



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ "ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσδιορισμός θέσης μαγνητικού στόχου βάσει της προκαλούμενης
γεωμαγνητικής ανωμαλίας**

Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος

Αριθμός Μητρώου: 021-171-11

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ "ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσδιορισμός θέσης μαγνητικού στόχου βάσει της προκαλούμενης γεωμαγνητικής ανωμαλίας

Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος

Αριθμός Μητρώου: 021-171-11

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21 Οκτωβρίου 2020.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής

Νικόλαος Θεοδώρου
Ομότιμος Καθηγητής

Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ "ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ"

Copyright ©All rights reserved Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος, 2020.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή της εργασίας αυτής για εκπαιδευτικό, ερευνητικό ή εμπορικό σκοπό, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην μεταπτυχιακή εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η μεταπτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του ΔΠΜΣ "Συστήματα Αυτοματισμού" του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

(Υπογραφή)

.....

Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος

Περίληψη

Η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σαν μέθοδος εντοπισμού, είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή από το στόχο. Επομένως, υπάρχει ανάγκη για μελέτη συστημάτων ανίχνευσης στόχων με διαφορετική προσέγγιση, η οποία θα καθιστά πιο δύσκολη, ή ακόμα και αδύνατη, την πρόθεση του ερευνητή για εντοπισμό του στόχου και την προσπάθεια του στόχου για απόκρυψη του ίχνους του. Στην περίπτωση μαγνητικών στόχων αυτό είναι δυνατό με τη χρήση μαγνητικών αισθητήρων.

Το κίνητρο για την εργασία αυτή είναι η ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθόδων ανίχνευσης μαγνητικών στόχων με τη χρήση συστοιχίας ευαίσθητων 3Δ μαγνητικών αισθητήρων, κατά προτίμηση τεχνολογίας πύλης ροής (Fluxgate), σε συνδυασμό με κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος για την ανίχνευση της μαγνητικής ανωμαλίας (Magnetic Anomaly Detection - MAD) που ένα στατικό ή κινούμενο μαγνητικό σώμα επιφέρει στο γεωμαγνητικό πεδίο. Στόχος της μελέτης αυτής είναι η ανάπτυξη κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου σε Python για την παραγωγή προσομοιωμένων δεδομένων για τη δοκιμή διαφόρων αλγορίθμων ανίχνευσης, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την κατάλληλη μεθοδολογία και τον τρόπο υλοποίησης της ανίχνευσης, προτού αυτά χρησιμοποιηθούν στο πεδίο με κατάλληλους αισθητήρες. Στην εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου εμπειρικής αποσύνθεσης (Empirical Mode Decomposition – EMD) του σήματος στις προσομοιωμένες σειρές δεδομένων. Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής: βιβλιογραφική επισκόπηση, παρουσίαση του προβλήματος, μεθοδολογία επίλυσης, περιγραφή υπολογιστικού εργαλείου, παρουσίαση αποτελεσμάτων, συμπεράσματα, επέκταση εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά

Εντοπισμός μαγνητικής ανωμαλίας, ανίχνευση μαγνητικού στόχου, διαφορικό μαγνητικό πεδίο, μέθοδος διαμόρφωσης σήματος, μέθοδος εμπειρικής αποσύνθεσης.

Abstract

The use of electromagnetic radiation as a detection method is easy to be noticed by the target. Therefore, there is a need to study target detection systems using a different approach that will make the detector's attempt to locate the target, as well as the target's attempt to hide its trace, more difficult or even impossible. In the case of magnetic targets, this is possible with the use of magnetic sensors.

The motivation for this study is the development of integrated methods for detecting magnetic targets using an array of sensitive 3D magnetic sensors, preferably Fluxgate technology, combined with appropriate signal processing techniques for the detection of Magnetic Anomaly (MAD) that a static or moving magnetic object causes to the geomagnetic field. The aim of this study is to develop an appropriate computer tool in python for producing simulated data that can be used for testing various detection algorithms, in order to draw useful conclusions about the appropriate detection methodology and implementation, before putting them into use in the field with suitable sensors. The thesis presents the results of applying the Empirical Mode Decomposition (EMD) method to the signal in the simulated data series. The study is organized as follows: bibliographical review, problem presentation, solution methodology, description of the computer tool, presentation of the results, conclusions, extensions of the study.

Keywords

Magnetic anomaly detection (MAD), magnetic target detection, differential magnetic field, signal modulation method, empirical mode decomposition (EMD).

Ευχαριστίες

Καταρχήν, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και τον αδελφό μου, που με αμέριστη αγάπη και υπομονή με στηρίζουν και με βοηθούν στις επιλογές και τους στόχους μου όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή και Επιβλέποντά μου κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, την Καθηγήτρια κ. Αφροδίτη Κτενά για τη συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή της, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς και της υποψήφιας Δρ. Λήδας Τζαννέτου για την βοήθεια στην μελέτη και υλοποίηση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους συναδέλφους - συμφοιτητές και πάνω απ' όλα φίλους μου για την γνωριμία, τη συνεργασία και την ανταλλαγή ιδεών και απόψεων κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο μεταπτυχιακό αυτό.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων	ix
Κατάλογος Πινάκων	xv
Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός εργασίας	1
1.2 Δομή εργασίας	1
Θεωρητικό Μέρος	3
2.1 Μαγνητισμός – Μαγνητικά Πεδία.....	3
2.2 Νόμος Biot – Savart	4
2.3 Μαγνητικό πεδίο σημειακού δίπολου.....	5
2.4 Γεωμαγνητικό πεδίο	6
2.4.1 Γενικά	6
2.4.2 Εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο.....	7
2.4.3 Εξωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο	8
2.5 Αισθητήρες	8
2.5.1 Ορισμός.....	8
2.5.2 Είδη & Χαρακτηριστικά	9
2.5.3 Τύποι μαγνητικών αισθητήρων.....	10
2.6 Η Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης σήματος	21
Πειραματικό Μέρος	26
3.1 Περιγραφή προβλήματος	26
3.1.1 Γεωμαγνητικό πεδίο.....	27
3.1.2 Θόρυβος.....	27
3.1.3 Μαγνητικός στόχος	28
3.2 Μεθοδολογία – Παραδοχές.....	29
3.2.1 Προσομοίωση δεδομένων	30

3.2.2	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου	37
3.2.3	Υπολογισμός διαφορικού μαγνητικού πεδίου	39
3.2.4	Εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης σήματος (EMD)	39
3.2.5	Υπολογισμός σημείου ανίχνευσης	40
Προσομιώσεις		42
4.1	Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων	42
4.1.1	Ελλειψοειδής στόχος	43
4.1.2	Σφαιρικός στόχος	54
4.2	Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων	65
4.2.1	Ελλειψοειδής στόχος	65
4.2.2	Σφαιρικός στόχος	77
Συμπεράσματα.....		88
5.1	Αποτίμηση αποτελεσμάτων	88
5.1.1	Επίδραση του σχήματος του στόχου	88
5.1.2	Επίδραση της κίνησης του στόχου	88
5.1.3	Επιδράσεις θορύβου	89
5.2	Γενικό συμπέρασμα	89
5.3	Επέκταση μελέτης	90
Βιβλιογραφία.....		91
Παράρτημα		94
7.1	Κύριος κώδικας (Main)	94
7.2	Συναρτήσεις (Functions)	104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αναπαράσταση της στοιχειώδους μαγνητικής επαγωγής $d\mathbf{B}$ από στοιχειώδες ρεύμα $I d\mathbf{l}$	4
Εικόνα 2: Μαγνητική επαγωγή (\mathbf{B}) για ευθύ, μακρύ σύρμα που φέρει ρεύμα I	5
Εικόνα 3: Εμπορικός αισθητήρας SQUID.....	12
Εικόνα 4: Τυπική τοπολογία αισθητήρα Orthogonal Fluxgate, στην οποία το ρεύμα διέρχεται από τον μαγνητικό πυρήνα.....	13
Εικόνα 5: Αισθητήρας θέσης βασισμένος στη διάταξη MDL	15
Εικόνα 6: Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) σε έναν αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα	17
Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall.....	18
Εικόνα 8: Διάγραμμα ροής αλγοριθμικής διαδικασίας εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης (EMD).....	24
Εικόνα 9: Απεικόνιση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης (EMD) σήματος αποτελούμενο από πριονωτό κύμα, ημιτονοειδή καμπύλη και γραμμική τάση	25
Εικόνα 10: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_x σε λεπτά για την 01/07/20 (άξονας X)	31
Εικόνα 11: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_y σε λεπτά για την 01/07/20 (άξονας Y)	31
Εικόνα 12: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_z σε λεπτά για την 01/07/20 (άξονας Z)	32
Εικόνα 13: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_x σε δευτερόλεπτα για προσομοίωση (άξονας X).....	32
Εικόνα 14: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_y σε δευτερόλεπτα για προσομοίωση (άξονας Y)	33
Εικόνα 15: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_z σε δευτερόλεπτα για προσομοίωση (άξονας Z)	33
Εικόνα 16: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_x σε δευτερόλεπτα για δειγματοληψία (άξονας X)	34
Εικόνα 17: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_y σε δευτερόλεπτα για δειγματοληψία (άξονας Y)	34
Εικόνα 18: Γεωμαγνητικό πεδίο \mathbf{BG}_z σε δευτερόλεπτα για δειγματοληψία (άξονας Z)	35
Εικόνα 19: Γεωμετρία προβλήματος για τα σενάρια όπου ο στόχος κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	43
Εικόνα 20: Υπολογισμός της συνιστώσας \mathbf{BT}_x του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων.....	44

Εικόνα 21: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTy</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων.....	44
Εικόνα 22: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTz</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων.....	45
Εικόνα 23: Υπολογισμός της συνισταμένης <i>BT</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων.....	46
Εικόνα 24: Η συνιστώσα <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	46
Εικόνα 25: Η συνιστώσα <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	47
Εικόνα 26: Η συνιστώσα <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	47
Εικόνα 27: Η συνισταμένη <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	48
Εικόνα 28: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSx</i> της συνιστώσας <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	49
Εικόνα 29: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSy</i> της συνιστώσας <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	49
Εικόνα 30: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSz</i> της συνιστώσας <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	50
Εικόνα 31: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	50
Εικόνα 32: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS1</i> της συνισταμένης <i>BS1</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	51
Εικόνα 33: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS2</i> της συνισταμένης <i>BS2</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	51
Εικόνα 34: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS4</i> της συνισταμένης <i>BS4</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	52

Εικόνα 35: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS5</i> της συνισταμένης <i>BS5</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	52
Εικόνα 36: Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	53
Εικόνα 37: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTx</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	54
Εικόνα 38: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTy</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	55
Εικόνα 39: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTz</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	55
Εικόνα 40: Υπολογισμός της συνισταμένης <i>BT</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	56
Εικόνα 41: Η συνιστώσα <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	57
Εικόνα 42: Η συνιστώσα <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	57
Εικόνα 43: Η συνιστώσα <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	58
Εικόνα 44: Η συνισταμένη <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	58
Εικόνα 45: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSx</i> της συνιστώσας <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	59
Εικόνα 46: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSy</i> της συνιστώσας <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	60
Εικόνα 47: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSz</i> της συνιστώσας <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	60

Εικόνα 48: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	61
Εικόνα 49: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS1</i> της συνισταμένης <i>BS1</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	62
Εικόνα 50: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS2</i> της συνισταμένης <i>BS2</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	62
Εικόνα 51: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS4</i> της συνισταμένης <i>BS4</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	63
Εικόνα 52: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS5</i> της συνισταμένης <i>BS5</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	63
Εικόνα 53 Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	64
Εικόνα 54: Γεωμετρία προβλήματος για τα σενάρια όπου ο στόχος κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	65
Εικόνα 55: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTx</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	66
Εικόνα 56: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTy</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	66
Εικόνα 57: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTz</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	67
Εικόνα 58: Υπολογισμός της συνισταμένης <i>BT</i> του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	68
Εικόνα 59: Η συνιστώσα <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	69
Εικόνα 60: Η συνιστώσα <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	69
Εικόνα 61: Η συνιστώσα <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	70
Εικόνα 62: Η συνισταμένη <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	70

Εικόνα 63: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSx</i> της συνιστώσας <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	71
Εικόνα 64: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSy</i> της συνιστώσας <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	72
Εικόνα 65: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSz</i> της συνιστώσας <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	72
Εικόνα 66: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	73
Εικόνα 67: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS1</i> της συνισταμένης <i>BS1</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	74
Εικόνα 68: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS2</i> της συνισταμένης <i>BS2</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	74
Εικόνα 69: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS4</i> της συνισταμένης <i>BS4</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	75
Εικόνα 70: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS5</i> της συνισταμένης <i>BS5</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	75
Εικόνα 71: Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	76
Εικόνα 72: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTx</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	77
Εικόνα 73: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTy</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	78
Εικόνα 74: Υπολογισμός της συνιστώσας <i>BTz</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	78
Εικόνα 75: Υπολογισμός της συνισταμένης <i>BT</i> του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων	79

Εικόνα 76: Η συνιστώσα <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	80
Εικόνα 77: Η συνιστώσα <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	80
Εικόνα 78: Η συνιστώσα <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	81
Εικόνα 79: Η συνισταμένη <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	81
Εικόνα 80: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSx</i> της συνιστώσας <i>BSx</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	82
Εικόνα 81: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSy</i> της συνιστώσας <i>BSy</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	83
Εικόνα 82: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBSz</i> της συνιστώσας <i>BSz</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	83
Εικόνα 83: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	84
Εικόνα 84: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS1</i> της συνισταμένης <i>BS1</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	85
Εικόνα 85: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS2</i> της συνισταμένης <i>BS2</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	85
Εικόνα 86: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS4</i> της συνισταμένης <i>BS4</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	86
Εικόνα 87: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS5</i> της συνισταμένης <i>BS5</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	86
Εικόνα 88: Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο <i>dBS</i> της συνισταμένης <i>BS</i> για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων.....	87

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι για τον υπολογισμό χρόνου προσομοίωσης και δειγματοληψίας	30
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά στοιχεία παρατηρητηρίου	30
Πίνακας 3: Τιμές μέσου m και τυπικής απόκλισης σ για τον υπολογισμό του θορύβου των αισθητήρων	35
Πίνακας 4: Παράμετροι θέσης αισθητήρων στο χώρο $PMi(x, y, z)$	36
Πίνακας 5: Τιμές της μαγνητικής ροπής στόχου $m = M * (x, y, z)$ για κάθε σενάριο	36
Πίνακας 6: Χρονική στιγμή ανίχνευσης ελλειψοειδή στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	53
Πίνακας 7: Χρονική στιγμή ανίχνευσης σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	64
Πίνακας 8: Χρονική στιγμή ανίχνευσης ελλειψοειδή στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	76
Πίνακας 9: Χρονική στιγμή ανίχνευσης σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων	87

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι, η ανάπτυξη κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου για την μελέτη και ανάλυση της συμπεριφοράς της μαγνητικής ανωμαλίας που επιφέρει ένα μαγνητικό σώμα στο γεωμαγνητικό πεδίο, όταν κινείται στο χώρο, και η αξιολόγηση του εργαλείου αυτού με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης. Ειδικότερα, είναι, η συνοπτική παρουσίαση του απαραίτητου θεωρητικού υπόβαθρου, η παρουσίαση και εμπέδωση του προβλήματος εντοπισμού μαγνητικής ανωμαλίας, η συγγραφή κώδικα σε σύγχρονη γλώσσα προγραμματισμού με παραμετροποιήσιμο τρόπο ώστε να είναι εύκολα αξιοποιήσιμος για μελλοντικές επεκτάσεις της μελέτης αυτής καθώς και η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και της αξιοπιστίας των αλγορίθμων επίλυσης.

Το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύχθηκε σε python με στόχο:

- την παραγωγή ή προσαρμογή των αρχικών δεδομένων που ήταν απαραίτητα
- την εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων επίλυσης
- την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την ταχύτερη αξιολόγηση τους

1.2 Δομή εργασίας

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αυτής, γίνεται σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση όσον αφορά στο βασικό θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο απαιτείται για την κατανόηση της. Δίνονται οι ορισμοί για το μαγνητικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο σημειακού δίπολου και το νόμο Biot-Savart,

ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά το γεωμαγνητικό πεδίο καθώς και τα είδη και τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων. Ακόμα, διατυπώνεται ο αλγόριθμος εμπειρικής αποσύνθεσης (Empirical Mode Decomposition) ο οποίος χρησιμοποιείται με σκοπό την εξαγωγή της χρήσιμης πληροφορίας μέσα από το θορυβώδες μαγνητικό σήμα που διαβάζει ο αισθητήρας.

Στο δεύτερο μέρος, γίνεται εκτενής περιγραφή του προβλήματος που θα αναλυθεί στην εργασία αυτή και καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης του γενικού προβλήματος και οι αλγόριθμοι υπολογισμού των επιμέρους τμημάτων του (προσομοίωση δεδομένων, υπολογισμός μαγνητικού πεδίου, υπολογισμός διαφορικού μαγνητικού πεδίου, εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης σήματος, υπολογισμός σημείου ανίχνευσης). Για κάθε ένα από τα επιμέρους τμήματα, γίνεται επεξήγηση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, δίνονται οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν και οι πίνακες με τα δεδομένα και τις παραδοχές που έγιναν προκειμένου να διευκολυνθεί η επίλυση του προβλήματος.

Στο τρίτο και προτελευταίο μέρος της εργασίας αυτής, περιγράφονται, για κάθε σενάριο, η γεωμετρία της συστοιχίας των αισθητήρων, που θα χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση του μαγνητικού σήματος, η κατεύθυνση της κίνησης του μαγνητικού στόχου και άλλες παραδοχές που ελήφθησαν υπόψη. Παρατίθενται τα αποτελέσματα των σεναρίων αυτών καθώς και πληθώρα γραφημάτων και πινάκων με στοιχεία που θα βοηθήσουν στην ευκολότερη εξαγωγή συμπερασμάτων για την αξιοπιστία και την ικανότητα του αλγορίθμου να ανιχνεύει μαγνητικούς στόχους που κινούνται στο χώρο.

Στο τελευταίο μέρος, γίνεται ανάλυση και εξαγωγή των συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα του προηγούμενου μέρους. Περιγράφεται, η επίδραση του σχήματος του στόχου, της κίνησης του στόχου και του θορύβου στο μετρούμενο μαγνητικό πεδίο και στο χρόνο ανίχνευσης της μαγνητικής ανωμαλίας, σύμφωνα με τις διαφορετικές τιμές που έλαβαν σε κάθε σενάριο. Τέλος, προτείνονται τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να βελτιωθεί η παρούσα μεθοδολογία και κατατίθενται ιδέες για μελλοντική επέκταση της μελέτης που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή.

Θεωρητικό Μέρος

2.1 Μαγνητισμός – Μαγνητικά Πεδία

Στη φυσική, με τον όρο μαγνητισμός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο στο οποίο κάποια υλικά, που χαρακτηρίζονται ως μαγνητικά, ασκούν ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις σε άλλα επίσης μαγνητικά υλικά. Οι δυνάμεις αυτές οφείλονται στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων σε υλικά με συγκεκριμένη ατομική και κρυσταλλική δομή. Το σύνολο των φαινομένων που οφείλονται στην ιδιότητα αυτή εξετάζονται από ιδιαίτερο πεδίο της φυσικής που λέγεται ομοίως Μαγνητισμός. Κάποια γνωστά μαγνητικά υλικά που παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, το κοβάλτιο, μερικά είδη ατσαλιού και το ορυκτό μαγνητίτης, αν και τα περισσότερα υλικά επηρεάζονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου.

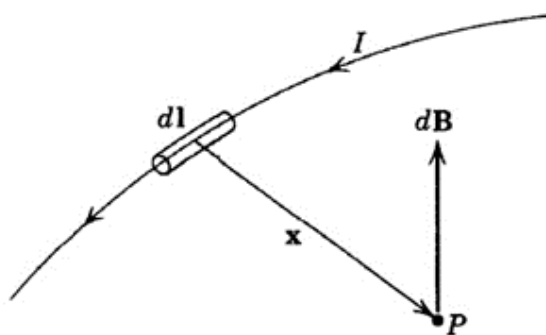
Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται γενικά ο χώρος εντός του οποίου ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία ή σε ορισμένα μέταλλα. Μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται επίσης γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς εξαιτίας τη ροής ηλεκτρικών φορτίων. Το μαγνητικό πεδίο ανιχνεύεται εύκολα με τη βοήθεια μιας πυξίδας ή μαγνητικής βελόνας της οποίας ο προσανατολισμός ευθυγραμμίζεται με τον βόρειο πόλο του πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε ένα μαγνητικό υλικό χαρακτηρίζεται ως ασθενές ή ισχυρό ανάλογα με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται εντός του, ομοιόμορφο ή ανομοιόμορφο, ανάλογα με την πυκνότητα και την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών. Όπως μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων έτσι και μεταξύ στοιχειωδών μαγνητικών ποσοτήτων εμφανίζονται ελκτικές και απωστικές δυνάμεις. Ουσιώδης διαφορά μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων και στοιχειωδών μαγνητικών ποσοτήτων είναι η εξής: ενώ υπάρχουν μεμονωμένα θετικά ή αρνητικά ηλεκτρικά φορτία, μεμονωμένοι βόρειοι ή νότιοι πόλοι δεν υπάρχουν. Η στοιχειώδης μαγνητική ποσότητα είναι δίπολο και εντός ενός μαγνητικού πεδίου αναπτύσσεται διπολική ροπή, γνωστή ως μαγνητική ροπή. Ωστόσο, η παραδοχή ύπαρξης μαγνητικών μονοπόλων διευκολύνει την ερμηνεία ορισμένων φαινομένων του μαγνητισμού.

2.2 Νόμος Biot – Savart

Η βασική ποσότητα στο μαγνητισμό στα στερεά είναι η μαγνητική διπολική ροπή (\vec{m}). Σε ατομικό επίπεδο, οι εσωτερικές μαγνητικές ροπές σχετίζονται με το σπιν των ηλεκτρονίων και με μία περαιτέρω συνεισφορά, που σχετίζεται με τη τροχιακή κίνησή τους γύρω από τον πυρήνα. [1] Το 1819 ο Oersted παρατήρησε ότι σε σύρματα όπου έρρεε ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργούνταν αποκλίσεις στα γειτονικά μόνιμα μαγνητικά δίπολα. Οι Biot-Savart (1820) πρώτα και μετά ο Ampere (1820-1825), με εκτενή ανάλυση και πειράματα, καθιέρωσαν το βασικό πειραματικό νόμο, που συσχετίζει την μαγνητική επαγωγή (\vec{B}) με το ρεύμα και καθιέρωσαν έτσι και το νόμο της δύναμης μεταξύ δυο ρευμάτων.

Αν $d\vec{l}$ είναι το στοιχειώδες μήκος (που δείχνει στη κατεύθυνση της ροής του ρεύματος) ενός νήματος καλωδίου που φέρει ρεύμα I και \vec{x} η συντεταγμένη του διανύσματος του στοιχειώδους μήκους για ένα παρατηρητή στο σημείο P, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, τότε η στοιχειώδης πυκνότητα ροής $d\vec{B}$ στο σημείο P δίνεται σε μέγεθος και κατεύθυνση από τη σχέση:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{(d\vec{l} \times \vec{x})}{|\vec{x}|^3} \quad (2.1)$$

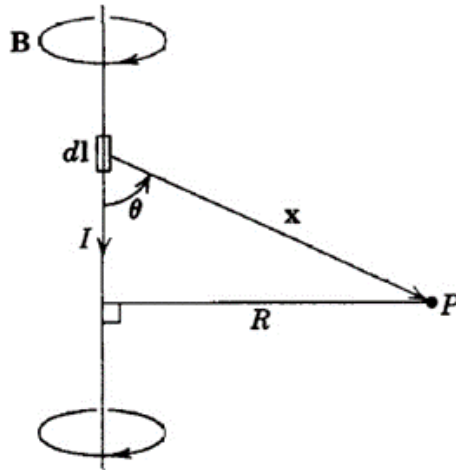


Εικόνα 1: Αναπαράσταση της στοιχειώδους μαγνητικής επαγωγής $d\vec{B}$ από στοιχειώδες ρεύμα $I dl$

Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , ενός ευθύγραμμου σύρματος που φέρει ρεύμα I , όπως αυτό στην Εικόνα 2, δίνεται από τη σχέση:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} IR \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dl}{(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (2.2)$$

Όπου R η απόσταση από το σημείο παρατήρησης ως το σύρμα. Αυτό το πειραματικό αποτέλεσμα που βρέθηκε πρώτα από τους Biot και Savart είναι γνωστό και ως νόμος Biot-Savart.



Εικόνα 2: Μαγνητική επαγωγή (\vec{B}) για ευθύ, μακρύ σύρμα που φέρει ρεύμα I

Για μια κατανομή ρεύματος \vec{J} , η μαγνητική επαγωγή στη θέση \vec{x} , θα δίνεται από μια πιο γενική σχέση για τον νόμο Biot-Savart:

$$\vec{B}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{x}') \times \frac{(\vec{x} - \vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|^3} d^3x' \quad (2.3)$$

Ο νόμος Biot-Savart είναι ισοδύναμος με τις εξισώσεις: $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ και $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$. Η δεύτερη σχέση είναι ο νόμος του Ampere. [2] [3]

2.3 Μαγνητικό πεδίο σημειακού δίπολου

Το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό (\vec{A}) είναι η ποσότητα, που ο στροβιλισμός της δίνει τη μαγνητική επαγωγή. Δηλαδή $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$. Το διανυσματικό δυναμικό επιλέγεται έτσι ώστε να

2.4 Γεωμαγνητικό πεδίο

ικανοποιεί την εξίσωση $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ (βαθμίδα Coulomb) και τότε κάθε καρτεσιανή συντεταγμένη του διανυσματικού δυναμικού, ικανοποιεί την εξίσωση Poisson: $\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J}$. Αν έχουμε μια εντοπισμένη κατανομή ρεύματος, τότε σε όλο το χώρο το διανυσματικό δυναμικό δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{A}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} d^3x' \quad (2.4)$$

Το διανυσματικό δυναμικό του σημειακού μαγνητικού δίπολου είναι:

$$\vec{A}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \times \vec{x}}{|\vec{x}|^3} \quad (2.5)$$

$$\text{όπου } \vec{m} = \frac{1}{2} \int \vec{x} \times \vec{J} d^3x$$

Από πράξεις προκύπτει ότι η μαγνητική επαγωγή είναι:

$$\vec{B}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\hat{n}(\vec{m} \cdot \hat{n}) - \vec{m}}{|\vec{x}|^3} \quad (2.6)$$

Όπου \hat{n} το μοναδιαίο διάνυσμα του διανύσματος \vec{x} ($\hat{n} = \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|}$) [2]

2.4 Γεωμαγνητικό πεδίο

2.4.1 Γενικά

Η Γη αποτελεί έναν τεράστιο φυσικό μαγνήτη και με αντίστοιχα μαγνητικά χαρακτηριστικά, δηλαδή, το Βόρειο μαγνητικό Πόλο, το Νότιο μαγνητικό Πόλο και τον μαγνητικό ισημερινό. Οι

μαγνητικοί αυτοί πόλοι της Γης συνιστούν τα γήινα εκείνα σημεία με τη μεγαλύτερη μαγνητική ένταση και βρίσκονται αρκετά κοντά στα αντίστοιχα ετερόνυμα γεωγραφικά σημεία. Ο μαγνητικός ισημερινός (της Γης) αντίθετα συνιστά τη σχετικά ουδέτερη μαγνητική ζώνη με την μικρότερη ένταση μαγνητικού πεδίου.

Ο Γήινος μαγνητισμός ονομάζεται και γεωμαγνητισμός, το δε δημιουργούμενο περίξ της Γης μαγνητικό πεδίο γεωμαγνητικό πεδίο.

Μια πρώτη αντίληψη της ύπαρξης του γεωμαγνητικού πεδίου παρέχει η λειτουργία της μαγνητικής πυξίδας. Σε οποιοδήποτε σημείο της Γης αν τοποθετήσουμε μια μαγνητική βελόνα, που να μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα, παρατηρούμε ότι αυτή λαμβάνει πάντα μια ορισμένη θέση από νότο προς βορρά. Επίσης γνωστό είναι ότι ο βόρειος μαγνητικός πόλος της μαγνητικής βελόνας είναι αυτός που στρέφεται προς βορρά. Εξ αυτού συνάγεται εύκολα ότι κοντά στο νότιο γεωγραφικό πόλο της Γης υπάρχει ο βόρειος μαγνητικός πόλος της Γης και αντίθετα κοντά στο βόρειο γεωγραφικό πόλο της Γης ο νότιος μαγνητικός πόλος της Γης. Αυτό εξηγεί γιατί οι μαγνήτες στρέφουν τον βόρειο μαγνητικό τους πόλο προς τον γεωγραφικό βορρά.

Έτσι η Γη συμπεριφέρεται σαν ένας τεράστιος μαγνήτης. Η ευθεία που ενώνει τους μαγνητικούς πόλους της ονομάζεται μαγνητικός άξονας της Γης και σχηματίζει με τον γεωγραφικό άξονα γωνία θ που μεταβάλλεται χρονικά. Οι μαγνητικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου έχουν φορά από το νότιο γεωγραφικό πόλο (βόρειο μαγνητικό της Γης) προς τον βόρειο γεωγραφικό πόλο (δηλαδή το νότιο μαγνητικό της Γης). [2]

2.4.2 Εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο

Ο πυρήνας της γης χωρίζεται σε δύο βασικές περιοχές. Στην εσωτερική περιοχή (στέρεη) με πάχος περίπου 1250km και στην εξωτερική περιοχή (υγρή) με πάχος περίπου 2200km. Το πεδίο του πυρήνα της γης, το οποίο αποτελείται κυρίως από σίδηρο από τα 2900km έως τα 6371km, έχει χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις, ενώ αποτελεί το 90% του συνολικού γεωμαγνητικού πεδίου που μετράμε στην επιφάνειά της.

2.5 Αισθητήρες

Το λιθοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο κυμαίνεται από 0 έως ± 1000 nT και είναι περίπου 400 φορές μικρότερο από το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα της γης. Το μαγνητικό πεδίο αυτό, δημιουργείται στο άνω τμήμα του μανδύα της γης και του φλοιού της (από 10km έως 70km), με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ανάλογα την τοποθεσία που πραγματοποιείται η μέτρηση. [2]

2.4.3 Εξωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο

Γύρω από τη γη σε απόσταση 10-20 φορές την ακτίνα της γης, υπάρχει η μαγνητόσφαιρα, περιοχή που δε διαπερνούν τα σωματίδια του ηλιακού ανέμου. Σε αυτή την περιοχή υπάρχει ένα σύστημα ηλεκτρικών ρευμάτων, το οποίο περιστρέφεται κατά τον ισημερινό δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό ρεύμα, τον δακτύλιο ρεύματος (ring current), και αποτελεί μέρος του μετρούμενου στην επιφάνεια γεωμαγνητικού πεδίου.

Ακόμη, σε απόσταση 50-60km πάνω από την επιφάνεια της γης, υπάρχει η ιονόσφαιρα, όπου η υπεριώδης ακτινοβολία από τον ήλιο ιονίζει άτομα των ανώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η φωτισμένη από τον ήλιο περιοχή της γης, να έχει επιπλέον κυκλικά ηλεκτρικά ρεύματα.

Ο ήλιος είναι επίσης υπεύθυνος για τις ημερήσιες μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης. Η επίδραση είναι μεγαλύτερη στην περιοχή του ισημερινού και μειώνεται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Υπάρχει και εποχική μεταβολή, όπου η ημερήσια διακύμανση είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι παρά το χειμώνα. [2]

2.5 Αισθητήρες

2.5.1 Ορισμός

Αισθητήρας ονομάζεται μια συσκευή η οποία είναι σε θέση να ανιχνεύσει ένα φυσικό μέγεθος και να παράξει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο. Στην ουσία δηλαδή, είναι μία συσκευή που δέχεται ερεθίσματα από το περιβάλλον και ανταποκρίνεται σε αυτά με συγκεκριμένο τρόπο

(μεταβολή φυσικών χαρακτηριστικών). Το αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής μετράται και συνήθως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται καθημερινά σε πληθώρα εφαρμογών και αποτελούν τα πιο σημαντικά εργαλεία μελέτης φυσικών φαινομένων. Πεδίο εφαρμογής βρίσκουν σε τομείς όπως ο κατασκευαστικός, η υγεία, η αυτοκίνηση, η πληροφορική, οι τηλεπικοινωνίες, η ενέργεια, η ρομποτική, η αεροναυπηγική, η βιομηχανία, καθώς και πολλοί άλλοι ακόμα που συναντάμε σε καθημερινή βάση. [2] [4]

2.5.2 Είδη & Χαρακτηριστικά

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης των αισθητήρων και βασίζονται στην μετρούμενη ποσότητα, στα υλικά κατασκευής τους και στη χρήση τους, ενώ χωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους αισθητήρων, τους ενεργητικούς ή τους παθητικούς.

- **Ενεργητικοί αισθητήρες** χαρακτηρίζονται εκείνοι που απαιτείται παροχή εξωτερικής ενέργειας προκειμένου να λειτουργήσουν, που ονομάζεται σήμα διέγερσης .
- **Παθητικοί αισθητήρες** χαρακτηρίζονται εκείνοι που χωρίς καμία πηγή ενέργειας, μπορούν να παράξουν ηλεκτρικό σήμα ως απόκριση στο ερέθισμα που δέχθηκαν.

