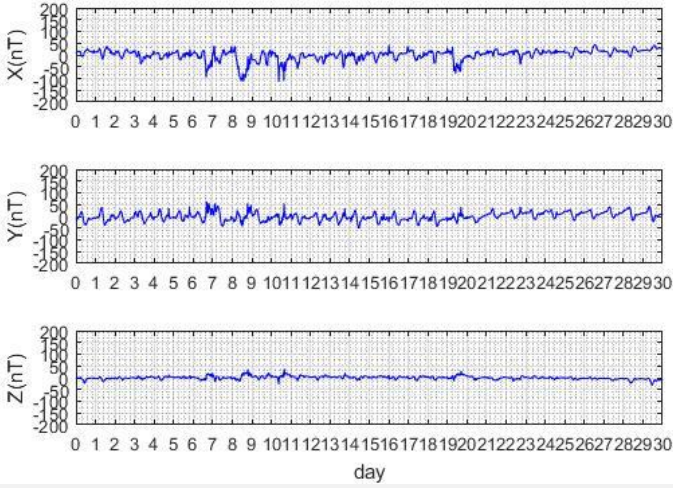
DION 05-2015



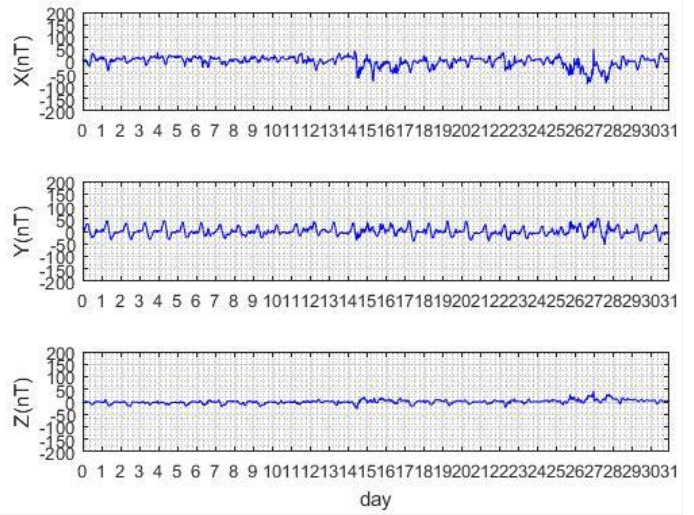
DION 06-2015



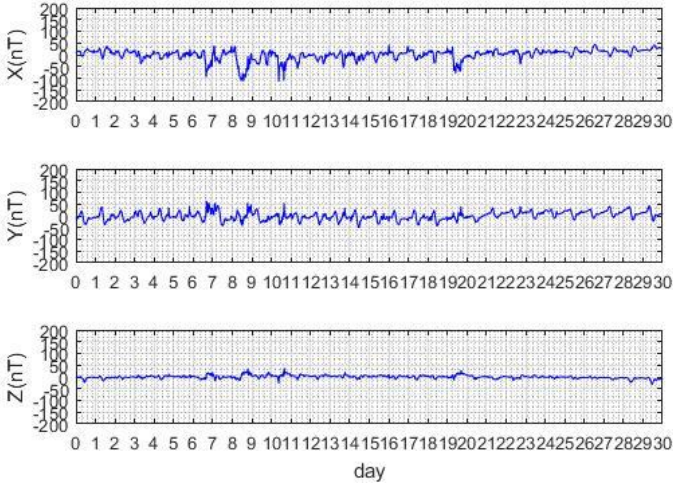
DION 09-2015



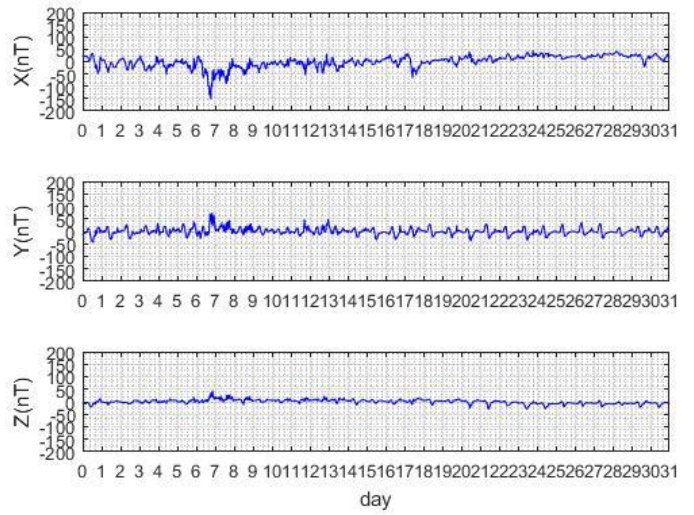
DION 08-2015



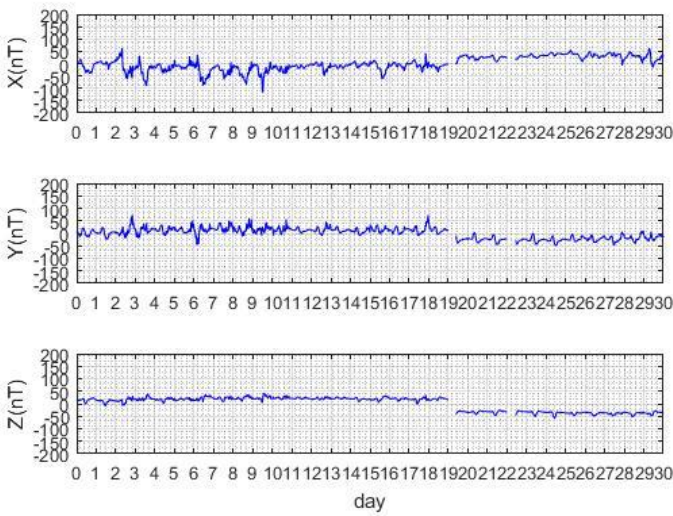
DION 09-2015



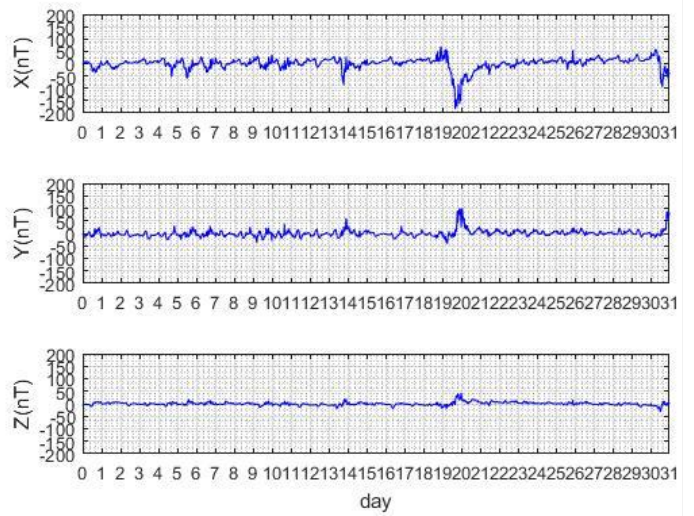
DION 10-2015



DION 11-2015

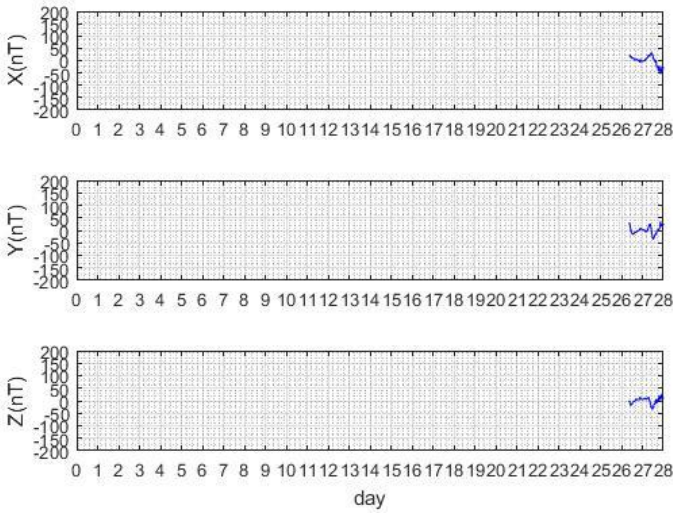


DION 12-2015

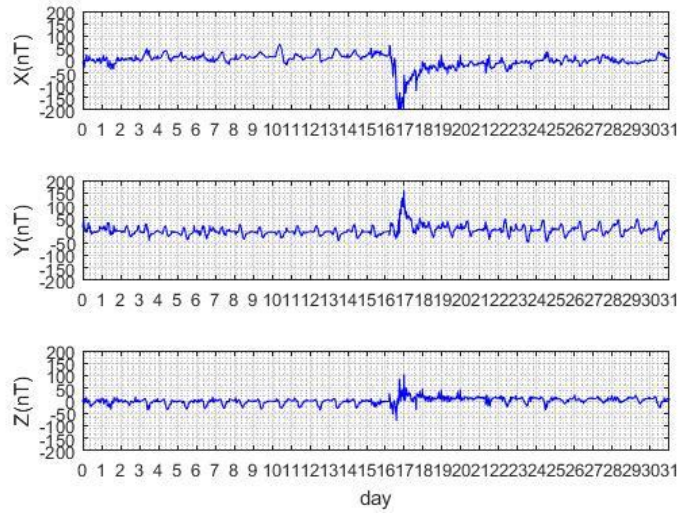


Εικόνα 43: Διαγράμματα των δεδομένων του VLI

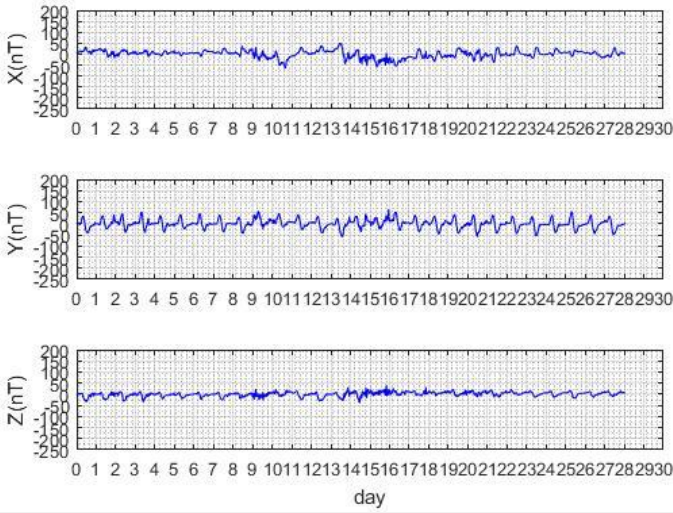
VLI 02-2015



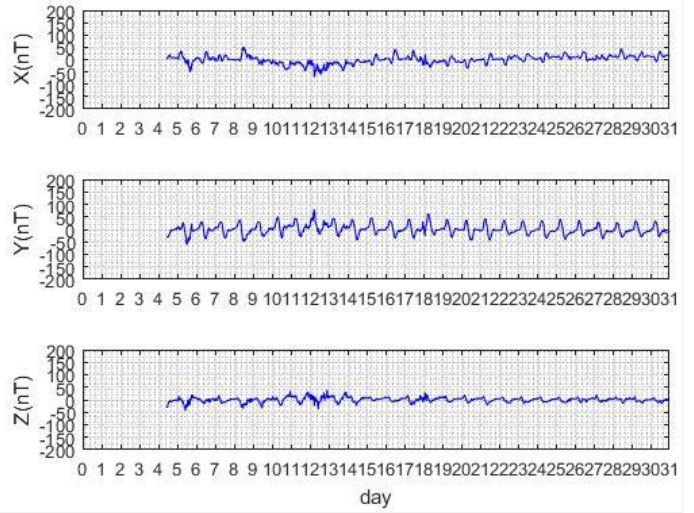
VLI 03-2015



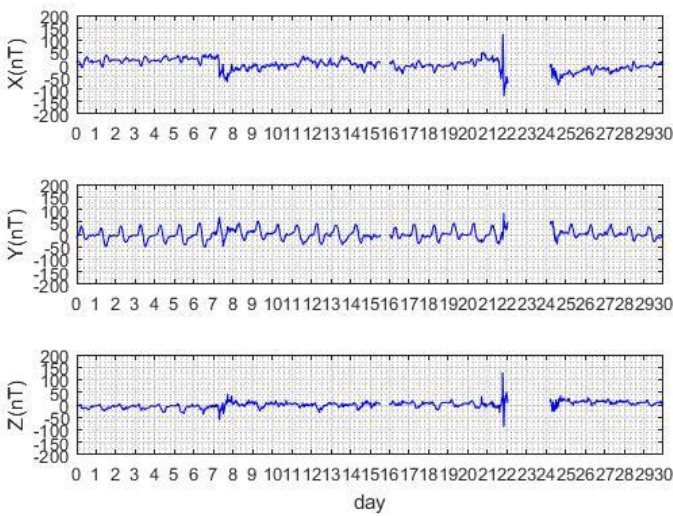
VLI 04-2015



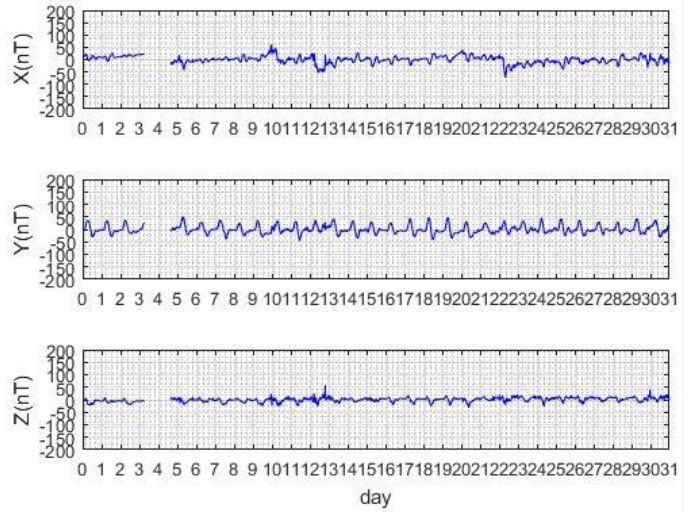
VLI 05-2015



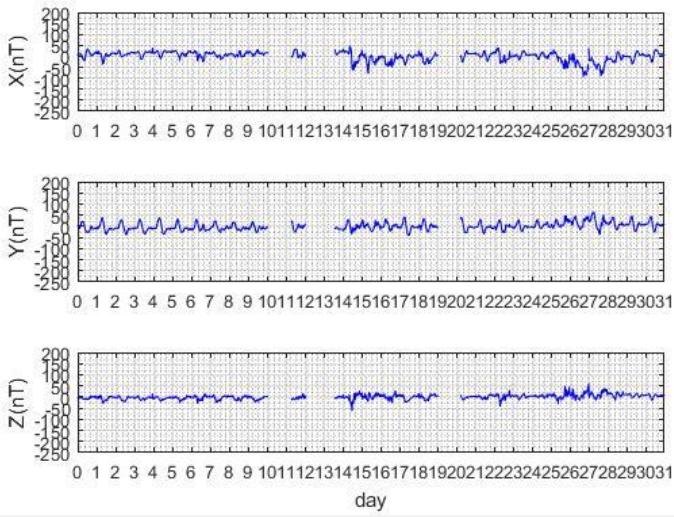
VLI 06-2015



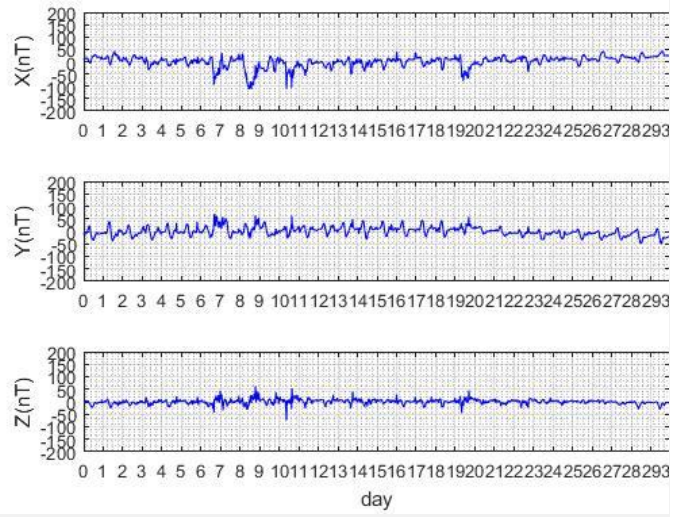
VLI 07-2015



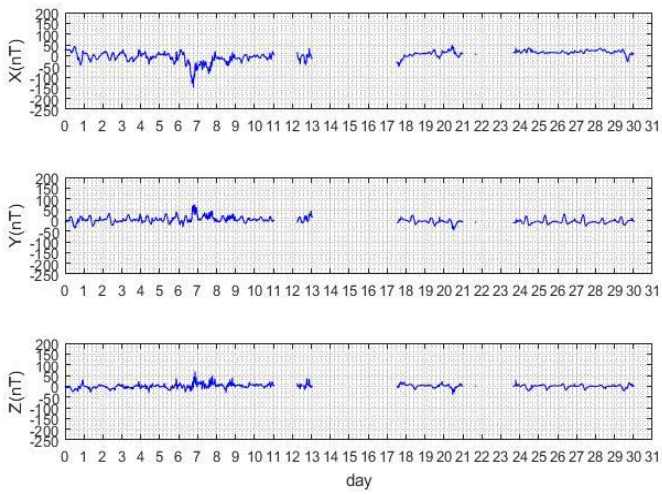
VLI 08-2015



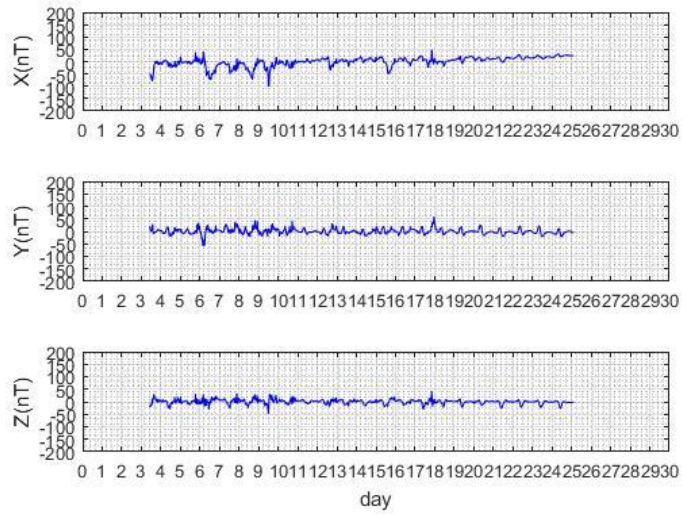
VLI 09-2015



VLI 10-2015

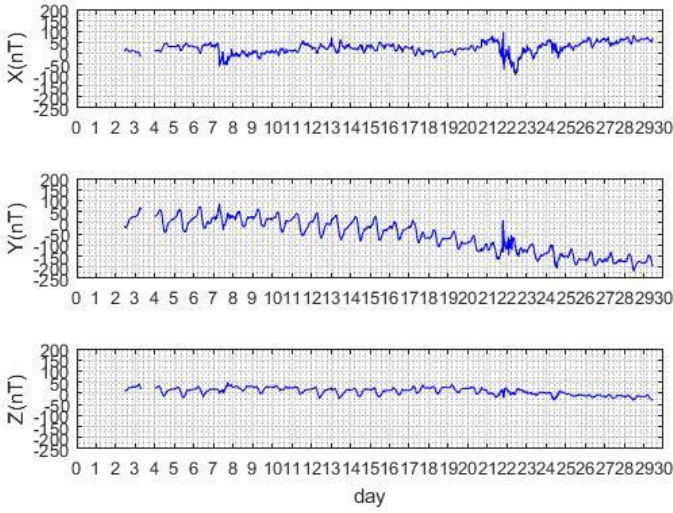


VLI 11-2015

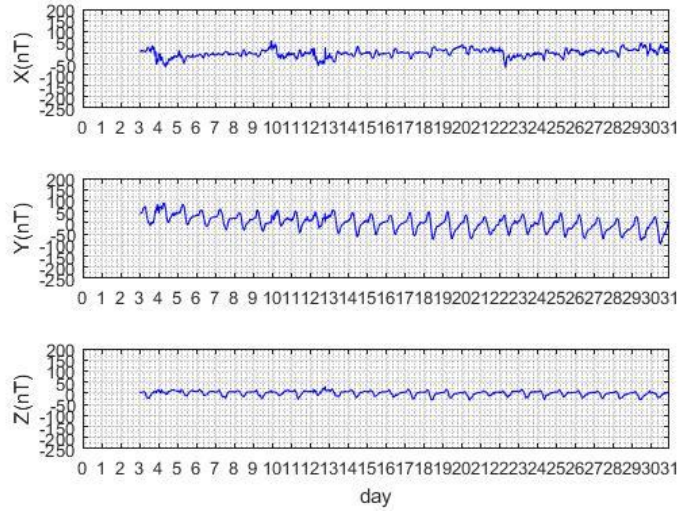


Εικόνα 44: Διαγράμματα των δεδομένων του THL

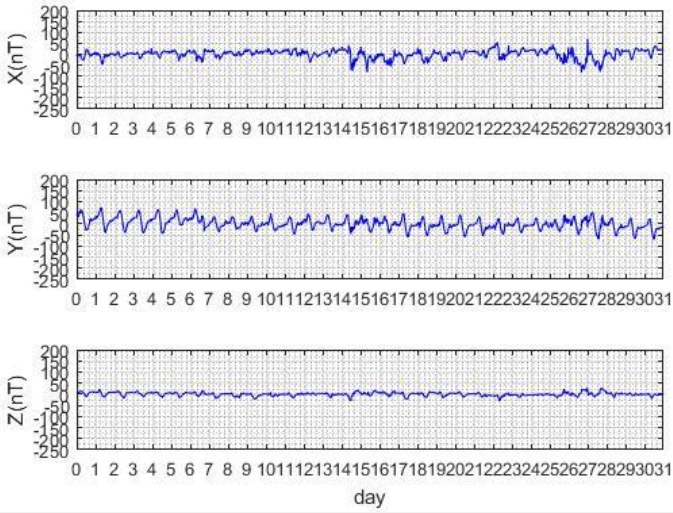
THL 06-2015



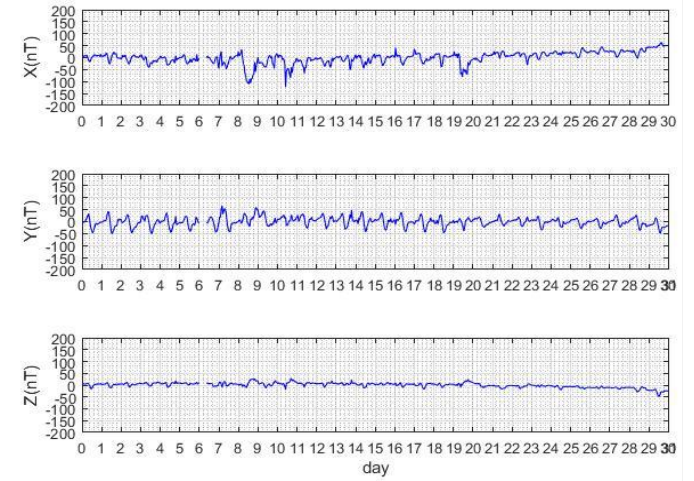
THL 07-2015



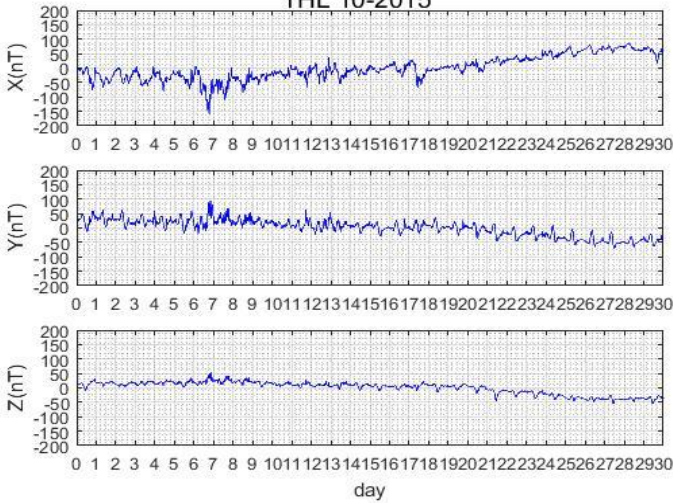
THL 08-2015



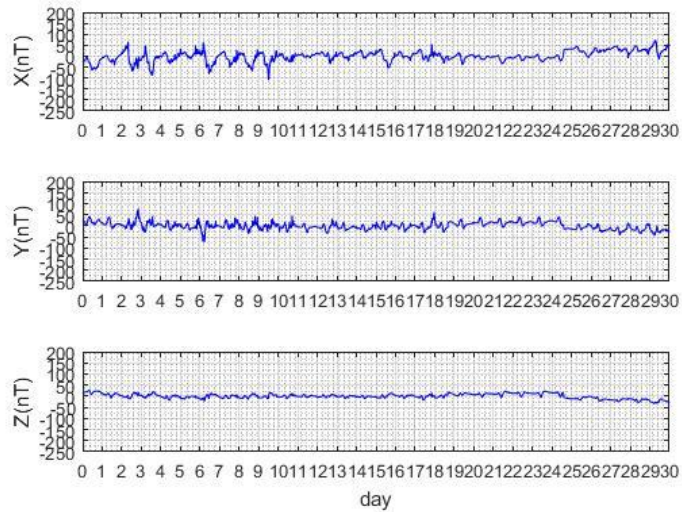
THL 09-2015



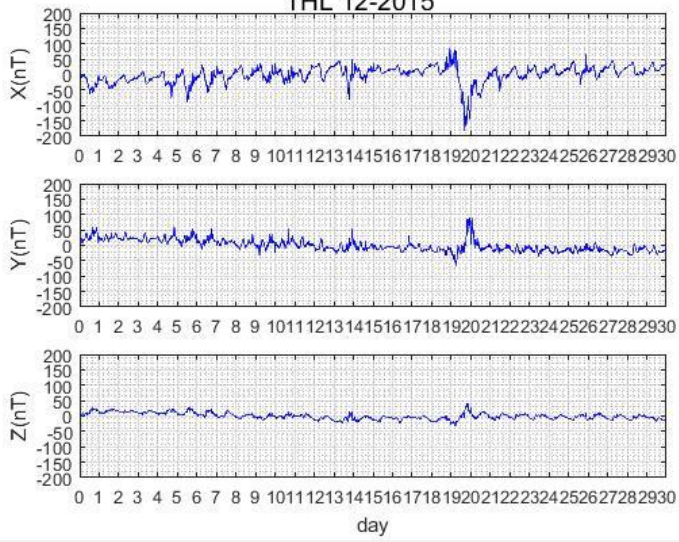
THL 10-2015



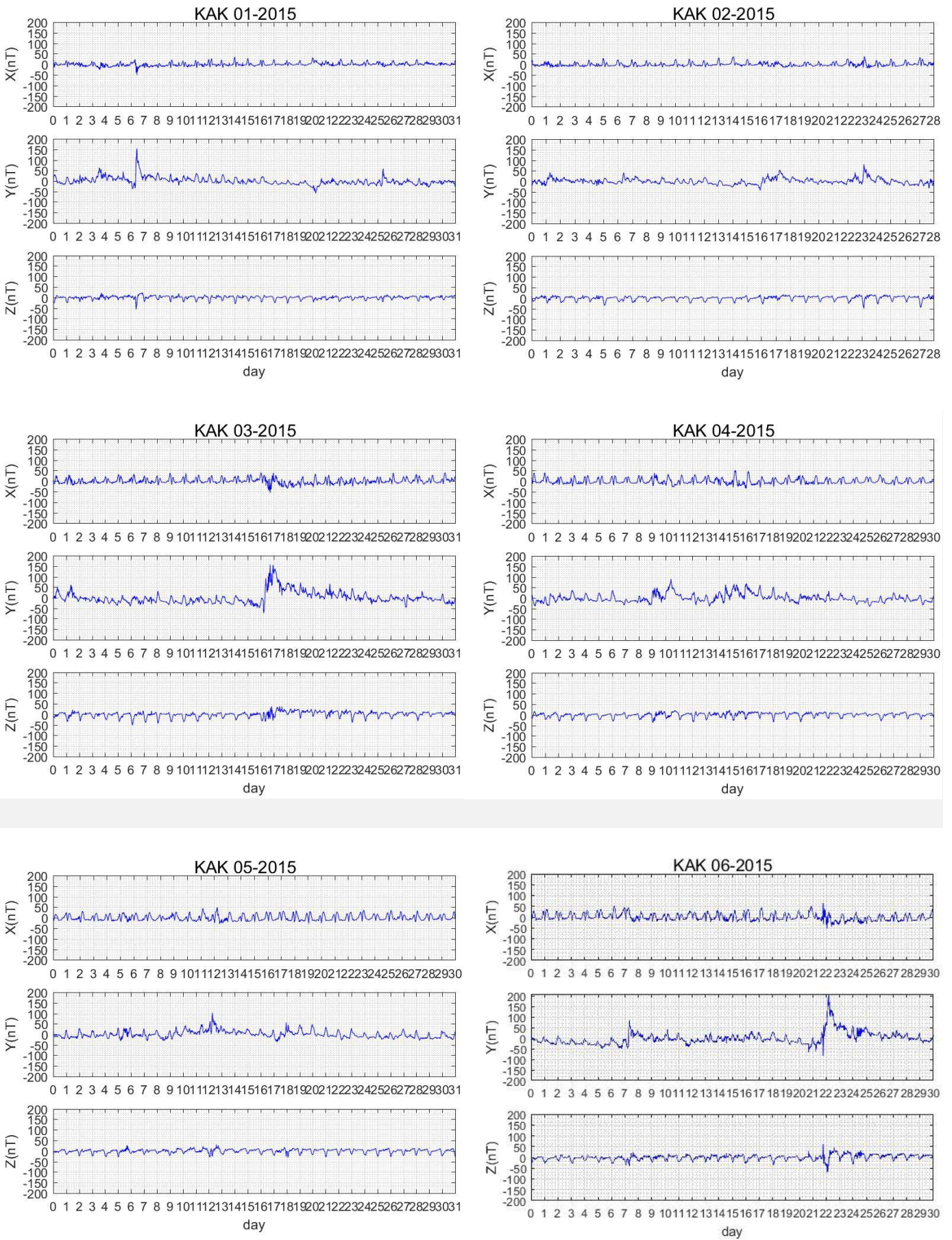
THL 11-2015



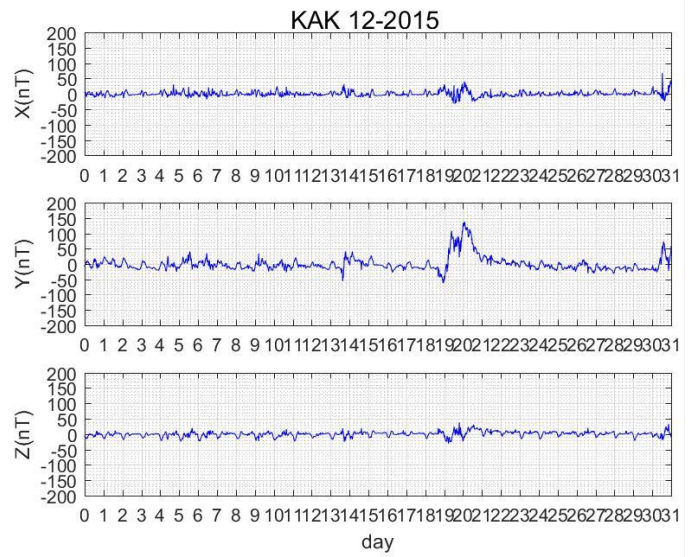
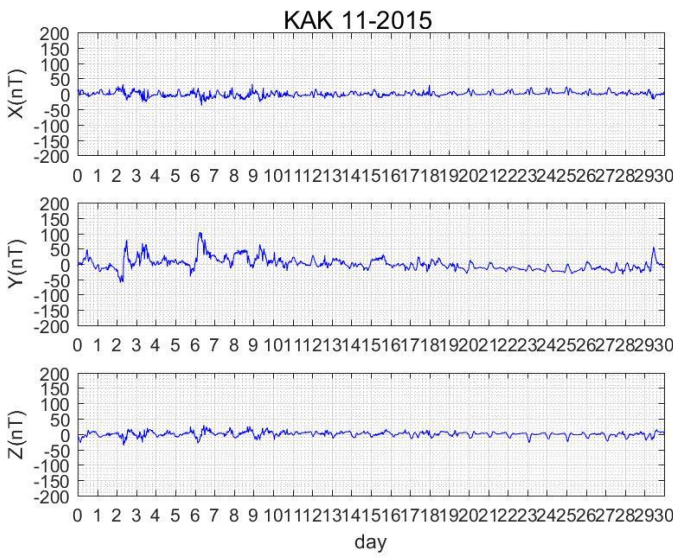
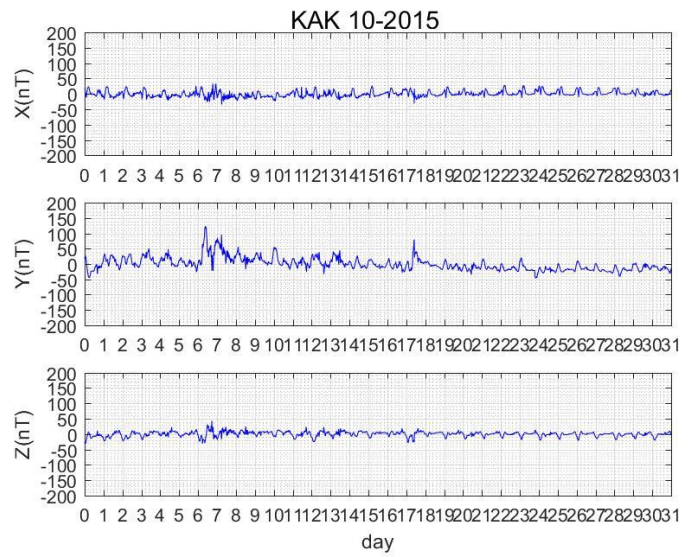
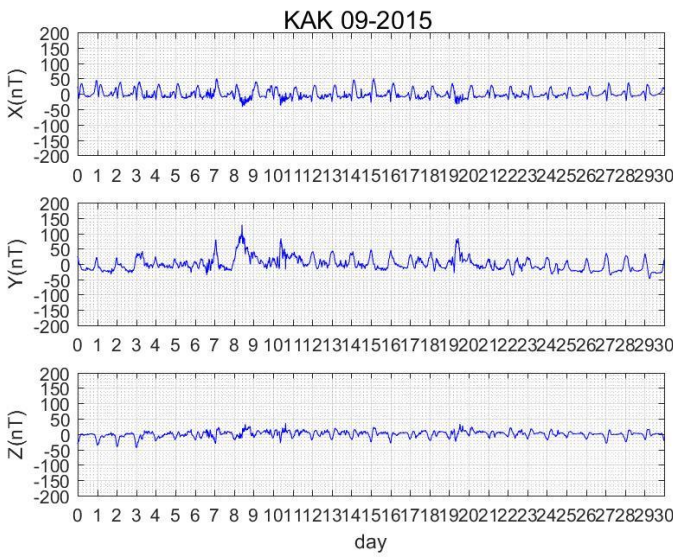
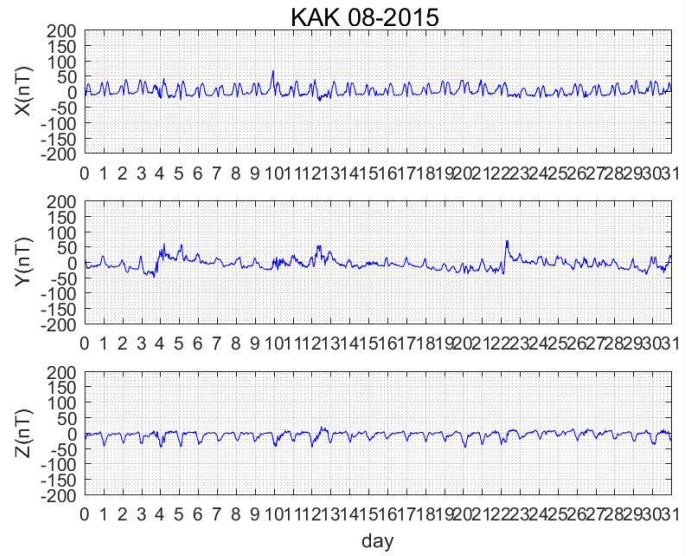
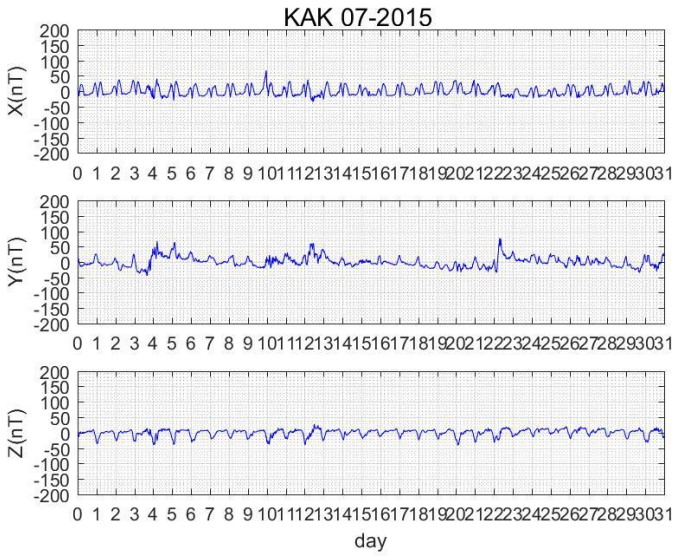
THL 12-2015



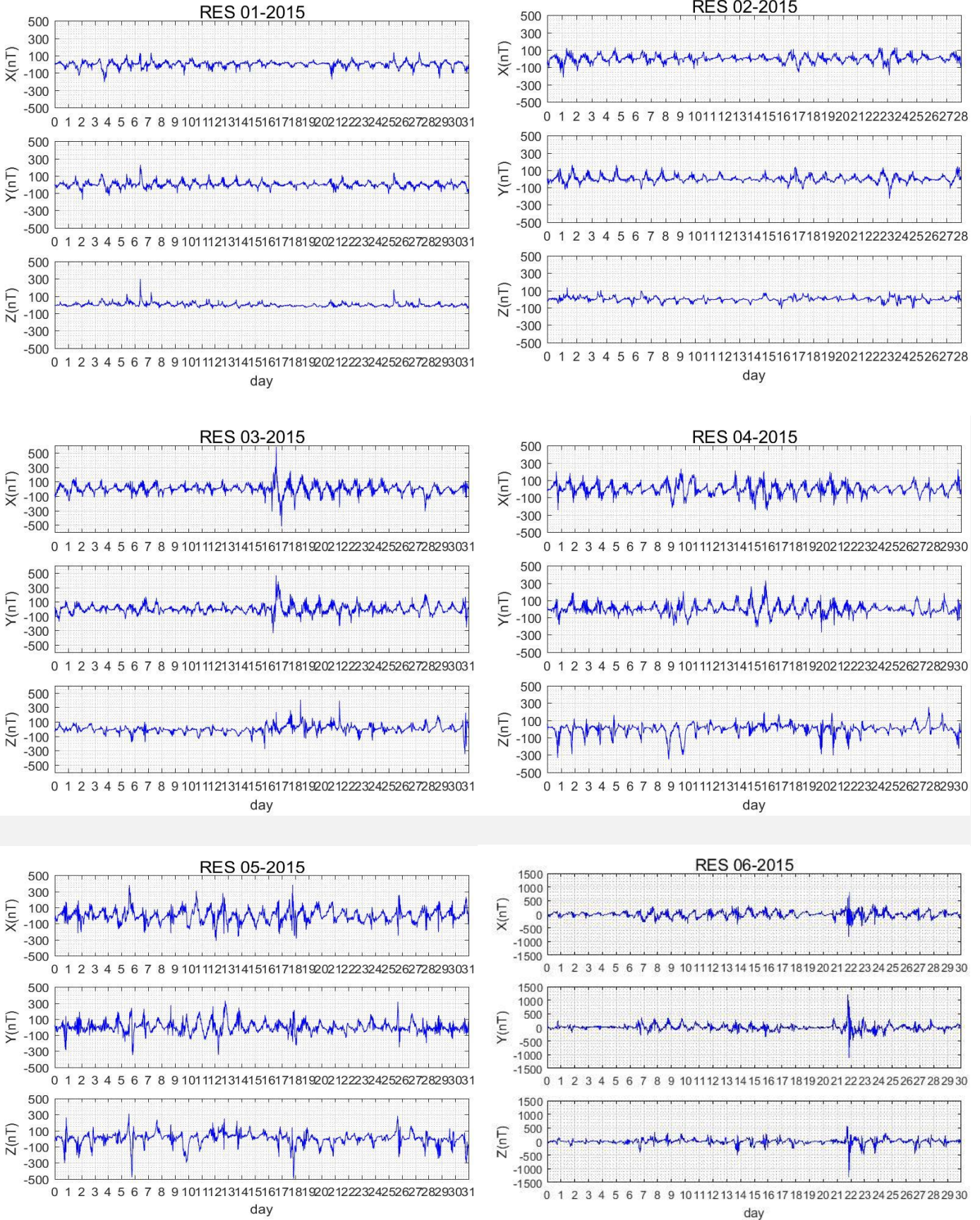
Εικόνα 45: Διαγράμματα των δεδομένων του ΚΑΚ

