



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

**Εντοπισμός θέσης πλοίου με μαγνητικές τεχνικές.**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

Νεοκλής Γ. Χατζηγεωργίου

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος

Αθήνα, Ιούλιος 2013





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

**Εντοπισμός θέσης πλοίου με μαγνητικές τεχνικές.**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

Νεοκλής Γ. Χατζηγεωργίου

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26<sup>η</sup> Ιουλίου 2013

.....  
Καθ Ν. Θεοδώρου

.....  
Λέκτορας Π. Τσαραμπαρης

.....  
Καθ. Ευ. Χριστοφόρου

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....  
Νεοκλής Γ. Χατζηγεωργίου  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νεοκλής Γ. Χατζηγεωργίου, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **Περίληψη**

Στην παρούσα εργασία μελετήσαμε τη δυνατότητα εντοπισμού μαγνητικών μαζών και ειδικότερα πλοίου με τη βοήθεια μαγνητικών αισθητήρων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε ήταν παθητική, δηλαδή υπήρχε μόνο δέκτης. Έχουμε μελετήσει τον εντοπισμό της θέσης ενός μαγνήτη, της θέσης ενός αυτοκινήτου και ενός μικρού φουσκωτού σκάφους με τη μέτρηση του μαγνητικού τους αποτυπώματος, δηλαδή της μαγνητικής διαταραχής που προκαλούν στο πεδίο της γης.

## **Λέξεις Κλειδιά**

Αισθητήρες, Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση, Μαγνητική Αντίσταση, Εντοπισμός σκάφους, μαγνητικοί αισθητήρες, HMC, HMC1001, HMC1002, HMC2003.

## **Abstract**

In this study we investigated the ability to detect magnetic masses and particular ship using magnetic sensors. The method used was passive, that is there was only receiver. We consider the identification of the position of a magnet, the position of a car and of a small inflatable boat with the measurement of the magnetic fingerprint, i.e. the magnetic disturbance caused to the field of the earth.

## **Keywords**

Sensors, AMR, Anisotropic Magneto Resistance, Magnetic Resistance, Ship Detection, Magnetic Sensors, HMC, HMC1001, HMC1002, HMC2003

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο για τη συμπαράστασή του και τη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Κοτσιβάκη Δημήτριο, Υποψήφιο Διδάκτορα του της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών για την πολύτιμη βοήθεια και την αμέριστη συνεισφορά του στη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής. Θα ήταν μεγάλη παράληψή μου αν δεν ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα κ. Βουρνά Πολυξένη και την Υποψήφια Διδάκτορα κ. Κυριακοπούλου Έλενα για την επιστημονική τους βοήθεια.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου Ελένη Ηλιάδου Χατζηγεωργίου και Γεώργιο Χατζηαντρέα Χατζηγεωργίου που τόσα χρόνια μου διάβαζαν και ηχογραφούσαν τα κείμενα των μαθημάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το θείο μου Μιχάλη Πατατάκο που με ενέπνευσε με τις τεχνικές του ικανότητες.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τεχνικούς του Ραδιοφωνικού Ιδρύματος Κύπρου, τον Άγγελο Δικωμίτη, Μιχαλάκη Αντρέου, Ρούλη Ζαχαριάδη, για την πρώτη καθοδήγηση στον τομέα της ηλεκτρονικής επιστήμης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τεχνικούς της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας Κύπρου, τον Αντρέα Στυλιανίδη, Γεώργιο Χριστοδούλου, Γιαννάκη Ορφανίδη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Παύλο Παυλίδη γιατί με καθοδήγησε στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του προγραμματισμού.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Νίκο Λυγερό για την καθοδήγησή του στα άδυτα των μαθηματικών και στον προγραμματισμό Maple.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω για την συντακτική και ορθογραφική διόρθωση κειμένων της διπλωματικής μου τους φίλους μου:

Bras Anne-Marie, Gazzano Pierre, Martinez Martine, Patrice Deloche, Solaris André, Αγγελάκος Ηλίας, Καπράγκου Σάνη, Κάτσιος Δημήτριος, Κάτσιος Κώστας, Κωνσταντίνου Δέσποινα, Παναγιότου Κωνσταντίνα, Παπαδοπούλου Αγγελική, Πολίτης Γεράσιμος, Ραπτοπούλου Όλγα, Σπανός Χρήστος, Σταϊκοπούλου Μαρία, Σταμπολίδου Κείρα, Σταμπολίδου Μαρία, Σταμπολίδου Σβεtlάνα, Τζιβελέκη Μαίρη, Τσατσαμπά Βασιλική, Τσιμή Ροδόκλεια, Χαριτίδου Εύη, Χαρισμαΐδου Χρύσα, Χατζηγεωργίου Γιώργος, Χατζηελευθερίου Γιάννης, Χριστοδούλου Θανάσης, Χρίστου Μάριος.

*Αυτή η εργασία αφιερώνεται στην οικογένειά μου  
και στην μνήμη του Νικολα Τεσλα (Nikola Tesla)*





# 1 Περιεχόμενα

1	Περιεχόμενα.....	10
2	Εισαγωγή .....	15
3	Βιβλιογραφική Έρευνα.....	17
3.1	Αισθητήρες Πεδίου. ....	19
3.1.1	Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου.....	19
3.1.2	Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου γης. ...	25
3.1.3	Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου.....	30
3.2	Reverse Engineer Monitoring .....	35
3.2.1	Εφαρμογή μαγνητικών αισθητήρων σε ανίχνευση οχημάτων.....	36
3.2.2	Επίβλεψη λιμένα. ....	44
4	Ανάπτυξη Διάταξης. ....	46
4.1	Ο αισθητήρας AMR. ....	47
4.1.1	Ο αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης AMR HMC2003. .	47
4.1.2	Τύλιγμα ‘τοποθέτησης/επανατοποθέτησης’ (Set/Reset strap).....	48
4.1.3	Τύλιγμα αντιστάθμισης (Offset strap). ....	52
4.1.4	Υπολογισμός της τάσης εξόδου της γέφυρας του HMC. ....	62
4.2	Σχεδιασμός ηλεκτρονικών για τον HMC2003. ....	64
4.2.1	Κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας αισθητήρα. ....	65
4.2.2	Κύκλωμα ελέγχου της τάσης απόκλισης. ....	66
4.2.3	Κύκλωμα δημιουργίας παλμών τοποθέτησης- επανατοποθέτησης. ....	68
4.2.4	Σύστημα δειγματοληψίας και επικοινωνία. ....	69
4.3	Χαρακτηρισμός Αισθητήρα. ....	71
4.3.1	Εύρεση της πυκνότητας φάσματος θορύβου του HMC2003. ....	72
4.3.2	Εύρεση της απόκρισης συχνότητας της διάταξης του αισθητήρα. ....	74
4.4	Συσκευασία του αισθητήρα.....	75
4.4.1	Κατασκευή.....	75
4.4.2	Καταπόντιση αισθητήρα στο λιμάνι. ....	76
4.4.3	Τοποθέτησης των αισθητήρων στις προβλήτες του λιμανιού. ....	79
4.4.4	Τροφοδοσία.....	79
5	Πειραματικό Μέρος και Μετρήσεις. ....	81
5.1	Εντοπισμός της θέσης του μαγνήτη σε πλέγμα.....	82
5.1.1	Μετρήσεις – Αποτελέσματα: .....	83
5.2	Μετρήσεις με αυτοκίνητο. ....	87
5.2.1	Πρώτο Πείραμα. ....	87
5.2.2	Δεύτερο Πείραμα. ....	96

5.3	Μετρήσεις σκάφους στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων.....	103
6	Συμπεράσματα.....	108
7	Βιβλιογραφία.....	111

## 1.1 Σχήματα

Σχήμα 3.1: Κατηγοριοποίηση αισθητήρων με βάση το εύρος του μαγνητικού πεδίου που μπορούν να μετρήσουν. ....	18
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση ενός πηνίου «ανίχνευσης» για γεωφυσικές μελέτες. ....	20
Σχήμα 3.3: Γραφήματα απόκρισης και θορύβου συναρτήσεων συχνότητας ενός πηνίου «ανίχνευσης» για γεωφυσικές μελέτες. ....	21
Σχήμα 3.4: Το φαινόμενο Meissner σε ένα υπεραγώγιμο δακτύλιο με εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. $\{\alpha\}$ κανονικό (συνήθης αγωγός), $\{\beta\}$ και $\{\gamma\}$ Το φαινόμενο Meissner (υπεραγωγός) και $\{\delta\}$ παραμένον ρεύμα (υπεραγωγός). ....	22
Σχήμα 3.5: Κβάντηση της μαγνητικής ροής. ....	23
Σχήμα 3.6 : Απλοποιημένες κυματομορφές: (α) σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο και (β) με εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο $H_0$ . ....	26
Σχήμα 3.7 : Fluxgate με πυρήνα δακτυλίου. ....	26
Σχήμα 3.8: Fluxgate με πυρήνα δακτυλίου: Χαρακτηριστικά του μαγνητισμού του μισού πυρήνα. (α) χωρίς εξωτερικό πεδίο, (β) με εξωτερικό συνεχές πεδίο $H_0$ . ....	27
Σχήμα 3.9: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση μιας μαγνητικής περιοχής λεπτού υμενίου. ....	29
Σχήμα 3.10: Κάθετη διατομή ενός GMR. ....	31
Σχήμα 3.11: Ο κύριος βρόχος απόκρισης όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο παράλληλο στο εύκολο άξονα μαγνήτισης των μαλακών και των σκληρών μαγνητικών επιπέδων. Τα μαλακά μαγνητικά επίπεδα αλλάζουν σε πεδίο περίπου 1mT, ενώ η αγκύρωση των σκληρών μαγνητικών επιπέδων ....	31
Σχήμα 3.12: Διέγερση της αντίστασης με χαμηλό πεδίο. Μόνο το μαλακό μαγνητικό επίπεδο μεταβάλλεται. ....	32
Σχήμα 3.13: Μεταβολή της τιμής της αντίστασης ως συνάρτηση της γωνίας. ....	32
Σχήμα 3.14: Δομή αισθητήρα Hall. (α) Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και (β) Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. ....	33
Σχήμα 3.15: Διάταξη μέτρησης μαγνητικού πεδίου με οπτική ίνα. ....	34
Σχήμα 3.16: Η πόλωση του φωτός από το μαγνητικό πεδίο γνωστό και ως φαινόμενο Faraday. ....	34
Σχήμα 3.17: Το μαγνητικό πεδίο της γης που διαπερνά ένα όχημα. ....	37
Σχήμα 3.18: Μαγνητική υπογραφή οχήματος. ....	38
Σχήμα 3.19: Μεταβολή απόκρισης αισθητήρα συναρτήσει της απόστασης από το όχημα. ....	40
Σχήμα 3.20: Ανίχνευση στη X διεύθυνση με χρήση ενός μαγνητικού αισθητήρα. ....	40
Σχήμα 3.21: Διάταξη με δύο αισθητήρες για εντοπισμό κατεύθυνσης κίνησης, όπως επίσης και διάγραμμα με τα σήματα των δύο αισθητήρων. ....	41
Σχήμα 3.22: Ρύθμιση της θέσης των αισθητήρων. Μια πιθανή κατάσταση ψευδοανίχνευση. ....	42
Σχήμα 3.23: Παράδειγμα μεταβολής της τάσης απόκλισης του αισθητήρα συναρτήσει των θερμοκρασιακών μεταβολών. ....	43
Σχήμα 3.24: Διάγραμμα κατασκευής (NEC) για ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης λιμένων. ....	44
Σχήμα 3.25: Διάταξη αισθητήρων στο πυθμένα και ασύμμετρες απειλές. ....	45
Σχήμα 3.26: Μέρος της οθόνης συστήματος παρακολούθησης λιμένων της NEC. ....	45
Σχήμα 4.1: Μαγνητοαντίσταση σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. ....	48
Σχήμα 4.2: Μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων του υπερκράματος NiFe. ....	49
Σχήμα 4.3: Εσωτερική δομή του τυλίγματος τοποθέτησης/επανατοποθέτησης. ....	49

Σχήμα 4.4: Ηλεκτρικό κύκλωμα παροχής των ηλεκτρικών παλμών (α) και αναμενόμενη μορφή παλμών (β). .....	51
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τάσης απόκλισης και υπολογισμός της (αριστερά) και διάγραμμα χρονισμού (δεξιά). .....	53
Σχήμα 4.6: Απόκλιση και ευαισθησία (α). Συνδυασμός των ανοχών (β). .....	54
Σχήμα 4.7: Αντιστάθμιση με αντίσταση παράκαμψης. ....	55
Σχήμα 4.8: Αντιστάθμιση μέσω πόλωσης στον τελεστικό ενισχυτή. ....	56
Σχήμα 4.9: (α) Διακοπτόμενη έξοδος γέφυρας. (β) Κύκλωμα υλοποίησης της διακοπτόμενης μεθόδου. ....	56
Σχήμα 4.10: Κύκλωμα οδήγησης ρεύματος. ....	58
Σχήμα 4.11: Αντιστάθμιση μέσω ψηφιακής αφαίρεσης. ....	60
Σχήμα 4.12: Γέφυρα Wheatstone. ....	62
Σχήμα 4.13: Ανάλυση κυκλώματος κατά Thévenin. (α) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης αντίστασης κατά Thévenin, (β) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης πηγής τάσης κατά Thévenin και (γ) το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thévenin. ....	62
Σχήμα 4.14: Ο αισθητήρας HMC2003. (α) ο αισθητήρας από την πάνω πλευρά και (β) ο αισθητήρας από την κάτω πλευρά. ....	64
Σχήμα 4.15: Κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας του αισθητήρα. ....	65
Σχήμα 4.16: Παθητικό σύστημα αντιστάθμισης με χρήση ρεύματος. ....	66
Σχήμα 4.17: Παθητικό σύστημα αντιστάθμισης με χρήση της τάσης αναφοράς. ....	67
Σχήμα 4.18: Ενεργό σύστημα αντιστάθμισης με χρήση ρεύματος. ....	67
Σχήμα 4.19: Κύκλωμα υλοποίησης τοποθέτησης – επανατοποθέτησης με χρήση διακόπτη. ....	68
Σχήμα 4.20: Εικόνα της κάρτας ADAM-4017. ....	69
Σχήμα 4.21: Σύστημα επικοινωνίας των καρτών δειγματοληψίας με το υπολογιστή. ....	70
Σχήμα 4.22: Τυπική πυκνότητα φάσματος θορύβου της οικογένειας HMC1001-2. ....	72
Σχήμα 4.23: Πειραματική μελέτη θορύβου αισθητήρα HMR2003. Στα (α) και (β) είναι η μετρήσεις ακριβός στην έξοδο του αισθητήρα ενώ στα (γ) και (δ) είναι μετά τον ενισχυτή AMP04. Επιπλέον στα (α) και (γ) το σήμα εξόδου σε Volt και στα (β) και (δ) η έξοδος κοινωνικοποιημένη σε dB. ....	73
Σχήμα 4.24: Γραφική παράσταση απόκριση σήματος διάταξης. ....	74
Σχήμα 4.25: Διάταξη εργαστηρίου μελέτης της συχνότητας απόκρισης της διάταξης του αισθητήρα. ....	74
Σχήμα 4.26: Η συσκευασία του αισθητήρα. ....	75
Σχήμα 4.27: Κύκλωμα ανύψωσης τάσης. Σχεδιασμός μέσο του προγράμματος WEBENCH της Texas Instruments. ....	78
Σχήμα 4.28: Κύκλωμα ανύψωσης τάσης. Σχεδιασμός μέσο του προγράμματος WEBENCH της Texas Instruments. ....	78
Σχήμα 5.1: Πλέγμα για μετρήσεις με μόνιμο μαγνήτη. ....	82
Σχήμα 5.2: Φωτογραφία από το εργαστήριο. ....	82
Σχήμα 5.3: Μέτρο του πεδίου από το μετρούμενο πεδίο. Ο μαγνήτης γωνία 0° και βήμα 10cm. Αριστερά, το μέτρο που μετρήθηκε από τον αριστερό αισθητήρα, στο κέντρο το άθροισμα των δύο και δεξιά το μέτρο από τον δεξιό αισθητήρα. ....	83
Σχήμα 5.4: Μέτρο του πεδίου από το μετρούμενο πεδίο. Ο μαγνήτης γωνία 0° και βήμα 5cm. Αριστερά, το μέτρο που μετρήθηκε από τον αριστερό αισθητήρα, στο κέντρο το άθροισμα των δύο και δεξιά το μέτρο από τον δεξιό αισθητήρα. ....	83
Σχήμα 5.5: Μέτρο του πεδίου από το μετρούμενο πεδίο. Ο μαγνήτης γωνία 90° και βήμα 10cm Αριστερά, το μέτρο που μετρήθηκε από τον αριστερό αισθητήρα, στο κέντρο το άθροισμα των δύο και δεξιά το μέτρο από τον δεξιό αισθητήρα. ....	83
Σχήμα 5.6: Μετρήσεις με βήμα 10cm και γωνία μαγνήτη 0°. ....	84

Σχήμα 5.7: Μετρήσεις με βήμα 5cm και γωνία μαγνήτη $0^\circ$ .....	85
Σχήμα 5.8: Μετρήσεις με βήμα 10cm και γωνία μαγνήτη $90^\circ$ .....	86
Σχήμα 5.9: Διάταξη μέτρησης οχημάτων με δύο αισθητήρες και κίνηση των οχημάτων ανάμεσά τους. ....	87
Σχήμα 5.10: Φωτογραφία της διάταξης στο χώρο στάθμευσης του Πολυτεχνείου. ...	88
Σχήμα 5.11: Σήμα της διαταραχής του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή μέτρησης. .89	
Σχήμα 5.12: Φιλτραρισμένο σήμα με τη μέθοδο μέσης τιμής 10 σημείων της διαταραχής του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή μέτρησης. ....	90
Σχήμα 5.13: Αφιλτράριστο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου. ....	91
Σχήμα 5.14: Φιλτραρισμένο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου. ....	92
Σχήμα 5.15: Φιλτραρισμένο σήμα από εμπρόσθιο πέρασμα του αυτοκινήτου. ....	93
Σχήμα 5.16: Φιλτραρισμένο σήμα από αντίστροφο πέρασμα του αυτοκινήτου. ....	94
Σχήμα 5.17: Φιλτραρισμένο σήμα από περιστροφή του αυτοκινήτου. ....	95
Σχήμα 5.18: Διάταξη δεύτερου πειράματος αυτοκινήτου. ....	96
Σχήμα 5.19: Διάταξη στο φυσικό χώρο. ....	96
Σχήμα 5.20: Αφιλτράριστο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου. ....	98
Σχήμα 5.21: Φιλτραρισμένο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου. ....	99
Σχήμα 5.22: Φιλτραρισμένο σήμα από εμπρόσθιο πέρασμα του αυτοκινήτου. ....	100
Σχήμα 5.23: Φιλτραρισμένο σήμα από αντίστροφο πέρασμα του αυτοκινήτου. ....	101
Σχήμα 5.24: Λιμάνι της ΣΝΔ και του Πειραιά. ....	103
Σχήμα 5.25: Πλησιέστερη εικόνα του λιμανιού της ΣΝΔ. ....	103
Σχήμα 5.26: Εικόνα φουσκωτού σκάφους όμοιο με αυτό των πειραμάτων. ....	104
Σχήμα 5.27: Θέση των αισθητήρων στο λιμάνι. ....	104
Σχήμα 5.28: Φιλτραρισμένο σήμα από τις μετρήσεις με το φουσκωτό σκάφος. ....	106

## 2 Εισαγωγή

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά την ανίχνευση και τον εντοπισμό μαγνητικών μαζών με ειδικότερη εφαρμογή στον εντοπισμό πλοίων. Τα πλοία, όπως και κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό, προκαλούν αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο της περιοχής όπου βρίσκονται. Όταν η μεταβολή αυτή είναι σχετικά μεγάλη ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα, τότε μπορεί να υπολογιστεί και η θέση τους, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής αριθμός αισθητήρων στο σημείο ενδιαφέροντος. Παραδείγματος χάρη, το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) χρειάζεται τουλάχιστο τρεις σταθμούς για τον αρχικό υπολογισμό και περισσότερους για πιο ασφαλή προσδιορισμό της τοποθεσίας.

Η μέθοδος που εξετάζουμε στην εργασία αυτή είναι παθητική, δηλαδή υπάρχει μόνο δέκτης και όχι πομπός. Κατά συνέπεια το πλοίο ή η μαγνητική μάζα όχι μόνο δεν είναι σε θέση να γνωρίζει την τοποθεσία των δεκτών, αλλά και οι χειριστές του δεν επηρεάζονται από οποιοδήποτε είδος ακτινοβολίας που χρησιμοποιούν άλλες παρόμοιες μέθοδοι. Επιπλέον, τα χρησιμοποιούμενα αισθητήρια είναι εξαιρετικά ανθεκτικά και μη ευάλωτα στις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, ενώ συνήθως το κόστος τους κυμαίνεται σε λογικά επίπεδα. Για παράδειγμα, ένα ραντάρ παρουσιάζει αδυναμίες σε συνθήκες κακοκαιρίας και ειδικότερα σε περίπτωση αμμοθύελλας.

Το κυριότερο μειονέκτημα της εξεταζόμενης τεχνικής είναι ότι χρειάζονται αρκετοί αισθητήρες για να καλύψουν, ένα λιμάνι. Επιπλέον, η διαταραχή που προκαλείται από μία μαγνητική μάζα είναι μη γραμμική και κατά συνέπεια δυσκολεύει τη διαδικασία ανάπτυξης της διάταξης των δεκτών στο λιμάνι. Τέλος, η δυσκολία της μεθόδου προέρχεται και από την ευαισθησία που έχει σε σχέση με τον μαγνητικό θόρυβο. Κατά συνέπεια, χρειάζεται να λυθούν θεωρητικά προβλήματα που προέρχονται από τη φύση και τις ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου, καθώς και πρακτικά προβλήματα που προέρχονται από την κατασκευή των αντικειμένων, τα οποία μπορεί να εμπεριέχουν μέταλλα που δεν ανιχνεύονται γιατί δεν είναι σιδηρομαγνητικά.





### 3 Βιβλιογραφική Έρευνα

Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για περισσότερο από 2.000 χρόνια. Μια από τις πρώτες τους εφαρμογές ήταν η εύρεση του προσανατολισμού, όχι μόνο στη στεριά αλλά και στη θάλασσα. Ειδικότερα στη ναυσιπλοΐα η χρήση της πυξίδας, η οποία εκμεταλλεύεται το μαγνητικό πεδίο της γης, είναι πολύ σημαντική. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνταν αν το καράβι βρισκόταν στο αρχιπέλαγος, δηλαδή μακριά από οποιοδήποτε φάρο και οι καιρικές συνθήκες ήταν δύσκολες ώστε να εμποδίζεται η παρατήρηση των άστρων. Στην αρχαιότητα, οι Έλληνες (Κρήτες, Μυκηναίοι), ο λαός της θάλασσας κατά τους Αιγυπτίους, χρησιμοποιούσαν τα άστρα και τους φάρους κατά τη ναυσιπλοΐα τους. Πρόβλημα παρουσιάζεται όταν υπάρχουν άσχημες καιρικές συνθήκες, όπως ομίχλη η οποία περιορίζει δραστικά την ορατότητα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση της μαγνητικής πυξίδας θεωρείται αναγκαία.

Στη σημερινή εποχή, παρόλο που υπάρχουν τα συστήματα εντοπισμού θέσης όπως το LORAN (Long Range Navigation), το αμερικάνικο GPS (Global Positioning System), το ευρωπαϊκό Galileo, το ρωσικό GLONASS και άλλα, η μαγνητική πυξίδα εξακολουθεί να βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Το LORAN βασίζεται σε επίγειους σταθμούς για τη μετάδοση του σήματος. Για το λόγο αυτό οι καιρικές συνθήκες όπως και η καμπυλότητα της γης επηρεάζουν την εμβέλεια κάλυψης. Στον αντίποδα, τα συστήματα GPS, Galileo και GLONASS είναι συστήματα GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Το GNSS είναι ένα σύστημα που έχει παγκόσμια κάλυψη και οι σταθμοί μετάδοσης των σημάτων του βρίσκονται σε δορυφόρους οι οποίοι περιστρέφονται γύρω από τη γη. Οι δορυφόροι αυτοί δεν είναι γεωσύγχρονοι και βρίσκονται σε μια απόσταση περίπου  $20 \cdot 10^6$  μέτρα από τη γη. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να υπάρξουν παρεμβολές στα σήματά τους.