Τα χαρακτηριστικά του κάθε αισθητήρα, καθορίζονται από το ίδιο το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία του ή από τα υλικά κατασκευής του και είναι εκείνα που προσδιορίζουν τη λειτουργία του. Διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά. Τα στατικά χαρακτηριστικά, αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ αισθητήρα και μετρούμενου μεγέθους. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει το μετρούμενο μέγεθος είτε να είναι σταθερό, είτε να μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με τη δυνατότητα του αισθητήρα να αντιληφθεί τη μεταβολή αυτή. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά, περιγράφουν τη συμπεριφορά του αισθητήρα μεταξύ της στιγμής κατά την οποία το σήμα εισόδου μεταβάλλεται έως τη στιγμή κατά την οποία το σήμα εξόδου θα σταθεροποιηθεί εκ νέου. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ισχύουν, όπως και τα στατικά, εντός συγκεκριμένου εύρους συνθηκών λειτουργίας του αισθητήρα. Ορισμένα από τα στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι:

- **Εύρος** (Τα όρια στα οποία η συσκευή λειτουργεί αξιόπιστα)
- **Πιστότητα** (Η εγγύτητα της τιμής εξόδου προς τη τιμή εισόδου)
- **Ακρίβεια** (Ο βαθμός ελευθερίας του αισθητήρα από τυχαία σφάλματα)
- **Επαναληψιμότητα** (Η παραγωγή του ίδιου αποτελέσματος, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, με την ίδια είσοδο)
- **Σφάλμα** (Η διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και τη πραγματική τιμή)
- **Ανοχή** (Το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μίας τιμής)
- **Διακριτική ικανότητα** (Η μικρότερη μεταβολή τιμής εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει)
- **Ευαισθησία** (Η σχέση της μεταβολής εξόδου προς τη μεταβολή εισόδου: είναι ίση με τη διαφορά των τιμών της εξόδου προς τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών εισόδου ή ίση με την πρώτη παράγωγο της χαρακτηριστικής καμπύλης του αισθητήρα στο σημείο λειτουργίας του)
- **Νεκρή ζώνη** (Το μέγιστο ποσό μεταβολής της εισόδου που δεν επιφέρει μεταβολή στην έξοδο)
- **Βαθμονόμηση** (Η βαθμολόγηση της κλίμακας μέτρησης σε μονάδες)
- **Γραμμικότητα** (Ο βαθμός στον οποίο η χαρακτηριστική του αισθητήρα προσεγγίζει την ευθεία γραμμή)
- **Απόκριση** (Ο χρόνος που απαιτείται για να λάβει τη τελική της τιμή η έξοδος)
- **Καθυστέρηση** (Η καθυστέρηση της μεταβολής της εξόδου ως προς την είσοδο)
- **Ευστάθεια** (Η μεταβολή της εξόδου μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος, χωρίς αντίστοιχη μεταβολή της εισόδου και των συνθηκών)
- **Υστέρηση** (Η διαφορά στην έξοδο όταν η κατεύθυνση της μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί) [2] [4] [5]

2.5.3 Τύποι μαγνητικών αισθητήρων

2.5.3.1 Αισθητήρες SQUID

Οι αισθητήρες SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), βασίζονται στη χρήση υπεραγώγιμων υλικών, δηλαδή υλικών των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση πρακτικά μηδενίζεται όταν βρεθούν σε θερμοκρασία χαμηλότερη κάποιας κρίσιμης τιμής. Οι αισθητήρες

SQUID, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους LTS και τους HTS. Οι αισθητήρες χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Sensors – LTS) λειτουργούν σε θερμοκρασίες -270°C και κατασκευάζονται από νιόβιο ή κράματα μολύβδου και χρυσού. Για τη λειτουργία τους απαιτείται ψύξη με υγρό ήλιο, κάτι που τους καθιστά πιο δύσχρηστους. Αντιθέτως, οι αισθητήρες υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Sensors – HTS) μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως και περίπου -130°C . Κατασκευάζονται από YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο είναι πιο εύχρηστο σε σχέση με το υγρό ήλιο, ενώ έχει και χαμηλότερο κόστος. [6] [7]

Η λειτουργία των αισθητήρων SQUID βασίζεται στο κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson, σύμφωνα με το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο μη υπεραγωγίμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγωγίμων υλικών. Έστω ένας αισθητήρας SQUID σε σχήμα δακτυλίου. Όταν αυτός ψυχθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία, δημιουργείται μια σταθερή μαγνητική ροή. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου με μαγνητική ροή Φ_{ex} , η εσωτερική ροή Φ_{in} αλλάζει στιγμιαία, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Phi_{in} = \Phi_{ex} - LI_c \sin \frac{2\pi\Phi_{in}}{\Phi_0} \quad (2.7)$$

Όπου,

- **L**: η αυτεπαγωγή του δακτυλίου
- **I_c**: μια κρίσιμη τιμή έντασης ρεύματος
- **Φ₀** = $2.068 \times 10^{-15} \text{ Wb}$

Συνεπώς, βάσει της μέτρησης της μεταβολής της μαγνητικής ροής, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας τους, αλλά και των ειδικών εργαστηριακών συνθηκών που απαιτεί η λειτουργία τους, οι αισθητήρες SQUID δεν χρησιμοποιούνται σε καταναλωτικά προϊόντα, αλλά κυρίως σε ερευνητικό εξοπλισμό (микροσκοπιο SQUID) και στη Βιοϊατρική (MRI). [8] Ένας εμπορικός αισθητήρας SQUID παρουσιάζεται στην Εικόνα 3:



Εικόνα 3: Εμπορικός αισθητήρας SQUID

2.5.3.2 Αισθητήρες Fluxgate

Τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής ή μαγνητόμετρα Fluxgate αποτελούν μία σημαντική κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, προσφέροντας , χωρίς όμως να απαιτούν ειδικές συνθήκες λειτουργίας, όπως συμβαίνει με τους αισθητήρες SQUID. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες προσδιορισμού θέσης και ταχύτητας, αλλά και σε όργανα πλοήγησης ή μέτρησης μαγνητικού πεδίου. Η ακρίβεια αυτών των αισθητήρων κυμαίνεται από 0.1 έως 10 nT, ενώ χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μαγνητικών πεδίων στο εύρος 10^{-10} έως 10^{-4} T. [9]

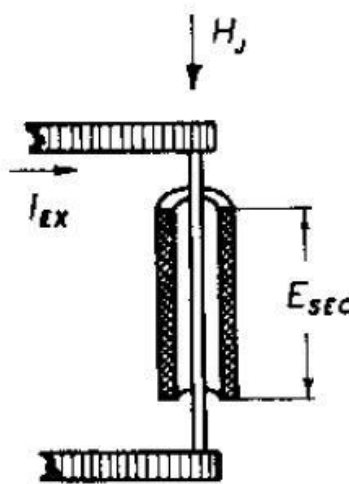
Οι πρώτοι αισθητήρες Fluxgate κατασκευάστηκαν το 1936 και χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό της μαγνητικής υπογραφής υποβρυχίων. Ένας τυπικός αισθητήρας Fluxgate αποτελείται από δύο πηνία, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχει ένας φερρομαγνητικός πυρήνας. Το ένα αποτελεί το πηνίο διέγερσης και το άλλο το πηνίο λήψης. Εναλλασσόμενο σήμα τροφοδοτεί το πηνίο διέγερσης, δημιουργώντας μαγνητική ροή που διαδίδεται μέσω του μαγνητικού πυρήνα. Εάν το μαγνητικό πεδίο διέγερσης είναι αρκετό, ώστε να οδηγεί στον περιοδικό κορεσμό του υλικού του μαγνητικού πυρήνα, τότε λαμβάνεται μέσω του πηνίου λήψης ένα σήμα που είναι ανάλογο της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής ως προς τον χρόνο. Μελετώντας το λαμβανόμενο σήμα ως προς διάφορες παραμέτρους που μεταβάλλονται (πλάτος, χρονική διαφορά κορυφών κ.λπ.), είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την ένταση και την κατεύθυνση του ανιχνευόμενου μαγνητικού πεδίου.

Σημαντική παράμετρο για τους αισθητήρες Fluxgate αποτελεί το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως μαγνητικός πυρήνας. Το υλικό θα πρέπει να εμφανίζει χαμηλή υστέρηση και

υψηλή ευαισθησία. Συνήθως επιλέγονται άμορφα μαγνητικά υλικά, όπως τα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB σε μορφή σύρματος ή ταινίας, τα οποία εμφανίζουν τα παραπάνω επιθυμητά χαρακτηριστικά. [10] [11] [12] [13]

Δύο παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τις μετρήσεις είναι η ασυμμετρία της διάταξης και η επίδραση του σήματος διέγερσης στο πηνίο λήψης. Η επιλογή της τοπολογίας πηνίων που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Η χρήση μαγνητικού πυρήνα σχήματος δακτυλίου μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της ασυμμετρίας, ενώ η χρήση δύο παράλληλων πηνίων διέγερσης (τοπολογία racetrack) μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της επίδρασης του σήματος διέγερσης στο σήμα λήψης.

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης είναι η αποφυγή χρήσης πηνίου διέγερσης, μέσω της διέλευσης του σήματος απευθείας από τον μαγνητικό πυρήνα όπως στην Εικόνα 4. Με αυτή την τοπολογία, που ονομάζεται Orthogonal Fluxgate, μπορεί να μειωθεί και το συνολικό μέγεθος του αισθητήρα, έχοντας όμως σαν μειονέκτημα τη δημιουργία ασθενέστερου μαγνητικού πεδίου διέγερσης, αφού αυτό παράγεται από τον ίδιο τον πυρήνα και όχι από ένα πηνίο αρκετών περιελίξεων. [14] [15] [16] [17]



Εικόνα 4: Τυπική τοπολογία αισθητήρα Orthogonal Fluxgate, στην οποία το ρεύμα διέρχεται από τον μαγνητικό πυρήνα

Με χρήση της τεχνολογίας λεπτών υμενίων (thin film) είναι δυνατή η «εκτύπωση» ενός αισθητήρα Fluxgate σε πλακέτα, δηλαδή η εναπόθεση κατάλληλων υλικών με την επιθυμητή

τοπολογία, σε αυτήν. [18] [19] [20] [21] Έτσι, είναι ευκολότερη η ενσωμάτωση του αισθητήρα σε μία πλήρη διάταξη, η οποία θα περιλαμβάνει και τα ηλεκτρονικά λήψης και επεξεργασίας του σήματος. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί να κατασκευαστεί και διάταξη που θα περιλαμβάνει περισσότερους από έναν αισθητήρες Fluxgate, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους για ταυτόχρονες μετρήσεις σε περισσότερες διαστάσεις. Ο προφανής τρόπος υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης είναι η τοποθέτηση τριών καθέτων αισθητήρων, ο καθένας εκ των οποίων θα μετρά μία από τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου. Όμως και σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται το πρόβλημα της επίδρασης του κάθε αισθητήρα στο σήμα που λαμβάνεται από τους γειτονικούς του, το οποίο πρέπει να επιλυθεί μέσω της κατάλληλης επιλογής τοπολογίας και διαστάσεων των τριών αισθητήρων. [8]

2.5.3.3 Αισθητήρες MDL

Οι αισθητήρες MDL βασίζονται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Lines – MDL). [22] [23] [24] [25] Σύμφωνα με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, η επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητικό υλικό οδηγεί στη μεταβολή του μεγέθους του, δηλαδή στη διαστολή ή συστολή του, η οποία εκφράζεται από τον παρακάτω λόγο:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.8)$$

όπου,

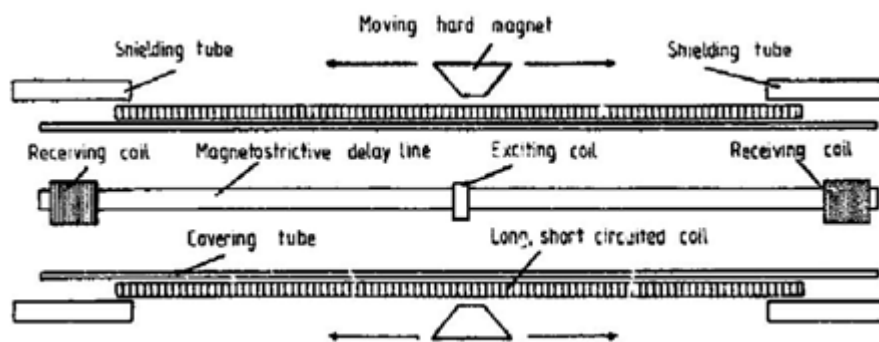
- **Δl:** η μεταβολή του μεγέθους του υλικού κατά την επιβολή του μαγνητικού πεδίου
- **l:** το αρχικό του μέγεθος

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής συμβαίνει λόγω της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, η οποία πραγματοποιείται κατά την επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου στα φερρομαγνητικά υλικά. Η μαγνητοσυστολή μπορεί να μελετηθεί μέσω της χρήσης άμορφων μαγνητικών υλικών που λαμβάνουν το ρόλο κυματοδηγού, διαρρεόμενα από παλμικό ρεύμα.

Μια τυπική διάταξη MDL αποτελείται ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένας κυματοδηγός, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Μέσω του πηνίου διέγερσης,

δημιουργείται παλμικό μαγνητικό πεδίο που διαδίδεται μέσω του άμορφου μαγνητικού σύρματος ή ταινίας που έχει το ρόλο του κυματοδηγού. Λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, αυτό το υλικό παραμορφώνεται τοπικά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας ελαστικός παλμός, ο οποίος διαδίδεται μέσω του κυματοδηγού. Τελικά, το σήμα λαμβάνεται από το πηνίο λήψης που είναι τοποθετημένο στο άλλο άκρο του κυματοδηγού.

Το μήκος του κυματοδηγού μπορεί να είναι μεγάλο, προσφέροντας τη δυνατότητα ανέπαφης ανίχνευσης της θέσης μαγνητικών αντικειμένων σε σχέση με τη διάταξη. Μετρώντας τη χρονική διαφορά μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων ή και τις μεταβολές του πλάτους τους, είναι δυνατός ο προσδιορισμός διαφόρων μεγεθών, όπως είναι η θέση, η απόσταση και η επιβαλλόμενη δύναμη. Συνεπώς, ένας τέτοιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία, αλλά και σε δίκτυα «έξυπνων πόλεων». [8] [26] [27] [28] [29]



Εικόνα 5: Αισθητήρας θέσης βασισμένος στη διάταξη MDL

2.5.3.4 Αισθητήρες AMR και GMR

Αυτές οι δύο κατηγορίες αισθητήρων, ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (Anisotropic MagnetoResistance – AMR) και γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Giant MagnetoResistance – GMR), στηρίζονται στο φαινόμενο της αλλαγής της αντίστασης που εμφανίζεται κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου σε διάφορα υλικά. Αν και αυτό το φαινόμενο γενικά παρατηρείται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν κατηγορίες υλικών, όπως είναι τα φερρομαγνητικά, στα οποία εμφανίζεται σε θερμοκρασία δωματίου. Στην περίπτωση της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή της αντίστασης του υλικού διαφοροποιείται μεταξύ της διαμήκους και της εγκάρσιας διάδοσης του ρεύματος σε αυτό.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης, οι αισθητήρες αποτελούνται από δομές λεπτών υμενίων κατασκευασμένων από φερρομαγνητικά υλικά, ανάμεσα στα οποία τοποθετείται ένα υπέρλεπτο αγώγιμο, αλλά μη μαγνητικό, στρώμα, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από χαλκό. Ο χαλκός, αν και αγώγιμο υλικό, σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, λόγω του πολύ μικρού πάχους του και συνεπώς της αυξημένης σκέδασης των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του. Μεταξύ των φερρομαγνητικών υμενίων πραγματοποιείται αντιφερρομαγνητική σύζευξη, δηλαδή παρατηρείται αντίθετος προσανατολισμός των μαγνητικών τους διπόλων. Όμως, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου κατάλληλης διεύθυνσης, η σύζευξη παύει να ισχύει και τα μαγνητικά δίπολα διατάσσονται σύμφωνα με αυτό, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανίχνευση του συγκεκριμένου μαγνητικού πεδίου. [30] [31] [32] [33] [34]

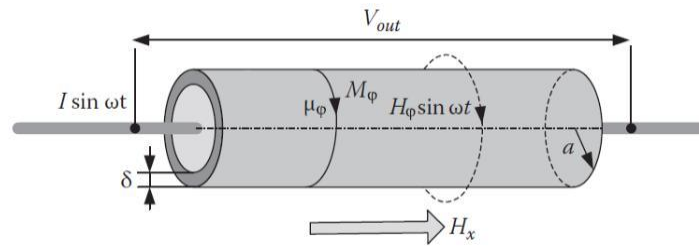
Τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM), καθώς και σε βιοαισθητήρες. Η ανακάλυψη των αισθητήρων GMR οδήγησε στην απονομή του βραβείου Nobel στους ερευνητές Albert Fert και Peter Grünberg το 2007. [35]

Γενικά, οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης ενσωματώνονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα σε τοπολογία γέφυρας Wheatstone. Τοποθετούνται σε ρομποτικές διατάξεις, αλλά και σε μεταφορικά μέσα, κυρίως ως αισθητήρες προσανατολισμού. [36] Επίσης, έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες ώστε να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για την ανίχνευση βιομορίων, με σκοπό την αντικατάσταση της χρήσης μεθόδων φθορισμού σε διαγνωστικές εξετάσεις. Αντί των φθοριζουσών ουσιών, έχει δοκιμαστεί η εισαγωγή καταλλήλων μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία είναι ικανά να ανιχνεύονται από τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης. [8] [37]

2.5.3.5 Αισθητήρες GMI

Οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (Giant MagnetImpedance – GMI) εμφανίζουν πολύ καλές επιδόσεις, χωρίς όμως να έχουν ακόμη εμφανιστεί σε διαδεδομένες εμπορικές εφαρμογές. Βάσει του ομώνυμου φαινομένου, η διάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας μέσω ενός φερρομαγνητικού σύρματος, οδηγεί στην εμφάνιση κυκλικής ανισοτροπίας, η οποία επηρεάζεται από τα συνεχή ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία που

επιδρούν στο υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, λόγω του επιδερμικού φαινομένου, εμφανίζεται ένα εξωτερικό στρώμα πάχους δ , που αντιστοιχεί στο βάθος διείσδυσης. Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) σε έναν αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα

Επειδή το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, είναι προφανές ότι για χαμηλές συχνότητες οι αλλαγές στην εμπέδηση είναι μικρές. Αντιθέτως, στις υψηλές συχνότητες, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου είναι ισχυρή, με αποτέλεσμα να υπάρχουν και αντίστοιχες μεταβολές στην εμπέδηση. Για καλύτερα αποτελέσματα, απαιτείται η χρήση υλικών με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή ειδική αντίσταση. Συνήθη τέτοια υλικά είναι τα άμορφα σύρματα που περιέχουν κοβάλτιο (CoSiB, CoFeSiB). [38]

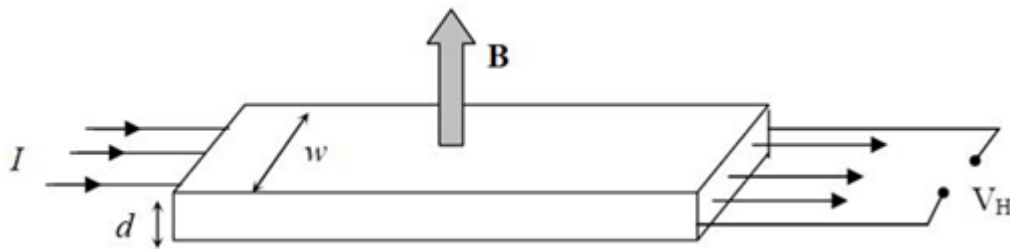
Οι εφαρμογές των αισθητήρων GMI περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη μέτρηση ρεύματος, γωνιακής ταχύτητας και δύναμης. [39] Η ευαισθησία τους μπορεί να φτάσει και τα 0.3nT, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασία δωματίου, παρουσιάζοντας χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. [8] [40] [41]

2.5.3.6 Αισθητήρες Hall

Οι αισθητήρες Hall αποτελούν μια πολύ διαδεδομένη κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, λόγω της εύκολης χρήσης τους, του μικρού μεγέθους τους και του χαμηλού κόστους τους. Χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές και μπορούν, για παράδειγμα, να βρεθούν στα αυτοκίνητα και στα κινητά τηλέφωνα. [42]

2.5 Αισθητήρες

Η λειτουργία του μαγνητικού αισθητήρα Hall βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο, που ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Edwin Hall. Βάσει αυτού, όταν ένα ρεύμα διαρρέει μία πλάκα και ταυτοχρόνως στο υλικό εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος, τότε εμφανίζεται μια τάση, η οποία είναι κάθετη τόσο στο ρεύμα, όσο και στο μαγνητικό πεδίο και οφείλεται στη δύναμη Lorentz που επιδρά στα κινούμενα φορτία (Εικόνα 7). Αυτή η τάση ονομάζεται τάση Hall (V_H). [43] [44]



Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall

Όταν η δύναμη Lorentz F_L επιδρά σε ένα σωματίδιο με φορτίο q που κινείται με ταχύτητα v , υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου E και μαγνητικού πεδίου B , τότε ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.9)$$

Απουσία μαγνητικού πεδίου, η ταχύτητα v_p και η πυκνότητα ρεύματος J των σωματιδίων δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\mathbf{v}_p = m_p \mathbf{E} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{J} = qm_p D_p \mathbf{E} \quad (2.11)$$

όπου,

- m_p : η κινητικότητα των σωματιδίων
- D_p : η πυκνότητα τους

Κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου, τα σωματίδια σκεδάζονται κάθετα ως προς αυτό, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο E_H που επιδρά σε αυτά είναι:

$$\mathbf{E}_H = -(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -m_p(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (2.12)$$

Η γωνία σκέδασης $\tan\theta_H$ δίνεται από τον τύπο:

$$\tan\theta_H = \frac{|E_H|}{|E|} \quad (2.13)$$

Επομένως, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι το ηλεκτρικό πεδίο Hall E_H μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathbf{E}_H = -\frac{1}{qD_p}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) = -R_H(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (2.14)$$

όπου,

- R_H : είναι ο συντελεστής Hall

Τελικά, η τάση Hall V_H σε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλάτους w , δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = m_p w E_x E_y = R_H W J B \quad (2.15)$$

Έστω ότι το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο έχει πάχος d . Τότε, η πυκνότητα ρεύματος J θα είναι ίση με:

$$J = \frac{I}{wd} \quad (2.16)$$

Οπότε, αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση, προκύπτει:

$$V_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (2.17)$$

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα Hall εξαρτάται κυρίως από την επιλογή υλικών με υψηλή κινητικότητα φορέων. Λαμβάνοντας υπόψιν και τις απώλειες ισχύος P_R λόγω της αντίστασης του υλικού, τελικά η τάση εξόδου ενός αισθητήρα Hall V_H δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = \sqrt{\frac{m_p P_R}{D_p d}} B \quad (2.18)$$

Συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες Hall είναι τα Si, GaAs, InAs, και InSb. Το κάθε υλικό εμφανίζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται κυρίως με την ευαισθησία, τη γραμμικότητα των μετρήσεων, τα σφάλματα λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και τα επίπεδα θορύβου. Λόγω της ευρείας διάδοσης του πυριτίου στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το πυρίτιο είναι το σύνθηρες υλικό που χρησιμοποιείται τελικά και στους αισθητήρες Hall. Αναλόγως του τρόπου κατασκευής του αισθητήρα, είναι δυνατή η μέτρηση σε περισσότερες της μίας διαστάσεις.

Όμως, τυχόν ασυμμετρία της διάταξης ή ανακριβής τοποθέτηση των ηλεκτροδίων εισόδου και εξόδου, οδηγούν στην εμφάνιση απόκλισης στις λαμβανόμενες μετρήσεις. Για την εξάλειψη της απόκλισης, επιλέγεται είτε η κατασκευή των αισθητήρων με χρήση laser, είτε η εκ των υστέρων αντιστάθμισή της με χρήση αντιστάσεων. Αντιστοίχως, για την αντιμετώπιση σφαλμάτων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, συχνά χρησιμοποιούνται αισθητήρες θερμοκρασίας που ενσωματώνονται στο ίδιο ολοκληρωμένο με τον Hall, με σκοπό να αντισταθμίζουν τις αποκλίσεις που προκαλούνται.

Οι τυπικοί αισθητήρες Hall που συναντώνται στην αγορά έχουν πολύ χαμηλό κόστος λόγω της μαζικής τους παραγωγής και της ευρείας διάδοσης. Οι αισθητήρες Hall χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, αναλόγως των μετρήσεων που είναι ικανοί να πραγματοποιήσουν.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που παράγουν ένα συγκεκριμένο σήμα εξόδου εάν το μαγνητικό πεδίο που δέχονται υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή (latch Hall

sensors). Επομένως, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τον προσδιορισμό ύπαρξης ή μη μαγνητικού πεδίου και όχι για τη μέτρηση της τιμής του. Τέτοιοι αισθητήρες έχουν εφαρμογές κυρίως σε περιπτώσεις μέτρησης αριθμού περιστροφών και συνεπώς ταχύτητας περιστροφής.

Στην δεύτερη και στην τρίτη κατηγορία αισθητήρων Hall περιλαμβάνονται οι αισθητήρες που είναι ικανοί να παράγουν μία τάση εξόδου που σχετίζεται γραμμικά με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι γραμμικοί αισθητήρες Hall χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τους μονοπολικούς (linear unipolar) και τους διπολικούς (linear bipolar). Οι μονοπολικοί αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μόνο η μέτρηση της απόλυτης τιμής του μαγνητικού πεδίου. Εάν είναι απαραίτητη η γνώση και της κατεύθυνσης επιβολής του μαγνητικού πεδίου ως προς τον αισθητήρα, τότε χρησιμοποιούνται οι διπολικοί αισθητήρες Hall. Στην περίπτωση των διπολικών αισθητήρων Hall, η τάση εξόδου για μηδενικό επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας. Συνεπώς, τάση εξόδου στο διάστημα $(0, \frac{V_{CC}}{2})$ υποδηλώνει επιβολή μαγνητικού πεδίου με κατεύθυνση αντίθετη ως προς την εμπρόσθια όψη του αισθητήρα, ενώ τάση εξόδου στο διάστημα $(\frac{V_{CC}}{2}, V_{CC})$ υποδηλώνει επιβολή πεδίου με κατεύθυνση όμοια με αυτή του αισθητήρα. [8]

2.6 Η Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης σήματος

Πρόσφατα, ένα εμπειρικό εργαλείο μη γραμμικής ανάλυσης για πολύπλοκες, μη στατικές χρονοσειρές παρουσιάστηκε από τους N. E. Huang et al. Το εργαλείο αυτό αναφέρεται συνήθως ως Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης – Empirical Mode Decomposition (EMD) και σε συνδυασμό με την φασματική ανάλυση Hilbert ονομάζεται μετασχηματισμός Hilbert - Huang (HHT). Η μέθοδος αυτή αποσυνθέτει προσαρμοστικά και τοπικά οποιεσδήποτε μη στατικές χρονοσειρές σε ένα σύνολο από εγγενείς συναρτήσεις που ονομάζονται Intrinsic Mode Functions (IMF), οι οποίες αντιπροσωπεύουν συνιστώσες διαμορφωμένες ως προς τη μέση τιμή του εύρους και της συχνότητας. Η EMD έχει την ιδιότητα της τέλει ανακατασκευής, αφού η σύνθεση όλων των εξαγόμενων IMF σε συνδυασμό με το αποτέλεσμα της μεθόδου (residual), είναι σε θέση να αναδομήσει το αρχικό σήμα χωρίς απώλεια πληροφορίας ή παραμόρφωσης. Η μέθοδος είναι συνεπώς παρόμοια με τις κλασικές μεθόδους αποσύνθεσης Fourier ή μετασχηματισμού κυμάτων,

αλλά η ερμηνεία των IMFs δεν είναι το ίδιο ξεκάθαρη. Ο εντοπισμός και ο συνδυασμός των εξαχθέντων IMFs με το σωστό τρόπο ώστε να δημιουργηθούν αξιόλογες συνιστώσες εξακολουθεί να είναι ένα δύσκολο έργο. Ακόμη, εάν ο σκοπός είναι μόνο η μερική αναδόμηση του σήματος, τότε δεν υπάρχει κριτήριο για το ποιες IMFs θα χρησιμοποιηθούν ούτως ώστε το αποτέλεσμα να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν καλύτερα το αρχικό σήμα.

Η μέθοδος EMD αναπτύχθηκε από την υπόθεση ότι οποιαδήποτε μη στατική και μη γραμμική χρονική σειρά αποτελείται από διαφορετικούς απλούς εγγενείς τρόπους ταλάντωσης. Η ουσία της μεθόδου είναι να προσδιοριστούν εμπειρικά αυτοί οι εγγενείς ταλαντωτικοί τρόποι με βάση τις χαρακτηριστικές χρονικές κλίμακες στα δεδομένα και στη συνέχεια να αποσυνθέσουν τα δεδομένα ανάλογα. Μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται "κοσκίνισμα" (sifting), μπορούν να εξαλειφθούν τα περισσότερα από τα κύματα οδήγησης, δηλαδή οι ταλαντώσεις χωρίς διέλευση από το μηδέν μεταξύ των ακρών. Ο αλγόριθμος EMD εξετάζει έτσι τις ταλαντώσεις σήματος σε πολύ τοπικό επίπεδο και διαχωρίζει τα δεδομένα σε τοπικά μη επικαλυπτόμενα στοιχεία κλίμακας χρόνου. Αναλύει ένα σήμα $x(t)$ στις συνιστώσες IMF υπακούοντας σε δύο ιδιότητες:

1. Μία IMF έχει μόνο ένα ακρότατο μεταξύ δύο συνεχόμενων τομών με τον άξονα, δηλαδή η διαφορά των τοπικών ελάχιστων και μέγιστων είναι το πολύ ένα.
2. Μία IMF έχει μέση τιμή μηδέν

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δεύτερη συνθήκη υπονοεί ότι μία IMF είναι στατική, κάτι το οποίο απλοποιεί την ανάλυσή της. Όμως, το εύρος και η συχνότητα της IMF μπορεί να μεταβάλλεται.

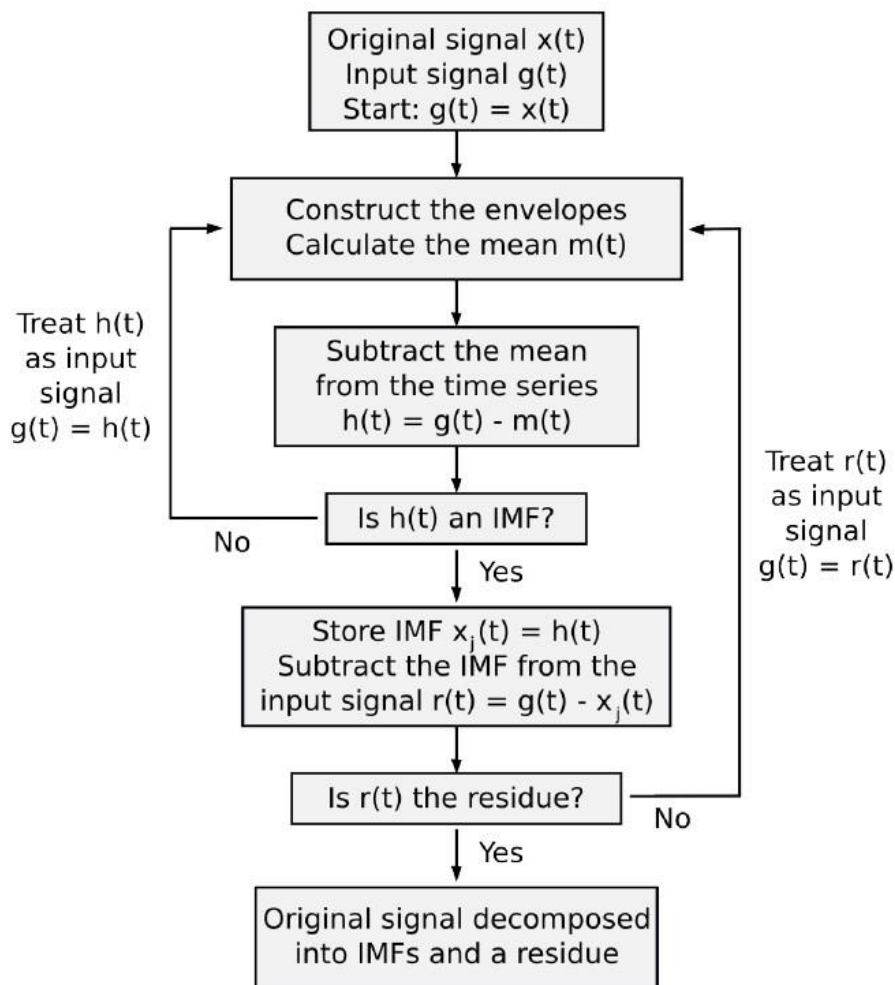
Ο αλγόριθμος EMD:

Η διαδικασία "κοσκίνισματος" (sifting) μπορεί να συνοψιστεί στον ακόλουθο αλγόριθμο: Αποσυνθέτουμε ένα σύνολο δεδομένων $x(t)$ σε IMFs $x_n(t)$ και ένα υπόλειμμα $r(t)$ έτσι ώστε το σήμα να μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$x(t) = \sum_n x_n(t) + r(t) \quad (2.19)$$

Η διαδικασία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (Εικόνα 8):

1. Αρχικοποίηση: $\mathbf{n} := \mathbf{1}$, $\mathbf{r}_0(\mathbf{t}) = \mathbf{x}(\mathbf{t})$
2. Υπολογισμός της $\mathbf{n} - \mathbf{th}$ IMF με τον ακόλουθο τρόπο:
 - a. Ορίζουμε $\mathbf{h}_0(\mathbf{t}) := \mathbf{r}_{\mathbf{n}-1}(\mathbf{t})$ και $\mathbf{k} := \mathbf{1}$.
 - b. Εντοπίζουμε όλα τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα του $\mathbf{h}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t})$.
 - c. Κατασκευάζουμε τις παρεμβάλλουσες (cubic splines) του $\mathbf{h}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t})$. Την $\mathbf{U}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t})$ όπως ορίζεται από τα μέγιστα και την $\mathbf{L}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t})$ όπως ορίζεται από τα ελάχιστα.
 - d. Προσδιορίζουμε το μέσο $\mathbf{m}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t}) = \frac{1}{2}(\mathbf{U}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t}) - \mathbf{L}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t}))$ της πάνω και κάτω παρεμβάλλουσας του $\mathbf{h}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t})$. Αυτός ο μέσος ονομάζεται τοπική τάση χαμηλής συχνότητας. Η αντίστοιχη τοπική τάση υψηλής συχνότητας προσδιορίζεται από μία διαδικασία που ονομάζεται κοσκίνισμα.
 - e. Σχηματίζουμε την $\mathbf{k} - \mathbf{th}$ συνιστώσα $\mathbf{h}_{\mathbf{k}}(\mathbf{t}) := \mathbf{h}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t}) - \mathbf{m}_{\mathbf{k}-1}(\mathbf{t})$
 - Αν η $\mathbf{h}_{\mathbf{k}}(\mathbf{t})$ δεν συμβαδίζει με όλα τα κριτήρια των IMF αυξάνουμε το $\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k} + \mathbf{1}$ και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία του κοσκινίσματος ξεκινώντας από το βήμα b.
 - Αν η $\mathbf{h}_{\mathbf{k}}(\mathbf{t})$ ικανοποιεί όλα τα κριτήρια των IMF τότε ορίζουμε $\mathbf{x}_{\mathbf{n}}(\mathbf{t}) := \mathbf{h}_{\mathbf{k}}(\mathbf{t})$ και $\mathbf{r}_{\mathbf{n}}(\mathbf{t}) := \mathbf{r}_{\mathbf{n}-1}(\mathbf{t}) - \mathbf{x}_{\mathbf{n}}(\mathbf{t})$
3. Αν η $\mathbf{r}_{\mathbf{n}}(\mathbf{t})$ αντιπροσωπεύει ένα υπόλειμμα (residuum), σταματάμε τη διαδικασία κοσκινίσματος, εάν όχι, αυξάνουμε το $\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{n} + \mathbf{1}$ και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το βήμα 1.