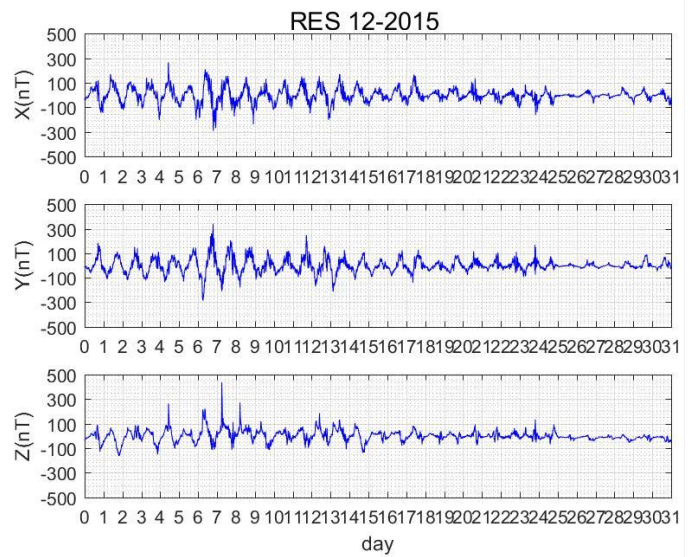
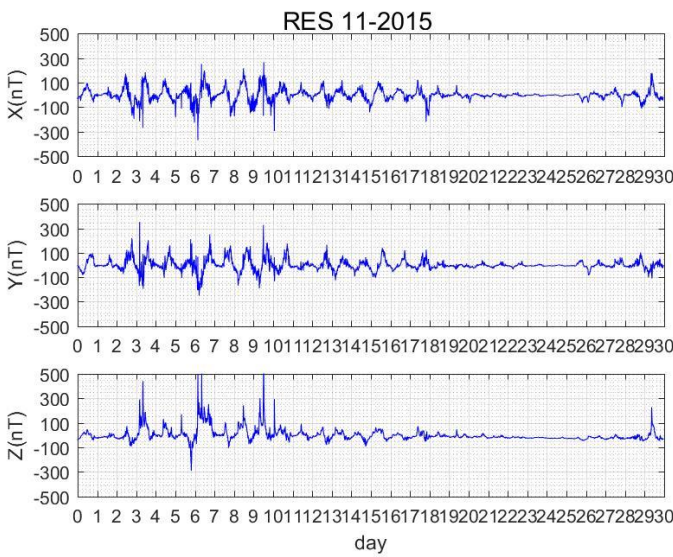
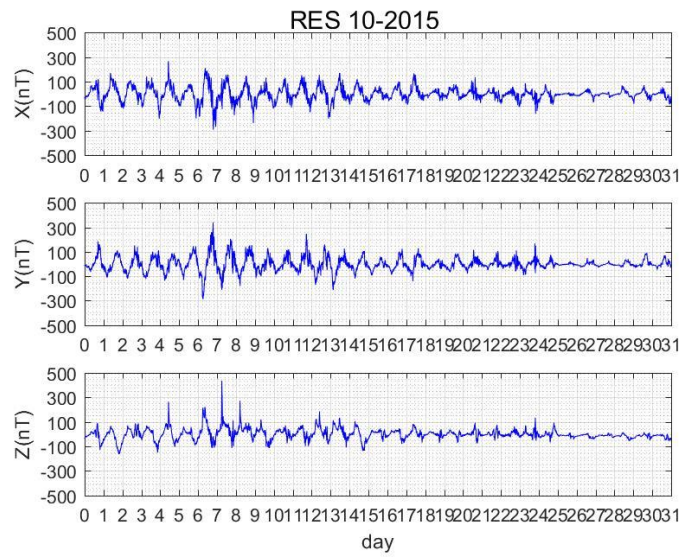
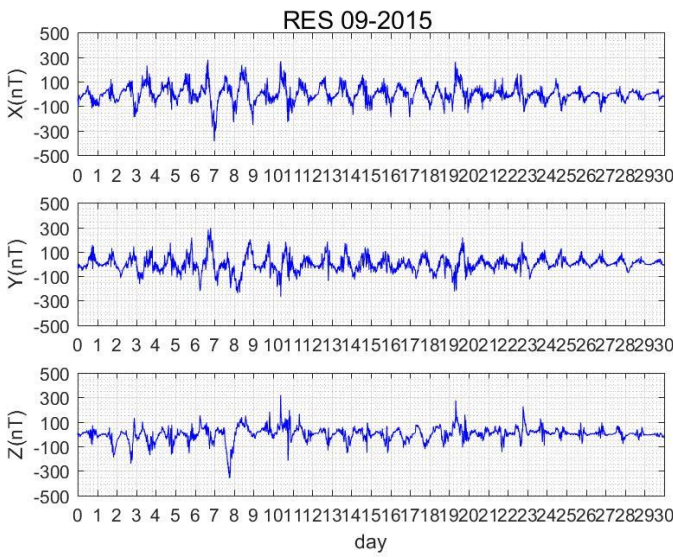
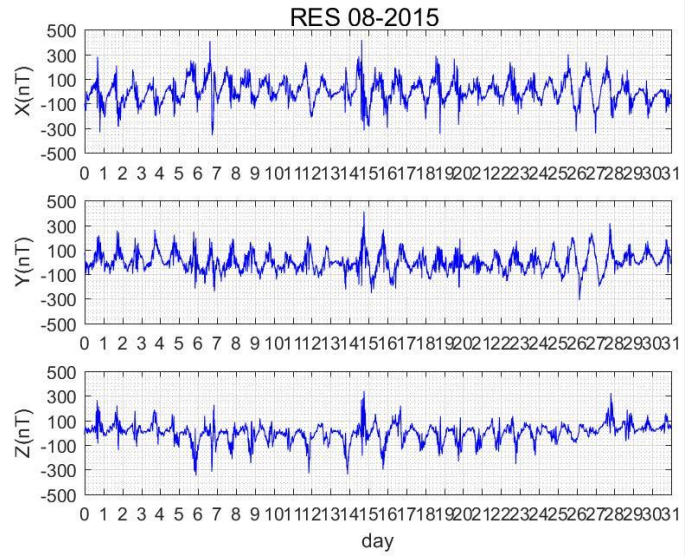
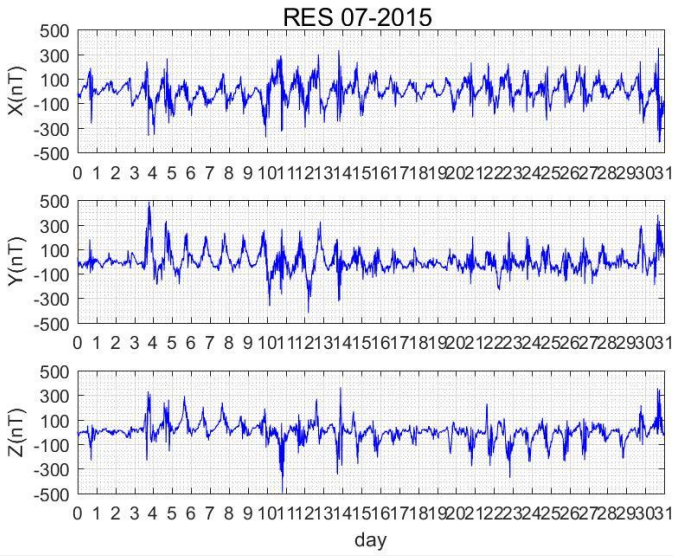






Εικόνα 46: Διαγράμματα των δεδομένων του RES





### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτουμε την διαδικασία εφαρμογής των μοντέλων καθώς και της αφαίρεσης του  $S_q$ , με την χρήση δεδομένων από τα μοντέλα. Σε κάθε ενότητα παραθέτονται τα διαγράμματα, τα οποία σχολιάζονται συνοπτικά.

#### 3.1. Εφαρμογή των μοντέλων

##### 3.1.1. IGRF-12

Πρώτο βήμα είναι να κατεβάσουμε το μοντέλο από την ιστοσελίδα <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>. Δίνεται σε μορφή κατάλληλη για Windows και για Linux.

Επιλέγουμε την πρώτη περίπτωση και κατεβάζουμε το αρχείο με όνομα *geomag70\_windows.zip*.

Ο φάκελος αυτός περιέχει αρχείο τύπου \*.exe, το οποίο διαβάζει τις μεταβλητές του IGRF, όπως δίνονται σε κατάλληλο αρχείο στον φάκελο.

Οι εντολές εισόδου INPUT αποτελούν:

- Ημερομηνία ή χρονικό διάστημα
- Βήμα (για χρονικό διάστημα)
- Υψόμετρο (από το κέντρο της Γης ή την επιφάνεια)
- Γεωγραφικές συντεταγμένες

Το πρόγραμμα μας δίνει OUTPUT τα εξής:

- Τις τρεις συνιστώσεις του πεδίου του πυρήνα σε γεωγραφικές συντεταγμένες Χ,Υ Και Ζ
- Την οριζόντια ένταση H
- Την ολική ένταση F
- Την απόκλιση D
- Την έγκλιση I

```
Geomag v7.0 - Jan 25, 2010
What is the name of the model data file to be opened? ==> IGRF12.COF
How would you like to enter the date?
  1) In decimal years.
  2) In year, month, and day.
    ==> 2
Would you like output for a single date or for a range of dates?
  1) A single date.
  2) A range of dates.
    ==> 2
Enter the start date (1900.00 to 2020.00)
  Year (1900 to 2020): 2015
  Month (1-12): 1
  Day (1-31): 1
Enter the end date (2015.00 to 2020)
  Year (2015 to 2020): 2015
  Month (1-12): 1
  Day (1-31): 31
Enter the step size in years. (0 to 0.08): 0.005
Enter Coordinate Preferences:
  1) Geodetic (WGS84 latitude and altitude above mean sea level)
  2) Geocentric (spherical, altitude relative to Earth's center)
    ==> 1
Enter Unit Preferences:
  1) Kilometers
  2) Meters
  3) Feet
    ==> 2
Enter geodetic altitude above mean sea level in meters (-1000.00 to 600000.00):
460
How would you like to enter the latitude and longitude?:
  1) In decimal degrees.
  2) In degrees, minutes, and seconds.
    ==> 1
Enter the decimal latitude (-90 to 90) (- for Southern hemisphere).
38.08
Enter the decimal longitude (-180 to 180) (- for Western hemisphere).
```

```
Enter the decimal latitude (-90 to 90) (- for Southern hemisphere).
38.0779
Enter the decimal longitude (-180 to 180) (- for Western hemisphere).
23.9331
Model: IGRF2015
Latitude: 38.08 deg
Longitude: 23.93 deg
Altitude: 460.00 meters
Range of Interest: 2015-6-1 to 2015-6-31 (yyyy-mm-dd), step 0.01 (years)
-----
Date      D      I      H      X      Y      Z      F
 (yr)    (deg min) (deg min) (nT)    (nT)    (nT)    (nT)    (nT)
2015.42  4d 15m  54d 43m  26547.0  26474.2  1965.4  37516.8  45959.3
2015.42  4d 15m  54d 43m  26547.1  26474.2  1965.7  37517.0  45959.5
2015.43  4d 15m  54d 43m  26547.1  26474.3  1965.9  37517.2  45959.6
2015.43  4d 15m  54d 43m  26547.2  26474.3  1966.1  37517.3  45959.8
2015.44  4d 15m  54d 43m  26547.3  26474.4  1966.3  37517.5  45960.0
2015.44  4d 15m  54d 43m  26547.3  26474.4  1966.6  37517.7  45960.2
2015.45  4d 15m  54d 43m  26547.4  26474.5  1966.8  37517.8  45960.3
2015.45  4d 15m  54d 43m  26547.5  26474.5  1967.0  37518.0  45960.5
2015.46  4d 15m  54d 43m  26547.6  26474.6  1967.2  37518.2  45960.7
2015.46  4d 15m  54d 43m  26547.6  26474.6  1967.5  37518.3  45960.9
2015.47  4d 15m  54d 43m  26547.7  26474.7  1967.7  37518.5  45961.0
2015.47  4d 15m  54d 43m  26547.8  26474.7  1967.9  37518.7  45961.2
2015.48  4d 15m  54d 43m  26547.8  26474.8  1968.1  37518.8  45961.4
2015.48  4d 15m  54d 43m  26547.9  26474.8  1968.4  37519.0  45961.6
2015.49  4d 15m  54d 43m  26548.0  26474.9  1968.6  37519.2  45961.8
2015.49  4d 15m  54d 43m  26548.0  26474.9  1968.8  37519.3  45961.9
2015.50  4d 15m  54d 43m  26548.1  26475.0  1969.0  37519.5  45962.1
-----
2015.50  4d 15m  54d 43m  26548.1  26475.0  1969.1  37519.6  45962.2
-----
Date      dD      dI      dH      dX      dY      dZ      dF
 (yr)    (min/yr) (min/yr) (nT/yr) (nT/yr) (nT/yr) (nT/yr) (nT/yr)
2015.50  5.7      0.6      13.6     10.3     44.9     33.6     35.3
-----
Enter
  0) to quit.
  1) to select a new model input file.
  2) to compute for a new point using same data file.
==>
```

Εικόνα 47: Input του IGRF12 (αριστερά) και Output (δεξιά)

Το πρόγραμμα δεν μας δίνει το output σε μορφή αρχείου αλλά εμφανίζεται στην οθόνη.

Για να απεικονίσουμε λοιπόν γραφικά το αποτέλεσμα, κατασκευάζουμε για κάθε συνιστώσα του κύριου πεδίου έναν πίνακα-στήλη με μήκος ίσο με αυτό των δεδομένων, στον οποίο επαναλαμβάνονται οι τιμές του δίνει το μοντέλο με κατάλληλο βήμα.

### 3.1.2. CHAOS-6

Το μοντέλο CHAOS-6 παρέχεται σε μορφή MATLAB και μπορούμε να το κατεβάσουμε από την ιστοσελίδα <http://www.spacecenter.dk/files/magnetic-models/CHAOS-6/>.

Το πρόγραμμα διαβάζει τα αρχεία *CHAOS-6.mat* (παράμετροι του μοντέλου) και *RC\_1997-2016\_May\_v1.dat* (τιμές του RC index).

Οι εντολές εισόδου INPUT αποτελούν:

- a. Χρονικό διάστημα (σε μορφή  $\text{mjd2000}^{16}$ )
- b. Βήμα (για εύρος ημερομηνιών)
- c. Υψόμετρο (από το κέντρο της Γης)
- d. Γεωγραφικές συντεταγμένες (co-latitude και longitude)

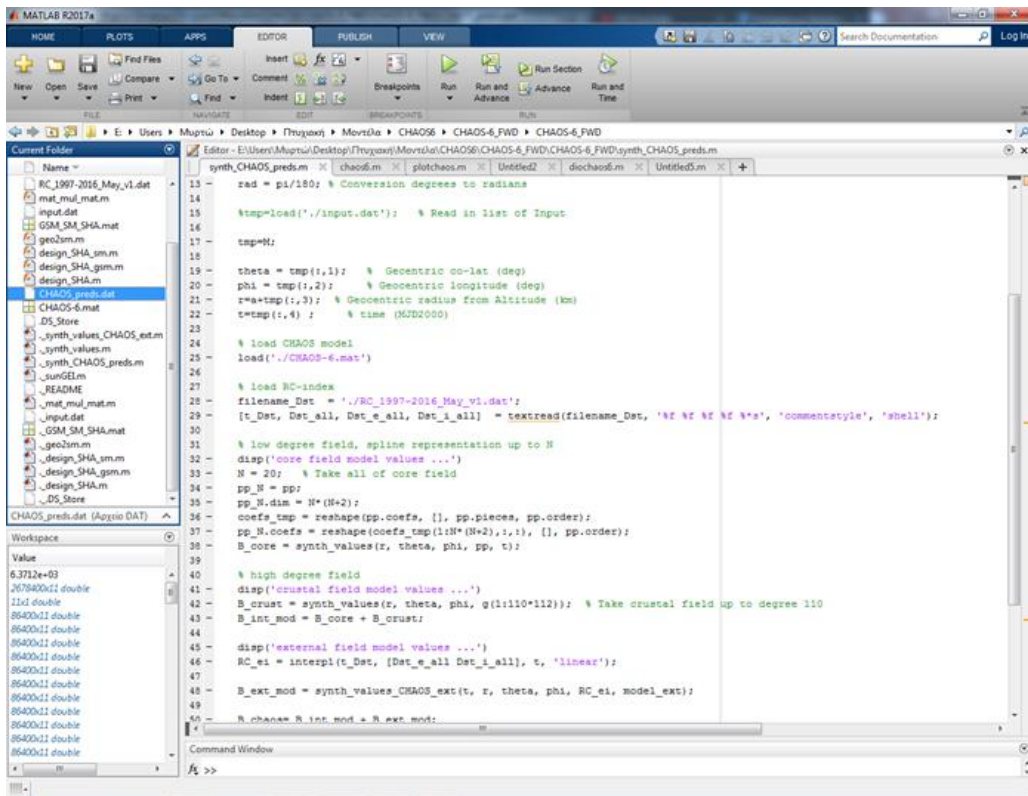
Το πρόγραμμα μας δίνει OUTPUT τα εξής:

- e. Τις συνιστώσες του πεδίου του πυρήνα
- f. Τις συνιστώσες του εξωτερικού πεδίου (δακτυλιοειδές ρεύμα, μαγνητόπαυση και μαγνητοουρά)
- g. Τις συνιστώσες της ολικής έντασης του πεδίου

Το μοντέλο δίνει τα αποτελέσματα σε σφαιρικές συντεταγμένες ( $B_r$ ,  $B_\theta$  και  $B_\phi$ ), οπότε χρειάζεται να τις μετατρέψουμε σε γεωγραφικές, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 1.1.5.β).

---

<sup>16</sup> Βλ. Παράρτημα



Εικόνα 48: Το πρόγραμμα CHAOS-6 στο MATLAB

CHAOS6												
tmd2000	rkm	theta1deg	phi1deg	B_r	B_theta	B_phi	B_r1	B_theta1	B_phi1	B_r2	B_theta2	B_phi2
Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number
1	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
2	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
3	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
4	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
5	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
6	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
7	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
8	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
9	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
10	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
11	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
12	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
13	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
14	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
15	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
16	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
17	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
18	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
19	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
20	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
21	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
22	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
23	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
24	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
25	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
26	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
27	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
28	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
29	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
30	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
31	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
32	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
33	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25
34	8371.660	38.07790	23.93310	-46179.42	-18370.81	1845.77	-46159.71	-2332.40	1553.81	-19.70	11.89	12.25

Εικόνα 49: Το OUTPUT του CHAOS-6 στο MATLAB

### 3.1.3. Αποτελέσματα

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μας πρέπει καταρχάς να βασίζεται στη συμφωνία αυτών με το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο συζητήσαμε στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Απαραίτητο είναι όμως τα δύο μοντέλα που χρησιμοποιούμε να βρίσκονται σε συμφωνία, καθώς και τα αποτελέσματα των ελληνικών σταθμών αφενός να συμφωνούν μεταξύ τους αλλά και οι διαφορές τους με τους σταθμούς εκτός Ελλάδος να βασίζονται σε φυσικές αρχές.

Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα των μοντέλων που αφορούν το πεδίο του πυρήνα, προχωρώντας στην απαραίτητη σύγκριση μεταξύ σταθμών και μοντέλων, αλλά και αξιολόγηση τους με βάση τις φυσικές αρχές που διέπουν τις μεταβολές του κύριου πεδίου.

Σε δεύτερο βήμα θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα μας για το εξωτερικό πεδίο, συγκρίνοντας την συμπεριφορά του σε περιόδους μαγνητικών καταιγίδων.

Τέλος, θα προσθέσουμε στην μεταβολή (variation) του πεδίου το πεδίο του πυρήνα και των εξωτερικών πηγών που προκύπτουν από το CHAOS και θα τα συγκρίνουμε με τις τιμές του ολικού πεδίου (που δίνει το ίδιο μοντέλο).

Για τα δύο τελευταία βήματα θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα μας για δύο μήνες του χρόνου: τον Ιούνιο όπου είχαμε μάεγαλύτερες γεωμαγνητικές καταιγίδες του έτους, και τον μήνα Σεπτέμβρη που μπορεί να χαρακτηριστεί ως μήνας μέτριας γεωμαγνητικής δραστηριότητας.

Τα διαγράμματα παραθέτονται στο τέλος του κεφαλαίου για χάριν ευκολίας.

#### **3.1.3.α) Secular Variation**

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 1.1.5α), οι χρονικές μεταβολές που υφίσταται το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα έχουν περίοδο τάξης μεγέθους μεγαλύτερη του ενός έτος.

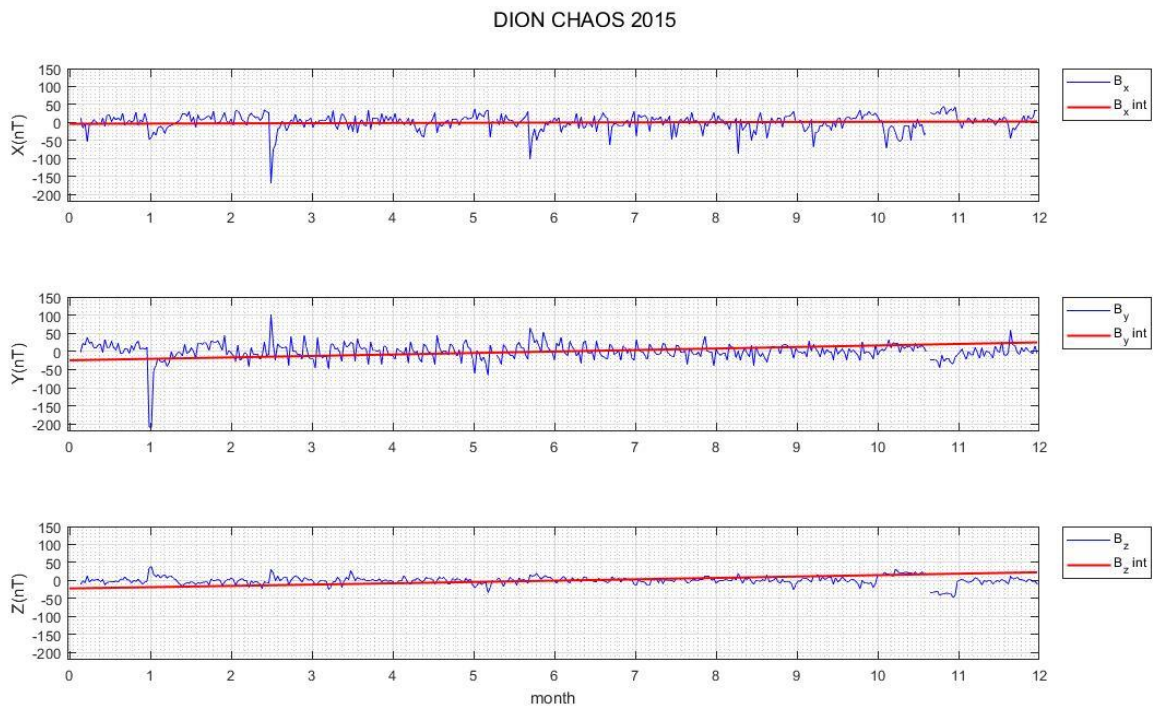
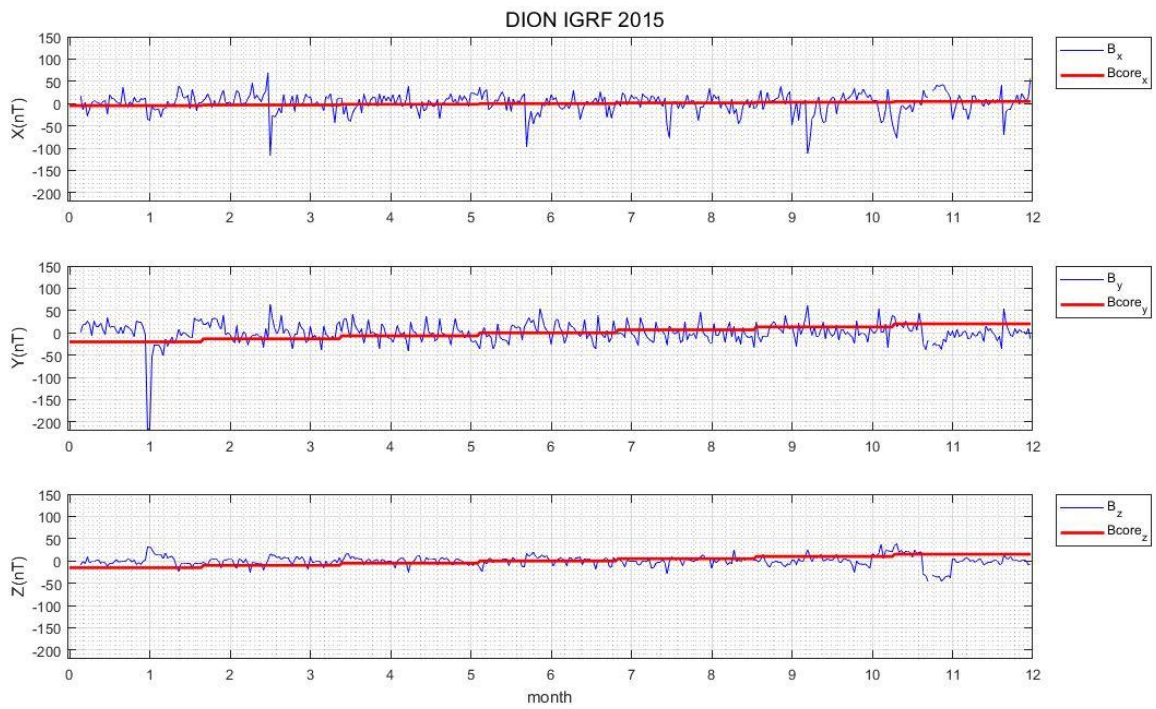
Πράγματι παρατηρούμε ότι, εφαρμόζοντας τα μοντέλα στα δεδομένα μας για όλο το έτος, υπάρχει μικρή μεταβολή του πεδίου, η οποία φαίνεται στα διαγράμματα στους πίνακες 8-12 από την μικρή κλίση του πεδίου του πυρήνα.

Παρατηρούμε ότι

Όπως είναι αναμενόμενο, δεν μπορούμε να δούμε μεταβολή σε επίπεδο ενός μήνα, όπως φαίνεται στα διαγράμματα

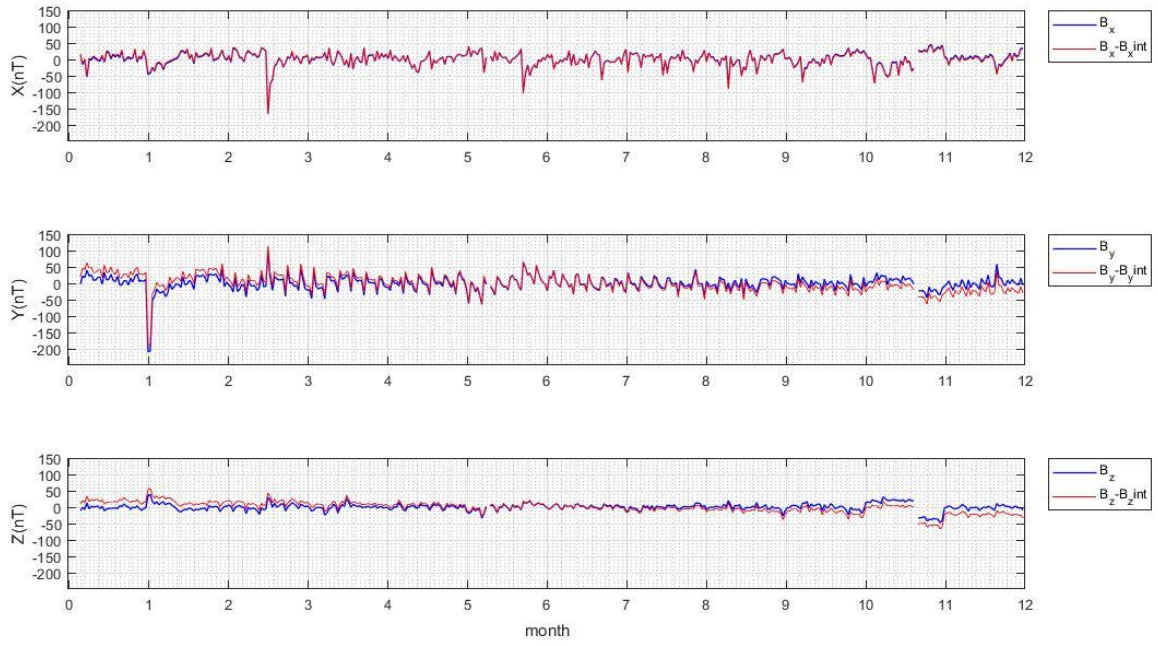
Η μεταβολή του κύριου πεδίου φαίνεται επίσης και τρία διαγράμματα στον πίνακα 13. Παρατηρούμε ότι στους ελληνικούς σταθμούς (low to mid latitude) έχουμε μεταβολή κυρίως στις Y και Z συνιστώσες του πεδίου. Στον σταθμό ΚΑΚ (mid-latitude) έχουμε μεταβολή κυρίως στις X και Z, ενώ στον RES (high latitude) στην X.

Εικόνα 50: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου με την μεταβολή του κύριου πεδίου για το σταθμό DION



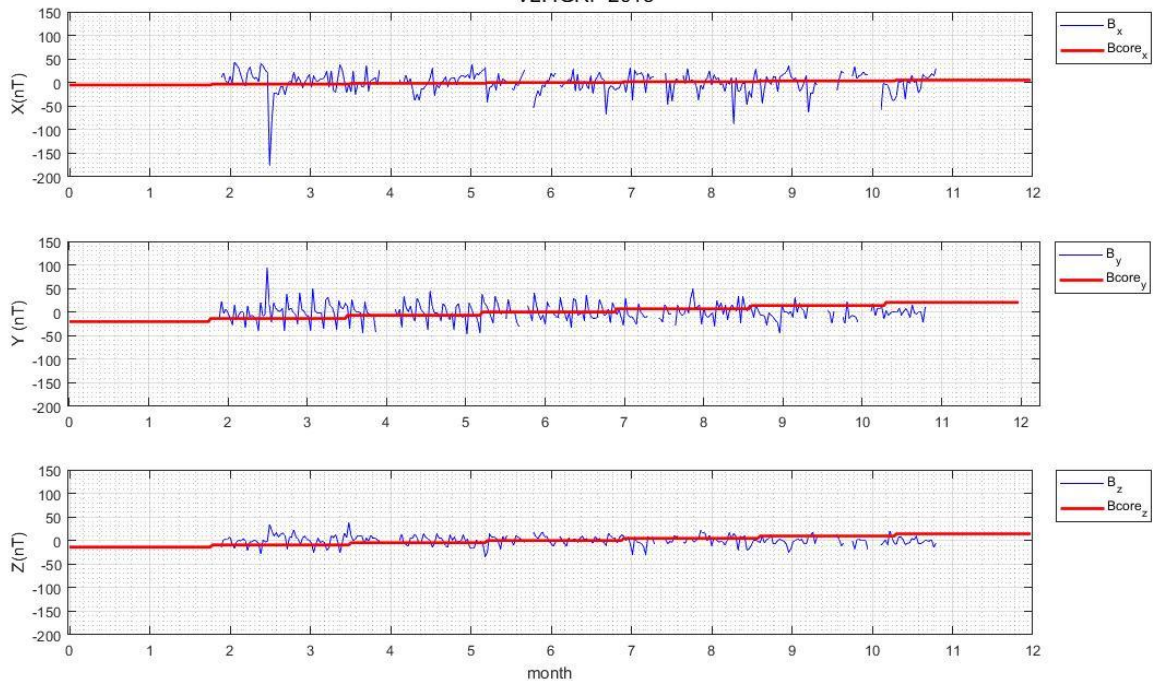


DION CHAOS 2015

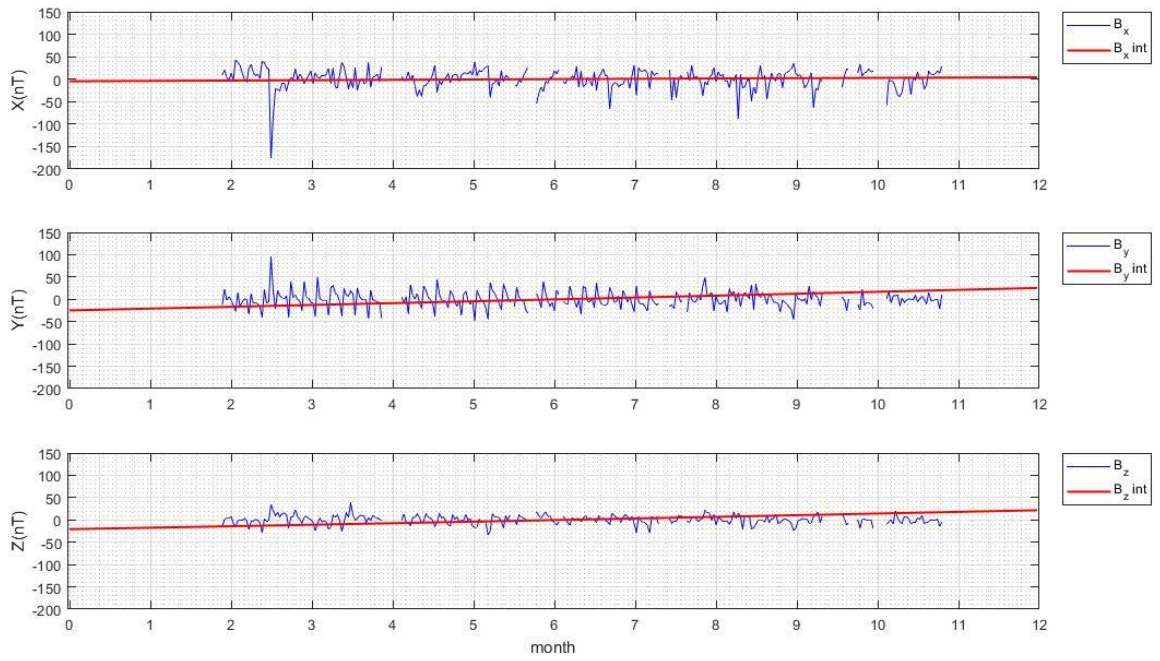


Εικόνα 51: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου με την μεταβολή του κύριου πεδίου για το σταθμό VLI

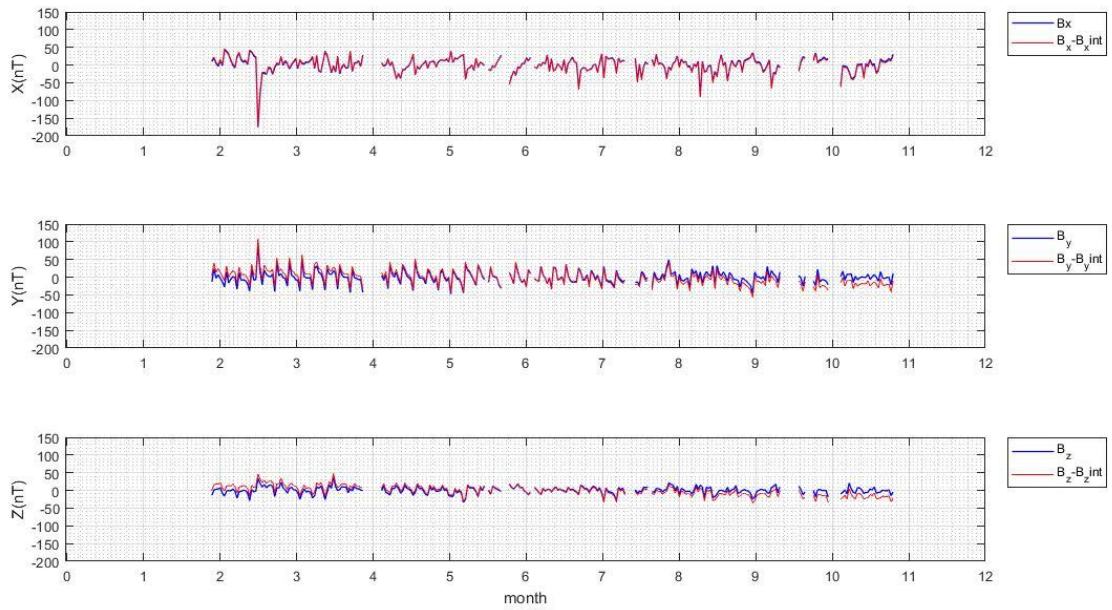
VLI IGRF 2015



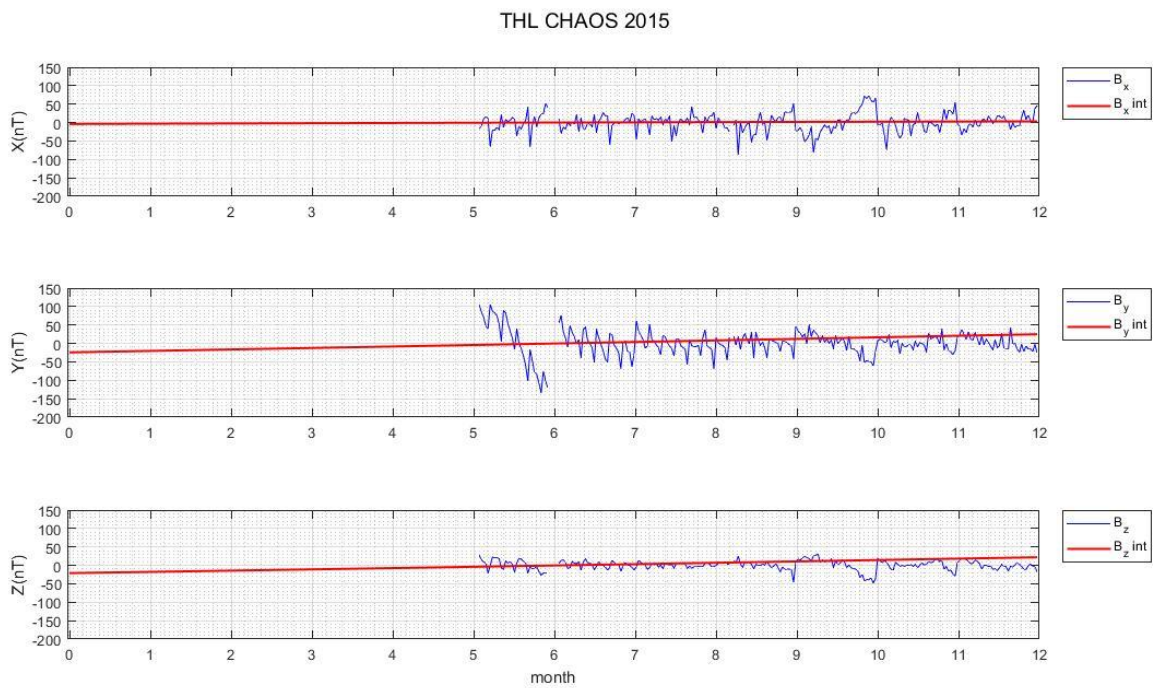
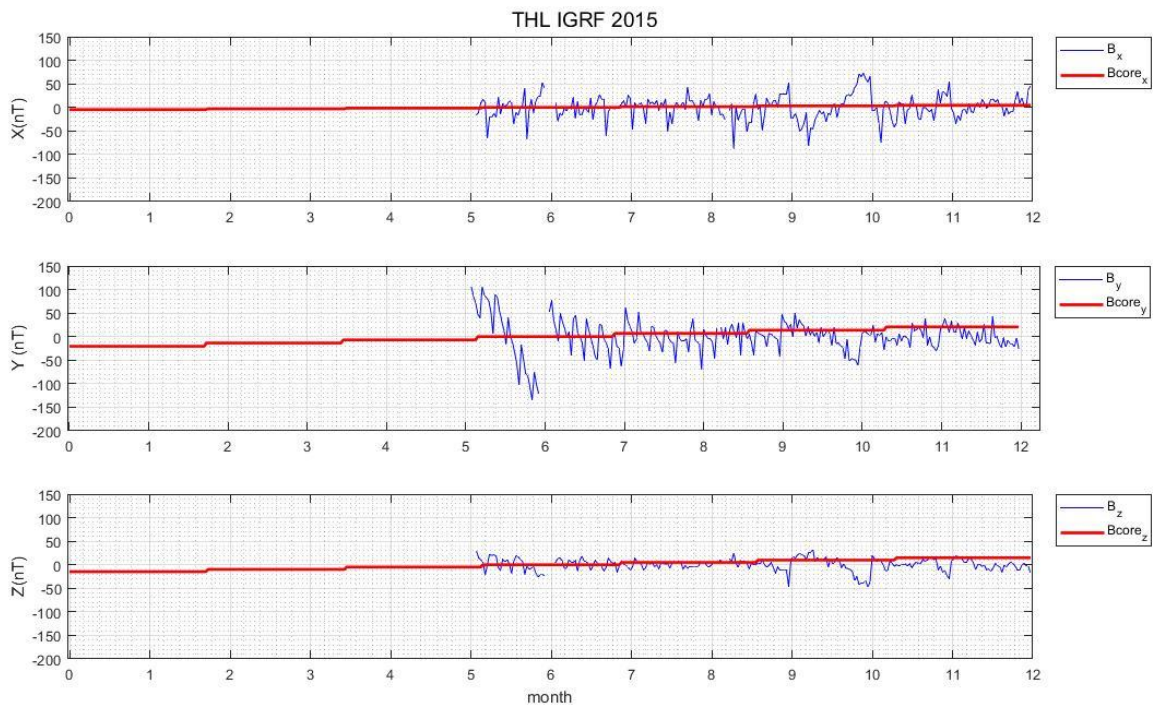
### VLI CHAOS 2015