Για τους λόγους αυτούς στην αεροπλοΐα και στη ναυσιπλοΐα η χρήση της μαγνητικής πυξίδας είναι σημαντική. Και στις δύο περιπτώσεις, αλλά ειδικότερα στην αεροπλοΐα, η μαγνητική πυξίδα συνοδεύεται και από γυροσκόπιο το οποίο βελτιώνει δραστικά την ακρίβεια της πυξίδας, όταν αυτή δεν είναι οριζοντιωμένη.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έφερε αλλαγές και στους μαγνητικούς αισθητήρες κάνοντάς τους μικρότερους σε μέγεθος, συμβατούς με τα ηλεκτρονικά (τη μικροηλεκτρονική), κυρίως όμως πολύ πιο ευαίσθητους.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των μαγνητικών αισθητήρων είναι ότι δεν μας ενδιαφέρει το μαγνητικό πεδίο αυτό καθαυτό, αλλά σαν μια ενδιάμεση μεταβολή ενός άλλου μεγέθους. Τέτοιου είδους μεταβολές μπορεί να είναι η γωνιακή ταχύτητα, η γραμμική ταχύτητα, η παρουσία μαγνητικού μελανιού, η ανίχνευση μηχανοκίνητων οχημάτων και πλοίων, η κατεύθυνση κίνησης, αλλά και η μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να μετρηθούν και απευθείας και έμμεσα, λόγω της διαταραχής που προκαλούν στο περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Όταν ο μαγνητικός αισθητήρας είναι αρκετά ευαίσθητος ώστε να εντοπίσει τη διαταραχή αυτή, στην έξοδό του θα πάρουμε ένα σήμα το οποίο χρειάζεται επεξεργασία. Η διαδικασία επεξεργασίας είναι πολλές φορές αρκετά πολύπλοκη αλλά αναγκαία προκειμένου για την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Ένας τρόπος να κατηγοριοποιήσουμε τους μαγνητικούς αισθητήρες είναι η ευαισθησία τους. Γενικά, μπορούμε να τους διακρίνουμε σε τρεις κατηγορίες:

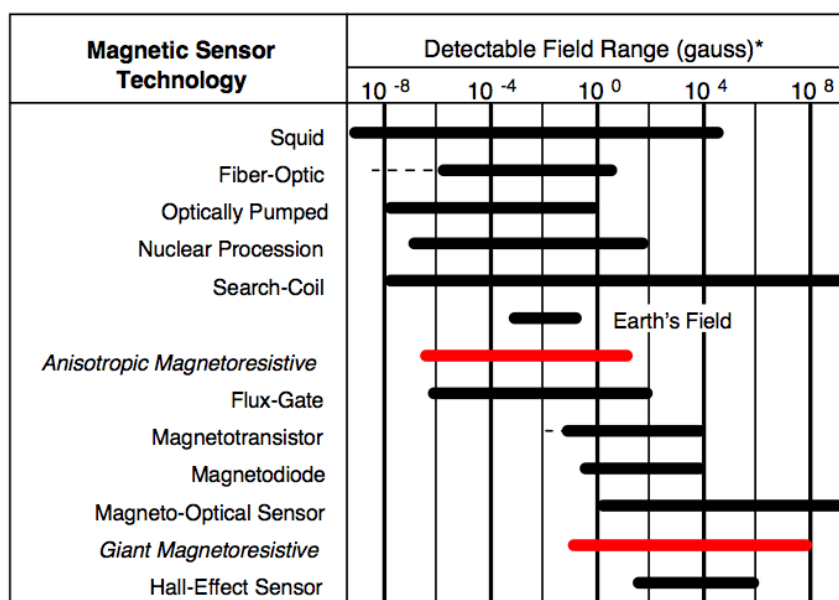
- ασθενούς πεδίου
- μέσου πεδίου
- υψηλού πεδίου.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν ασθενή μαγνητικά πεδία. Ως ασθενή πεδία στην περίπτωσή μας θεωρούμε τα πεδία που είναι μικρότερα από 1μ gauss.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν πεδία μέσης τάξης. Έτσι, θεωρούμε σαν μέσης τάξης πεδία, αυτά τα οποία που βρίσκονται στο εύρος από 1μ gauss έως 10 gauss. Σε αυτό το εύρος ανήκει και το μαγνητικό πεδίο της γης.

Η τρίτη κατηγορία αφορά τους αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν πεδία ισχυρότερα από 10 gauss.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ένα διάγραμμα κατηγοριοποίησης των αισθητήρων με βάση το εύρος του μαγνητικού πεδίου το οποίο μπορούν να μετρήσουν:



**Σχήμα 3.1: Κατηγοριοποίηση αισθητήρων με βάση το εύρος του μαγνητικού πεδίου που μπορούν να μετρήσουν.**

Το μαγνητικό πεδίο είναι διανυσματικό μέγεθος. Οι μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν το πεδίο αυτό με διαφορετικούς τρόπους. Μερικοί μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν το ολικό μέτρο του επιβαλλομένου πεδίου, αλλά δεν μπορούν να μετρήσουν τη διεύθυνση (βαθμωτοί αισθητήρες). Άλλοι αισθητήρες μετρούν το μέτρο του πεδίου ως προς τον άξονα ευαισθησίας τους (omnidirectional sensors). Μερικοί αισθητήρες μπορεί να ανιχνεύουν και τη φορά του πεδίου (bidirectional sensors). Οι διανυσματικοί αισθητήρες μπορεί να έχουν δύο ή τρεις bidirectional αισθητήρες, ώστε να είναι σε θέση να μετρήσουν το διάνυσμα του πεδίου. Μερικοί αισθητήρες για να δώσουν σήμα στην έξοδό τους, θα πρέπει το μαγνητικό πεδίο να ξεπεράσει ένα κατώτατο όριο (κατώφλι).

### 3.1 Αισθητήρες Πεδίου.

#### 3.1.1 Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα (3.1), στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μαγνητόμετρα SQUID και τα πηνία ανίχνευσης (search coils). Αργότερα θα εξετάσουμε συνοπτικά το καθένα από αυτά.

##### 3.1.1.1 Αισθητήρες Επαγωγής

Οι αισθητήρες επαγωγής βασίζονται στο νόμο του Faraday.

$$V_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d N \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Όπου:

$V_i$  = η επαγόμενη τάση στα άκρα του πηνίου

$N$  = ο αριθμός των σπειρών

$\Phi$  = η μαγνητική ροή που περνά από το πηνίο

$A(t)$  = η κάθετη διατομή του πηνίου

$H(t)$  = το μαγνητικό πεδίο

$\mu_0$  = μαγνητική διαπερατότητα του αέρα.

$\mu_r(t)$  = η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα σε σχέση με την  $\mu_0$ .

Η εξίσωση (3.1) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$V_i = N A \mu_0 \mu_r \frac{dH(t)}{dt} + N \mu_0 \mu_r H \frac{dA}{dt} + N A \mu_0 H \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (3.2)$$

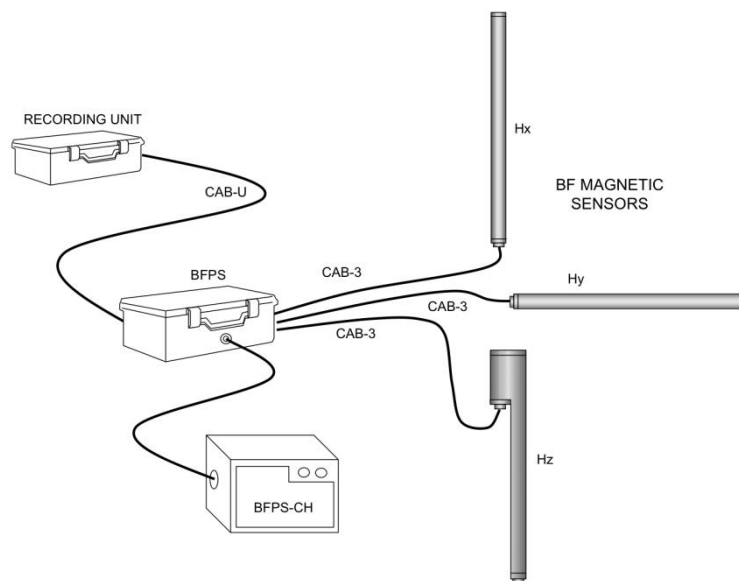
Τα πηνία ανίχνευσης (search coils) βασίζονται στον πρώτο όρο. Ο μεσαίος όρος περιγράφει τα περιστρεφόμενα πηνία, όπου ο όρος  $A(t)$  είναι η ωφέλιμη περιοχή του επιπέδου κάθετα στο μετρούμενο πεδίο. Ο τρίτος όρος είναι η εξίσωση που διέπει τα μαγνητόμετρα πύλης ροής (fluxgate).

Ένα σωληνοειδές επαγωγικό πηνίο μαγνητομέτρου αποτελείται από πολλά επίπεδα σπειρών. Τα πηνία ανίχνευσης χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Τα πηνία που βασίζονται σε πυρήνα αέρα και σε αυτά με πυρήνα σιδηρομαγνητικό. Τα πηνία με σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά είναι λιγότερα σταθερά από αυτά χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τέτοιου είδους πηνία πρέπει να είναι μακριά και λεπτά και να έχουν χαμηλή απομαγνήτιση. Οι επαγωγικοί αισθητήρες είναι παθητικού τύπου και πρέπει να διαχωριστούν από τους αισθητήρες μέτρησης επαγωγής, οι οποίοι απαιτούν κυκλώματα διέγερσης για τη λειτουργία τους. Τους αισθητήρες μέτρησης επαγωγής θα τους δούμε στην κατηγορία GMI.

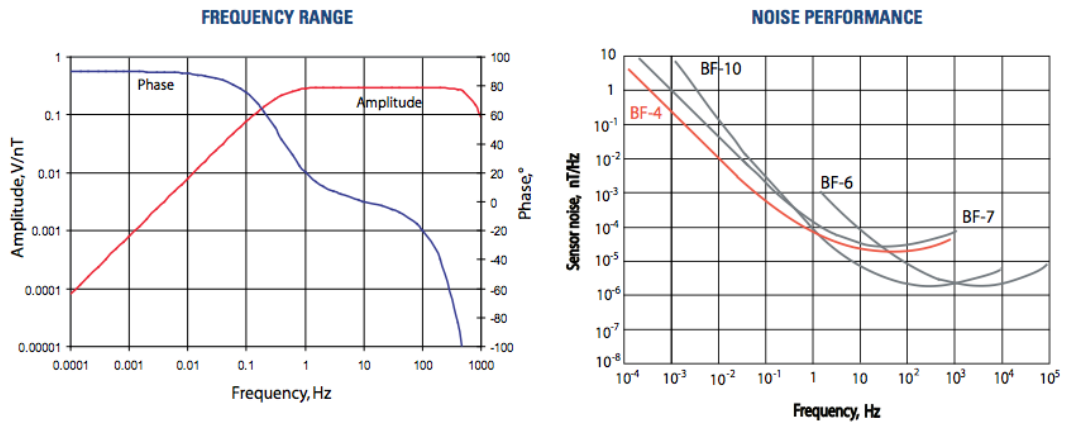
Συνοπτικά για τα πηνία «ανίχνευσης» μπορούμε να πούμε ότι χρησιμοποιούνται σε αρκετούς τομείς. Στη γεωφυσική για να μετρούν αδύνατους παλμούς του πεδίου της γης και για συχνότητες στο εύρος (1mHz έως 1Hz). Στο εύρος ακουστικών συχνοτήτων μπορεί να λειτουργούν σαν μικρόφωνο, όπως επίσης για καταγραφή και ανάγνωση μαγνητικών ταινιών. Στη μεταλλουργική χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση-μελέτη των δευτερευόντων μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται μετά από διέγερση, όπως για παράδειγμα τη μέτρηση του θορύβου Barkhausen.

Τα πηνία με πυρήνα αέρα σε συνδυασμό με μαγνητόμετρα πύλης ροής (Fluxgate) χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη DCσυνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Αυτό γίνεται με την αφαίρεση από τη μέτρηση του fluxgate της μέτρησης από τα πηνία ανίχνευσης.

Η απόκριση συχνότητας των πηνίων «ανίχνευσης» είναι γραμμική για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, το οποίο εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Τα πηνία πολλών τυλιγμάτων εμφανίζουν κατανεμημένες χωρητικότητες και με την υψηλή επαγωγή τους προκαλούν συντονισμό στις χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, στις υψηλές συχνότητες η έξοδος των πηνίων «ανίχνευσης» είναι μη γραμμική. Η παρασιτική αυτή χωρητικότητα επηρεάζεται από τη συχνότητα και κατά συνέπεια η απόκριση συχνότητας αλλάζει με τη θερμοκρασία, παρόλο που είναι προβλέψιμη η μεταβολή με τη θερμοκρασία. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη με τη συχνότητα, το δε ρεύμα εξόδου έχει μια επίπεδη απόκριση για συχνότητες  $f \gg \frac{R}{2\pi L}$ . Με την αύξηση της διατομής του πηνίου η ευαισθησία αυξάνεται. Ο παράγοντας  $\frac{R}{L}$  εξαρτάται από την ποσότητα του χαλκού, τον αριθμό των σπειρών και τη διατομή του, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή. Όπως για παράδειγμα να ανταποκρίνεται στο θόρυβο εισόδου του ενισχυτή. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε ένα τέτοιου είδους πηνίο «ανίχνευσης».



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση ενός πηνίου «ανίχνευσης» για γεωφυσικές μελέτες.



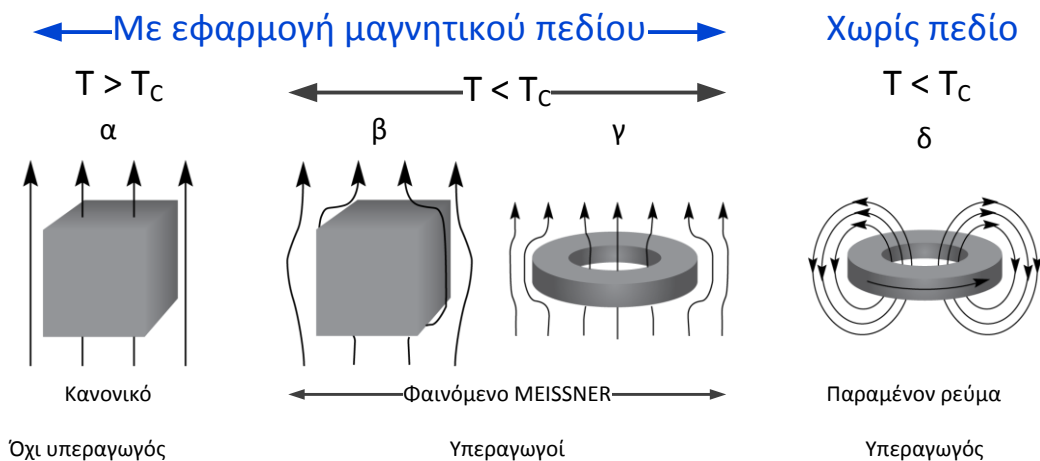
Σχήμα 3.3: Γραφήματα απόκρισης και θορύβου συναρτήσεις συχνότητας ενός πηνίου «ανίχνευσης» για γεωφυσικές μελέτες.

### 3.1.1.2 SQUID( *Superconducting Quantum Inference Devices* ).

Τα μαγνητόμετρα SQUIDs βασίζονται στο φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας. Το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας εμφανίζεται όταν συγκεκριμένα υλικά υφίστανται δραματική μείωση της αντίστασης τους, η οποία γίνεται μηδενική για θερμοκρασίες που πλησιάζουν το απόλυτο μηδέν. Το 1911 ο Kamerlingh – Onnes ανακάλυψαν ότι η αντίσταση του υδραργύρου πέφτει σε σχεδόν μηδενικές τιμές όταν ψυχθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες από 4.2°K. Σύμφωνα με την θεωρία Bardeen – Cooper-Schriber (BCS), ο μηχανισμός που επιτρέπει αυτή την υπεραγωγιμότητα είναι η ανταλλαγή φωνονίων (phonon) μεταξύ των ζευγών ηλεκτρονίων (Cooperpairs).

#### 3.1.1.2.1 Φαινόμενο Meissner

Μία ενδιαφέρουσα ιδιότητα των υπεραγωγών παρατηρείται όταν ένας υπεραγωγός τοποθετηθεί σε μαγνητικό πεδίο και ψυχθεί κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης. Στην κανονική κατάσταση, οι γραμμές της μαγνητικής ροής διαπερνούν το υλικό, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.4.α). Καθώς το υλικό γίνεται υπεραγωγό η μαγνητική ροή σταματά να διαπερνά τον υπεραγωγό, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα (3.4.β). Αυτό συμβαίνει σαν συνέπεια των εξισώσεων Maxwell, στις οποίες δεν μπορεί να υπάρχει διαφορά δυναμικού πεδίου μέσα στον υπεραγωγό. Εάν ο υπεραγωγός έχει το σχήμα δακτυλίου, η μαγνητική ροή που διέρχεται από το εσωτερικό του δακτυλίου εγκλωβίζεται, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.4.γ). Εάν η μαγνητική ροή διακοπή, εμφανίζεται ένα επαγόμενο ρεύμα που περιφέρεται στο δακτύλιο το οποίο τείνει να διατηρήσει την μαγνητική ροή σταθερή ( $\Phi = B dA$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα (3.4.δ). Σε ένα κανονικό αγωγό περιμένουμε το ρεύμα που το διαρρέει να μειωθεί πολύ γρήγορα βάση του τύπου  $I \tau = I_0 e^{-\frac{tR}{L}}$  όπου R η αντίσταση και L η αυτεπαγωγή. Σε ένα υπεραγωγό το ηλεκτρικό ρεύμα αυτό μπορεί να το διαρρέει για χρόνια χωρίς καμία μετρήσιμη μείωση.



Σχήμα 3.4: Το φαινόμενο Meissner σε ένα υπεραγωγό δακτύλιο με εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. {α} κανονικό (συνήθης αγωγός), {β} και {γ} Το φαινόμενο Meissner (υπεραγωγός) και {δ} παραμένον ρεύμα (υπεραγωγός).

### 3.1.1.2.2 Κβαντισμός της μαγνητικής ροής

Η παγιδευμένη μαγνητική ροή έχει κάποιες ασυνήθιστες ιδιότητες. Αυτό που μας ενδιαφέρει πρώτα από όλα δεν μπορούμε να αλλάξουμε με συνεχές τρόπο την μαγνητική ροή. Η αλλαγή της μαγνητικής ροής συμβαίνει μόνο σε διακριτά επίπεδα, όπως φαίνονται στο σχήμα (3.5). Με άλλα λόγια η μαγνητική ροή είναι κβαντισμένη και υπάρχει μόνο σε πολλαπλάσια μιας μικρής θεμελιώδους ποσότητας, η οποία ονομάζεται και κβαντική μαγνητική ροή ( $\Phi_0$ ) της οποίας το πλάτος είναι  $2.068 \cdot 10^{-15} \text{Wb}$  ( $1 \text{Wb} \cdot \text{m}^2 = 1\text{T}$ ).



Σχήμα 3.5: Κβάντηση της μαγνητικής ροής.

### 3.1.1.2.3 Το φαινόμενο Josephson

Έστω ότι έχουμε ένα υπεραγώγιμο σύρμα σε βρόχο, ο οποίος διακόπτεται με μία περιοχή με κανονική αντίσταση. Η αναμενόμενη συμπεριφορά που θα περίμενε κανείς είναι ότι ο βρόχος αυτός θα συμπεριφερθεί σαν κανονικός αγωγός και η τιμή του ρεύματος που το διαρρέει, όταν η διέγερση είναι μηδενική, είναι να μειωθεί γρήγορα. Το 1964 ο Josephson προέβλεψε ότι είναι πιθανόν τα ηλεκτρόνια να εμφανίζουν το φαινόμενο "tunneling" καθώς περνούν από τον ένα υπεραγωγό στον άλλο, που τους διαχωρίζει ένα στρώμα αντίστασης. Για μικρά μήκη μικρότερα του συνεκτικού μήκους και για ρεύματα μικρότερα του κρίσιμου ρεύματος  $I_C$  το ρεύμα διαπερνά το φράγμα της αντίστασης χωρίς πτώση τάσης. Για ένα υπεραγώγιμο βρόχο, ο οποίος διακόπτεται με μία ασθενή επαφή Josephson, η μαγνητική ροή δημιουργεί ένα ρεύμα στο βρόχο. Όταν το ρεύμα είναι κάτω από το κρίσιμο ρεύμα, ο βρόχος συμπεριφέρεται ως κανονικός υπεραγωγός. Οποιαδήποτε αλλαγή στην μαγνητική ροή προκαλεί ένα ρεύμα θωράκισης, το οποίο στην συνέχεια δημιουργεί ένα μικρό μαγνητικό πεδίο το οποίο τείνει να αντισταθμίσει την αλλαγή στην μαγνητική ροή.

Τα μαγνητόμετρα SQUID χρησιμοποιούν το φαινόμενο Josephson για να μετρούν τις εξαιρετικά μικρές μεταβολές στην μαγνητική ροή.

#### 3.1.1.2.4 Τα μειονεκτήματα των SQUID.

Όπως όλοι οι αισθητήρες έτσι και τα μαγνητόμετρα SQUID παρουσιάζονται τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιεί σαν πεδίο αναφοράς την μαγνητική ροπή που εγκλώβισε κατά την μετάβαση από την μη υπεραγώγιμη στην υπεραγώγιμη κατάσταση.
- Η μέγιστη συχνότητα μαγνητικού πεδίου που μπορούν να μετρήσουν τα SQUID είναι τα 100KHz.
- Τα SQUID έχουν περιορισμό στο ρυθμό μεταβολής του ρεύματος και υπάρχει ένα όριο μεταβολής το οποίο δεν πρέπει να ξεπεραστεί.

Γενικότερα τα μαγνητόμετρα SQUID έχουν την υψηλότερη ανάλυση και ακρίβεια από όλα τα μαγνητόμετρα και ο κύριος περιοριστικός παράγοντας προέρχεται από τα ηλεκτρονικά που τα συνοδεύουν.



### 3.1.2 Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου γης.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες του τύπου αυτού συχνά χρησιμοποιούν το πεδίο της γης, δηλαδή χρησιμοποιούν το πεδίο της γης ως αναφορά για να καθορίσουν την πορεία και να εντοπίσουν ανωμαλίες που προκαλούν τα οχήματα στο πεδίο της γης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες:

- Fluxgate
- Magnetoinductive
- AMR (Anisotropic Magnetic Resistance).

#### 3.1.2.1 Αισθητήρες πύλης ροής (Fluxgate)

Οι αισθητήρες Fluxgate έχουν τη δυνατότητα να μετρούν το πλάτος και τη διεύθυνση μαγνητικού πεδίου συνεχούς ρεύματος ή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος. Έχουν υψηλή ευαισθησία και μπορούν να μετρήσουν πεδία από  $10^{-10}$ T έως  $10^{-4}$ T. Η βασική αρχή λειτουργίας του αισθητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα (3.8).

Το μαλακό μαγνητικό υλικό του πυρήνα του αισθητήρα είναι περιοδικά κορεσμένο σε αμφοτέρως τις πολικότητες από το πεδίο διέγερσης, το οποίο παράγεται από το ρεύμα διέγερσης  $I_{exc}$  μέσω του πηνίου διέγερσης. Εξ αιτίας αυτού, η διαπερατότητα του πυρήνα αλλάζει και η ροή dc που συνδέεται με το μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο  $B_0$  διαμορφώνεται. Η πύλη (gating) της ροής που λαμβάνει χώρα όταν ο πυρήνας είναι κορεσμένος έδωσε το όνομα στη συσκευή.

Στο σχήμα (3.6) παρουσιάζονται οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου. Η έξοδος της συσκευής είναι συνήθως η τάση  $V_1$  η οποία επάγεται στο αισθητήριο πηνίο στη δεύτερη ή και ανωτέρας τάξης αρμονική της συχνότητας διέγερσης. Αυτή η τάση είναι ανάλογη του μετρούμενου πεδίου.

Η πρώτη πατέντα σε αισθητήρες fluxgate καταχωρήθηκε από τον H.P. Thomas το 1931. Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο για την ανίχνευση υποβρυχίων και αργότερα για γεωφυσικές εφαρμογές. Αισθητήρες Fluxgate βρίσκουμε και στους δορυφόρους και μπορούν να λειτουργήσουν στο φεγγάρι και στο μακρινό διάστημα. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή των fluxgate είναι για να μετρούν χαμηλής έντασης ρεύματα ή να συγκρίνουν δύο ρεύματα μεταξύ τους.

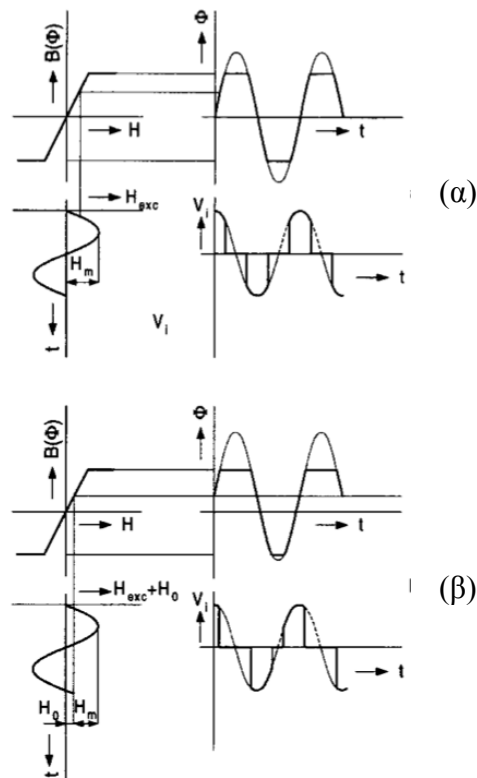
Η ανάλυση των Fluxgate μπορεί να φθάσει τα 10pTesla και 1nTesla για σταθερότητα μακράς διάρκειας. Η απόκλιση λόγω θερμοκρασίας είναι περίπου  $0.1\text{nTesla}/^\circ\text{C}$ . Το επίπεδο θορύβου είναι συγκρίσιμο με αυτό των SQUID υψηλών θερμοκρασιών, αλλά με μεγαλύτερο δυναμικό εύρος.

##### 3.1.2.1.1 Θεωρία

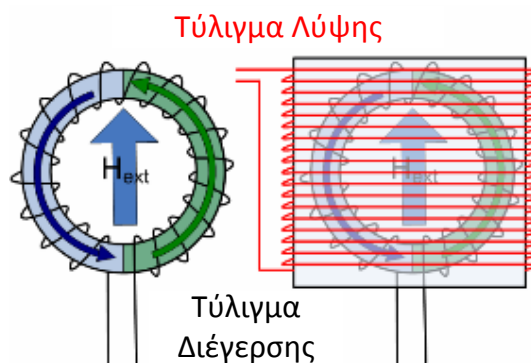
Έστω ότι έχουμε ένα ιδανικό βρόχο υστέρησης του ενός μισού του αισθητήρα (F1 Vs). Η διέγερση είναι ίδια με τα χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών, εφόσον το μαγνητικό κύκλωμα είναι κλειστό, όπως φαίνεται στο σχήμα (α). Όταν το εξωτερικό πεδίο DC εφαρμόζεται, η χαρακτηριστική καμπύλη του βρόγχου παραμορφώνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα (β). Για μερικές κρίσιμες τιμές του H διέγερσης, το μισό του πυρήνα, στο οποίο το πεδίο διέγερσης έχει την ίδια διεύθυνση με το μετρούμενο

πεδίο, γίνεται κορεσμένο. Τη στιγμή αυτή η χαλάρωση (reluctance) του μαγνητικού κυκλώματος αυξάνεται πολύ γρήγορα, επειδή η ροή περιορίζεται από την πύλη (flux is “gated”). Η διαπερατότητα του άλλου μισού πυρήνα μειώνεται. Επιπλέον, η χαρακτηριστική καμπύλη μετατοπίζεται από το εξωτερικό πεδίο κατά μήκος του άξονα  $H$ .