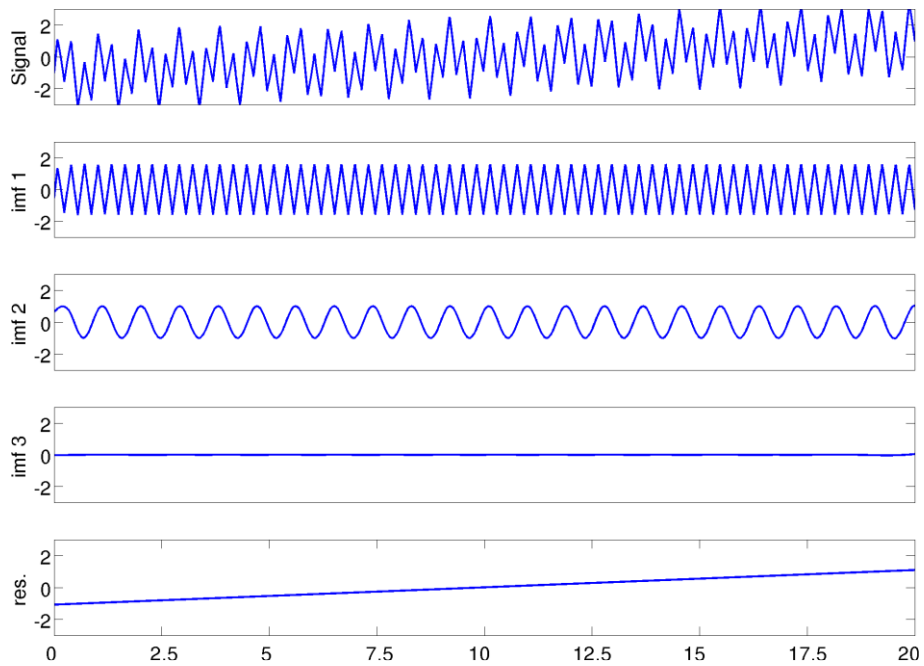


Εικόνα 8: Διάγραμμα ροής αλγοριθμικής διαδικασίας εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης (EMD)

Η μέση περίοδος της κάθε IMF μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας το διπλάσιο του μεγέθους του δείγματος $2 * N$ με τον αριθμό των τομών του άξονα. Θα πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι ο αριθμός των εξαχθέντων IMFs από μία χρονοσειρά είναι περίπου ίσος με $\log_2 N$. Η Εικόνα 9 δείχνει το αποτέλεσμα μιας ανάλυσης με βάση τη μέθοδο EMD που αφορά ένα μη στατικό σήμα το οποίο αποτελείται από τη σύνθεση ενός πριονωτού κύματος, μίας ημιτονοειδούς καμπύλης και μίας γραμμικής τάσης. Η διαδικασία του κοσκίνισματος διαχωρίζει τα δεδομένα της μη στατικής χρονοσειράς στις αρχικές, τοπικά μη επικαλυπτόμενες IMFs.

Η ολοκλήρωση της διαδικασίας αποσύνθεσης επιτυγχάνεται αυτόματα από τον αλγόριθμο αφού $x(t) = \sum_{n=1}^i x_n + r$ αποτελεί ταυτότητα. Επιπροσθέτως, ο αλγόριθμος EMD παράγει τοπικά ορθογώνιες IMFs. Η γενική ορθογωνιότητα δεν είναι εγγυημένη καθώς οι γειτονικές IMFs

μπορεί να έχουν ίδιες συχνότητες σε διαφορετικά χρονικά σημεία (συνήθως σε μικρότερο του 1% των περιπτώσεων). [45]



Εικόνα 9: Απεικόνιση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης (EMD) σήματος αποτελούμενο από πριονωτό κύμα, ημιτονοειδή καμπύλη και γραμμική τάση

Πειραματικό Μέρος

3.1 Περιγραφή προβλήματος

Στόχος ενός συστήματος εντοπισμού μαγνητικής ανωμαλίας, είναι η μελέτη και η ανάλυση μιας ανωμαλίας που παρατηρείται στο σχετικά σταθερά μεταβαλλόμενο γεωμαγνητικό πεδίο στην πάροδο του χρόνου. Η ανωμαλία αυτή οφείλεται σε έναν εξωτερικό παράγοντα (μαγνητικό αντικείμενο) ο οποίος επηρεάζει με τέτοιο τρόπο το μαγνητικό πεδίο, ώστε να είναι ανιχνεύσιμο από ειδικούς αισθητήρες (όπως οι αισθητήρες Fluxgate, που περιγράφονται στην ενότητα 2.5.3.2.). Επομένως, για την μελέτη και την ανάλυση της ανωμαλίας αυτής, τοποθετείται μία συστοιχία από n αισθητήρες σε γνωστή θέση και απόσταση μεταξύ τους οι οποίοι κάθε χρονική στιγμή ανιχνεύουν το μαγνητικό πεδίο στον τρισδιάστατο χώρο.

Σε ένα πρόβλημα εντοπισμού μαγνητικής ανωμαλίας, υπάρχουν τρεις παράγοντες οι οποίοι αποτελούν το μαγνητικό πεδίο (σήμα) το οποίο ανιχνεύει εν τέλει ένας αισθητήρας. Το γεωμαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου και διαφέρει από σημείο σε σημείο, ο θόρυβος που έχει παρατηρηθεί ότι συνήθως ακολουθεί μία κατανομή, οι παράμετροι της οποίας αλλάζουν από αισθητήρα σε αισθητήρα, καθώς και το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί το μαγνητικό σώμα όταν αυτό κινείται στο χώρο, που εξαρτάται από την θέση και τη μαγνητική ροπή του σώματος αυτού. Επομένως, το μαγνητικό πεδίο το οποίο ανιχνεύει κάθε στιγμή ένας αισθητήρας υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{B}_{S_i}(t) = \mathbf{B}_{G_i}(t) + \mathbf{B}_{N_i}(t) + \mathbf{B}_{T_i}(t) \quad (3.1)$$

όπου,

- \mathbf{B}_S : σήμα ανίχνευσης (μαγνητικό πεδίο)
- \mathbf{B}_G : γεωμαγνητικό πεδίο
- \mathbf{B}_N : θόρυβος του αισθητήρα

- **B_T**: μαγνήτιση (άνωμαλία) που προκαλεί το μαγνητικό σώμα
- **i**: αισθητήρας
- **t**: χρόνος

Όπως παρατηρούμε η μαγνητική επαγωγή εξαρτάται από το χρόνο, τη μαγνητική ροπή του κινούμενου στόχου και τη θέση του κάθε αισθητήρα, με αποτέλεσμα να πρέπει να μελετηθούν αναλυτικότερα οι επιμέρους εξισώσεις για το γεωμαγνητικό πεδίο, το θόρυβο και το μαγνητικό πεδίο του υπό μελέτη μαγνητικού σώματος.

3.1.1 Γεωμαγνητικό πεδίο

Δεδομένου ότι το γεωμαγνητικό πεδίο $B_{G_i}(t)$ μεταβάλλεται σε σχέση με τη θέση και το χρόνο, υπάρχουν ειδικά παρατηρητήρια με κατάλληλους αισθητήρες που μετρούν και καταγράφουν από διάφορες τοποθεσίες της γης, τη μεταβολή του πεδίου αυτού. Μια εύκολη λύση σε κάθε περίπτωση είναι να αξιοποιηθούν αυτές οι μετρήσεις, όμως στην πράξη θα υπάρχουν πιθανώς αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές που επηρεάζουν τον κάθε αισθητήρα ανά χρονική στιγμή στο σημείο που εκείνος έχει τοποθετηθεί.

3.1.2 Θόρυβος

Ο εσωτερικός θόρυβος των αισθητήρων, που θεωρείται ότι οφείλεται στη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων, έχει ένα ομοιόμορφο φάσμα ισχύος σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων, πρόκειται δηλαδή για τον αποκαλούμενο λευκό θόρυβο. Ο λευκός θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ένα διακριτό σήμα, του οποίου τα δείγματα θεωρούνται μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών με μηδενική μέση τιμή και πεπερασμένη διακύμανση, ακολουθούν δηλαδή τη κανονική κατανομή.

Οπότε για κάθε χρονική στιγμή, μπορούμε να πάρουμε τυχαία τιμές που να ικανοποιούν τη παραπάνω συνθήκη ορισμού του λευκού θορύβου ώστε να κατασκευάσουμε όλες τις τιμές $B_{N_i}(t)$ που χρειαζόμαστε.

3.1.3 Μαγνητικός στόχος

Κάθε μαγνητικός στόχος προκαλεί μία ανωμαλία στο μαγνητικό υπόβαθρο του περιβάλλοντος του. Αυτή η μαγνητική ανωμαλία είναι δυνατό να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα, όταν η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου είναι μεγαλύτερη από 3 φορές το μέγεθος του στόχου, οπότε ο στόχος μπορεί να θεωρηθεί ως μαγνητικό δίπολο [46]. Το πεδίο του μαγνητικού δίπολου για κάθε χρονική στιγμή που ανιχνεύει κάθε αισθητήρας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathbf{B}_{T_i}(\mathbf{t}) = \frac{\mu_0}{4\pi d_i^2(\mathbf{t})} \mathbf{R}_i(\mathbf{t}) \mathbf{m} \quad (3.2)$$

όπου,

- **B_T**: μαγνητική ανωμαλία που προκαλεί ο στόχος
- **μ₀**: μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- **d**: απόσταση μεταξύ αισθητήρα και μαγνητικού σώματος
- **m**: μαγνητική ροπή του μαγνητικού σώματος
- **i**: αισθητήρας
- **t**: χρόνος

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} 3(\mathbf{P}_{T_x}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{x_i}})^2 - d_i^2(\mathbf{t}) & 3(\mathbf{P}_{T_x}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{x_i}})(\mathbf{P}_{T_y}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{y_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_x}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{x_i}})(\mathbf{P}_{T_z}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{z_i}}) \\ 3(\mathbf{P}_{T_y}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{y_i}})(\mathbf{P}_{T_x}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{x_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_y}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{y_i}})^2 - d_i^2(\mathbf{t}) & 3(\mathbf{P}_{T_y}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{y_i}})(\mathbf{P}_{T_z}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{z_i}}) \\ 3(\mathbf{P}_{T_z}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{z_i}})(\mathbf{P}_{T_x}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{x_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_z}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{z_i}})(\mathbf{P}_{T_y}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{y_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_z}(\mathbf{t}) - \mathbf{P}_{M_{z_i}})^2 - d_i^2(\mathbf{t}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

όπου,

- **P_T**: θέση μαγνητικού στόχου
- **P_M**: θέση αισθητήρα
- **d**: απόσταση μεταξύ αισθητήρα και μαγνητικού σώματος
- **i**: αισθητήρας
- **t**: χρόνος

3.2 Μεθοδολογία – Παραδοχές

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία προκειμένου να προσομοιωθούν δεδομένα τα οποία δεν ήταν δυνατό να είναι διαθέσιμα χωρίς την πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων και να δοκιμαστεί ο τρόπος προσέγγισης του σημείου ανίχνευσης του στόχου σε διαφορετικά σενάρια, ώστε να αξιολογηθεί ως προς την αποτελεσματικότητά της.

Συνοπτικά, το πρόβλημα χωρίστηκε σε τρία βασικά επιμέρους προβλήματα:

- **Της προσομοίωσης δεδομένων** (Data Simulation), που ορίζεται ως το πρόβλημα κατασκευής δεδομένων που προσεγγίζουν τιμές αντίστοιχες με αυτές των πειραματικών μετρήσεων και είναι απαραίτητα για την επίλυση του ευρύτερου προβλήματος. Αυτά τα δεδομένα αποτελούνται από τιμές του γεωμαγνητικού πεδίου που λαμβάνονται από παρατηρητήρια, του προσομοιωμένου θορύβου των αισθητήρων και **του υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου** που προκαλεί το κινούμενο σώμα σε κάθε έναν από τους αισθητήρες. Έτσι, το προσομοιωμένο σήμα των αισθητήρων (Signal Magnetic Field) ορίζεται ως το πρόβλημα υπολογισμού του συνολικού μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύεται από κάθε έναν από τους αισθητήρες της συστοιχίας για κάθε χρονική στιγμή καθώς το μαγνητικό σώμα κινείται στο χώρο.
- **Του υπολογισμού διαφορικού μαγνητικού πεδίου** (Differential Magnetic Field), που ορίζεται ως το πρόβλημα υπολογισμού της διαφοράς του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύει κάθε αισθητήρας ως προς τον αισθητήρα αναφοράς, για κάθε χρονική στιγμή, με στόχο την απλοποίηση του γεωμαγνητικού πεδίου από το σήμα.
- **Της εμπειρικής αποσύνθεσης σήματος** (Empirical Mode Decomposition), που ορίζεται ως το πρόβλημα απαλοιφής του θορύβου μέσω διαμόρφωσης σήματος από σήματα τα οποία είναι αλλοιωμένα και είναι δύσκολο να εξαχθούν αξιόπιστες πληροφορίες λόγω του χαμηλού SNR τους.

Με την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων θα είναι πλέον εφικτό να ανιχνεύσουμε μία ανωμαλία στο γεωμαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα να μπορούμε να προσδιορίσουμε την κίνηση ενός μαγνητικού σώματος στο χώρο.

Για την παραπάνω μελέτη θα βασιστούμε στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην [46], αλλά και σε δεδομένα τα οποία επιλέχθηκαν έπειτα από δοκιμές κατά τη διάρκεια της μελέτης.

3.2.1 Προσομοίωση δεδομένων

Αρχικά, θα θεωρήσουμε ότι το μαγνητικό σώμα το οποίο θα ανιχνεύσουμε, εκτελεί σταθερή γραμμική κίνηση με ταχύτητα **4m/s** και ότι θα διανύσει **900m** για το συνολικό χρόνο της προσομοίωσης. Από τη θεώρηση αυτή, προκύπτει ότι ο χρόνος μελέτης του προβλήματος αντιστοιχεί σε **225s** και με συχνότητα δειγματοληψίας **10Hz** προκύπτει σύνολο **2250** δειγμάτων.

Target Velocity	Distance	Simulation Duration	Samples Frequency
4 m/s	900 m	225 s	10 Hz

Πίνακας 1: Παράμετροι για τον υπολογισμό χρόνου προσομοίωσης και δειγματοληψίας

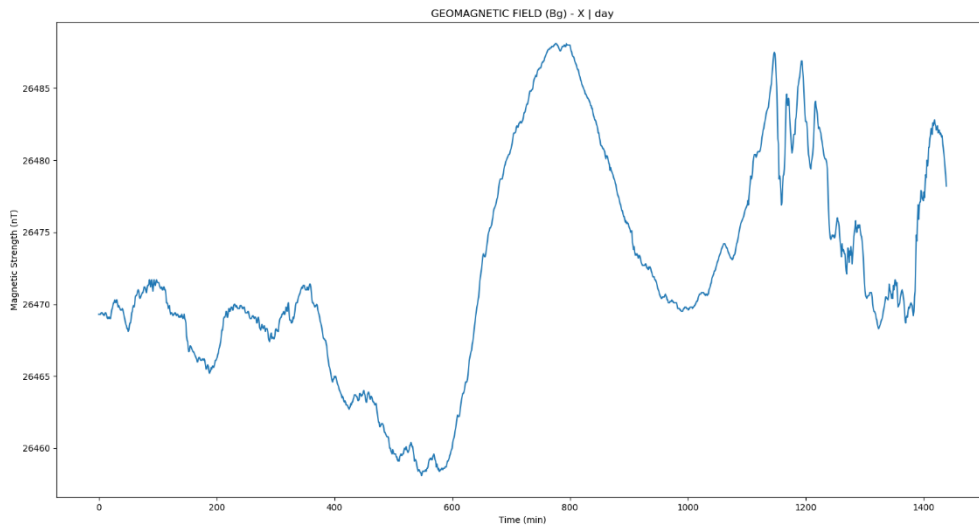
3.2.1.1 Δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου

Τα δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου της γης που θα χρησιμοποιήσουμε για την μελέτη αυτή, θα τα αντλήσουμε από το “**International Real-time Magnetic Observatory Network**” και πιο συγκεκριμένα από το παρατηρητήριο της Ελλάδας που βρίσκεται στην περιοχή της Πεντέλης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

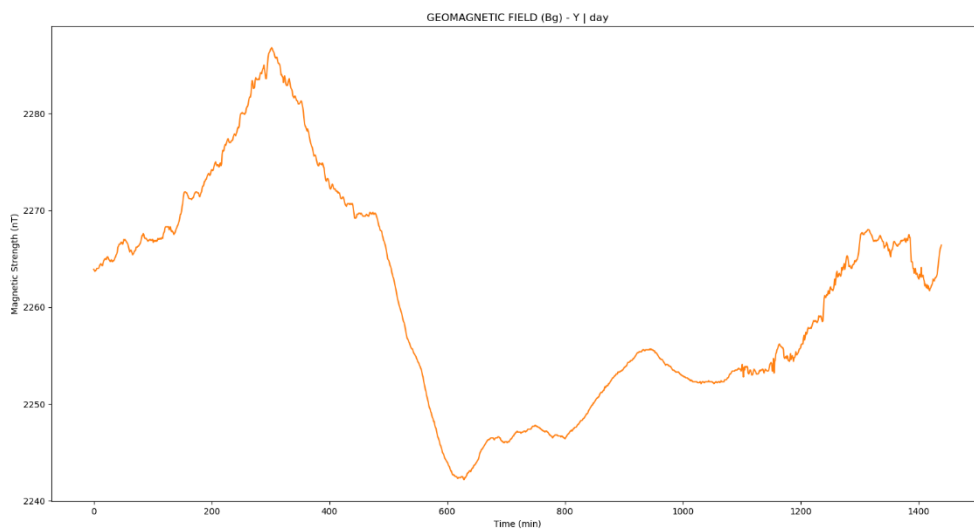
Station	Location	Country	Co-latitude	Longitude	Elevation	Orientation
PEG	Nea Makri	Greece	51,9°	23,9°	380 meters	HDZF

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά στοιχεία παρατηρητηρίου

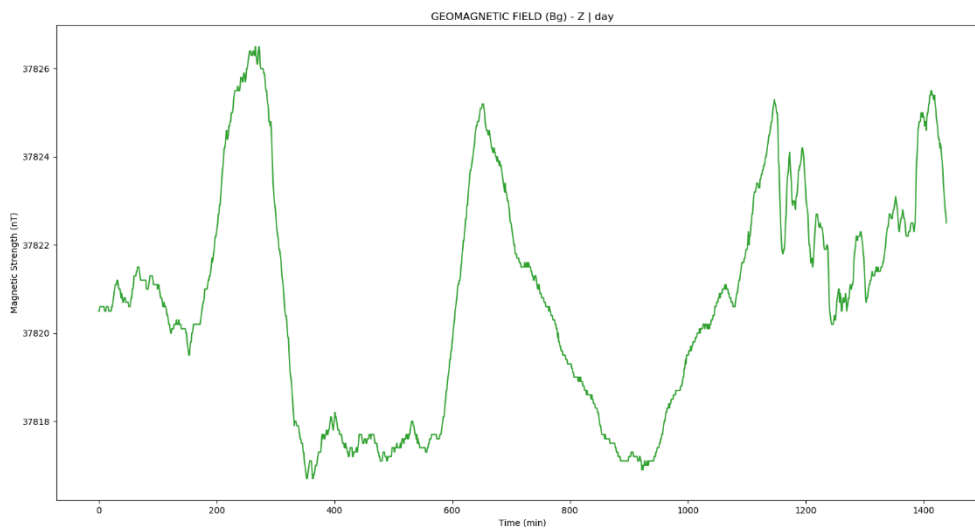
Τα δεδομένα αφορούν μετρήσεις του παρατηρητηρίου από την 1^η Ιουλίου 2020 για το γεωμαγνητικό πεδίο ανά άξονα (x – y – z) για κάθε λεπτό για όλη τη διάρκεια της ημέρας και παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 10: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_x} σε λεπτά για την 01/07/20 (άξονας X)

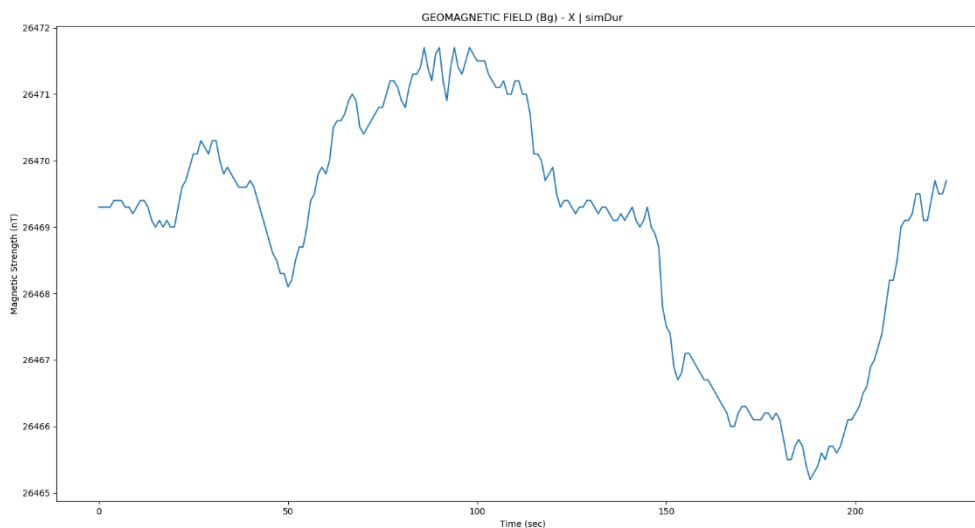


Εικόνα 11: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_y} σε λεπτά για την 01/07/20 (άξονας Y)

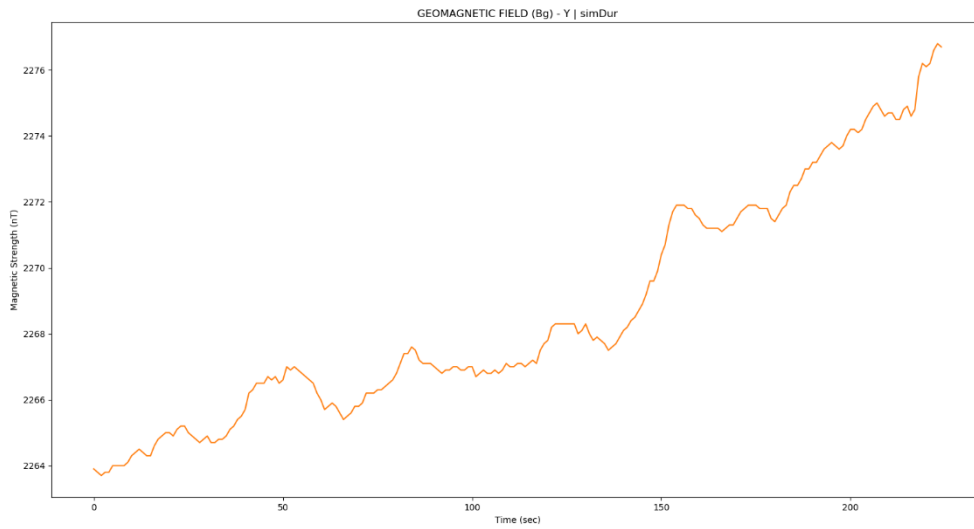


Εικόνα 12: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_z} σε λεπτά για την 01/07/20 (άξονας Z)

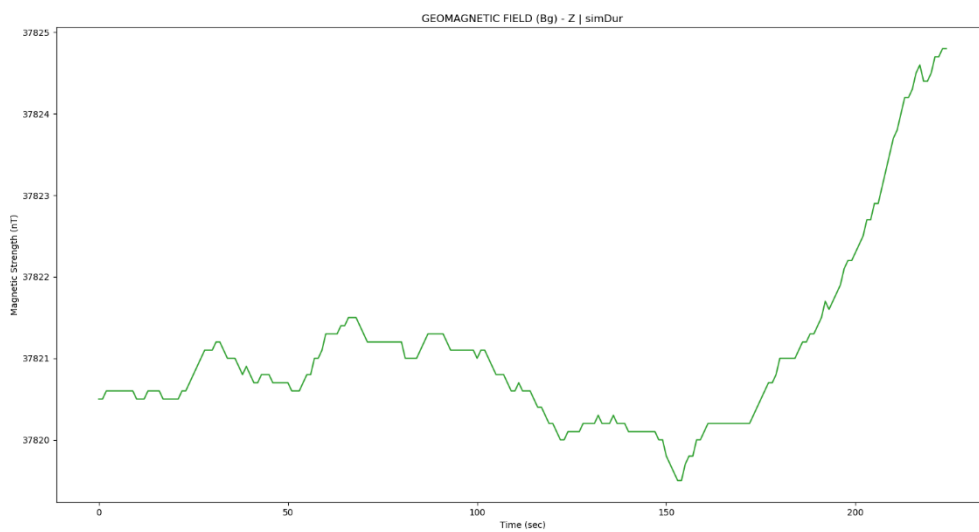
Για να χρησιμοποιήσουμε τα παραπάνω δεδομένα στο πρόβλημα μας, τα τροποποιούμε κατάλληλα ώστε να προσαρμοστούν στις ανάγκες της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα οι μετρήσεις ανά λεπτό, έχουν θεωρηθεί για λόγους ευκολίας μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, ενώ χρονικά θα κρατήσουμε τα πρώτα **225s**, ώστε να προσαρμοστούν με το συνολικό χρόνο προσομοίωσης. Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 13: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_x} σε δευτερόλεπτα για προσομοίωση (άξονας X)



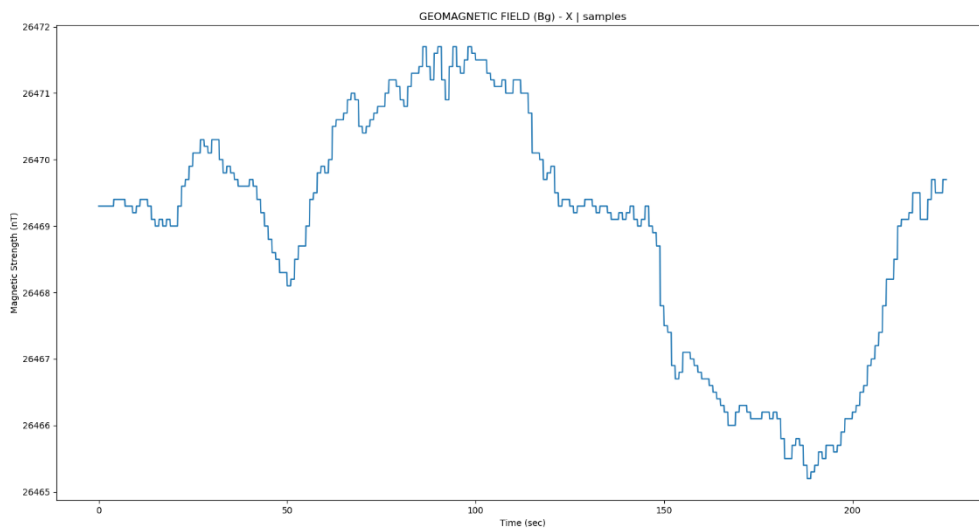
Εικόνα 14: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{Gy} σε δευτερόλεπτα για προσομοίωση (άξονας Y)



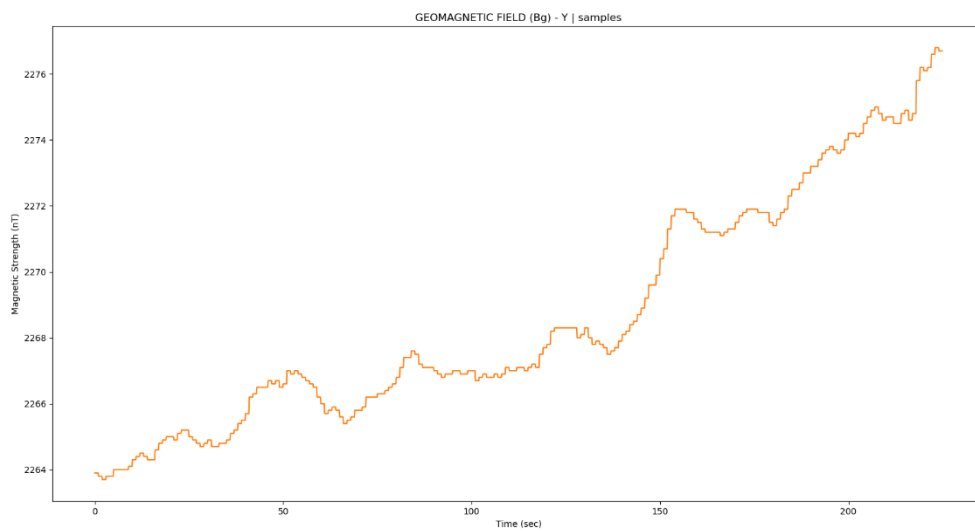
Εικόνα 15: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{Gz} σε δευτερόλεπτα για προσομοίωση (άξονας Z)

Στις Εικόνα 16, Εικόνα 17, Εικόνα 18 παρουσιάζονται οι παραπάνω μετρήσεις του γεωμαγνητικού πεδίου προσαρμοσμένες σε διάστημα μέτρησης **225s** με ρυθμό δειγματοληψίας **0,1s**.

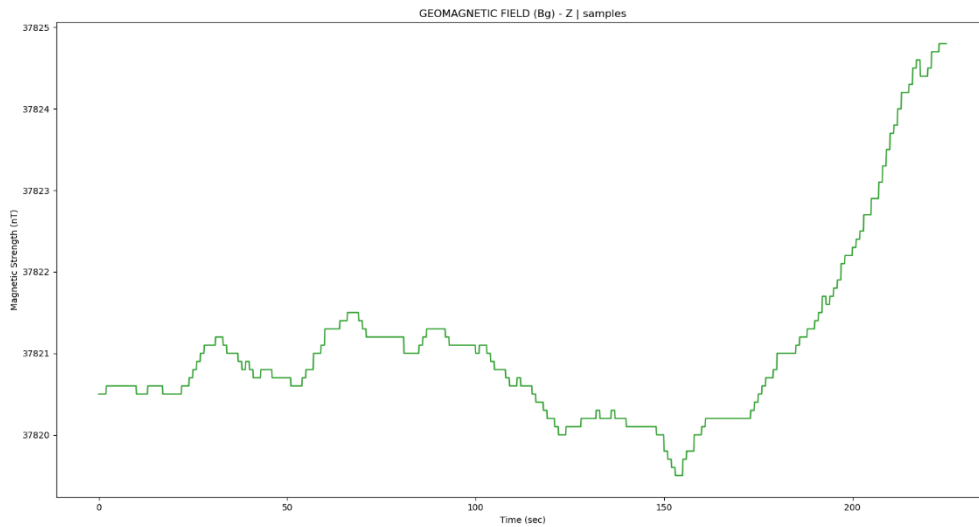
3.2 Μεθοδολογία – Παραδοχές



Εικόνα 16: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_x} σε δευτερόλεπτα για δειγματοληψία (άξονας X)



Εικόνα 17: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_y} σε δευτερόλεπτα για δειγματοληψία (άξονας Y)



Εικόνα 18: Γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_z} σε δευτερόλεπτα για δειγματοληψία (άξονας Z)

3.2.1.2 Δεδομένα θορύβου

Ο θόρυβος που παρουσιάζεται στους αισθητήρες που θεωρείται λευκός θόρυβος και διαφέρει ως προς την τυπική απόκλιση σ ανά αισθητήρα. Το εύρος των τυπικών αποκλίσεων κυμαίνεται μεταξύ **0.015nT** και **0.025nT**. Στο διάστημα αυτό επιλέγουμε τις παρακάτω τιμές για κάθε έναν από τους **5** αισθητήρες της συστοιχίας των αισθητήρων, οπότε προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

m	σ_1 (nT)	σ_2 (nT)	σ_3 (nT)	σ_4 (nT)	σ_5 (nT)
0	0.015	0.018	0.020	0.022	0.025

Πίνακας 3: Τιμές μέσου m και τυπικής απόκλισης σ για τον υπολογισμό του θορύβου των αισθητήρων

Με βάση τις τιμές του πίνακα, χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση – γεννήτρια τυχαίων αριθμών που ικανοποιεί τις παραπάνω συνθήκες κατασκευάζουμε όλες τις τιμές του $B_{N_i}(t)$.

3.2.1.3 Δεδομένα αισθητήρων

Για να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς που αφορούν στο μαγνητικό πεδίο που ανιχνεύει κάθε αισθητήρας, θεωρούμε ότι η συστοιχία των αισθητήρων βρίσκεται στον άξονα y , ενώ όλοι οι αισθητήρες απέχουν μεταξύ τους **15m**. Η θεώρηση αυτή, έχει γίνει προκειμένου να θεωρήσουμε ότι όλοι οι αισθητήρες ανιχνεύουν ίσης έντασης γεωμαγνητικό πεδίο. Συνθήκη που σε επόμενο στάδιο της επίλυσης, θα μας επιτρέψει την αφαίρεσή του από το συνολικό μαγνητικό πεδίο. Στους υπόλοιπους άξονες θεωρούμε ότι δεν υπάρχει απόσταση μεταξύ των αισθητήρων.

Position Mag 1	Position Mag 2	Position Mag 3	Position Mag 4	Position Mag 5
(0,75,0)	(0,60,0)	(0,45,0)	(0,30,0)	(0,15,0)

Πίνακας 4: Παράμετροι θέσης αισθητήρων στο χώρο $P_{M_i}(x, y, z)$

3.2.1.4 Δεδομένα μαγνητικού στόχου

Τα δεδομένα που αφορούν στο μαγνητικό στόχο της εργασίας, διαφέρουν ανάλογα το σενάριο το οποίο εξετάζουμε σύμφωνα με όσα έχουν αναλυθεί προηγουμένως. Προκειμένου να μπορούμε να συγκρίνουμε όμως το αποτέλεσμα, υπάρχει μια αντιστοιχία μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων ως προς τη μαγνητική ροπή του στόχου και την κίνηση που εκτελεί.