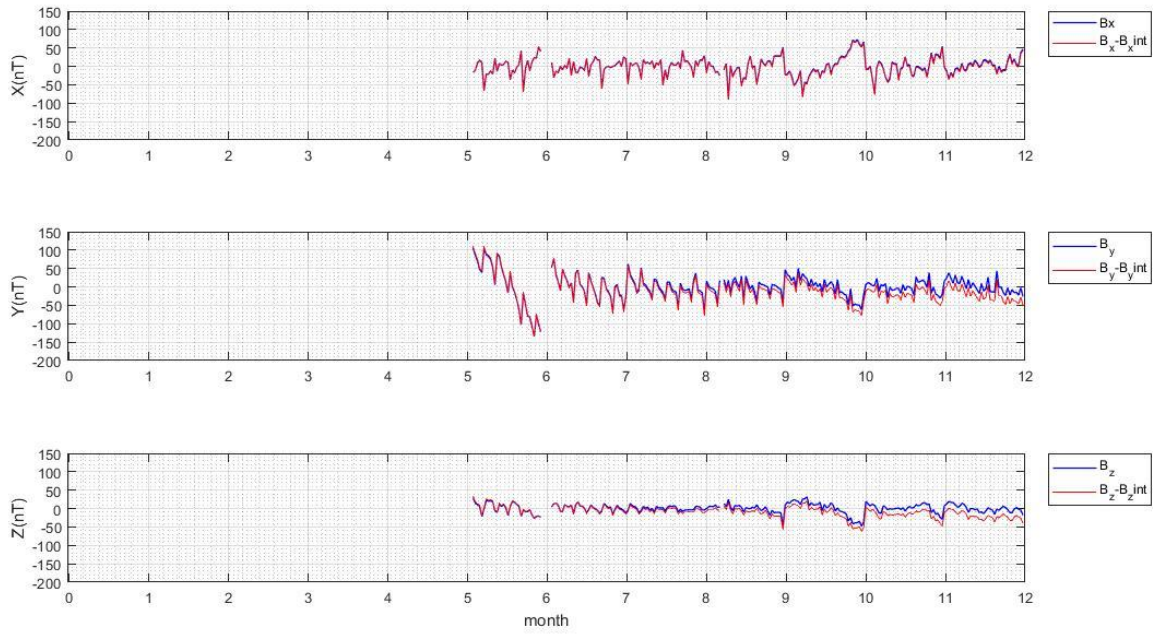
### VLI CHAOS 2015



Εικόνα 52: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου με την μεταβολή του κύριου πεδίου για το σταθμό THL

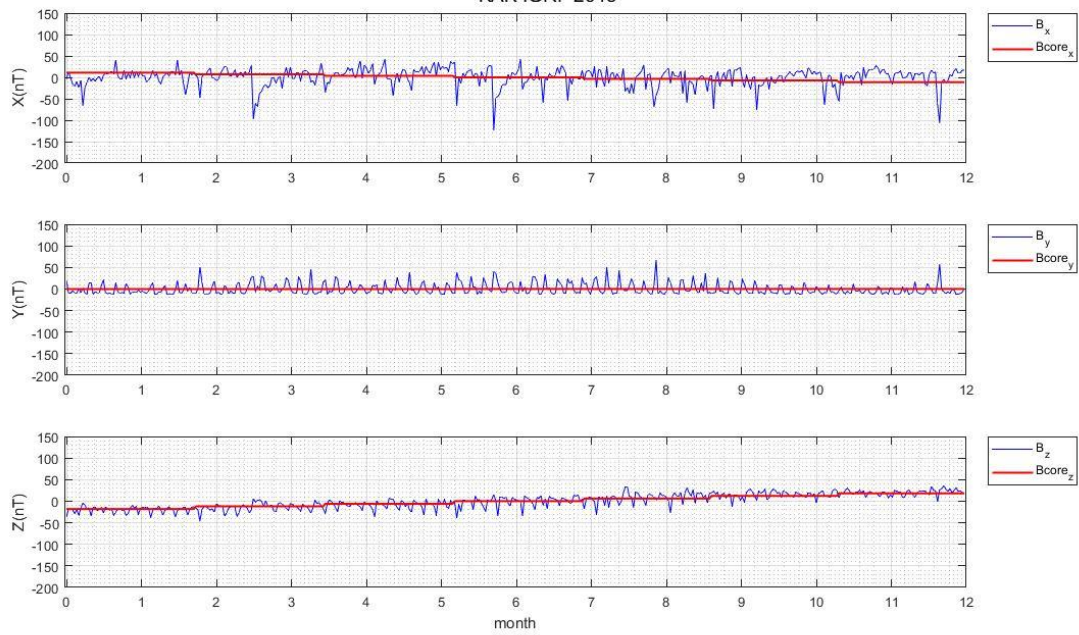


THL CHAOS 2015

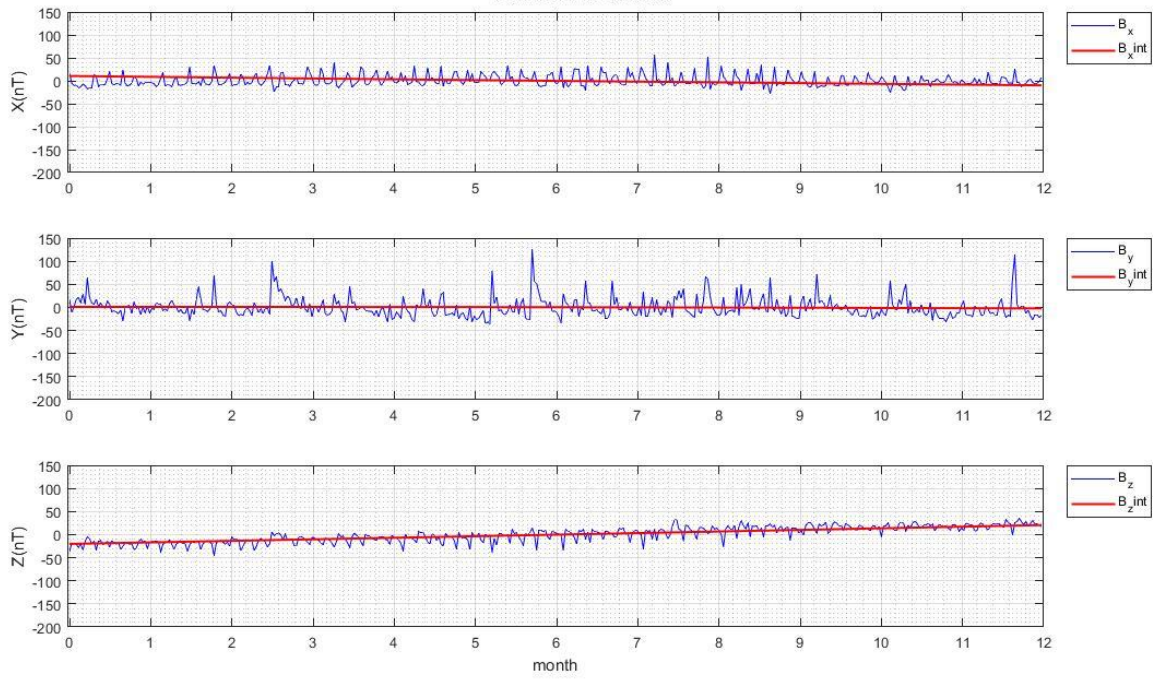


Εικόνα 53: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου με την μεταβολή του κύριου πεδίου για το σταθμό ΚΑΚ

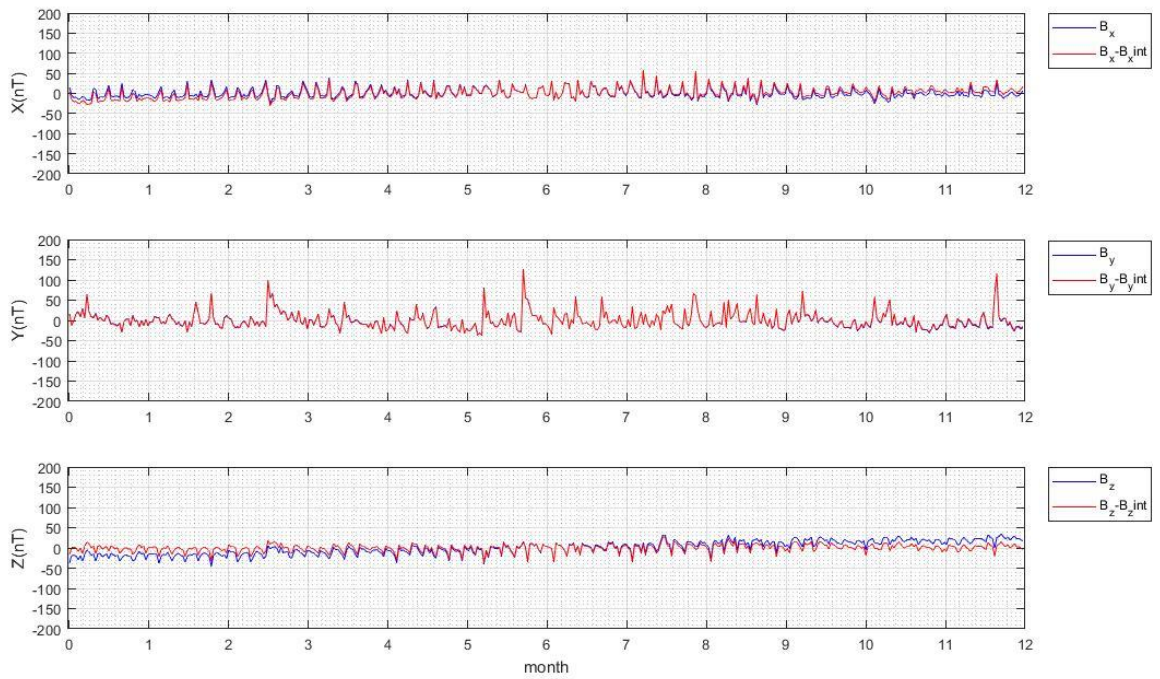
ΚΑΚ IGRF 2015



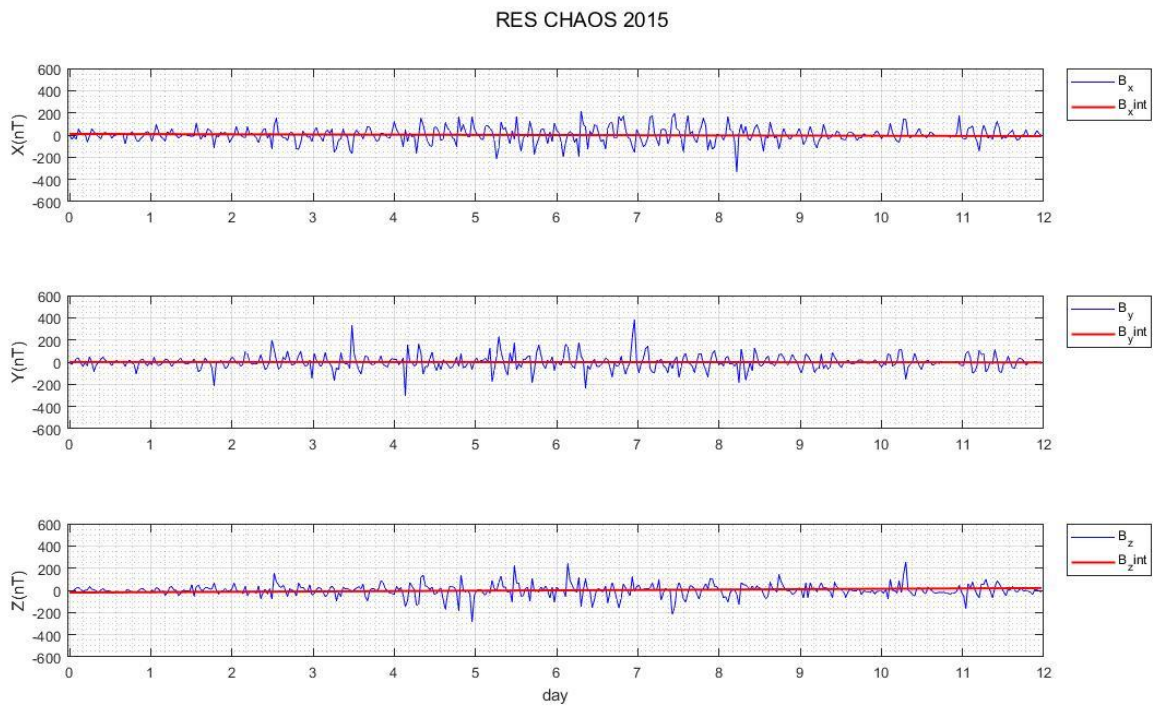
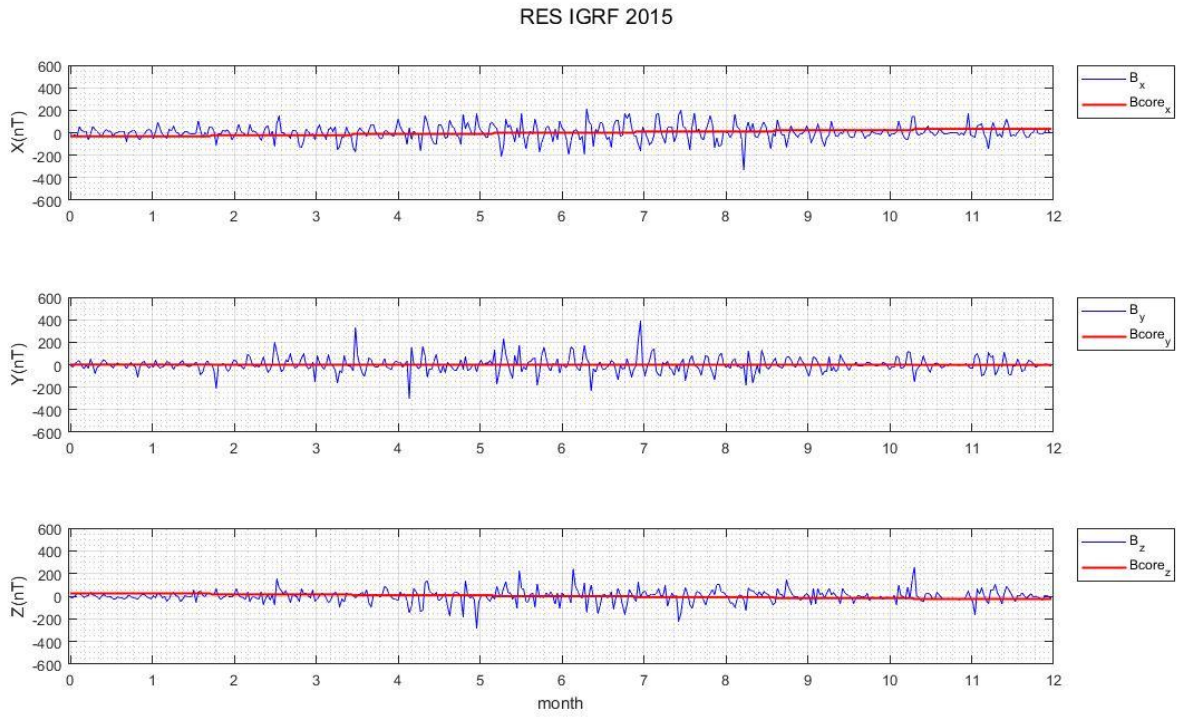
### KAK CHAOS 2015

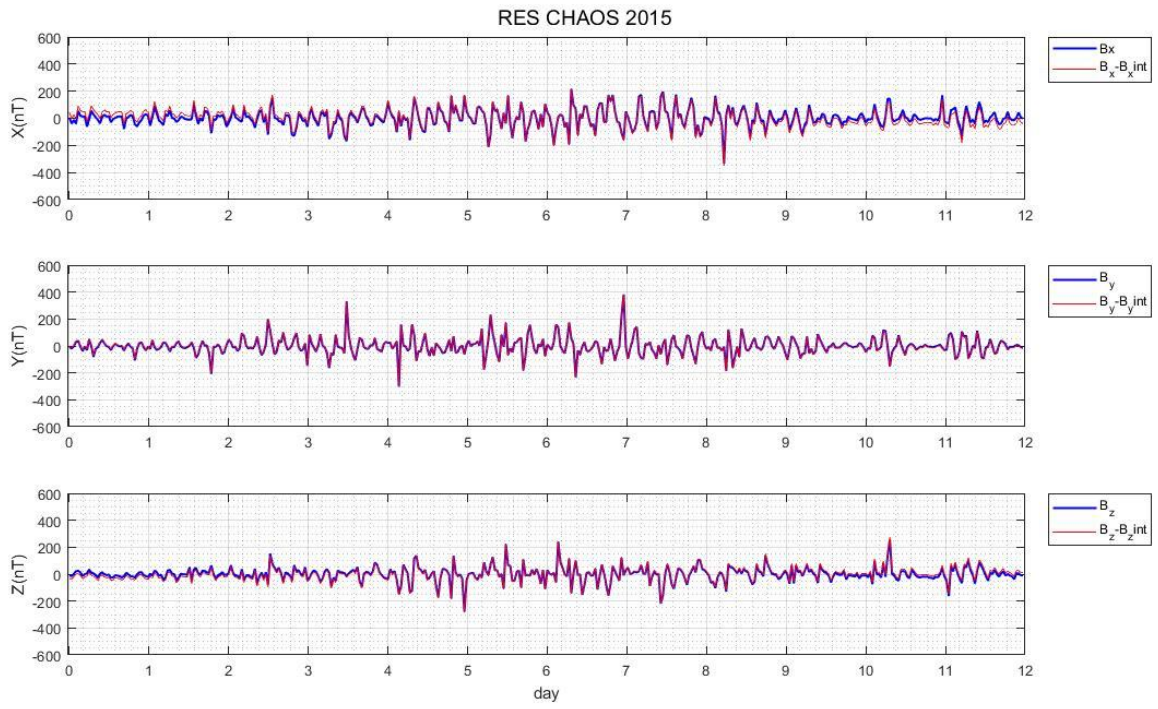


### KAK CHAOS 2015

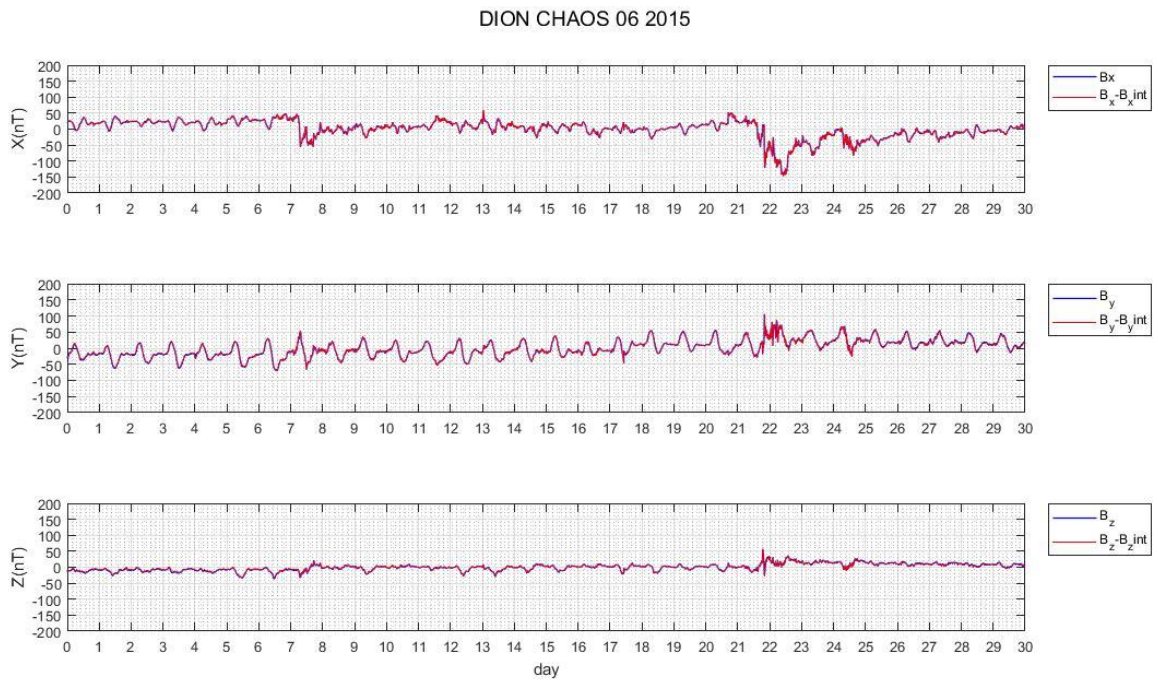


Εικόνα 54: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου με την μεταβολή του κύριου πεδίου για το σταθμό RES

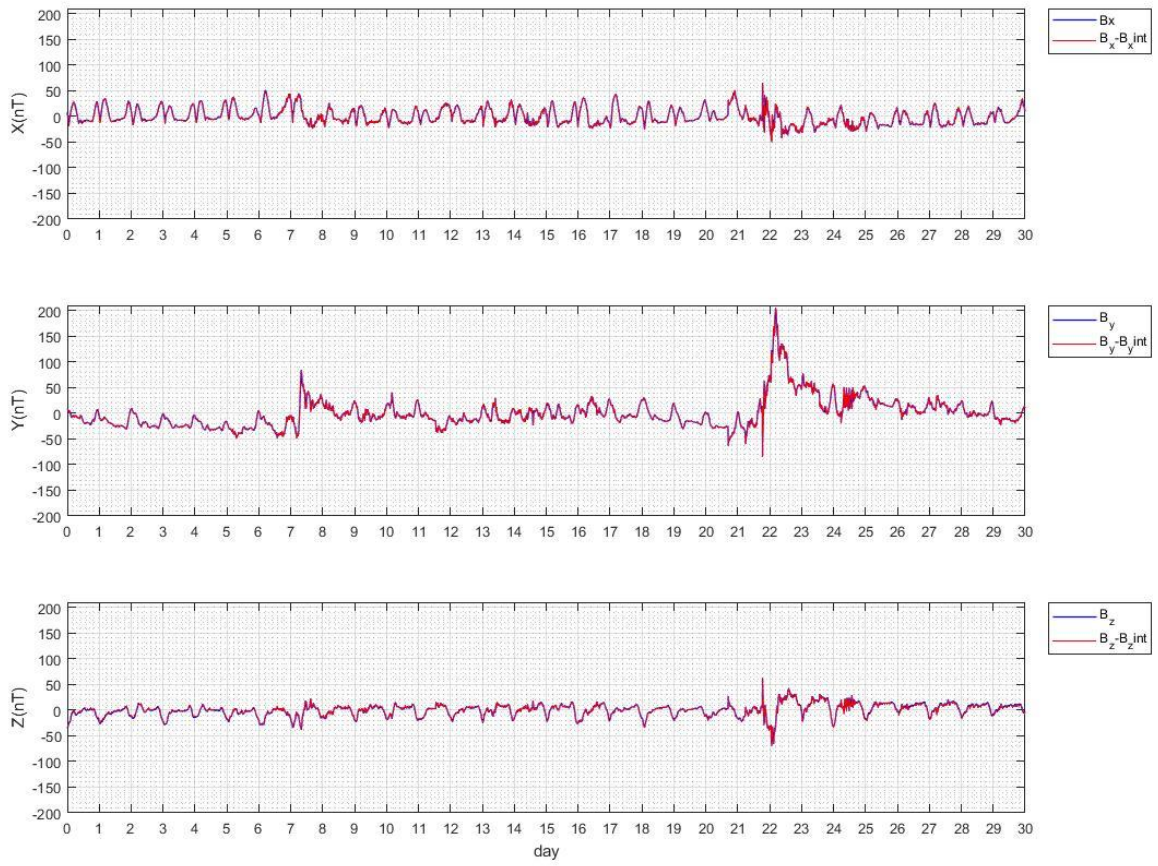




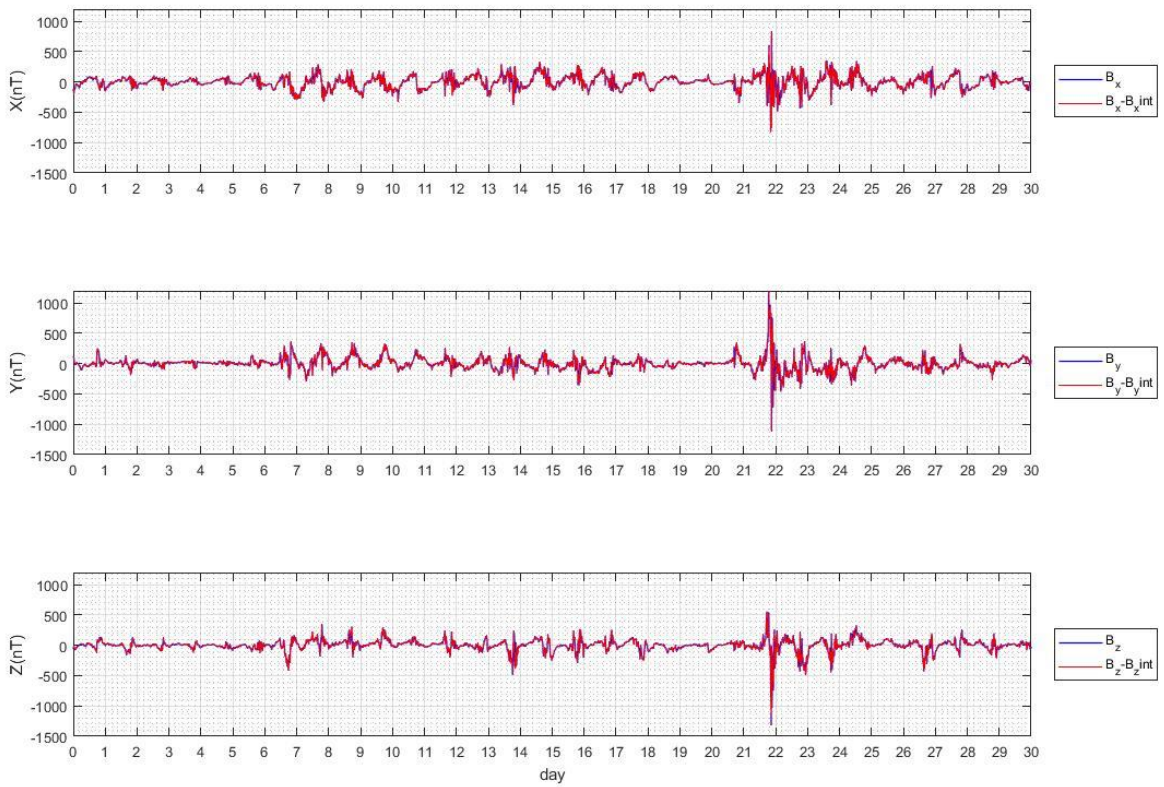
Εικόνα 55: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου με την μεταβολή του κύριου πεδίου για τον μήνα Ιούνιο στους σταθμούς DION, KAK και RES



### KAK CHAOS 06 2015



### RES CHAOS 06 2015





### 3.1.3.β) Πεδίο εξωτερικών πηγών

Στον πίνακα 14 παραθέτουμε διαγράμματα, στα οποία συγκρίνουμε την μεταβολή του πεδίου των εξωτερικών πηγών, όπως υπολογίζονται από το CHAOS-6, σε σύγκριση με την μεταβολή του πεδίου, όπως μετρείται από τους επίγειους σταθμούς που χρησιμοποιούμε (δηλαδή της χρονοσειράς των δεδομένων).

Παρατηρούμε ότι τον μήνα Ιούνιο υπάρχει αύξηση (κατά απόλυτη τιμή) της έντασης του πεδίου των μαγνητοσφαιρικών πηγών μεταξύ της 21<sup>ης</sup> και 23<sup>ης</sup> ημέρες, όπου παρατηρήθηκε μία από τις μεγαλύτερες γεωμαγνητικές καταιγίδες του έτους.

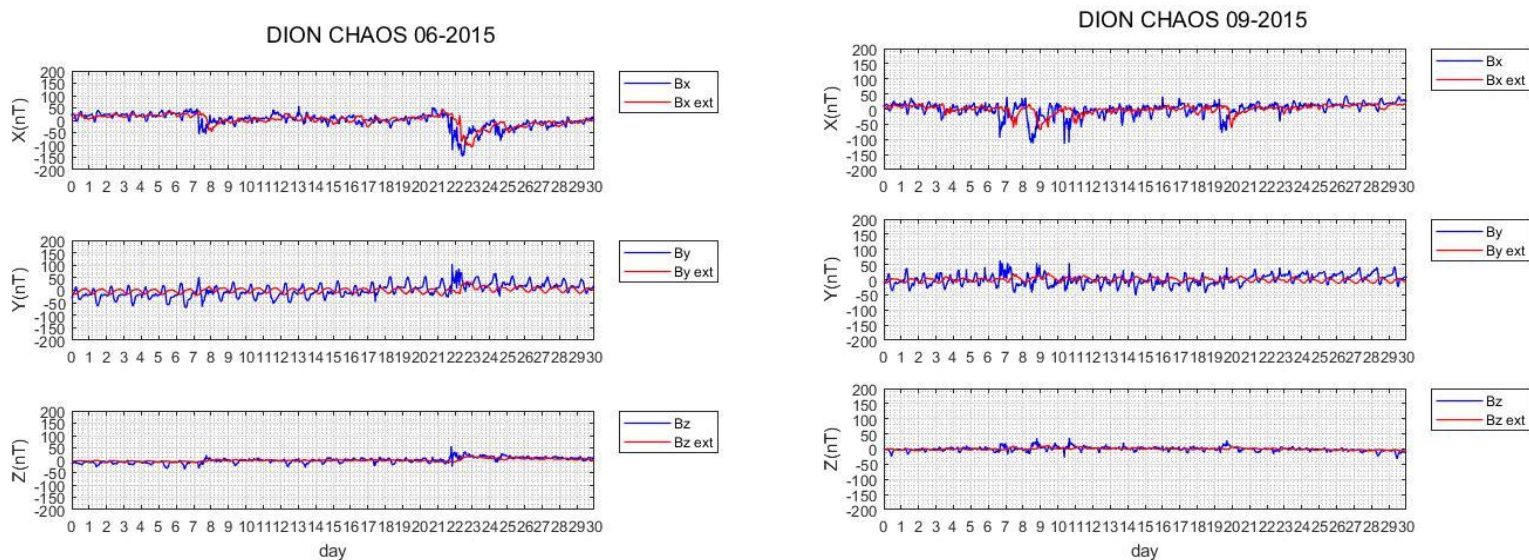
Όμοια τον Σεπτέμβρη έχουμε αύξηση του ίδιου πεδίου που συμπίπτει με μείωση της οριζόντιας συνιστώσας, κυρίως της Χ.

Να σημειωθεί ότι για στον σταθμό RES αυτές οι μεταβολές δεν είναι το ίδιο εμφανείς, καθώς έχουμε πολύ μεγαλύτερες μεταβολές στην ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου συνολικά. Οι διαταραχές αυτές δεν οφείλονται μόνο στις εξωτερικές πηγές που υπολογίζει το CHAOS-6, αλλά και σε άλλες συνεισφορές.

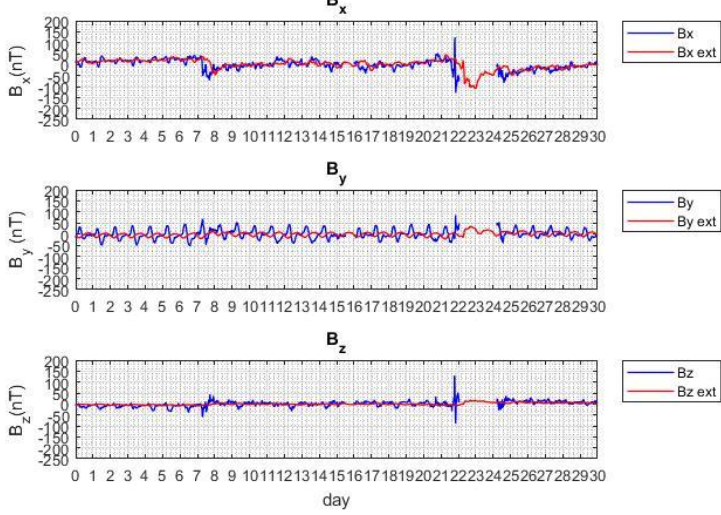
Στον πίνακα 15 παραθέτουμε την ένταση του μαγνητοσφαιρικού πεδίου για τους τρεις σταθμούς DION, VLI και RES. Επιλέγουμε αυτούς τους τρεις σταθμούς, καθώς βρίσκονται σε τρία διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη. Βλέπουμε ότι η ένταση του πεδίου αυτού είναι σχεδόν ίδια και στις τρεις περιπτώσεις και μεγαλύτερη μεταβολή παρατηρείται στην συνιστώσα Χ.

*Σημείωση: Οι αρνητικές τιμές των πεδίων των μαγνητοσφαιρικών πηγών σχετίζονται με το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούμε. Δηλαδή, ότι η ένταση του πεδίου μεταβάλλεται αντίθετα της κατεύθυνσης του διανύσματος.*

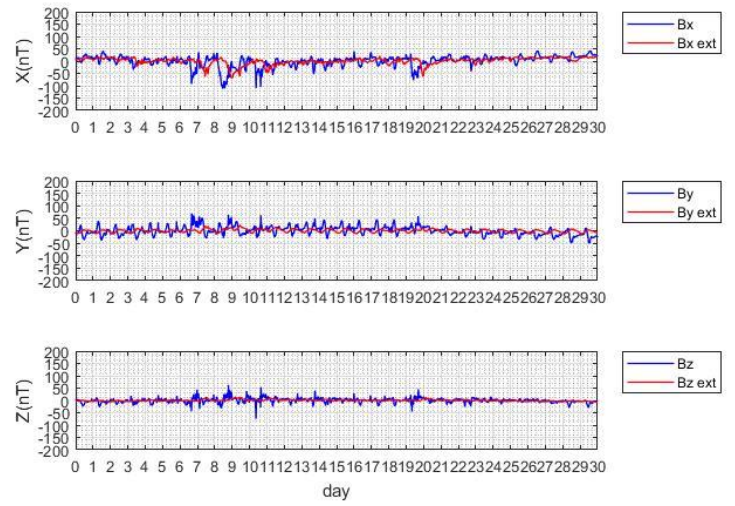
Εικόνα 56: Σύγκριση της μεταβολής του πεδίου (μπλε καμπύλη) με την μεταβολή του μαγνητοσφαιρικού πεδίου (κόκκινη καμπύλη), για τους μήνες Ιούνιο (αριστερή στήλη) και Σεπτέμβρη (δεξιά στήλη) και για όλους στους σταθμούς