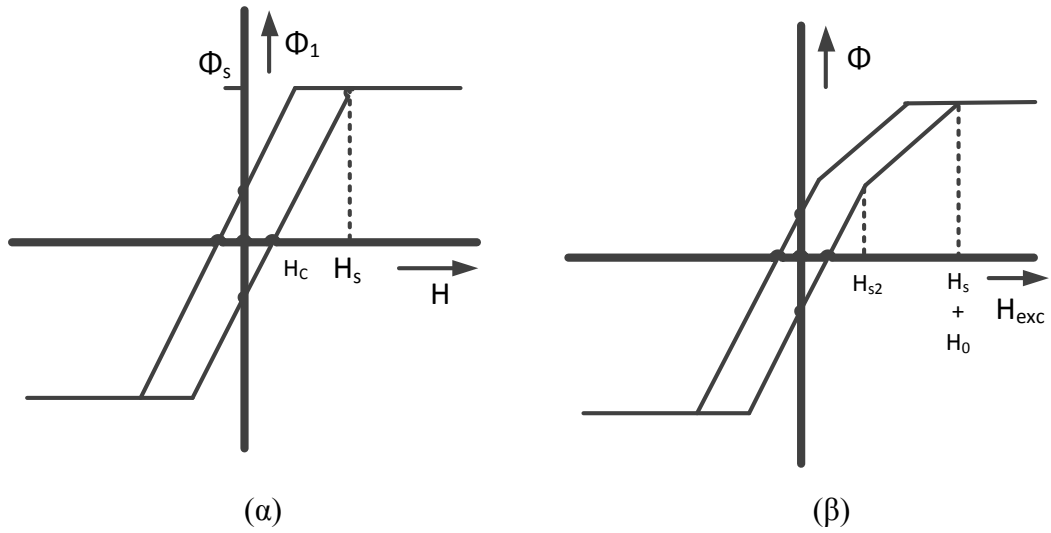
Η χαρακτηριστική του δεύτερου μισού του πυρήνα είναι συμμετρική ως προς τον  $\Phi$  άξονα. Με την άθροιση των δύο βρόχων παρατηρούμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς του  $\Phi$  ως προς την  $H$  διέγερση χαρακτηριστική η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα (3.7). Το πλάτος της συνάρτησης μεταφοράς (το οποίο αντιστοιχεί σε αλλαγές κορυφής ως προς κορυφή του πηνίου λήψης) αυξάνεται με το μετρούμενο πεδίο. Αναφορικά με την εξάρτηση, αυτή είναι γραμμική μέχρι που η ένταση του πεδίου να είναι υψηλή και ολόκληρος ο αισθητήρας να κορεστεί.



Σχήμα 3.6 : Απλοποιημένες κυματομορφές: (α) σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο και (β) με εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο  $H_0$ .



Σχήμα 3.7 : Fluxgate με πυρήνα δακτυλίου.



Σχήμα 3.8: Fluxgate με πυρήνα δακτυλίου: Χαρακτηριστικά του μαγνητισμού του μισού πυρήνα.  
 (α) χωρίς εξωτερικό πεδίο, (β) με εξωτερικό συνεχές πεδίο  $H_0$ .

### 3.1.2.2 Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης.

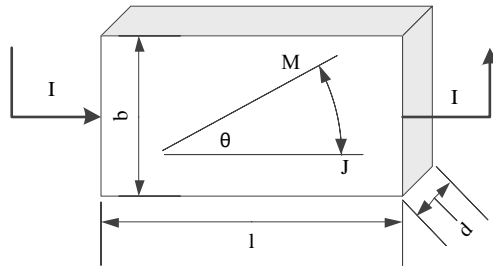
Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης βασίζονται στο φαινόμενο της σκέδασης των ηλεκτρονίων, η οποία εξαρτάται από τη διεύθυνση της στροφορμής (spin) ως προς το στιγμιαίο (spontaneous) μαγνητισμό των φερρομαγνητικών υλικών. Την κατηγορία αυτή μπορούμε να τη χωρίσουμε σε τρεις υποκατηγορίες. Η πρώτη υποκατηγορία είναι οι αισθητήρες με ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR), οι οποίες μαγνητοαντιστάσεις κατασκευάζονται σε λεπτά φιλμς. Η δεύτερη υπο- κατηγορία είναι οι αντιστάσεις γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR), οι οποίες βασίζονται στο φαινόμενο της ανταλλαγής σύζευξης (coupling) στα υπέρλεπτα μαγνητικά και μη μαγνητικά επίπεδα (superlattices). Η τρίτη υποκατηγορία αφορά τους αισθητήρες τύπου κολοσσιαίας μαγνητοαντίστασης (CMR).

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης είναι κατάλληλοι για μέσης τάξης πεδία, όπως αυτά του μαγνητικού πεδίου της γης και σε εφαρμογές μέτρησης θέσης. Μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνικές μικροηλεκτρονικής, ώστε να είναι μικρού μεγέθους και υψηλής ακρίβειας, αλλά συνάμα χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, στους σκληρούς δίσκους υπάρχει μια κεφαλή GMR σε κάθε βελόνα ανά μία επιφάνεια δίσκου.

#### 3.1.2.2.1 Αισθητήρες ARM.

Το φαινόμενο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης βασίζεται στον ανισοτροπικό σκεδασμό των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας, με ασύζευκτα ηλεκτρόνια στην ζώνης σθένους, π.χ. το 3d τροχιακό των στοιχείων μετάπτωσης Fe, Co, και Ni. Η ενέργεια των δύο καταστάσεων της στροφορμής της μαγνητικής ροπής ( $\pm\mu_B$ ) διαφέρει κατά την κβαντική μηχανική από την ενέργεια ανταλλαγής. Αυτά τα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση φερρομαγνητισμού και φερριμαγνητισμού.

Η θεωρητική ανάλυση των AMR δίνεται από τους «όρους» στάθμη Fermi και το διάγραμμα πυκνότητας ηλεκτρονίων της κατάστασης. Η δυσκολία είναι ότι το ανισοτροπικό μέρος της αντίστασης εξαρτάται από το ακριβές τρισδιάστατο σχήμα της επιφάνειας Fermi (της 3d πτυχής της στάθμης Fermi), η οποία δεν είναι γνωστή με ακρίβεια εκτός από πολύ λίγα μαγνητικά υλικά. Ως εκτούτου, οι θεωρητικοί δεν έχουν καταφέρει να υπολογίσουν το φαινόμενο περισσότερο από το ένα δέκατο του πλάτους. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι όλα τα δεδομένα για τα υλικά θα πρέπει να βρεθούν εμπειρικά. Το πλάτος και το πρόσημο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (ARM) δεν μπορούν να προβλεφθούν με ευκολία. Παρόλα αυτά, τα περισσότερα υλικά έχουν θετική σταθερά ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, το οποίο σημαίνει ότι η υψηλή αντίσταση εμφανίζεται όταν τα διαστήματα που περιγράφουν την αυθόρμητη μαγνήτιση  $M_s$  και την πυκνότητα ρεύματος  $J$  είναι παράλληλα. Το σχήμα (3.9) παριστάνει μια μαγνητική περιοχή ενός φερρομαγνητικού λεπτού υμενίου. Το φαινόμενο AMR μπορεί να περιγραφεί απλά στο δισδιάστατο χώρο. Όπως φαίνεται στο σχήμα (3.9) οι διαστάσεις του ορθογωνικού λεπτού φερρομαγνητικού υμενίου είναι  $l$  το μήκος,  $b$  το πλάτος, και  $d$  το πάχος. Επίσης φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων. Ένα εφαρμοζόμενο πεδίο κατά τον  $H_y$  περιστρέφει το  $M_s$  κατά γωνία  $\theta$  από τον εύκολο άξονα μαγνήτισης στο δύσκολο άξονα της ομοαξονικής ανισοτροπίας.



Σχήμα 3.9: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση μιας μαγνητικής περιοχής λεπτού υμενίου.

Η εξίσωση (3.3) δίνει την εξάρτηση της σταθεράς ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τη γωνία  $\theta$ .

$$\rho_{\theta} = \rho_0 + (\rho_p - \rho_0) \cdot \cos^2 \theta = \rho_0 + \Delta\rho \cdot \cos^2(\theta) \quad (3.3)$$

Όπου  $\rho = \rho_p$  για  $M_s$  παράλληλο με το ρεύμα  $J$  και

$\rho = \rho_0$  για  $M_s$  και  $J$  κάθετα.

Το πηλίκο  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$  είναι η σταθερά μαγνητοαντίστασης. (The quotient  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$  is the magnetoresistive coefficient.) Η εξίσωση που δίνει η αντίσταση είναι:

$$R_{\theta} = \rho_{\theta} \frac{l}{b \cdot a} = R + \Delta R \cdot \cos^2 \theta \quad (3.4)$$

### 3.1.3 Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου.

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ένας μόνιμος μαγνήτης για να δημιουργήσει το πεδίο του οποίου η μεταβολή ανιχνεύεται στη συνέχεια από έναν αισθητήρα. Οι αισθητήρες του τύπου αυτού είναι κατάλληλοι για τέτοιες εφαρμογές. Η χρήση του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, συνήθως μεγαλύτερου από το πεδίο της γης, δεν πρέπει να επηρεάζει μόνιμα τον αισθητήρα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι αισθητήρες Hall και GMR.

#### 3.1.3.1 Αισθητήρες GMR.

Οι αισθητήρες GMR είναι κυρίως γνωστοί από τις κεφαλές ανάγνωσης στους σκληρούς δίσκους και τελευταίως στις μνήμες MRAM. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες GMR είναι ότι έχουν υψηλή ευαισθησία, υψηλή ταχύτητα, χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και προπάντων μπορούν να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Μπορούν να κατασκευαστούν σε μία ευρεία περιοχή λειτουργίας ως προς το μαγνητικό πεδίο, την τιμή της αντίστασης, το σχήμα και το μέγεθος.

Το φαινόμενο GMR ανακαλύφθηκε στα τέλη του 1980 από πολλές διαφορετικές ερευνητικές ομάδες και οι θεμελιώδεις ιδιότητες μελετήθηκαν με λεπτομέρεια. Η έξοδος του GMR είναι άμεσα ανάλογη της μαγνητικής κατάστασης του λεπτού φιλμ από φερρομαγνητικά μέταλλα.

Ένας απλοϊκός τρόπος να κατανοήσουμε το φαινόμενο GMR είναι να κοιτάξουμε τις μεταβολές της αντίστασης της απλούστερης δομής GMR: Ο προσανατολισμός του διανύσματος των spin σε μια δομή που αποτελείται από επαλληλίες στρωμάτων-επιπέδων φερρομαγνητικού (FM) και μη (NF) υλικού. Κάθε φερρομαγνητικό επίπεδο χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα μαγνητικού διπόλου. Για περισσότερη απλοποίηση των μαγνητικών φαινομένων, ένα από τα φερρομαγνητικά επίπεδα τοποθετείται με ένα παρακείμενο αντιφερρομαγνητικό επίπεδο, έτσι ώστε ένα από τα δύο μαγνητικά στρώματα να είναι ελεύθερο να ανταποκριθεί στο εξωτερικό επιβαλλόμενο πεδίο. Τα επίπεδα αυτά έχουν πάχη της τάξης των νανομέτρων και το πάχος ολόκληρης της στοίβας των επιπέδων κυμαίνεται από 10nm έως 20nm. Η αντίσταση μεταξύ των επιπέδων είναι η μικρότερη όταν τα μαγνητικά δίπολα είναι παράλληλα, ενώ στην περίπτωση των αντιπαράλληλων μαγνητικών διπόλων εμφανίζεται η μεγαλύτερη αντίσταση. Στο σχήμα (3.10) δίνεται μία κάθετη διατομή της δομής του GMR.

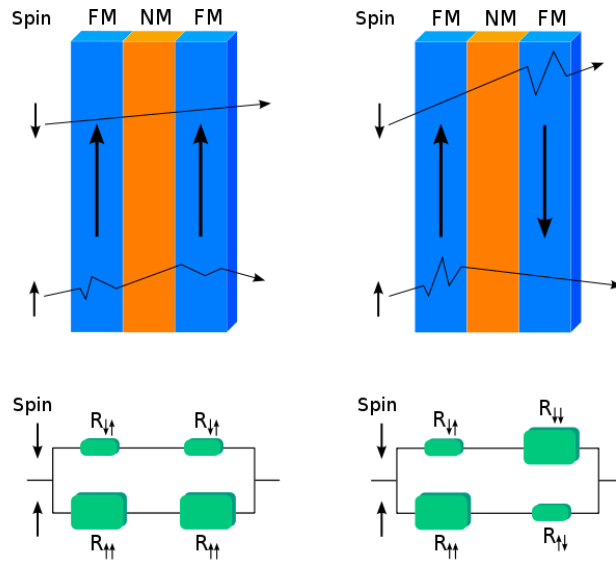
Η αντίσταση που έχει ο GMR σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του πεδίου, όπως τη σχέση που έχει το B με το βρόχο H ενός «ασύνδετου» (unpinned) FM επιπέδου. Στα σχήματα (3.11) και (3.12) φαίνονται οι βρόχοι αυτού. Εάν στα μαλακά μαγνητικά υλικά ο μαγνητισμός περιστρέφεται πάνω στο επίπεδο του φιλμ αντί να αναστρέφεται, η αντίσταση των προσκείμενων επιπέδων μεταβάλλεται. Εάν υποθέσουμε ότι κάθε μαγνητικό επίπεδο μπορεί να είναι ομοιόμορφο, η εξάρτηση της αντίστασης και της γωνίας του μαγνητισμού είναι:

$$R(\theta) = R_{par} + \frac{\Delta R}{2} (1 - \cos \theta) \quad (3.5)$$

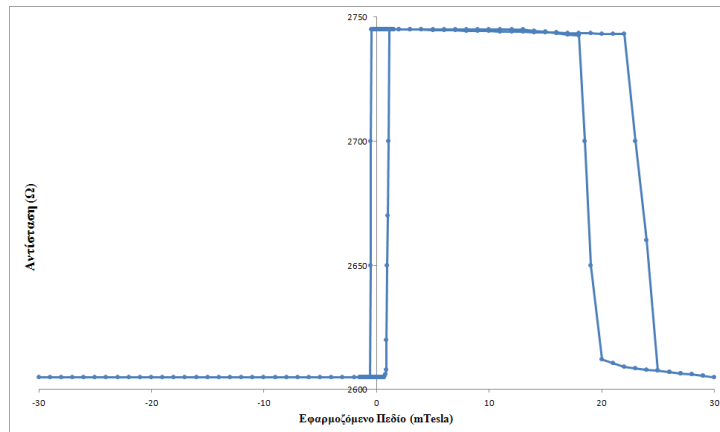
Εδώ ο όρος  $\Delta R$  είναι το μέτρο της μέγιστης μεταβολής καθώς η γωνία  $\theta$  περιστρέφεται από παράλληλα σε αντιπαράλληλα μεταξύ των δύο επιπέδων FM. Δηλαδή  $R_{par}$  και  $R_{anti}$  είναι οι αντιστάσεις, όταν τα επίπεδα είναι παράλληλα και αντιπαράλληλα.

$$\Delta R = R_{anti} - R_{par} = R_{max} - R_{min} \quad (3.6)$$

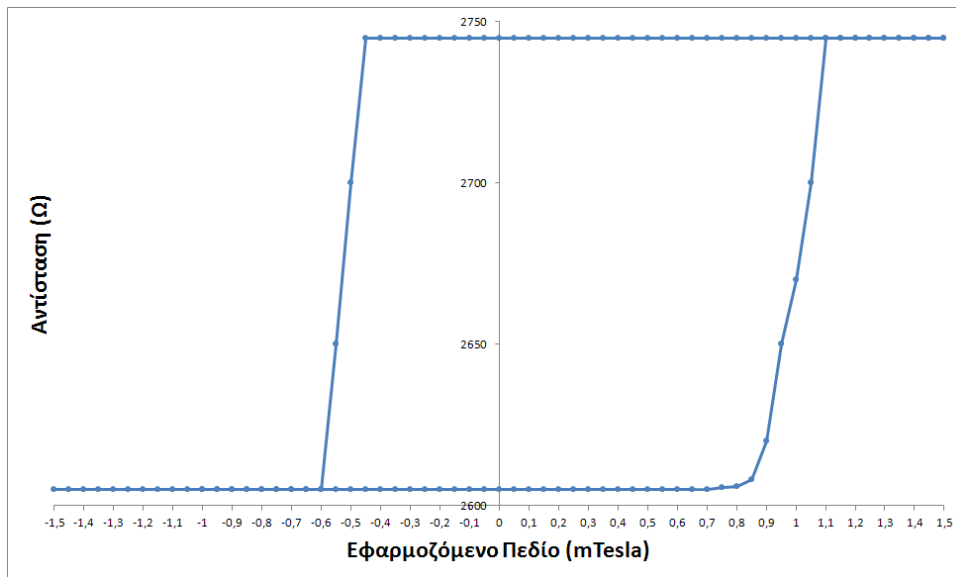
Στο ακόλουθο σχήμα (3.13) παρουσιάζεται μία γραφική παράσταση ενός τυπικού GMR.



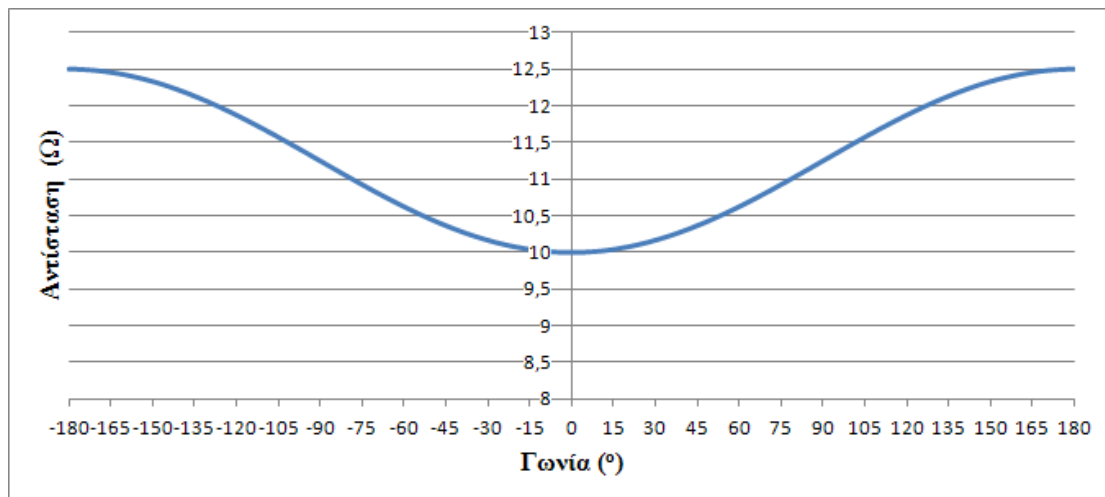
Σχήμα 3.10: Κάθετη διατομή ενός GMR.



Σχήμα 3.11: Ο κύριος βρόχος απόκρισης όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο παράλληλο στο εύκολο άξονα μαγνήτισης των μαλακών και των σκληρών μαγνητικών επιπέδων. Τα μαλακά μαγνητικά επίπεδα αλλάζουν σε πεδίο περίπου 1mT, ενώ η αγκύρωση των σκληρών μαγνητικών επιπέδων



Σχήμα 3.12: Διέγερση της αντίστασης με χαμηλό πεδίο. Μόνο το μαλακό μαγνητικό επίπεδο μεταβάλλετε.



Σχήμα 3.13: Μεταβολή της τιμής της αντίστασης ως συνάρτηση της γωνίας.



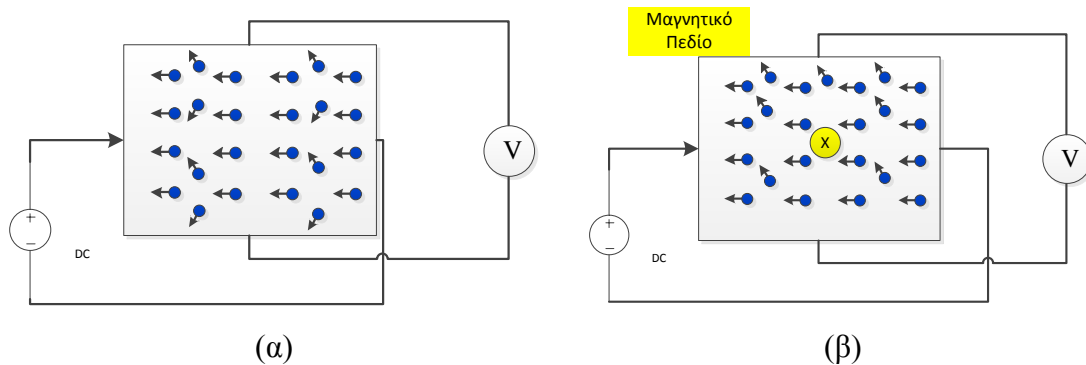
### 3.1.3.2 Αισθητήρες φαινομένου Hall.

Οι αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές. Το φαινόμενο Hall είναι γνωστό για πάνω από εκατό χρόνια, αλλά μόνο τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες άρχισε η ευρεία εφαρμογή του. Η πρώτη εφαρμογή εκτός εργαστηρίου ήταν στα 1950 σαν αισθητήρας ισχύος σε φούρνους μικροκυμάτων. Το 1968 έγινε η πρώτη εφαρμογή αισθητήρων σε ηλεκτρολογία. Σήμερα συσκευές που αξιοποιούν το φαινόμενο Hall χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως υπολογιστές, ραπτομηχανές, στα αυτοκίνητα, αεροσκάφη, ακόμη και σε ιατρικά μηχανήματα.

Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον Dr. Edwin Hall 1879, ο οποίος την εποχή εκείνη ήταν υποψήφιος διδάκτορας στο πανεπιστήμιο του Johns Hopkins στη Baltimore. Ο Hall προσπαθούσε να επιβεβαιώσει τη θεωρία για τη ροή ηλεκτρονίων που προτάθηκε από τον Kelvin πριν μία τριακονταετία. Ο Hall βρήκε ότι όταν τοποθετήσουμε ένα μαγνήτη, έτσι ώστε η μαγνητική ροή να περνά κάθετα στην επιφάνεια ενός φύλλου χρυσού το οποίο διαπερνά ρεύμα, εμφανίζεται μία διαφορά τάσης στα απέναντι άκρα. Βρήκε επίσης ότι η τάση αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαπερνά τον αγωγό και ανάλογη της μαγνητικής ροής που διαπερνά κάθετα τον αγωγό.

#### 3.1.3.2.1 Θεωρία λειτουργίας του φαινομένου Hall.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο, στην περίπτωση μας ένα ηλεκτρόνιο, κινείται κάθετα σε μαγνητικό πεδίο, υφίσταται μία δύναμη Lorenz κάθετα στη διεύθυνση κίνησης. Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε θα δημιουργηθεί τάση, η οποία είναι κάθετη τόσο στο ηλεκτρικό ρεύμα όσο και στο μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 3.14: Δομή αισθητήρα Hall. (α) Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και (β) Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

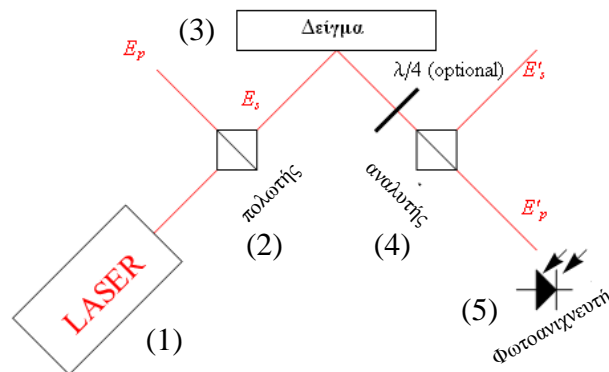
### 3.1.3.2.2 Μαγνητοοπτικοί αισθητήρες.

Οι οπτικοί αισθητήρες έχουν πολύ καλά χαρακτηριστικά, όπως η αναισθησία σε θόρυβο, δυνατότητα λειτουργίας σε επικίνδυνα περιβάλλοντα όπως ραδιενεργά, υψηλών τάσεων και άλλα. Με τη χρήση φωτός μπορούμε να κατασκευάσουμε αισθητήρες με πολύ υψηλές προδιαγραφές, όπως για παράδειγμα τα οπτικά γυροσκόπια τα οποία αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά προβλήματα του αποσυγχρονισμού που έχουν τα κλασσικά γυροσκόπια. Έτσι και οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες είναι χρήσιμοι σε δυσχερείς συνθήκες.