Θεωρώντας ότι έχουμε συνισταμένη μαγνητική ροπή ίση με $6,5 * \sqrt{102} \text{ Am}^2$, προκύπτουν οι παρακάτω μαγνητικές ροπές για όλα τα σενάρια που θα εξετάσουμε:

Vertical Movement Ovoid Target	Vertical Movement Sphere Target	Parallel Movement Ovoid Target	Parallel Movement Sphere Target
$6,5*(10,1,1)\text{Am}^2$	$6,5*(\sqrt{34}, \sqrt{34}, \sqrt{34})\text{Am}^2$	$6,5*(1,10,1)\text{Am}^2$	$6,5*(\sqrt{34}, \sqrt{34}, \sqrt{34})\text{Am}^2$

Πίνακας 5: Τιμές της μαγνητικής ροπής στόχου $m = M * (x, y, z)$ για κάθε σενάριο

3.2.2 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου

Κάθε χρονική στιγμή, σύμφωνα με την κίνηση που εκτελεί το μαγνητικό σώμα, αναλόγως δηλαδή το προς μελέτη σενάριο, θα υπολογίσουμε αρχικά την θέση στην οποία βρίσκεται. Γνωρίζοντας ότι το σώμα εκτελεί γραμμική κίνηση με σταθερή ταχύτητα, μπορούμε να υπολογίσουμε την μετατόπιση του ανά χρονική στιγμή. Εφόσον η μετατόπιση του με την πάροδο του χρόνου παραμένει σταθερή, χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση, θα βρούμε τη θέση του στόχου για κάθε χρονική στιγμή.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{T_x}(t+1) \\ \mathbf{P}_{T_y}(t+1) \\ \mathbf{P}_{T_z}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{T_x}(t) \\ \mathbf{P}_{T_y}(t) \\ \mathbf{P}_{T_z}(t) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τη θέση κάθε μαγνητόμετρου της συστοιχίας και τη θέση του στόχου ανά χρονική στιγμή, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση του στόχου από κάθε μαγνητόμετρο με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$d_i(t) = \sqrt{\left(\mathbf{P}_{T_x}(t) - \mathbf{P}_{M_{x_i}}\right)^2 + \left(\mathbf{P}_{T_y}(t) - \mathbf{P}_{M_{y_i}}\right)^2 + \left(\mathbf{P}_{T_z}(t) - \mathbf{P}_{M_{z_i}}\right)^2} \quad (3.5)$$

Αντικαθιστώντας την απόσταση στον παρακάτω τύπο, μπορούμε να υπολογίσουμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του νόμου Biot – Savart.

$$R_i(t) = \begin{bmatrix} 3(\mathbf{P}_{T_x}(t) - \mathbf{P}_{M_{x_i}})^2 - d_i^2(t) & 3(\mathbf{P}_{T_x}(t) - \mathbf{P}_{M_{x_i}})(\mathbf{P}_{T_y}(t) - \mathbf{P}_{M_{y_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_x}(t) - \mathbf{P}_{M_{x_i}})(\mathbf{P}_{T_z}(t) - \mathbf{P}_{M_{z_i}}) \\ 3(\mathbf{P}_{T_y}(t) - \mathbf{P}_{M_{y_i}})(\mathbf{P}_{T_x}(t) - \mathbf{P}_{M_{x_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_y}(t) - \mathbf{P}_{M_{y_i}})^2 - d_i^2(t) & 3(\mathbf{P}_{T_y}(t) - \mathbf{P}_{M_{y_i}})(\mathbf{P}_{T_z}(t) - \mathbf{P}_{M_{z_i}}) \\ 3(\mathbf{P}_{T_z}(t) - \mathbf{P}_{M_{z_i}})(\mathbf{P}_{T_x}(t) - \mathbf{P}_{M_{x_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_z}(t) - \mathbf{P}_{M_{z_i}})(\mathbf{P}_{T_y}(t) - \mathbf{P}_{M_{y_i}}) & 3(\mathbf{P}_{T_z}(t) - \mathbf{P}_{M_{z_i}})^2 - d_i^2(t) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

όπου,

- \mathbf{P}_T : θέση μαγνητικού στόχου
- \mathbf{P}_M : θέση αισθητήρα
- d : απόσταση μεταξύ αισθητήρα και μαγνητικού σώματος
- i : αισθητήρας
- t : χρόνος

Έχοντας πλέον όλα τα δεδομένα, αντικαθιστώντας στην παρακάτω εξίσωση, μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνιστώσες του νόμου Biot – Savart για κάθε μαγνητόμετρο για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

$$\begin{bmatrix} B_{T_{ix}}(t) \\ B_{T_{iy}}(t) \\ B_{T_{iz}}(t) \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi d_i^2(t)} R_i(t) \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

όπου,

- **B_T**: μαγνήτιση (ανωμαλία) που προκαλεί το μαγνητικό σώμα σε κάθε άξονα
- **μ₀**: μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- **d**: απόσταση μεταξύ αισθητήρα και μαγνητικού σώματος
- **m**: μαγνητική ροπή του μαγνητικού σώματος
- **i**: αισθητήρας
- **t**: χρόνος

Οπότε, αθροίζοντας ανά χρονική στιγμή το γεωμαγνητικό πεδίο, το θόρυβο και τη μαγνήτιση του στόχου, προκύπτει το συνολικό μαγνητικό πεδίο που ανιχνεύει το κάθε μαγνητόμετρο της συστοιχίας με βάση την σχέση:

$$B_{S_i}(t) = B_{G_i}(t) + B_{N_i}(t) + B_{T_i}(t) \quad (3.8)$$

όπου,

- **B_S**: σήμα ανίχνευσης (μαγνητικό πεδίο)
- **B_G**: γεωμαγνητικό πεδίο
- **B_N**: θόρυβος του αισθητήρα
- **B_T**: μαγνήτιση (ανωμαλία) που προκαλεί το μαγνητικό σώμα
- **i**: αισθητήρας
- **t**: χρόνος

3.2.3 Υπολογισμός διαφορικού μαγνητικού πεδίου

Για την ανάλυση του σήματος ανίχνευσης των αισθητήρων της συστοιχίας, θα εφαρμόσουμε την μέθοδο διαφορικού μαγνητικού πεδίου, προκειμένου να καταφέρουμε να αφαιρέσουμε από τα προς μελέτη σήματα την επιρροή του γεωμαγνητικού πεδίου.

Θεωρώντας ως αισθητήρα αναφοράς για λόγους ευκολίας τον μεσαίο αισθητήρα της συστοιχίας, θα αφαιρέσουμε από το μαγνητικό πεδίο του κάθε αισθητήρα που υπολογίσαμε στην προηγούμενη ενότητα, το μαγνητικό πεδίο του αισθητήρα αναφοράς. Βάσει της υπόθεσης που κάναμε στην ενότητα 3.2.1.3 αναφορικά με την απόσταση των αισθητήρων, όλοι οι αισθητήρες ανιχνεύουν το ίδιο γεωμαγνητικό πεδίο ανά χρονική στιγμή. Ακολουθώντας την μεθοδολογία αυτή, προκύπτουν νέα σήματα τα οποία είναι ανεξάρτητα του γεωμαγνητικού πεδίου, καταλήγοντας στην παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{B}_{S_i}(t) - \mathbf{B}_{S_{ref}}(t) = \mathbf{B}_{N_i}(t) - \mathbf{B}_{N_{ref}}(t) + \mathbf{B}_{T_i}(t) - \mathbf{B}_{T_{ref}}(t) \quad (3.9)$$

Η σύντομη γραφή της παραπάνω εξίσωσης αντίστοιχα είναι:

$$d\mathbf{B}_{S_i}(t) = d\mathbf{B}_{N_i}(t) + d\mathbf{B}_{T_i}(t) \quad (3.10)$$

3.2.4 Εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης σήματος (EMD)

Έχοντας πλέον δημιουργήσει εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν το διαφορικό μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι απαλλαγμένο από το γεωμαγνητικό πεδίο, δηλαδή εξισώσεις από τις οποίες μπορεί πιο εύκολα να εξαχθεί πληροφορία, θα εφαρμόσουμε σε αυτές την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης προκειμένου να αναπαραστήσουμε γραφικά την τάση (trend) της προς μελέτη συνάρτησης. Η τάση αυτή, και συγκεκριμένα το σημείο αλλαγής της κλίσης της, θα μας δώσει την απαραίτητη πληροφορία για την χρονική στιγμή της ανίχνευσης του στόχου.

Για να εφαρμόσουμε τη μέθοδο της εμπειρικής αποσύνθεσης στις εξισώσεις διαφορικού μαγνητικού πεδίου που δημιουργήσαμε, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της Python PyEMD. [47]

Η εξίσωση που περιγράφει αναλυμένη την συνάρτηση διαφορικού μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης, δηλαδή το σύνολο των συνιστωσών της μαζί με το υπόλειμμα (τάση), φαίνεται παρακάτω:

$$dB_{S_i}(t) = \sum_n dB_{S_{i_n}}(t) + r_i(t) \quad (3.11)$$

όπου,

- **dB_s**: σήμα ανίχνευσης (μαγνητικό πεδίο)
- **r**: υπόλειμμα (residuum)
- **n**: επαναλήψεις μέχρι την εύρεση λύσης (αριθμός συνιστωσών)
- **i**: αισθητήρας
- **t**: χρόνος

Από τις εξισώσεις $r_i(t)$ μπορούμε να αναπαραστήσουμε γραφικά την τάση της αρχικής συνάρτησης του διαφορικού μαγνητικού πεδίου $dB_{S_i}(t)$. Η συνάρτηση $r_i(t)$ ταυτίζεται με την τελευταία IMF που υπολογίζει ο κώδικας της EMD που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία.

3.2.5 Υπολογισμός σημείου ανίχνευσης

Δεδομένου ότι δεν γνωρίζουμε την εξίσωση της συνάρτησης για κάθε λύση $r_i(t)$ της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σήματος, θα υπολογίσουμε το σημείο αλλαγής της κλίσης των καμπυλών αυτών κάνοντας χρήση μιας προσεγγιστικής μεθόδου.

Αρχικά, υπολογίζουμε την ελάχιστη και μέγιστη τιμή κάθε καμπύλης και ενώνοντας τα δύο αυτά σημεία, βρίσκουμε την κλίση της ευθείας. Η γωνία που σχηματίζεται με τον άξονα x ονομάζεται θ. Πολλαπλασιάζοντας με τον πίνακα περιστροφής περιστρέφουμε τα δεδομένα της καμπύλης έτσι ώστε να η κλίση της ευθείας που ορίζεται από την ελάχιστη και μέγιστη τιμή της να είναι μηδέν.

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

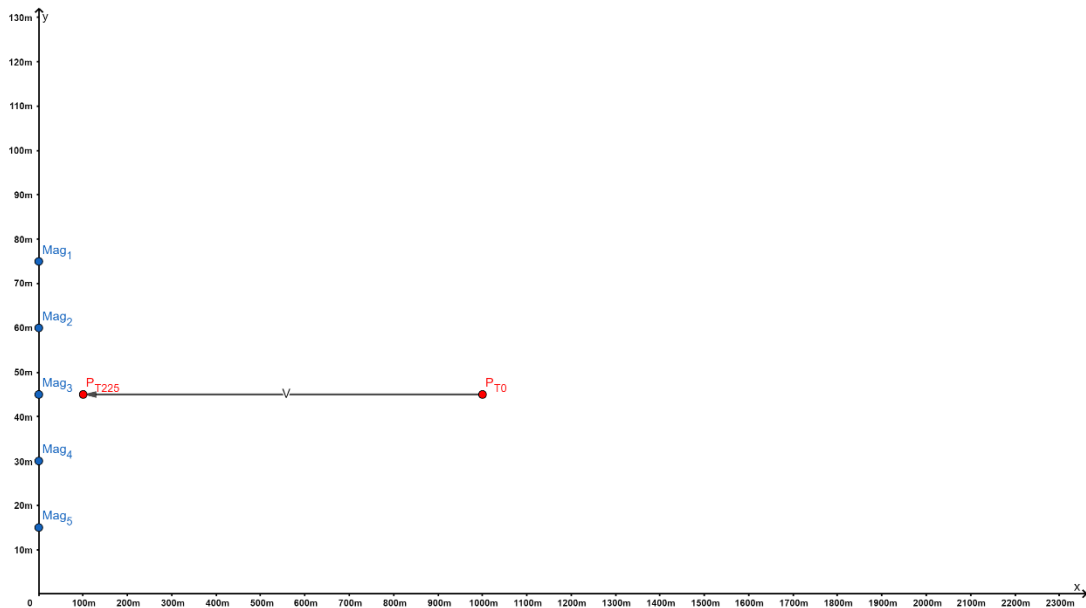
Η ελάχιστη τιμή της καμπύλης που περιστρέψαμε, είναι το προσεγγιστικό σημείο αλλαγής της κλίσης της λύσης, δηλαδή το σημείο όπου ο στόχος ανιχνεύεται για πρώτη φορά από το εκάστοτε μαγνητόμετρο. [48]

Προσομοιώσεις

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν 4 διαφορετικά σενάρια ώστε να αξιολογηθεί η απόκριση του συστήματος σε διαφορετική μαγνητική ροπή σώματος ή σε διαφορετική κίνηση μαγνητικού σώματος. Πιο αναλυτικά, εξετάσαμε δύο διαφορετικές μορφολογίες στόχου, έναν ελλειψοειδή και έναν σφαιρικό, με τις αντίστοιχες μαγνητικές ροπές τους (οι οποίες θεωρούμε ότι έχουν συνισταμένη ίση με $6,5 * \sqrt{102} \text{ Am}^2$) και πώς αυτές οι διαφορετικές μορφολογίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα σύμφωνα με την κίνηση που εκτελούν. Οι κινήσεις που μελετήθηκαν διαφέρουν ως προς την κατεύθυνση με την πρώτη να είναι κάθετη προς την συστοιχία των αισθητήρων και τη δεύτερη παράλληλη με την συστοιχία των αισθητήρων.

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

Βάση των δεδομένων για τις θέσεις των μαγνητόμετρων που αναφέρονται στον πίνακα 4 και την κίνηση που εκτελεί το μαγνητικό σώμα σε αυτό το σενάριο, προκύπτει η γεωμετρία που ακολουθεί.



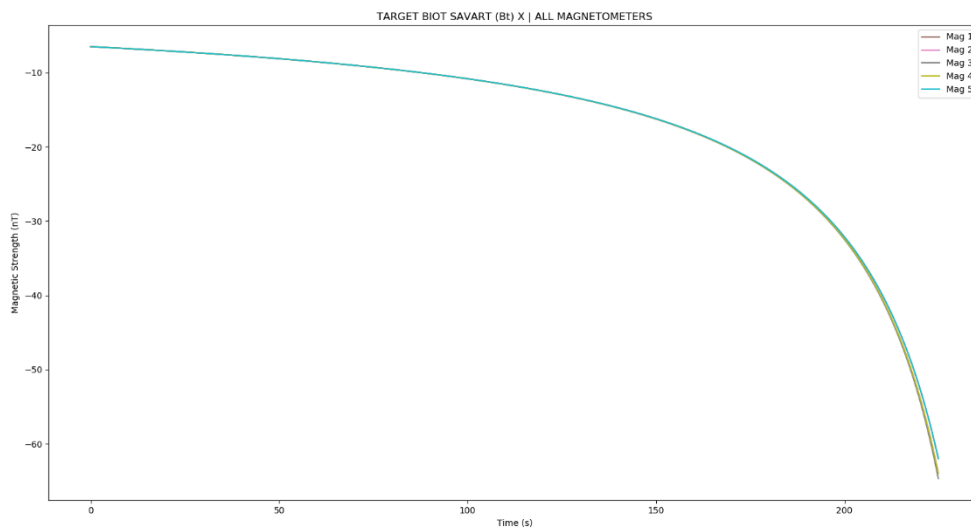
Εικόνα 19: Γεωμετρία προβλήματος για τα σενάρια όπου ο στόχος κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.1.1 Ελλειψοειδής στόχος

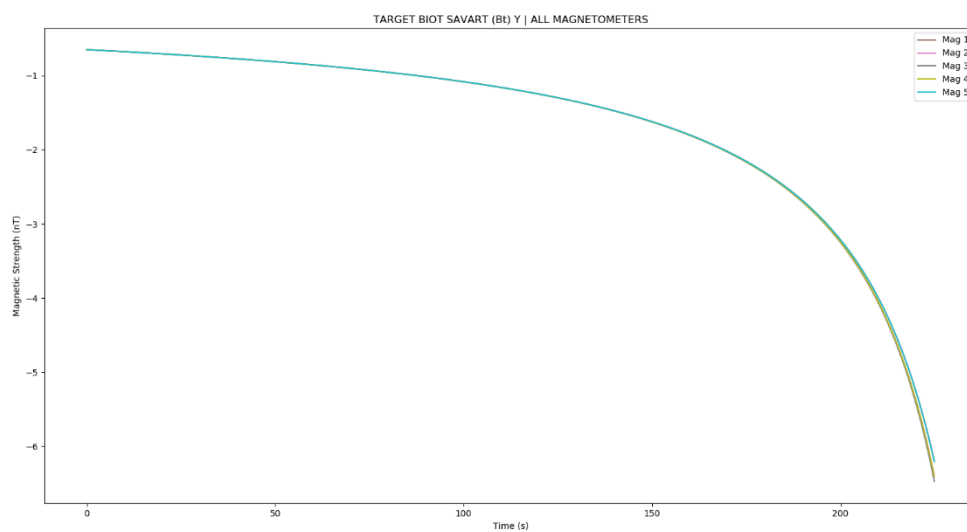
Σύμφωνα με την κίνηση που εκτελεί το μαγνητικό σώμα και την μορφολογία του, η μαγνητική ροπή του στόχου για το σενάριο αυτό είναι ίση με $6.5 * (10, 1, 1)Am^2$. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του σεναρίου.

Με βάση το νόμο Biot-Savart, υπολογίζουμε τις συνιστώσες $B_{T_x}, B_{T_y}, B_{T_z}$ του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδή στόχου που ανιχνεύει η συστοιχία των 5 μαγνητόμετρων.

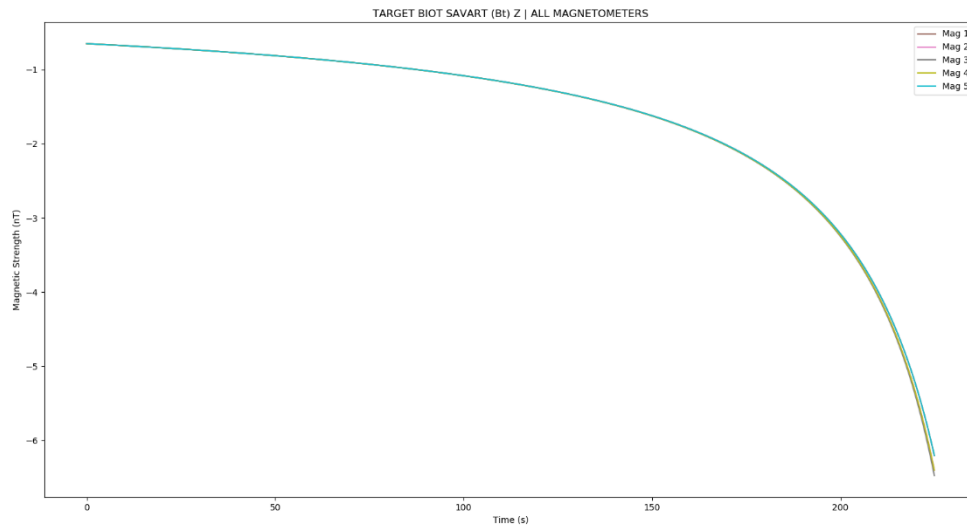
4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 20: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_x} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 21: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_y} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



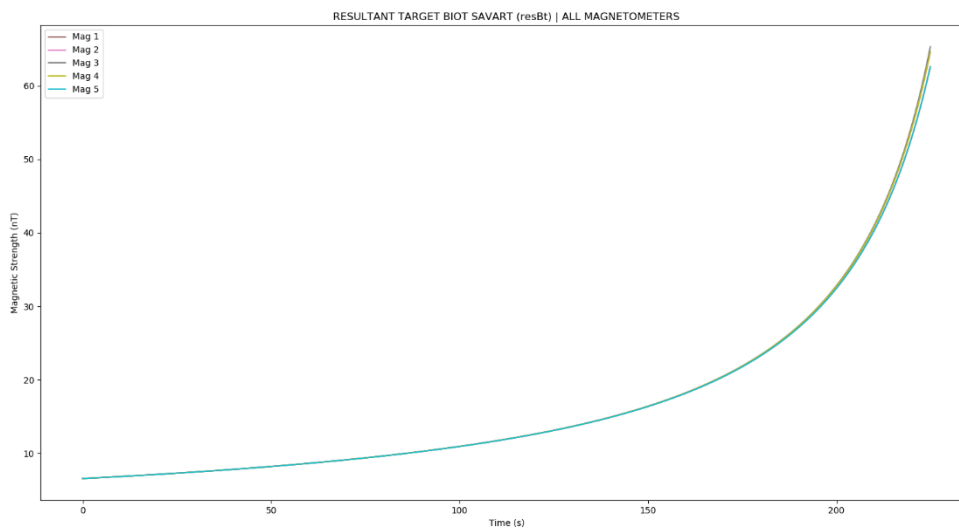
Εικόνα 22: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_z} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρατηρούμε ότι καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, έχουμε αύξηση του μαγνητικού πεδίου του αντικειμένου, η οποία είναι παρόμοια στους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς. Στους κοντινότερους αισθητήρες προς τον αισθητήρα αναφοράς η αύξηση αυτή παρατηρείται ταχύτερα.

Οι αρνητικές τιμές οφείλονται στην κατεύθυνση του στόχου ο οποίος κινείται από τις θετικές τιμές του άξονα προς τις αρνητικές.

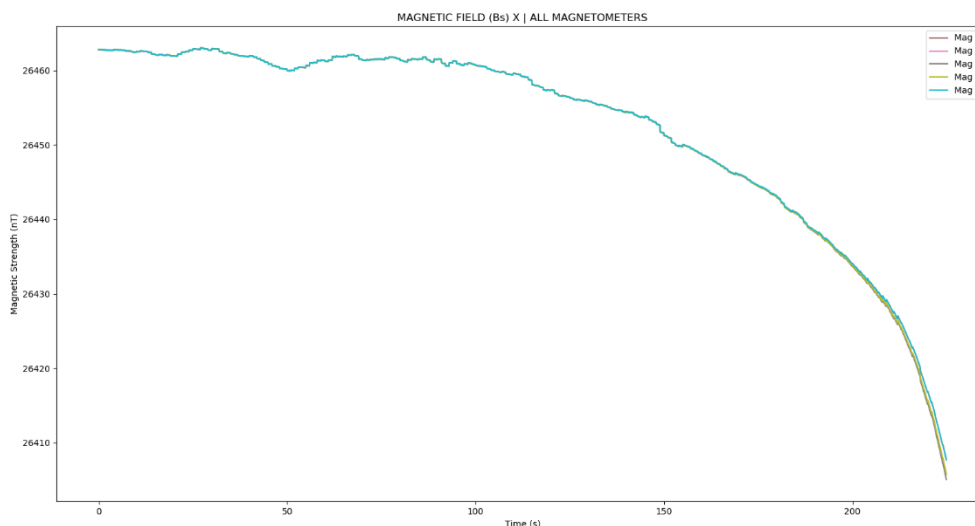
Η συνιστώσα B_{T_x} έχει 10πλάσια μαγνητική ροπή συγκριτικά με τις άλλες δύο συνιστώσες και καθορίζει το μέτρο της συνισταμένης (Εικόνα 23).

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

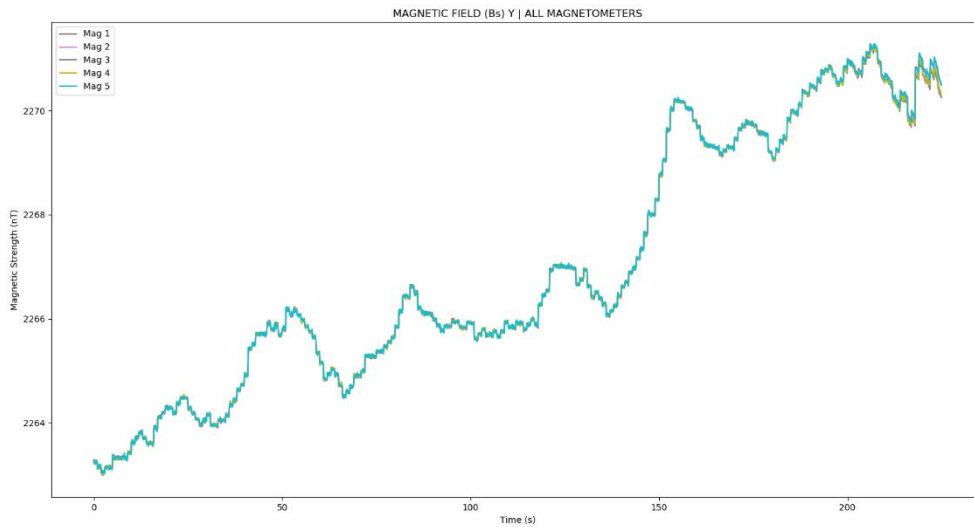


Εικόνα 23: Υπολογισμός της συνισταμένης B_T του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

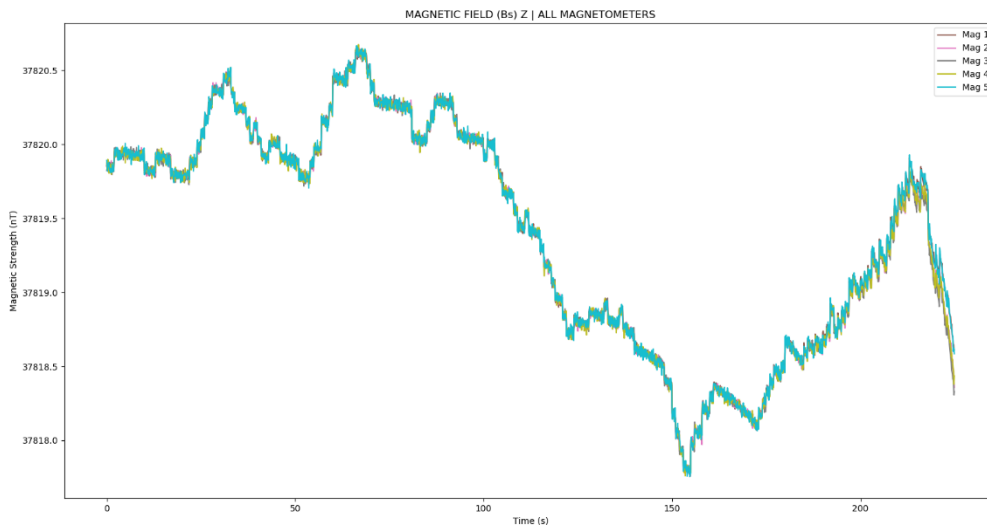
Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που μετρούν οι αισθητήρες, για κάθε μία από τις συνιστώσες του $B_{S_x}, B_{S_y}, B_{S_z}$, οι οποίες αποτελούνται από το γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_i} , το θόρυβο B_{N_i} και το μαγνητικό πεδίο B_{T_i} που οφείλεται στην κίνηση του στόχου.



Εικόνα 24: Η συνιστώσα B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



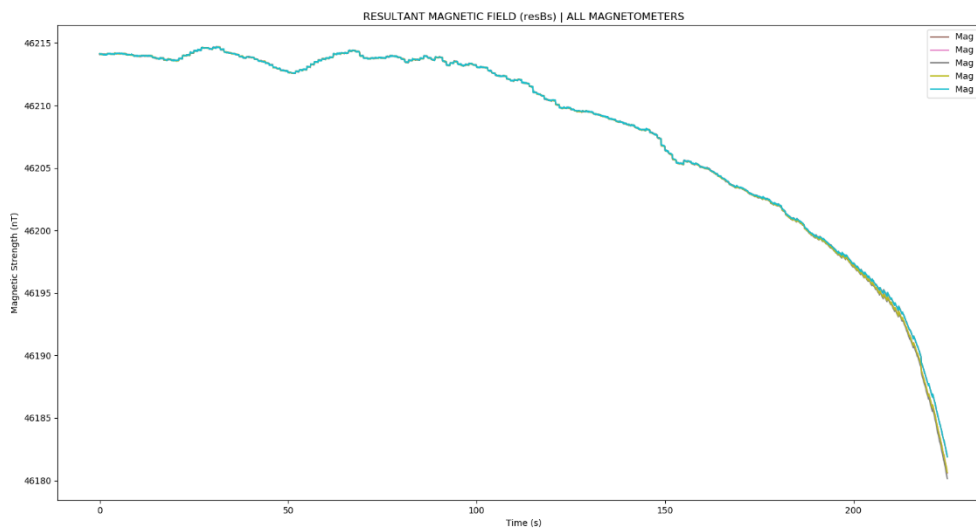
Εικόνα 25: Η συνιστώσα B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 26: Η συνιστώσα B_{S_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Στα διαγράμματα αυτά, παρατηρούμε ότι κυρίαρχο ρόλο παίζει το γεωμαγνητικό πεδίο, αφού είναι έως 8 τάξεις μεγαλύτερο από τον θόρυβο και έως 5 από το μαγνητικό πεδίο του στόχου. Ωστόσο, καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στο στόχο. Η τάση (trend) είναι ιδιαίτερα εμφανής στη συνιστώσα B_{S_x} .

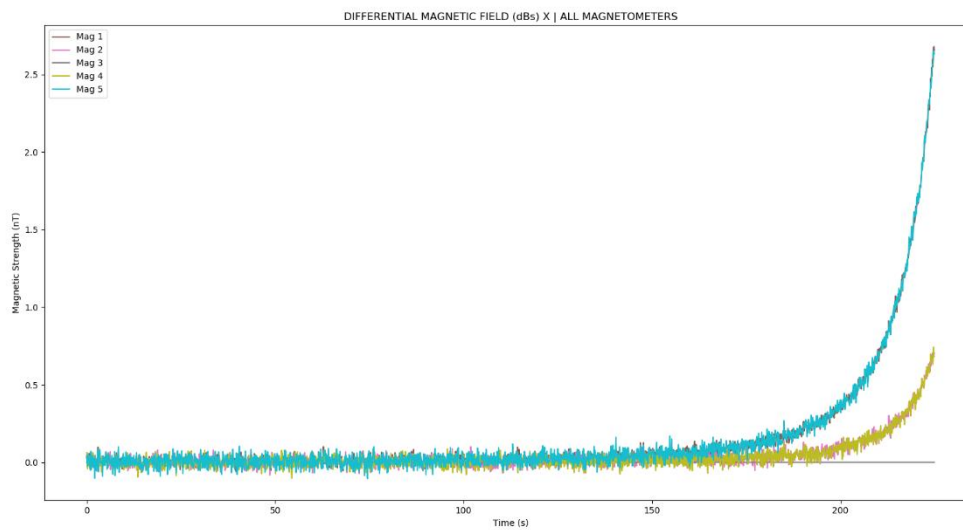
4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



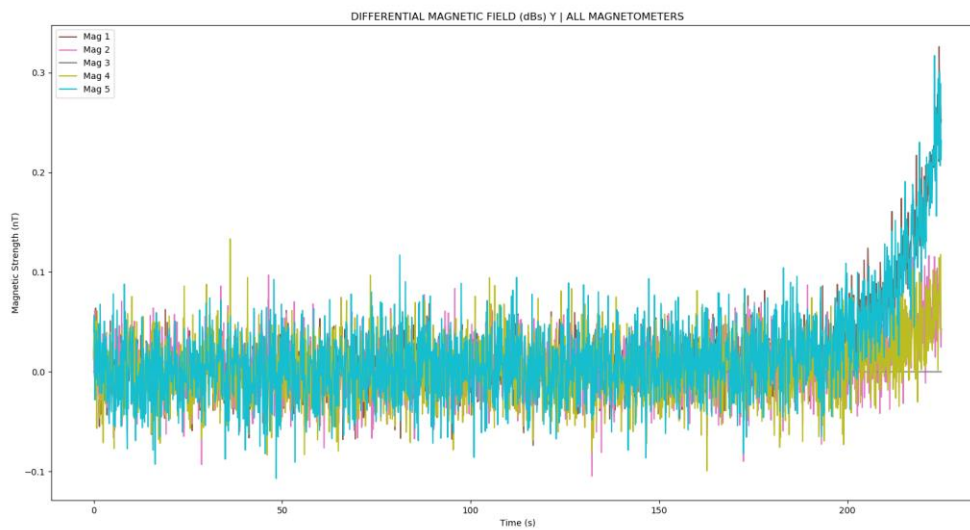
Εικόνα 27: Η συνισταμένη B_S του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Από τη συνισταμένη B_S του μαγνητικού πεδίου για όλες τις χρονικές στιγμές για όλα τα μαγνητόμετρα, παρατηρούμε την επικράτηση, όσον αφορά την τάξη μεγέθους, της συνιστώσας B_{S_z} λόγω του μεγαλύτερου γεωμαγνητικού πεδίου που παρατηρείται. Παράλληλα, είναι αντιληπτή η αντίστοιχη απόκλιση των αισθητήρων που βρίσκονται πιο μακριά από τον αισθητήρα αναφοράς (αισθητήρες 1 & 5), σε σχέση με αυτά που βρίσκονται πιο κοντά. Δηλαδή η επιρροή του μαγνητικού πεδίου του στόχου παρατηρείται ταχύτερα στους κοντινότερους αισθητήρες.