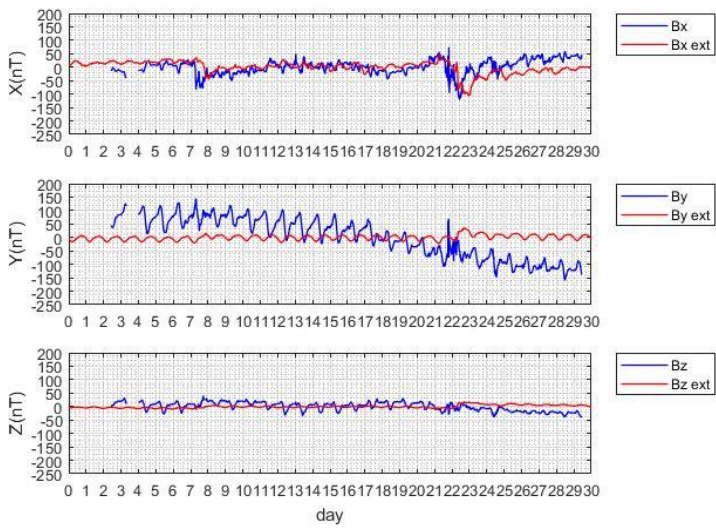
VLJ CHAOS 06-2015



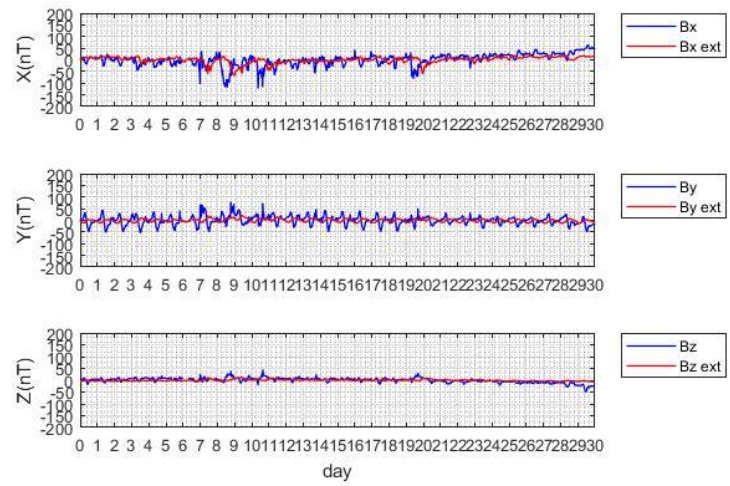
VLJ CHAOS 09-2015



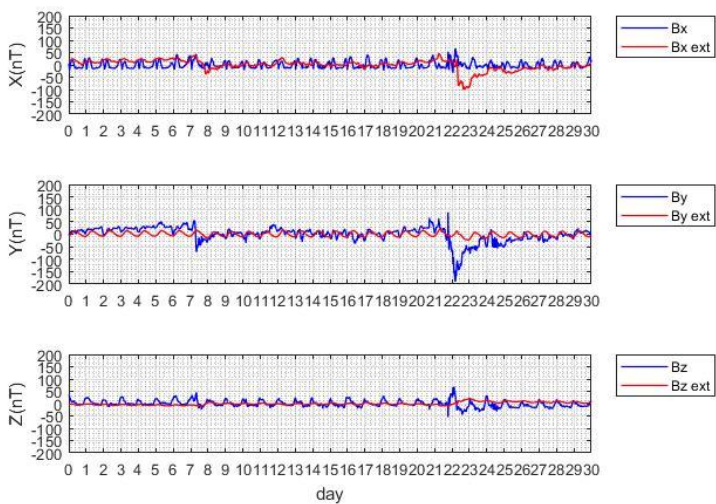
THL CHAOS 06-2015



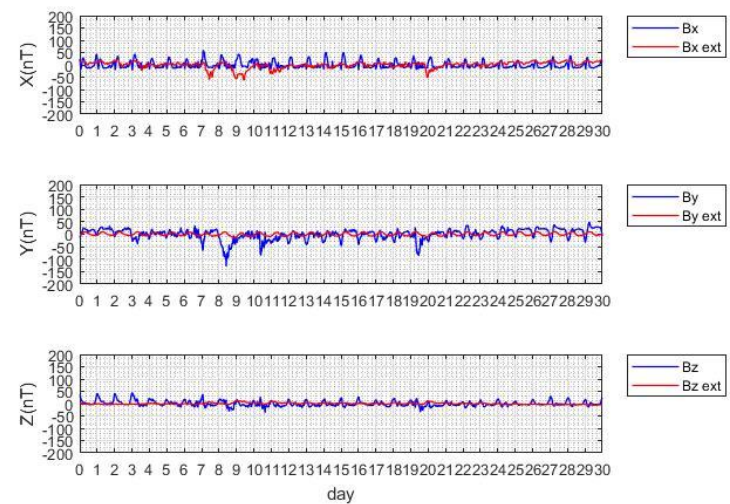
THL CHAOS 09-2015



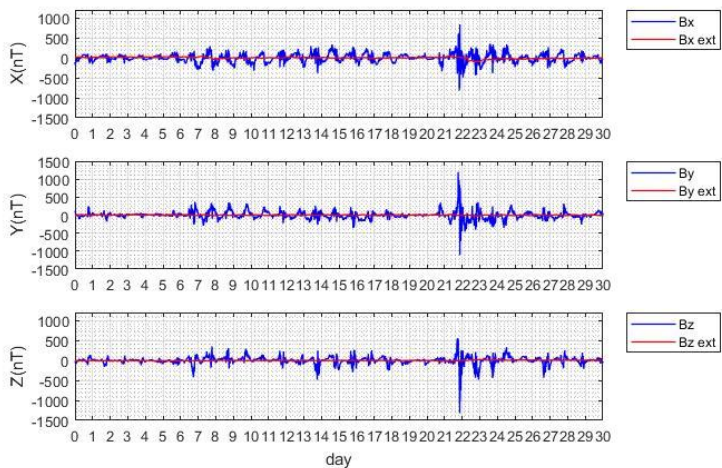
KAK CHAOS 06-2015



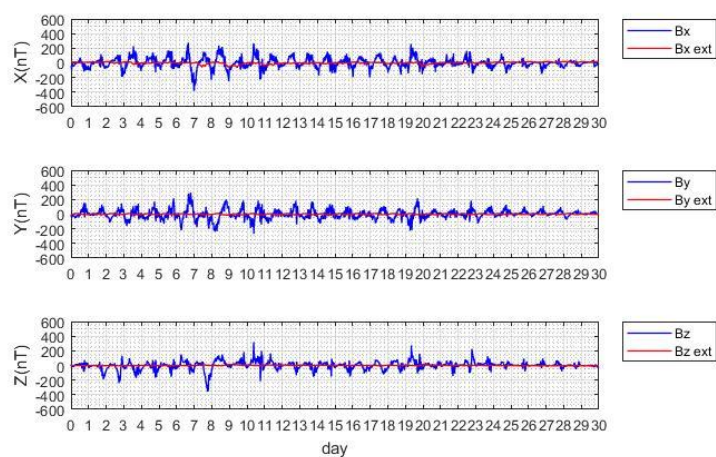
KAK CHAOS 09-2015



RES CHAOS 06-2015

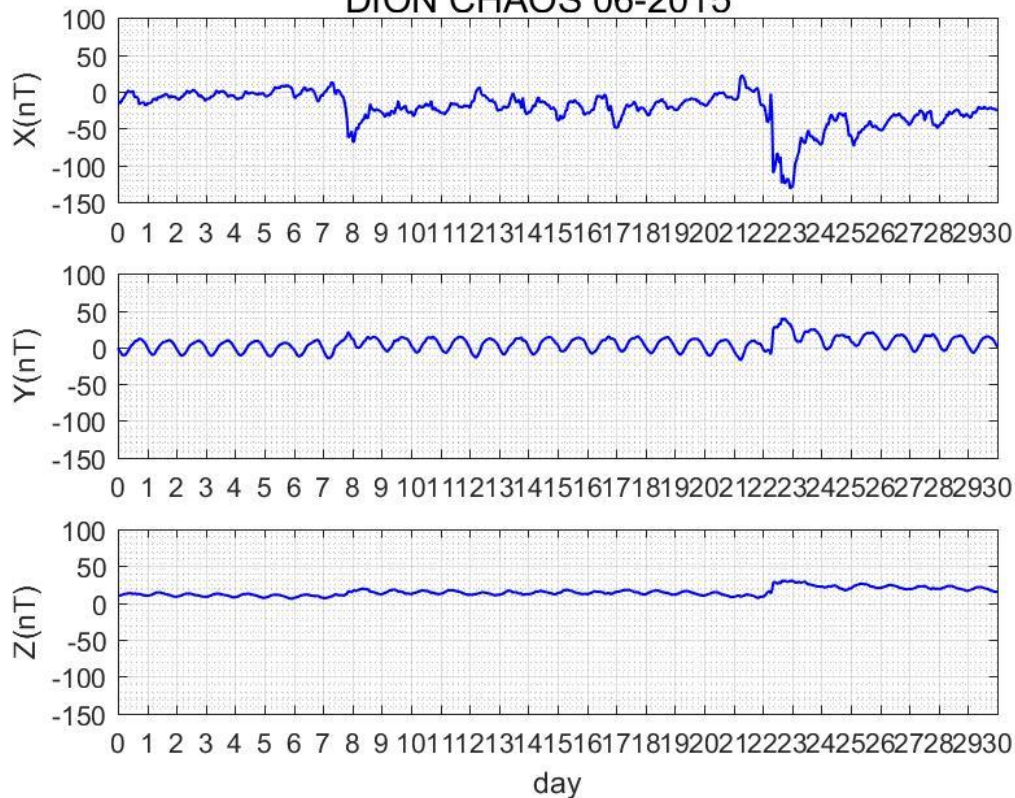


RES CHAOS 09-2015

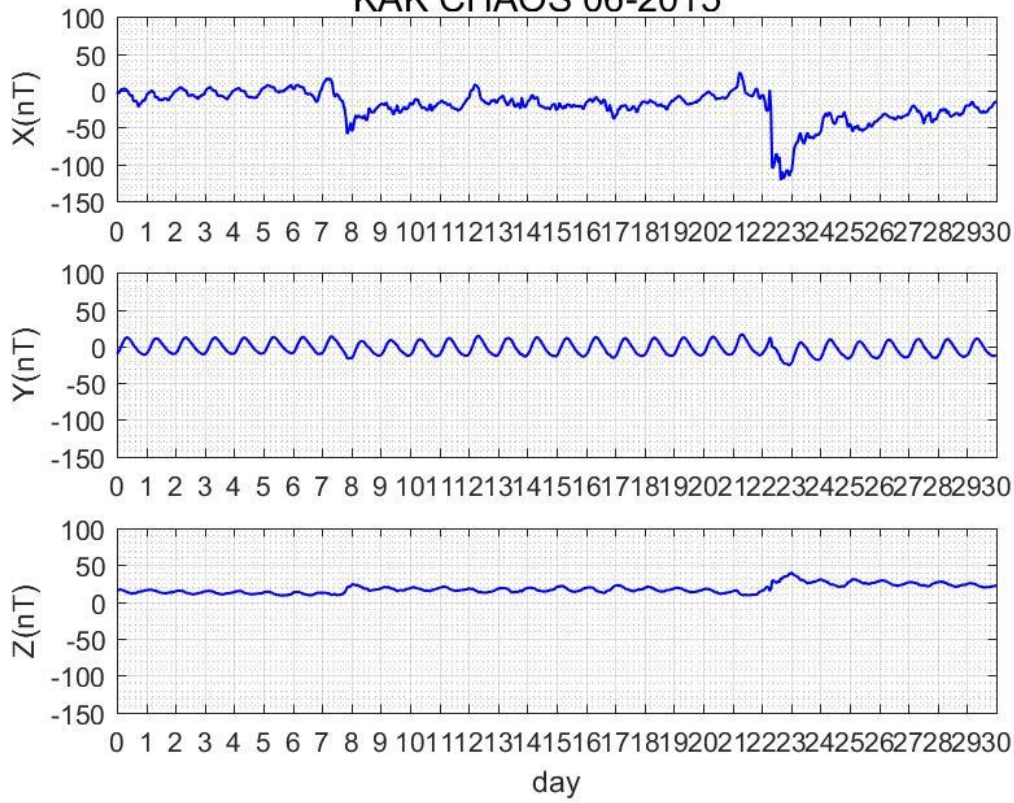


Εικόνα 57: Η ένταση του μαγνητοσφαιρικού πεδίου για τους τρεις σταθμούς DION, KAK και RES

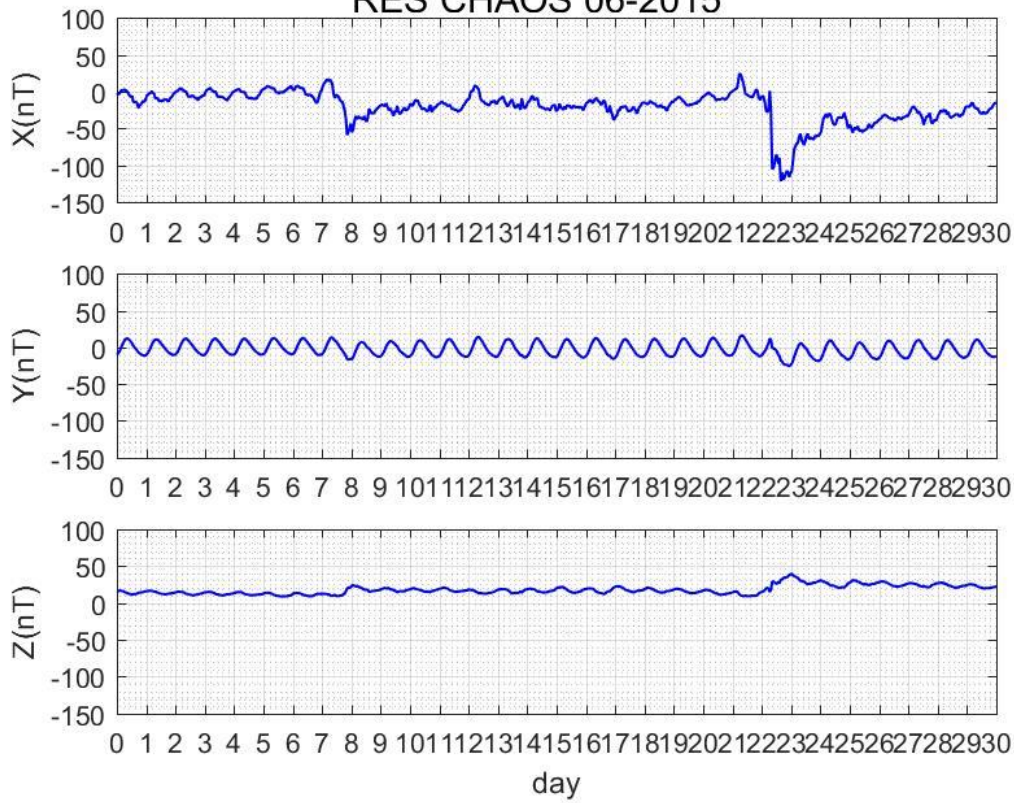
DION CHAOS 06-2015



### KAK CHAOS 06-2015



### RES CHAOS 06-2015



### 3.1.3.γ) Ολικό πεδίο

Σε επόμενο βήμα υπολογίζουμε το άθροισμα της μεταβολής του πεδίου, όπως μετρίεται από τους επίγειους σταθμούς (δηλαδή της χρονοσειράς των δεδομένων), και των δύο πεδίων (κύριο και εξωτερικό) που υπολογίζει το CHAOS-6.

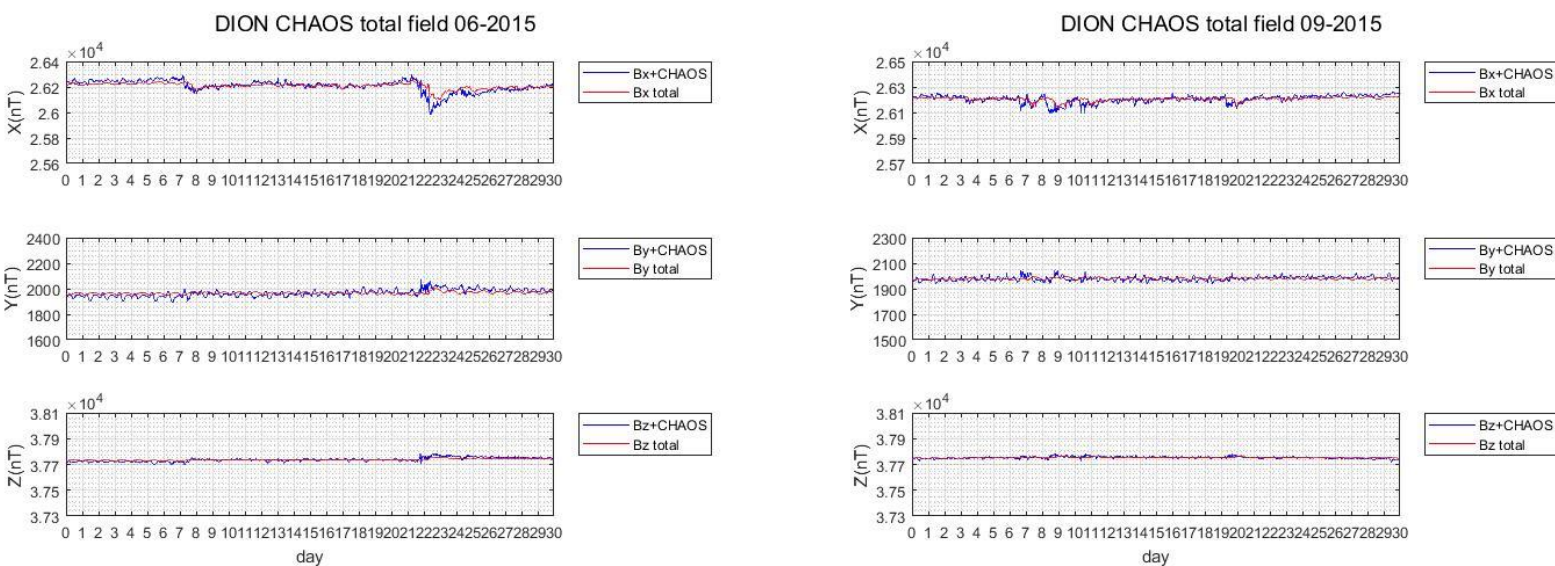
Στον πίνακα 15 παραθέτουμε διαγράμματα για τους μήνες Ιούνιο και Σεπτέμβρη για όλους τους σταθμούς, στα οποία συγκρίνουμε την τιμή του ολικού πεδίου που μας δίνει το CHAOS-6 με το άθροισμα αυτό.

Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει αντιστοίχιση των παραπάνω. Εξαιρέση είναι οι Ιούνιος για τον σταθμό THL, όπου υπάρχει μία ορισμένη κλίση στην χρονοσειρά, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ταύτιση.

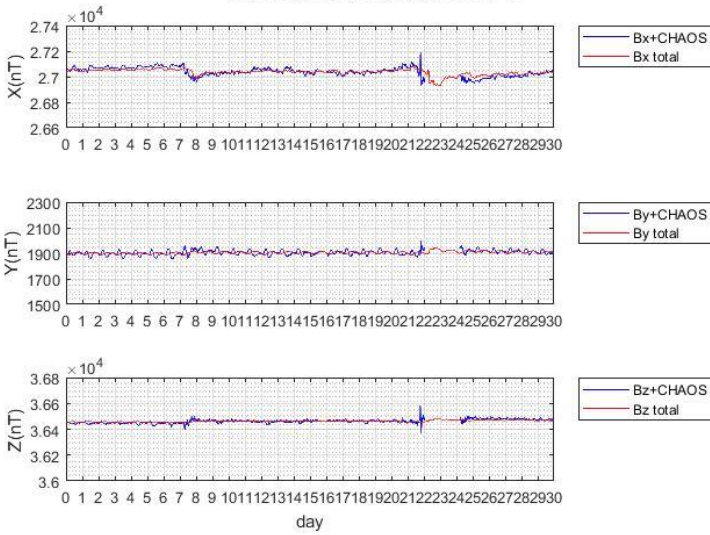
Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του πεδίου στην Z συνιστώσα αυξάνονται, καθώς αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος. Σηλαδή στους ελληνικούς σταθμούς DION, VLI και THL, έχουμε μικρότερες τιμές, ακολουθεί ο σταθμός KAK που βρίσκεται σε μεσαίο προς υψηλό γεωγραφικό πλάτος και τέλος στο RES όπου παρατηρούμε τις υψηλότερες τιμές, καθώς βρίσκεται σε πολική περιοχή.

Σημειώνεται ότι σε όλα τα διαγράμματα ο κατακόρυφος άξονας έχει την ίδια κλίμακα, ώστε να καθίσταται εύκολη η σύγκριση των μεταβολών.

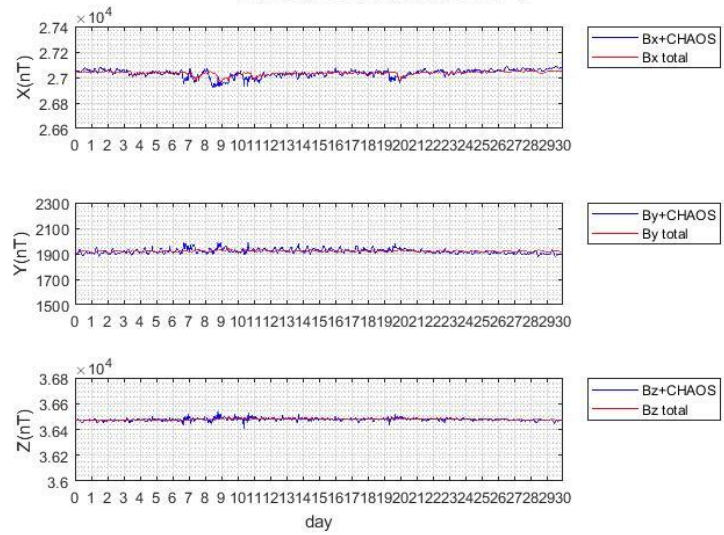
Εικόνα 58: Σύγκριση του ολικού πεδίου (κόκκινη καμπύλη) με το άθροισμα της μεταβολής του πεδίου και των τιμών του CHAOS-6 (μπλε καμπύλη), για τους μήνες Ιούνιο (αριστερή στήλη) και Σεπτέμβρη (δεξιά στήλη) και για όλους τους σταθμούς



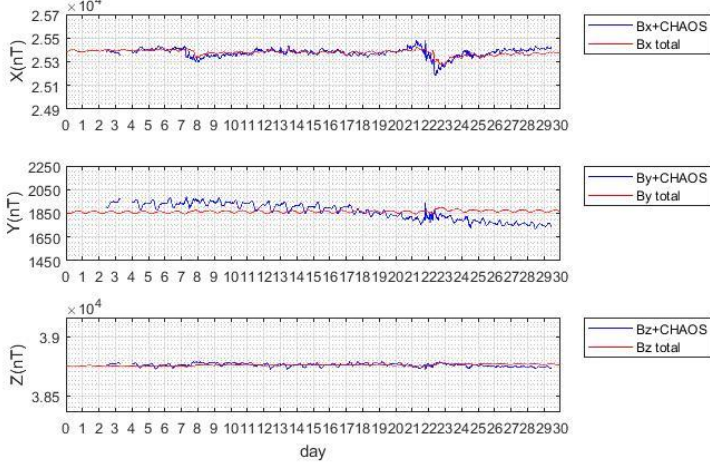
VLI CHAOS total field 06-2015



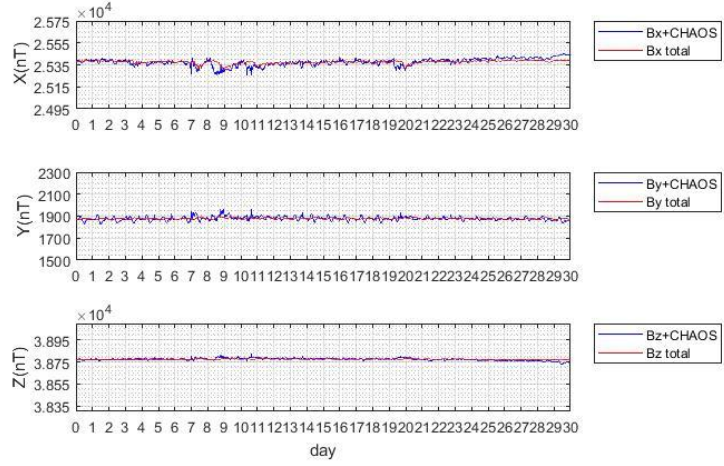
VLI CHAOS total field 09-2015



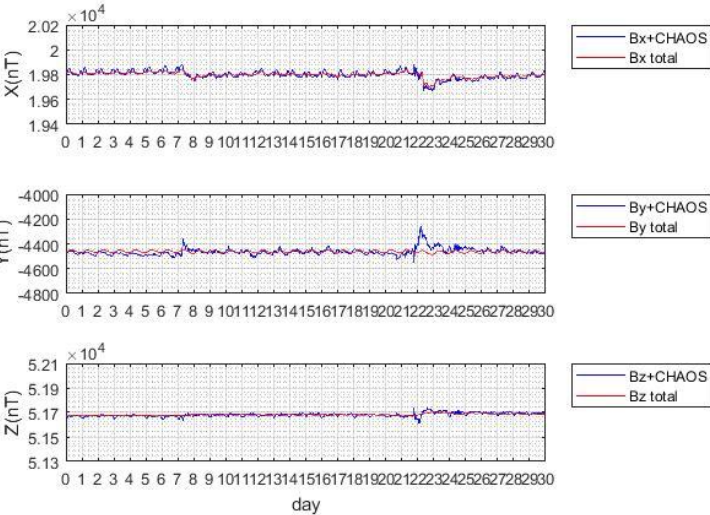
THL CHAOS total field 06-2015



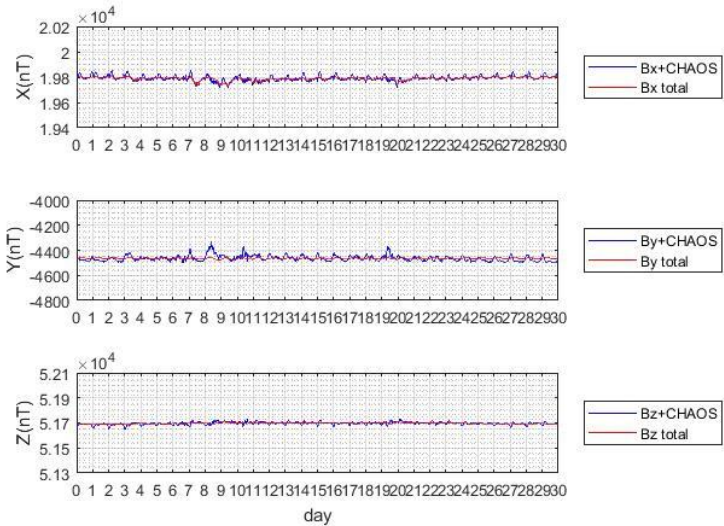
THL CHAOS total field 09-2015

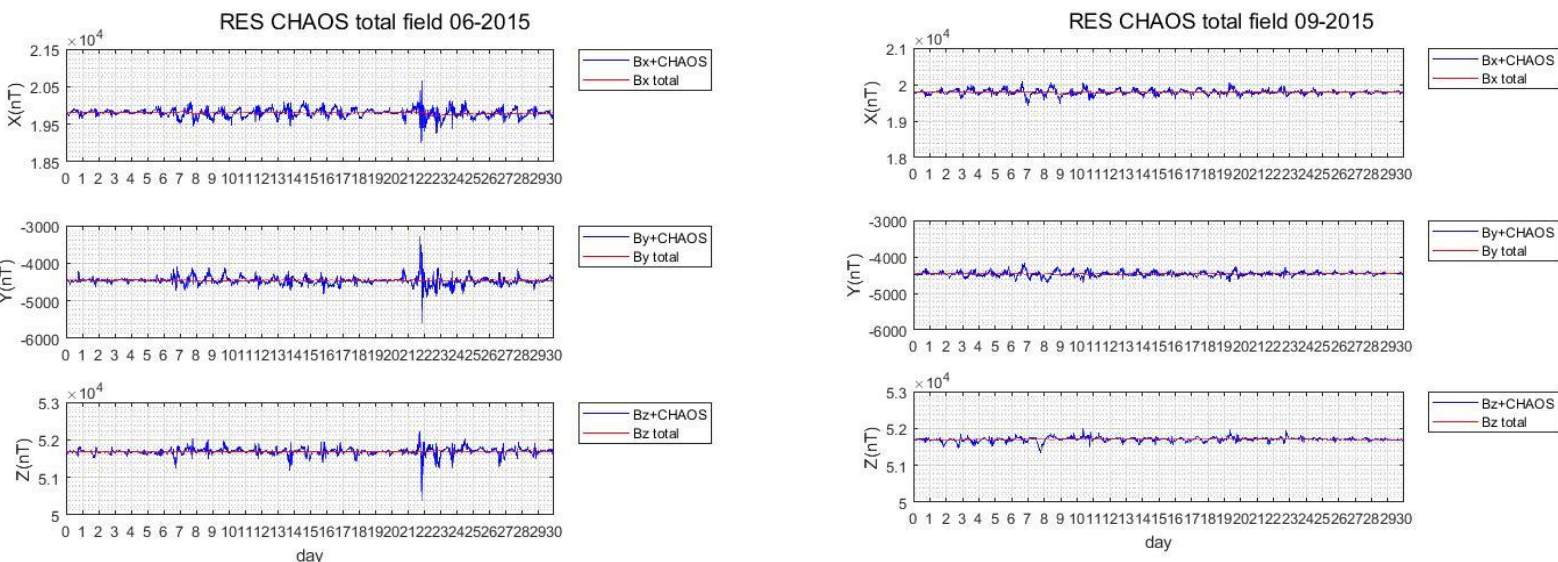


KAK CHAOS total field 06-2015



KAK CHAOS total field 09-2015





### 3.2. Αφαίρεση του $S_q$

Η διαδικασία καθορισμού και απαλειφής της ημερήσιας μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου και δεν αποτελεί ένα τετριμένο ζήτημα. Μάλιστα αποτελεί κομβικό ζήτημα για την πλήρη κατανόηση των φυσικών διεργασιών στην ιονόσφαιρα. Τα περιεκτικά μοντέλα (comprehensive models), εμπεριέχουν μαθηματικές φόρμουλες για τις συνιστώσες αυτές. Έτσι και για το πεδίο που παράγεται στην ιονόσφαιρα υπάρχει μαθηματική περιγραφή με βάση το μοντέλο του ιονοσφαιρικού δυναμώ.

Εμείς θα ακολουθήσουμε μία απλή διαδικασία που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην μελέτη του  $S_q$ . Συνοπτικά, θα απομονώσουμε τις 5 πιο ήσυχες ημέρες κάθε μήνα και θα εξάγουμε τον μέσο όρο αυτών, καθώς οι ημέρες αυτές κυριαρχούνται από το  $S_q$ , λόγω έλλειψης γεωμαγνητικών διαταραχών. Αυτή η ημερήσια μεταβολή που προκύπτει αντιστοιχεί στο  $S_q$ . Απαιράιτητο είναι όμως να αφαιρέσουμε πρώτα μεταβολές που οφείλονται σε άλλες πηγές. Τέτοιες είναι η μεταβολή του κύριου πεδίου του πεδίου και η μεταβολή λόγω εξωτερικών πηγών, ώστε να απομονώσουμε την μεταβολή λόγω του  $S_q$ . Στην βιβλιογραφία χρησιμοποιείται κατά κόρον ο δείκτης  $D_{st}$  για τον καθορισμό της συνεισφοράς των εξωτερικών πηγών. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα του CHAOS-6.

Ως baseline θα χρησιμοποιήσουμε τον μέσο όρο των τιμών των 5 ημερών, ώστε η μεταβολή να ταλαντώνεται γύρω από το 0.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφαλαίο 1.1.2, ο μηχανισμός παραγωγής του  $S_q$  διαφέρει στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως η μέθοδος εξαγωγής του είναι παρόμοια με την παραπάνω (Paper: Quiet-time magnetic variations at high latitude observatories). Γι αυτό το λόγο

#### 3.2.1 Μέθοδος

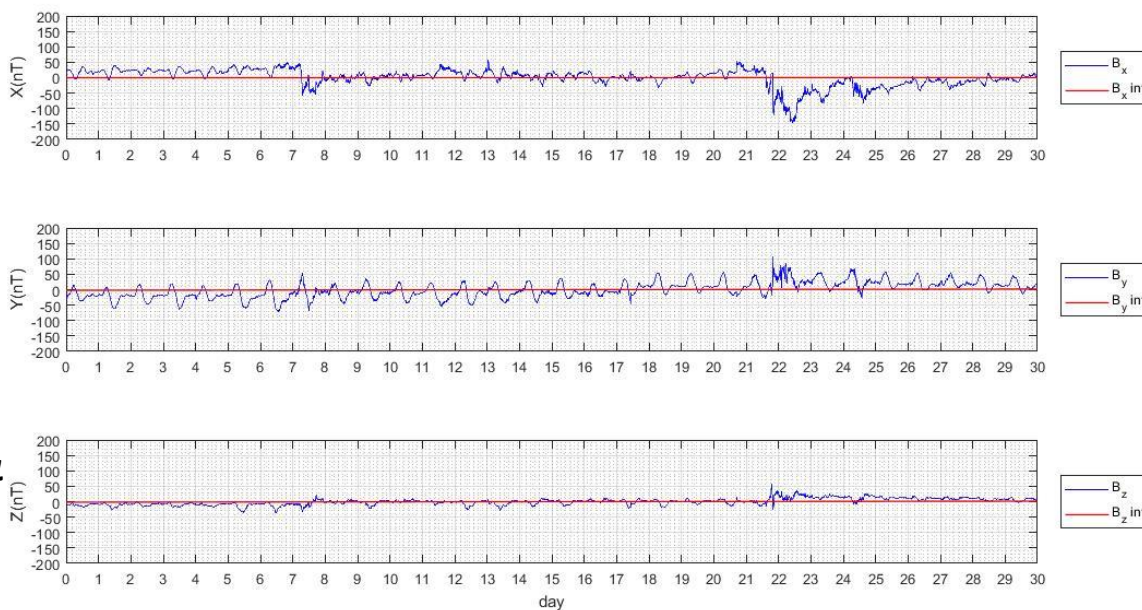
Τα βήματα που θα ακολουθήσουμε είναι τα εξής:

1. Μετατόπιση όλων των χρονοσειρών γύρω από το 0, ώστε όλες οι μεταβολές να ταλαντώνονται γύρω από το 0
2. Αφαίρεση του yearly trend

Η αφαίρεση της μεταβολής του κύριου πεδίου, θα γίνει με χρήση του μοντέλου CHAOS-6, καθώς το IGRF-12, καθώς έχει μικρότερη διακριτική ικανότητα και δεν είναι το ίδιο εύρηστο.

Αφαιρούμε σημείο προς σημείο από την χρονοσειρά των δεδομένων μας την μεταβολή λόγω του κύριου

DION CHAOS 06-2015 comparison

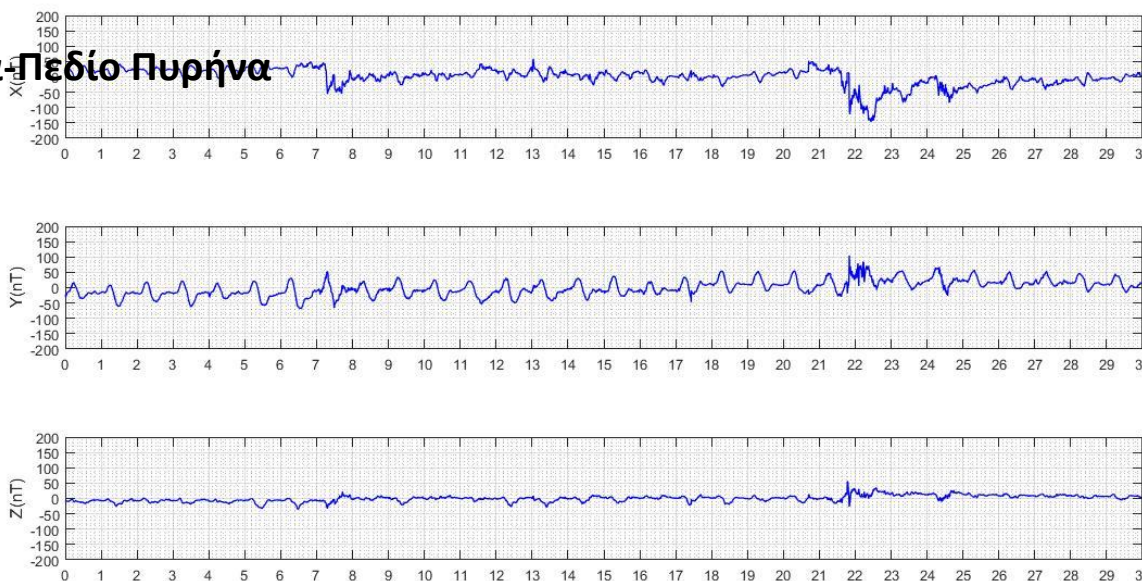


Χρονοσειρά



Χρονοσειρά-Πεδίο Πυρήνα

DION CHAOS 06 2015



Εικόνα 59: Αφαίρεση του yearly trend από τη χρονοσειρά

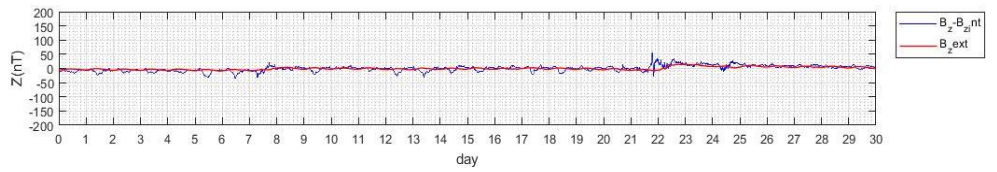
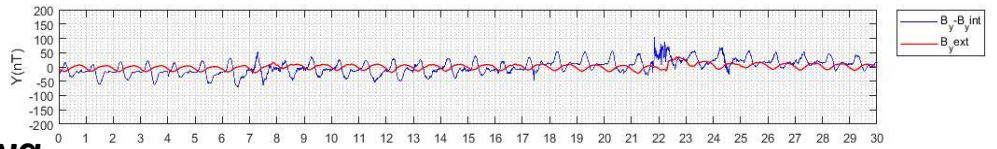
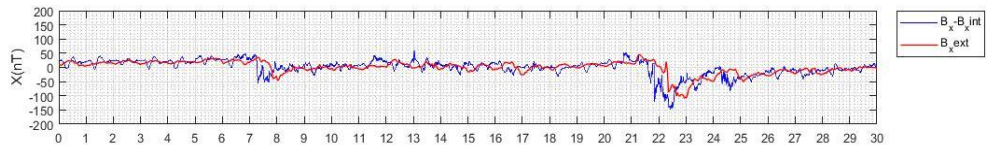
πεδίου. Στην παρακάτω εικόνα αναπαριστούμε σχηματικά την διαδικασία αυτήν.

### 3. Αφαίρεση της μεταβολής λόγω εξωτερικών πηγών

Αφαιρούμε σημείο προς σημείο από την χρονοσειρά των δεδομένων μας την μεταβολή λόγω του κύριου πεδίου. Στην παρακάτω εικόνα αναπαριστούμε σχηματικά την διαδικασία αυτήν.



DION CHAOS 06-2015

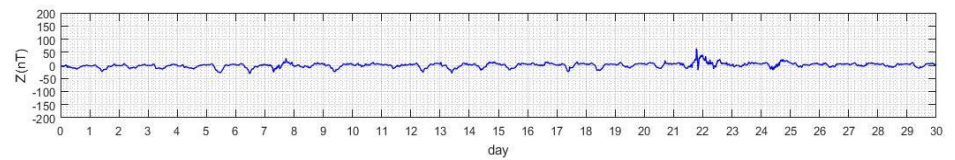
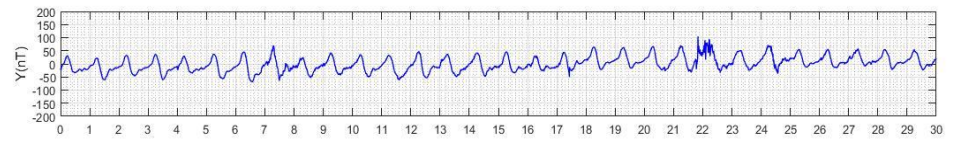
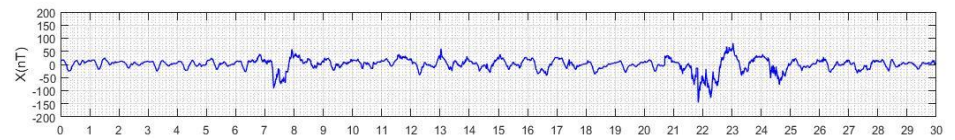


Χρονοσειρά-Πεδίο Πυρήνα



Χρονοσειρά-Πεδίο Πυρήνα-Πεδίο εξωτερικών πηγών

DION CHAOS 06 2015

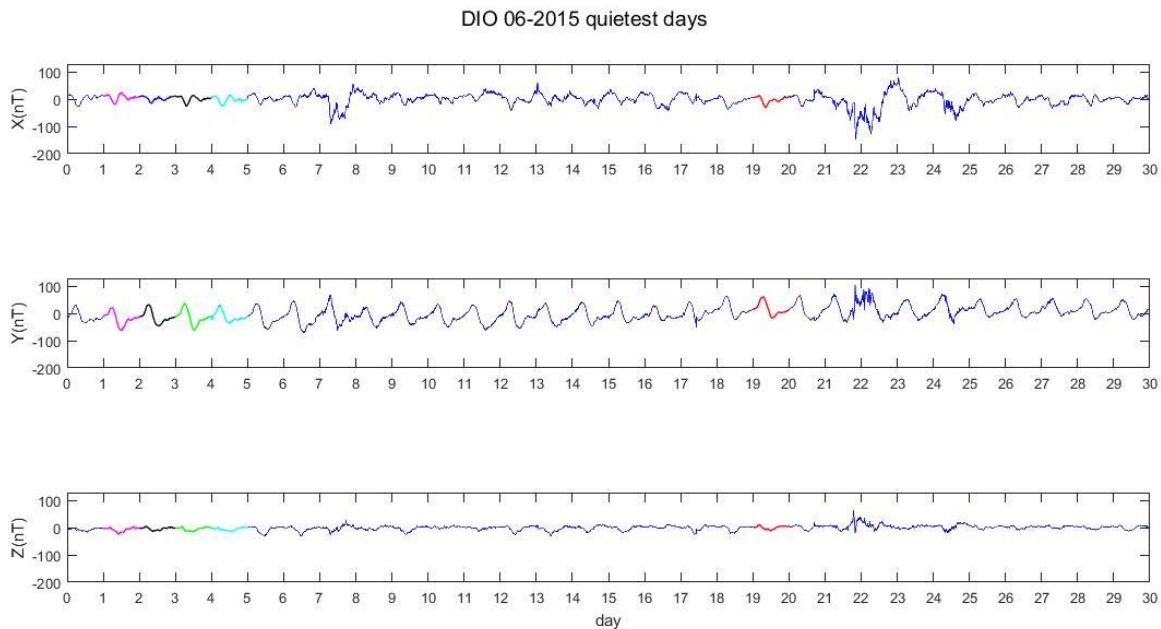


Εικόνα 60: Αφαίρεση των εξωτερικών πηγών από τη χρονοσειρά

#### 4. Εύρεση των 5 πιο ήσυχων ημερών

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 1.2, οι 5 ησυχότερες ημέρες του μήνα καθορίζονται από τον δείκτη  $K_p$ . Μπορούμε να αναζητήσουμε τις 5 αυτές ημέρες στην ιστοσελίδα: <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/quietdst/qd20101x.txt>.

Έτσι, από τα διορθωμένα πλέον δεδομένα μας, απομονώνουμε τις 5 αυτές ημέρες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 45.



Εικόνα 61: Οι 5 πιο ήσυχες ημέρες του Ιουνίου 2015 (με χρώμα)

#### 5. Κατασκευή χρονοσειράς-μέσου όρου

Στη συνέχεια, κατασκευάζουμε χρονοσειρά της οποίας κάθε τιμή αποτελεί μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών των 5 ημερών.