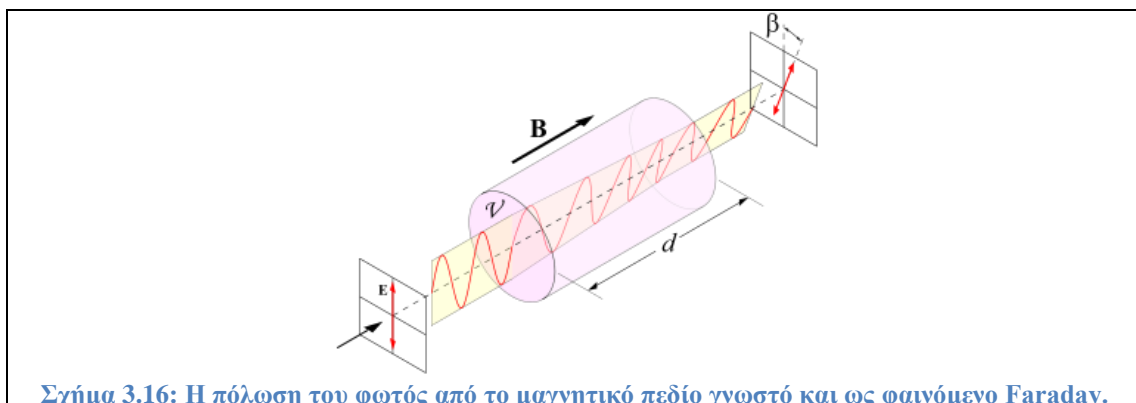
Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των φαινομένων Faraday, Kerr καθώς και των μεθόδων μέτρησης της μαγνητικής ροής.

### 3.1.3.2.3 Το φαινόμενο Faraday.

Όταν ένα γραμμικά πολωμένο φως περνά μέσα από ένα μέσο, το οποίο τοποθετήθηκε σε μαγνητικό πεδίο και η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι παράλληλη με αυτή της διάδοσης του φωτός, τότε το πεδίο πόλωσης του φωτός περιστρέφεται. Στο σχήμα (3.15) φαίνεται μία κλασσική διάταξη του Faraday. Μία φωτεινή πηγή (1) περνά μέσα από φίλτρο πόλωσης (2) και στη συνέχεια μέσα από μαγνητοοπτικά υλικά (3). Στη συνέχεια περνά μέσα από ένα πολωτικό αναλυτή (4) και ακολούθως συλλέγεται από φωτοανιχνευτή (5).



Σχήμα 3.15: Διάταξη μέτρησης μαγνητικού πεδίου με οπτική ίνα.



Σχήμα 3.16: Η πόλωση του φωτός από το μαγνητικό πεδίο γνωστό και ως φαινόμενο Faraday.

### 3.2 Reverse Engineer Monitoring

Ίσως ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα στην επιστήμη είναι να κατανοούμε πώς λειτουργούν τα φυσικά φαινόμενα και να τα αναπαράγουμε σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Στην περίπτωση όμως που εξετάζουμε, δηλ. στο μαγνητισμό, αυτό δεν είναι αρκετό. Θέλουμε οπωσδήποτε να ξέρουμε πού είναι η πηγή του μαγνητικού πεδίου. Η κατασκευή ενός μοντέλου που επιτρέπει από το αποτέλεσμα να φτάνουμε πίσω στην αιτία συναντάται στην βιβλιογραφία συναντάται ως “reverse engineering”. Απαραίτητες προϋποθέσεις για τη δημιουργία ενός μοντέλου για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων, ειδικά χαμηλής έντασης είναι η κατανόηση των νόμων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια μαγνητικών μετρήσεων, η αναπαραγωγή τους σε ελεγχόμενο περιβάλλον, η γνώση της πηγής του μαγνητικού πεδίου. Η κατασκευή του μοντέλου συνήθως δεν είναι απλοϊκή. Πρέπει να πρώτα να έχουμε κατανοήσει σε βάθος το φυσικό φαινόμενο που μελετάμε και το πώς αυτό επηρεάζεται από τα το περιβάλλον.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής ήταν η εύρεση της θέσης σκαφών μετρώντας το μαγνητικό τους αποτύπωμα, δηλαδή την μαγνητική διαταραχή που προκαλούν στο πεδίο της γης. Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων στο χώρο του λιμανιού της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων (ΣΝΔ) με ένα φουσκωτό σκάφος συνειδητοποιήσαμε την ανεπαίσθητη αλλαγή της μαγνητικής απόκρισης. Το μαγνητικό αποτύπωμα του φουσκωτού ήταν συγκρίσιμο με το θόρυβο του περιβάλλοντος. Έτσι η χρήση μεθόδων αποθορυβοποίησης ήταν σημαντικοί. Ξεκινώντας από απλά παραδείγματα που αφορούν τον εντοπισμό της θέσης ενός αυτοκινήτου, η εύρεση της ταχύτητας του και ο προσανατολισμού του. Θα περιγράψουμε πώς η NEC έχει σχεδιάσει το δικό τις σύστημα για επίβλεψη λιμανιών. Παρόλο που το σύστημα που παρουσιάζει η NEC δεν χρησιμοποιεί αποκλειστικά μαγνητικούς αισθητήρες ή ενός είδους αισθητήρες είναι ενδιαφέρον να δούμε τι υπάρχει σήμερα διαθέσιμο.

Σε γενικές γραμμές η παρατήρηση της κίνησης σε έναν λιμένα είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Η ύπαρξη πολλών πλοίων διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικών υλικών καθιστά το πρόβλημα δυσεπίλυτο. Όπως στην ανάπτυξη κάθε συστήματος έτσι και σε αυτό ο άνθρωπος έχει την ευθύνη για την ανάλυση των δεδομένων την στιγμή που συμβαίνει το γεγονός. Όταν κατανοηθεί πλήρως το σύστημα τότε μπορεί να γίνει και η υλοποίηση του σε αυτόματο σύστημα.

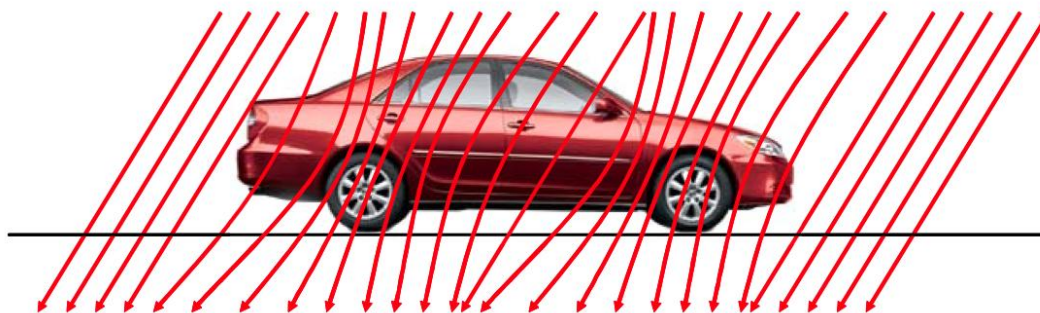
### **3.2.1 Εφαρμογή μαγνητικών αισθητήρων σε ανίχνευση οχημάτων.**

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή που υπάρχει στη βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα που εξετάζουμε είναι η ανίχνευση οχημάτων με χρήση αισθητήρα τύπου ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR). Με την αύξηση της κίνησης των αυτοκινούμενων οχημάτων παρουσιάζεται μια τάση για την ανάπτυξη καλύτερων και χαμηλότερου κόστους συστημάτων ανίχνευσης. Έτσι, για το σκοπό αυτό η χρήση αισθητήρα AMR θεωρείται ιδανική.

Οι τεχνολογίες ανίχνευσης της κίνησης οχημάτων σε αυτοκινητοδρόμους και εθνικές οδούς έχουν βελτιωθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες μπορούν να ανιχνεύσουν την κίνηση, όπως για παράδειγμα σωλήνες αέρα ή πηνία ενσωματωμένα στο οδόστρωμα, κινηματογράφηση των δρόμων και άλλες παλαιότερου τύπου μέθοδοι, οι οποίες συλλέγουν τα απαιτούμενα στοιχεία για την παρακολούθηση της τροχιάς κίνησης. Στη σημερινή εποχή με την πληθώρα των αυτοκινήτων, τραμ, σιδηροδρόμων που σε αρκετά σημεία διασταυρώνονται, η έγκαιρη και γρήγορη συλλογή πληροφοριών, όπως για παράδειγμα η θέση, η ταχύτητα, η διεύθυνση και η φορά κίνησης, είναι πρωταρχικής σημασίας. Έχοντας μια τέτοιου είδους πληροφόρηση μπορούμε όχι μόνο να αποφύγουμε ατυχήματα, αλλά και να βελτιστοποιήσουμε την αξιοποίηση του υπάρχοντος δικτύου ελέγχοντας έξυπνα την τροχιά κίνησης.

Κάνοντας μια έρευνα για το είδος των μετάλλων και την κραμάτωσή τους που υπάρχουν στα μηχανοκίνητα οχήματα μπορούμε να δούμε ότι έχουν σημαντικές ποσότητες από φερρομαγνητικά μέταλλα (σίδηρο, ατσάλι, νικέλιο, κοβάλτιο). Καθώς η τεχνολογία βελτιώνεται, βελτιώνονται μαζί τους και οι ιδιότητες των μαγνητικών αισθητήρων, όπως η διακριτική ικανότητα και το εύρος μέτρησής τους. Υπάρχει μια πληθώρα αισθητήρων όπως είδαμε προηγουμένως. Μερικοί από αυτούς είναι αρκετά ευαίσθητοι, ώστε να ανιχνεύσουν το μαγνητικό πεδίο που προκαλούν τα οχήματα.

Παρόλα αυτά, δεν σημαίνει ότι όλα τα οχήματα έχουν το δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να διεγείρει κάθε είδους αισθητήρα. Για το λόγο αυτό αποκλείουμε τους αισθητήρες ισχυρού πεδίου. Χάρη στο μαγνητικό πεδίο που μας δίνει η φύση και που εκτείνεται από το βόρειο έως το νότιο πόλο και διαπερνά κάθε υλικό που υπάρχει σε αυτό, μπορούμε να το θεωρήσουμε ως μία πηγή που διεγείρει κάθε τι φερρομαγνητικό που περιλαμβάνει. Η ιδέα είναι ότι μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ιδιότητα που έχουν τα φερρομαγνητικά υλικά να παραμορφώνουν το μαγνητικό πεδίο της γης που βρίσκεται στην περιοχή τους. Το μαγνητικό πεδίο της γης είναι περίπου 0,5 gauss. Για το λόγο αυτό χρειαζόμαστε αισθητήρες που να μπορούν να μετρούν από κλάσματα του μεγέθους αυτού έως μερικά gauss. Στο σχήμα () βλέπουμε μια αναπαράσταση της διαταραχής που προκαλεί το αυτοκίνητο στη μαγνητική ροή του πεδίου της γης που το διαπερνά.



Σχήμα 3.17: Το μαγνητικό πεδίο της γης που διαπερνά ένα όχημα.

Καθώς οι γραμμές της μαγνητικής ροής συγκλίνουν ή αποκλίνουν, τοποθετούμε ένα μαγνητικό αισθητήρα κοντά στο όχημα. Έντος της εμβέλειας της ζώνης επιρροής του αυτοκινήτου. Καθώς ο αισθητήρας δεν προσομοιάζει το σχήμα του αυτοκινήτου, η ανίχνευση της διαταραχής του πεδίου δεν θα είναι αξιόπιστη. Ένα εξίσου σημαντικό ζήτημα είναι η απόσταση που θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας από το όχημα. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής στην παρουσία του οχήματος μειώνεται με εκθετικό ρυθμό. Αυτό είναι και καλό και κακό, αναλόγως της εφαρμογής και της μεθοδολογίας μέτρησης. Εάν η επιθυμητή διαδικασία είναι η μέτρηση της απόστασης, τότε αυτή η εκθετική μείωση είναι ιδιαίτερα ενοχλητική. Όμως, σε άλλες περιπτώσεις που δεν θέλουμε να έχουμε εσφαλμένη ένδειξη, όπως για παράδειγμα σε θέσεις στάθμευσης ή σε λωρίδες κυκλοφορίας, τότε η γρήγορη απόσβεση δεν δημιουργεί προβλήματα στην ανίχνευση της μαγνητικής μάζας.

Συνήθεις εφαρμογές που αφορούν την ανίχνευση οχήματος με χρήση μαγνητικού αισθητήρα είναι:

- Έλεγχος διασταυρώσεων σε σιδηροτροχιές
- Σε χώρους ταχείας εξυπηρέτησης (Driving through service) (FastFood, Banking)
- Αυτόματος έλεγχος σε πύλες και πόρτες
- Παρακολούθηση της κίνησης (ταχύτητας και διεύθυνσης)
- Ανίχνευση θέσης στάθμευσης
- Παρκόμετρα.

### 3.2.1.1 Δομή Μαγνητικού Αισθητήρα (MAGNETIC SENSOR HARDWARE)

Στην εφαρμογή αυτή θέλουμε αισθητήρες μέτρησης του πεδίου της γης με αρκετή ευαισθησία. Οι δύο πιο πρόσφορες κατηγορίες είναι τα πηνία και οι γέφυρες μαγνητοαντίστασης. Από τη μία τα πηνία μπορούν να δημιουργήσουν αισθητήρες μαγνητοεμπέδησης (MI) και πύλης ροής (μαγνητόμετρα ροής, fluxgate), που είναι μεγάλα σε μέγεθος και χρειάζονται κυκλώματα που θα παράγουν την ενεργό διέγερση. Για τις μαγνητοαντιστάσεις δύο τύποι είναι κυρίως διαθέσιμοι, οι AMR και οι GMR. Όπως είπαμε προηγουμένως, οι AMR μετρούν το πεδίο μόνο ως προς τη διεύθυνση του άξονα ευαισθησίας τους. Έτσι για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου αισθητήρα απαιτούνται τρεις AMR. Ένα άλλο πλεονέκτημα των AMR, που μας χρησιμεύει σε τέτοιες εφαρμογές, είναι η εξαιρετική γραμμικότητά τους. Οι GMR μπορούν και αυτοί να μετρήσουν πεδία χαμηλής έντασης, αλλά έχουν το μειονέκτημα ελάχιστης κατευθυντικότητας (directionality). Ένα άλλο μειονέκτημα των GMR είναι το ότι χρειάζονται πεδίο ισχυρότερο από αυτό της γης, ώστε να βελτιωθεί η

γραμμικότητα του αισθητήρα. Για τους λόγους αυτούς στην εφαρμογή που ακολουθεί έγινε χρήση αισθητήρα AMR.

Σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του αισθητήρα AMR και των κυκλώματων που τον συνοδεύουν.

### 3.2.1.2 Ανίχνευση Μαγνητικής Υπογραφής Οχήματος.

Η ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου της γης μάς δίνει ένα σχετικά σταθερό πεδίο στην περιοχή του στατικού αισθητήρα. Το πεδίο της γης είναι περίπου 0.5gauss, υπάρχει όμως το ενδεχόμενο το πεδίο να μειωθεί περαιτέρω σε έναν άξονα. Έτσι, ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή το πεδίο μπορεί να μεταβάλλεται από σχεδόν μηδενικό έως  $\pm 0.7$ gauss. Καθώς το όχημα πλησιάζει τον αισθητήρα, η μεταβολή του πεδίου της γης προέρχεται από δύο πηγές, τα μαλακά μαγνητικά υλικά και τα σκληρά μαγνητικά υλικά (soft and hard magnetic materials). Ορίζουμε ως μαλακό σίδηρο (soft-iron) τα φερρομαγνητικά υλικά τα οποία συγκεντρώνουν τη μαγνητική ροή μέσα στο υλικό, χωρίς να προσθέτουν ή δημιουργούν επιπλέον μαγνητική ροή μέσα στο υλικό. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά (hard-irons) είναι υλικά τα οποία όχι μόνο συγκεντρώνουν τη μαγνητική ροή, αλλά επιπλέον προσθέτουν και αυτά επιπλέον μαγνητική ροή. Αν και τα σκληρά σίδηρα μπορούν να συνεισφέρουν στο πεδίο ακόμη και εκατοντάδες gauss, στα οχήματα παρατηρείται λιγότερο από δύο gauss παραμένουσας μαγνήτισης λόγω του τρόπου κατασκευής τους.

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μπορεί μεν να συγκεντρώνουν τη μαγνητική ροή της γης, όμως η αύξηση στο υπάρχον πεδίο θα είναι μικρότερη από το μισό της μόνιμης μαγνητικής ροής στο σημείο του αισθητήρα. Καθώς τα μαλακά σίδηρα συγκεντρώνουν τη μαγνητική ροή, ταυτόχρονα τείνουν να αποκεντρώνουν τη μαγνητική ροή η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση του πεδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα (). Το αναμενόμενο για τον αισθητήρα είναι να βλέπει ένα πεδίο πόλωσης της γης από μερικές δεκάδες gauss έως εκατοντάδες gauss με «στατικές» αιχμές που μπορεί να φτάνουν τα  $\pm 3$ gauss, καθώς το όχημα πλησιάζει τον αισθητήρα. Οι σχεδιαστές προϊόντων για να αναγνωρίζουν τη μαγνητική υπογραφή του οχήματος δεν τους αρέσει να χρησιμοποιούν αυτές τις δυναμικές αιχμές, αλλά προτιμούν να χρησιμοποιούν τη δυναμική περιοχή των  $\pm 1$ gauss, καθώς επίσης και τις απότομες μεταβολές του πεδίου πόλωσης για την αναγνώριση του οχήματος



Σχήμα 3.18: Μαγνητική υπογραφή οχήματος.

Στο σχήμα (3.18) παρουσιάζει τη διαταραχή των μαγνητικών γραμμών του πεδίου της γης καθώς το όχημα κινείται στο βόρειο ημισφαίριο της γης. Τα πράσινα κουτιά δείχνουν πιθανές θέσεις του αισθητήρα κοντά στο οδόστρωμα. Το γράφημα παρουσιάζει τη διαμήκη μεταβολή του πεδίου και συνάμα την έξοδο του αισθητήρα, όταν ο άξονας ευαισθησίας του ήταν προσανατολισμένος νότια. Μιας και στην περιοχή αυτή το μαγνητικό πεδίο δίνει μία πόλωση στον αισθητήρα η οποία είναι αρνητική, περαιτέρω αύξηση της μαγνητικής ροής μειώνει ακόμη περισσότερο την τάση εξόδου, ενώ αντίθετα με την μείωση της μαγνητικής ροής υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της τάσης.

Οι αισθητήρες μπορεί να τοποθετούνται πλαγίως του οδοστρώματος. Αν τοποθετηθούν και κάθετα προς το οδόστρωμα πάλι θα αισθανθούν την απόκλιση του πεδίου κάθε φορά που θα περνά το όχημα, αλλά η μαγνητική υπογραφή θα είναι διαφορετική. Στις περισσότερες εφαρμογές η ένταση και ο προσανατολισμός της μεταβολής της τάσης δεν είναι σημαντικός, αλλά αυτό που μετράει περισσότερο για τον εντοπισμό είναι η σημαντική μεταβολή της τάσης εξόδου. Για την εφαρμογή που εξετάζουμε η πιο αξιόπιστη μέτρηση είναι αυτή της μεταβολής του διανυσματικού μέτρου του μαγνητικού πεδίου της γης. Χρησιμοποιώντας ψηφιακές μετρήσεις των τριών αξόνων του αισθητήρα, μετά από ενίσχυση και επεξεργασία, το διανυσματικό μέτρο του πεδίου θα είναι:

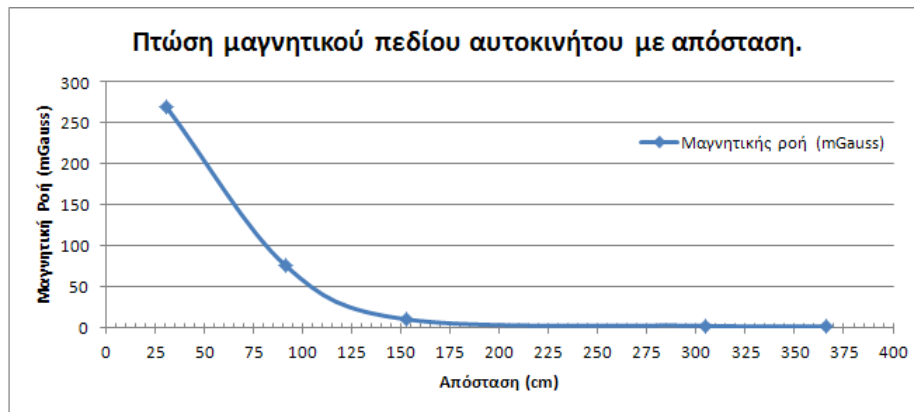
$$A = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Καθώς το όχημα παρκάρει πλαγίως ή πάνω από τη θέση που βρίσκεται ο μαγνητικός αισθητήρας, η ένδειξη του αισθητήρα θα αποκλίνει από την προϋπάρχουσα. Αυτό εφαρμόζεται κυρίως σε παρκόμετρα, στην καταμέτρηση σε χώρους στάθμευσης, στην αυτόματη αλλαγή πορτών και στην ταχεία εξυπηρέτηση (drive through).

Σημειώνουμε ότι η έξοδος του αισθητήρα έχει μεγάλη εξάρτηση από την απόσταση μεταξύ αισθητήρα και οχήματος. Στην περίπτωση που ο αισθητήρας είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια του οδοστρώματος, μόλις μερικά εκατοστά από το όχημα, θα έχει σαν αποτέλεσμα τη σχεδόν λεπτομερή λήψη όλων των παρεμβολών, λόγω των φερρομαγνητικών υλικών που υπάρχουν στο αμάξωμα του οχήματος. Σε απόσταση ενός μέτρου η μαγνητική υπογραφή του οχήματος μειώνεται περίπου στο ένα δέκατο της αρχικής. Το εύρος της υπογραφής μοιάζει περισσότερο σαν καμπύλη παρά σαν υπογραφή.

<b>Απόσταση του οχήματος από τον αισθητήρα (cm)</b>	<b>Μεταβολή της μαγνητικής ροής (milligauss)</b>
30.48	270
91.44	75
152.4	10
304.8	2
365.76	1

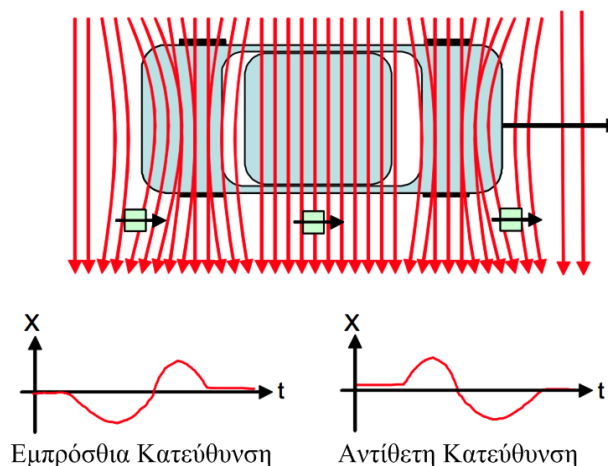
Πίνακας 3.1: Μαγνητική μεταβολή σε σχέση με την απόσταση.



Σχήμα 3.19: Μεταβολή απόκρισης αισθητήρα συναρτήσει της απόστασης από το όχημα.

### 3.2.1.3 Ανίχνευση κατεύθυνσης κίνησης οχημάτων.

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε με ποιο τρόπο με έναν αισθητήρα μπορούμε να πάρουμε τη μαγνητική υπογραφή οχημάτων. Ο αισθητήρας βρισκόταν κατά κύριο λόγο κάτω από το έδαφος, με τον άξονα ευαισθησίας του στη διεύθυνση κίνησης, την οποία συνηθίζουμε να αποκαλούμε και X-άξονα. Στην περίπτωση που θέλουμε να ανιχνεύσουμε τη διεύθυνση κίνησης, δεν είναι απαραίτητο ο αισθητήρας να είναι ακριβώς κάτω από το όχημα, αλλά μπορεί να βρίσκεται και στο πλάι. Στο σχήμα 8 φαίνεται μια τυπική διάταξη ενός αισθητήρα για την ανίχνευση της κατεύθυνσης κίνησης.



Σχήμα 3.20: Ανίχνευση στη X διεύθυνση με χρήση ενός μαγνητικού αισθητήρα.

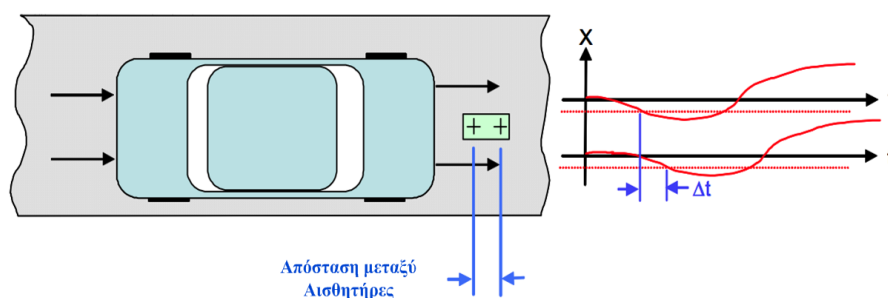
Στο σχήμα (3.20) βλέπουμε ότι οι μαγνητικές γραμμές αρχίζουν να καμπυλώνουν στην περιοχή του αισθητήρα, καθώς το όχημα πλησιάζει τον αισθητήρα. Η μείωση της μαγνητικής ροής κάτω από το σημείο πόλωσης έχει σαν επακόλουθο και η τάση εξόδου του αισθητήρα να μειωθεί. Στη συνέχεια με την απομάκρυνση του οχήματος από τον αισθητήρα οι μαγνητικές γραμμές πυκνώνουν περισσότερο από το προϋπάρχον πεδίο και κατά συνέπεια η τάση του αισθητήρα ανεβαίνει πάνω από την τάση του πεδίου πόλωσης. Όταν δε το όχημα απομακρυνθεί τελείως, η έξοδος του αισθητήρα επανέρχεται. Όταν το όχημα έρχεται από την αντίθετη κατεύθυνση, το γράφημα εξόδου του αισθητήρα θα έχει το κατοπτρικό γράφημα σε σχέση με το προηγούμενο. Στη περίπτωση πολλαπλών οχημάτων αυτό πρέπει να έχουμε μία λίστα



με τις μαγνητικές υπογραφές, ώστε να γίνεται πρώτα η αναγνώριση του οχήματος και στη συνέχεια ποια είναι η κατεύθυνσή του.