Υπολογίζοντας το διαφορικό μαγνητικό πεδίο (εξίσωση 3.10), δημιουργώντας δηλαδή σήματα απαλλαγμένα από το γεωμαγνητικό πεδίο, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:

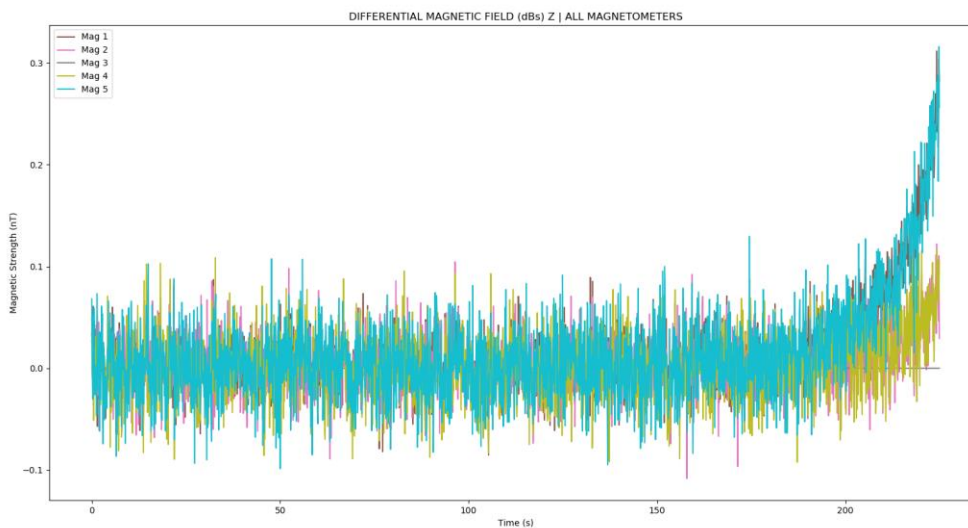


Εικόνα 28: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_x} της συνιστώσας B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

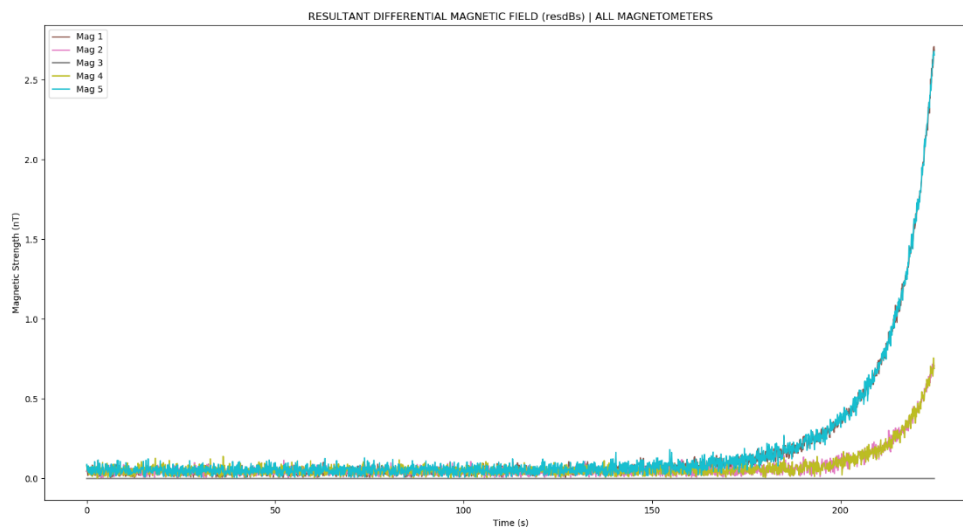


Εικόνα 29: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_y} της συνιστώσας B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



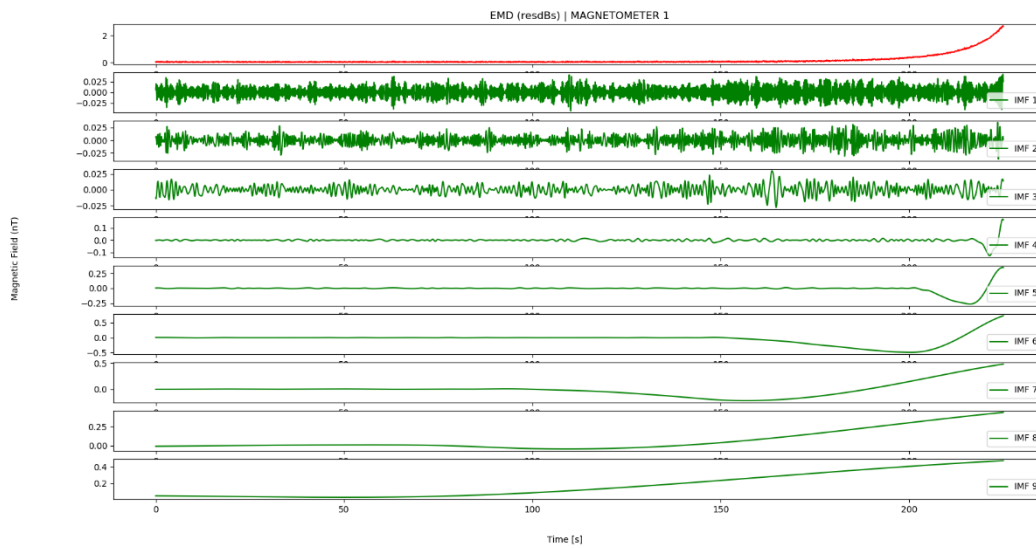
Εικόνα 30: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_z} της συνιστώσας B_{S_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



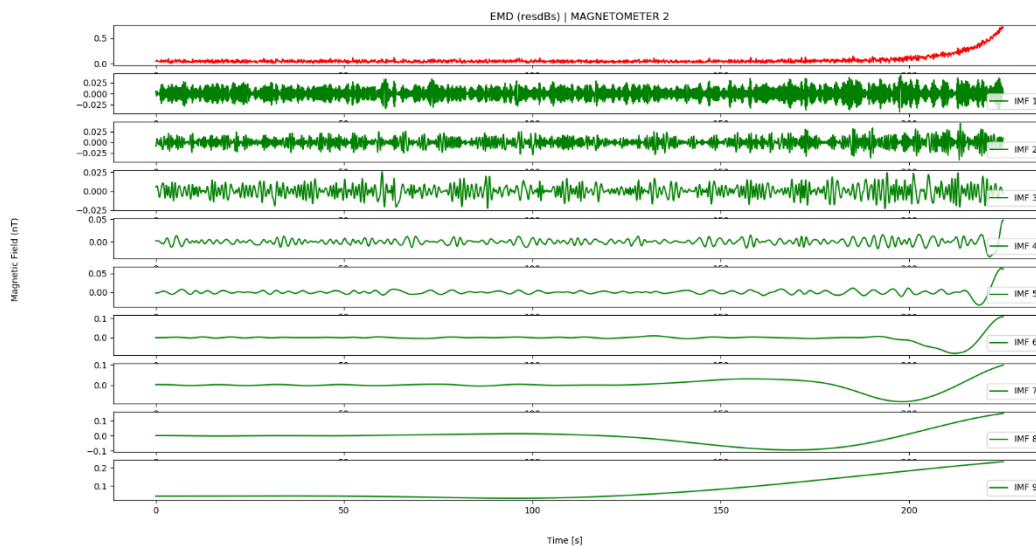
Εικόνα 31: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S της συνισταμένης B_S του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Η επιρροή του μαγνητικού στόχου ξεκινάει να γίνεται αντιληπτή (οπτικά) την χρονική στιγμή περίπου **150s** για τα μαγνητόμετρα που απέχουν περισσότερο από τον αισθητήρα αναφοράς και περίπου τη χρονική στιγμή **200s** για τους αισθητήρες που βρίσκονται πιο κοντά στον αισθητήρα αναφοράς.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της εμπειρικής αποσύνθεσης σε κάθε ένα από τα διαφορικά πεδία dB_{S_i} , προκύπτουν τα παρακάτω:

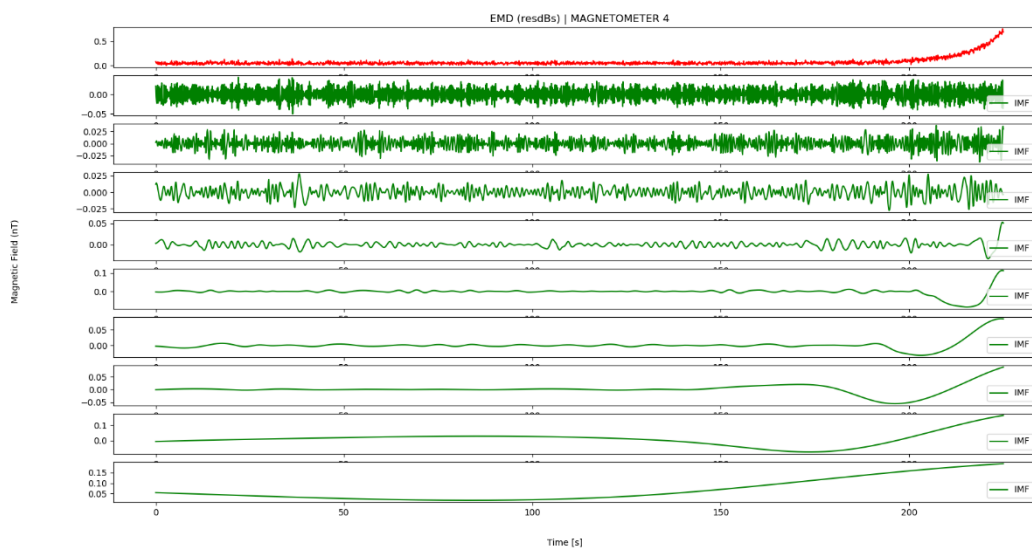


Εικόνα 32: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_1} της συνισταμένης B_{S_1} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

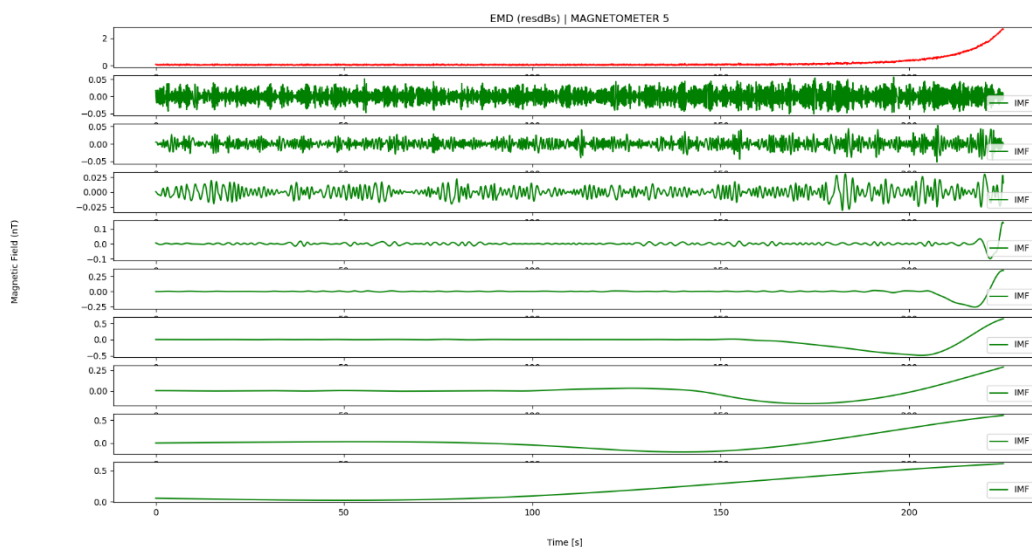


Εικόνα 33: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_2} της συνισταμένης B_{S_2} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

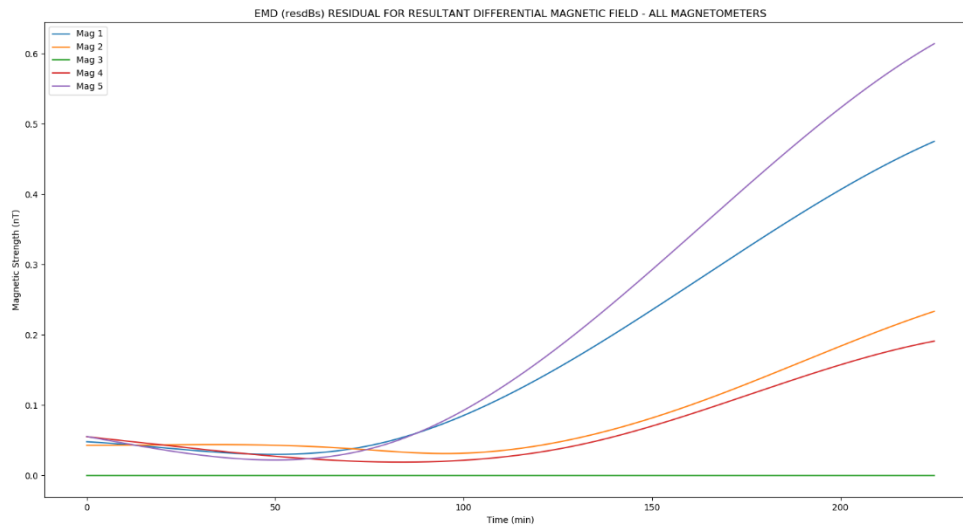


Εικόνα 34: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_4} της συνισταμένης B_{S_4} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 35: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_5} της συνισταμένης B_{S_5} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρατηρούμε ότι η τελευταία IMF δημιουργεί επιτυχώς μία καινούργια συνάρτηση απαλλαγμένη από το θόρυβο η οποία υποδηλώνει τη γραμμή τάσης που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου.



Εικόνα 36: Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S της συνισταμένης B_S για ελλειψοειδή στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου εμπειρικής αποσύνθεσης για κάθε διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_i} , παρατηρούμε παρόμοιες λύσεις σε μαγνητόμετρα που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς ως προς τη χρονική στιγμή αύξησης της κλίσης της γραμμής τάσης (τελευταία IMF). Θεωρούμε ότι από τη χρονική στιγμή αυτή έχουμε ανίχνευση του μαγνητικού στόχου. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καμπύλες για τους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς είναι παρόμοιες.

Με βάση τη μέθοδο υπολογισμού σημείου ανίχνευσης, κάθε αισθητήρας αναγνωρίζει πρώτη φορά το στόχο σε χρόνο που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Mag₁	Mag₂	Mag₄	Mag₅
91.1 s	118.9 s	111.5 s	91.7 s

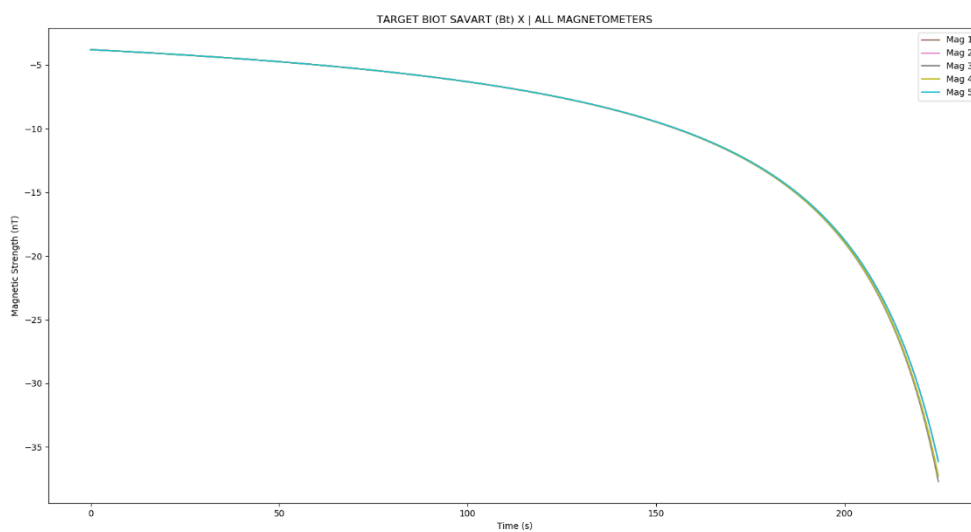
Πίνακας 6: Χρονική στιγμή ανίχνευσης ελλειψοειδή στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

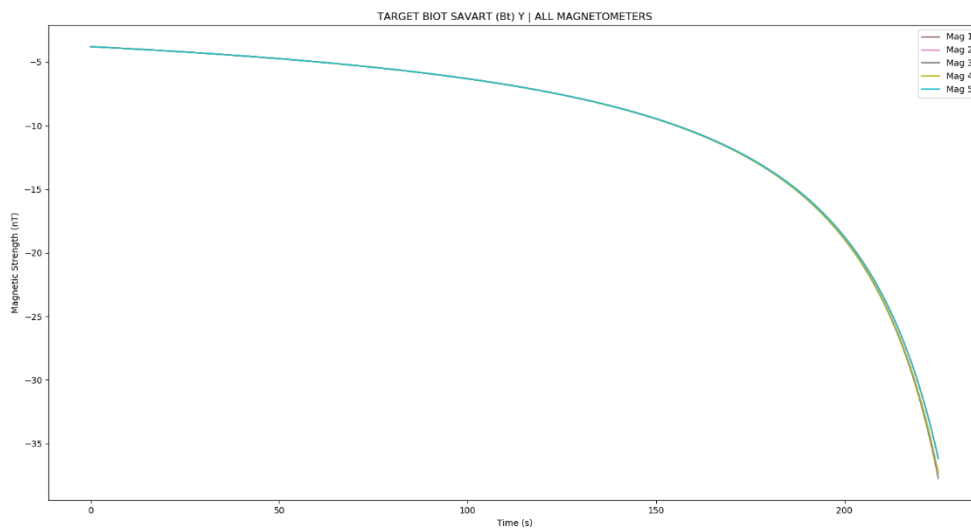
4.1.2 Σφαιρικός στόχος

Σύμφωνα με την κίνηση που εκτελεί το μαγνητικό σώμα και την μορφολογία του, η μαγνητική ροπή του στόχου για το σενάριο αυτό είναι ίση με $6.5 * (\sqrt{34}, \sqrt{34}, \sqrt{34}) Am^2$. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του σεναρίου.

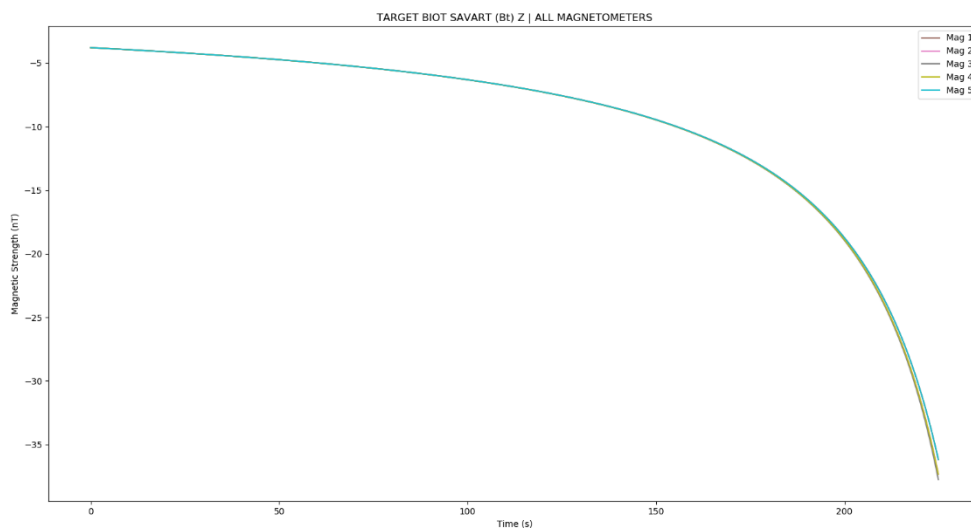
Με βάση το νόμο Biot-Savart, υπολογίζουμε τις συνιστώσες B_{T_x} , B_{T_y} , B_{T_z} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που ανιχνεύει η συστοιχία των 5 μαγνητόμετρων.



Εικόνα 37: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_x} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 38: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_y} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



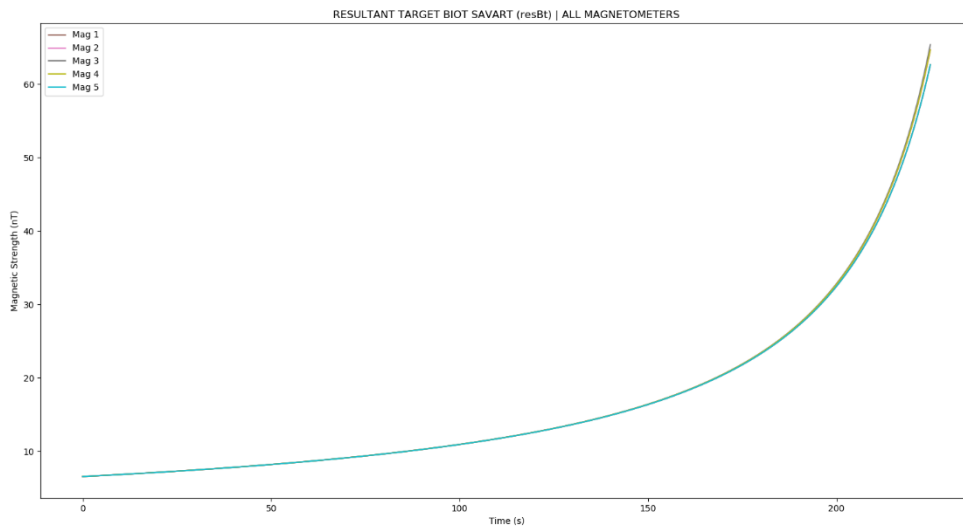
Εικόνα 39: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_z} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρατηρούμε ότι καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, έχουμε αύξηση του μαγνητικού πεδίου η οποία είναι παρόμοια στους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς. Στους κοντινότερους αισθητήρες προς τον αισθητήρα αναφορά η αύξηση αυτή παρατηρείται νωρίτερα.

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

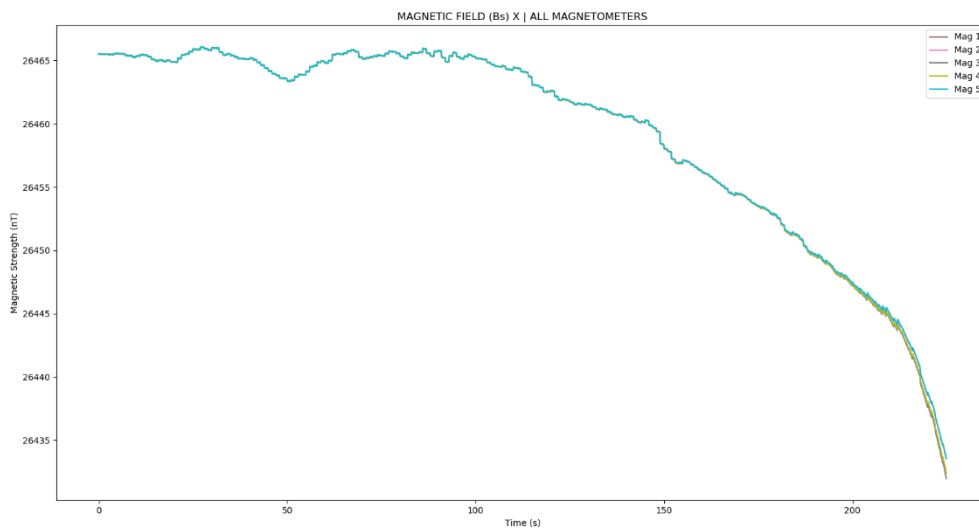
Οι αρνητικές τιμές οφείλονται στην κατεύθυνση του στόχου ο οποίος κινείται από τις θετικές τιμές του άξονα προς τις αρνητικές.

Δεν υπάρχει διαφορά στη μαγνητική ροπή κάθε συνιστώσας, επομένως το μέτρο της συνισταμένης επηρεάζεται το ίδιο και από τις τρεις συνιστώσες B_{T_x} , B_{T_y} , B_{T_z} (Εικόνα 40).

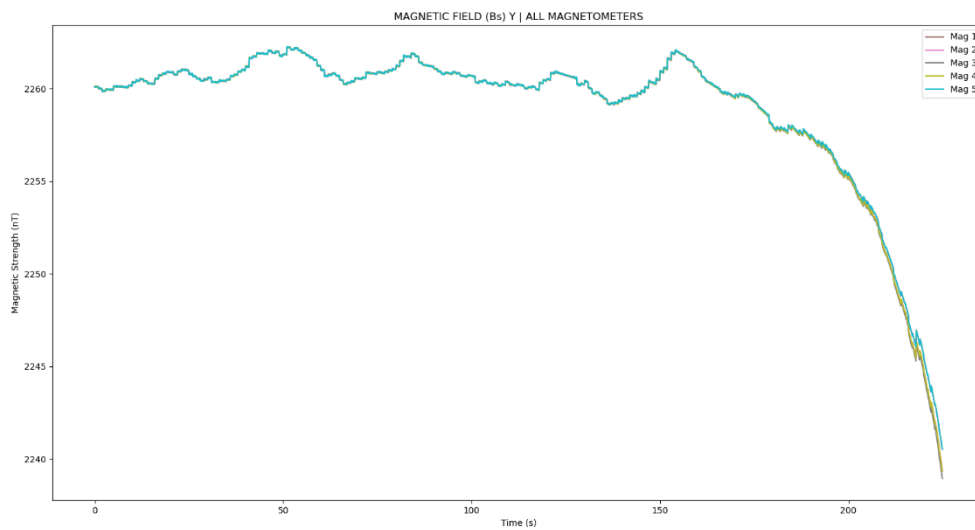


Εικόνα 40: Υπολογισμός της συνισταμένης B_T του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου για κάθε μία από τις συνιστώσες του B_{S_x} , B_{S_y} , B_{S_z} , δηλαδή τις τιμές που ανιχνεύουν οι αισθητήρες και οι οποίες αποτελούνται από το γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_i} , το θόρυβο B_{N_i} και το μαγνητικό πεδίο του στόχου B_{T_i} .

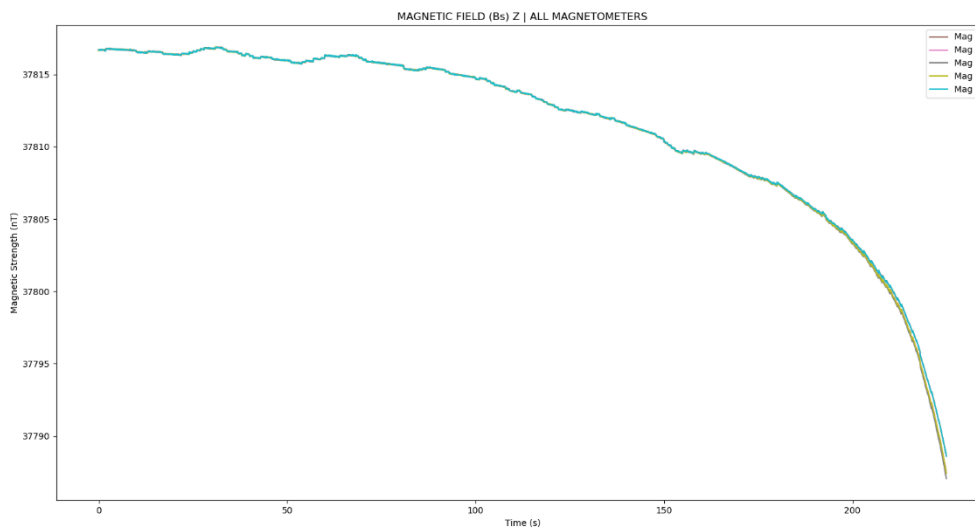


Εικόνα 41: Η συνιστώσα B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



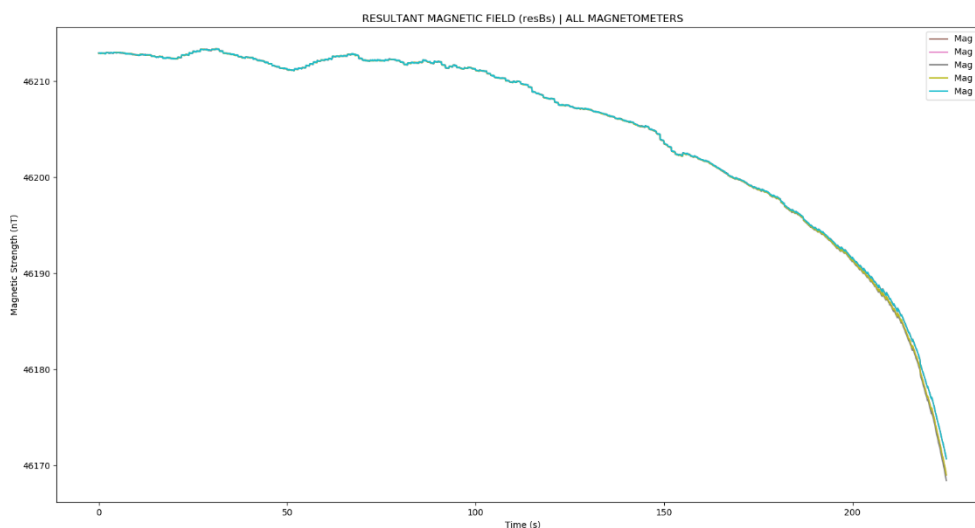
Εικόνα 42: Η συνιστώσα B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 43: Η συνιστώσα B_{S_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

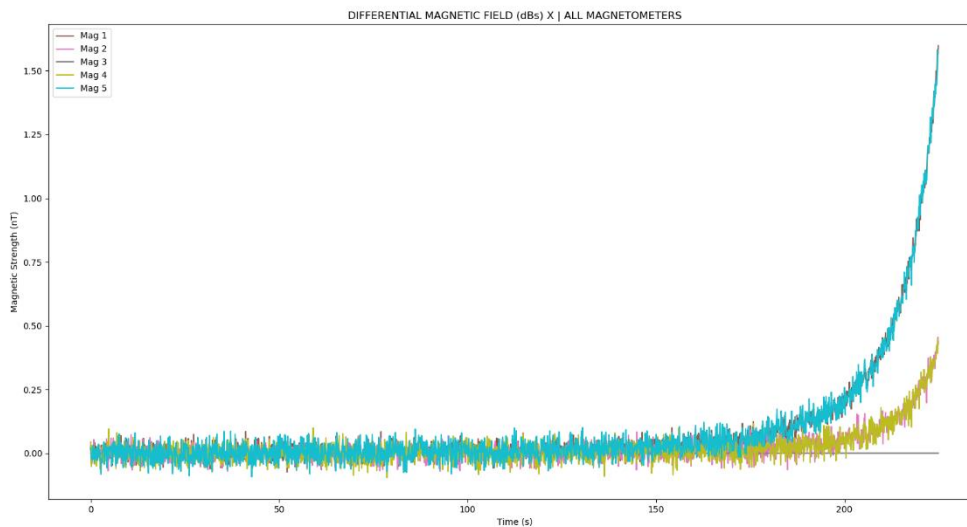
Στα διαγράμματα αυτά, παρατηρούμε ότι κυρίαρχο ρόλο παίζει το γεωμαγνητικό πεδίο, αφού είναι έως 8 τάξεις μεγαλύτερο από τον θόρυβο και έως 5 από το μαγνητικό πεδίο του στόχου. Ωστόσο, καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στο στόχο.



Εικόνα 44: Η συνισταμένη B_S του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

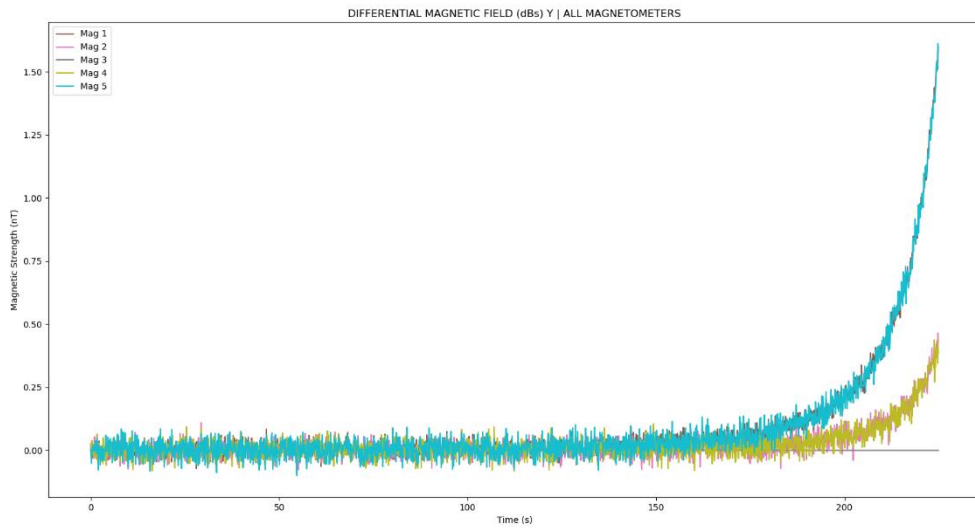
Από τη συνισταμένη B_S του μαγνητικού πεδίου για όλες τις χρονικές στιγμές για όλα τα μαγνητόμετρα, παρατηρούμε την επικράτηση, όσον αφορά την τάξη μεγέθους, της συνιστώσας B_{S_z} λόγω του μεγαλύτερου γεωμαγνητικού πεδίου που παρατηρείται. Παράλληλα, είναι αντιληπτή η αντίστοιχη απόκλιση των αισθητήρων που βρίσκονται πιο μακριά από τον αισθητήρα αναφοράς (αισθητήρες 1 & 5), σε σχέση με αυτά που βρίσκονται πιο κοντά. Δηλαδή η επιρροή του μαγνητικού πεδίου του στόχου παρατηρείται ταχύτερα στους κοντινότερους αισθητήρες.

Υπολογίζοντας το διαφορικό μαγνητικό πεδίο (εξίσωση 3.10), δημιουργώντας δηλαδή σήματα απαλλαγμένα από το γεωμαγνητικό πεδίο, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:

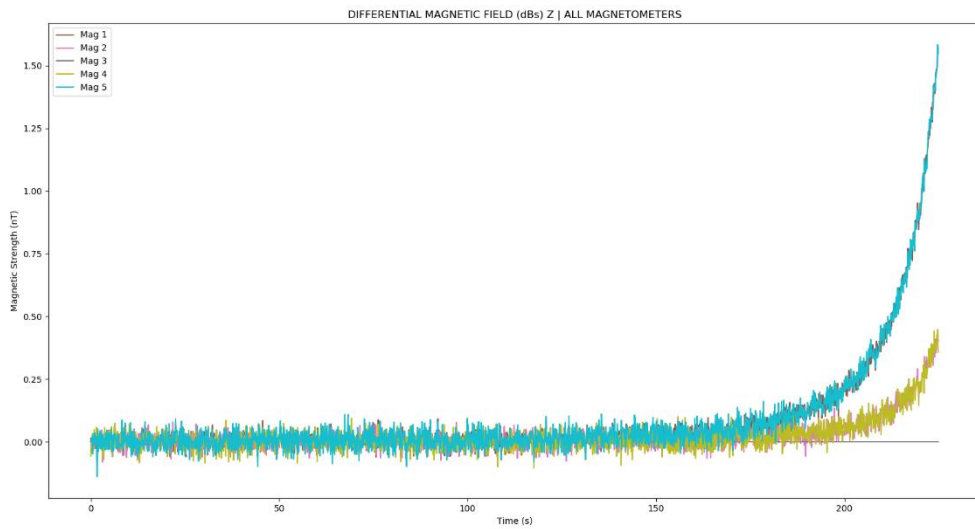


Εικόνα 45: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_x} της συνιστώσας B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

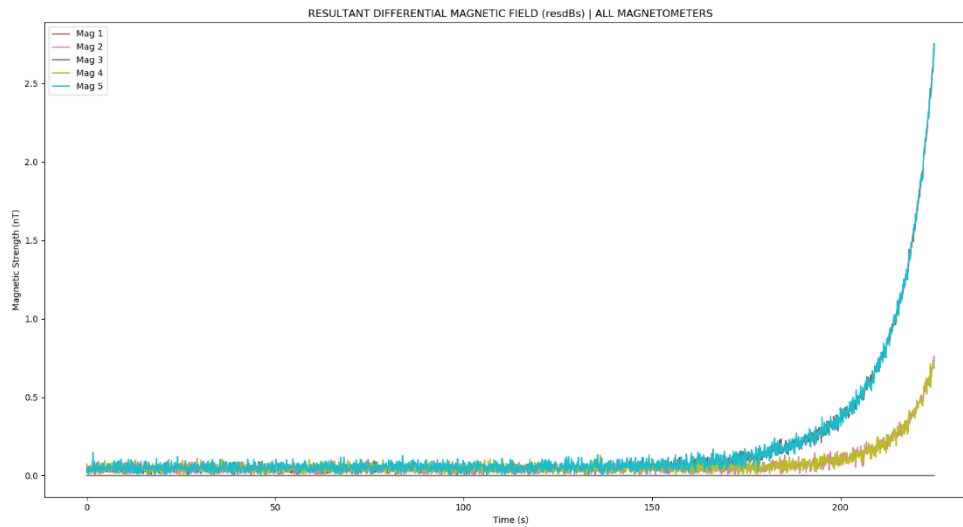
4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 46: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_y} της συνιστώσας B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 47: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_z} της συνιστώσας B_{S_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

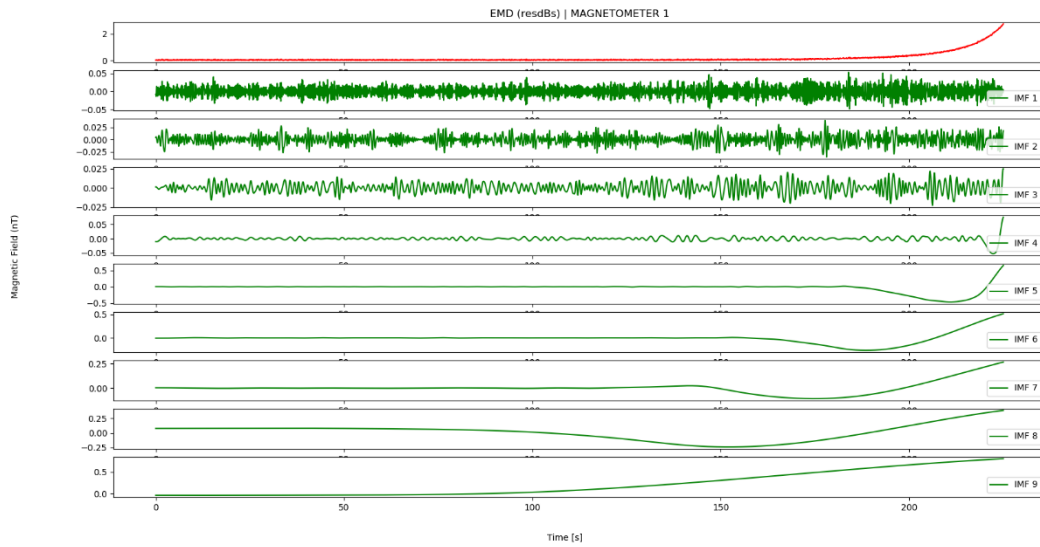


Εικόνα 48: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο $d\mathbf{B}_S$ της συνισταμένης \mathbf{B}_S του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