Δηλαδή ισχύει:

$$X_{qd}(j) = \frac{\sum_{n=1}^5 X_{qd}^n(j)}{5} \quad (\alpha)$$

$$Y_{qd}(j) = \frac{\sum_{n=1}^5 Y_{qd}^n(j)}{5} \quad (\beta)$$

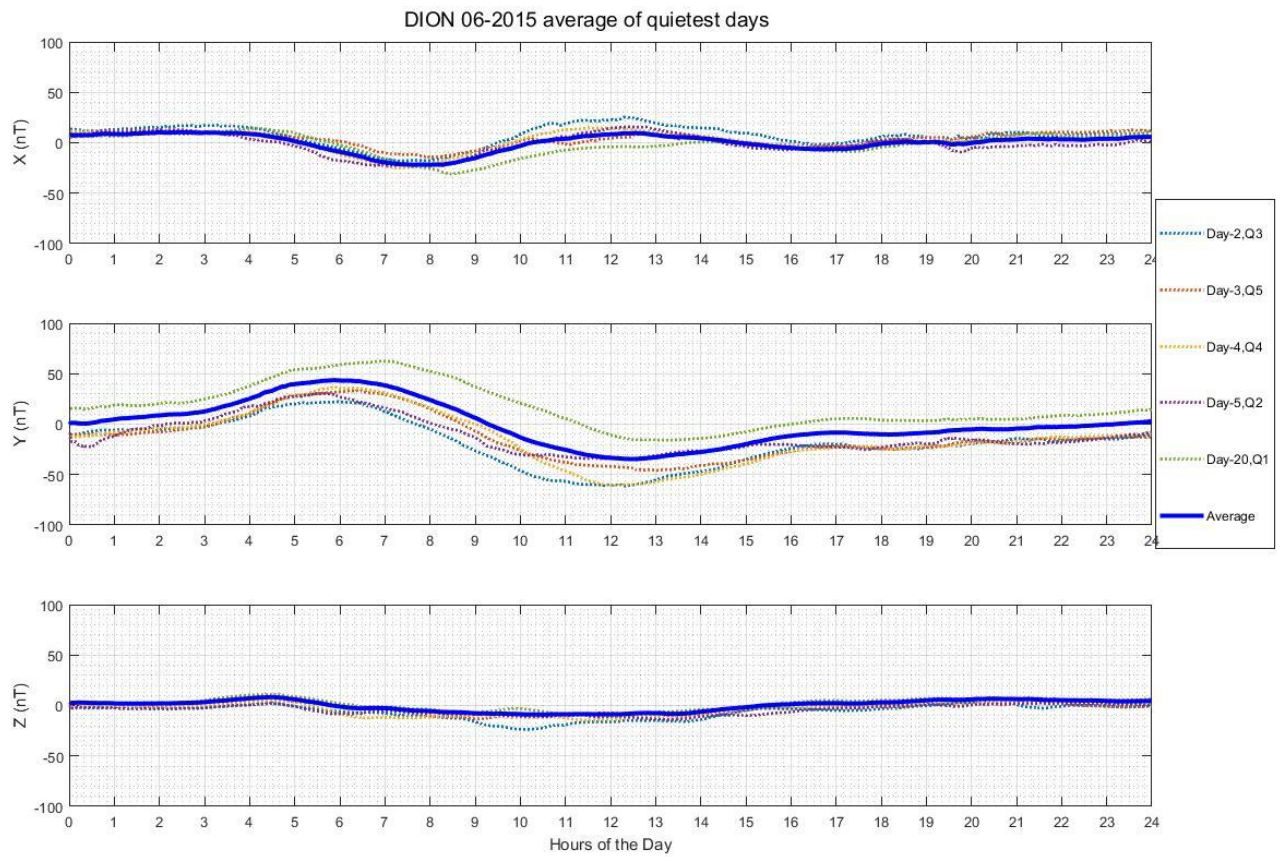
$$Z_{qd}(j) = \frac{\sum_{n=1}^5 Z_{qd}^n(j)}{5} \quad (\gamma)$$

(Εξισώσεις 29 (α), (β), (γ): Χρονοσειρές ήσυχων ημερών)

Όπου  $X_{qd}(j)$ ,  $Y_{qd}(j)$  και  $Z_{qd}(j)$  είναι η μέση τιμή των 5 ήσυχων ημερών και αντιστοιχεί στο  $S_q$  για κάθε συνιστώσα.

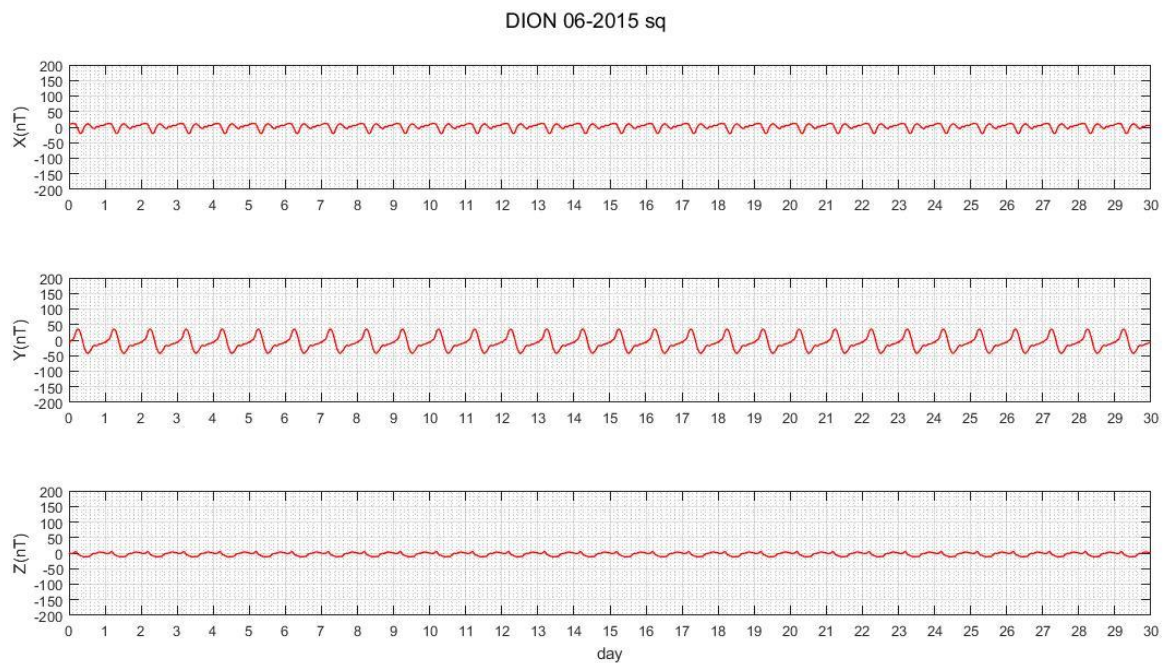
Οι όροι  $X_{qd}^n(j)$ ,  $Y_{qd}^n(j)$  και  $Z_{qd}^n(j)$ , με  $n=1,2,3,4,5$  αντιστοιχούν στην κάθε ήσυχη μέρα για κάθε συνιστώσα.

Ο  $j \in Z^*$  αντιστοιχεί στην κάθε σειρά του πίνακα-στήλη.



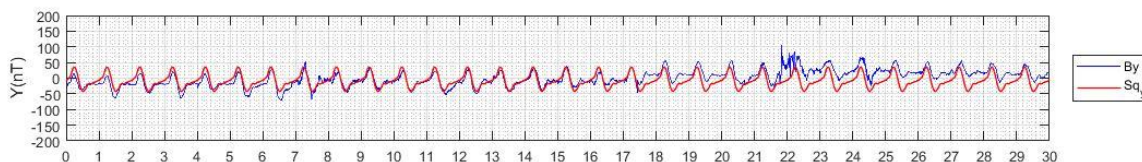
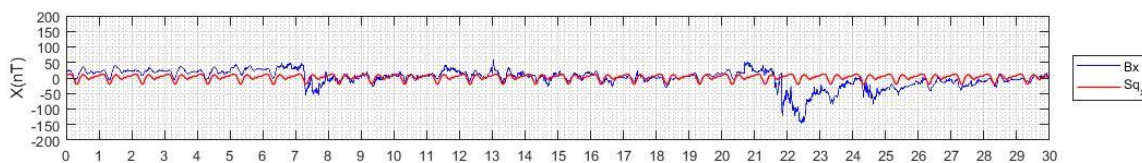
Εικόνα 62: Οι 5 ήσυχες ημέρες (διακεκομμένες καμπύλες) του 6/2015 σε σχέση με την μέση τιμή τους (συμπαγής καμπύλη)

## 6. Κατασκευή χρονοσειράς-επανάληψης της παραπάνω

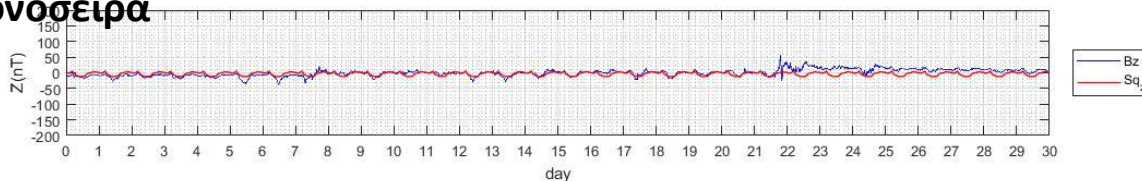


## 7. Αφαίρεση της χρονοσειράς από τα δεδομένα

DION 06-2015 sq

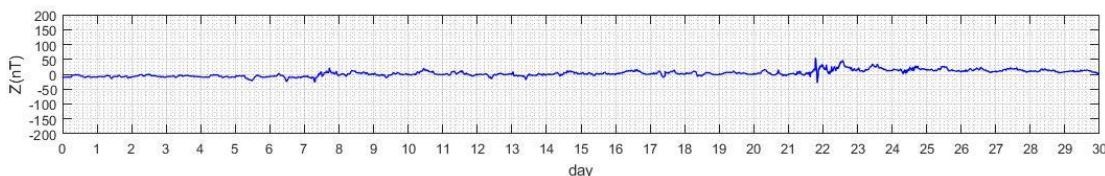
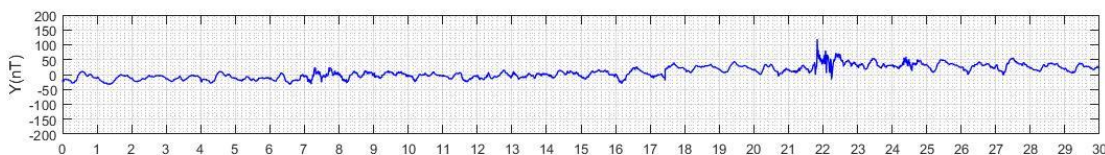
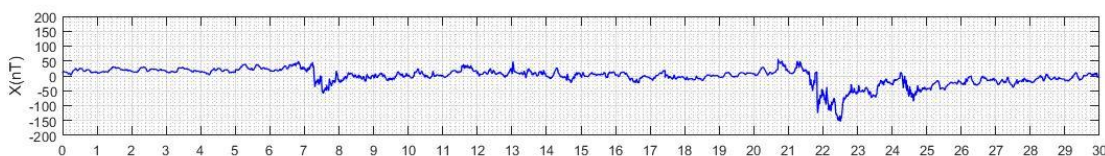


### Αρχική Χρονοσειρά



### Αρχική Χρονοσειρά- $S_q$

DION 06-2015 no sq



**Σημείωση:** Σε κάποιες περιπτώσεις σταθμών κάποια ή κάποιες από τις ήσυχες ημέρες του μήνα λείπουν. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να μην συμπεριλάβουμε την ημέρα αυτή ή τις ημέρες αυτές στον παραπάνω υπολογισμό.

Τέτοιο παράδειγμα είναι στον σταθμό DION η 22<sup>η</sup> ημέρα του Οκτώβρη, στον σταθμό VLI η 28<sup>η</sup> ημέρα του Απρίλη κτλ.

### 3.2.2. Αποτελέσματα

Παρακάτω θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα μας, που είναι:

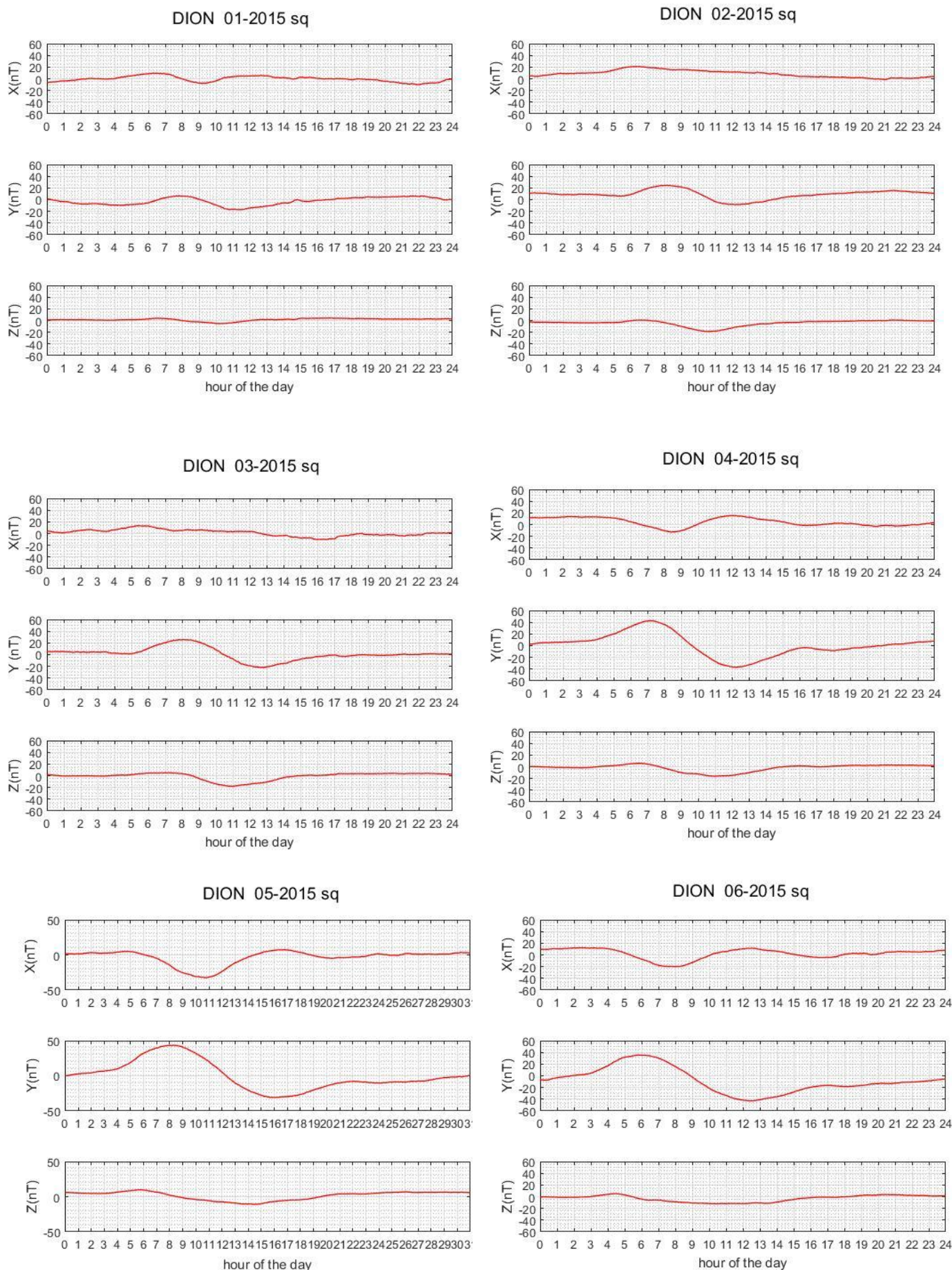
- Διαγράμματα των  $S_q$  για κάθε μήνα για όλους τους σταθμούς. Σημειώνεται ότι στο μήνα Φεβρουάριου του σταθμού VLI δεν επαρκούν τα δεδομένα για αυτήν την διαδικασία, οπότε παραλείπεται.
- Διαγράμματα των διορθωμένων δεδομένων

Παρατηρούμε καταρχάς ότι τα ημερήσια διαγράμματα του  $S_q$  εμφανίζουν την αναμενόμενη περιοδική μορφή. Παρατηρούμε επίσης ότι στους ελληνικούς σταθμούς το πλάτος του  $S_q$  είναι κατά πλειοψηφία μεγαλύτερο στην Y συνιστώσα. Μάλιστα, στους ελληνικούς σταθμούς συνολικά το  $S_q$  εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση απ' ό,τι στον

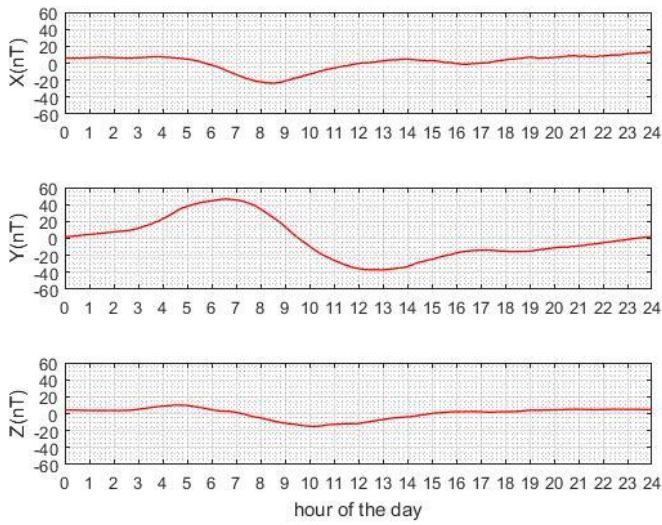
σταθμό ΚΑΚ. Τέλος, η μορφή του  $S_q$  στον σταθμό RES εμφανίζει μεμονωμένες διακυμάνσεις της τάξης της ώρας, καθώς, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, στις πολικές περιοχές συμβάλουν επιπλέον συστήματα ρευμάτων.

Α) Διαγράμματα του  $S_q$  για κάθε σταθμό ανά μήνα

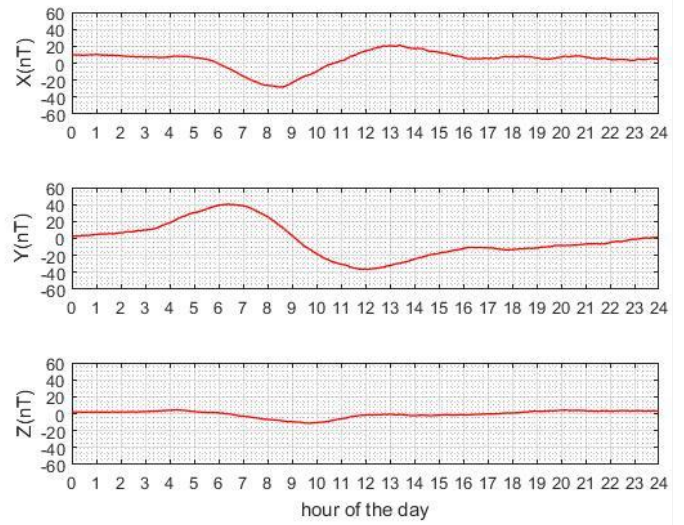
Εικόνα 63: Ημερήσιο διάγραμμα του  $S_q$  για κάθε μήνα για το σταθμό DION



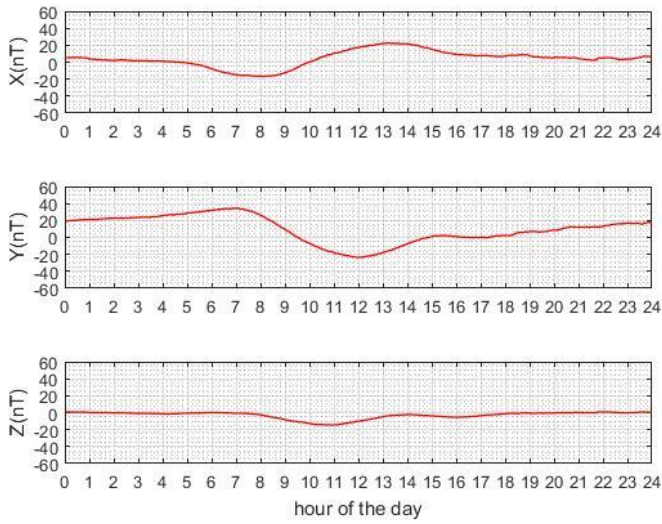
DION 07-2015 sq



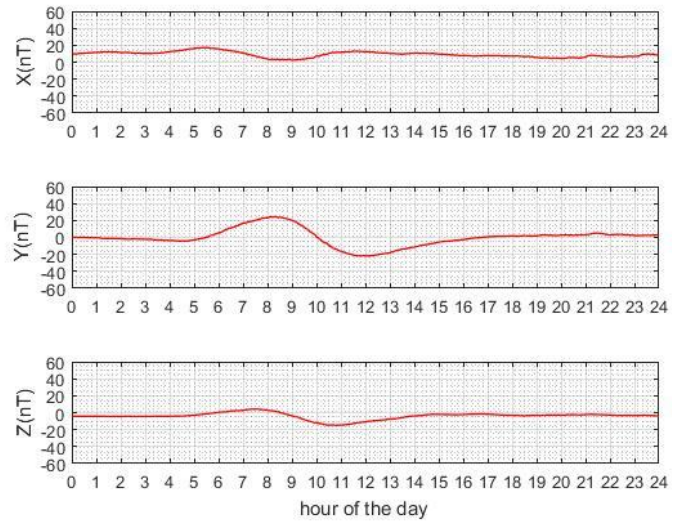
DION 08-2015 sq



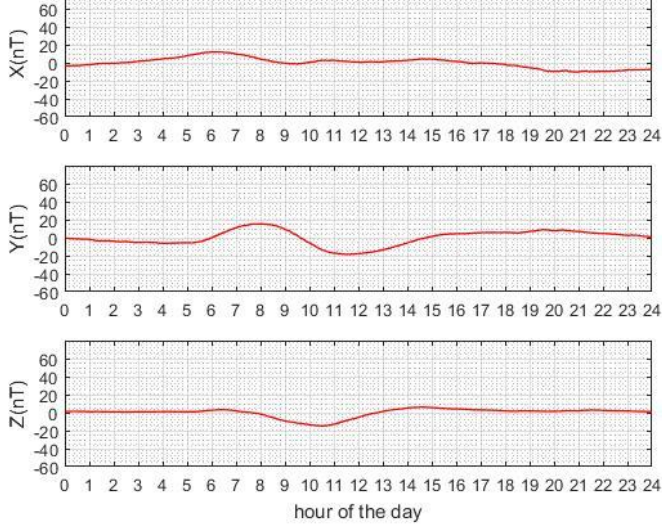
DION 09-2015 sq



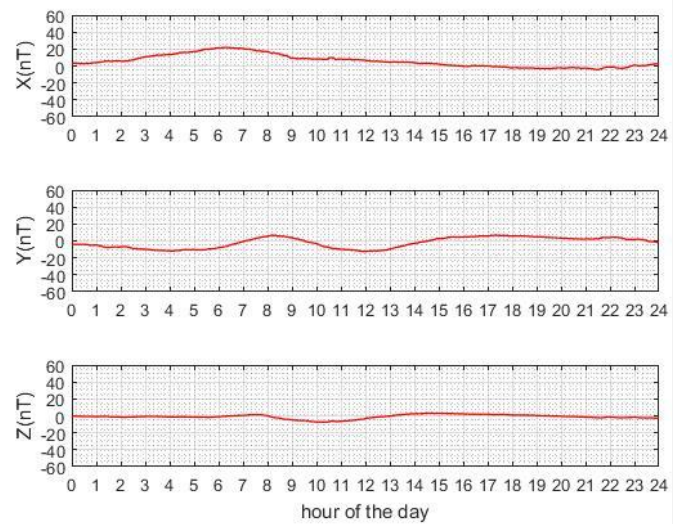
DION 10-2015 sq



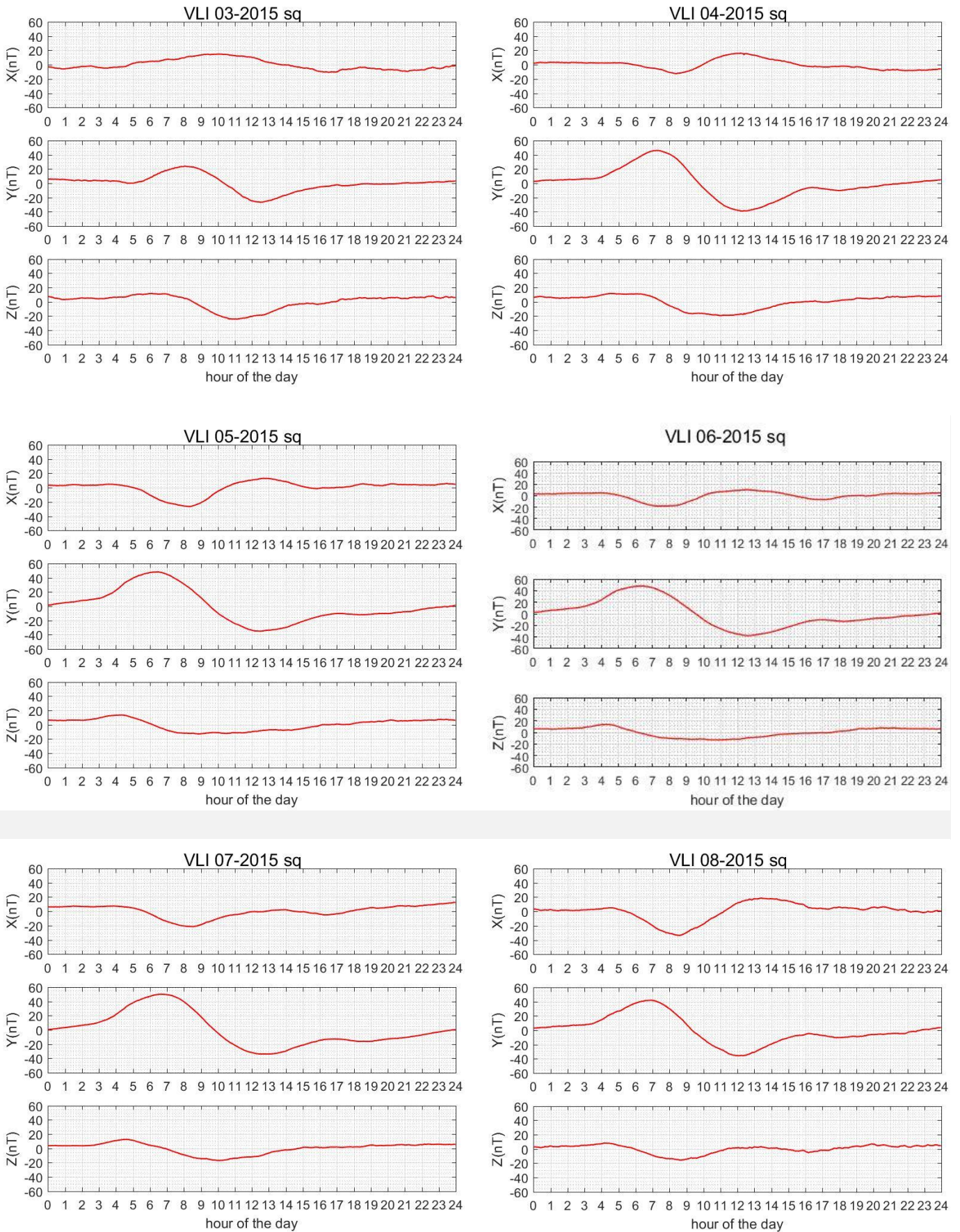
DION 11-2015 sq



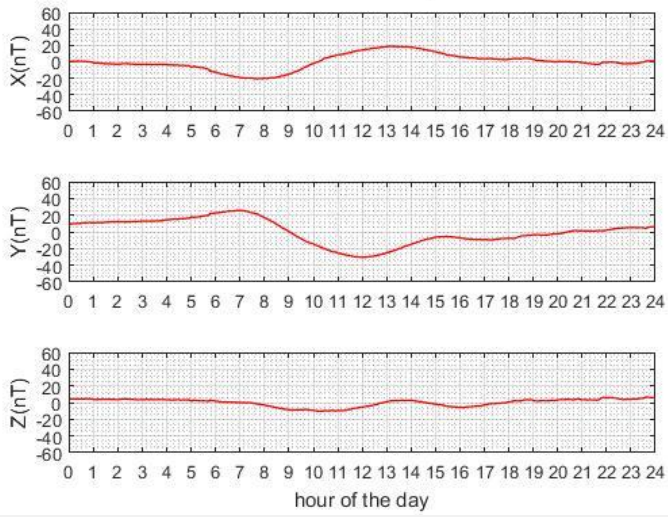
DION 12-2015 sq



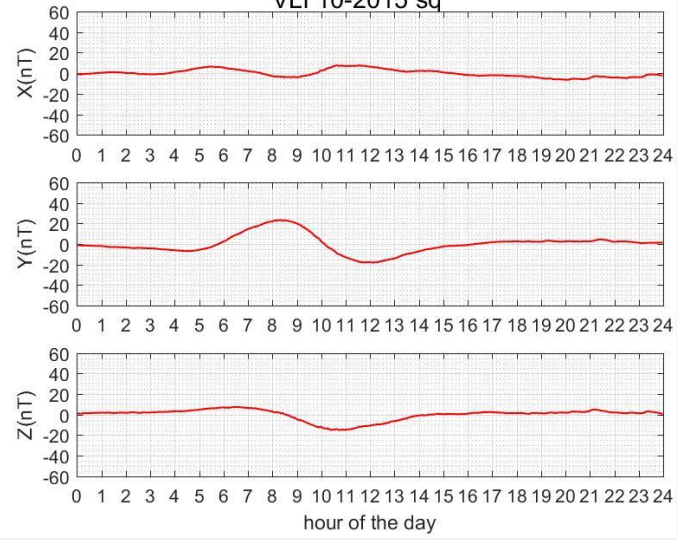
Εικόνα 64: Ημερήσιο διάγραμμα του Sq για κάθε μήνα για το σταθμό VLI



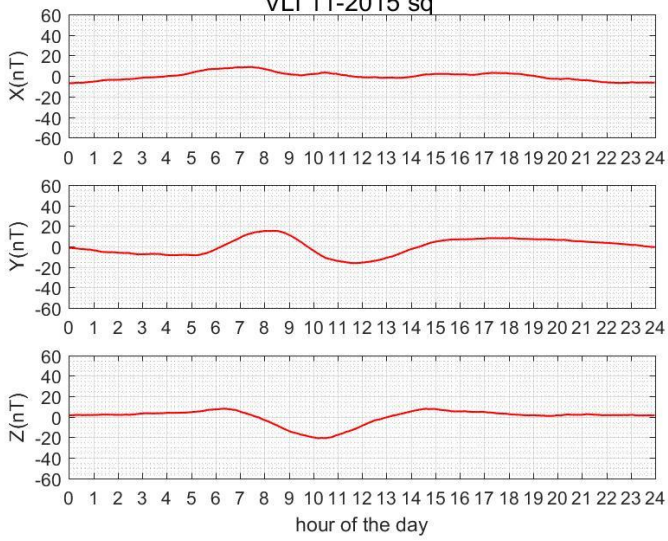
VLI 09-2015 sq



VLI 10-2015 sq



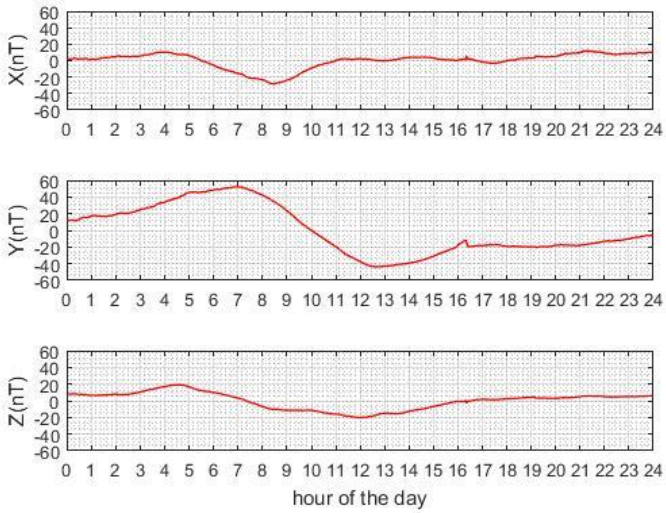
VLI 11-2015 sq



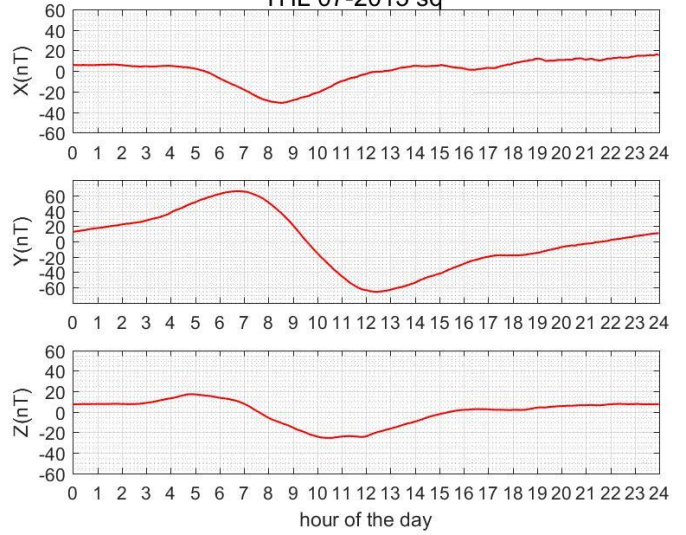


Εικόνα 65: Ημερήσιο διάγραμμα του Sq για κάθε μήνα για το σταθμό THL

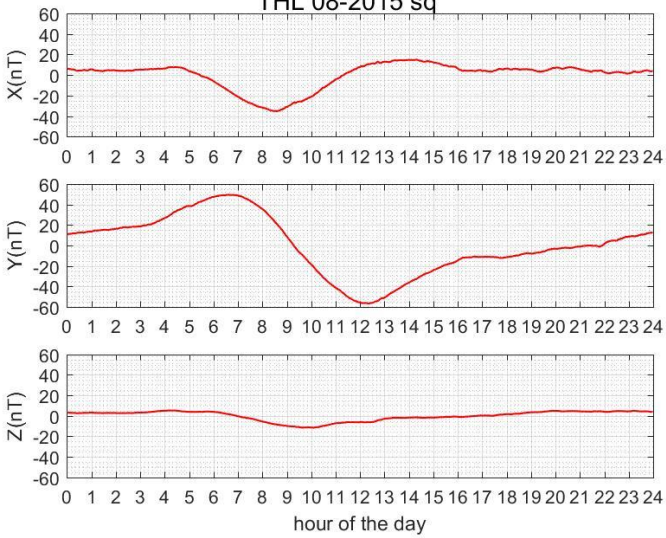
THL 06-2015 sq day



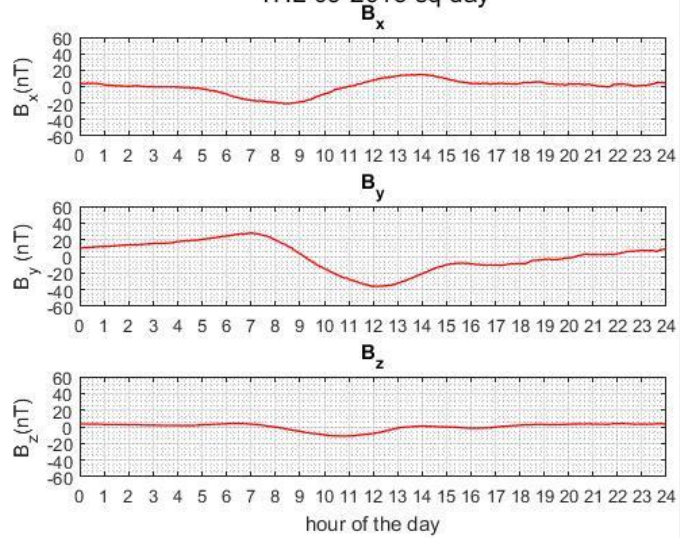
THL 07-2015 sq



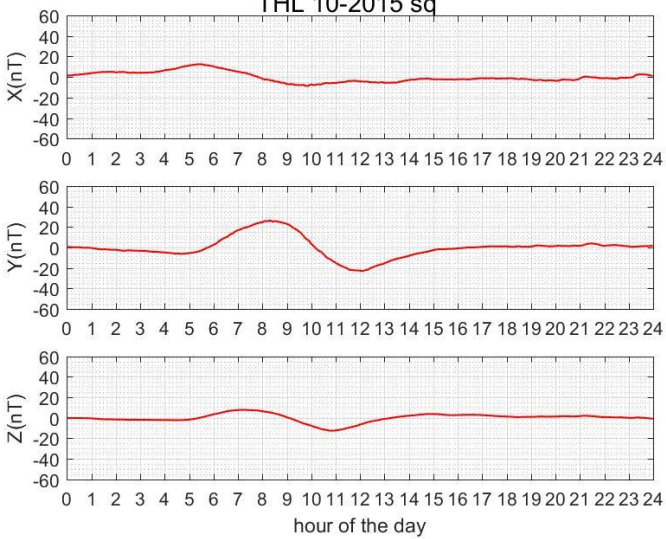
THL 08-2015 sq



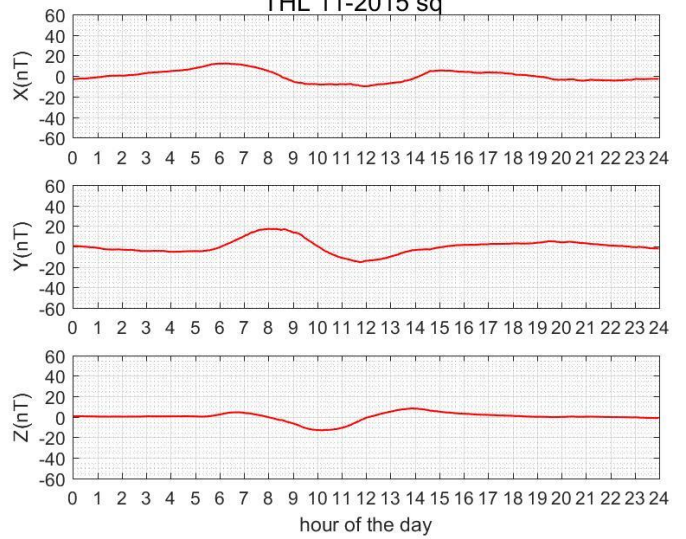
THL 09-2015 sq day

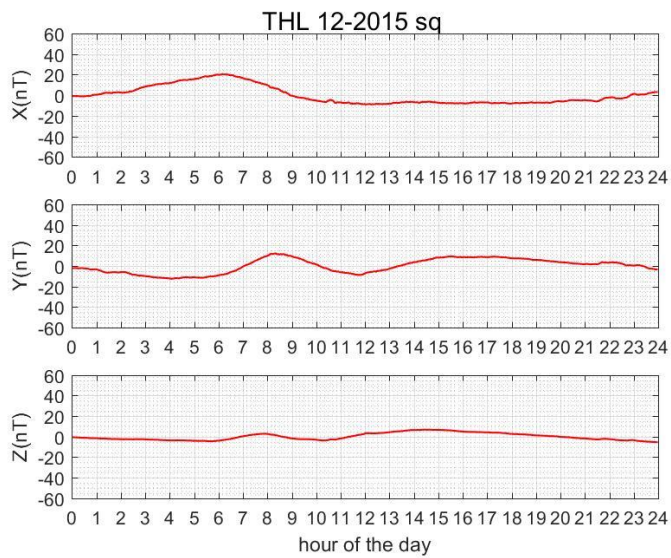


THL 10-2015 sq

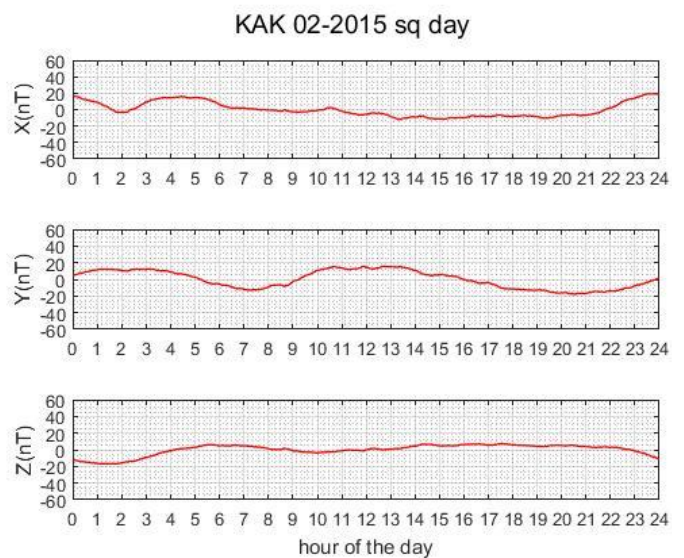
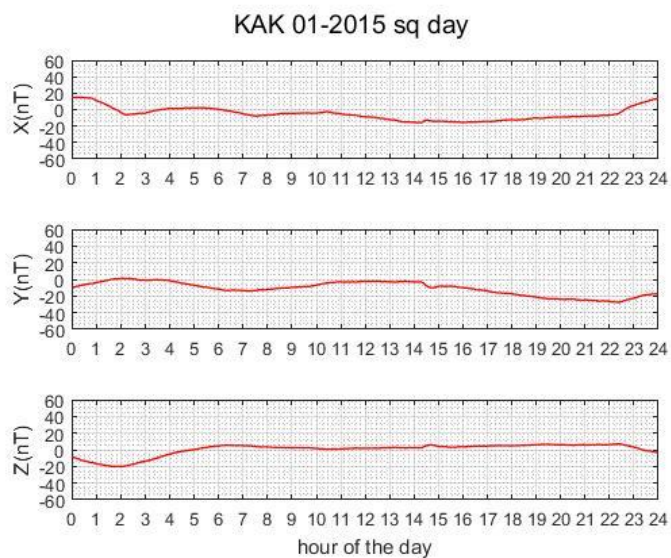