Ένας άλλος πιο αξιόπιστος τρόπος για την ανίχνευση κατεύθυνσης κίνησης είναι ο ακόλουθος: Αντί ενός αισθητήρα τώρα τοποθετούμε δύο αισθητήρες με μια μικρή μετατόπιση και με ευθυγραμμισμένους τους άξονες ευαισθησίας προς τη διεύθυνση κίνησης με την ίδια κατεύθυνση. Η διάταξη αυτή λειτουργεί σαν μαγνητικό διαφορικό μαγνητόμετρο (Gradiometer). Το κινούμενο όχημα θα έχει το ίδιο μαγνητικό αποτύπωμα και στους δύο αισθητήρες, αλλά αυτό που θα διαφέρει είναι η χρονική μετατόπιση των δύο υπογραφών.

Έτσι, ο εγγύτερος αισθητήρας ως προς το όχημα θα δεχθεί πρώτος τη μαγνητική διαταραχή η οποία θα ξεπεράσει ένα κατώφλι και μετά από κλάσματα του δευτερολέπτου ο απομακρυσμένος αισθητήρας θα δεχθεί την ίδια διαταραχή. Ακριβώς το αντίθετο θα συμβεί, εάν η κίνηση του οχήματος γίνει στην προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αφού η απόσταση των αισθητήρων είναι γνωστή και έχοντας μια καλή χρονική απόκριση (ταχύτητα δειγματοληψίας), της οποίας ξέρουμε με καλή ακρίβεια το χρόνο μεταξύ των δύο διαταραχών, μπορούμε να υπολογίσουμε όχι μόνο την κατεύθυνση κίνησης, αλλά και την ταχύτητα.



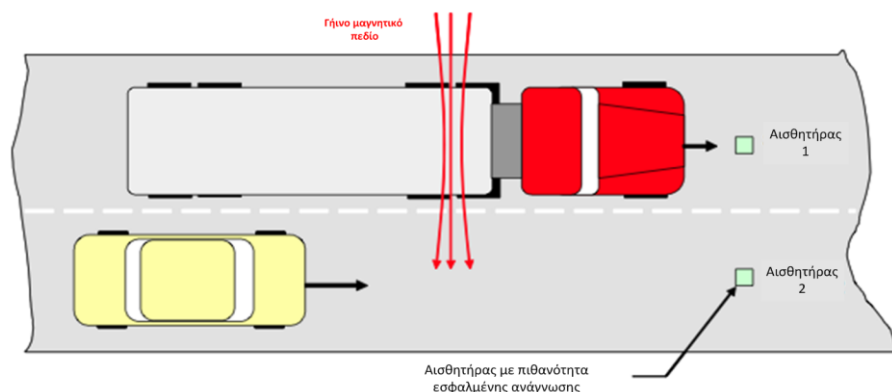
**Σχήμα 3.21:** Διάταξη με δύο αισθητήρες για εντοπισμό κατεύθυνσης κίνησης, όπως επίσης και διάγραμμα με τα σήματα των δύο αισθητήρων.

Με τη χρήση σύγχρονων μεθόδων, όπως υψηλής πιστότητας αναλογικά κυκλώματα, υψηλής ταχύτητας μικροελεγκτές, η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων δεν παίζει καθοριστικό ρόλο. Παρόλα αυτά με την σύγχρονη τεχνολογία μπορούμε να έχουμε υψηλή ανάλυση με ακρίβεια χιλιομέτρου.

#### 3.2.1.4 Ψευδής ανίχνευση οχημάτων.

Ο μεγαλύτερος πονοκέφαλος σε συστήματα αναγνώρισης είναι η εσφαλμένη αναγνώριση οχήματος, όταν αυτό δεν υπάρχει ή και το αντίθετο. Στις περιπτώσεις που έχουμε αυτές τις εσφαλμένες αναγνωρίσεις δεν σημαίνει απαραίτητα ότι κάποιος κακοπροαίρετος πήγε και τοποθέτησε μαγνήτη κοντά στον αισθητήρα. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό το φαινόμενο είναι η μεταβολή των φυσικών παραμέτρων, η οποία προκαλεί αλλαγές στα φυσικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα, όπως στην περίπτωση μας είναι η εσωτερική αντίσταση και το μαγνητικό πεδίο πόλωσης της γης. Η ιδιότητα που είδαμε στον πίνακα (3.1) της εκθετικής μείωσης του σήματος με την απόσταση, μπορεί να αποτελέσει μια ιδέα για το πώς θα επιλυθεί το πρόβλημα της ψευδούς ανίχνευσης οχημάτων. Επιπλέον, μπορούμε να ρυθμίσουμε το κατώφλι αναγνώρισης, όπως επίσης τη θέση των αισθητήρων στο οδόστρωμα, ώστε να μειώνονται οι παρεμβολές από οχήματα από τις διπλανές λωρίδες κυκλοφορίας. Το

μεγαλύτερο πρόβλημα εμφανίζεται όταν το όχημα αυτό είναι φορτηγό ή νταλίκα, τα οποία έχουν πολύ μεγάλη μαγνητική μάζα.



Σχήμα 3.22: Ρύθμιση της θέσης των αισθητήρων. Μια πιθανή κατάσταση ψευδοανίχνευση.

Στην περίπτωση που ο δρόμος έχει δύο μόνο λωρίδες κυκλοφορίας, υπάρχει η δυνατότητα της μετατόπισης των αισθητήρων προς τα άκρα των λωρίδων ώστε να μειωθεί κάπως το φαινόμενο της ψευδοανίχνευσης. Όμως, υπάρχει ο κίνδυνος μεγαλώνοντας το κατώφλι ανίχνευσης, να χαθεί δυνατότητα ανίχνευσης μοτοσυκλετών και μικρών αυτοκινήτων, τα οποία έχουν πολύ λιγότερα φερρομαγνητικά υλικά στο αμάξωμά τους.

Ένα άλλο σενάριο που πάλι προκαλεί ψευδοανιχνεύσεις και προβλήματα είναι η μεταβολή του πεδίου της γης. Παρόλο που αυτές οι αλλαγές είναι μικρές, είναι συνεχείς από μέρα σε μέρα και από λεπτό σε λεπτό. Σε εφαρμογές τύπου πυξίδας μπορεί οι μεταβολές αυτές της τάξης των μερικών mGauss να είναι ασήμαντες, αλλά στις περιπτώσεις που θέλουμε να ανιχνεύσουμε τη θέση του οχήματος, αυτές οι μεταβολές μπορεί να παίζουν καθοριστικό ρόλο. Για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη την ένταση του πεδίου της γης και είτε, μέσω του προγραμματιστικού αλγορίθμου είτε, μέσω αναλογικής επεξεργασίας να αγνοούμε τις αργές μεταβολές του μετρούμενου πεδίου. Ο αλγόριθμος μπορεί να ανανεώνει συνεχώς τις τιμές του πεδίου της γης που προβλέπονται βάσει μοντέλου από την Αμερικάνικη Εθνική Γεωφυσική Υπηρεσία (NGDC). Με τον τρόπο αυτό θα υπάρχει συνεχής ανανέωση του γήινου πεδίου και θα το αφαιρεί, έτσι ώστε να υπάρχει μια σημαντική βελτίωση στην ποιότητα των μετρήσεων.

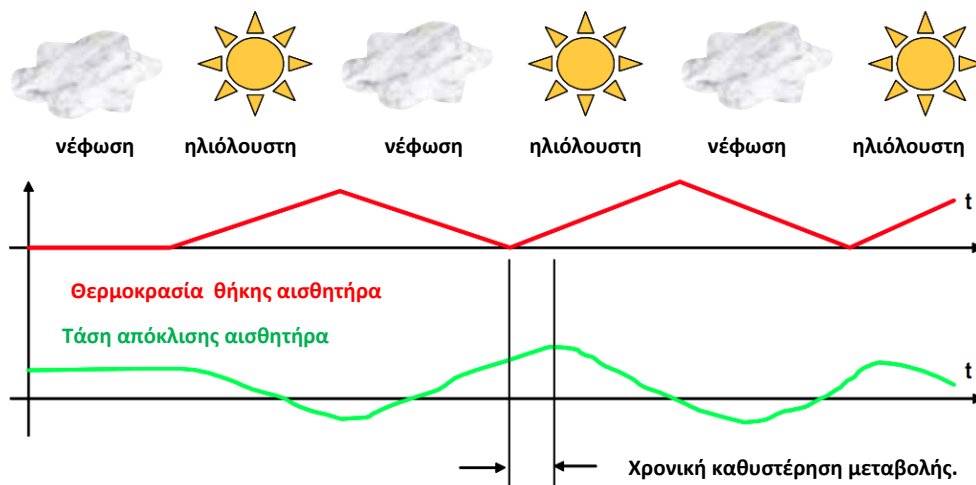
Το τρίτο σενάριο που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ανίχνευση είναι η θερμοκρασιακή μεταβολή. Στο σενάριο αυτό η χειρότερη περίπτωση είναι να έχουμε μία καλοκαιρινή μέρα με νεφώσεις κατά διαστήματα. Στο σενάριο αυτό η θερμοκρασία του αέρα δεν εμφανίζει ιδιαίτερες μεταβολές, ενώ η θερμοκρασία του οδοστρώματος μπορεί να αποκλίνει περισσότερο από 10°C. Παρόλα αυτά, ένας καλός σχεδιασμός, ο οποίος θα λαμβάνει πρόνοια της θερμοκρασιακής μεταβολής όχι μόνο στη συσκευασία αλλά και στα ηλεκτρονικά, θα βοηθούσε τα μέγιστα στη μείωση του επηρεασμού από τη μεταβολή αυτή.

Οι ψευδοενδείξεις λόγω της θερμοκρασίας συμβαίνουν όταν θερμαίνεται το υπερκράμα του αισθητήριου στοιχείου, οπότε αλλάζει η αντίστασή του και κατά επέκταση η τάση απόκλισης της γέφυρας. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής είναι περίπου -3100 part per million για κάθε βαθμό Κελσίου (-3100ppm/°C). Έτσι, όταν η τάση απόκλισης της γέφυρας στους 25°C έστω ότι είναι 1,5mV, στους 30°C θα γίνει 1,48mV. Πιο αναλυτικά θα λέγαμε ότι για μία τροφοδοσία της γέφυρας στα 3V θα πάρουμε στην έξοδο 20millivolt-gauss. Για μία μεταβολή 5°C θα έχουμε μία

απόκλιση της γέφυρας κατά  $20\mu\text{V}$ . Για πολλούς αυτή η μεταβολή των  $20\mu\text{V}$  θα φαίνεται ασήμαντη, αλλά, αν συνυπολογίσουμε την τάση τροφοδοσίας  $3\text{V}$ , η έξοδος στη γέφυρα θα αντιστοιχεί με μία μεταβολή των  $20\text{mgauss}$ . Το πρόβλημα συνεχίζει να γίνεται πιο αισθητό όταν ενισχύσουμε το σήμα αυτό μέσα από τελεστικό ενισχυτή. Με μία τάξη ενίσχυσης  $\times 200$  θα πάρουμε ότι η μεταβολή της τάσης εξόδου φτάνει τα  $4\text{mV}$ .

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί σχετικά εύκολα κάνοντας χρήση του τυλίγματος τοποθέτησης/επανατοποθέτησης (set/reset strap). Για την ακύρωση της τάσης απόκλισης μπορούμε να πάρουμε μία μέτρηση και στη συνέχεια να πάρουμε ακόμα μία μέτρηση, αλλά κάνοντας χρήση της επανατοποθέτησης. Στη συνέχεια με την αθροίζοντας τις μετρήσεις και διαιρώντας διά δύο βρίσκουμε την τάση απόκλισης της γέφυρας. Έτσι, με μία περιοδική εφαρμογή παλμών τοποθέτησης και επανατοποθέτησης μπορούμε να εξαλείψουμε το φαινόμενο αυτό.

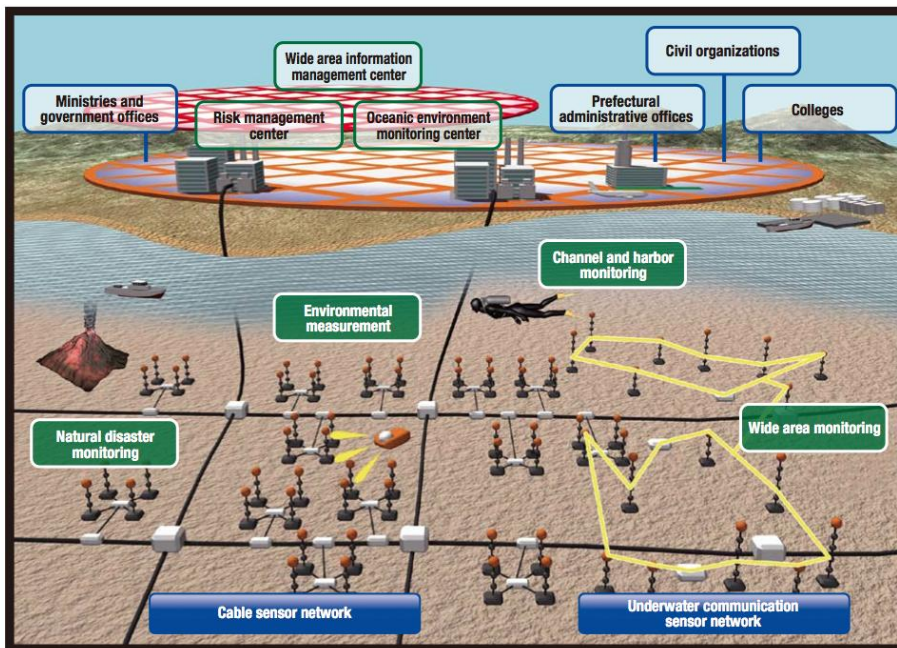
### Μέρα με σποραδικές νεφώσεις



Σχήμα 3.23: Παράδειγμα μεταβολής της τάσης απόκλισης του αισθητήρα συναρτήσει των θερμοκρασιακών μεταβολών.

### 3.2.2 Επίβλεψη λιμένα.

Η NEC ανέπτυξε ένα σύστημα για την παρατήρηση λιμένων. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε ένα ωκεανογραφικό δίκτυο από αισθητήρες. Το σύστημα αυτό όχι μόνο εντοπίζει πλοία αλλά προσφέρει ένα πλήρες σύστημα παρακολούθησης και χαρτογράφησης της θαλάσσιας περιοχής έτσι ώστε να βοηθήσει στην προστασία του περιβάλλοντος και να αποφύγει καταστροφές. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη ένα σταθερό η επεκτάσιμο δίκτυο υψηλής πυκνότητας πληροφορίας. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει το δίκτυο αυτό βρίσκεται στο πυθμένα της θάλασσας και μπορεί να παρέχει συνεχόμενα πληροφορίες από μία μεγάλη περιοχή χωρίς να τον επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες.

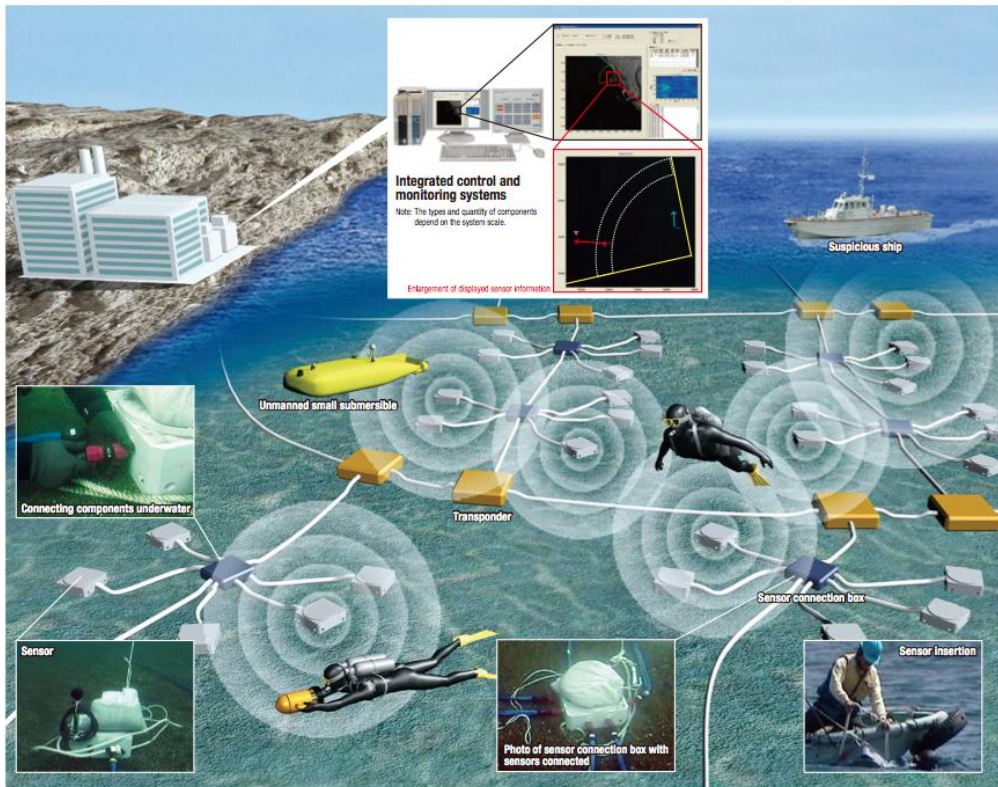


Σχήμα 3.24: Διάγραμμα κατασκευής (NEC) για ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης λιμένων.

Το δίκτυο με τους αισθητήρες έχει την δυνατότητα να ενσωματώσει αισθητήρες διάφορων τύπων οι οποίοι μπορεί να είναι στην ξηρά ή κάτω από την θάλασσα έτσι ώστε να είναι σε θέση να εντοπίζει, να ακολουθεί και να παρατηρεί μικρά ύποπτα πλοία και δύτες οι οποίοι θα ήθελαν να εισβάλουν στην περιοχή και να προκαλέσουν ζημιά σε εγκαταστάσεις που βρίσκονται κατά μήκος των ακτών.

Το σύστημα συνολικά χρησιμοποιεί ραντάρ και βιντεοκάμερες ώστε να εντοπίζεις και να ακολουθεί τα μικρά ύποπτα πλοία που βρίσκονται στην θάλασσα. Το σύστημα διαθέτει υπερευαίσθητες κάμερες και περίοδες κάμερες έτσι ώστε να μπορούν να πάρουν εικόνα με χαμηλή ορατότητα άσχετα με την ώρα, ακόμη και την νύκτα. Οι κάμερες παρακολουθούν την περιοχή αυτόματα που υπάρχουν οι πιθανοί στόχοι που έχουν εντοπίσει τα ραντάρ.

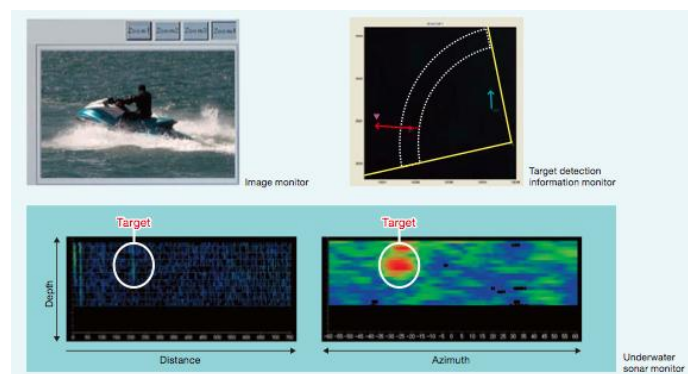
Το σύστημα διαθέτει επίσης μια σειρά από αισθητήρες οι οποίες τοποθετούνται στο πυθμένα τις θάλασσας ώστε να εντοπίζουν υποθαλάσσιους στόχους. Οι αισθητήρες στέλλουν τις πληροφορίες όπως και τα ραντάρ. Όταν ανιχνευθούν στόχοι τότε αναλαμβάνουν οι κάμερες να τους εντοπίσουν. Όλες οι πληροφορίες που συλλέγονται από το σύστημα αποστέλλονται σε κεντρικό σύστημα όπου από εκεί διανέμονται στους κατάλληλους φορείς.



Σχήμα 3.25: Διάταξη αισθητήρων στο πυθμένα και ασύμμετρες απειλές.

Όπως είπαμε το σύστημα διαθέτει πολλούς διαφορετικούς αισθητήρες όπως για παράδειγμα:

- Παθητικούς ακουστικούς αισθητήρες
- Ενεργούς ακουστικούς αισθητήρες
- Αισθητήρες ιόντων
- Μαγνητικούς αισθητήρες
- Υποθαλάσσιες κάμερες υπερύθρων
- Και άλλους αισθητήρες που μπορούν να αναπτυχθούν από τον χρήστη.



Σχήμα 3.26: Μέρος της οθόνη συστήματος παρακολούθησης λιμένων της NEC.

## 4 Ανάπτυξη Διάταξης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε αναλυτικότερα τον αισθητήρα AMR και στην συνέχεια τα ηλεκτρονικά του κυκλώματα που το συνοδεύουν. Στα ηλεκτρονικά που συνοδεύουν τον αισθητήρα περιλαμβάνονται τα συστήματα δειγματοληψίας τα κυκλώματα για διόρθωση των τάσεων αποκλίσεων κ.α. Τέλος θα δούμε πώς αντιμετωπίστηκε το ζήτημα της συσκευασίας του αισθητήρα, ώστε να είναι έτοιμος προς εγκατάσταση.

Συγκεκριμένα, στην ενότητα 4.1 αναλύεται η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης. Η ανάλυση αφορά τόσο τη λειτουργία του αισθητήρα όσο και των ενσωματωμένων στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ηλεκτρονικών και ηλεκτρονικών διατάξεων που κατασκευάστηκαν εκ των υστέρων για την αξιόπιστη λειτουργία του. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στα κυκλώματα τοποθέτησης - επανατοποθέτησης (set-reset) και αντιστάθμισης της τάσης απόκλισης (offset).

Στην ενότητα 4.2 αναλύεται η διαδικασία βαθμονόμησης του αισθητήρα ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης που χρησιμοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η βαθμονόμηση με χρήση πηνίων Helmholtz και τροφοδοτικών ακριβείας. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του ΕΜΠ. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη του θορύβου που παρουσιάζει ο αισθητήρας σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, το οποίο υπερκαλύπτει το παρεχόμενο από τον κατασκευαστή εύρος συχνοτήτων.

Τέλος στην ενότητα 4.4 δίνονται πληροφορίες για την τελική συσκευασία που επιλέχθηκε προκειμένου για την τοποθέτηση του αισθητήρα στα σημεία μέτρησης.

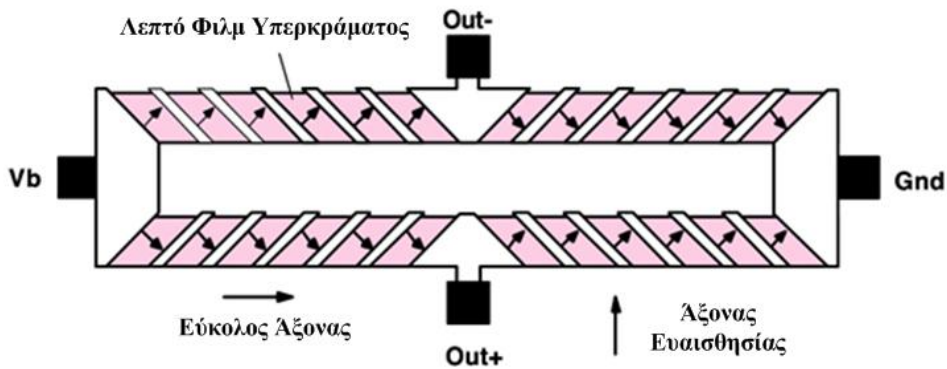
## 4.1 Ο αισθητήρας AMR.

### 4.1.1 Ο αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης AMR HMC2003.

Ο αισθητήρας AMRHMC2003 είναι ένας υβριδικός αισθητήρας της Honeywell, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μετρά το μαγνητικό πεδίο στις τρεις διαστάσεις. Αποτελείται από δύο αισθητήρες μαγνητοαντίστασης υψηλής ευαισθησίας. Ο πρώτος αισθητήρας HMC1001, ο οποίος είναι κολλημένος κάθετα στον HMC2003, μετρά τη συνιστώσα Z και ο δεύτερος αισθητήρας HMC1002 μετρά τις X και Y συνιστώσες. Επιπλέον, ο αισθητήρας αυτός έχει τρεις ενισχυτές οργάνων (instrumentation amplifiers), οι οποίοι παρουσιάζουν χαμηλό θόρυβο καθώς και ενεργό βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 1KHz.

Ο αισθητήρας AMR αποτελείται από τέσσερις απλές AMR σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. Η διάταξη αυτή μας επιτρέπει να μετρούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια μικρές μεταβολές των αντιστάσεων. Με μία απλή εφαρμογή τάσης στα άκρα της γέφυρας, ο αισθητήρας μετατρέπει το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο σε διαφορική τάση εξόδου. Ο αισθητήρας μαγνητοαντίστασης αποτελείται από μια λεπτή επίστρωση Ni-Fe (permalloy) πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Si) διαμορφωμένη έτσι ώστε να αποτελεί στοιχείο αντίστασης υπό μορφή ταινίας. Η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στη μεγάλη πλευρά του φιλμ προκαλεί περιστροφή του διανύσματος μαγνήτισης και αλλαγή της γωνίας του. Αυτό με τη σειρά του θα προκαλέσει μια αλλαγή της τιμής της αντίστασης κατά  $\Delta R$  και κατά συνέπεια θέτει τη γέφυρα Wheatstone εκτός ισορροπίας, οπότε αντίστοιχα μεταβάλλεται και η τάση στην έξοδό της. Κατά την κατασκευή, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης (προτιμώμενη διεύθυνση για το μαγνητικό πεδίο) τίθεται σε έναν άξονα κατά μήκος του φιλμ. Αυτό επιτρέπει τη μεγιστοποίηση των αλλαγών στην αντίσταση με την επιβολή πεδίου στο υπερκράμα Ni-Fe του φιλμ.