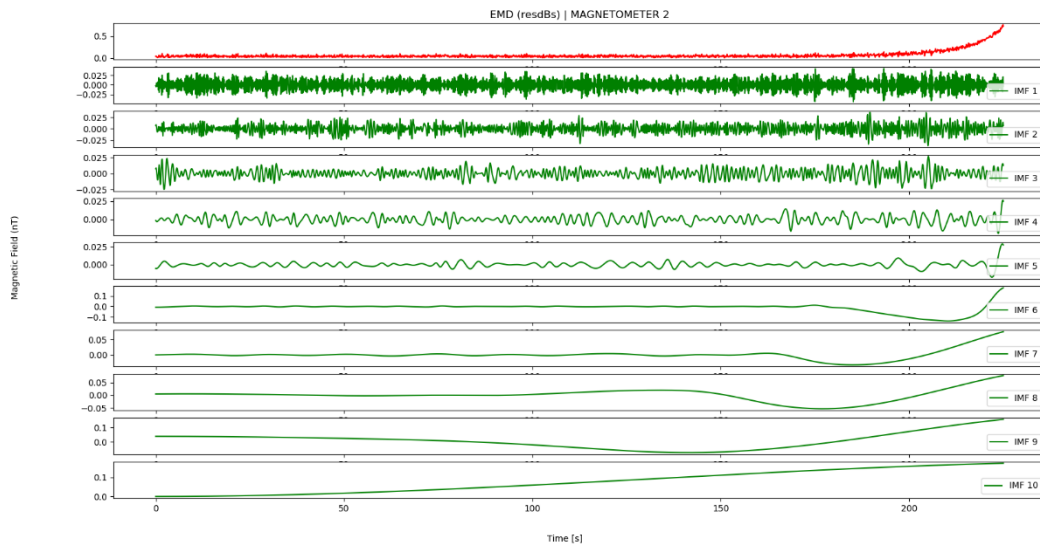
Η επιρροή του μαγνητικού στόχου ξεκινάει να γίνεται αντιληπτή (οπτικά) την χρονική στιγμή περίπου **150s** για τα μαγνητόμετρα που απέχουν περισσότερο από τον αισθητήρα αναφοράς και περίπου τη χρονική στιγμή **200s** για τους αισθητήρες που βρίσκονται πιο κοντά στον αισθητήρα αναφοράς.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της εμπειρικής αποσύνθεσης σε κάθε ένα από τα διαφορικά πεδία $d\mathbf{B}_{S_i}$, προκύπτουν τα παρακάτω:

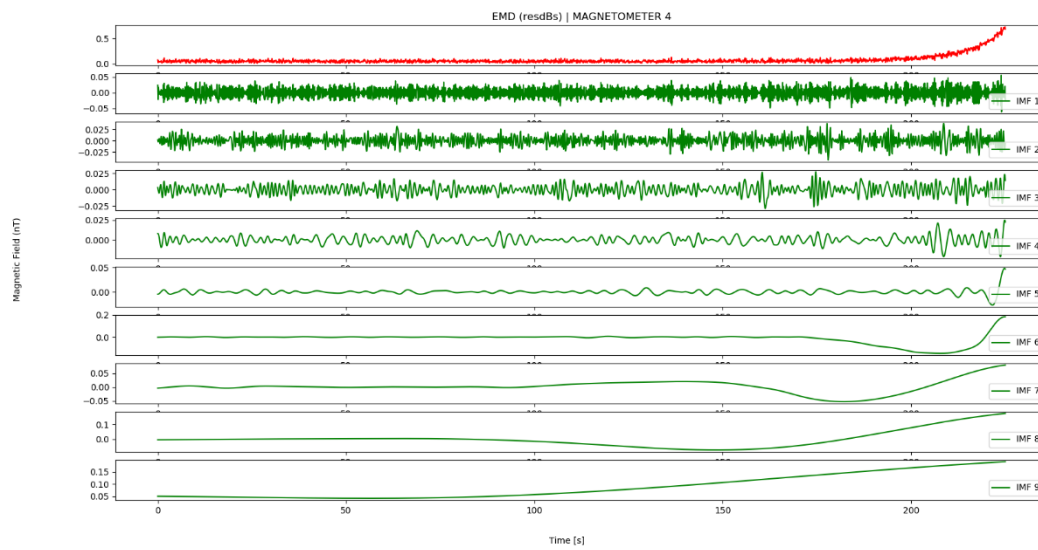
4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



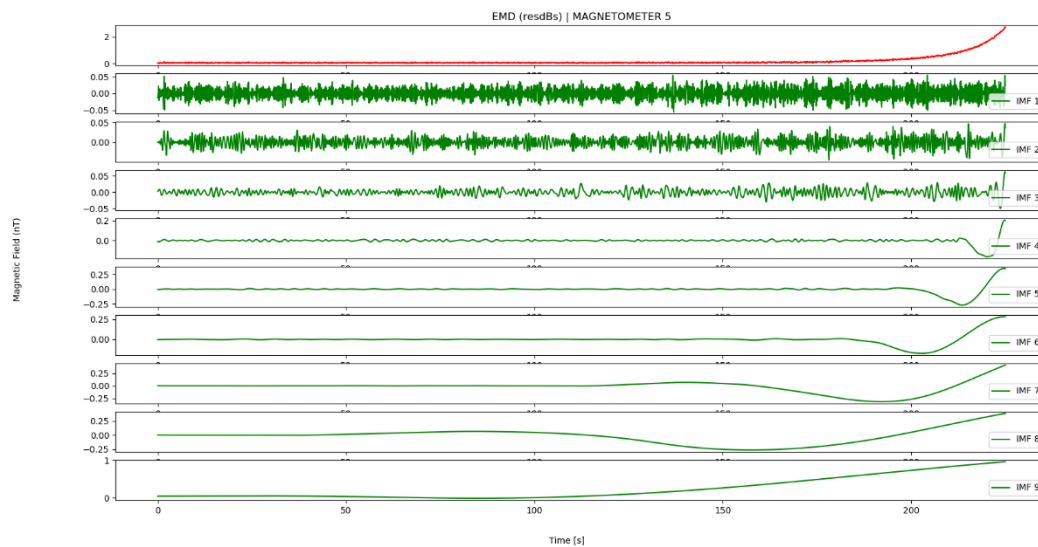
Εικόνα 49: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_1} της συνισταμένης B_{S_1} για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 50: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_2} της συνισταμένης B_{S_2} για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



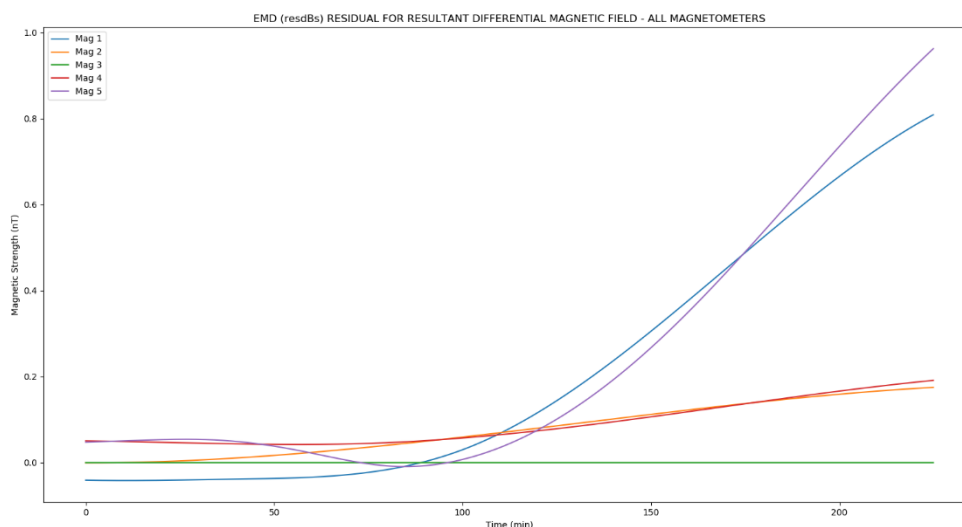
Εικόνα 51: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_4} της συνισταμένης B_{S_4} για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 52: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_5} της συνισταμένης B_{S_5} για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρατηρούμε την τελευταία IMF, που επιτυχώς δημιουργεί μία καινούργια συνάρτηση απαλλαγμένη από το θόρυβο και η οποία υποδηλώνει τη γραμμή τάσης που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου.

4.1 Κίνηση κάθετη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 53 Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S της συνισταμένης B_S για σφαιρικό στόχο που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου εμπειρικής αποσύνθεσης για κάθε διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_i} , παρατηρούμε παρόμοιες λύσεις σε μαγνητόμετρα που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς ως προς τη χρονική στιγμή αύξησης της κλίσης της γραμμής τάσης (τελευταία IMF). Θεωρούμε ότι από τη χρονική στιγμή αυτή έχουμε ανίχνευση του μαγνητικού στόχου. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καμπύλες για τους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς είναι παρόμοιες.

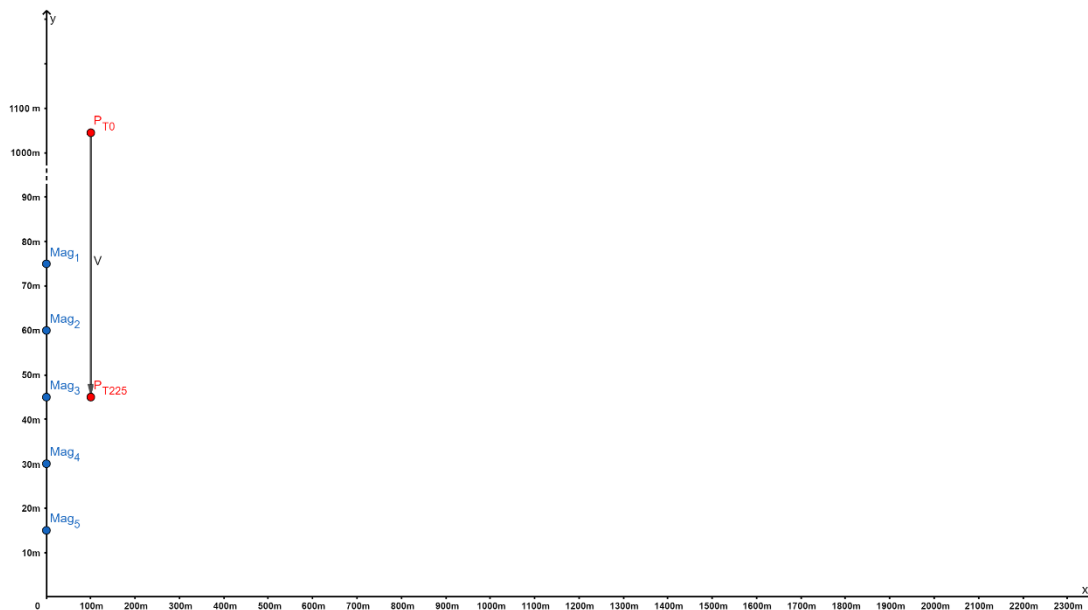
Με βάση τη μέθοδο υπολογισμού σημείου ανίχνευσης, κάθε αισθητήρας αναγνωρίζει πρώτη φορά το στόχο σε χρόνο που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Mag₁	Mag₂	Mag₄	Mag₅
104.4 s	64.1 s	94.8 s	115 s

Πίνακας 7: Χρονική στιγμή ανίχνευσης σφαιρικού στόχου που κινείται κάθετα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

Στο σενάριο αυτό, η κίνηση του στόχου είναι παράλληλη με την συστοιχία των αισθητήρων, ενώ σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 4 που ορίζονται οι θέσεις των αισθητήρων, προκύπτει η παρακάτω γεωμετρία συστοιχίας – στόχου.



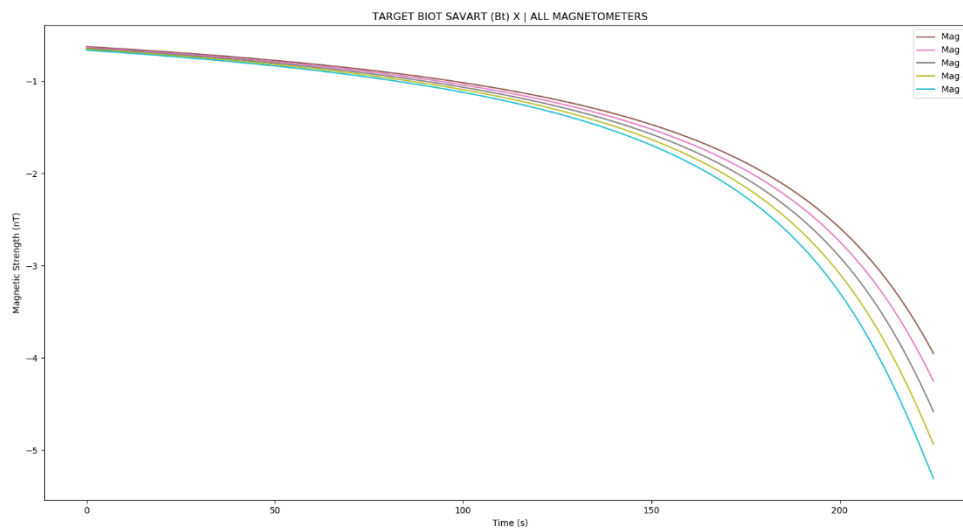
Εικόνα 54: Γεωμετρία προβλήματος για τα σενάρια όπου ο στόχος κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.2.1 Ελλειψοειδής στόχος

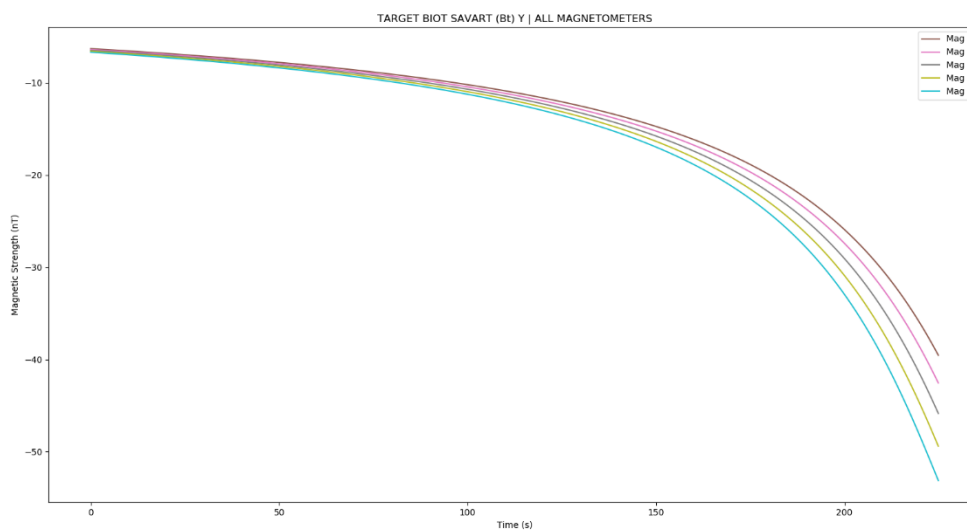
Σύμφωνα με την κίνηση που εκτελεί το μαγνητικό σώμα και την μορφολογία του, η μαγνητική ροπή του στόχου για το σενάριο αυτό είναι ίση με $6.5 * (1, 10, 1)Am^2$. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του σεναρίου.

Με βάση το νόμο Biot-Savart, υπολογίζουμε τις συνιστώσες B_{T_x} , B_{T_y} , B_{T_z} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδή στόχου που ανιχνεύει η συστοιχία των 5 μαγνητόμετρων.

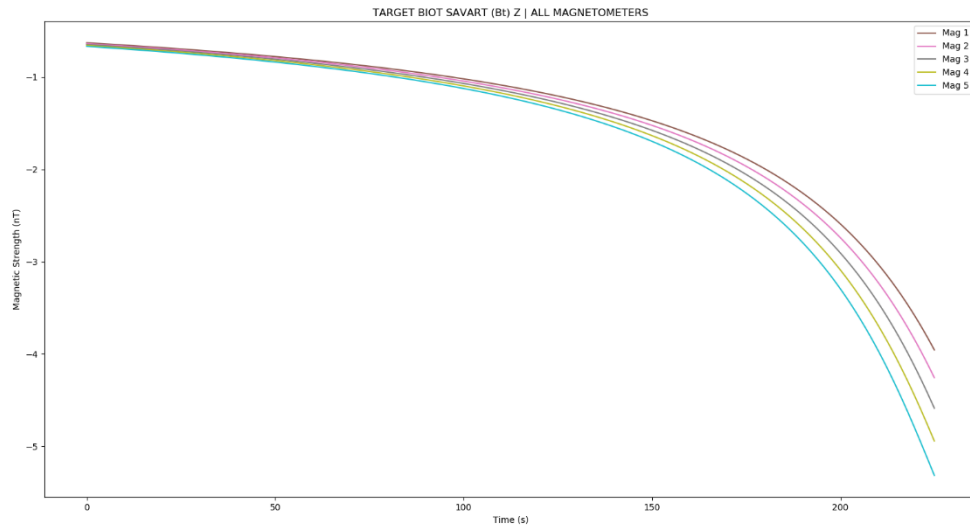
4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 55: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_x} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 56: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_y} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



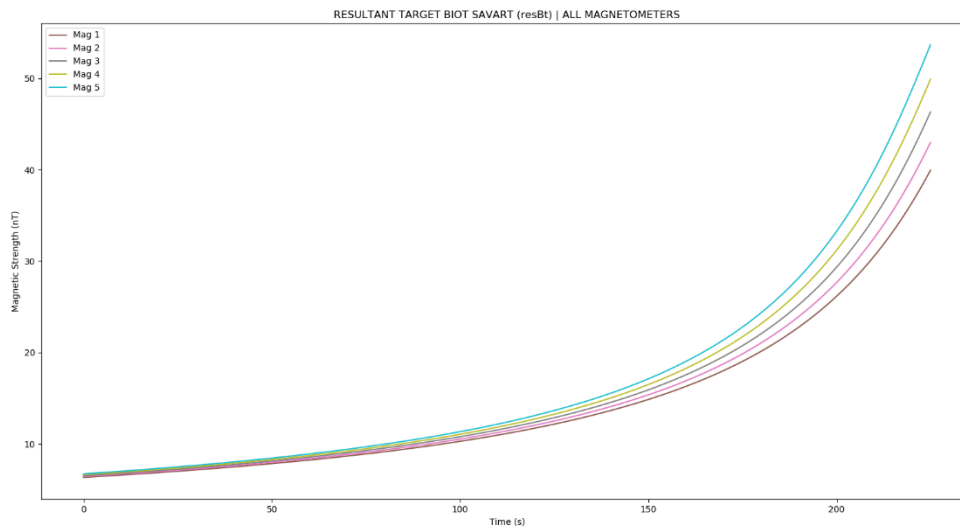
Εικόνα 57: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_z} του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρατηρούμε ότι καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, έχουμε αύξηση του μαγνητικού πεδίου η οποία είναι παρόμοια σε όλους τους αισθητήρες αλλά διαφέρει ως προς το χρόνο που παρουσιάζεται. Στους κοντινότερους αισθητήρες προς τον στόχο η αύξηση αυτή παρατηρείται ταχύτερα.

Οι αρνητικές τιμές οφείλονται στην κατεύθυνση του στόχου ο οποίος κινείται από τις θετικές τιμές του άξονα προς τις αρνητικές.

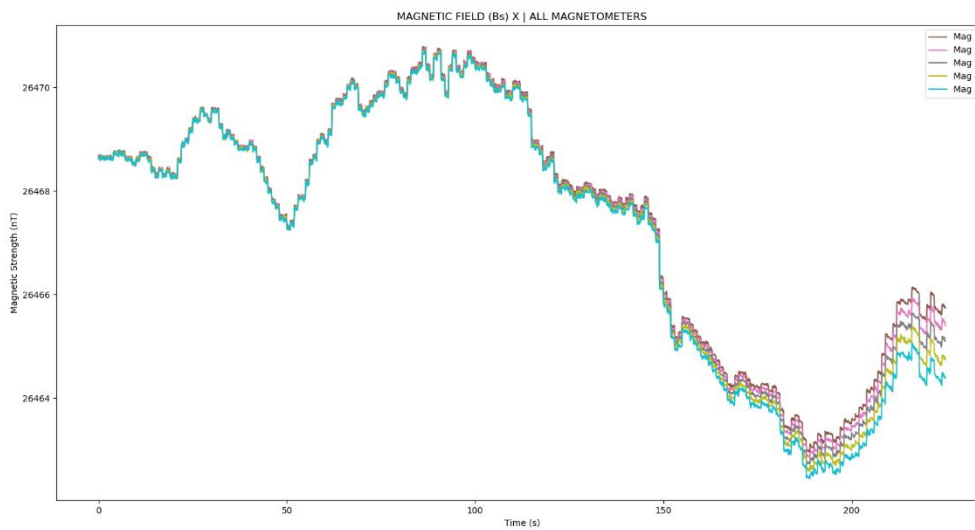
Η συνιστώσα B_{T_y} έχει 10πλάσια μαγνητική ροπή συγκριτικά με τις άλλες δύο συνιστώσες και καθορίζει το μέτρο της συνισταμένης

4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

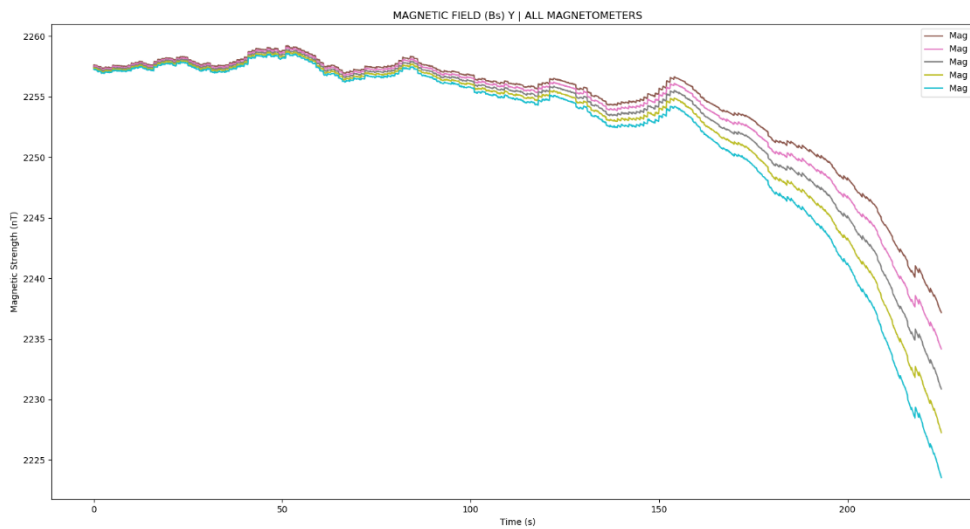


Εικόνα 58: Υπολογισμός της συνισταμένης B_T του μαγνητικού πεδίου του ελλειψοειδούς στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου για κάθε μία από τις συνιστώσες του B_{S_x} , B_{S_y} , B_{S_z} , δηλαδή τις τιμές που ανιχνεύουν οι αισθητήρες και οι οποίες αποτελούνται από το γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_i} , το θόρυβο B_{N_i} και το μαγνητικό πεδίο του στόχου B_{T_i} .

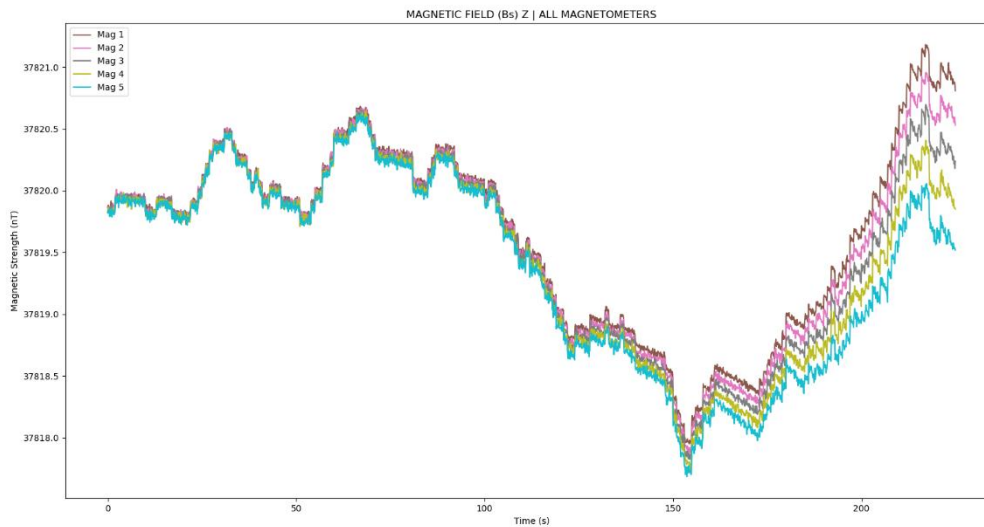


Εικόνα 59: Η συνιστώσα B_{s_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



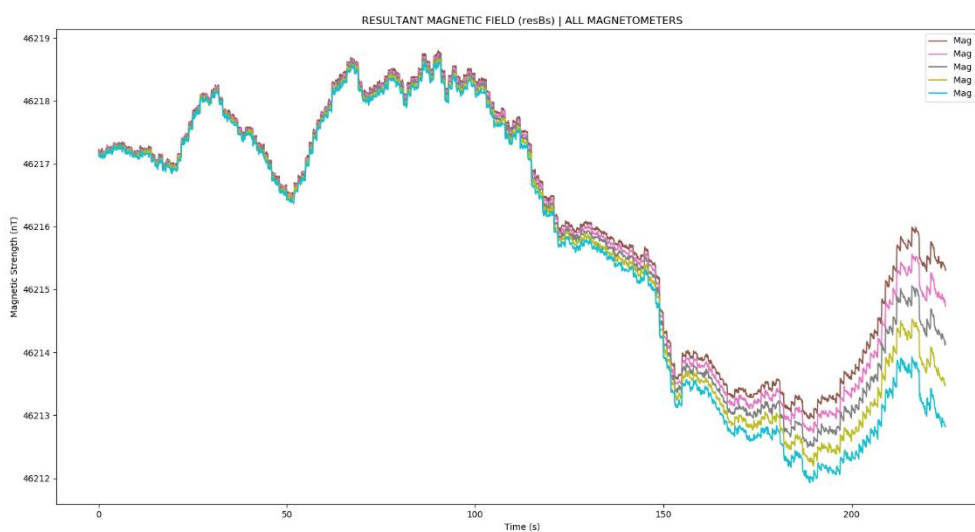
Εικόνα 60: Η συνιστώσα B_{s_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 61: Η συνιστώσα B_{s_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

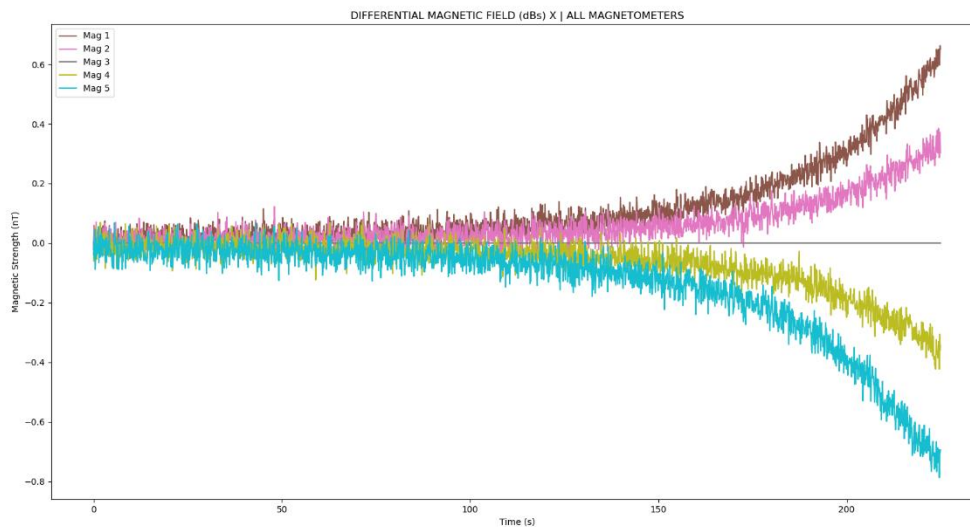
Στα διαγράμματα αυτά, παρατηρούμε ότι κυρίαρχο ρόλο παίζει το γεωμαγνητικό πεδίο, αφού είναι έως 8 τάξεις μεγαλύτερο από τον θόρυβο και έως 5 από το μαγνητικό πεδίο του στόχου. Ωστόσο, καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στο στόχο. Η τάση (trend) είναι ιδιαίτερα εμφανής στη συνιστώσα B_{s_y} .



Εικόνα 62: Η συνισταμένη B_s του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

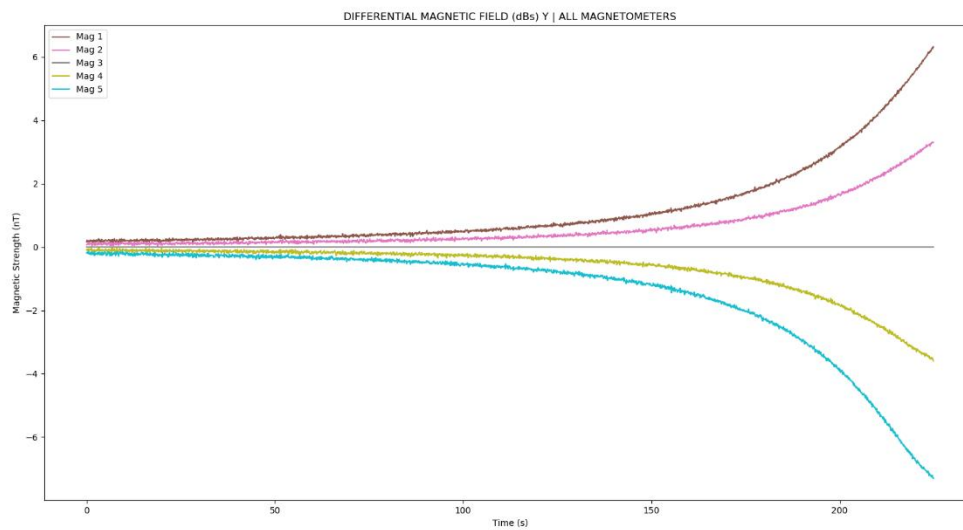
Από τη συνισταμένη B_S του μαγνητικού πεδίου για όλες τις χρονικές στιγμές για όλα τα μαγνητόμετρα, παρατηρούμε την επικράτηση, όσον αφορά την τάξη μεγέθους, της συνιστώσας B_{S_x} λόγω του μεγαλύτερου γεωμαγνητικού πεδίου που παρατηρείται. Παράλληλα, είναι αντιληπτή η ταχύτερη απόκλιση των αισθητήρων που βρίσκονται πιο κοντά στο στόχο σε σχέση με αυτούς που είναι πιο μακριά. Δηλαδή η επιρροή του μαγνητικού πεδίου του στόχου παρατηρείται ταχύτερα στους κοντινότερους αισθητήρες.