THL 11-2015 sq

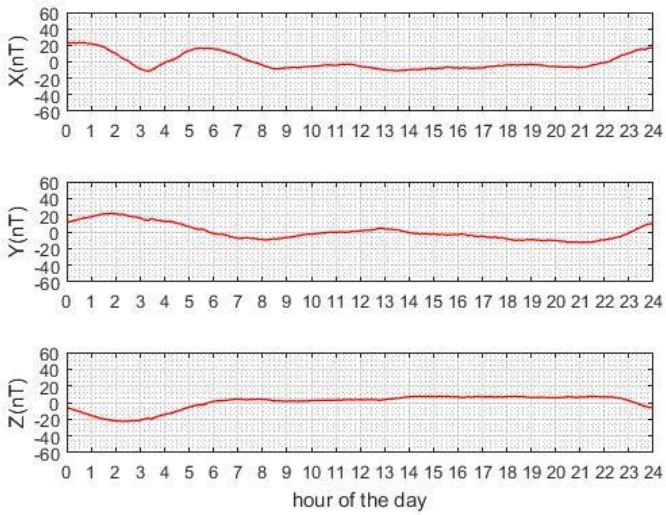




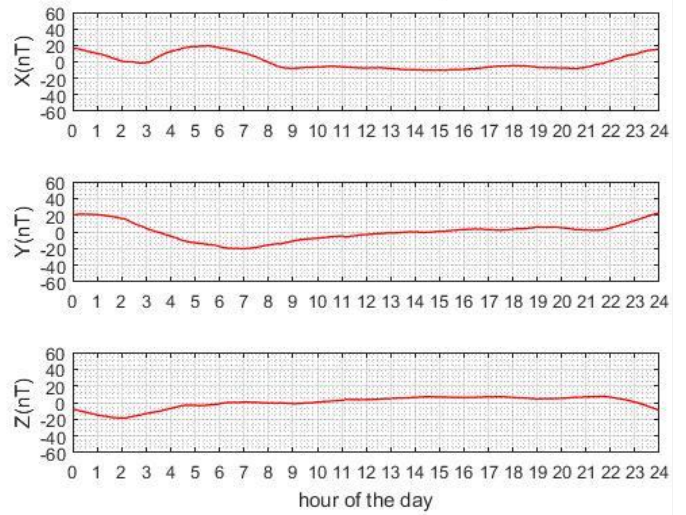
Εικόνα 66: Ημερήσιο διάγραμμα του Sq για κάθε μήνα για το σταθμό KAK



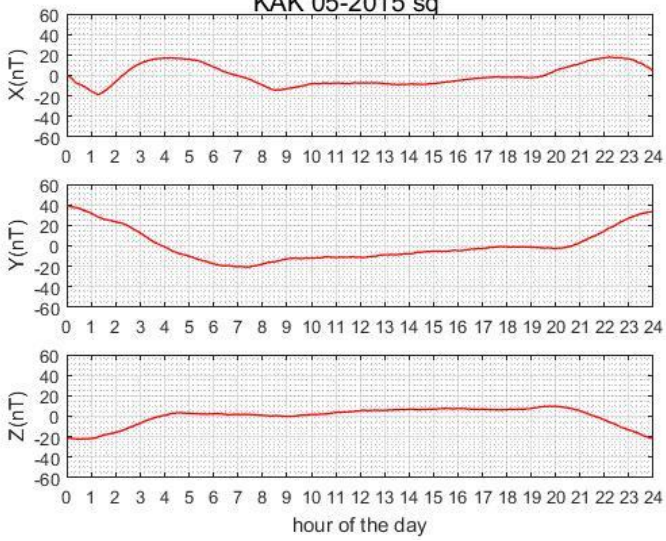
KAK 03-2015 sq



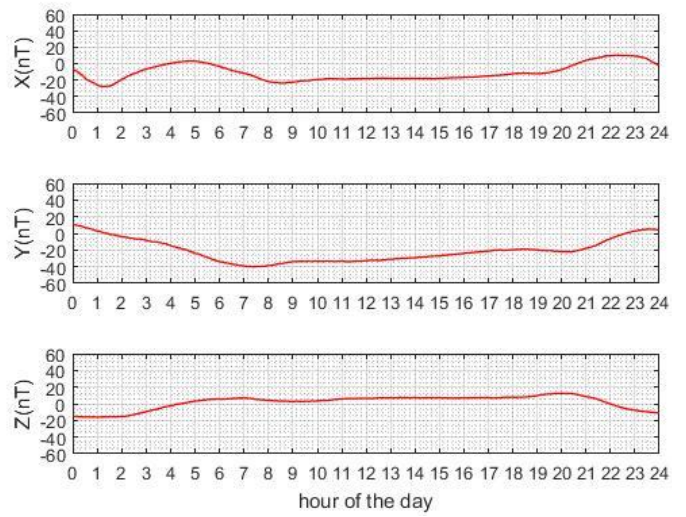
KAK 04-2015 sq



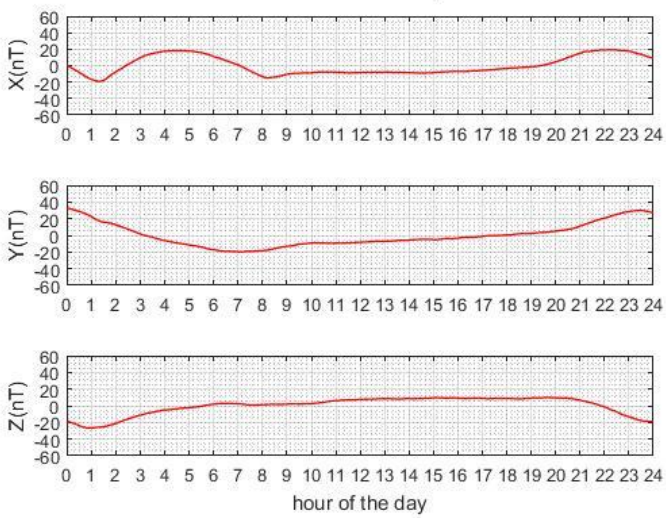
KAK 05-2015 sq



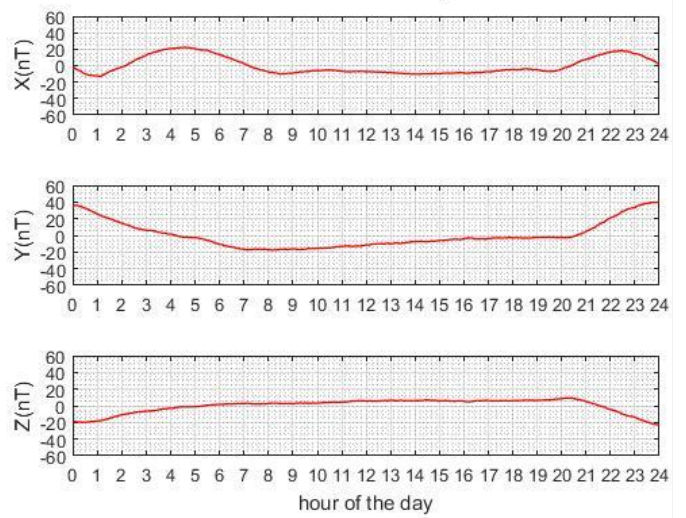
KAK 06-2015



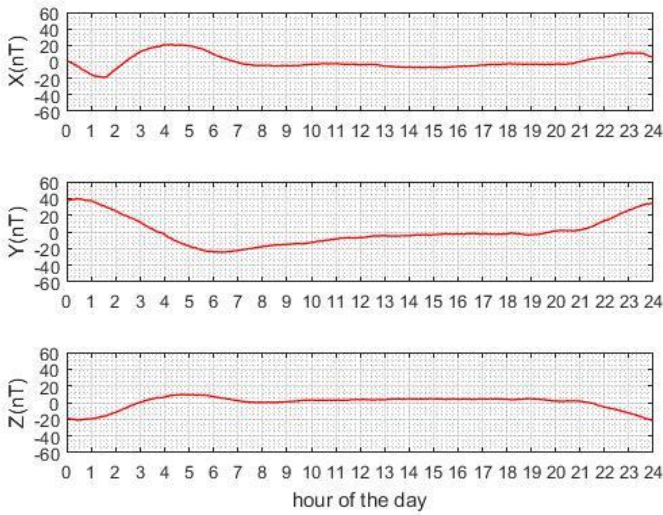
KAK 07-2015 sq



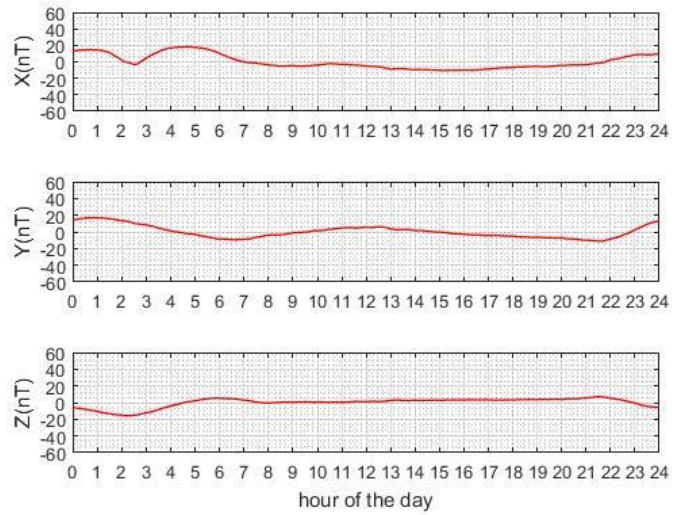
KAK 08-2015 sq



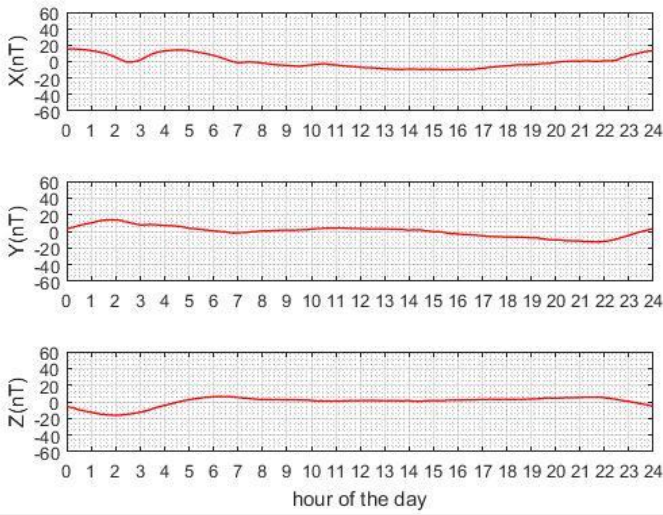
KAK 09-2015 sq



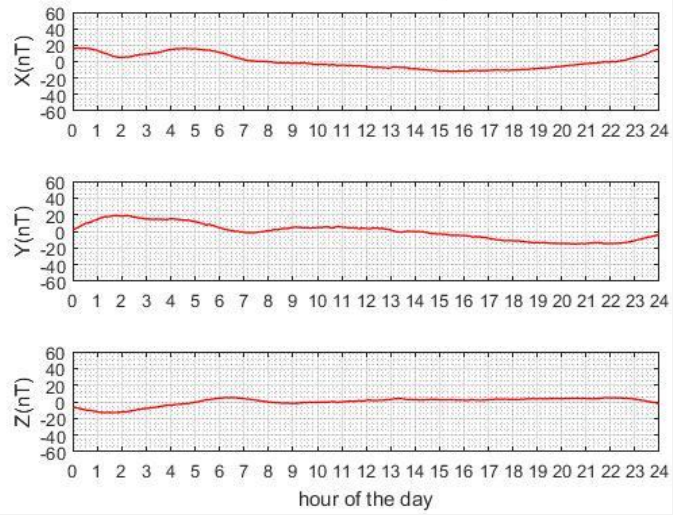
KAK 10-2015



KAK 11-2015

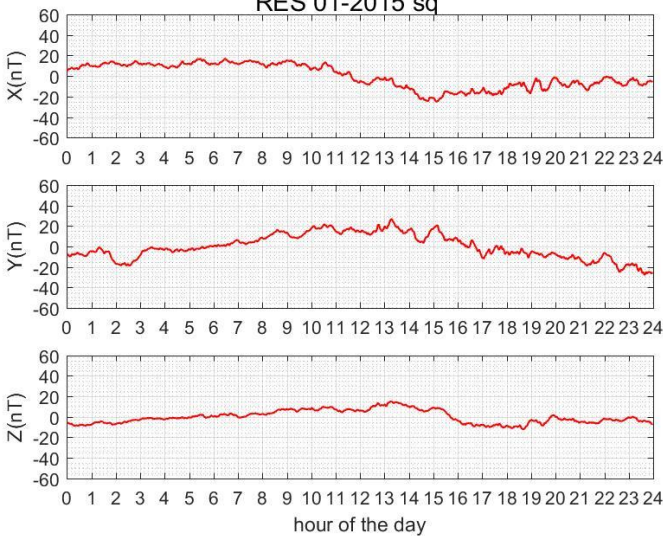


KAK 12-2015 sq

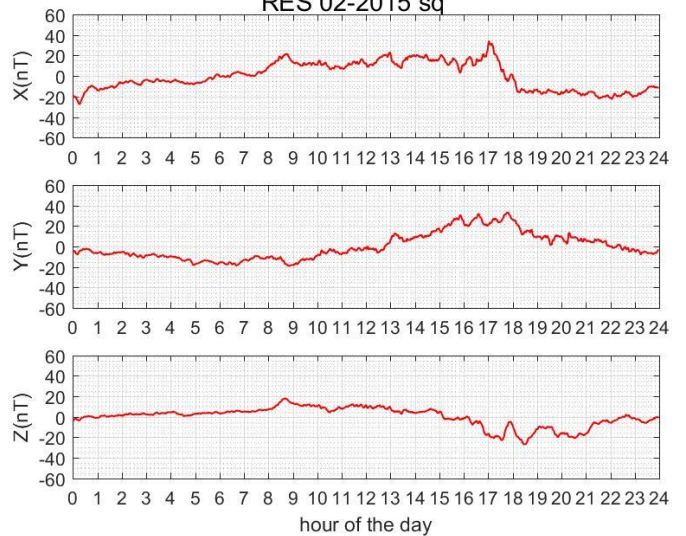


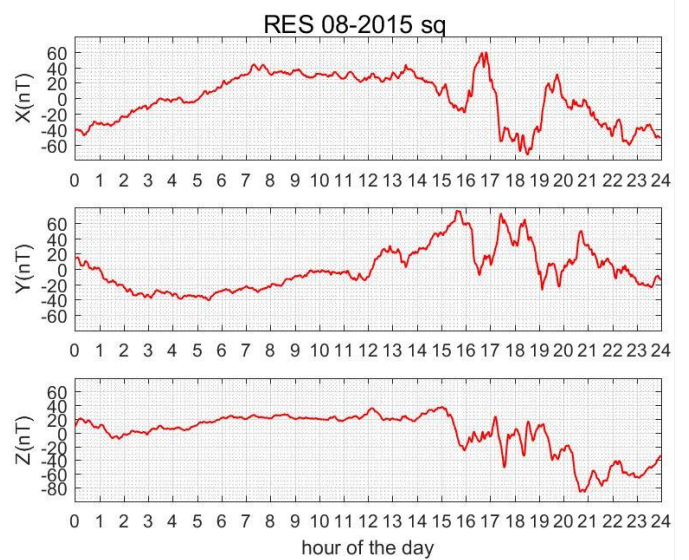
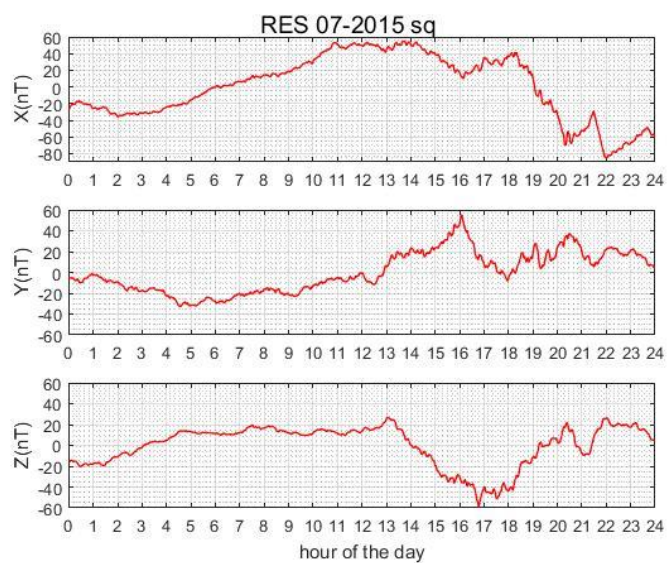
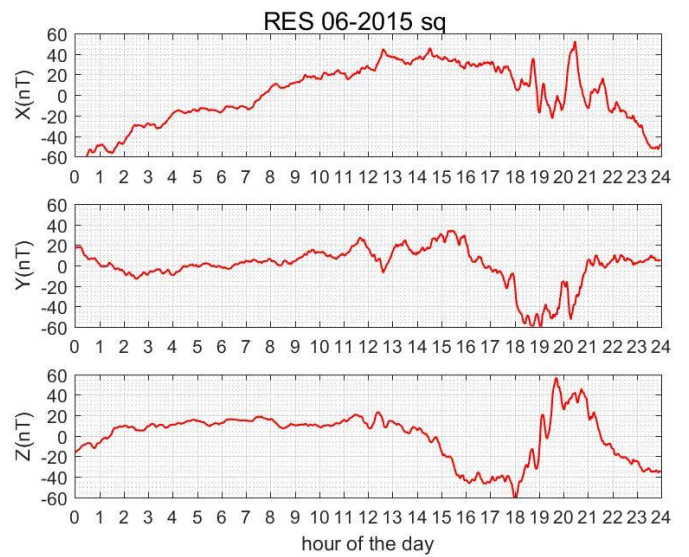
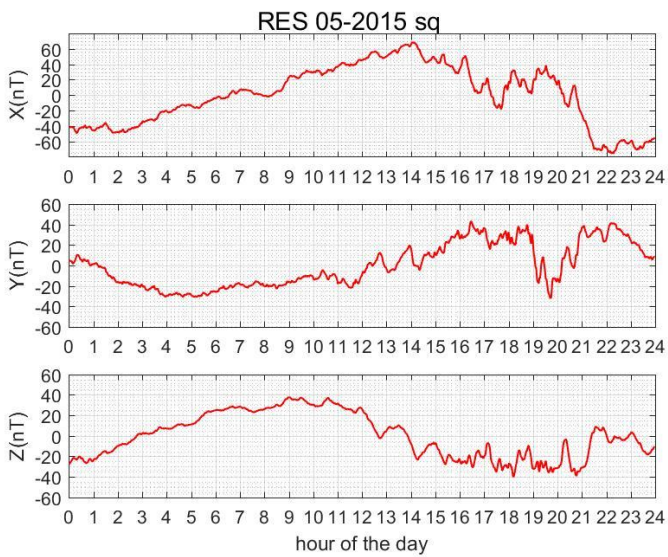
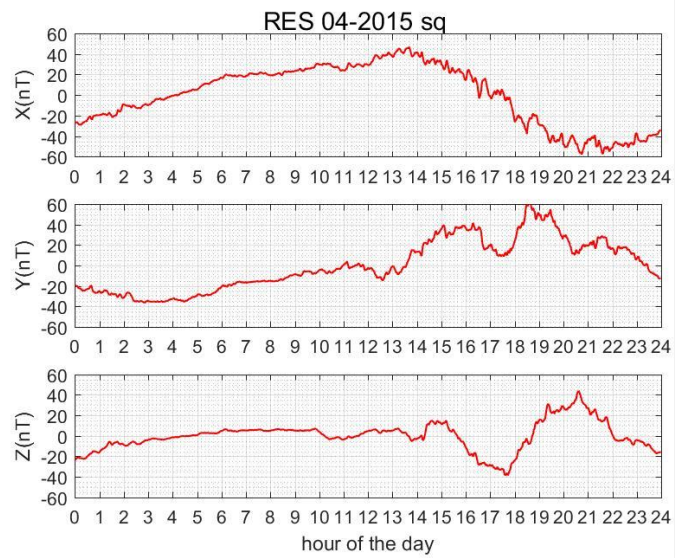
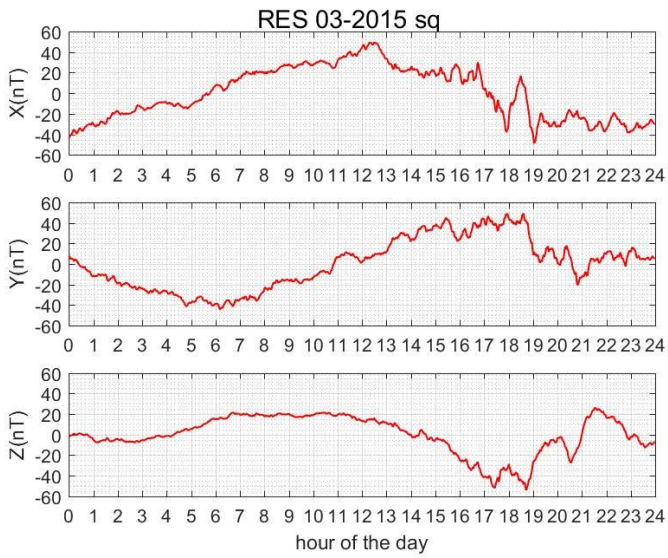
Εικόνα 67: Ημερήσιο διάγραμμα του Sq για κάθε μήνα για το σταθμό RES

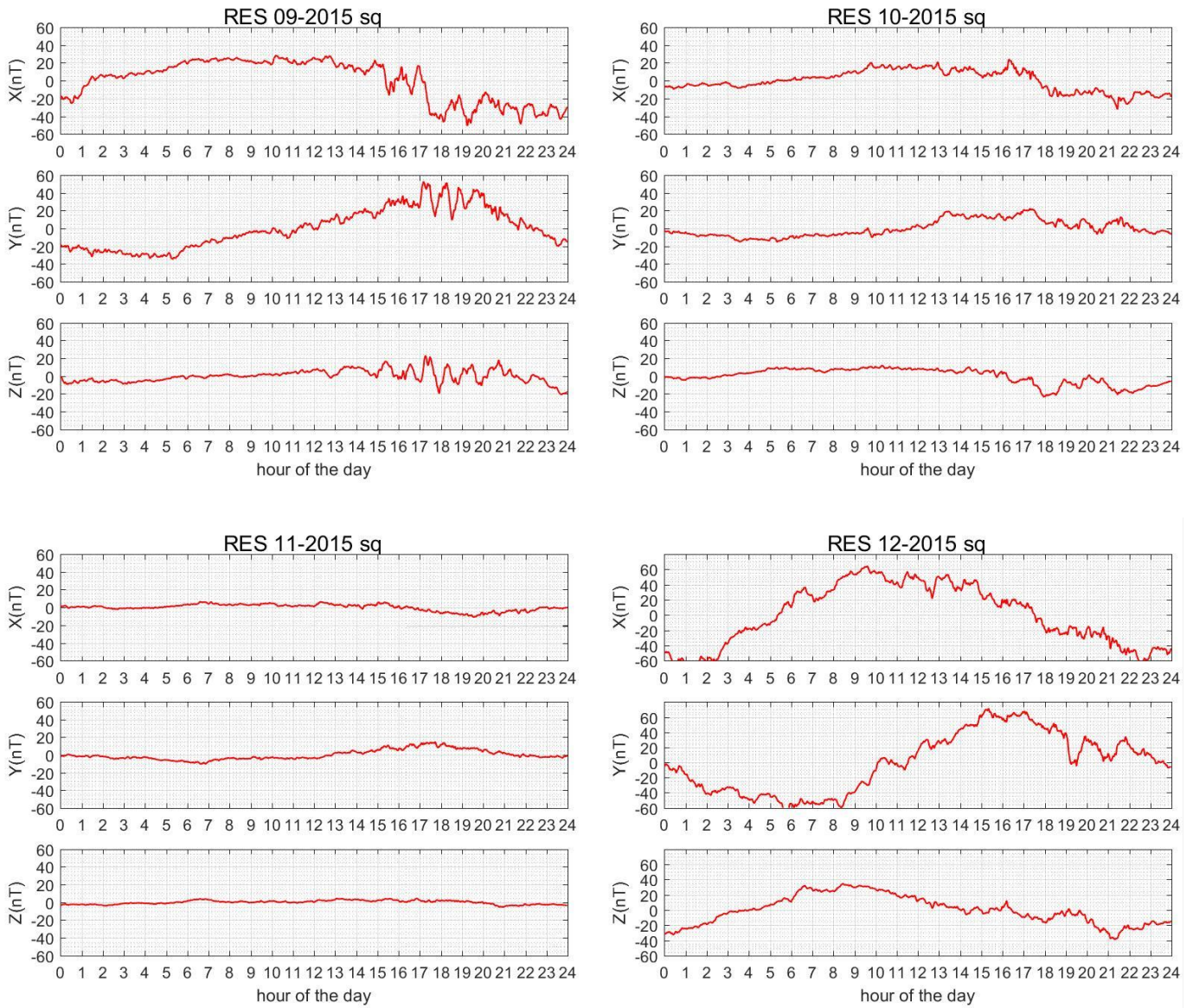
RES 01-2015 sq



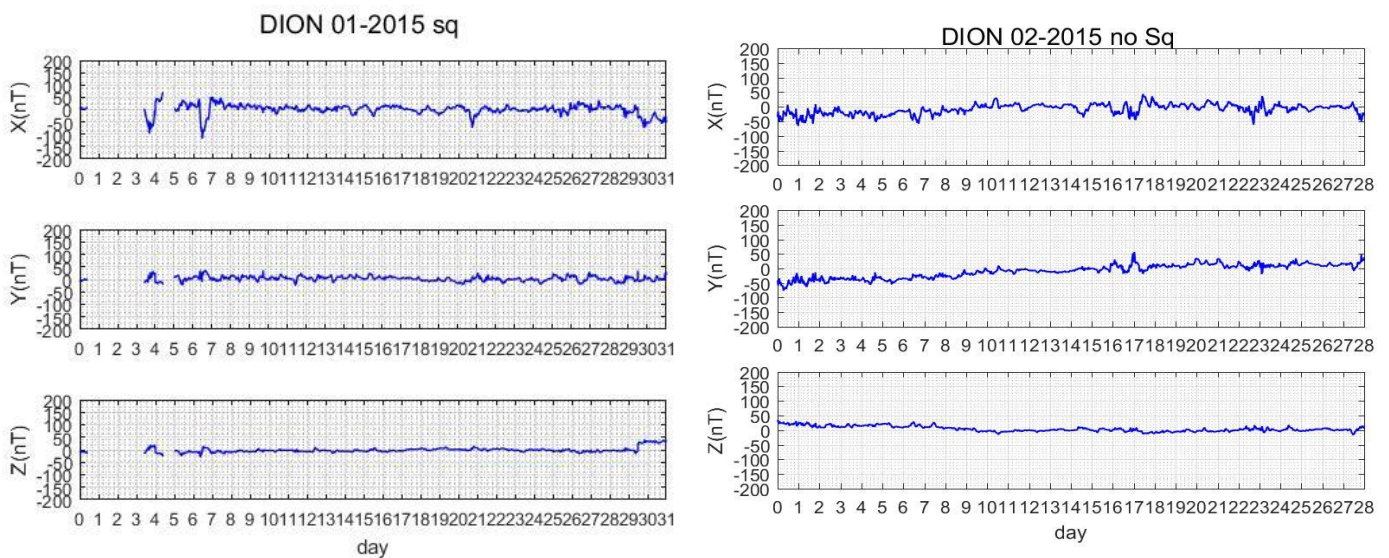
RES 02-2015 sq



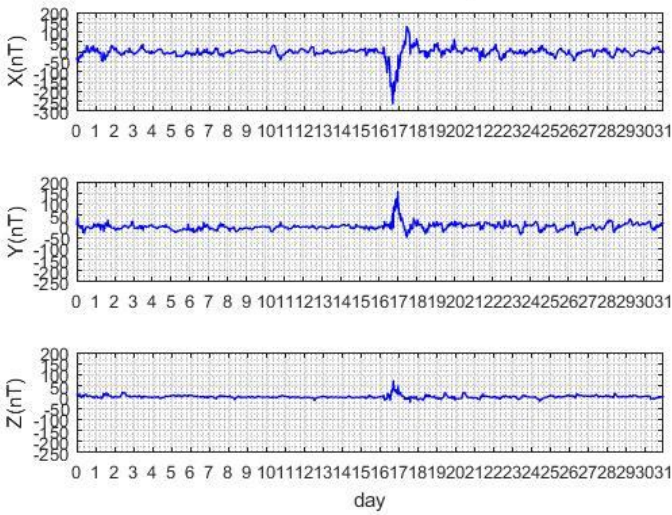




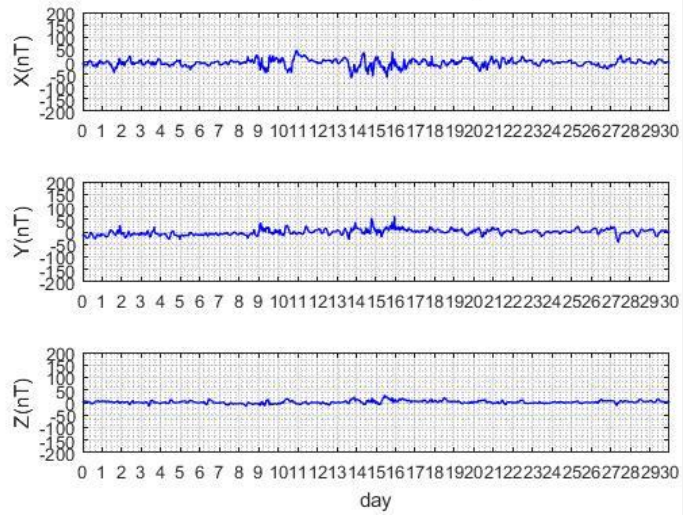
Εικόνα 68: Διορθωμένα διαγράμματα των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου για όλους τους μήνες για το σταθμό DION



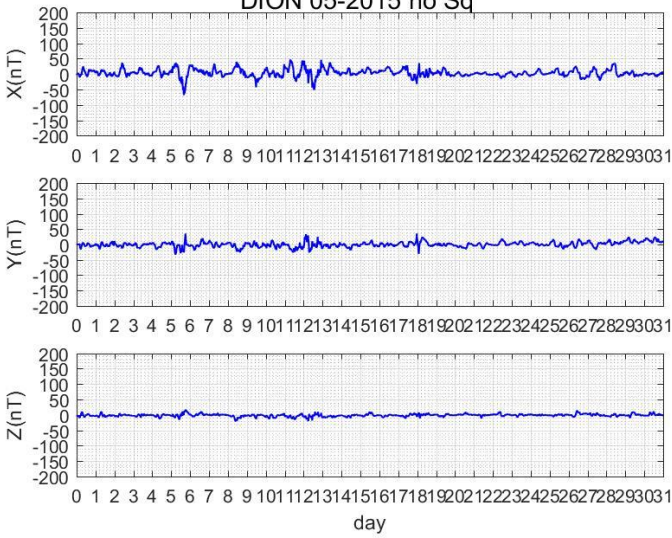
DION 03-2015 no Sq



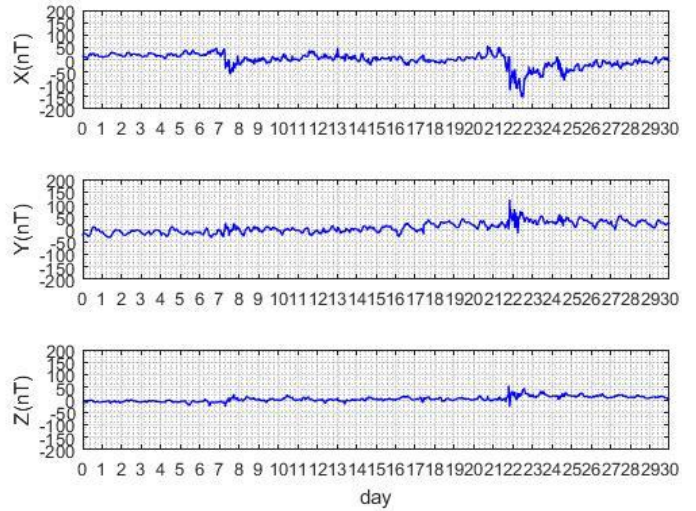
DION 04-2015 no Sq



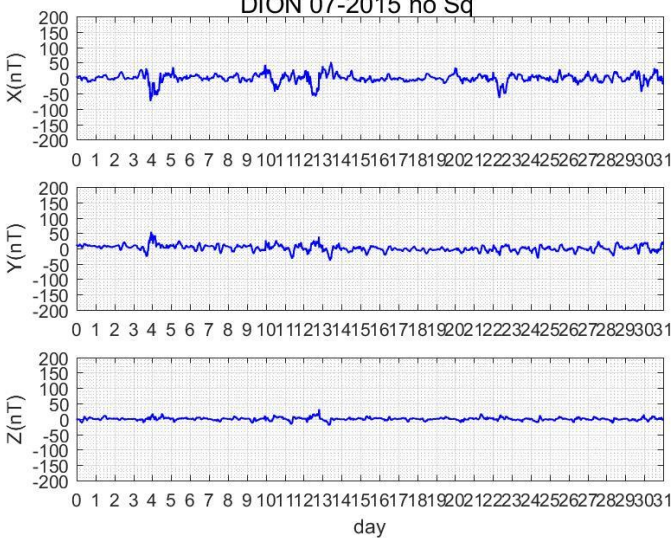
DION 05-2015 no Sq



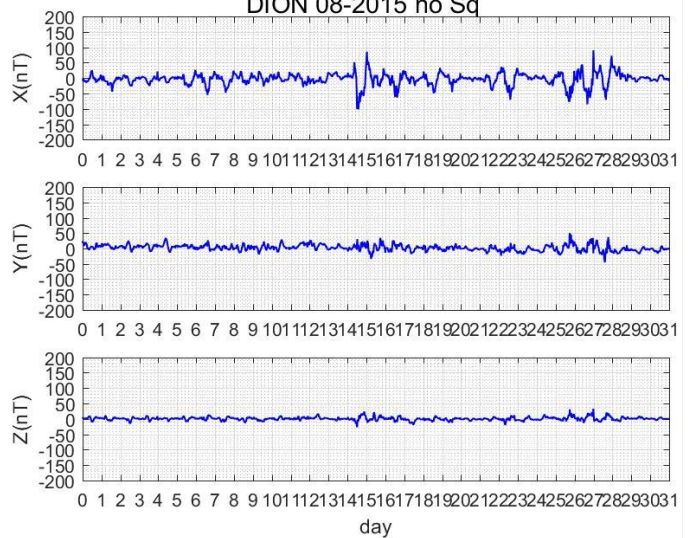
DION 06-2015 no Sq



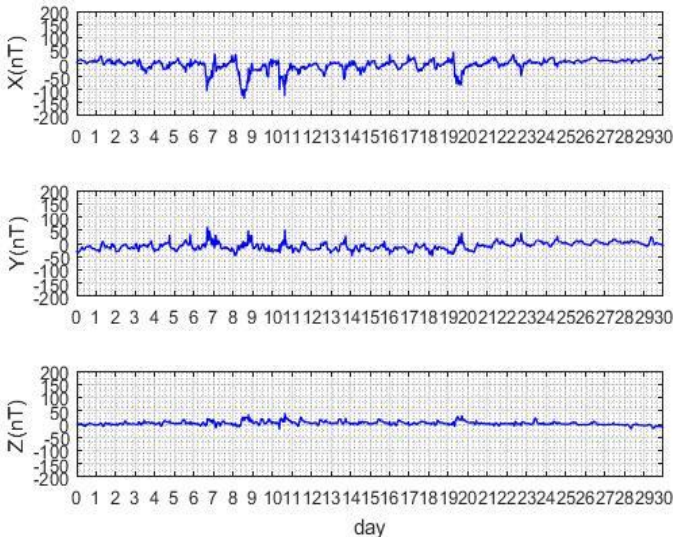
DION 07-2015 no Sq



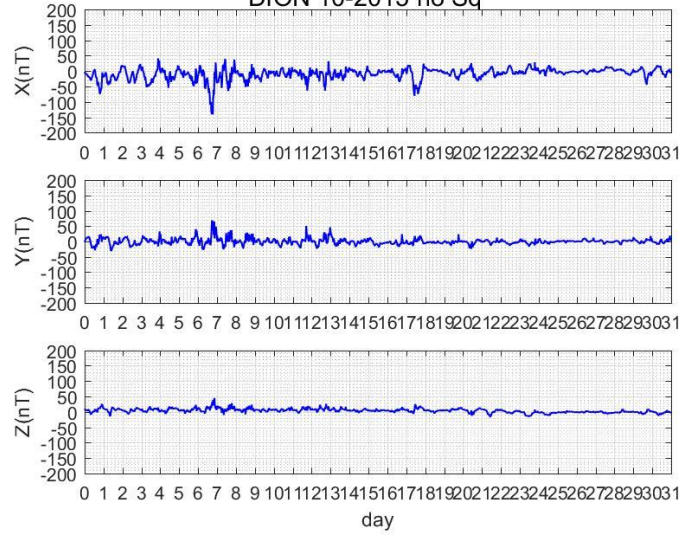
DION 08-2015 no Sq



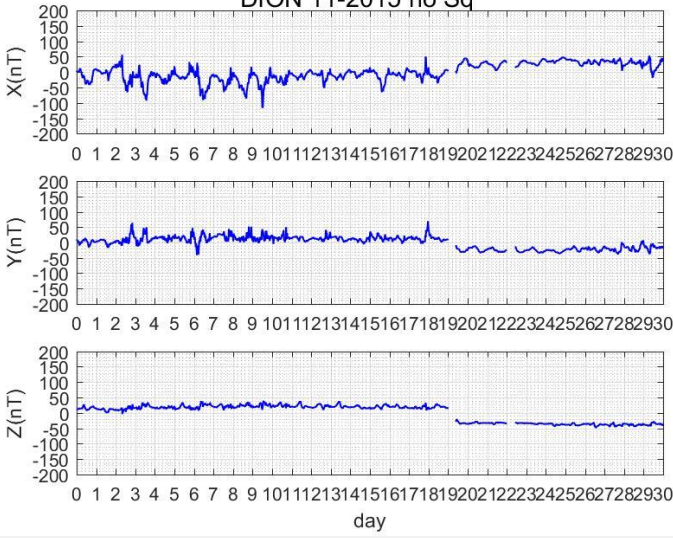
DION 09-2015 no Sq



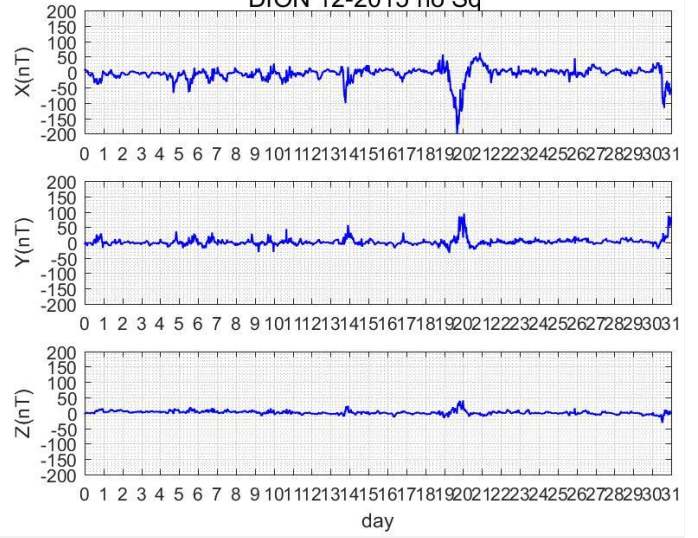
DION 10-2015 no Sq



DION 11-2015 no Sq

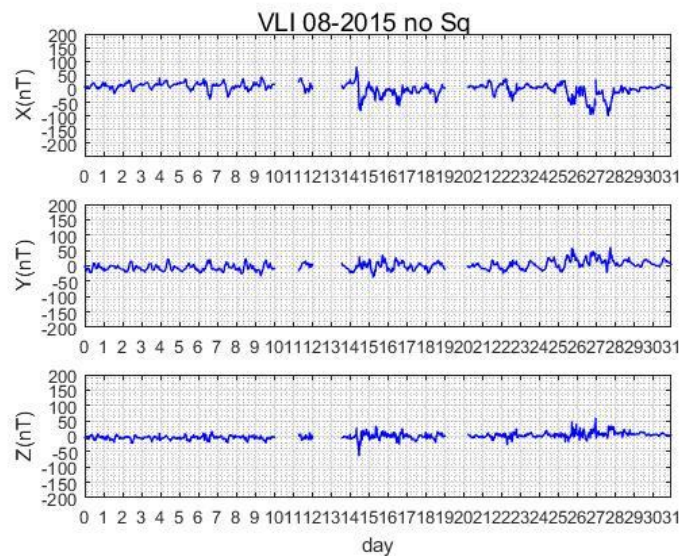
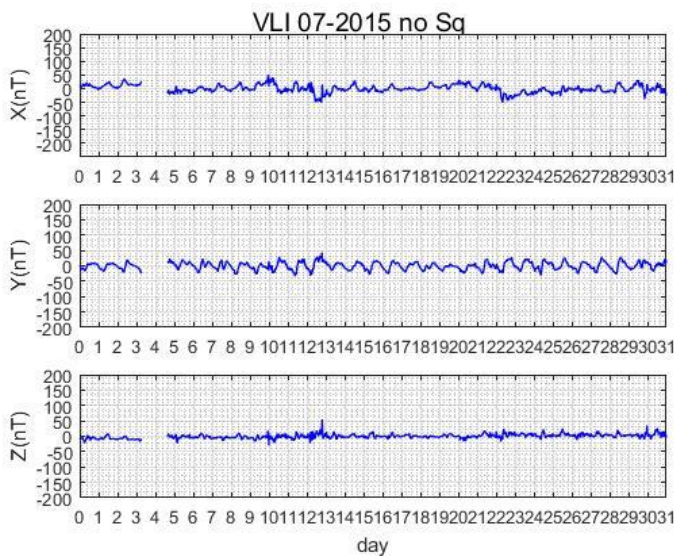
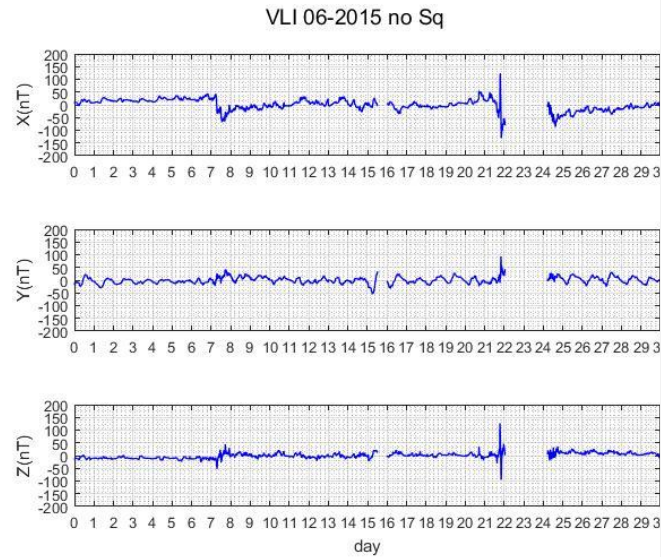
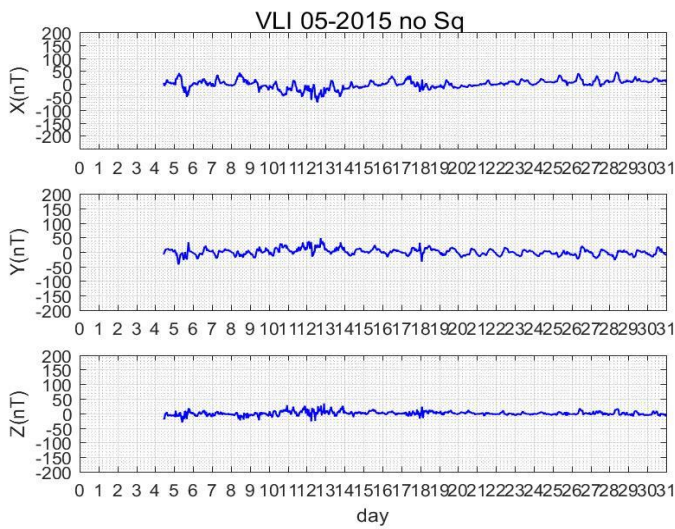
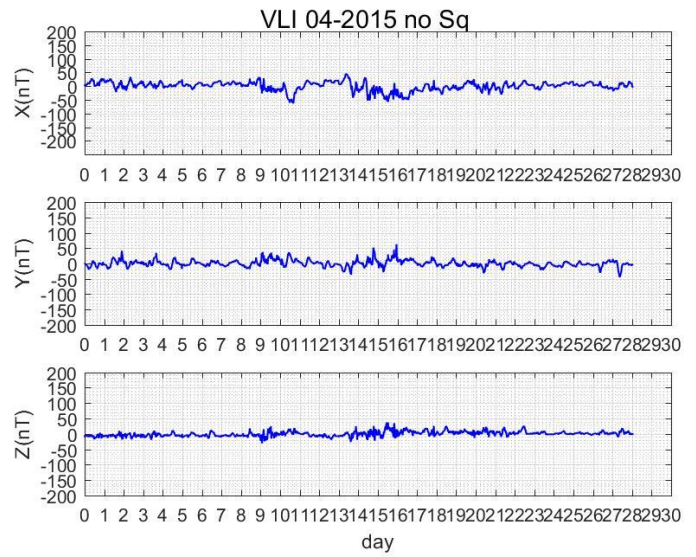
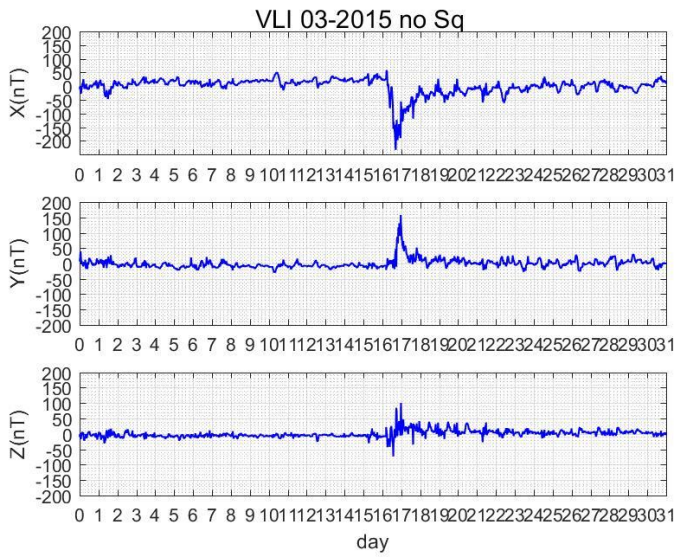