Παρόλα αυτά, η επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου, μεγαλύτερου από 10 gauss κατά μήκος του εύκολου άξονα, μπορεί να διατάραξει ή ακόμη και να αντιστρέψει την πολικότητα μαγνήτισης του φιλμ, το οποίο έχει ως επακόλουθο την αλλαγή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα. Μετά από μια τέτοια διαταραχή χρειάζεται να εφαρμοστεί ένα ισχυρό στιγμιαίο μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε να τοποθετηθούν ή να επανατοποθετηθούν οι μαγνητικές περιοχές και μαζί τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Οι αντιστάσεις είναι ευθυγραμμισμένες κατά τρόπο ώστε να έχουν έναν κοινό άξονα ευαισθησίας και με την εφαρμογή αύξησης του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση ευαισθησίας δίνουν θετική μεταβολή στην τάση. Επειδή μόνον η έξοδος είναι ανάλογη προς το μονοδιάστατο άξονα (αρχή ανισοτροπίας) και προς το μέγεθός του, επιπρόσθετες γέφυρες αισθητήρα τοποθετημένες σε ορθογώνιες κατευθύνσεις επιτρέπουν ακριβή μέτρηση της κατεύθυνσης του αυθαίρετου πεδίου. Το γεγονός ότι ο αισθητήρας μετρά μόνο σε μία διάσταση μας αναγκάζει να τοποθετήσουμε αισθητήρες σε τρεις ορθογώνιους άξονες ώστε να μετρήσουμε το διανυσματικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου. Στο ακόλουθο σχήμα(4.1) παρατίθεται το αισθητήριο στοιχείο μαγνητοαντίστασης.



Σχήμα 4.1: Μαγνητοαντίσταση σε διάταξη γέφυρας Wheatstone.

Γύρο από κάθε αισθητήρα AMR υπάρχουν δύο πηνία: το ένα για 'set/reset' και το άλλο για αντιστάθμιση.

#### 4.1.2 Τύλιγμα 'τοποθέτησης/επανατοποθέτησης' (Set/Reset strap).

Η περιέλιξη τοποθέτησης / επανατοποθέτησης είναι ένα σπείρωμα από μέταλλο, το οποίο είναι μαγνητικά συζευγμένο με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης του αισθητήρα. Κάθε τέτοιο τύλιγμα έχει μικρή αντίσταση ώστε να επιτρέπει βραχείς αλλά υψηλού ρεύματος παλμούς τοποθέτησης / επανατοποθέτησης. Η περιέλιξη αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται περιοδικά, έτσι ώστε να θέτει τις μαγνητικές περιοχές της μαγνητοαντίστασης στον εύκολο άξονα μαγνήτισης για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της μέτρησης.

Ένας παλμός τοποθέτησης ορίζεται ως ένας θετικός παλμός ρεύματος, ο οποίος εισέρχεται στη σύνδεση S/R+ του τυλίγματος. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα είναι ο αισθητήρας να ευθυγραμμιστεί με τον εμπρόσθιο εύκολο άξονα μαγνήτισης, έτσι ώστε η αισθητήρια γέφυρα να έχει θετική πολικότητα. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου με θετική κλίση στον άξονα ευαισθησίας (δύσκολο άξονα μαγνήτισης) αναμένουμε μια θετική κλίση της τάσης στα άκρα εξόδου της γέφυρας.

Ένας παλμός επανατοποθέτησης ορίζεται ως ένας αρνητικός παλμός ρεύματος, ο οποίος εισέρχεται στη σύνδεση S/R+ του τυλίγματος. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα είναι ο αισθητήρας να ευθυγραμμιστεί με τον οπίσθιο εύκολο άξονα μαγνήτισης, έτσι ώστε η αισθητήρια γέφυρα να έχει αρνητική πολικότητα. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου με θετική κλίση στον άξονα ευαισθησίας (δύσκολο άξονα μαγνήτισης), αναμένουμε μια αρνητική κλίση της τάσης στα άκρα εξόδου της γέφυρας.

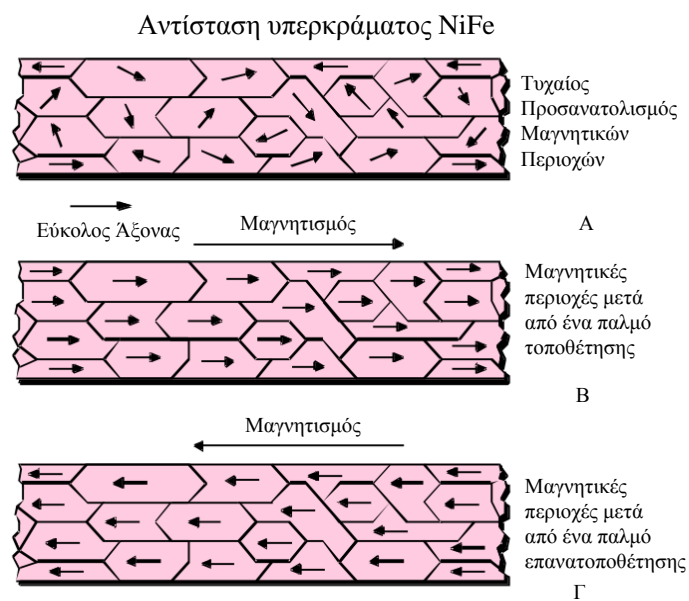
Συνήθως πρώτα εφαρμόζεται ένα παλμός επανατοποθέτησης και ύστερα από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου εφαρμόζεται ένας παλμός τοποθέτησης. Με αυτή την ώθηση των μαγνητικών περιοχών προς την τελείως αντίθετη κατεύθυνση είναι μεγάλη η πιθανότητα οποιαδήποτε μαγνητική διαταραχή που προϋπήρχε να διαγραφεί πλήρως από το ζεύγος των παλμών. Για πιο απλά κυκλώματα, τα οποία προορίζονται για εφαρμογές με λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις για αφαίρεση του θορύβου και ακρίβεια στις μετρήσεις, ένας μόνο παλμός μίας πολικότητας μπορεί να εφαρμοστεί περιοδικά. Πολλοί μονοπολικοί παλμοί πλησιάζουν σε απόδοση τον ένα διπολικό παλμό.



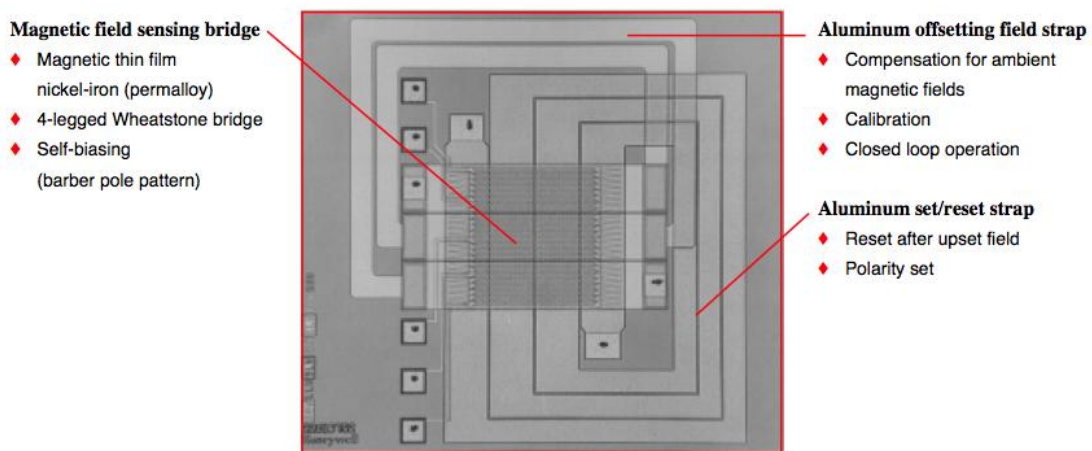
Συνοπτικά η περιέλιξη τοποθέτησης/επανατοποθέτησης μάς χρησιμεύει για τα ακόλουθα:

- Επιτρέπει στον αισθητήρα να εκτελεί μετρήσεις υψηλής ευαισθησίας όπως για παράδειγμα να επανακτά την ευαισθησία του μετά από την έκθεση σε ισχυρά εξωτερικά πεδία τα οποία επαναμαγνητίζουν τον αισθητήρα.
- Επιτρέπει στον αισθητήρα να αντιστρέφει την πολικότητα της γέφυρας. Αυτό έχει σαν συνέπεια την βελτιστοποίηση των μαγνητικών περιοχών.
- Επιτρέπει την αντιστροφή των μαγνητικών περιοχών για την εύρεση της απόκλισης της γέφυρας με την αλλαγή της θερμοκρασίας.

Η περιοδική χρήση του βελτιώνει τη γραμμικότητα, μειώνει την επιρροή από επιδράσεις των άλλων αξόνων (cross-axis effects) και μειώνει επίδραση της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 4.2: Μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων του υπερκράματος NiFe.**



**Σχήμα 4.3 Εσωτερική δομή του τυλίγματος τοποθέτησης/επανατοποθέτησης.**

Ισχυρά εξωτερικά πεδία, τα οποία υπερβαίνουν το όριο των 10 με 20 gauss, μπορεί να προέρχονται από μια πληθώρα εφαρμογών. Οι πιο κοινές πηγές ισχυρού πεδίου είναι οι συσκευές με μόνιμους μαγνήτες, όπως για παράδειγμα τα μεγάφωνα, οι εν λειτουργία αγωγοί υψηλού ρεύματος, όπως αγωγοί των ηλεκτροσυγκολλήσεων, τα εν λειτουργία τροφοδοτικά ισχύος, τα εν λειτουργία πηνία ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όπως είναι οι οθόνες καθοδικού σωλήνα (CRT) και οι εν λειτουργία μετασχηματιστές ισχύος. Οι μαγνήτες παρουσιάζουν στους πόλους πεδία τα οποία μπορεί να υπερβούν τις εκατοντάδες ακόμα και χιλιάδες gauss. Αυτά τα υψηλής πυκνότητας μαγνητικά πεδία δεν καταστρέφουν μόνιμα το αισθητήριο στοιχείο, αλλά το στοιχείο διαταράσσεται και αποκλίνει από την απαιτούμενη διεύθυνση του εύκολου άξονα μαγνήτισης. Το αποτέλεσμα αυτού του επαναμαγνητισμού του αισθητηρίου στοιχείου της μαγνητοαντίστασης είναι η μείωση της ευαισθησίας ή η εμφάνιση ‘καθυστερήσεων’ στην έξοδό του. Με τη χρήση των παλμών τοποθέτησης και επανατοποθέτησης επανέρχονται τα μαγνητικά δίπολα του αισθητήρα στον κατάλληλο άξονα.

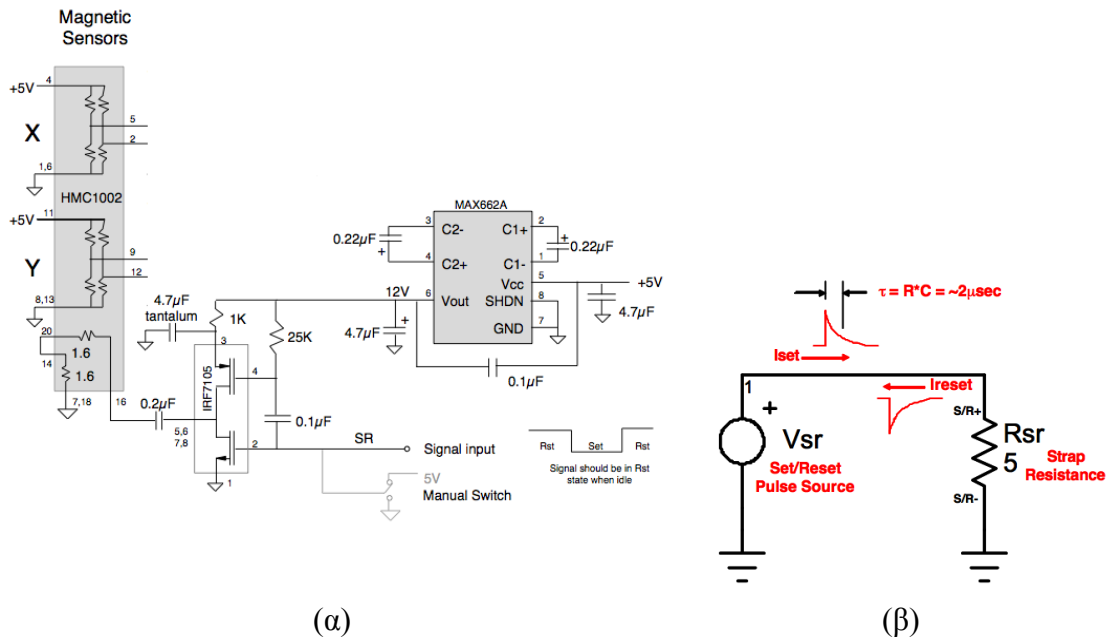
Οι αισθητήρες τύπου AMR αποτελούνται από φερρομαγνητικά υλικά με κρυσταλλική δομή. Η ίδια δομή του φιλμ που κάνει τον αισθητήρα ευαίσθητο στα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, έχει το μειονέκτημα να αλλάζει τη μαγνητική διεύθυνση των μαγνητικών περιοχών μέσω της θερμικής ενέργειας με αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου να αυξάνει ο εσωτερικός θόρυβος του αισθητήρα. Παρόλο που ο θόρυβος αυτός είναι πολύ μικρός, επηρεάζει την ακρίβεια μέτρησης σε μαγνητικά πεδία της τάξης μερικών milli-gauss ή χαμηλότερα. Με τη συχνή εφαρμογή παλμών τοποθέτησης (set) και επανατοποθέτησης (reset) ο εσωτερικός θόρυβος περιορίζεται στην ελάχιστη δυνατή τιμή.

Στον αισθητήρα παρουσιάζεται αλλαγή της τιμής της κάθε αντίστασης σε συνάρτηση με την αλλαγή της θερμοκρασίας του. Η αλλαγή της θερμοκρασίας μπορεί να οφείλεται είτε σε ενδογενείς είτε σε εξωγενείς παράγοντες. Έτσι, ένας τρόπος να εξαλείψουμε την τάση απόκλισης (offset) της γέφυρας είναι να παίρνουμε σταθερές μετρήσεις μαγνητικού πεδίου μεταξύ κάθε τοποθέτησης και επανατοποθέτησης. Μιας και με την τοποθέτηση και την επανατοποθέτηση αλλάζει η πολικότητα της τάσης εξόδου της γέφυρας, μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση απόκλισης (offset voltage) της γέφυρας βρίσκοντας τη διαφορά των δύο τάσεων και διαιρώντας το αποτέλεσμα με 2.

$$V_{offset} = \frac{V_{set} + V_{reset}}{2}$$

#### 4.1.2.1 Κύκλωμα οδήγησης Τοποθέτησης/Επανατοποθέτησης (Set/Reset)

Όπως αναφέραμε, πώς εφαρμόζοντας παλμούς ηλεκτρικού ρεύματος τα μαγνητικά τοιχώματα ευθυγραμμίζονται. Στην προηγούμενη παράγραφο, δόθηκε μια λογική εξήγηση γιατί θα ήταν καλό να υλοποιήσουμε το μηχανισμό αυτό. Τα μαγνητικά τοιχώματα του αισθητηρίου στοιχείου, όπως είπαμε, απαιτούν παλμούς υψηλού ρεύματος μικρής διάρκειας που να περνούν μέσα από το ειδικό τύλιγμα στο εσωτερικό του αισθητήρα. Στο σχήμα () φαίνεται η δομή του τυλίγματος αυτού. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η τιμή του ρεύματος που πρέπει να περάσει είναι 3-5Α και για χρονική διάρκεια 2 μsec. Στο σχήμα () φαίνεται ένα απλό κύκλωμα για την υλοποίηση της τοποθέτησης/επανατοποθέτησης.



Σχήμα 4.4: Ηλεκτρικό κύκλωμα παροχής των ηλεκτρικών παλμών (α) και αναμενόμενη μορφή παλμών (β).

Οι παλμοί της τοποθέτησης και επανατοποθέτησης όπως φαίνονται στο σχήμα ( ) είναι εκθετικά αποσβεννόμενοι. Ο λόγος που έχουν τη μορφή αυτή είναι ο τρόπος παραγωγής τους. Ο πιο εύκολος τρόπος να δημιουργηθούν τέτοιοι παλμοί με υψηλό ρεύμα, αλλά συνάμα και μικρής χρονικής διάρκειας, είναι η φόρτιση και στη συνέχεια η εκφόρτιση ενός πυκνωτή πάνω στην αντίσταση. Οι περισσότερες μπαταρίες που κυκλοφορούν στο εμπόριο και τα περισσότερα τροφοδοτικά δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν παλμούς υψηλού ρεύματος χωρίς να παρουσιαστεί σημαντική βύθιση τάσης. Για το λόγο αυτό στο σχήμα (\*) η πηγή  $V_{sr}$  αναφέρεται σε φορτισμένο πυκνωτή που εκφορτίζεται απότομα κατά μήκος του τυλίγματος τοποθέτησης/επανατοποθέτησης (set/reset strap). Η χωρητικότητα του πυκνωτή εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης και συνήθως μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες nano-Farads (nF) έως μερικά micro-Farads ( $\mu\text{F}$ ). Ο ρυθμός πτώσης της εκθετικής κυματομορφής διέπεται από τη χρονική σταθερά  $\tau$  η οποία είναι η χωρητικότητα σε Farad (F) πολλαπλασιασμένη με την αντίσταση σε ohm ( $\Omega$ ) και μετράται σε δευτερόλεπτα.

### 4.1.3 Τύλιγμα αντιστάθμισης (Offset strap).

Το τύλιγμα αντιστάθμισης είναι μεταλλικό σπείρωμα το οποίο είναι μαγνητικά συζευγμένο με τον άξονα ευαισθησίας (δύσκολο άξονα μαγνήτισης). Το τύλιγμα αυτό έχει μια αντίσταση περίπου στα 3Ω και χρειάζεται μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος με μέγιστο 200mA για κάθε gauss επαγόμενου πεδίου. Το τύλιγμα μπορεί εύκολα να χειριστεί ρεύματα για αναίρεση ή ενίσχυση του πεδίου μέσα από μια γραμμική περιοχή μέτρησης. Όμως, κατά τη χρήση του απαιτείται προσοχή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που μπορούν να αναπτυχθούν στο πλακίδιο. Στις πιο πολλές εφαρμογές μπορεί το τύλιγμα αντιστάθμισης να μην χρησιμοποιηθεί, αφήνοντας τα άκρα του ανοικτοκυκλωμένα.

Το τύλιγμα αντιστάθμισης επιτρέπει πολλές διαφορετικές λειτουργίες κατά τη χρήση του. Οι χρήσεις αυτές μπορεί να είναι:

- Αφαίρεση ενός εξωτερικού ανεπιθύμητου πεδίου.
- Μηδενισμός της τάσης απόκλισης της γέφυρας.
- Ακύρωση πεδίου κλειστού βρόχου.
- Αυτοχαρακτηρισμός του κέρδους της γέφυρας.

Όπως έχουμε ήδη αναφερθεί, οι αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης συνήθως βρίσκουν εφαρμογή υπό τη μορφή γέφυρας Wheatstone. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες, παρότι εμφανίζουν μια πλειάδα πλεονεκτημάτων, έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι παρουσιάζουν μη μηδενική τάση εξόδου στην περίπτωση μηδενικής εισόδου. Η τάση αυτή είναι γνωστή ως τάση offset και μπορεί να προκαλέσει μείωση της απόδοσης του αισθητήρα αν δεν αντιμετωπιστεί. Λόγω της αρχής λειτουργίας των γεφυρών Wheatstone, το ζητούμενο στην περίπτωση αισθητήρων AMR είναι η κατασκευή τεσσάρων μαγνητοαντιστάσεων κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι τιμές των στοιχείων να είναι ανά δύο απόλυτα όμοιες και να συμπεριφέρονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο στα υπό μέτρηση μαγνητικά πεδία. Η τάση offset εμφανίζεται στους κόμβους εξόδου της γέφυρας. Μια τέτοια τάση είναι ανεπιθύμητη διότι εμποδίζει την αλλαγή της τιμής ή της πολικότητας του αισθητήρα, ακόμα και αν το υπό μέτρηση μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται. Στην περίπτωση των αισθητήρων AMR η τάση offset εμφανίζεται λόγω ασυμφωνίας (mismatching) μεταξύ των τιμών των μαγνητοαντιστάσεων που σχηματίζουν τη γέφυρα Wheatstone εξαιτίας μικρών ατελειών κατά τη διάρκεια κατασκευής του αισθητήρα. Ακόμα και με αντιστάσεις εκατοντάδων έως χιλιάδων ohm ένα σφάλμα της τάξης κλάσματος του ohm μπορεί να προκαλέσει αισθητές μεταβολές στην τάση εξόδου της γέφυρας. Για παράδειγμα, στον αισθητήρα HMC1021 οι αντιστάσεις της γέφυρας  $R_1, R_2, R_3$  και  $R_4$  είναι 1100Ω η κάθε μια. Η τάση εξόδου της γέφυρας δίνεται από τον τύπο:

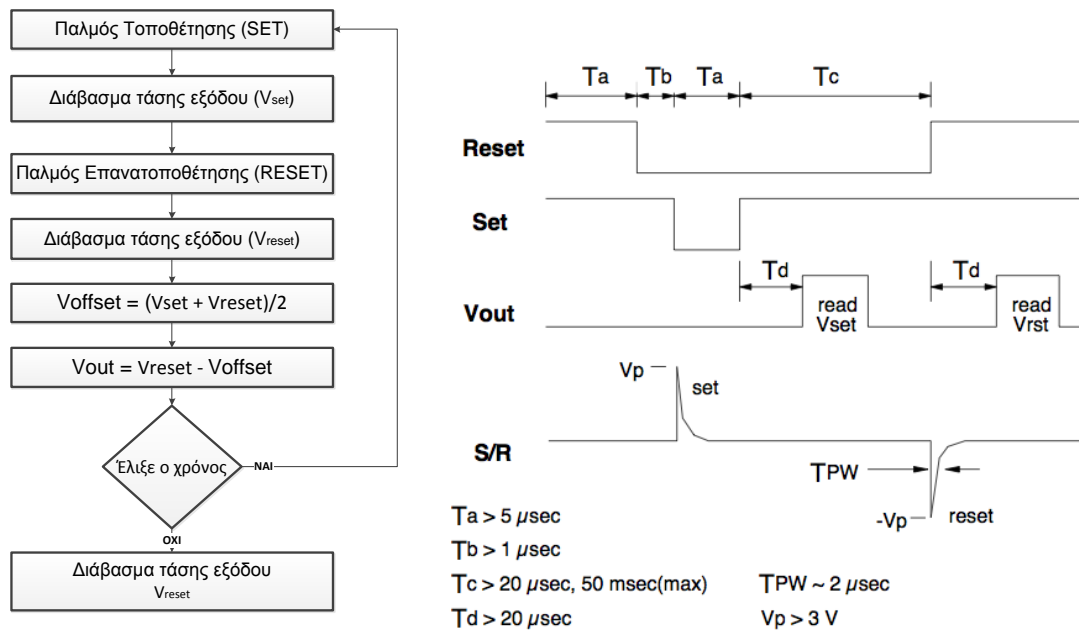
$$V_{out} = V_B \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4}$$

όπου  $V_{out} = V_{off}$  στην περίπτωση μηδενικής διέγερσης.

Έτσι για παράδειγμα, εάν οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_4$  είναι 1101Ω και οι  $R_2$  και  $R_3$  παραμείνουν στα 1100Ω, με μία τάση τροφοδότησης  $V_B=5$  Volts, τότε η  $V_{off}$  είναι -2.27millivolts. Θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει αυτή την τάση πολύ μικρή, η πραγματικότητα ωστόσο είναι διαφορετική. Όταν μετρήσουμε με ένα ιδανικό HMC1021 μία συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της γης της τάξης των 100 millgauss, η τάση εξόδου του αισθητήρα με μια τάση τροφοδοσίας  $V_B=5$  Volts, θα είναι 0.5 mV. Αν συγκρίνουμε τώρα την  $V_{off}$  λόγω της κατασκευαστικής ατέλειας και της μετρούμενης τιμής, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τάση απόκλισης μπορεί

να είναι μεγαλύτερη από τη μετρούμενη τιμή. Για το λόγο αυτό η τάση απόκλισης  $V_{off}$  δεν πρέπει να αγνοείται και χρειάζεται να συνυπολογιστεί στους υπολογισμούς και στην συνέχεια να αφαιρείται από τις μετρήσεις μετρήσεις.

Το θετικό στην περίπτωση μας είναι ότι η τάση απόκλισης της γέφυρας είναι σταθερή σε όλο το χρονικό διάστημα της χρήσιμης ζωής του αισθητήρα. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει μια φορά και να χρησιμοποιηθεί ένας από τους τρόπους που παρατίθενται παρακάτω για την εξάλειψή της. Ένα άλλο θετικό στοιχείο σε ότι αφορά την τάση απόκλισης είναι ότι είναι ευθέως ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας της γέφυρας, δηλαδή, μπορεί να δοθεί σε μία κανονικοποιημένη μορφή όπως 0.454 mV/V.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τάσης απόκλισης και υπολογισμός της (αριστερά) και διάγραμμα χρονισμού (δεξιά).

#### 4.1.3.1 Επίδραση της απόκλισης στο σχεδιασμό του αισθητήρα.

Η τάση απόκλισης της γέφυρας έχει επίδραση στο σχεδιασμό του συστήματος του αισθητήρα AMR πέρα από μία μετατόπιση της τάσης εξόδου. Η τάση απόκλισης της γέφυρας έχει μεγάλη ανοχή. Ιδιαίτερα όταν μελετήσουμε αισθητήρες που προέρχονται από το ίδιο κομμάτι υποστρώματος (wafer), κατανοούμε ότι η ανοχή δεν οφείλεται στο υπόστρωμα ή σε άλλο φαινόμενο μακράς σταθερότητας κατά την κατασκευή. Έτσι, όταν σχεδιάζονται τα επόμενα στάδια ενίσχυσης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να προστίθεται η ανοχή για την τάση απόκλισης στο αναμενόμενο εύρος εξόδου του AMR, όταν αυτός διεγείρεται με τις οριακές τιμές του μαγνητικού πεδίου.

Ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα που δίνει η ίδια η κατασκευάστρια εταιρεία, για να δούμε πώς και πόσο μας επηρεάζει η τάση απόκλισης. Θεωρούμε τον αισθητήρα AMR τύπου HMC1022 ο οποίος είναι δύο διαστάσεων και χρησιμοποιείται για εφαρμογές αυτοκίνησης. Όταν διεγείρεται η γέφυρα με τροφοδοσία στα 5volt, τότε η μισή γέφυρα στην ισορροπία θα έχει ως τάση εξόδου 2.5volt. Το αναμενόμενο κανονικοποιημένο εύρος τιμής τάσης απόκλισης μπορεί να κινείται από -2mV/V έως +2.25mV/V. Στην περίπτωση μας κυμαίνεται από -10mV έως +11.25mV. Σε

εφαρμογές μαγνητικών πυξίδων, το μέγιστο μαγνητικό πεδίο της γης για μια οποιαδήποτε γέφυρα μπορεί να ανέρχεται στα 625 milli-gauss. Εφόσον ο αισθητήρας HMC1022 έχει μια ευαισθησία από 0.8 έως 1.25mV/V/gauss, κατ' επέκταση η μέγιστη τάση διέγερσης που μπορεί να έχει στην έξοδό της η γέφυρα από το μαγνητικό πεδίο της γης είναι  $\pm 3.9\text{mV}$ .

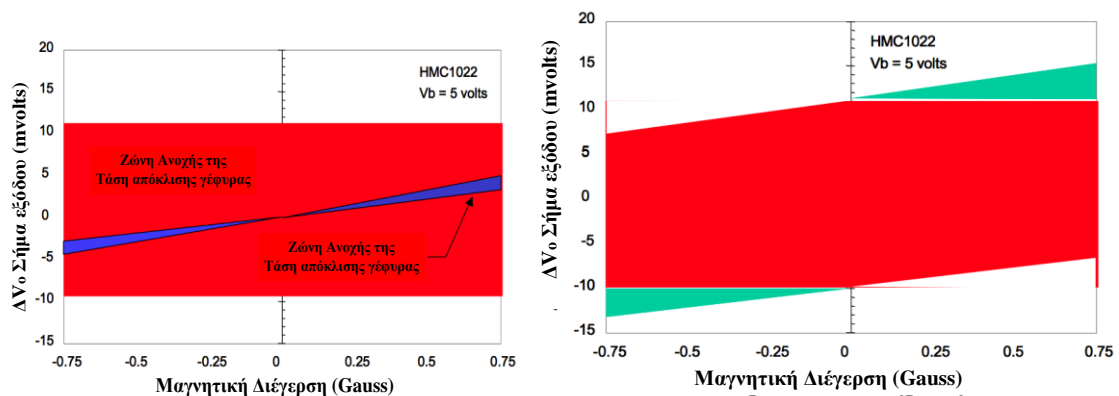
Το πρόβλημα προκύπτει όταν αθροίσουμε την τάση  $\pm 3.9\text{mV}$  με την τάση απόκλισης της γέφυρας  $-10\text{mV}$  έως  $+11.25\text{mV}$ . Με την άθροιση προκύπτει ένα εύρος τάσης από  $-13.9\text{mV}$  έως  $+15.15\text{mV}$ . Εξετάζοντας τώρα το ποσοστό μεταβολής του επιθυμητού σήματος σε σχέση με το ολικό εύρος παρατηρούμε ότι είναι μόλις:

$$\nu = \frac{3.9 - -3.9}{15.15 - -13.9 + 3.9 - -3.9} = \frac{7.8}{36.85} = 21.2\%$$

Τώρα προχωρούμε στο επόμενο στάδιο ενίσχυσης, όπου θέλουμε να αντιστοιχήσουμε το παραπάνω εύρος στο εύρος από 0.5 έως 4.5volt, ώστε να είναι συμβατό με το εύρος εισόδου του αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC). Ο ενισχυτής θα πρέπει να έχει ένα κέρδος της τάξης των 132 φορών, έτσι ώστε 15.15mV να αντιστοιχεί στα 2volt.

$$K = \frac{2}{15.15 \cdot 10^{-3}} = 132.0 \dots$$

Χρησιμοποιούμε την τάση 15.15mV, τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή, μιας και ο ενισχυτής ενισχύει συμμετρικά το σήμα στα θετικά και αρνητικά. Στα επόμενα σχήματα (4.6.α) και (4.6.β) παρουσιάζονται το εύρος ανοχής της τάσης απόκλισης και το εύρος ευαισθησίας από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης.



(α)

(β)

Σχήμα 4.6: Απόκλιση και ευαισθησία (α). Συνδυασμός των ανοχών (β).

Αυτό που αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στην ανάλυση του αισθητήρα σε εφαρμογές τύπου πυξίδας είναι ότι απομένουν μόνο 1.03 Volt ωφέλιμο εύρος από το σύνολο των 4 Volt που εισέρχεται στο ADC. Έτσι, αν ο ADC έχει ανάλυση 10bit, τα συνολικά βήματα είναι 1024, από τα οποία μόλις τα 256 βήματα είναι ωφέλιμα για την πυξίδα. Δηλαδή μέγιστη δυνατή ανάλυση είναι  $0.5^\circ$  της μοίρας και γύρω στη  $1^\circ$  μοίρα στις περισσότερες περιοχές της Βόρειας Αμερικής.

Αν πάρουμε τον ίδιο δειγματολήπτη, αλλά τώρα με την τάση απόκλισης της γέφυρας διορθωμένη πριν την είσοδο σε αυτόν, τότε όλα τα 1024 βήματα θα περιείχαν

χρήσιμη πληροφορία για την πυξίδα. Το βέλτιστο αποτέλεσμα που θα είχαμε στην περίπτωση αυτή είναι  $0.1^\circ$  ανά τον κόσμο και για τις περισσότερες περιοχές στην Βόρεια Αμερική θα είχαμε  $0.2^\circ$ .

Ακόμη ένας παράγοντας που επηρεάζει την τάση απόκλισης της γέφυρας και κατ' επέκταση το σύστημα είναι η θερμοκρασιακή μεταβολή. Αυτή η θερμοκρασιακή μεταβολή δυσχεραίνει τον υπολογισμό για το κέρδος του ενισχυτή. Με μια προσεκτική ανάλυση αντιλαμβανόμαστε ότι, αν λάβουμε υπόψη και υλοποιήσουμε μια θερμοκρασιακή αντιστάθμιση, θα αντιληφθούμε ότι έχει ένα εύρος  $\pm 5\%$  το οποίο προστίθεται στην τάση εξόδου με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της ανάλυσης.

#### 4.1.3.2 Μέθοδοι για μείωση της τάσης απόκλισης της γέφυρας.

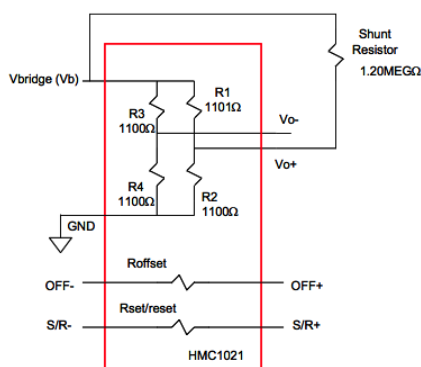
Υπάρχουν πολλές υποψήφιες μέθοδοι για μείωση της τάσης απόκλισης της γέφυρας Wheatstone. Εδώ θα αναφέρουμε πέντε μεθόδους οι οποίες είναι:

- Με Αντίσταση παράκαμψης
- Με χρήση δυναμικού πάλωσης του ενισχυτή
- Μέσω διακοπτόμενης ανατροφοδότησης.
- Μέσω ελέγχου του ρεύματος στο τύλιγμα απόκλισης
- Με ψηφιακή αφαίρεση

##### 4.1.3.2.1 Μέθοδος με αντίσταση παράκαμψης.

Η μέθοδος αυτή αναφέρεται στην απλή προσθήκη μιας αντίστασης παράλληλης σε ένα ή περισσότερα πόδια της γέφυρας, έτσι ώστε να την επαναφέρει στην ισορροπία. Για να το κάνουμε αυτό με ακρίβεια θα πρέπει πρώτα να αφαιρέσουμε οποιαδήποτε μαγνητική διέγερση είτε με πηνία Helmholtz είτε σε θωρακισμένο θάλαμο. Στη συνέχεια, για να μειώσουμε τον αριθμό των εξωτερικών αντιστάσεων, θα πρέπει να βρούμε με ένα ωμόμετρο ακριβείας τις αντιστάσεις της γέφυρας. Στη μεγαλύτερη αντίσταση που βρίσκουμε υπολογίζουμε το μέγεθος της αντίστασης που πρέπει να βάλουμε παράλληλα, έτσι ώστε να έχουμε τον ίδιο λόγο από το άλλο μισό της γέφυρας.

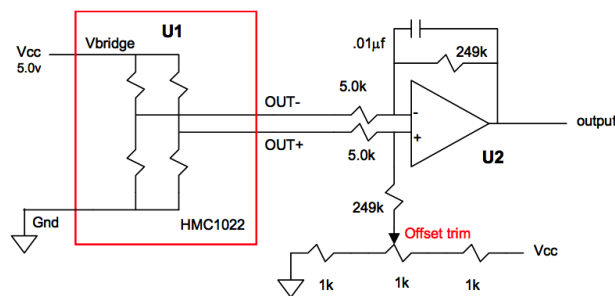
Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι χρειάζεται έως και τέσσερις διόδους παράκαμψης μεγάλης ακριβείας, αλλά προπάντων μπορεί να προκύψουν τιμές αντιστάσεων που δεν είναι προτυποποιημένες.



Σχήμα 4.7: Αντιστάθμιση με αντίσταση παράκαμψης.

#### 4.1.3.2.2 Μηδενισμός με δυναμικό πόλωσης του ενισχυτή.

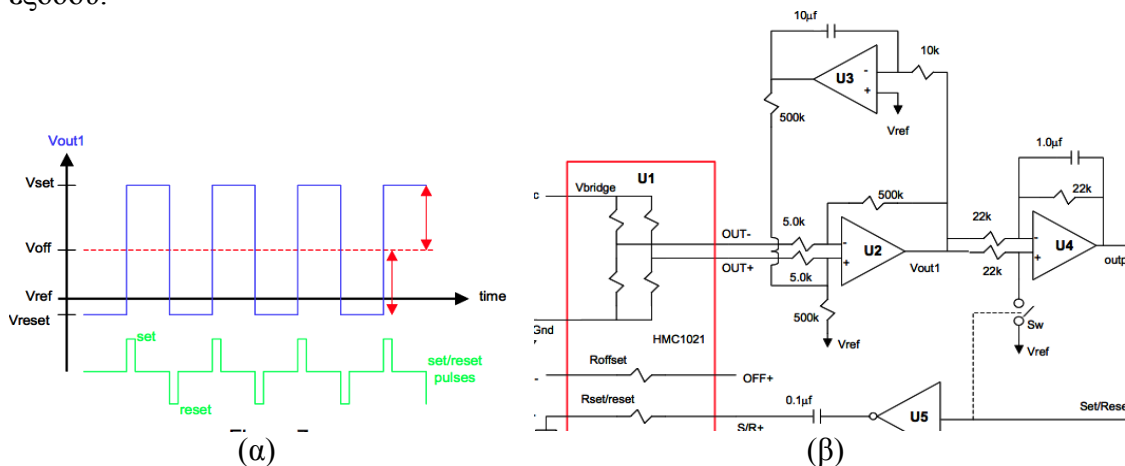
Με τη μέθοδο αυτή δεν επηρεάζουμε την απόδοση της γέφυρας. Χρησιμοποιούμε τον ίδιο τον τελεστικό ενισχυτή για τη διόρθωση της τάσης απόκλισης της γέφυρας. Είναι γνωστό ότι με τη χρήση τελεστικών ενισχυτών μπορούμε να υλοποιήσουμε αρκετές μαθηματικές πράξεις, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμό και διαίρεση με μία σταθερά, όπως επίσης ολοκλήρωση και διαφόριση. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ήδη θα χρειαστεί να πολώσουμε τον τελεστικό ενισχυτή περί τα 2.5volts όταν θα βάλουμε την είσοδο σε δειγματολήπτη, μιας και οι περισσότεροι μπορούν να διαβάζουν τάσεις από 0volt έως 5volt. Επιπλέον μπορούμε να βάλουμε πυκνωτή στην ανατροφοδότηση, ο οποίος λειτουργεί ως βαθυπερατό φίλτρο, και κατ' επέκταση να αποφεύγεται το φαινόμενο της αναδίπλωσης φάσματος κατά τη δειγματοληψία.



Σχήμα 4.8: Αντιστάθμιση μέσω πόλωσης στον τελεστικό ενισχυτή.

#### 4.1.3.2.3 Μηδενισμός με διακοπτόμενη ανατροφοδότηση (εναλλαγή ανατροφοδότησης) (Switching Feedback).

Η μέθοδος της διακοπτόμενης ανατροφοδότησης αξιοποιεί την ιδιότητα που έχει το αισθητήριο στοιχείο να αντιστρέφει τις μαγνητικές περιοχές και καθώς και την υψηλή ταχύτητα της διαδικασία αυτής. Επίσης, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι η τάση απόκλισης είναι σταθερή ανεξαρτήτως της διεύθυνσης πόλωσης. Στο παρακάτω σχήμα (4.9) παρατίθεται ένα διάγραμμα κάποιων τυπικών τιμών τάσεων εξόδου.



Σχήμα 4.9: (α) Διακοπτόμενη έξοδος γέφυρας. (β) Κύκλωμα υλοποίησης της διακοπτόμενης μεθόδου.



Με την εναλλαγή από set σε reset και αντίθετα, δημιουργείται μια τετραγωνική κυματομορφή στην έξοδο της γέφυρας με τη χρήση ενός ολοκληρωτή στην ανάδραση. Ο ολοκληρωτής δεν επηρεάζεται από την εναλλαγή, αλλά μόνο από τα αργά μεταβαλλόμενα φαινόμενα, που στην περίπτωσή μας είναι η τάση ανάδρασης. Έτσι, ο ολοκληρωτής παίρνει το μέσο όρο από τις εναλλαγές και δημιουργεί την κατάλληλη τάση για ανάδραση. Στο σχήμα (4.9.β) φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα της διακοπτόμενης μεθόδου.

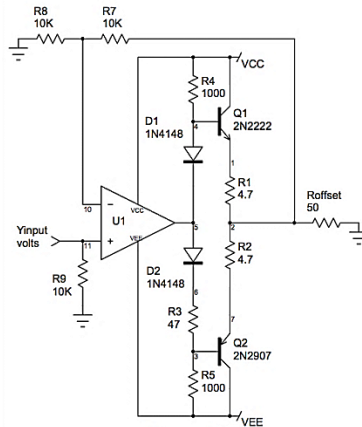
Στο σχήμα (4.9.β), το πρώτο στάδιο της ενίσχυσης πραγματοποιείται μέσω ενός ενισχυτή οργάνων (instrumentation amplifier) ( $u_2$ ), που η έξοδός του σημειώνεται σαν  $V_{out1}$ . Στο δεύτερο στάδιο της ενίσχυσης το κύκλωμα λειτουργεί σαν ολοκληρωτής που ανατροφοδοτεί το εξερχόμενο σήμα  $V_{out1}$ , αφαιρώντας από μέσα την αλλαγή και επαναφέροντάς το σε μια συνεχή τιμή, η οποία αντιστοιχεί στην τάση απόκλισης της γέφυρας. Μέσω της αφαίρεσης της τάσης απόκλισης από την τάση εξόδου, έχουμε ένα σήμα απαλλαγμένο από την απόκλιση της γέφυρας. Το τελευταίο στάδιο ενίσχυσης ( $u_4$ ) έχει σκοπό να αφαιρέσει την εναλλαγή από την τάση εξόδου, δηλαδή να αφαιρέσει την εναλλαγή πολικότητας από την τάση  $V_{out1}$ , αφήνοντας στην έξοδό του μόνο την τάση που αντιστοιχεί στο ενισχυμένο μαγνητικό πεδίο.

Η μέθοδος της «μορφοποίησης» ανιχνεύει το σήμα εξόδου και στη συνέχεια η «αποδιαμόρφωση» το αφαιρεί από την τάση απόκλισης. Όμως το παραπάνω κύκλωμα, θα πρέπει η διακοπτόμενη διαμόρφωση να είναι τουλάχιστον 100 φορές πιο γρήγορη από τη σταθερά του χρόνου ολοκλήρωσης. Η μεταβολή του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου πρέπει να είναι πιο αργή από τον χρόνο ολοκλήρωσης. Για το λόγο αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή τόσο της αντίστασης εισόδου του  $U_3$ , όσο και στον πυκνωτή ανατροφοδότησής του. Επιπλέον, μεγάλη σημασία έχει και ο χρόνος τοποθέτησης “set” και ο χρόνος της επανατοποθέτησης “reset” να είναι αυστηρά ίσοι. Εάν έχουν την παραμικρή απόκλιση, τότε θα έχουμε αλλαγή της τάσης εξόδου χάνοντας έτσι ένα μέρος της χρήσιμης πληροφορίας.

#### 4.1.3.2.4 Μέθοδος με τη χρήση ρεύματος στο τύλιγμα ισοστάθμισης ή απόκλισης “offset strap”

Με τη μέθοδο αυτή ελέγχουμε την απόκλιση μέσω ελέγχου του ρεύματος που διαπερνά το τύλιγμα ισοστάθμισης. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει εκτός από την αφαίρεση της τάσης απόκλισης της γέφυρας, την αφαίρεση μόνιμων μαγνητικών πεδίων. Επίσης χρησιμοποιείται στην ενεργή αναβαθμολόγηση του αισθητήρα.

Η αντίσταση του τυλίγματος αυτού και η σταθερά (mA/gauss) εξαρτώνται πολύ από το σχεδιασμό του AMR και από chip σε chip. Παρόλα αυτά συνήθως χρειάζονται μερικά milliAmps να διαπεράσουν το τύλιγμα, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μηδενισμός. Για μικρά ρεύματα μπορεί να χρησιμοποιείται ο τελεστικός ενισχυτής απευθείας πάνω στο τύλιγμα. Για ρεύματα που ξεπερνούν τις ικανότητες του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος (4.10). Το πλεονέκτημα του κυκλώματος αυτού είναι το χαμηλό κόστος. Ενώ η απαίτηση για συμμετρική τροφοδοσία αποτελεί μειονέκτημα. Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται άλλες δυνατές τοπολογίες.



Σχήμα 4.10: Κύκλωμα οδήγησης ρεύματος.

#### 4.1.3.2.5 Μέθοδος με ψηφιακή αφαίρεση

Η μέθοδος της ψηφιακής αφαίρεσης είναι ίσως η δημοφιλέστερη, εφόσον και δεν χρειάζεται καμία αλλαγή στο υλικό (hardware). Όπως περιγράψαμε παραπάνω, το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι θυσιάζουμε εύρος ζώνης από την ανάλυση του ADC, ώστε να καλύψουμε και το δυναμικό μέρος της τάσης απόκλισης της γέφυρας. Αν απαιτείται όλη η ακρίβεια του αισθητήρα, τότε πρέπει να καταφύγουμε σε υπερδιαστασιολόγηση της ανάλυσης του ADC.

Ας δούμε ένα παράδειγμα που μας το προτείνει ο ίδιος ο κατασκευαστής του αισθητήρα (Honeywell):

Ο αισθητήρας HMC 1052 εμπεριέχει μια διπλή γέφυρα και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πυξίδας σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 0°C έως και 70°C.

Από το φυλλάδιο των τεχνικών χαρακτηριστικών του μπορούμε να δούμε ότι η τάση απόκλισης της γέφυρας είναι  $\pm 1.25 \text{ mV/V}$  και η ευαισθησία του σε μαγνητικά πεδία είναι  $1.0 \pm 0.2 \text{ mV/V/gauss}$ .

Έτσι, η χειρότερη κατάσταση είναι ότι η μέγιστη ευαισθησία ανέρχεται στα  $1.335 \text{ mV/V/gauss}$ , από την οποία το μεγαλύτερο μέρος της είναι η τάση απόκλισης. Επιπλέον παράμετροι είναι η τάση παροχής ίση με 3.0Volts και το μέγιστο μαγνητικό πεδίο της γης ίσο με 625milligauss.

Οπότε, η τάση απόκλισης της γέφυρας μπορεί να φτάσει:

$$V_{off} = (3.0V) \cdot (\pm 1.25 \text{ mV/V})$$

$$V_{off} = \pm 3.75 \text{ mV}$$

Η μέγιστη μαγνητική μεταβολή μπορεί να είναι:

$$V_{field} = (3.0V) \cdot (\pm 1.335 \text{ mV/V} \cdot \text{gauss}) \cdot (0.625 \text{ gauss})$$

$$V_{field} = \pm 2.5 \text{ mV}$$

Έτσι, η ολική μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας μπορεί να είναι:

$$V_o = V_{off} + V_{field} = \pm 3.75 \text{ mV} + (\pm 2.5 \text{ mV})$$

$$V_o = \pm 6.25 \text{ mV}$$

Τώρα μπορούμε να συνεχίσουμε με ένα βασικό κυκλωματικό σχεδιασμό χρησιμοποιώντας διπλό τελεστικό ενισχυτή για την τροφοδοσία του ADC του μικροελεγκτή και ένα MOSFET για την ενίσχυση των σημάτων set/reset του μικροελεγκτή.

Υποθέτουμε ότι η τάση του ADC του μικροελεγκτή του είναι η ίδια με τον αισθητήρα και τους τελεστικούς ενισχυτές, δηλαδή 3.0Volts. Για να είμαστε εντός της ανάλυσης δειγματολήπτη, ας υποθέσουμε ότι πρέπει να αφήσουμε την κλίμακα μακριά από τις ακραίες τιμές τροφοδοσίας κατά 200milliVolts. Οπότε το εύρος μας είναι από 0.2 έως 2.8 Volts ή αλλιώς  $\pm 1.3V$  από τη μέση τιμή των 1.5Volts, γνωστή και σαν τιμή αναφοράς. Αυτό επιτρέπει τη ρύθμιση των ενισχυτικών οργάνων έτσι ώστε το σήμα  $\pm 6.25V$  να το αναγάγουν στο εύρος του ADC  $=\pm 1.3V$ . Αυτό δίνει τον λόγο κέρδους κατά τον οποίο πρέπει να ενισχυθεί η τάση εξόδου της γέφυρας

$$K_{Gain} = \pm 1.3V \pm 0.00625V = 208$$

Λόγω του ότι οι αντιστάσεις απαντώνται στο εμπόριο σε πρότυπες τιμές, στρογγυλεύουμε το κέρδος γύρω στα 200. Αυτή η τιμή του κέρδους επιτρέπει να επιλεγθούν αντιστάσεις 4.99KΩ και 1MΩ του τύπου Μεταλλικού Φιλμ, οι οποίες είναι υψηλής ακρίβειας. Η επιλογή 4.99KΩ προέρχεται από την ονομαστική αντίσταση της γέφυρας που είναι 1KΩ και από το ότι η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή πρέπει να είναι 4 με 10 φορές μεγαλύτερη της αντίστασης εξόδου της γέφυρας. Η αντίσταση 1MΩ είναι περίπου 200 φορές μεγαλύτερη από την 4.99KΩ. Τώρα, έχοντας το εύρος που χρειάζεται ο ADC, το οποίο είναι  $\pm 1.3V$  και στο οποίο περιλαμβάνεται το offset της γέφυρας και η επίδραση του μαγνητικού πεδίου, μπορεί να αρχίσει η ψηφιακή αφαίρεση. Μια άλλη παραδοχή που δεχόμαστε είναι ότι ο ADC έχει ανάλυση 10 bit, δηλαδή 1024 ψηφιακά επίπεδα στο εύρος  $\pm 1.3V$  (2.6V).

Έτσι, τα 1024 επίπεδα ή βήματα γίνονται αριθμητική αναπαράσταση της τάσης εισόδου. Επομένως το 512 βήμα αντιστοιχεί στην τάση των 1.5Volts ή αλλιώς στο μαγνητικό πεδίο. Κάθε βήμα απέχει από το επόμενο περίπου 2.53milliVolts.

Για να βάλουμε τα βήματα σε 'πραγματικές' τιμές τάσης σε αυτό το παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι η A γέφυρα εκτίθεται σε μαγνητικό πεδίο -127milli-gauss. Η τάση απόκλισης της γέφυρας είναι +3.00milli-volts, όταν αυτή τροφοδοτείται με 30Volts. Σε αυτή την περίπτωση, τα 127milligauss προστίθενται στα 3.00milliVolts και η ολική έξοδος είναι 2.619milli-volt. Έπειτα, η τάση αυτή ενισχύεται κατά 200 φορές από τον τελεστικό ενισχυτή και προστίθεται στην τάση αναφοράς 1.5Volt.

$$V_{adc} = 1.5V + 2.619mV \cdot 200 = 2.024V$$

Έτσι, η ψηφιακή του αναπαράσταση είναι 206 βήματα πάνω από τα 512 βήματα της αναφοράς ή άλλα 718. Υπάρχουν τώρα τουλάχιστον δύο τρόποι να υλοποιήσουμε την ψηφιακή αφαίρεση της τάσης απόκλισης. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιείται κυρίως σε εργαστήρια με χρήση πηνίων Helmholtz ή θωρακισμένου θαλάμου, ώστε να πετύχουμε μηδενικό πεδίο. Ο δεύτερος τρόπος μοιάζει με τη μέθοδο της διακοπτόμενης ανατροφοδότησης που εξετάσαμε νωρίτερα.