Υπολογίζοντας το διαφορικό μαγνητικό πεδίο (εξίσωση 3.10), δημιουργώντας δηλαδή σήματα απαλλαγμένα από το γεωμαγνητικό πεδίο, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:

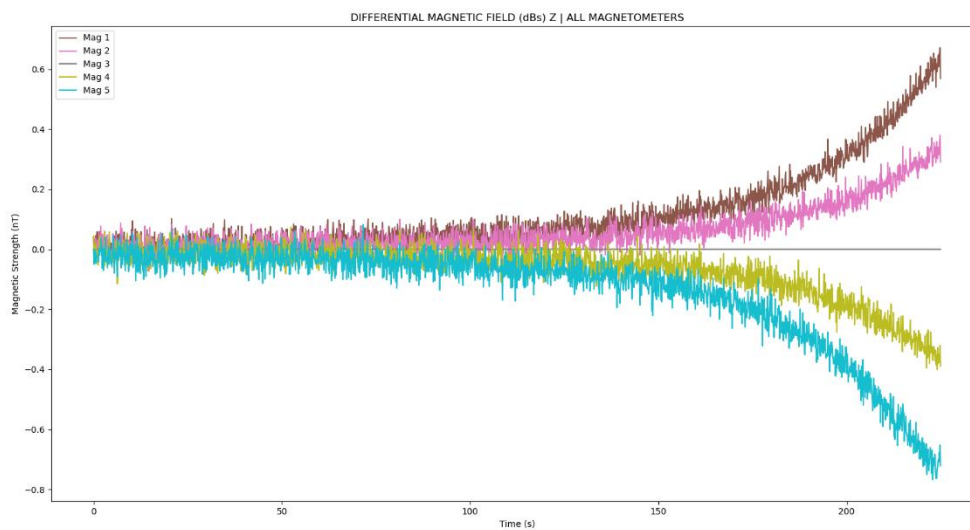


Εικόνα 63: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_x} της συνιστώσας B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

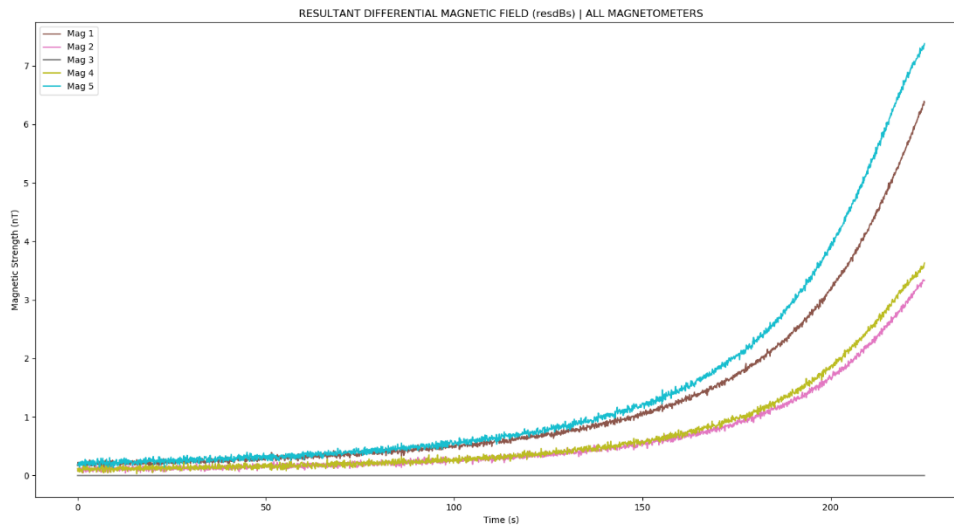
4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 64: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_y} της συνιστώσας B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 65: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_z} της συνιστώσας B_{S_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

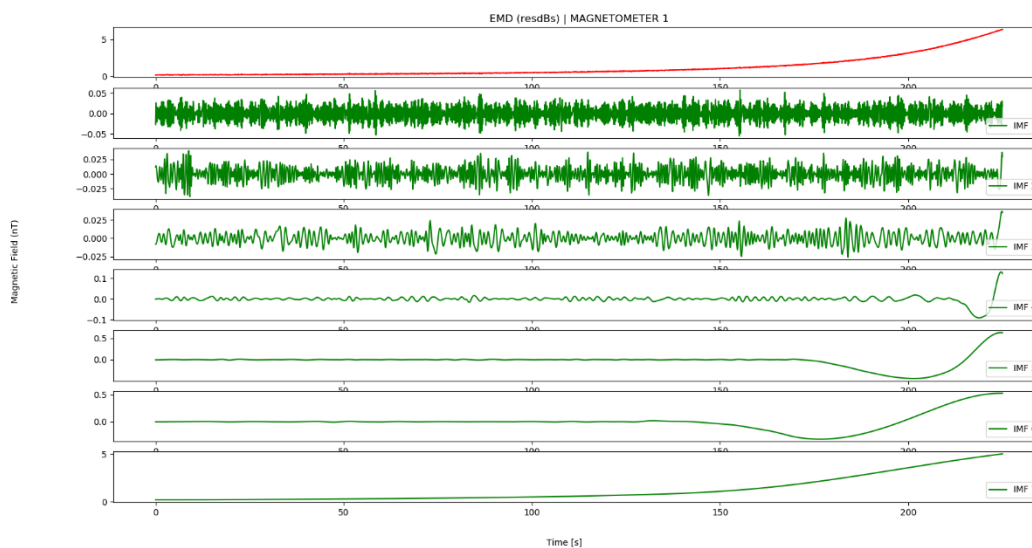


Εικόνα 66: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο $d\mathbf{B}_S$ της συνισταμένης \mathbf{B}_S του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

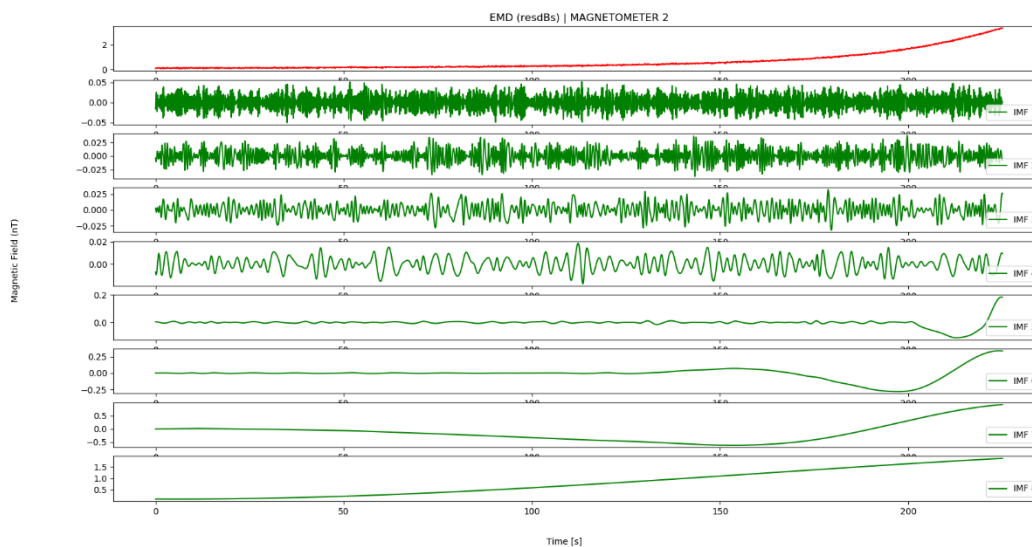
Η επιρροή του μαγνητικού στόχου ξεκινάει να γίνεται αντιληπτή (οπτικά) την χρονική στιγμή περίπου **80s** για τα μαγνητόμετρα που απέχουν περισσότερο από τον αισθητήρα αναφοράς και περίπου τη χρονική στιγμή **100s** για τους αισθητήρες που βρίσκονται πιο κοντά στον αισθητήρα αναφοράς.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της εμπειρικής αποσύνθεσης σε κάθε ένα από τα διαφορικά πεδία $d\mathbf{B}_{S_i}$, προκύπτουν τα παρακάτω:

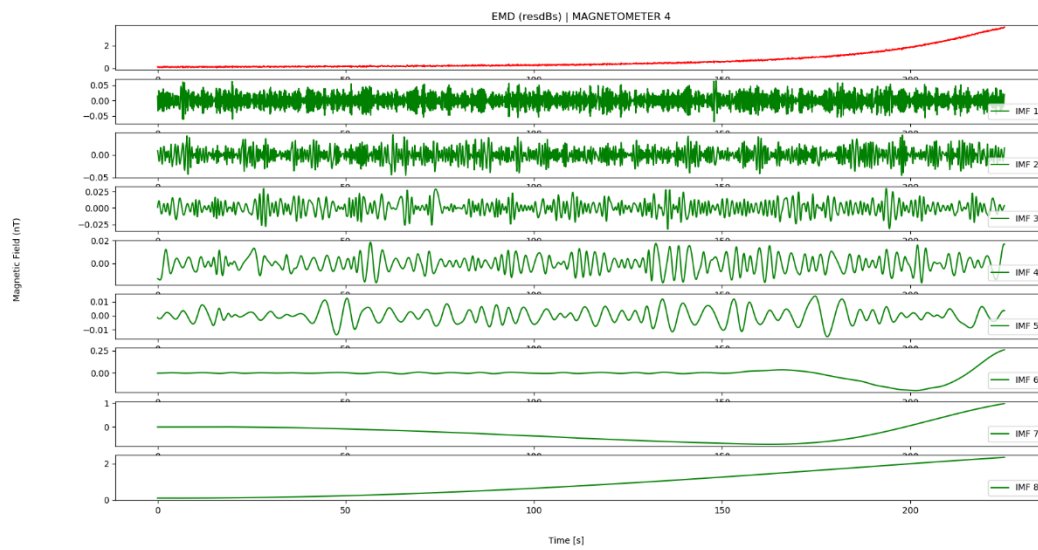
4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



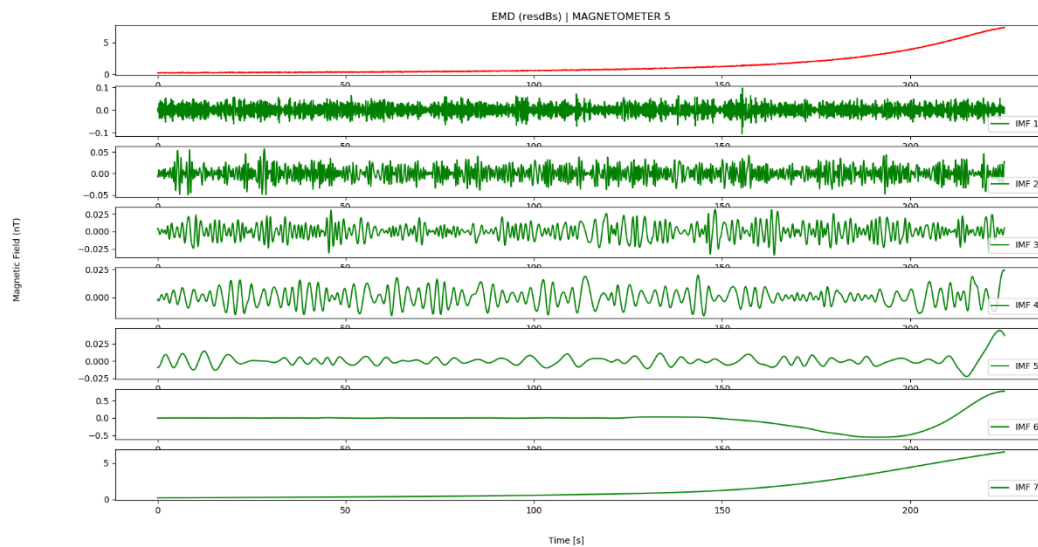
Εικόνα 67: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_1} της συνισταμένης B_{S_1} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 68: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_2} της συνισταμένης B_{S_2} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



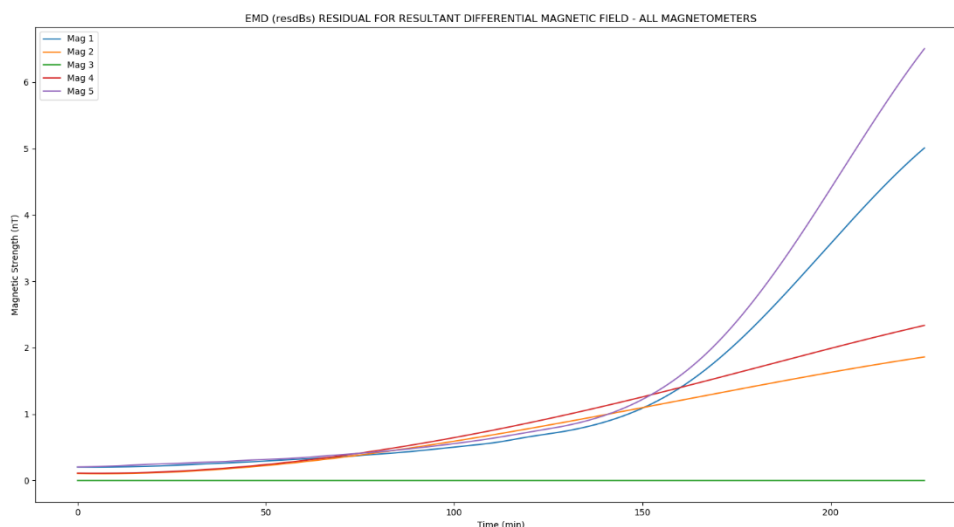
Εικόνα 69: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_4} της συνισταμένης B_{S_4} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 70: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_5} της συνισταμένης B_{S_5} για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρατηρούμε ότι στην τελευταία IMF δημιουργείται επιτυχώς μία καινούργια συνάρτηση απαλλαγμένη από το θόρυβο, η οποία υποδηλώνει τη γραμμή τάσης που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου.

4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 71: Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S της συνισταμένης B_S για ελλειψοειδή στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου εμπειρικής αποσύνθεσης για κάθε διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_i} , παρατηρούμε παρόμοιες λύσεις σε μαγνητόμετρα που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς ως προς τη χρονική στιγμή αύξησης της κλίσης της γραμμής τάσης (τελευταία IMF). Θεωρούμε ότι από τη χρονική στιγμή αυτή έχουμε ανίχνευση του μαγνητικού στόχου. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καμπύλες για τους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς είναι παρόμοιες.

Με βάση τη μέθοδο υπολογισμού σημείου ανίχνευσης, κάθε αισθητήρας αναγνωρίζει πρώτη φορά το στόχο σε χρόνο που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Mag₁	Mag₂	Mag₄	Mag₅
145.7 s	80.2 s	93.7 s	148.9 s

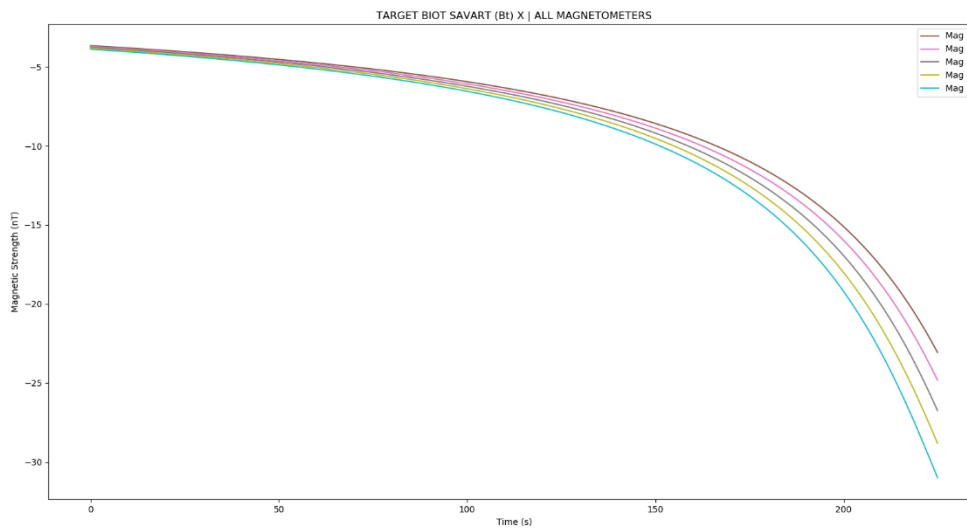
Πίνακας 8: Χρονική στιγμή ανίχνευσης ελλειψοειδή στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.2.2 Σφαιρικός στόχος

Σύμφωνα με την κίνηση που εκτελεί το μαγνητικό σώμα και την μορφολογία του, η μαγνητική ροπή του στόχου για το σενάριο αυτό είναι ίση με $6.5 * (\sqrt{34}, \sqrt{34}, \sqrt{34}) Am^2$.

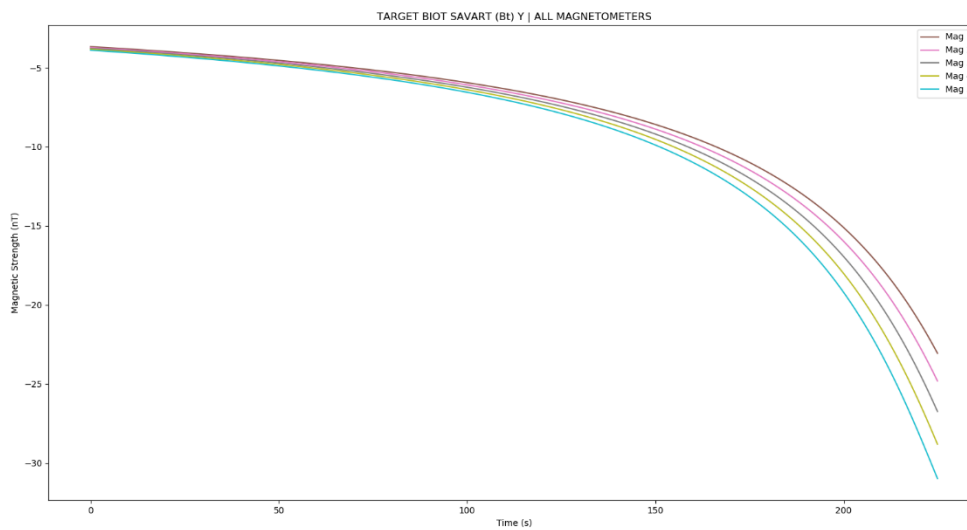
Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του σεναρίου.

Με βάση το νόμο Biot-Savart, υπολογίζουμε τις συνιστώσες $B_{T_x}, B_{T_y}, B_{T_z}$ του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που ανιχνεύει η συστοιχία των 5 μαγνητόμετρων.

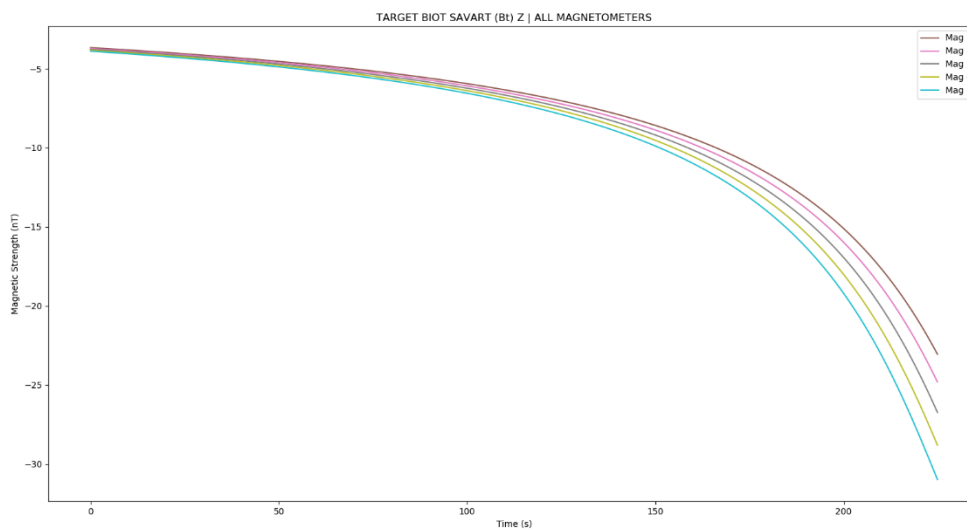


Εικόνα 72: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_x} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



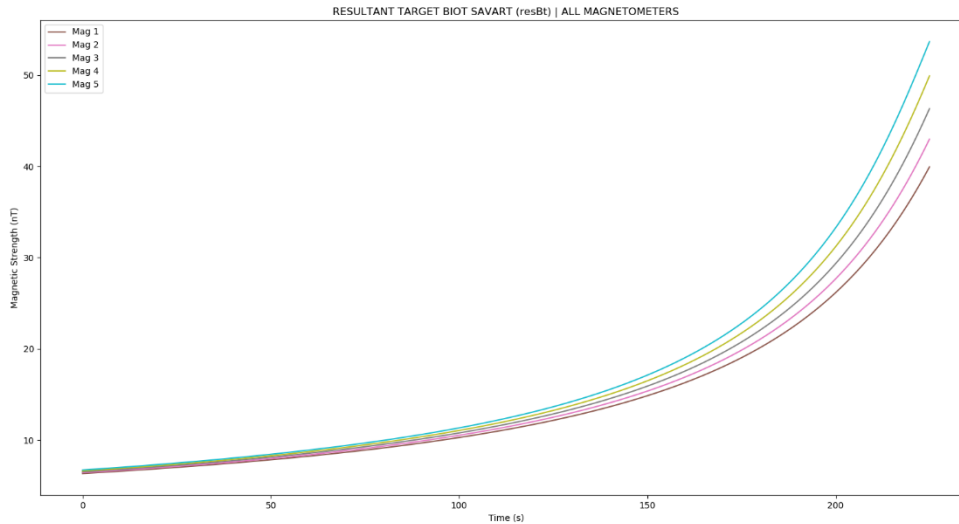
Εικόνα 73: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_y} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 74: Υπολογισμός της συνιστώσας B_{T_z} του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρατηρούμε ότι καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, έχουμε αύξηση του μαγνητικού πεδίου η οποία είναι παρόμοια σε όλους τους αισθητήρες αλλά διαφέρει ως προς το χρόνο που παρουσιάζεται. Στους κοντινότερους αισθητήρες προς τον στόχο η αύξηση αυτή παρατηρείται ταχύτερα.

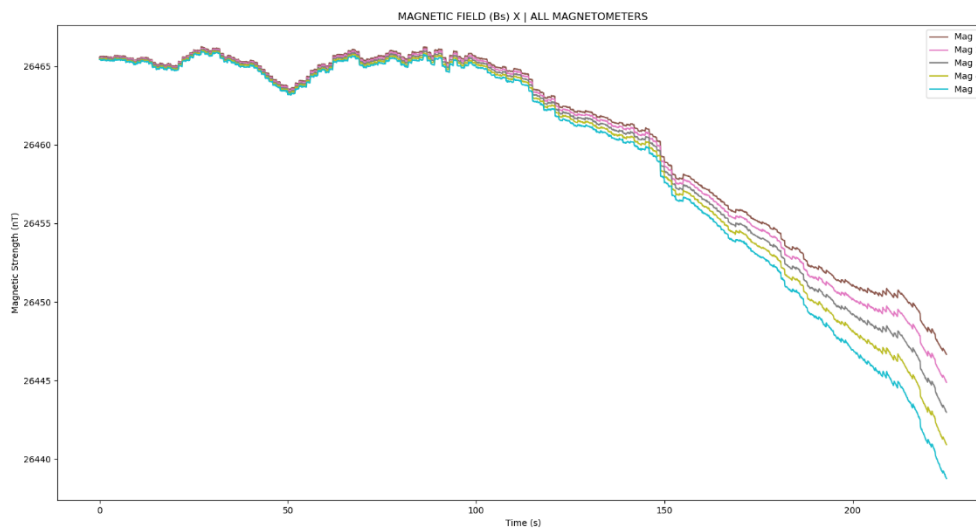
Οι αρνητικές τιμές οφείλονται στην κατεύθυνση του στόχου ο οποίος κινείται από τις θετικές τιμές του άξονα προς τις αρνητικές.



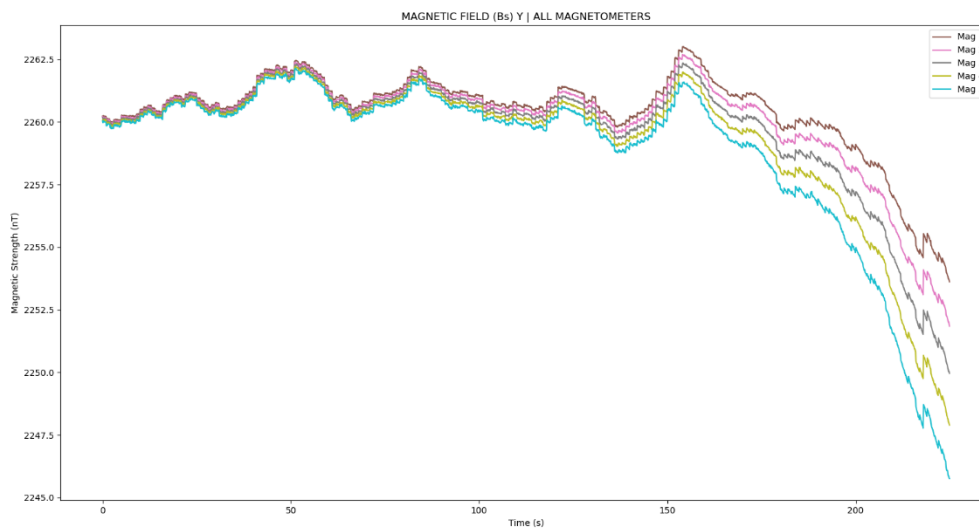
Εικόνα 75: Υπολογισμός της συνισταμένης B_T του μαγνητικού πεδίου του σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y,z) της διάταξης αισθητήρων

Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου για κάθε μία από τις συνιστώσες του B_{S_x} , B_{S_y} , B_{S_z} , δηλαδή τις τιμές που ανιχνεύουν οι αισθητήρες και οι οποίες αποτελούνται από το γεωμαγνητικό πεδίο B_{G_i} , το θόρυβο B_{N_i} και το μαγνητικό πεδίο του στόχου B_{T_i} .

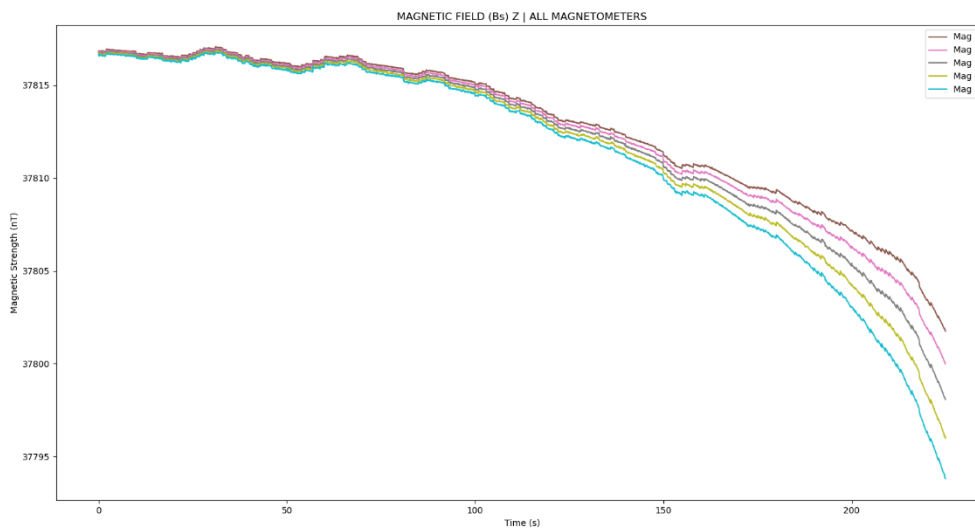
4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



Εικόνα 76: Η συνιστώσα B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

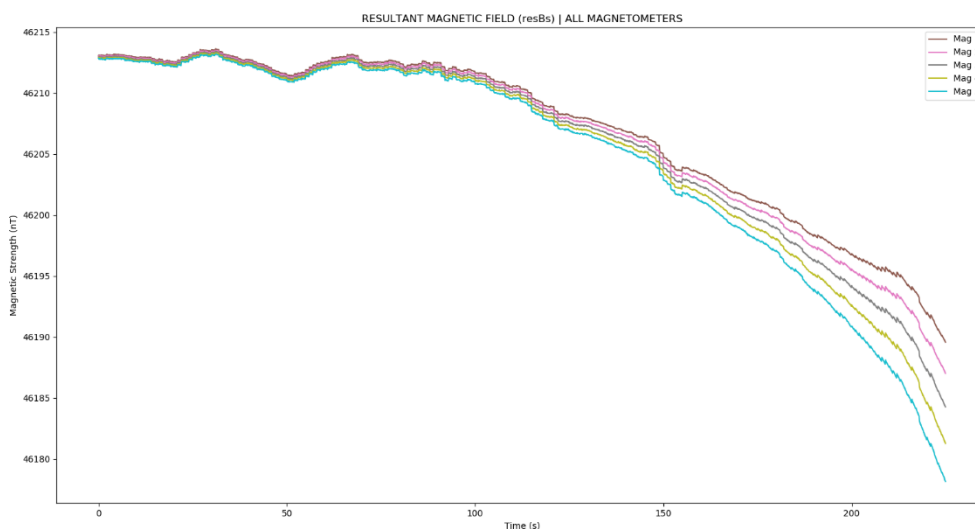


Εικόνα 77: Η συνιστώσα B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 78: Η συνιστώσα B_{s_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Στα διαγράμματα αυτά, παρατηρούμε ότι κυρίαρχο ρόλο παίζει το γεωμαγνητικό πεδίο, αφού είναι έως 8 τάξεις μεγαλύτερο από τον θόρυβο και έως 5 από το μαγνητικό πεδίο του στόχου. Ωστόσο, καθώς ο στόχος πλησιάζει τη συστοιχία των αισθητήρων, ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στο στόχο.

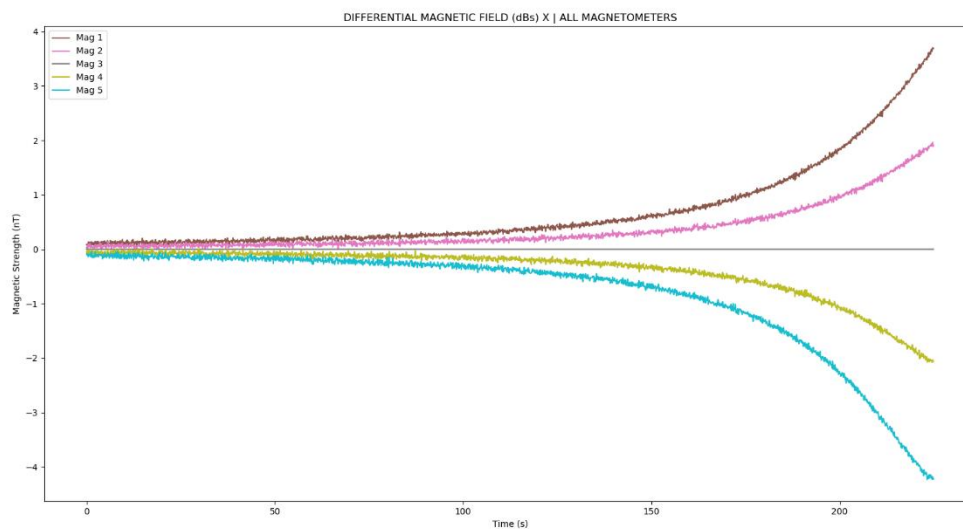


Εικόνα 79: Η συνισταμένη B_s του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

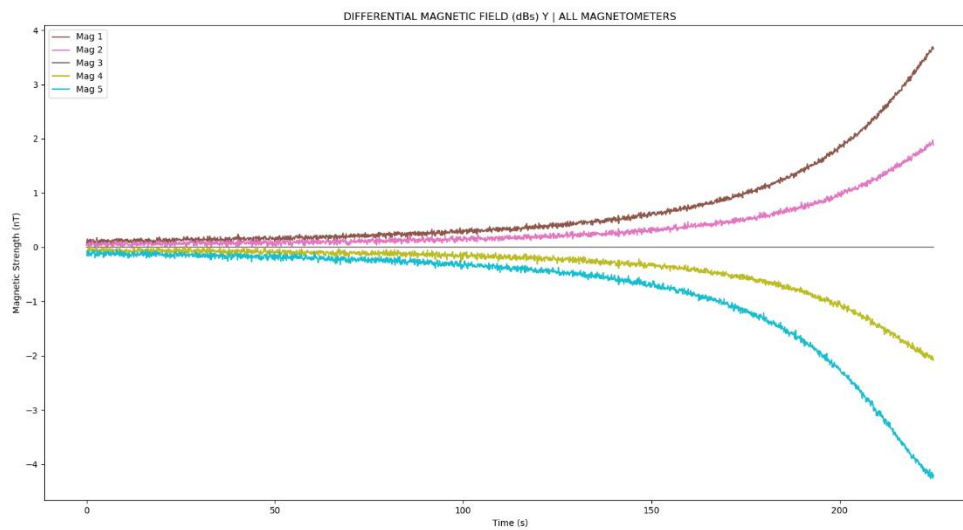
4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

Από τη συνισταμένη B_S του μαγνητικού πεδίου για όλες τις χρονικές στιγμές για όλα τα μαγνητόμετρα, παρατηρούμε την επικράτηση, όσον αφορά την τάξη μεγέθους, της συνιστώσας B_{S_x} λόγω του μεγαλύτερου γεωμαγνητικού πεδίου που παρατηρείται. Παράλληλα, είναι αντιληπτή η ταχύτερη απόκλιση των αισθητήρων που βρίσκονται πιο κοντά στο στόχο σε σχέση με αυτούς που είναι πιο μακριά. Δηλαδή η επιρροή του μαγνητικού πεδίου του στόχου παρατηρείται ταχύτερα στους κοντινότερους αισθητήρες.

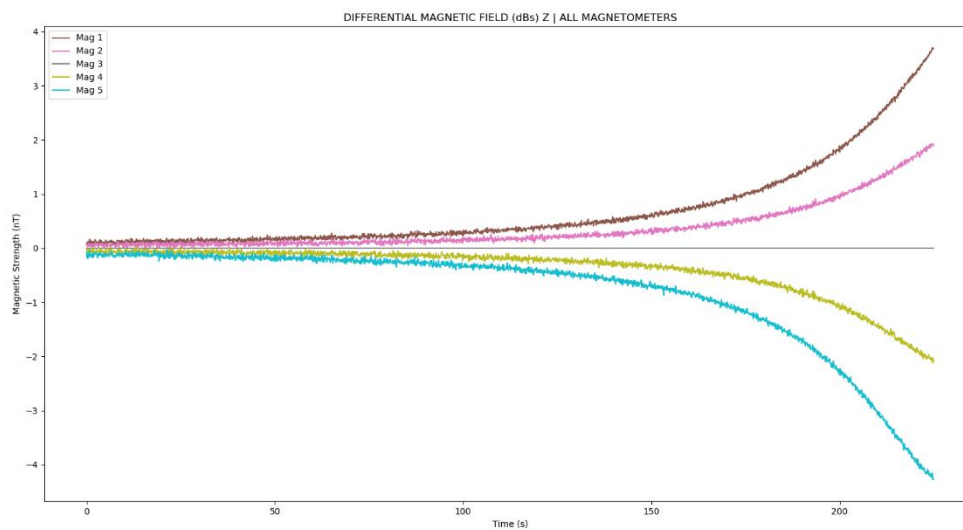
Υπολογίζοντας το διαφορικό μαγνητικό πεδίο (εξίσωση 3.10), δημιουργώντας δηλαδή σήματα απαλλαγμένα από το γεωμαγνητικό πεδίο, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 80: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_x} της συνιστώσας B_{S_x} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

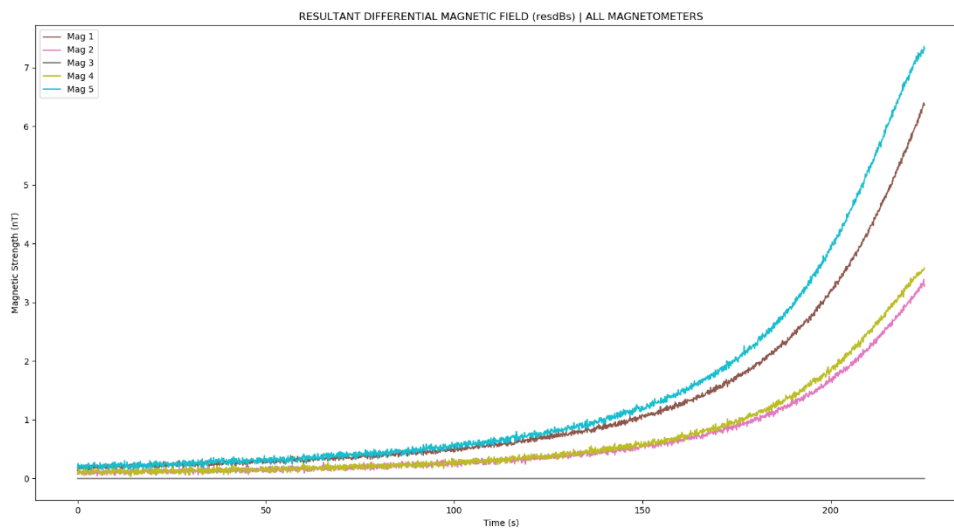


Εικόνα 81: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_y} της συνιστώσας B_{S_y} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 82: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_z} της συνιστώσας B_{S_z} του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

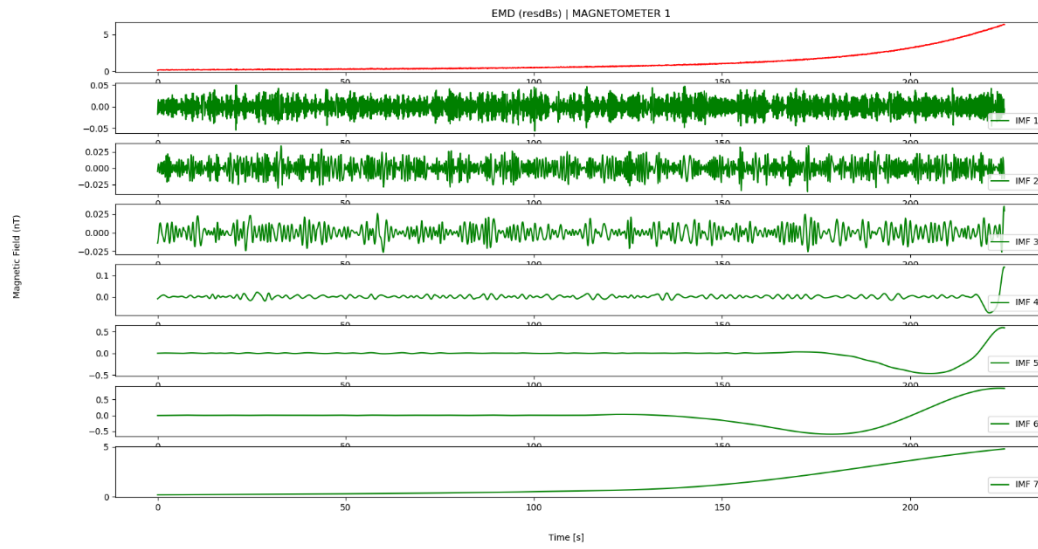
4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων



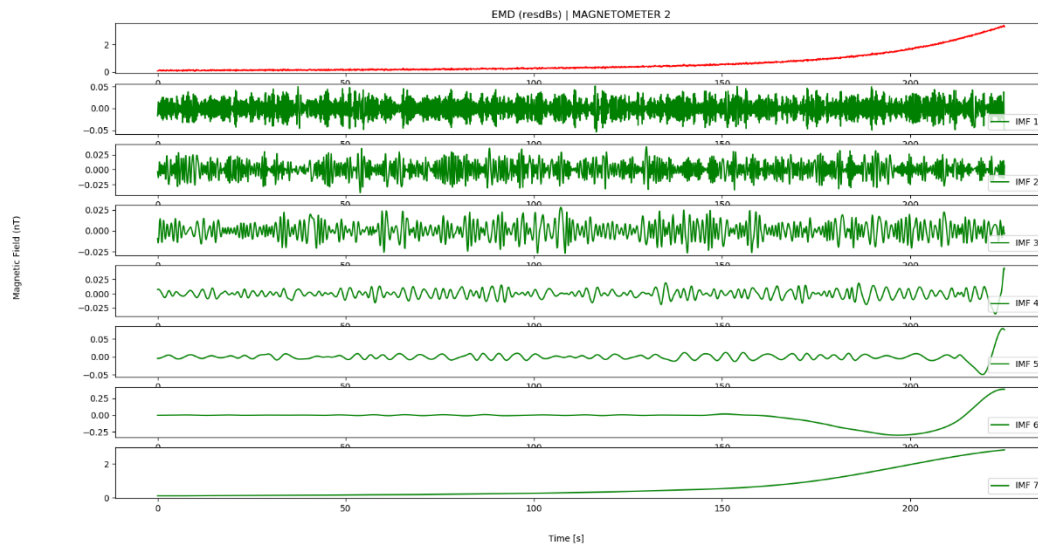
Εικόνα 83: Το διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S της συνισταμένης B_S του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύουν οι αισθητήρες για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Η επιρροή του μαγνητικού στόχου ξεκινάει να γίνεται αντιληπτή (οπτικά) την χρονική στιγμή περίπου **80s** για τα μαγνητόμετρα που απέχουν περισσότερο από τον αισθητήρα αναφοράς και περίπου τη χρονική στιγμή **100s** για τους αισθητήρες που βρίσκονται πιο κοντά στον αισθητήρα αναφοράς.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της εμπειρικής αποσύνθεσης σε κάθε ένα από τα διαφορικά πεδία dB_{S_i} , προκύπτουν τα παρακάτω:

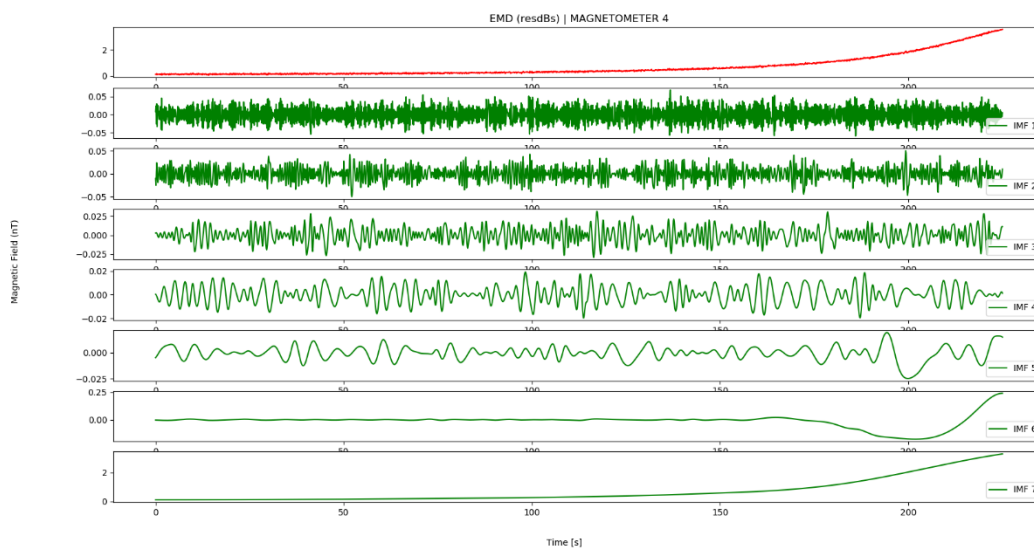


Εικόνα 84: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_1} της συνισταμένης B_{S_1} για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

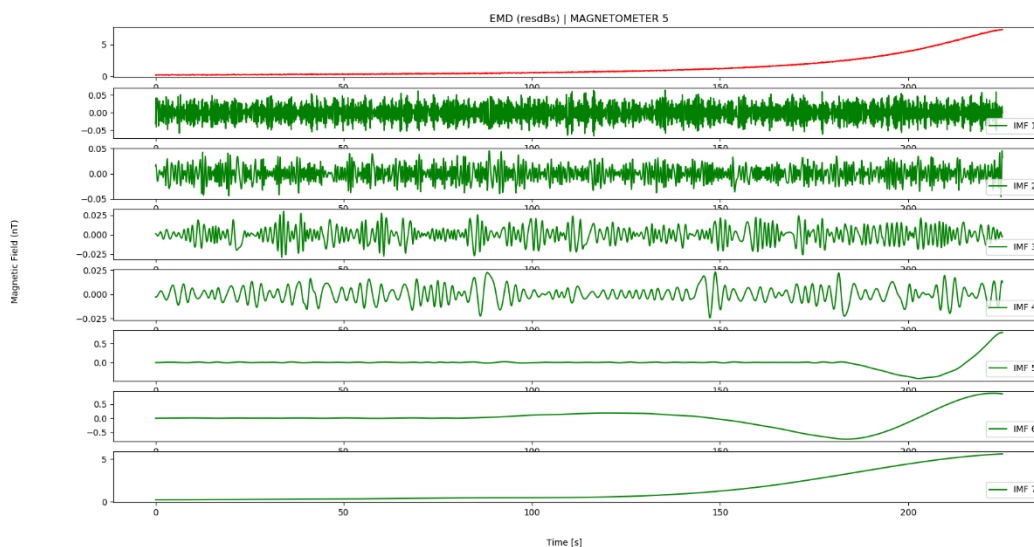


Εικόνα 85: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_2} της συνισταμένης B_{S_2} για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

4.2 Κίνηση παράλληλη προς τη συστοιχία των αισθητήρων

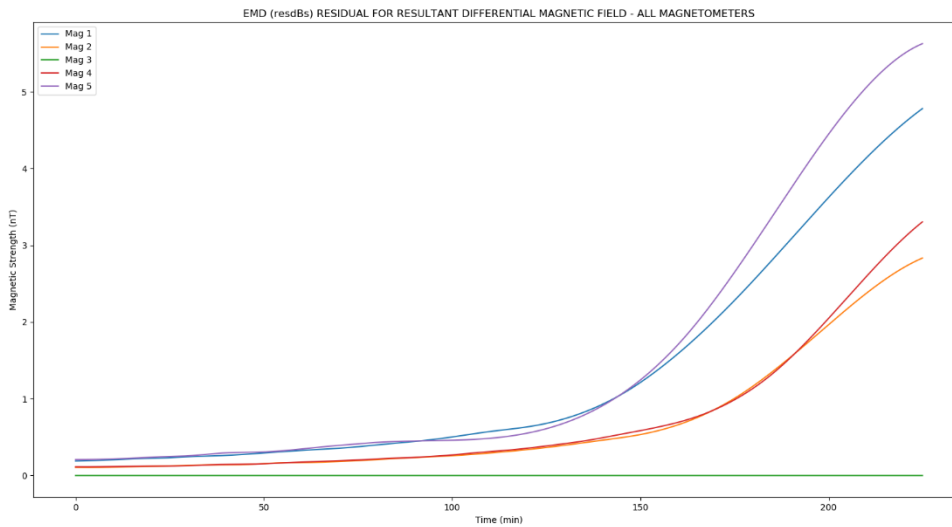


Εικόνα 86: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_4} της συνισταμένης B_{S_4} για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων



Εικόνα 87: Ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_5} της συνισταμένης B_{S_5} για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρατηρούμε την τελευταία IMF, όπου επιτυχώς δημιουργείται μία καινούργια συνάρτηση απαλλαγμένη από το θόρυβο η οποία υποδηλώνει τη γραμμή τάσης που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου.



Εικόνα 88: Σύγκριση της τάσης (trend) που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του στόχου και προκύπτει από την ανάλυση EMD στο διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S της συνισταμένης B_S για σφαιρικό στόχο που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου εμπειρικής αποσύνθεσης για κάθε διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_{S_i} , παρατηρούμε παρόμοιες λύσεις σε μαγνητόμετρα που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς ως προς τη χρονική στιγμή αύξησης της κλίσης της γραμμής τάσης (τελευταία IMF). Θεωρούμε ότι από τη χρονική στιγμή αυτή έχουμε ανίχνευση του μαγνητικού στόχου. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καμπύλες για τους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς είναι παρόμοιες.

Με βάση τη μέθοδο υπολογισμού σημείου ανίχνευσης, κάθε αισθητήρας αναγνωρίζει πρώτη φορά το στόχο σε χρόνο που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Mag₁	Mag₂	Mag₄	Mag₅
136.9 s	154.3 s	161.7 s	136.7 s

Πίνακας 9: Χρονική στιγμή ανίχνευσης σφαιρικού στόχου που κινείται παράλληλα στο επίπεδο (y, z) της διάταξης αισθητήρων

Συμπεράσματα

5.1 Αποτίμηση αποτελεσμάτων

5.1.1 Επίδραση του σχήματος του στόχου

Από τα διαφορετικά σενάρια που μελετήσαμε, μπορούμε να πούμε ότι παρότι η μαγνητική ανωμαλία που προκαλείται από την κίνηση του ελλειψοειδούς στόχου γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή με το μάτι στον αντίστοιχο άξονα και θα υποθέταμε ότι το ίδιο θα συνέβαινε και στο τελικό αποτέλεσμα της συνισταμένης, βλέπουμε ότι μετά την μέθοδο της εμπειρικής αποσύνθεσης το συνολικό αποτέλεσμα της συστοιχίας είναι το αντίθετο. Δηλαδή στον σφαιρικό στόχο μπορεί η μαγνητική ροπή ανά άξονα να είναι μικρότερη από τη μαγνητική ροπή κατά το μακρύ άξονα του ελλειψοειδούς αλλά η ισοτροπία του μαγνητικού πεδίου επιτρέπει έπειτα από την μέθοδο εμπειρικής αποσύνθεσης να ανιχνεύσουμε ελαφρώς νωρίτερα το στόχο μας.

5.1.2 Επίδραση της κίνησης του στόχου

Η κίνηση του στόχου παίζει σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση μιας μαγνητικής ανωμαλίας στο γεωμαγνητικό πεδίο. Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα διαγράμματα των σεναρίων που μελετήσαμε, ότι στις περιπτώσεις κίνησης παράλληλης με τη συστοιχία η μαγνητική ανωμαλία εντοπίζεται οπτικά από τα διαγράμματα διαφορικού πεδίου διαφορικό πεδίο dB_S αρκετά πιο νωρίς απ' ό τι στην κάθετη κίνηση. Πιο συγκεκριμένα στα δύο σενάρια της κάθετης κίνησης είχαμε εντοπισμό της ανίχνευσης περίπου στα **150 – 200 s**, ενώ αντίθετα στα δύο σενάρια παράλληλης κίνησης είχαμε εντοπισμό περίπου στα **80 – 100 s**.

Επιπλέον, αναφορικά με την επιρροή της κίνησης του στόχου στην μέθοδο εμπειρικής αποσύνθεσης σήματος, παρατηρούμε ότι για την εύρεση της τάσης του διαφορικού πεδίου dB_S , στις περιπτώσεις κάθετης κίνησης του στόχου προς τη συστοιχία των αισθητήρων χρειάστηκαν **9**

IMF ή ακόμα και 10 σε μία περίπτωση. Αντίθετα στις περιπτώσεις παράλληλης κίνησης του στόχου προς τη συστοιχία των αισθητήρων χρειάστηκαν **7 IMF** και 8 σε δύο περιπτώσεις.

5.1.3 Επιδράσεις θορύβου

Παρότι η διαφορά στην τυπική απόκλιση του θορύβου σε κάθε αισθητήρα ήταν πάρα πολύ μικρή, με αρκετή προσοχή στα διαγράμματα, μπορούμε να δούμε πως στην πρώτη IMF της μεθόδου της εμπειρικής αποσύνθεσης για κάθε διαφορικό μαγνητικό πεδίο dB_S , η συνάρτηση είναι πιο πυκνή όσο πιο μεγάλη είναι η τυπική απόκλιση του αντίστοιχου θορύβου.

Επίσης, αν και απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για την επαλήθευση του συμπεράσματος αυτού, παρατηρούμε ότι ο στόχος εντοπίζεται πιο σύντομα από τους αισθητήρες που έχουν μικρότερη τυπική απόκλιση θορύβου, αν συγκρίνουμε τους αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς.

5.2 Γενικό συμπέρασμα

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, σε θεωρητικό επίπεδο δείχνει αρκετά αποδοτική στο να ανιχνεύει χρονικά την εμφάνιση μαγνητικής ανωμαλίας στο γεωμαγνητικό πεδίο.

Ο υπολογισμός του διαφορικού μαγνητικού πεδίου μας επέτρεψε να αφαιρέσουμε το γεωμαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι εκείνο που επηρεάζει περισσότερο έναν αισθητήρα μαγνητικού πεδίου, με ορισμένες παραδοχές οι οποίες σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να διαφέρουν ακόμα και αν οι αισθητήρες βρίσκονται σε κοντινότερη απόσταση μεταξύ τους.

Η μέθοδος εμπειρικής αποσύνθεσης σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν φαίνεται να δίνει αξιόπιστο αποτέλεσμα ως προς την δημιουργία συνάρτησης τάσης διαφορικού πεδίου dB_S απαλλαγμένη από το θόρυβο του κάθε αισθητήρα. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε από την ομοιομορφία των αποτελεσμάτων σε όλα τα σενάρια αν συγκρίνουμε τις λύσεις για αισθητήρες που ισαπέχουν από τον αισθητήρα αναφοράς.

Τέλος, η μέθοδος υπολογισμού σημείου ανίχνευσης μπορεί να μας δώσει εμπειρικά ένα ασφαλές αποτέλεσμα, όμως, σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας της, σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αλλαγή της κατεύθυνσης του στόχου και συγκεκριμένα αλλαγή στο πρόσημο της μεταβολής της απόστασης, δημιουργείται ακρότατο στην προς μελέτη συνάρτηση (αλλάζει η μονοτονία της) και δεν μπορεί να μελετηθεί.

5.3 Επέκταση μελέτης

Δεδομένου ότι ο κώδικας που παράχθηκε για την πειραματική μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος είναι αρκετά δυναμικός, το πρώτο και βασικό βήμα σε περίπτωση επέκτασης της παρούσας μελέτης, θα είναι να μελετηθούν περισσότερα σενάρια διαφορετικής μαγνητικής ροπής στόχου και εκτελούμενης κίνησης. Οι δοκιμές αυτές θα μας επιτρέψουν να βγάλουμε περισσότερα αποτελέσματα και θα μας βοηθήσουν να επιβεβαιώσουμε τα παραπάνω συμπεράσματα.

Σε συνέχεια των δοκιμών, είναι σημαντικό να βελτιωθεί η ικανότητα ανίχνευσης ασθενών σημάτων μαγνητικής ανωμαλίας, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μεθοδολογίας που προτείνεται στην [46] με την συνέλιξη των διαφορικών σημάτων της συστοιχίας των αισθητήρων και την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης χρόνου – συχνότητας (time-frequency analysis) σε αυτή.

Τέλος, πέρα από το χρόνο πρώτης ανίχνευσης μιας μαγνητικής ανωμαλίας, στόχος είναι να μπορέσει να προσδιοριστεί ακριβώς η θέση που παρατηρείται αυτή η μαγνητική ανωμαλία συναρτήσει της συστοιχίας των αισθητήρων, συνεπώς να εντοπίσουμε χωροταξικά τη θέση ενός κινούμενου μαγνητικού στόχου.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Coey, «Magnetism and Magnetic Materials,» 2010.
- [2] Λ. Τζαννέτου, «Προσδιορισμός μαγνητικής «μάζας» με την μέθοδο της ανίχνευσης μαγνητικής ανωμαλίας,» 2019.
- [3] J. D. Jackson, «Classical Electrodynamics,» 1999.
- [4] Α. Α. Αργυρίου, «Αισθητήρες ημιαγωγών, αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες,» 2004.
- [5] J. Fraden, «Handbook of Modern Sensors,» 2016.
- [6] H. Weinstock, «SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications.,» 2012.
- [7] J. Clarke and A. I. Braginski, «The SQUID Handbook: Applications of SQUIDs and SQUID Systems,» 2006.
- [8] Σ. Κ. Αγγελόπουλος, «Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων και διατάξεων χαρακτηρισμού των, με χρήση μαγνητικών φαινομένων,» 2019.
- [9] P. Ripka, J. Magn. Magn. Mater, «New directions in fluxgate sensors,» 2000.
- [10] L. C. de C. Benyosef, G. C. Stael, and M. Bochner, «Optimization of the magnetic properties of materials for fluxgate sensors,» 2008.
- [11] P. Ripka, M. Butta, M. Malatek, S. Atalay, and F. E. Atalay, «Characterisation of Magnetic Wires for Fluxgate Cores,» 2007.
- [12] P. D. Dimitropoulos, J. N. Avaritsiotis, and E. Hristoforou, «Boosting the performance of miniature fluxgates with novel signal extraction techniques,» 2001.
- [13] C. Petridis, A. Ktena, E. Laskaris, P. Dimitropoulos, and E. Hristoforou, «Ni–Fe Thin Film Coated Cu Wires for Field Sensing Applications,» 2007.
- [14] P. Ripka, X. P. Li, and J. Fan, «Orthogonal fluxgate effect in electroplated wires,» 2005.

- [15] I. Sasada and S. Harada, «Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Gradiometer,» 2014.
- [16] M. Butta and I. Sasada, «Orthogonal Fluxgate With Annealed Wire Core,» 2013.
- [17] K. Goleman and I. Sasada, «High Sensitive Orthogonal Fluxgate Magnetometer Using a Metglas Ribbon,» 2006.
- [18] J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka, and P. Kaspar, «Low-power PCB fluxgate sensor,» 2005.
- [19] P. Ripka, J. Kubik, M. Duffy, W. G. Hurley, and S. O'Reilly, «Current sensor in PCB technology,» 2002.
- [20] A. Tipek, T. O'Donnell, P. Ripka, and J. Kubik, «Excitation of PCB fluxgate sensor,» 2003.
- [21] A. Tipek, T. O'Donnell, P. Ripka, and J. Kubik, «Excitation and temperature stability of PCB fluxgate sensor,» 2005.
- [22] C. F. Brockelsby, «Ultrasonic Delay Lines,» 1963.
- [23] E. Keonjian, «Micropower Electronics,» 2013.
- [24] H. W. Gschwind, «Design of Digital Computers: An Introduction,» 2013.
- [25] D. R. Raichel, «The Science and Applications of Acoustics,» 2006.
- [26] E. Hristoforou, «Magnetostrictive delay lines and their applications,» 1997.
- [27] E. Hristoforou and D. Niarchos, «Fast characterisation of magnetostrictive delay lines,» 1993.
- [28] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, and I. Darie, «Sound velocity in magnetostrictive amorphous ribbons and wires,» 1994.
- [29] E. Hristoforou and A. Ktena, «Magnetostriction and magnetostrictive materials,» 2007.
- [30] C. Reig, S. Cardoso, and S. C. Mukhopadhyay, «Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors: From Basis to State-of-the-Art Applications,» 2013.
- [31] H. S. Nalwa, «Handbook of Thin Films,» 2001.
- [32] W. Y. Du, «Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies,» 2014.
- [33] A. Asfour, «Magnetic Sensors: Development Trends and Applications,» 2017.
- [34] E. Hirota, H. Sakakima, K. Inomata, and K. Inomata, «Giant Magneto-Resistance Devices,» 2002.
- [35] A. Fert, «Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics,» 2008.

- [36] M. J. Caruso, «Applications of magnetic sensors for low cost compass systems,» 2000.
- [37] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, «Magnetoresistive sensors,» 2007.
- [38] S. Tumański, «Handbook of magnetic measurements,» 2011.
- [39] P. Jantaratana and C. Sirisathitkul, «Low-cost Sensors Based on the GMI Effect in Recycled Transformer Cores,» 2008.
- [40] H. Chang, M. Yang, J. Liu, and Y. Yu, «Highly Sensitive GMI Sensor with an Equivalent Noise 0.3 nT,» 2012.
- [41] P. Sarkar, J. Vcelak, R. K. Roy, A. K. Panda, A. Mitra, and P. Ripka, «Co-Based Amorphous Material for Giant Magnetoimpedance and Fluxgate Sensing Cores,» 2015.
- [42] G. Meijer, «Smart Sensor Systems,» 2008.
- [43] E. Ramsden, «Hall-Effect Sensors: Theory and Application,» 2011.
- [44] C. Chien, «The Hall Effect and Its Applications,» 2013.
- [45] A. Zeiler, R. Faltermeier, I. R. Keck and A. M. Tom´e, Member, IEEE, C. G. Puntonet and E. W. Lang, "Empirical Mode Decomposition - An Introduction," 2010.
- [46] Luzhao Chen, Yongqiang Feng, Peilin Wu, Wanhua Zhu and Guangyou Fang, «An Innovative Magnetic Anomaly Detection Algorithm Based on Signal Modulation,» 2020.
- [47] Laszuk, Dawid, Python implementation of Empirical Mode Decomposition algorithm, 2017.
- [48] G. Unterholzner, «kneebow 0.1.1,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://pypi.org/project/kneebow/>.

Παράρτημα

7.1 Κύριος κώδικας (Main)

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

__author__ = "Iasonas Polydoros"
__copyright__ = "Copyright 2020, Magnetic Anomaly Detection Problem"
__license__ = "ECL"
__email__ = "jpolydoros@gmail.com"
__status__ = "Development"

# LIBRARIES IMPORTATIONS

import numpy as np
    # support for large, multi-dimensional arrays and matrices
import csv
    # implements classes to read and write tabular data in CSV format
import math
    # provides access to the mathematical functions
import scipy
import random
    # generates random numbers
import matplotlib.pyplot as plt
    # creates plots
from numpy.fft import fft, fftfreq, ifft
from PyEMD import EMD
from kneebow.rotor import Rotor

# FUNCTIONS IMPORTATIONS

import functions as ft
    # imports all the necessary functions for the calculations below

# VARIABLES DECLARATION

simDur = 225
    # duration of the simulation (sec)
samplesPerSec = 10
    # number of samples per second
```

```

samples = simDur*samplesPerSec
  # number of samples per duration
numMag = 5
  # number of magnetometers
refMag = 2
  # selects the reference magnetometer
xMagDist = 0
  # distance of the magnetometers on the axis x
yMagDist = 15
  # distance of the magnetometers on the axis y
zMagDist = 0
  # distance of the magnetometers on the axis z
initMagPos = [0,15,0]
  # position of the first magnetometer
npMagArray = ft.magInitializer(initMagPos,numMag,xMagDist,yMagDist,zMagDist)
  # array with positions of magnetometers

# Scenario 1. Vertical Movement - Ovoid Shape

initTargetPos = [[1000,45,0]]
  # initial position of the target
targetVel = [-
0.4,0,0] # velocity o
f the target (m/0,1s)
magMoment = (6.5)*np.array([10,1,1])
  # magnetic moment of the target

# Scenario 2. Vertical Movement - Sphere Shape

# initTargetPos = [[1000,45,0]]

# targetVel = [-
0.4,0,0]
# magMoment = (6.5)*np.array([np.sqrt(34),np.sqrt(34),np.sqrt(34)])

# Scenario 3. Parallel Movement - Ovoid Shape

# initTargetPos = [[100,1045,0]]

# targetVel = [0,-
0.4,0]
# magMoment = (6.5)*np.array([1,10,1])

# Scenario 4. Parallel Movement - Sphere Shape

# initTargetPos = [[100,1045,0]]

# targetVel = [0,-
0.4,0]

```

```

# magMoment = (6.5)*np.array([np.sqrt(34),np.sqrt(34),np.sqrt(34)])

mu = 0
# mean (expected value) for normal distribution
sigma = np.array([[0.015],[0.018],[0.020],[0.022],[0.025]])
# sigma (standard deviation) for normal distribution
# sigma = ft.sigma_generator(numMag)
# function for generating dynamic sigma between specific values
R = np.zeros([samples,numMag]).tolist()
# initialization of R (distance) array
Bt = np.zeros([samples,numMag,3])
# initialization of Bt (target anomaly) array
Bn = np.zeros([samples,numMag,3])
# initialization of Bn (noise) array
Bg = np.zeros([samples,3])
# initialization of Bg (geomagnetic field) array
Bs = np.zeros([samples,numMag,3])
# initialization of Bs (signal) array
SNR = np.zeros([samples,numMag])
# initialization of SNR (signal to noise ratio) array
dBs = np.zeros([samples,numMag,3])
# initialization of dBs (differential signal) array
resBg = np.zeros([samples])
# initialization of resBg (geomagnetic field) resultant array
resBn = np.zeros([samples,numMag])
# initialization of resBn (noise) resultant array
resBs = np.zeros([samples,numMag])
# initialization of resBs (signal) resultant array
resBt = np.zeros([samples,numMag])
# initialization of resBt (target) resultant array
resdBs = np.zeros([samples,numMag])
# initialization of resdBs (differential signal) resultant array
resSNR = np.zeros([samples,numMag])
# initialization of resSNR (signal to noise ratio) resultant array
N = np.zeros([numMag])
# initialization of N (intrinsic mode functions) array
residual = []
recTarget = []
recPosition = []
temp = 0

# DATA INSERTION

with open('PythonCode/geomag_data_peg.csv', 'r') as dt:
    reader = csv.reader(dt, delimiter=';')
    headers = next(reader)
    # gets header from first row
    geomdata = np.array(list(reader))
    # imports data into numpy array

```

```

    daydata = geomdata[:,1:4].astype('float')
    # selects day data and transforms them to float data
    data = geomdata[0:simDur,1:4].astype('float')
    # selects simDur data and transforms them to float data

k = -1
for i in range(0,samples):
    if i % samplesPerSec == 0:

        k = k+1
        if k > len(data) - 1:
            break
        Bg[i] = data[k]

# DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD CALCULATION

for i in range (1,samples):
    initTargetPos.append(ft.position(initTargetPos[i-
1],targetVel))          # calculates the next position of the target

initTargetPos = np.array(initTargetPos)
    # returns an array with positions of the target

for i in range (0,samples):
    for j in range(0,numMag):
        R_temp = np.array(ft.r_array(npMagArray[j,:],initTargetPos[i,:]))

        r_temp = ft.r_distance(npMagArray[j,:],initTargetPos[i,:])
        R[i][j] = R_temp
        b_temp = math.pow(10,2)/math.pow(r_temp,5)*np.dot(R_temp,magMoment.T)
        Bt[i][j] = b_temp
        n_temp = ft.random_generator(j,mu,sigma)
    # returns gaussian white noise
        Bn[i][j] = n_temp

        Bs[i][j] = b_temp + Bg[i] + n_temp
    # calculates the signals of magnetometers
        resBg[i] = np.sqrt(np.sum(np.square(Bg[i,:])))
    # calculates the resultant of geomagnetic field
        resBn[i][j] = np.sqrt(np.sum(np.square(Bn[i,j,:])))
    # calculates the resultant of noise
        resBs[i][j] = np.sqrt(np.sum(np.square(Bs[i,j,:])))
    # calculates the resultant of signal
        resBt[i][j] = np.sqrt(np.sum(np.square(Bt[i,j,:])))
    # calculates the resultant of the target

B_ref = Bs[:,refMag,:]
    # declaration of reference magnetometer
Bn_ref = Bn[:,refMag,:]

```

```

resBn_ref = resBn[:,refMag]

Bt_ref = Bt[:,refMag,:]

for i in range (0,samples):
    for j in range(0,numMag):
        if (j != refMag):
            dBs[i][j] = Bs[i][j] - B_ref[i]
        # calculates the difference between magnetometers and reference
        resdBs[i][j] = np.sqrt(np.sum(np.square(dBs[i,j,:])))
        # calculates the resultant of the differential field
        SNR[i][j] = 10*np.log10(abs(((resBs[i][j])/(resBn[i][j])))))
        # calculates the SNR

IMF = [[] for i in range(numMag)]
for i in range (0,numMag):
    t = np.linspace(0, simDur, samples)
    a = EMD().emd(resdBs[:,i],t)
    IMF[i] = a
    N[i] = IMF[i].shape[0]+1

    for n, imf in enumerate(IMF[i]):
        temp = imf

        residual.append(temp)

residual = np.array(residual)

for i in range (0,numMag):
    recTarget = []
    for index, value in enumerate(residual[i]):
        recTarget.append([index+1,value])

    r = Rotor()
    r.fit_rotate(recTarget)
    elbow_idx = r.get_elbow_index()
    temp2 = elbow_idx/samplesPerSec
    recPosition.append(temp2)

recPosition = np.array(recPosition)
print(recPosition)
print(residual)

# RESULTS - PLOTS

# GEOMAGNETIC FIELD X - Y - Z (day)

plt.figure()

```



```
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - X | day')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (min)')
plt.plot(daydata[:,0], color='C0')
plt.show()

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - Y | day')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (min)')
plt.plot(daydata[:,1], color='C1')
plt.show()

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - Z | day')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (min)')
plt.plot(daydata[:,2], color='C2')
plt.show()

# GEOMAGNETIC FIELD X - Y - Z (simDur)

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - X | simDur')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.plot(data[:,0], color='C0')
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.show()

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - Y | simDur')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.plot(data[:,1], color='C1')
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.show()

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - Z | simDur')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.plot(data[:,2], color='C2')
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.show()

# GEOMAGNETIC FIELD (Bg) X - Y - Z (samples)
```

```

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - X | samples')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.plot(Bg[:,0], color='C0')
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.show()

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - Y | samples')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.plot(Bg[:,1], color='C1')
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.show()

plt.figure()
plt.title('GEOMAGNETIC FIELD (Bg) - Z | samples')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.plot(Bg[:,2], color='C2')
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.show()

# TARGET BIOT SAVART (Bt) X - Y - Z (samples)

plt.figure()
plt.title('TARGET BIOT SAVART (Bt) X | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(Bt[:,i,0], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

plt.figure()
plt.title('TARGET BIOT SAVART (Bt) Y | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(Bt[:,i,1], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')

```

```

plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

plt.figure()
plt.title('TARGET BIOT SAVART (Bt) Z | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(Bt[:,i,2], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

# # RESULTANT TARGET BIOT SAVART (resBt) | ALL MAGNETOMETERS (samples)

plt.figure()
plt.title('RESULTANT TARGET BIOT SAVART (resBt) | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(resBt[:,i], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

# MAGNETIC FIELD (Bs) X - Y - Z (samples)

plt.figure()
plt.title('MAGNETIC FIELD (Bs) X | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(Bs[:,i,0], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

plt.figure()
plt.title('MAGNETIC FIELD (Bs) Y | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(Bs[:,i,1], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))

```

```

plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

plt.figure()
plt.title('MAGNETIC FIELD (Bs) Z | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(Bs[:,i,2], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

# # RESULTANT MAGNETIC FIELD (resBs) | ALL MAGNETOMETERS (samples)

plt.figure()
plt.title('RESULTANT MAGNETIC FIELD (resBs) | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(resBs[:,i], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

# DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (dBs) X - Y - Z | ALL MAGNETOMETERS

plt.figure()
plt.title('DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (dBs) X | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(dBs[:,i,0], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

plt.figure()
plt.title('DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (dBs) Y | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(dBs[:,i,1], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)

```

```

plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

plt.figure()
plt.title('DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (dBs) Z | ALL MAGNETOMETERS')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(dBs[:,i,2], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

# # RESULTANT DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (resdBs) | ALL MAGNETOMETERS

plt.figure()
plt.title('RESULTANT DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (resdBs) | ALL MAGNETOMETERS'
)
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(resdBs[:,i], color='C'+str(i+5), label='Mag '+str(i+1))
plt.ticklabel_format(useOffset=False)
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.legend()
plt.show()

# EMD FOR RESULTANT DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (resdBs)

for i in range (0,numMag):
    rows = len(IMF[i])+1
    fig, axes = plt.subplots(rows, 1, sharex=True, sharey=False)
    fig.text(0.5, 0.04, "Time [s]", ha='center')
    fig.text(0.04, 0.5, 'Magnetic Field (nT)', va='center', rotation='vertical
')

    plt.subplot(N[i],1,1)
    plt.title("EMD (resdBs) | MAGNETOMETER "+str(i+1))
    plt.plot(t, resdBs[:,i], 'r')

    for n, imf in enumerate(IMF[i]):
        plt.subplot(N[i],1,n+2)
        plt.plot(t, imf, 'g', label = 'IMF '+str(n+1))

```

```
plt.legend(loc='lower right')

plt.show()

# EMD RESIDUAL OF RESULTANT DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD (resdBs) | ALL MAGNETO
METERS

plt.figure()
plt.title('EMD (resdBs) RESIDUAL FOR RESULTANT DIFFERENTIAL MAGNETIC FIELD - A
LL MAGNETOMETERS')
plt.ylabel('Magnetic Strength (nT)')
plt.xlabel('Time (min)')
for i in range (0,numMag):
    plt.plot(residual[i], color='C'+str(i), label='Mag '+str(i+1))
plt.legend()
plt.xticks(np.arange(0,samples,500), np.arange(0,simDur,50))
plt.show()
```

7.2 Συναρτήσεις (Functions)

```
import math
import numpy as np
import random

def position(pos,velocity):
    rx = velocity[0]+pos[0]
    ry = velocity[1]+pos[1]
    rz = velocity[2]+pos[2]
    return [rx,ry,rz]

def r_array(pos_m,pos_t):
    r_2 = math.pow(math.pow((pos_m[0]-pos_t[0]),2) + math.pow((pos_m[1]-
pos_t[1]),2) + (pos_m[2]-pos_t[2]),2)
    dx = pos_t[0]-pos_m[0]
    dy = pos_t[1]-pos_m[1]
    dz = pos_t[2]-pos_m[2]
    return [[math.pow(3*dx,2)-
r_2, 3*dx*dy, 3*dx*dz],[ 3*dy*dx, math.pow(3*dy,2)-
r_2, 3*dy*dz],[ 3*dz*dx, 3*dz*dy, math.pow(3*dz,2)-r_2]]

def r_distance(pos_m,pos_t):
    return math.sqrt(math.pow((pos_m[0]-pos_t[0]),2) + math.pow((pos_m[1]-
pos_t[1]),2) + math.pow((pos_m[2]-pos_t[2]),2))
```

```
def magInitializer(initMagPos,numMag,xMagDist,yMagDist,zMagDist):
    magArray = []
    for i in range(numMag):
        if len(magArray) == 0:
            magArray.append(initMagPos)
        else:
            magArray.append([sum(x) for x in zip((magArray[i-
1]),([xMagDist,yMagDist,zMagDist])))])
    return np.array(magArray)

def random_generator(j,mu,sigma):
    noise = np.random.normal(mu, sigma[j], 3)
    return np.array([noise])

def sigma_generator(numMag):
    sigArray = []
    for i in range(numMag):
        sigArray.append(random.randrange(15,25)/1000)
        sigma = math.pow(10,-9)*np.array(sigArray)
    return sigma;
```