DION 12-2015 no Sq

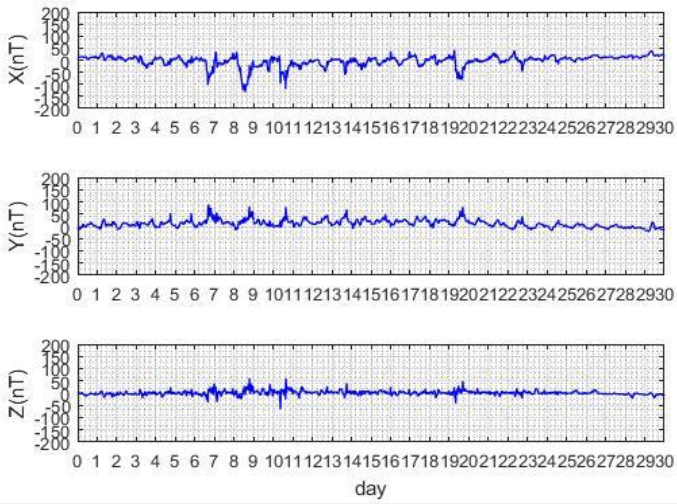




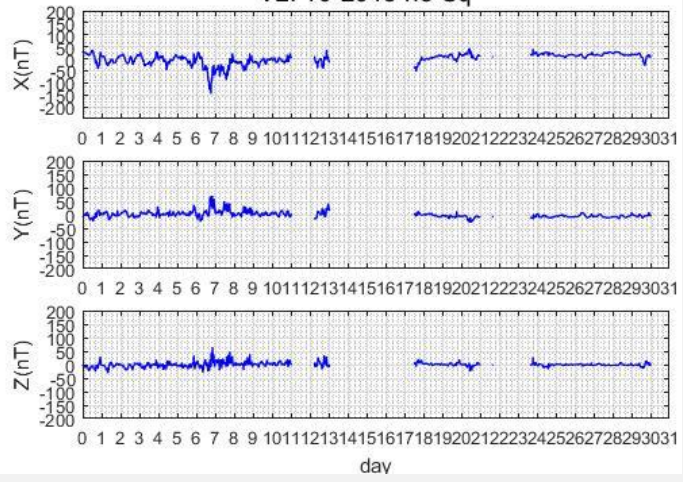
Εικόνα 69: Διορθωμένα διαγράμματα των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου για όλους τους μήνες για το σταθμό VLI



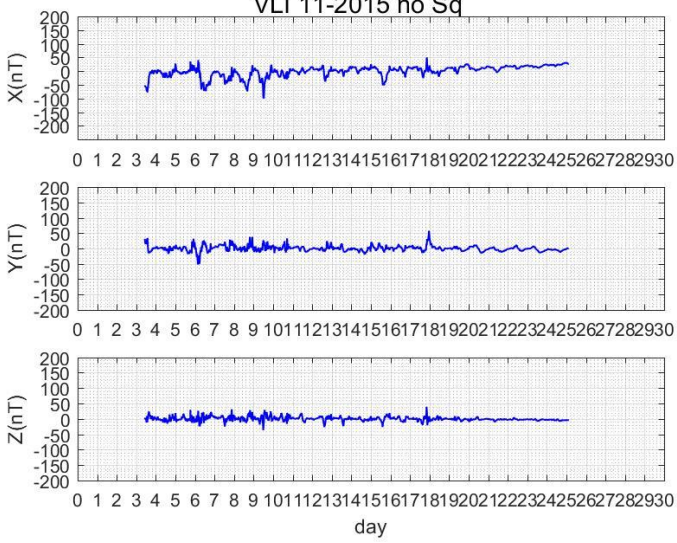
VLI 09-2015 no sq



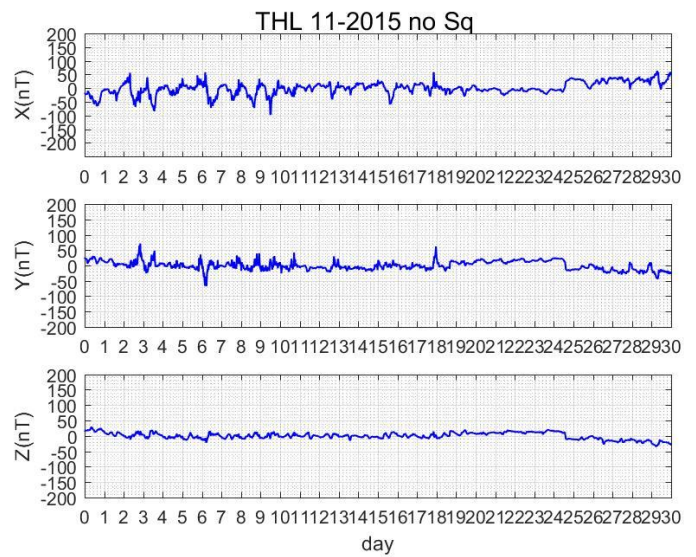
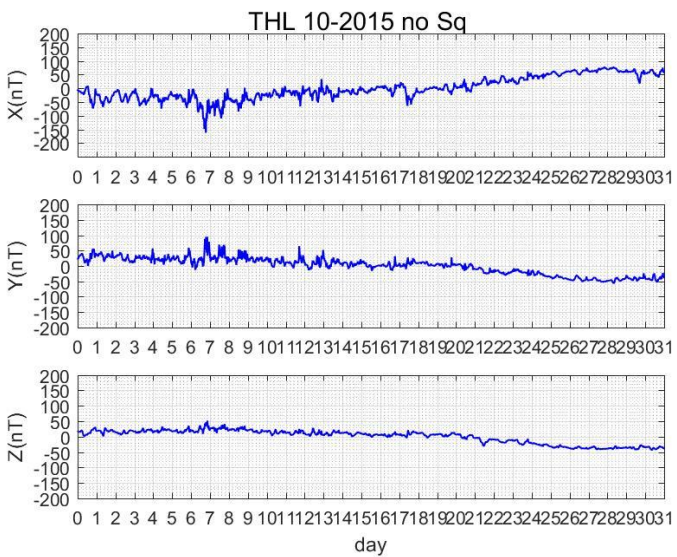
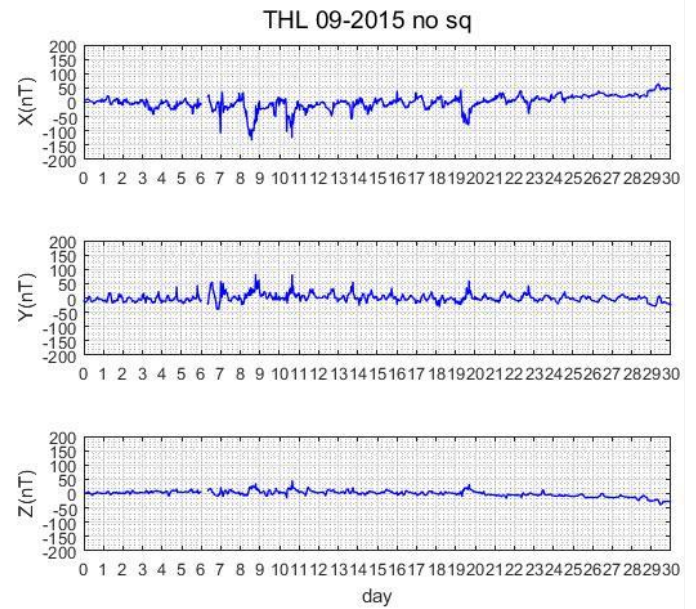
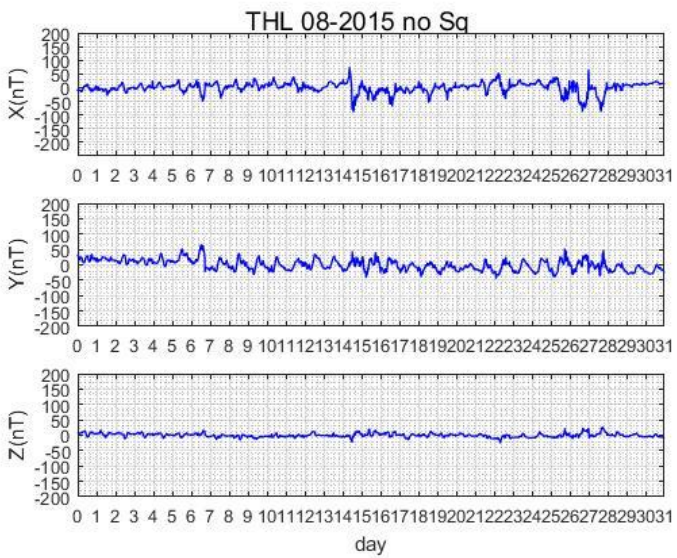
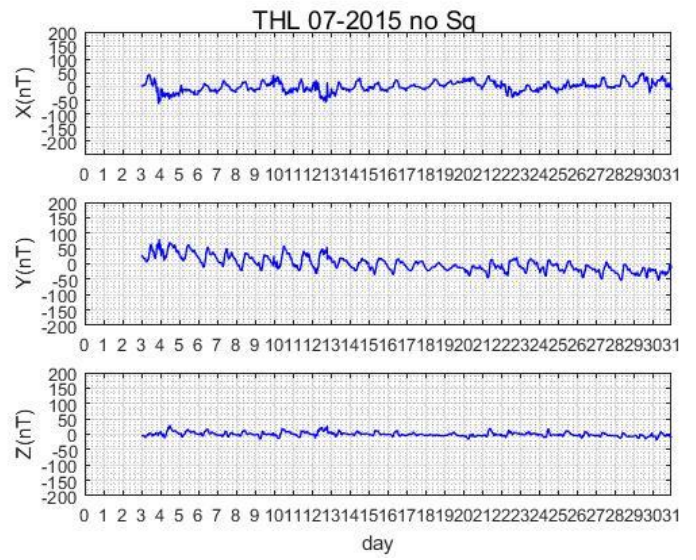
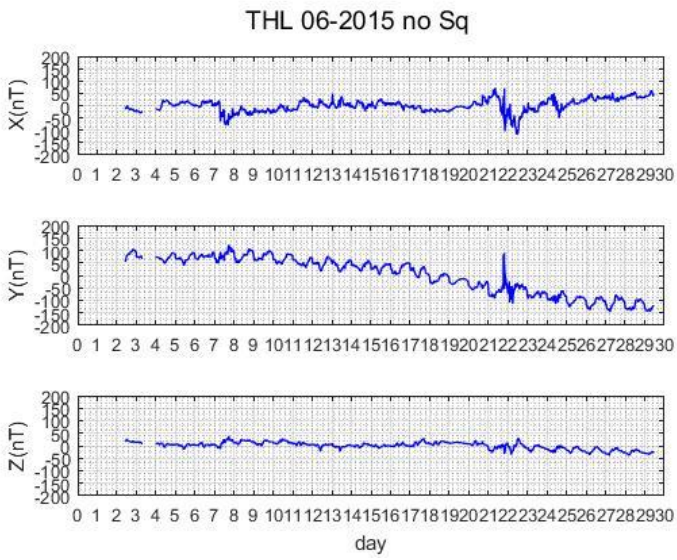
VLI 10-2015 no Sq

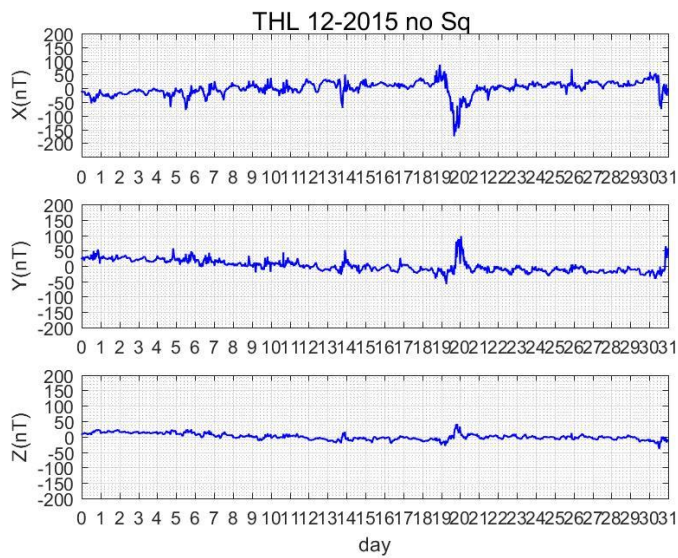


VLI 11-2015 no Sq

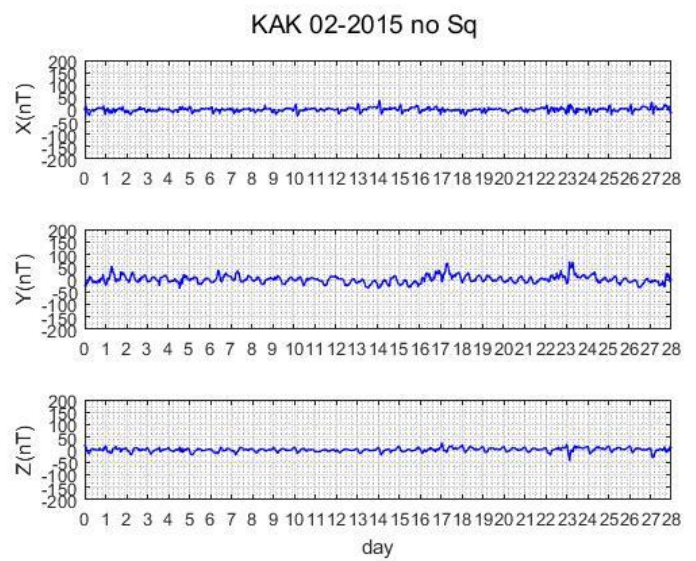
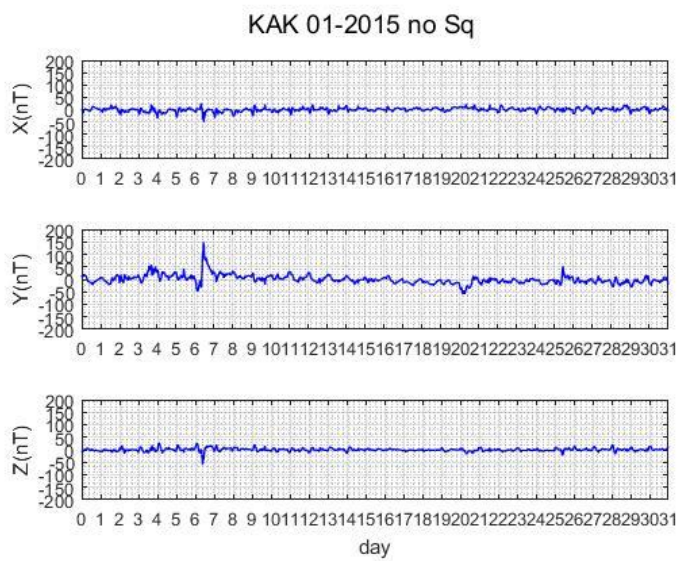


Εικόνα 70: Διορθωμένα διαγράμματα των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου για όλους τους μήνες για το σταθμό THL

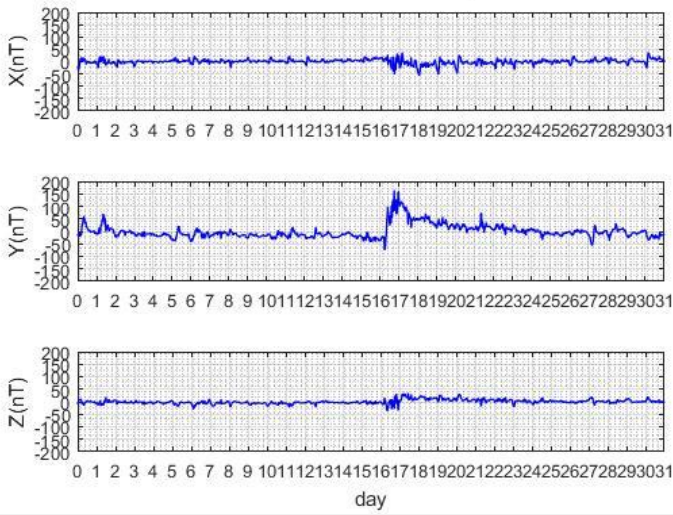




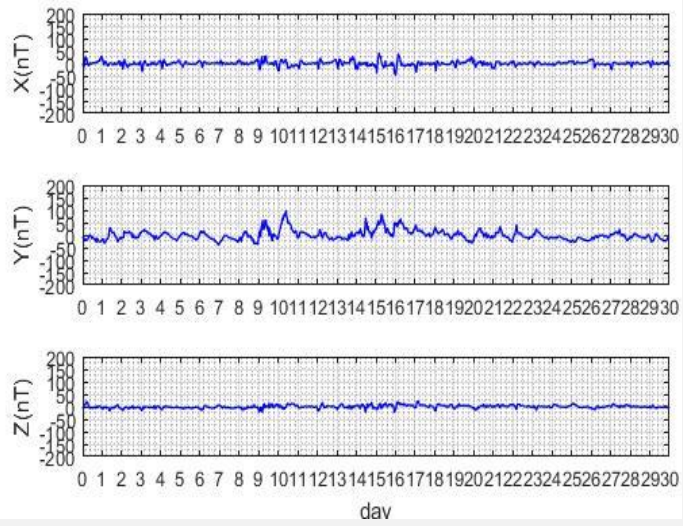
Εικόνα 71: Διορθωμένα διαγράμματα των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου για όλους τους μήνες για το σταθμό KAK



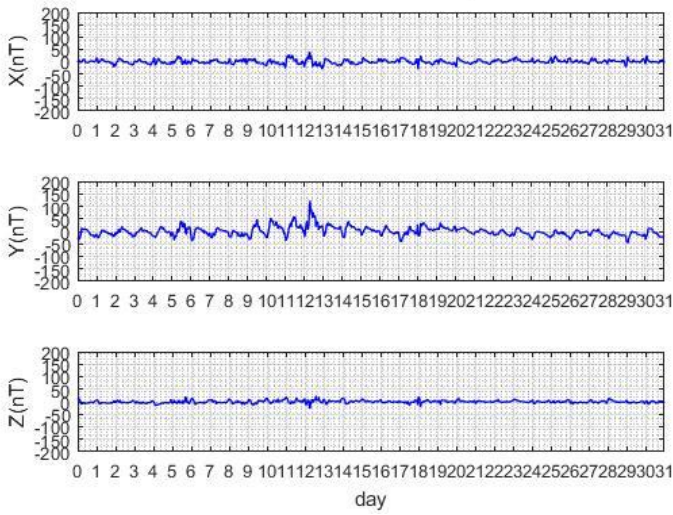
KAK 03-2015 no Sq



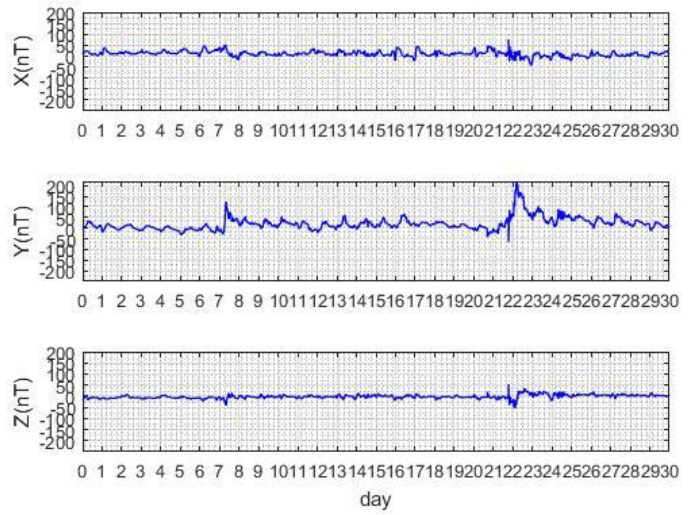
KAK 04-2015 no Sq



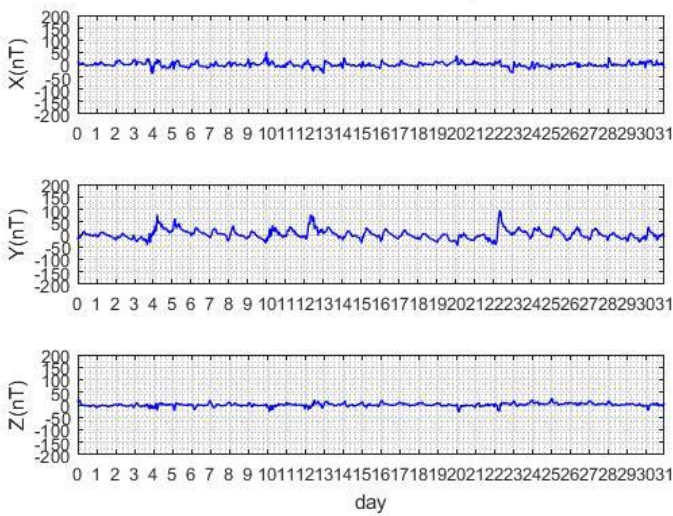
KAK 05-2015 no Sq



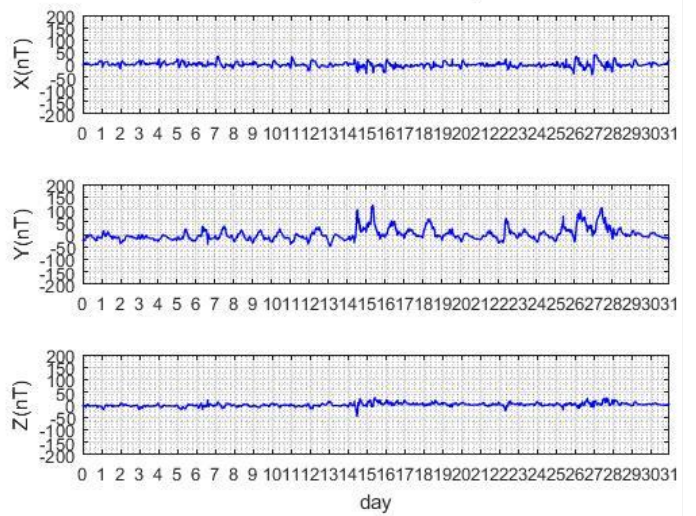
KAK 06-2015 no Sq



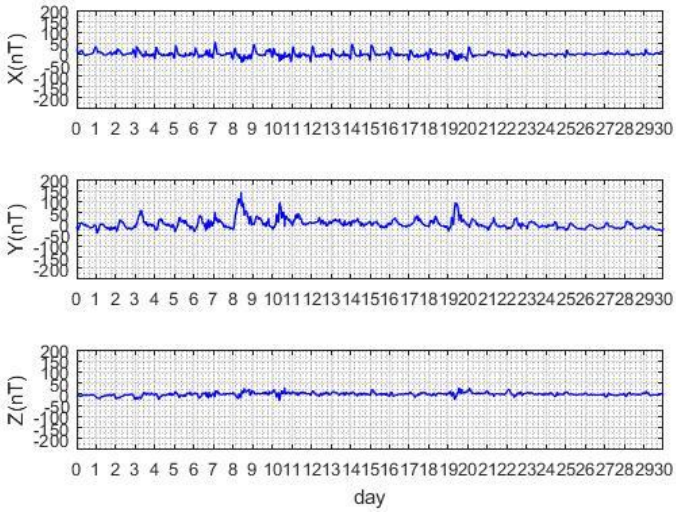
KAK 07-2015 no Sq



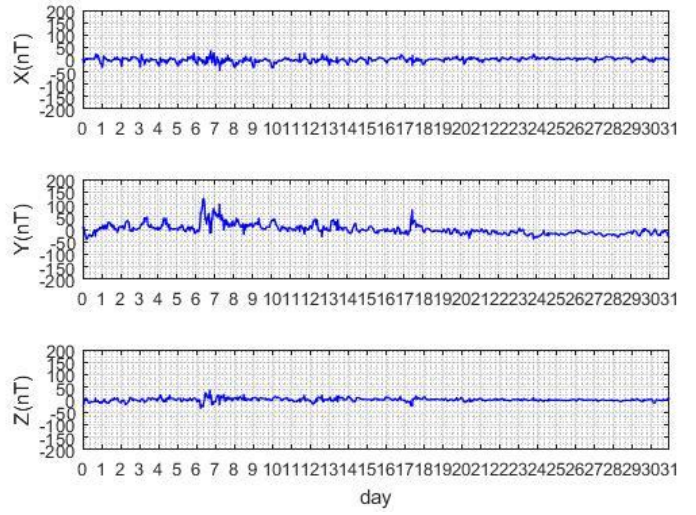
KAK 08-2015 no Sq



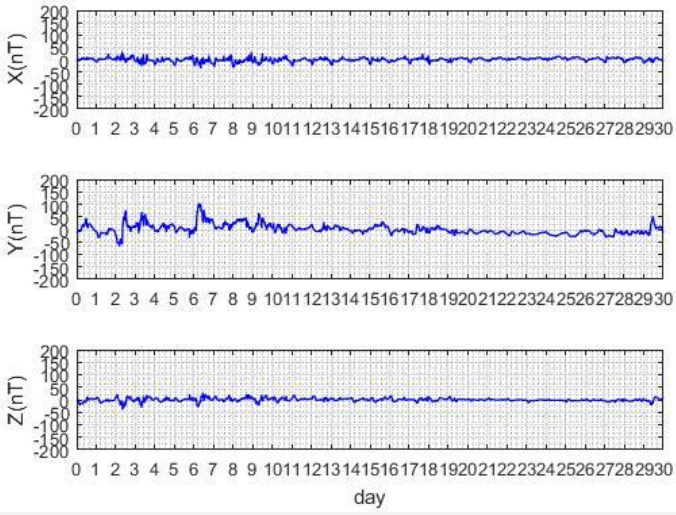
KAK 09-2015 no Sq



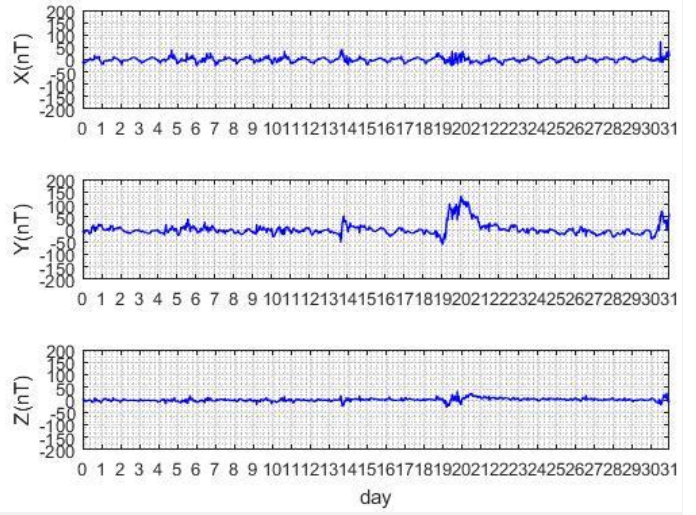
KAK 10-2015 no Sq



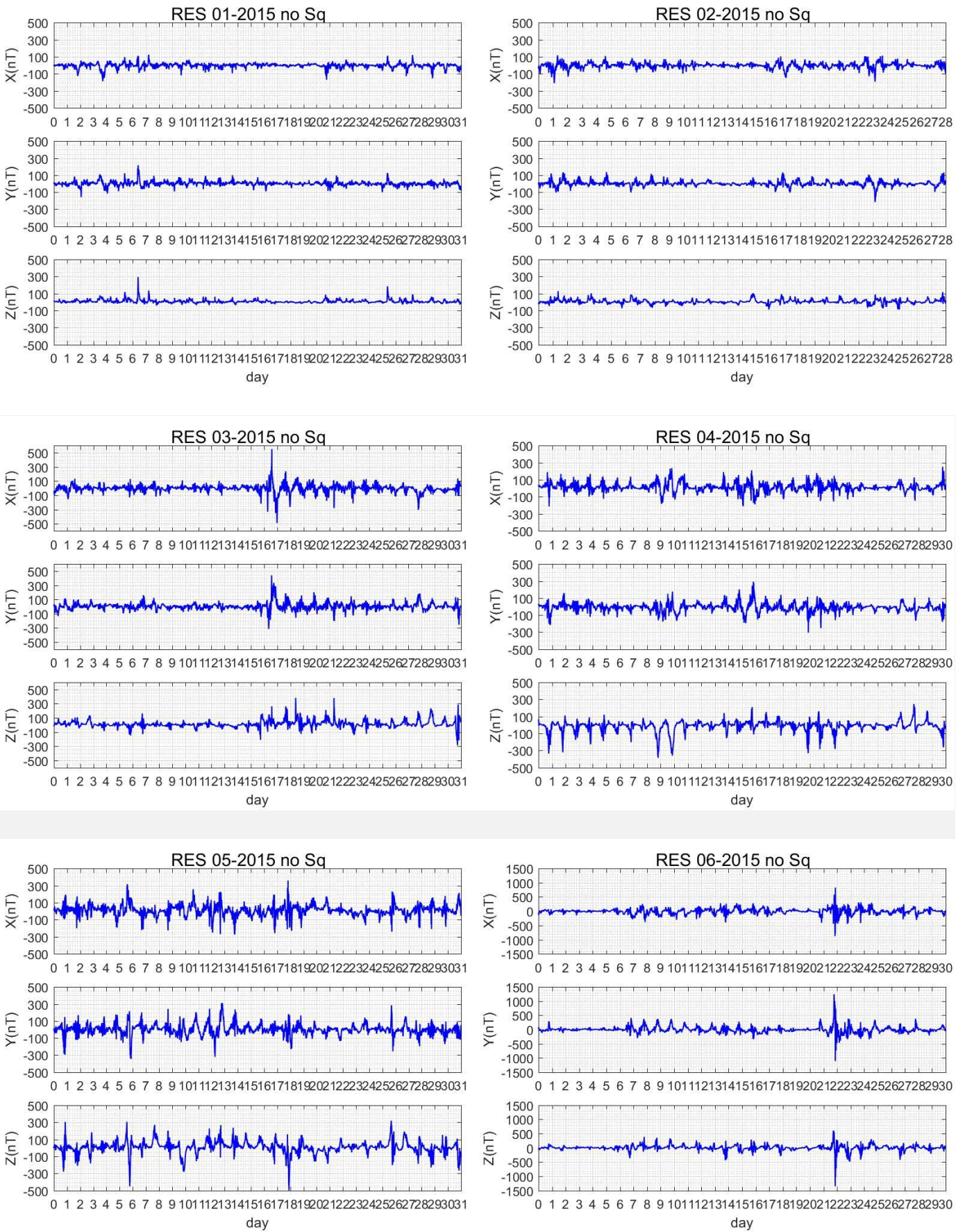
KAK 11-2015 no Sq

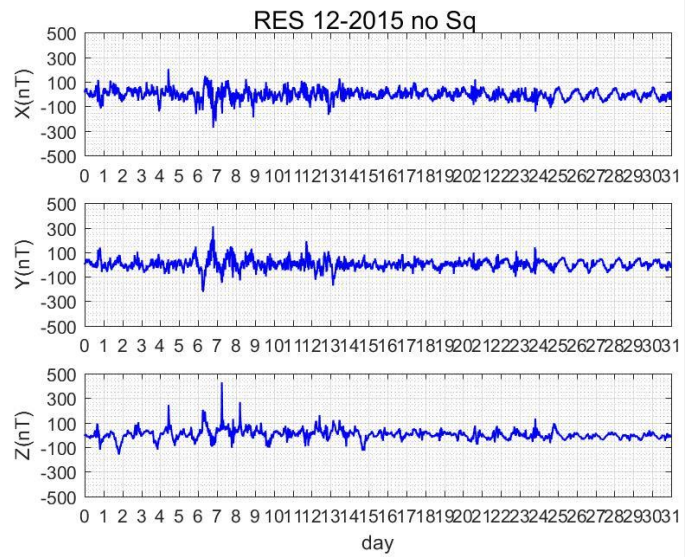
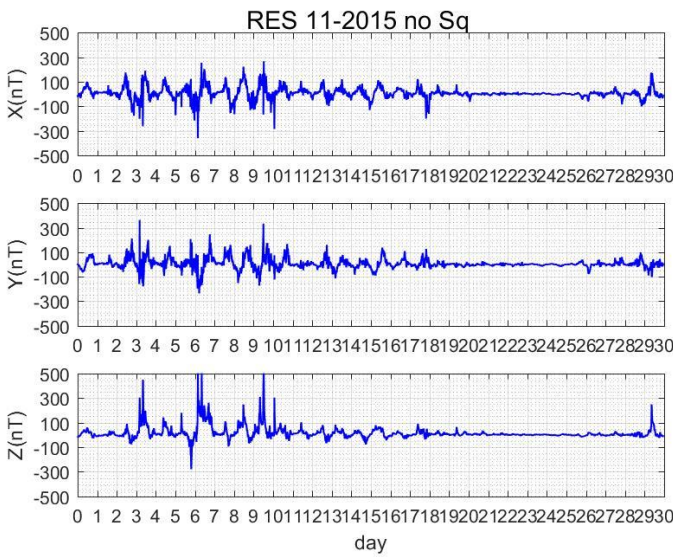
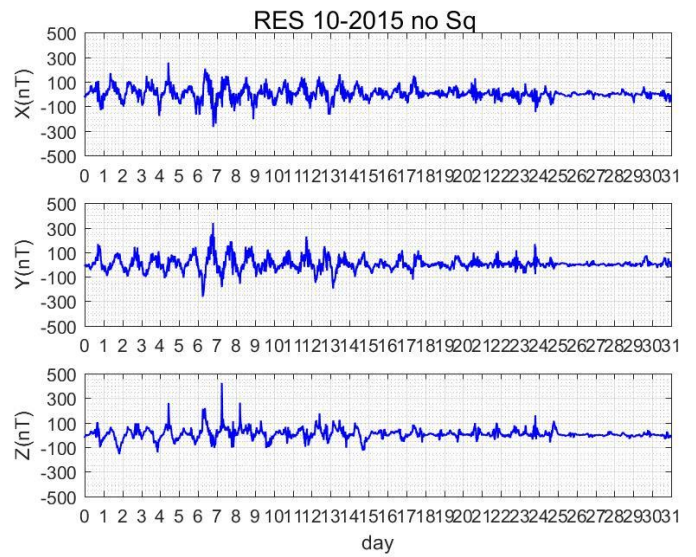
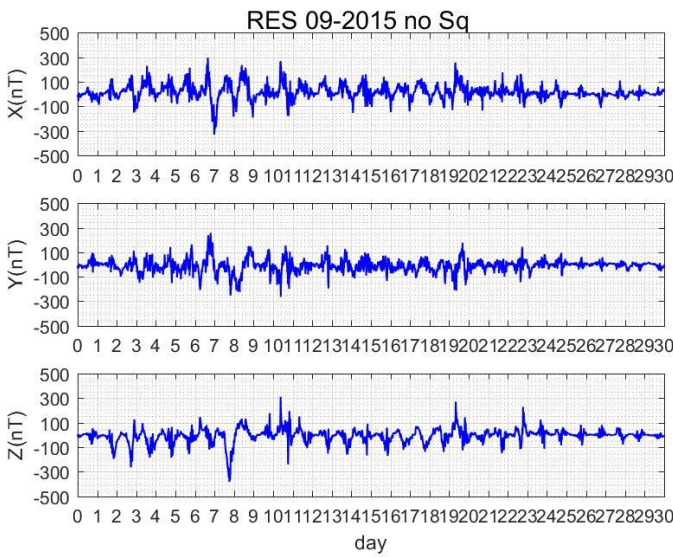
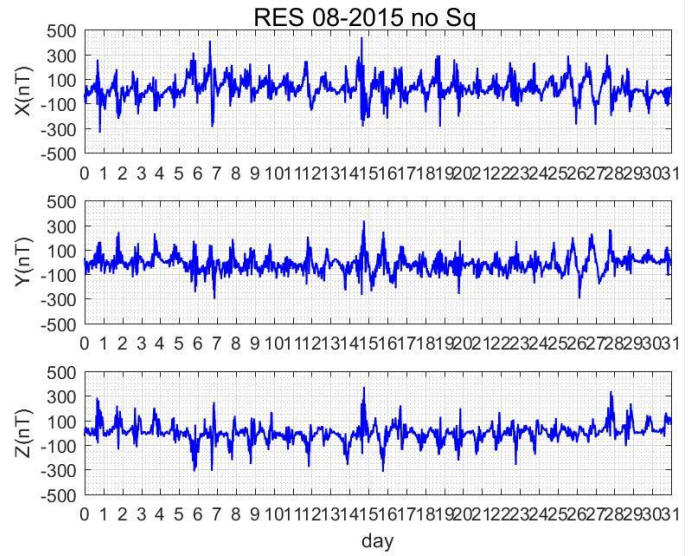
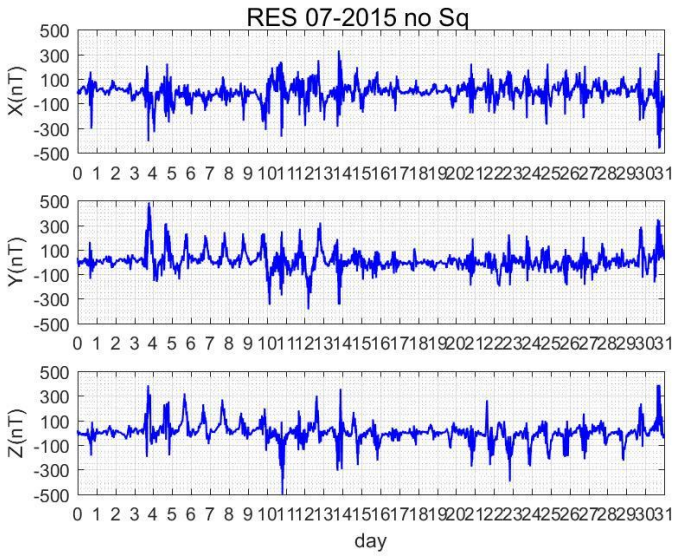


KAK 12-2015 no Sq



Εικόνα 72: Διορθωμένα διαγράμματα των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου για όλους τους μήνες για το σταθμό RES



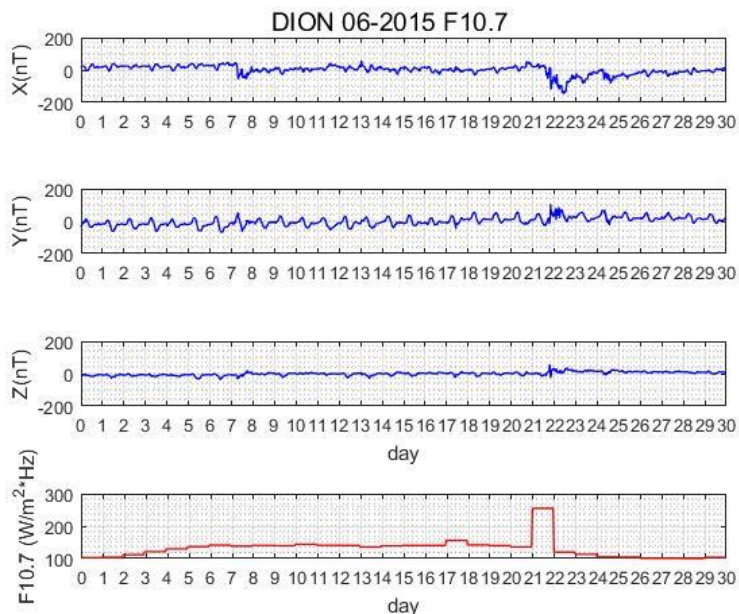




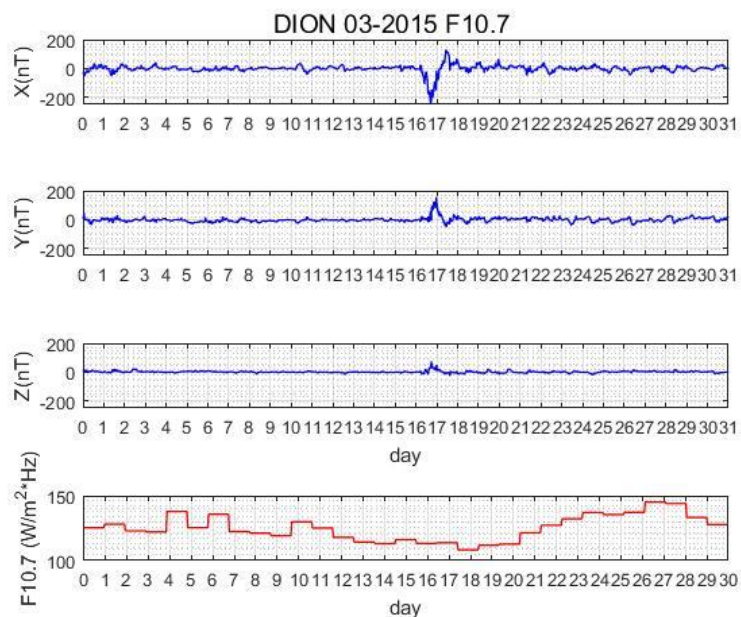
### 3.3. Συσχέτιση με τον δείκτη F10.7

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.1.5γ), ο δείκτης F10.7 συνδέεται με τις μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου.

Στα παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την συσχέτιση των μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου (διορθωμένων από το  $S_q$ ) από το σταθμό DION για το μήνα Ιούνιο και τον Μάρτιο. Παρατηρούμε ότι την 21<sup>η</sup> ημέρα του μήνα Ιουνίου έχουμε αύξηση του δείκτη F10.7, που συμπίπτει με την μαγνητική καταιγίδα τις ημέρες 21<sup>η</sup>-23<sup>η</sup> (εικόνα 47) Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχει αντίστοιχη αύξηση του δείκτη τις ημέρες 16-17 του μήνα Μάρτη, που επιβεβαιώνει ότι η σχέση του με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα δεν είναι δεδομένη (εικόνα 48).



Εικόνα 73: Συσχέτιση του δείκτη F10.7 (κόκκινη καμπύλη) με το μαγνητικό πεδίο (μπλε καμπύλες) στο σταθμό DION για τον μήνα Ιούνιο.

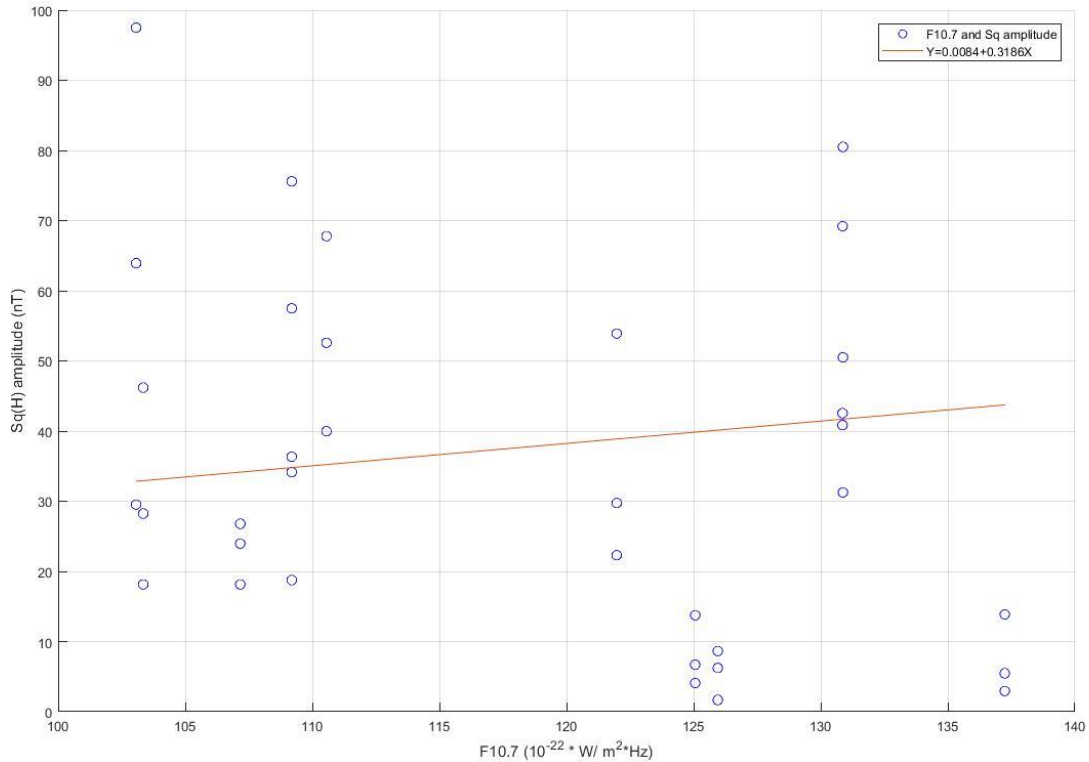


Εικόνα 74: Συσχέτιση του δείκτη F10.7 (κόκκινη καμπύλη) με το μαγνητικό πεδίο (μπλε καμπύλες) στο σταθμό DION για τον μήνα Μάρτιο

Σε δεύτερο βήμα, εξετάζουμε την σχέση του F10.7 με το  $S_q$ . Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.1.5., έρευνες δείχνουν ότι εμφανίζει σχεδόν γραμμική (ή πολυωνυμική δευτέρου βαθμού) σχέση με το πλάτος του  $S_q$ . Παίρνουμε λοιπόν τα πλάτη αυτά για κάθε μήνα για τους σταθμούς DION, KAK και RES και τα αντιστοιχίζουμε με την αντίστοιχη μέση τιμή του δείκτη για κάθε μήνα. Στη συνέχεια, κατασκευάζουμε ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression). Το διάγραμμα που προκύπτει εμφανίζεται στην εικόνα 49.

Παρατηρούμε ότι, αν και υπάρχει μεγάλος διασκορπισμός των σημείων. Συμπεραίνουμε ότι, αν και υπάρχει τάση εξάρτησης, δεν μπορεί να φανεί σε χρονική περίοδο τάξης ενός έτους.

Sq and F10.7



Εικόνα 75: Συσχέτιση του F10.7 με το πλάτος του  $S_q$  για όλους τους μήνες του 2015 για τους σταθμούς DION, KAK και RES.

#### 4. Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των μοντέλων του μαγνητικού πεδίου στα δεδομένα του ENIGMA και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα σταθμών μεγαλύτερων γεωγραφικών πλατών.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων του ENIGMA είναι μια απαιτητική διαδικασία, καθώς προέρχονται κατευθείαν από τα μαγνητόμετρα χωρίς πρότερη επεξεργασία. Κύρια εστίασαμε στις ακραίες τιμές-splikes, που χαλούν την εικόνα αλλά και την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης εστίασαμε στα κενά των μετρήσεων, που η λάθος αντιμετώπιση τους μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων μας μας δίνει παρόμοια αποτελέσματα για τους τρεις σταθμούς του ENIGMA, όπως προφανώς αναμένεται. Μάλιστα, βλέπουμε ότι στον σταθμό RES, ο οποίος βρίσκεται σε μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, δηλαδή σε πολική περιοχή, εμφανίζονται αρκετά μεγαλύτερες διακυμάνσεις του πεδίου, λόγω επιπλέον συνεισφορών που στην παρούσα εργασία δεν λάβαμε υπόψιν μας.

Η εφαρμογή του μοντέλου IGRF-12 μας δίνει τις τιμές του κύριου πεδίου, δηλαδή του πεδίου του πυρήνα και του φλοιού, και τα αποτελέσματα μας επιβεβαιώνουν το θεωρητικό υποβαθρο όσον αφορά το secular variation. Δηλαδή ότι οι μεταβολές του κύριου πεδίου είναι εμφανείς σε χρονικές κλίμακες μεγαλύτερες του ενός έτους.

Η εφαρμογή του μοντέλου CHAOS-6 μας δίνει τις τιμές του κύριου πεδίου καθώς και εξωτερικών πηγών, που είναι το δακτυλιοειδές ρεύμα, η μαγνητόπαυση και η μαγνητοουρά. Τα αποτελέσματα μας όσον αφορά το κύριο πεδίο συμφωνούν με τα αντίστοιχα του IGRF-12. Αφαιρώντας την μεταβολή του κύριου πεδίου από τα δεδομένα μας βλέπουμε την μεταβολή στην διάρκεια του έτους, αλλά όχι σε επίπεδο μήνα. Επίσης, η ένταση των εξωτερικών πηγών μεταβάλλεται σε μικρότερες χρονικές κλίμακες και μάλιστα βλέπουμε την αύξηση του σε περιόδους εντονότερης γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Η σύγκριση, επίσης, της έντασης τους στα τρία διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη μας δίνει παρόμοια αποτελέσματα. Μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι οι μεταβολές στον RES (πολική περιοχή) οφείλονται και σε επιπλέον συνεισφορές.

Η εφαρμογή των μοντέλων στους τρεις σταθμούς του ENIGMA μας δίνει παρόμοια αποτελέσματα, όπως θα ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Παρατηρούμε επίσης ότι η χρονικές μεταβολές του κύριου πεδίου δεν είναι σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη η ίδια. Για την ακρίβεια, παρατηρούμε ότι στους ελληνικούς σταθμούς (low to mid latitude) έχουμε μεταβολή κυρίως στις Y και Z συνιστώσες του πεδίου. Στον σταθμό KAK (mid latitude) έχουμε μεταβολή κυρίως στις X και Z, ενώ στον RES (high latitude) στην X.

Στην συνέχεια, αφαιρέσαμε την συνεισφορά του πεδίου που παράγεται από το ρεύμα  $S_q$  στην ιονόσφαιρα. Η μεταβολή αυτή του πεδίου είναι ημερήσια και στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγεται να αφαιρείται. Ακολουθήσαμε μία εύκολη αλλά διαδεδομένη διαδικασία, κατά την οποία εξάγαμε την συνεισφορά αυτήν ως μέσο όρο των 5 πιο ήσυχων (γεωμαγνητικά) ημερών του κάθε μήνα. Εντοπίσαμε ότι υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των σταθμών του ENIGMA, καθώς και ότι υπάρχει μεγαλύτερη διακύμανση του πλάτους του  $S_q$  σε αυτούς τους σταθμούς σε σχέση με τον σταθμό KAK, ειδικότερα στην Y συνιστώσα του πεδίου. Μάλιστα, είδαμε ότι στον σταθμό RES εμφανίζονται επιπλέον διακυμάνσεις, διάρκειας ωρών.

Τέλος, εξετάσαμε την σχέση του δείκτη F10.7 με τις διαταραχές του πεδίου. Είδαμε ότι δεν υπάρχει απόλυτη σχέση μεταξύ τους, όπως είναι αναμενόμενο. Δηλαδή, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις η αύξηση της ροής ηλιακής ακτινοβολίας σε μήκος κύματος 10.7cm συμπίπτει με το ξέσπασμα μαγνητικής καταιγίδας (π.χ. Ιούνιος), σε άλλες περιπτώσεις δεν υπάρχει αντίστοιχη σύνδεση (π.χ. Μάρτης). Επίσης, είδαμε ότι η σύνδεση του δείκτη με το πλάτος του  $S_q$  απαιτεί δεδομένα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. Βέβαια, εντοπίσαμε μία ορισμένη συσχέτιση, αλλά με μεγάλη διασπορά των σημείων.

Σε μελλοντική μελέτη, ενδιαφέρον εμφανίζει η διαδικασία εξαγωγής του  $S_q$  με μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο εξειδικευμένη επιλογή baseline, αλλά και σε πολικές περιοχές ύστερα από την εξάλειψη των επιπλέον συνεισφορών εκεί. Περαιτέρω έρευνα τροφοδοτεί επίσης η συσχέτιση του δείκτη F10.7 με το  $S_q$  σε δεδομένα μεγαλύτερου χρονικού εύρους του ενός έτους.

## 5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### 5.1. Τύποι μαγνητομέτρων

#### Μαγνητόμετρο DI fluxgate

Βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του fluxgate και χρησιμοποιείται για την μέτρηση της απόκλισης (D) και έγκλισης (I) του πεδίου.

#### Cesium vapor (scalar)

Αποτελείται από συσκευή εκπομπής φωτονίων και χώρο όπου βρίσκονται ατμοί καισίου (ρουβίδιο, ποτάσσιο ή άλλο αλκάλιο, ή ήλιο). Τα φωτόνια διεγείρουν τα άτομα καισίου σε συγκεκριμένη ενέργεια. Η ύπαρξη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί διαφοροποίηση στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων και αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη συχνότητα.

#### Proton precession magnetometers (scalar)

Η βασική δομή του μαγνητομέτρου πρωτονίου συνίσταται σε μια χάλκινη, συνήθως ηλεκτραγώγιμη σπείρα που περιβάλλει έναν κύκλινδρο παραφίνης ή κηροζίνης, υλικά δηλαδή που είναι πλούσια σε πρωτόνια. Ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το σωληνοειδές δημιουργεί μεγάλης έντασης μαγνητικό πεδίο στο οποίο τα πρωτόνια συντονίζονται/ευθυγραμμίζονται. Η διακοπή του ρεύματος οδηγεί στην οδηγεί στην μετάπτωση των πρωτονίων με συχνότητα ανάλογη του περιβάλλοντος πεδίου.

#### Overhauser (scalar)

Το μαγνητόμετρο τύπου Overhauser ακολουθεί παρόμοια λειτουργία με το μαγνητόμετρο πρωτονίων, μόνο που ο συντονισμός των πρωτονίων γίνεται με τη χρήση ραδιοκύματος χαμηλής ενέργειας.

### 5.2. Ώρα UTC

Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα- Universal Time Coordinated (UTC): είναι το διεθνές σημείο αναφοράς χρόνου. Διεθνώς έχει επιλεγεί ως μεσημβρινός αναφοράς αυτός του Greenwich και η ώρα UTC προκύπτει ως η Παγκόσμια Ώρα (Universal Time-UT), διορθωμένη με την βοήθεια του Παγκόσμιου Ατομικού Χρόνου (International Atomic Time-TAI). Η UT βασίζεται στην ακριβή μέτρηση του χρόνου περιστροφή της Γης, ενώ στο χρόνο TAI ως ένα δευτερόλεπτο ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται ένα άτομο Cs-137 να ταλαντωθεί 9.192.631.770 φορές στη θεμελιώδη κατάσταση.

### 5.3. Συστήματα καταγραφής χρόνου

Η Ιουλιανή Ημερομηνία (Julian Date-JD) είναι συνεχής καταγραφή χρόνου ανά ημέρα, με σημείο 0 το μεσημέρι της 1<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 4713 π.Χ. (χρόνος UTC) και δημιουργήθηκε το 1583 από τον Joseph Justice Scaliger. Η συγκεκριμένη ημερομηνία επιλέχθηκε κυρίως για ιστορικούς λόγους. Για παράδειγμα το μεσημέρι της 1<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2015 ήταν JD= 2457024.

Συνήθως χρησιμοποιείται η Διορθωμένη Ιουλιανή Ημερομηνία (Modified Julian Date-MJD), η οποία ξεκινά τα μεσάνυχτα και αφαιρούνται τα πρώτα δύο ψηφία της JD για απλοποίηση.

$MJD = JD - 2400000.5$  (Εξίσωση 30: JD σε MJD)

Η MJD2000 ημερομηνία ξεκινά την καταγραφή από τα μεσάνυχτα της 1<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2000.

$MJD2000 = MJD - 51544.5$  (Εξίσωση 31: MJD σε MJD2000)

Για παράδειγμα, τα μεσάνυχτα της 1/1/2015 αντιστοιχούν στις εξής ημερομηνίες:

JD=2457023.5

MJD=57023.00

Να σημειωθεί ότι η καταγραφή του χρόνου με τα παραπάνω συστήματα επιτρέπει την εύκολη καταγραφή και ταξινόμηση δεδομένων.

#### 5.4. Διαστημικές Αποστολές

- **Sputnik-3**

Ο δορυφόρος Sputnik-3 εκτοξεύτηκε στις 15 Μαΐου του 1958 από την ΕΣΣΔ με σκοπό την εξερεύνηση της ανώτερης ατμόσφαιρας και του εγγύς διαστήματος. Ο Sputnik-1 αποτέλεσε τον πρώτο δορυφόρο που εκτοξεύτηκε στο διάστημα από τον άνθρωπο.

Ήταν εφοδιασμένο με πολλά διαφορετικά όργανα, ανάμεσα τους το πρώτο μαγνητόμετρο στο διάστημα.

- **MAGSAT (MAGnetic field SATellite)**

Ο δορυφόρος Magsat εκτοξεύτηκε στις 30 Οκτωβρίου 1979 από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (*National Aeronautics and Space Administration-NASA*) και το Γεωλογικό Ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών (*United States Geological Survey-USGS*). Η τροχιά του ήταν 350 km-551 km από την επιφάνεια. Η αποστολή του τελείωσε στις 11 Ιούνη του 1980.

Παρά το μικρό χρόνο ζωής του, η αποστολή του Magsat αποτελεί ορόσημο, καθώς έδωσε ακριβείς μετρήσεις του παγκόσμιου μαγνητικού πεδίου και τις πρώτες μετρήσεις του διανυσματικού πεδίου (vector field) σε χαμηλή τροχιά (low earth orbit-LEO).

- **CHAMP (Challenging Minisatellite Payload )<sup>17</sup>**

Ο δορυφόρος CHAMP εκτοξεύτηκε στις 15 Ιούλη 2000 από το Γερμανικό Ερευνητικό Κέντρο Γεωεπιστημών (GFZ German Research Centre for Geosciences/ Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum ) σε τροχιά 416-476km από την επιφάνεια της Γης. Η αποστολή τελείωσε στις Σεπτέμβρη 2010.

Σκοπός της αποστολής ήταν, μεταξύ άλλων, η μέτρηση χωρικών και χρονικών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου.

- **Ørsted**

Ο Ørsted είναι ο πρώτος δορυφόρος της Δανίας, εκτοξεύτηκε στις 23 Φεβρουαρίου 1999 από το Δανέζικο Μετεωρολογικό Ινστιτούτο (*Danish Meteorological Institute*) και βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι σήμερα.

Ο κύριος στόχος ήταν η καταγραφή του μαγνητικού πεδίου της Γης και των μεταβολών του. Η τροχιά του βρίσκεται σε ύψος 632.6 -833.4km.

- **SAC-C (Satellite for Scientific Applications)<sup>18</sup>**

Ο δορυφόρος SAC-C εκτοξεύτηκε το Νοέβριο του 2000 στα 702km ύψος και η αποστολή του ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 2013.

Αποτελεί διεθνή συνεργασία μεταξύ Αργεντινής, ΗΠΑ, Δανίας, Βραζιλίας, Ιταλίας και Γαλλίας. Εξ αυτών, κύρια μέλη της συνεργασίας αποτελεί η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (*National Aeronautics and Space Administration-NASA*) και η Εθνική Επιτροπή Διαστημικών Δραστηριοτήτων της Αργεντινής (*Comisión Nacional de Actividades Espaciales-CONAE*).

Κύριοι στόχοι της αποστολής ήταν η μελέτη της δομής και δυναμικής της επιφάνειας της Γης, της ατμόσφαιρας, της ιονόσφαιρας και της μαγνητόσφαιρας, αλλά και φαινομένων που συνδέονται με την ηλιακή δραστηριότητα.

- **Swarm<sup>19</sup>**

Η αποστολή Swarm εκτοξεύτηκε στις 22 Νοεμβρίου του 2013 υπό την αιγίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (*European Space Agency: ESA*). Αποτελείται από τρεις πανομοιότυπους δορυφόρους, οι οποίοι

<sup>17</sup> <https://www.gfz-potsdam.de/champ/>

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2000-039B>

<sup>18</sup> [https://www.nasa.gov/sites/default/files/110896main\\_FS-2000-11-012-GSFC-SAS-C.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/110896main_FS-2000-11-012-GSFC-SAS-C.pdf)

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/sac-c>

<sup>19</sup> [https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Swarm/Facts\\_and\\_figures](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Swarm/Facts_and_figures)

ονομάζονται ALPHA, BRAVO και CHARLIE. Οι δύο δορυφόροι περιφέρονται σε ύψος 460km ο ένα δίπλα στον άλλον, και ο τρίτος σε ύψος 530km.

Ο σκοπός της αποστολής είναι η καλύτερη κατανόηση και μελέτη του μαγνητικού πεδίου της Γης. Πιο συγκεκριμένα στοχεύει στην κατανόηση της δυναμικής του πυρήνα, του μηχανισμού του γεωδυναμό, την αλληλεπίδραση φλοιού-μανδύα, τους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στη λιθόσφαιρα και στους ωκεανούς. Επίσης, στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης του Ήλιου στην γήινη μαγνητόσφαιρα και στην επίδραση του ηλιακού ανέμου στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

Κάθε δορυφόρος είναι εφοδιασμένος με τα εξής όργανα:

- **Vector Field Magnetometer**

Λαμβάνει υψηλής ανάλυσης μετρήσεις της έντασης και κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου.

- **Absolute Scalar Magnetometer**

Μετρά με υψηλή ανάλυση την απόλυτη ένταση του μαγνητικού πεδίου.

- **Επιταχυνσιόμετρο (Accelerometer)**

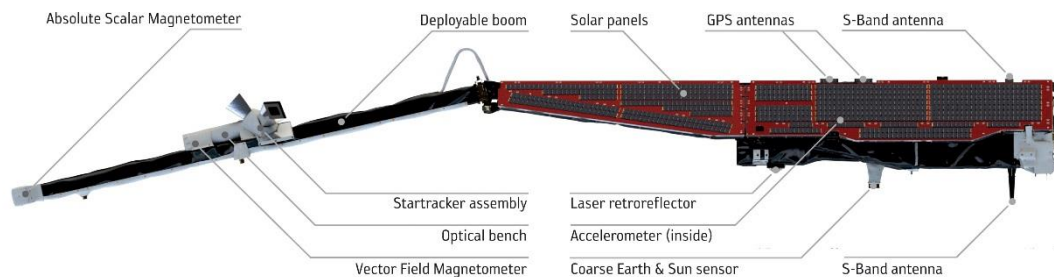
Παρέχει πληροφορία για τον ηλιακό άνεμο και την αντίσταση του αέρα

- **Electrical Field Instrument**

Τοποθετημένο στο μπροστινό μέρος του κάθε δορυφόρου, λαμβάνει μετρήσεις για την πυκνότητα, ολίσθηση και επιτάχυνση του πλάσματος ώστε να παρέχει πληροφορία για το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την Γη.

- **GPS Receiver and Laser Retroreflector**

Παρέχει επακριβή πληροφορία της θέσης κάθε δορυφόρου.



Εικόνα 76: Όργανα των δορυφόρων Swarm:

(Πηγή: ESA [https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Swarm/New\\_generation\\_of\\_sensors](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Swarm/New_generation_of_sensors))

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κανάρης Χ. Τσίγκανος (2015): Αστροφυσική Πλάσματος
- [2] Sabaka et. al (2002): A comprehensive model of the quiet-time, near-Earth magnetic field: phase 3, *Geophys. J. Int.*
- [3] Lowes F. (2016): How should the international geomagnetic reference field be defined? (*position paper*)
- [4] Yamazaki et. al (2017): Sq and EEJ-A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents, *Space Sci Rev*, DOI 10.1007/s11214-016-0282-z
- [5] Jeremy Davis (2014): Mathematical Modeling of Earth's Magnetic Field, *Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, Technical Note*
- [6] Shinbori et al (2014): Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation, *Earth, Planets and Space* (<https://doi.org/10.1186/s40623-014-0155-1>)
- [7] Paola De Michelis, Giuseppe Consolini (2015): On polar daily geomagnetic variation, *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 58, 5, 2015, G0549; doi:10.4401/ag-6801
- [8] Olsen et. al (2014) : The CHAOS-4 geomagnetic field model, *Geophys. J. Int.*
- [9] *Thébault et al.* (2015): International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, *Earth, Planets and Space*
- [10] Finlay et al. (2016): Recent geomagnetic secular variation from *Swarm* and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model, *Earth, Planets and Space*
- [11] Adamantia Zoe Boutsis (2017): Wavelet spectral analysis of the ENIGMA magnetometer array time series and solar wind conditions around the strongest magnetic storms of solar cycle 24, *Master Thesis*
- [12] Edda Lína Gunnarsdóttir (2012): The Earth's Magnetic Field, *degree in Physics Department of Háskóli Íslands*

## Διαδικτυακές Πηγές

<https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field/>

<https://www.spenvis.oma.be/help/background/coortran/coortran.html#GEO>

<http://geomag.nrcan.gc.ca/index-en.php>

<http://helios.fmi.fi/~juusola/geomagnetism/Lectures/>

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/dst2/onDstindex.html>

<http://supermag.jhuapl.edu/info/>

<http://enigma.space.noa.gr>

<http://wikipedia.com>

<https://www.researchgate.net/>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΚΑΛΛΙΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ .....	2
ΕΙΚΟΝΑ 2:ΕΞΩΦΥΛΛΟ ΤΟΥ DE MAGNETE, ΕΚΔΟΣΗ 1628 (ΠΗΓΗ: WIKIPEDIA).....	4
ΕΙΚΟΝΑ 3: Ο ROALD AMUNDSEN ΚΑΙ Η ΟΜΑΔΑ ΤΟΥ ΣΤΟΝ ΒΟΡΕΙΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΟΛΟ (ΠΗΓΗ: WIKIPEDIA).....	4
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑΣ (ΠΗΓΗ: RESEARCHGATE).....	5
ΕΙΚΟΝΑ 5:ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟ. ΟΙ ΣΠΕΙΡΕΣ ΑΝΑΠΑΡΙΣΤΟΥΝ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ CORIOLIS. (ΠΗΓΗ: WIKIPEDIA) .....	6
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	6
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΤΗΝ Υ-ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΙΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΕΣ 7 ΗΜΕΡΕΣ ΤΟΥ 9/2015-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΙΟΝΥΣΟΣ ΤΟΥ ENIGMA .....	7
ΕΙΚΟΝΑ 8:ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ SQ .....	7
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΤΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΕΣ ΡΕΥΜΑ (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ CHARMAN-FERRARO (ΚΑΤΩ), (ΠΗΓΗ: BRITANNICA) .....	8
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΥΡΑΣ .....	8
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΕΥΜΑΤΩΝ BIRKELAND (ΠΗΓΗ: WIKIPEDIA) .....	9
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΤΑ ΒΑΣΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑΣ (ΠΗΓΗ: BRITANNICA) .....	9
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΙΚΟΥ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	10
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΓΗΣ ΩΣ ΔΙΠΟΛΟ, ΤΕΤΡΑΠΟΛΟ ΚΑΙ ΟΚΤΑΠΟΛΟ .....	11
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ 4 ΠΡΩΤΩΝ ΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ .....	11
ΕΙΚΟΝΑ 16: .....	12
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ GSM .....	13
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΣΧΕΣΗ GEO ΚΑΙ MAG.....	14
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΣΤΟ ΛΟΝΔΙΝΟ.....	15
ΕΙΚΟΝΑ 20: Η ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΟΥ ΒΟΡΕΙΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΝΟΤΙΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ (HTTP://WDC.KUGI.KYOTO-U.AC.JP/POLES/POLESEXP.HTML).....	15
ΕΙΚΟΝΑ 21:ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ F10.7 ΜΕ ΤΟ SQ ΓΙΑ 6 ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ 1947 ( Η ΤΕΛΙΚΗ ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΙΑΦΕΡΕΙ). Η ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΕΝΩ Η ΚΟΚΚΙΝΗ ΣΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ 2ΟΥ ΒΑΘΜΟΥ. [6] .....	17
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ FLUXGATE ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ .....	17
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ $D_{ST}$ .....	18
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ RC (ΚΟΚΚΙΝΕΣ ΤΕΛΕΙΕΣ) (ΠΗΓΗ: [8]) .....	19
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΛΟΓΟΤΥΠΟ ΤΗΣ MATLAB ΠΗΓΗ: WIKIPEDIA .....	23
ΕΙΚΟΝΑ 26:ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΩΝ 4 ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΟΥ ENIGMA (ΠΗΓΗ: HTTP://ENIGMA.SPACE.NOA.GR) .....	24
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ SUPERMAG (HTTP://SUPERMAG.JHUAPL.EDU).....	24
ΕΙΚΟΝΑ 28: .....	25
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΟΥ ENIGMA .....	26
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΑΡΧΕΙΟ *.TXT ΤΟΥ THL. ΟΙ ΣΤΗΛΕΣ ΑΠΟ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΔΕΞΙΑ ΕΙΝΑΙ: ΈΤΟΣ, ΜΗΝΑΣ, ΗΜΕΡΑ, ΏΡΑ, ΛΕΠΤΟ, ΔΕΥΤΕΡΟΛΕΠΤΟ, ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ X, Y, Z ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΟ ΟΡΓΑΝΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....	26
ΕΙΚΟΝΑ 31:ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΑ ΚΕΝΑ ΣΕ ΗΜΕΡΑ ΤΟΥ ΔΙΟΝ. ΣΗΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΚΥΚΛΟ. ....	27
ΕΙΚΟΝΑ 320: ΚΕΝΟ 26 ΗΜΕΡΩΝ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ VLI .....	27
ΕΙΚΟΝΑ 33: ΚΕΝΟ 5 ΜΗΝΩΝ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ THL .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 34: SPIKE ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΔΙΟΝ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ SPIKE ΣΤΟ ΓΡΑΦΗΜΑ. ΔΕΞΙΑ: Η ΤΙΜΗ ΤΟΥ SPIKE ΣΤΟ ΑΡΧΕΙΟ .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 35: .....	29
ΕΙΚΟΝΑ 36: THL 1,2,3/7: ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΙΔΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ. ΤΗΝ ΑΓΝΟΟΥΜΕ ΓΙΑΤΙ ΔΕΝ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗ. ....	29
ΕΙΚΟΝΑ 37:ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΤΟΥ ΙΔΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ VLI 4/3 .....	29
ΕΙΚΟΝΑ 38: SPIKE ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ VLI.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 39: ΚΑΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ. ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΩΣ SPIKE. ΔΙΟΡΘΩΝΟΥΜΕ ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΑ .....	30
ΕΙΚΟΝΑ 40:ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΩΝ 536 ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ SUPERMAG (ΠΗΓΗ: HTTP://SUPERMAG.JHUAPL.EDU/MAG/) .....	31
ΕΙΚΟΝΑ 41: ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ RES ΣΤΟ MATLAB.....	32
ΕΙΚΟΝΑ 42:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΔΙΟΝ.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 43:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ VLI .....	35
ΕΙΚΟΝΑ 44:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ THL .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 45:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΚΑΚ.....	39



ΕΙΚΟΝΑ 46:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ RES .....	41
ΕΙΚΟΝΑ 47: INPUT ΤΟΥ IGRF12 (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ OUTPUT (ΔΕΞΙΑ) .....	43
ΕΙΚΟΝΑ 48: ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CHAOS-6 ΣΤΟ MATLAB .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 49: ΤΟ OUTPUT ΤΟΥ CHAOS-6 ΣΤΟ MATLAB .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 50:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΔΙΟΝ .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 51:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ VLI.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 52:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΗΛ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 53:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΚ .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 54:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ RES.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 55:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟ ΣΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΔΙΟΝ, ΚΑΚ ΚΑΙ RES .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 56:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΜΠΛΕ ΚΑΜΠΥΛΗ) ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΚΟΚΚΙΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ), ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΙΟΥΝΙΟ (ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΛΗ) ΚΑΙ ΣΕΠΤΕΜΒΡΗ (ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΛΗ) ΚΑΙ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ.....	56
ΕΙΚΟΝΑ 57: Η ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΡΕΙΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΔΙΟΝ, ΚΑΚ ΚΑΙ RES.....	58
ΕΙΚΟΝΑ 58: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΚΟΚΚΙΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ) ΜΕ ΤΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ CHAOS-6 (ΜΠΛΕ ΚΑΜΠΥΛΗ), ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΙΟΥΝΙΟ (ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΛΗ) ΚΑΙ ΣΕΠΤΕΜΒΡΗ (ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΛΗ) ΚΑΙ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ .....	60
ΕΙΚΟΝΑ 59:ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ YEARLY TREND ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 60: ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ.....	64
ΕΙΚΟΝΑ 61: ΟΙ 5 ΠΙΟ ΗΣΥΧΕΣ ΗΜΕΡΕΣ ΤΟΥ ΙΟΥΝΙΟΥ 2015 (ΜΕ ΧΡΩΜΑ).....	65
ΕΙΚΟΝΑ 62: ΟΙ 5 ΗΣΥΧΕΣ ΗΜΕΡΕΣ (ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΤΟΥ 6/2015 ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥΣ (ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗ) .....	66
ΕΙΚΟΝΑ 63: ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ SQ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΔΙΟΝ .....	68
ΕΙΚΟΝΑ 64:ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ SQ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ VLI .....	70
ΕΙΚΟΝΑ 65: ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ SQ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΗΛ .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 66: ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ SQ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΚ .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 67: ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ SQ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ RES.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 68: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΔΙΟΝ .....	77
ΕΙΚΟΝΑ 69: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ VLI.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 70: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΗΛ.....	82
ΕΙΚΟΝΑ 71: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΚ.....	83
ΕΙΚΟΝΑ 72: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ RES.....	86
ΕΙΚΟΝΑ 73: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ F10.7 (ΚΟΚΚΙΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ) ΜΕ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ (ΜΠΛΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΔΙΟΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟ.....	88
ΕΙΚΟΝΑ 74:ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ F10.7 (ΚΟΚΚΙΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ) ΜΕ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ (ΜΠΛΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΔΙΟΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟ .....	88
ΕΙΚΟΝΑ 75: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ F10.7 ΜΕ ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΟΥ S <sub>q</sub> ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΤΟΥ 2015 ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΔΙΟΝ, ΚΑΚ ΚΑΙ RES.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 76: ΌΡΓΑΝΑ ΤΩΝ ΔΟΥΡΥΦΟΡΩΝ SWAM:.....	93

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΓΕΝΙΕΣ ΤΟΥ IGRF (ΠΗΓΗ: [9]) .....	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 2:ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ 5 ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	23

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ**

ΕΞΙΣΩΣΗ 1:ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟ .....	6
ΕΞΙΣΩΣΗ 2: ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ .....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 3:ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΙΣΗΜΕΡΙΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ .....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 4:SPHERICAL HARMONICS .....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 5: ΑΠΟΥΣΙΑΣ ΜΟΝΟΠΟΛΩΝ .....	10

ΕΞΙΣΩΣΗ 6: ΝΟΜΟΣ AMPERE.....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 7: ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΩΣ ΚΛΙΣΗ ΒΑΘΜΩΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 8: ΕΞΙΣΩΣΗ LAPLACE .....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 9: ΕΞΙΣΩΣΗ LAPLACE ΣΕ ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ .....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 10: ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ .....	10
ΕΞΙΣΩΣΗ 11: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ SCHMIDT .....	11
ΕΞΙΣΩΣΗ 12: ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ LEGENDRE.....	11
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ 13 (Α), (Β), (Γ): ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ .....	11
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ 14 (Α), (Β), (Γ): ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΙΣ GEO .....	12
ΕΞΙΣΩΣΗ 15: ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΝΤΑΣΗ (HORIZONTAL INTENSITY).....	13
ΕΞΙΣΩΣΗ 16: ΟΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (TOTAL INTENSITY) .....	13
ΕΞΙΣΩΣΗ 17: ΑΠΟΚΛΙΣΗ (DECLINATION).....	13
ΕΞΙΣΩΣΗ 18: ΕΓΚΛΙΣΗ (INCLINATION) .....	13
ΕΞΙΣΩΣΗ 19: ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΣΕ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.....	14
ΕΞΙΣΩΣΗ 20: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΕ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.....	14
ΕΞΙΣΩΣΗ 21: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ GEO-MAG .....	14
ΕΞΙΣΩΣΗ 22: ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΣΤΟΝ Υ-ΑΞΟΝΑ ΚΑΤΑ ΓΩΝΙΑ $\theta_0(T)$ .....	14
ΕΞΙΣΩΣΗ 23: ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΣΤΟΝ Ζ-ΑΞΟΝΑ ΚΑΤΑ ΓΩΝΙΑ $\Phi_0(T)$ .....	14
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ 24 (Α), (Β): ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ GAUSS ΣΤΟ IGRF .....	20
ΕΞΙΣΩΣΗ 25: ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ CHAOS.....	21
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ 26 (Α), (Β): ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ GAUSS ΣΤΟ CHAOS-6.....	21
ΕΞΙΣΩΣΗ 27: ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΟ CHAOS.....	21
ΕΞΙΣΩΣΗ 28: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΤΟ CHAOS.....	21
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ 29 (Α), (Β), (Γ): ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΗΣΥΧΩΝ ΗΜΕΡΩΝ.....	65
ΕΞΙΣΩΣΗ 30: JD ΣΕ MJD.....	91
ΕΞΙΣΩΣΗ 31: MJD ΣΕ MJD2000.....	91