Ας εξετάσουμε αναλυτικότερα τις μεθόδους αυτές. Η πρώτη μέθοδος θα είναι ο προσδιορισμός της φυσικής τάσης απόκλισης της γέφυρας στο εργαστήριο με επιβολή μηδενικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται είτε σε θάλαμο θωράκισης είτε με χρήση πηνίων Helmholtz, έτσι ώστε να αντισταθμίζουν το μαγνητικό πεδίο της γης.

Τα +30milliVolts της τάσης απόκλισης, θα είναι παρόντα στην έξοδο της γέφυρας και μετά από 200 φορές ενίσχυσης θα είναι 600milliVolts πάνω από την τάση αναφοράς, δηλαδή 2.10Volts. Αυτό αντιστοιχεί σε 236 βήματα πάνω από τα 512 βήματα της αναφοράς, αλλιώς 748 βήματα. Έπειτα αφαιρούμε τα 236 βήματα μέσα στο πρόγραμμα του μικροελεγκτή.

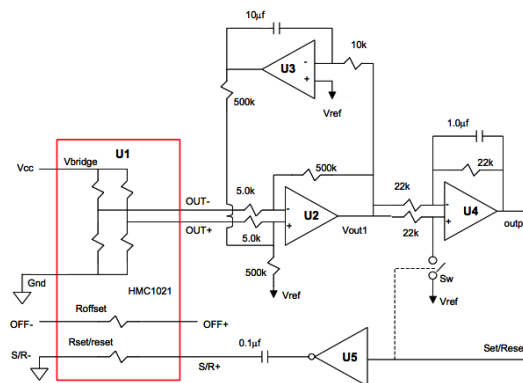
Η δεύτερη μέθοδος θα είναι παρόμοια με τη μέθοδο της διακοπτόμενης ανατροφοδότησης. Η διαφορά είναι ότι δε χρειάζεται επιπλέον ηλεκτρονικάεκτός από τα MOSFET, που ενισχύουν τους παλμούς set/reset του μικροελεγκτή. Η επικάλυψη του set/reset μπορεί να είναι αργή, ακόμη και πιο αργή από το μεταβαλλόμενο πεδίο που μετρούμε.

Στο παραπάνω παράδειγμα αν το τύλιγμα 'set/reset' δεχτεί ένα ρεύμα αντίθετης φοράς με το προηγούμενο, τα -127milligauss του πεδίου που επιδρά θα γίνουν σαν να είναι +127milligauss και σαν έξοδο +0.38milliVolts. Τα 3.00milliVolts της τάσης απόκλισης της γέφυρας A, θα παραμείνουν και θα προστεθούν στην τάση εξόδου, η οποία θα είναι τώρα ίση με +3.381milliVolts.

Μετά από το στάδιο ενίσχυσης η τάση θα είναι 678milliVolts πάνω από την τάση αναφοράς 1.5Volts και το άθροισμα δίνει 2.18Volts. Αυτό αντιστοιχεί σε 266 βήματα πάνω από τα 512 βήματα αναφοράς, με άλλα λόγια 778 βήματα.

Τώρα παρατηρούμε ότι στην ορθή πόλωση έχουμε 206 βήματα πάνω από την αναφορά και στην αντίθετη πολικότητα έχουμε 266 βήματα πάνω από την αναφορά. Εάν αθροίσουμε τα τμήματα, τα βήματα θα διπλασιαστούν, ενώ τα βήματα που προέρχονται από την απόκλιση αλληλοεξουδετερώνονται.

Βήματα =236



Σχήμα 4.11: Αντιστάθμιση μέσω ψηφιακής αφαίρεσης.

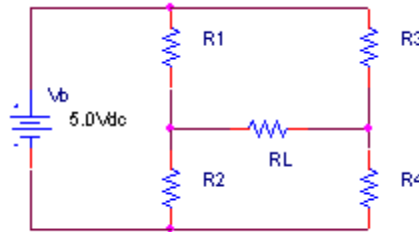
Το πλεονέκτημα της μεθόδου εναλλαγής 'set/reset' είναι ότι μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς καμία ιδιαίτερη αλλαγή (fixturing) ή οποιαδήποτε αλλαγή της διεύθυνσης του επιβαλλόμενου πεδίου. Πολλοί κατασκευαστές πυξιδών συνιστούν να γίνεται περιοδική εφαρμογή 'set/reset', παρόλο που η τάση απόκλισης δεν αλλάζει στη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα να μηδενίζεται και το τελευταίο bit σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι τα  $\pm 127$ milligauss έχουν μια αντιστοιχία σε 206 έως 266 βήματα, δηλαδή 60 βήματα διαφορά. Όταν χρησιμοποιούνται ADC των 8 ή 10 bit δεν θα είναι σε θέση να παρέχουν υψηλή ανάλυση. Στο παράδειγμά μας είδαμε ότι το ολικό πεδίο της γης είναι  $\pm 625$ milligauss, το οποίο δίνει  $\pm 1.875$ milligauss στην έξοδο της γέφυρας. Με μια ενίσχυση στις 200 φορές φτάνουμε στα  $\pm 0.375$ Volts το οποίο αντιστοιχεί σε  $\pm 148$  βήματα από τα συνολικά 1024 βήματα του δειγματολήπτη. Οπότε η μέγιστη ανάλυση που δίνει αυτός ο σχεδιασμός είναι  $0.4^\circ$ .

Συμπερασματικά, θα λέγαμε ότι ο χειρισμός της τάσης απόκλισης της γέφυρας είναι ένα πρόβλημα το οποίο χρειάζεται να λύσουμε. Παραπάνω αναφέραμε μερικές μεθόδους με τις οποίες μπορούμε να εξαλείψουμε το πρόβλημα. Όμως, η μέθοδος που θα πρέπει να χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις εκάστοτε απαιτήσεις. Εάν το κόστος είναι περιοριστικός παράγοντας και δεν απαιτείται υψηλή απόδοση, η ψηφιακή μέθοδος είναι μια καλή λύση. Αν όμως, χρειάζεται υψηλή ανάλυση και δεν μας περιορίζει το κόστος, η αναλογική μέθοδος θα πρέπει να προτιμηθεί.

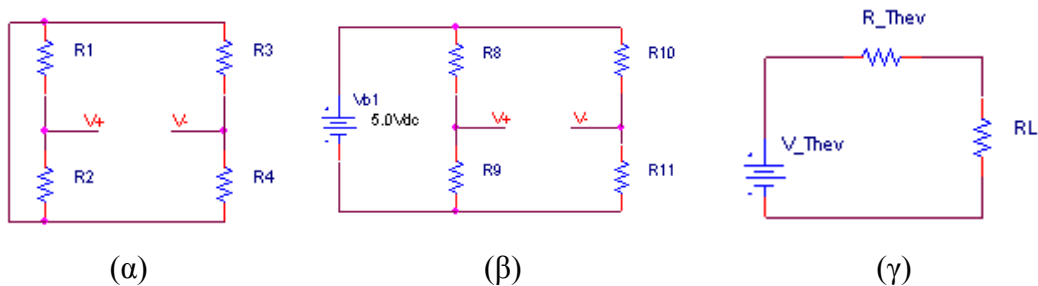
#### 4.1.4 Υπολογισμός της τάσης εξόδου της γέφυρας του HMC.

Ο αισθητήρας HMC είναι κατασκευασμένος σε δομή γέφυρας Wheatstone. Η ανάλυση της γέφυρας Wheatstone είναι απλοϊκή και την αναλύουμε έτσι ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε στην συνέχεια την αντίσταση εξόδου και τον θερμικό θόρυβο που εμφανίζεται από τα ηλεκτρονικά.



Σχήμα 4.12: Γέφυρα Wheatstone.

Στο παραπάνω σχήμα ( ) είδαμε την γέφυρα Wheatstone. Όμως για την πιο εύκολη ανάλυση της στο σχήμα ( ) παρατίθεται το ισοδύναμο κατά Thévenin κύκλωμα.



Σχήμα 4.13: Ανάλυση κυκλώματος κατά Thévenin. (α) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης αντίστασης κατά Thévenin, (β) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης πηγής τάσης κατά Thévenin και (γ) το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thévenin.

Έχοντας τώρα το ισοδύναμο κατά Thévenin κύκλωμα η ανάλυση είναι απλή.

Η αντίσταση Thévenin του κυκλώματος είναι:

$$R_{Thev} = (R_1 // R_2) + (R_3 // R_4)$$

$$R_{Thev} = (R_1 | R_2 + (R_3 || R_4)) = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

Η τάση Thévenin του κυκλώματος είναι:

$$V_{Thev} = V_+ - V_- = V_b$$

$$V_+ = \frac{V_b \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{και} \quad V_- = \frac{V_b \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

$$V_{Thev} = V_+ - V_- = \frac{V_b \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{V_b \cdot R_4}{R_3 + R_4} = V_b \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 + R_4}{R_1 + R_2} - \frac{R_4 \cdot R_1 + R_2}{R_3 + R_4} = V_b \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 + R_4 - R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 \cdot R_3 + R_4}$$

Τάση που θα μετράει ο τελεστικός ενισχυτής με πεπερασμένη αντίσταση εισόδου  $R_{in}$  η οποία φαίνεται σαν  $R_L$  στην έξοδο της γέφυρας δίνεται από την εξίσωση ( ).

$$V_L = \frac{V_{Thev} \cdot R_L}{R_L + R_{Thev}}$$

$$V_L = \frac{V_b \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3+R_4} \cdot R_L}{R_L + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2} + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2}} = \frac{V_b R_L R_2 \cdot R_3 + R_4 - R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_1 + R_2 + R_3 \cdot R_4 \cdot R_3 + R_4 + R_L R_1 + R_2 + (R_3 + R_4)}$$

Εάν θεωρήσουμε ότι οι αντιστάσεις είναι ίδιες και μεταβάλλονται κατά  $-\Delta R$  οι  $R_1$  και  $R_4$  ενώ  $R_2$  και  $R_3$  μεταβάλλονται κατά  $\Delta R$  τότε έχουμε

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 + R_4 - R_4 \cdot R_1 + R_2}{R_1 + R_2 \cdot R_3 + R_4}$$

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{(R+\Delta R) \cdot R+\Delta R + R-\Delta R - (R-\Delta R) \cdot (R-\Delta R) + (R+\Delta R)}{(R-\Delta R) + (R+\Delta R) \cdot (R+\Delta R) + (R-\Delta R)}$$

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{R+\Delta R - R-\Delta R \cdot R-\Delta R + R+\Delta R}{R-\Delta R + R+\Delta R \cdot R+\Delta R + R-\Delta R} = V_b \cdot \frac{R+\Delta R - R-\Delta R}{R-\Delta R + R+\Delta R}$$

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{2 \cdot \Delta R}{2 \cdot R} = V_b \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

Εάν θεωρήσουμε τώρα ότι μόνο μία αντίσταση μεταβάλετε τότε έχουμε:

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{R+DR \cdot 2R - R \cdot 2R+DR}{2R+DR \cdot 2R} = V_b \cdot \frac{2 R+DR - 2R+DR}{2 2R+DR \cdot}$$

$$V_{Thev} = V_b \cdot \frac{DR}{4R+2DR \cdot}$$

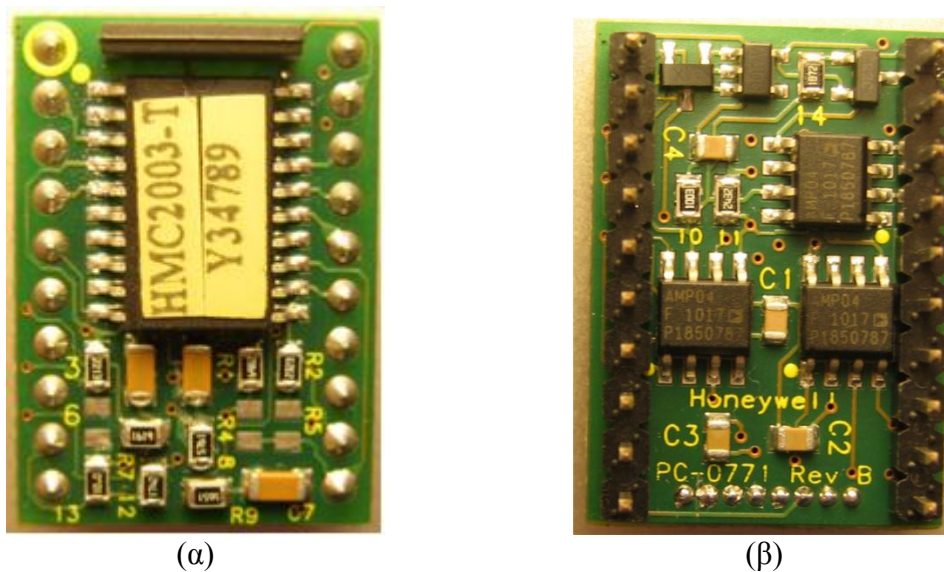
Το κέρδος τάσης που έχουμε αν χρησιμοποιούμε τέσσερις μεταβλητές αντιστάσεις αντί μίας μπορεί να υπολογιστή ως εξής.

$$A = \frac{V_b \frac{\Delta R}{R}}{V_b \cdot \frac{\Delta R}{4R+2\Delta R \cdot}} = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{4R+2\Delta R}{\Delta R} = \frac{4R+2\Delta R}{R} \approx 4$$

Είναι κατανοητό όταν έχουμε τέσσερις μεταβλητές αντιστάσεις δύο ίδιες και δύο αντισυμμετρικές των άλλων θα έχουμε την μέγιστη απόδοση και γραμμικότητα της γέφυρας. Οι αντιστάσεις ποτέ δεν έχουν ακριβώς τις ίδιες τιμές και για το λόγο αυτό είδαμε προηγουμένως πώς να αντισταθμίζουμε την τάση απόκλιση της γέφυρας. Αν έχουμε το chip του αισθητήρα χωρίς τα ηλεκτρονικά του και σε μαγνητικά θωρακισμένο θάλαμο μπορούμε υπολογίσουμε ακριβώς τις αντιστάσεις αυτές.

## 4.2 Σχεδιασμός ηλεκτρονικών για τον HMC2003.

Στον σχεδιασμό για τα ηλεκτρονικά του αισθητήρα HMC2003 λαμβάνουμε υπόψη την ανάλυσή του και τις δυνατότητες για την αποστολή του σήματος στο κέντρο καταγραφής. Είναι γνωστό ότι μπορούμε να στείλουμε μία πληροφορία είτε υπό μορφή τάσης είτε υπό μορφή ρεύματος είτε με την μορφή παλμών. Η αποστολή σήματος υπό την μορφή τάσης είναι γνωστό ότι υποφέρει από υψηλό θόρυβο και η αποστολή του σήματος γίνεται μόνο σε πολύ κοντινές αποστάσεις. Η επιλογή της αποστολής της πληροφορίας μέσω ρεύματος είναι μία καλύτερη επιλογή η οποία δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλα προβλήματα θορύβου στο καλώδιο μετάδοσης. Η τρίτη επιλογή είναι η μετατροπή του σήματος εξόδου του αισθητήρα σε παλμούς και η αποστολή των παλμών αυτών μέσω του καλωδίου στο κέντρο. Τελικά έγινε η επιλογή της αποστολής της πληροφορίας με την χρήση παλμών. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε τις μεθόδους αποστολή ρεύματος και παλμών.



Σχήμα 4.14: Ο αισθητήρας HMC2003. (α) ο αισθητήρας από την πάνω πλευρά και (β) ο αισθητήρας από την κάτω πλευρά.

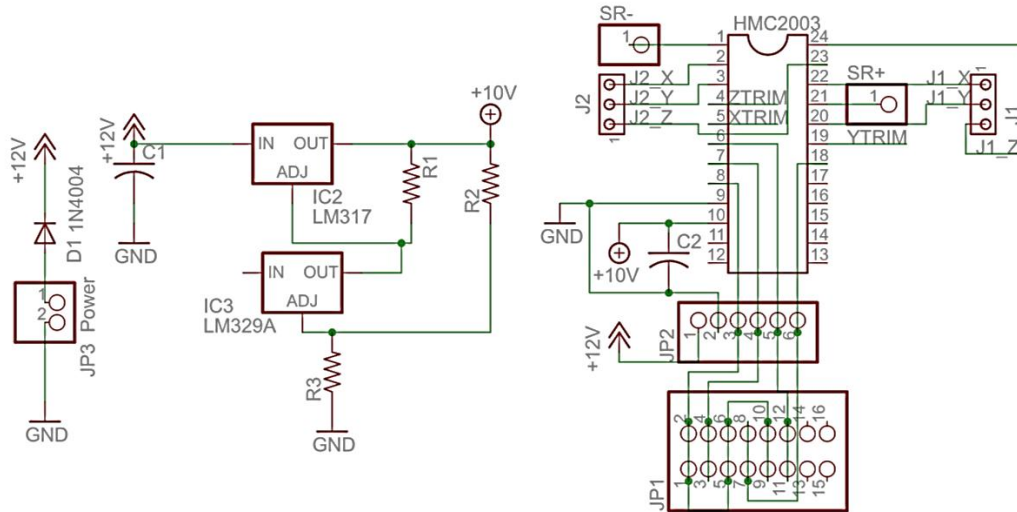
Ο αισθητήρας HMC2003 δεν διαθέτει απλά δύο chip μαγνητοαντιστάσεων αλλά και τα ηλεκτρονικά για να τροφοδοτούν την γέφυρα με κατάλληλη τάση καθώς και τους ενισχυτές οργάνων. Οι τελεστικοί ενισχυτές οργάνων που χρησιμοποιούνται από τον κατασκευαστή είναι οι AMP04. Ο τελεστικός ενισχυτής μέσω της επιλεγόμενης αντίστασης κέρδους μας δίνει το κέρδος. Ο ενισχυτής αυτός δίνει τάση εξόδου στο εύρος 0-5volt, και είναι σχεδιασμένος κατά τρόπο ώστε το ηλεκτρονικό του να δίνει τάση εξόδου 2.5volt όταν υπάρχει μηδενική τάση εξόδου στην γέφυρα. Επιπλέον, αν αφαιρέσουμε την τάση αναφοράς 2.5volt ο αισθητήρας έχει αναλογία 1:1 της τάσης εξόδου και της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου σε gauss. Αναλυτικότερα όταν το μαγνητικό πεδίο είναι -2gauss, η τάση εξόδου είναι 0.5volt. Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι +2gauss, η τάση εξόδου είναι 4.5volt. Έτσι το εύρος αυτό είναι το πλέον κατάλληλο την είσοδο του σε δειγματολήπτη.

Πριν συνεχίσουμε με τα συστήματα μετάδοσης πληροφορίας είναι χρήσιμο να δούμε τα ηλεκτρονικά που συνοδεύουν τον αισθητήρα με σκοπό να εγγυηθούν μια πιο σταθερή τάση τροφοδοσίας, που είναι προαπαιτούμενο για την αξιόπιστη λειτουργία του. Τα άλλα ηλεκτρονικά που συνοδεύουν τον αισθητήρα είναι το κύκλωμα παλμών τοποθέτησης / επανατοποθέτησης και διόρθωσης της τάσης απόκλισης.



### 4.2.1 Κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας αισθητήρα.

Η σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας του αισθητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί επιτρέπει να παραμένει σταθερή η έξοδος του όταν χρησιμοποιείται μια πηγή τάσης η οποία δεν έχει σταθερή τάση. Για παράδειγμα κατά την εκφόρτιση μιας μπαταρίας η τάση στα άκρα της δεν παραμένει σταθερή. Στο σχήμα () παρατίθεται το κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης που χρησιμοποιήθηκε.



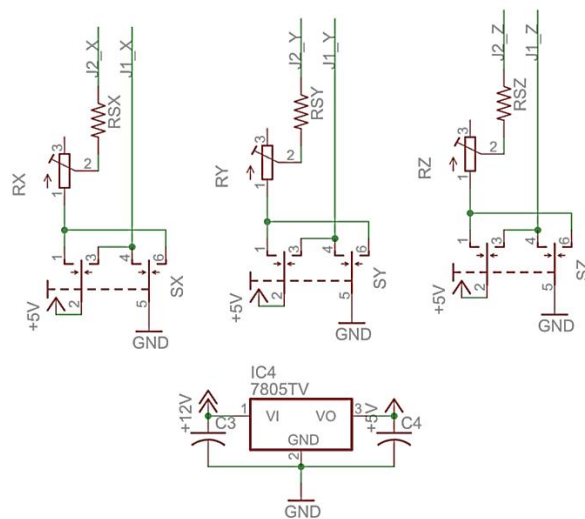
Σχήμα 4.15: Κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας του αισθητήρα.

Οι πυκνωτές C1 και C2 χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση των υψιλόσυχων τάσεων. Η δίοδος zener LM329A χρησιμεύει σαν τάση αναφοράς για τον σταθεροποιητή τάσης LM317 έτσι ώστε να δίνει 10volt σταθερή τροφοδοσία στην έξοδο.

## 4.2.2 Κύκλωμα ελέγχου της τάσης απόκλισης.

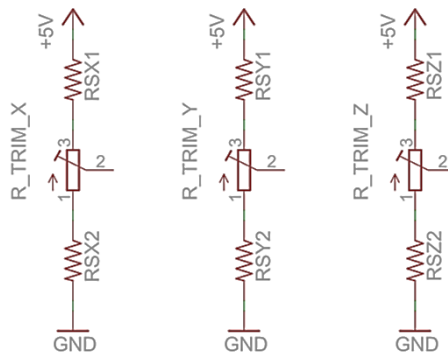
Το κύκλωμα ελέγχου της τάσης απόκλισης είναι σημαντικό όταν θέλουμε να μετράμε με υψηλή ακρίβεια μικρές μεταβολές. Αν η τάση απόκλισης είναι σχεδόν μηδενική μπορούμε να ενισχύσουμε το σήμα μας και να μετρήσουμε με ένα δειγματολήπτη μικρότερης ακρίβειας, αξιοποιώντας την πλήρη ακρίβεια του αισθητήρα και θυσιάζοντας κάποια περιοχή μέτρησης. Τα δύο κυκλώματα ελέγχου της τάσης απόκλισης που σχεδιάστηκαν είναι παθητικά, δηλαδή εν ώρα λειτουργίας δεν μπορούν να παρέμβουν είτε μέσω εντολών είτε μέσω αποστολής σήματος. Το τρίτο κύκλωμα είναι ενεργό και μπορεί μέσω εντολών να αλλάζει το πεδίο αναφοράς έτσι ώστε να επιτρέπει την ενεργή βαθμονόμηση του αισθητήρα.

Στο σχήμα (4.16) βλέπουμε ένα κύκλωμα που μηδενίζει την τάση απόκλισης κάνοντας χρήση των τυλιγμάτων αντιστάθμισης του αισθητήρα. Οι αντιστάσεις  $R_{SX}$ ,  $R_{SY}$ ,  $R_{SZ}$  φροντίζουν ότι αν ακόμη η μεταβλητές  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  μηδενιστούν το ρεύμα που θα περάσει στον τελεστικό ενισχυτή να είναι εντός των προδιαγραφών. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί και την αντίσταση  $R_L$  η οποία έχει ως σκοπό να καταναλώνει ελάχιστο ρεύμα από αυτό πρέπει να καταναλώνεται έτσι ώστε να εγγυάται τη σωστή λειτουργία του σταθεροποιητή 7805. Οι διακόπτες χρησιμεύουν στην αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος.



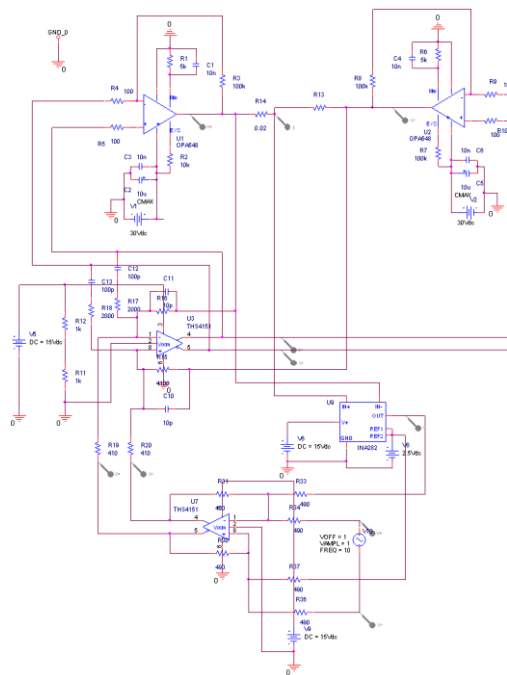
Σχήμα 4.16: Παθητικό σύστημα αντιστάθμισης με χρήση ρεύματος.

Το δεύτερο κύκλωμα δεν χρησιμοποιεί τα ρεύματα αντιστάθμισης αλλά κάνει χρήση της τάσης αναφοράς του τελεστικού ενισχυτή.



Σχήμα 4.17: Παθητικό σύστημα αντιστάθμισης με χρήση της τάσης αναφοράς.

Τέλος το ενεργό κύκλωμα αντιστάθμισης είναι και το πιο δύσκολο από όλα, σε ότι αφορά την υλοποίησή του. Χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά υψηλής ευαισθησίας και απαιτεί συνεχή έλεγχο για την εξασφάλιση της σταθερότητάς του. Για το λόγο αυτό έγιναν μια σειρά από προσομοιώσεις ώστε να επιβεβαιώσουμε την ευστάθεια του. Επιπλέον το κύκλωμα αυτό χρειάζεται εξονυχιστική βαθμονόμηση ακριβώς επειδή αποτελεί κύκλωμα υψηλής ακρίβειας. Ο ψηφιακός σε αναλογικό μετατροπέας έχει περιορισμό στην συχνότητα αλλαγή της τάσης εξόδου η οποία είναι 2msec για κάθε αλλαγή. Έτσι στην καλύτερη περίπτωση η μέγιστη συχνότητα αλλαγών είναι τα 500Hz.

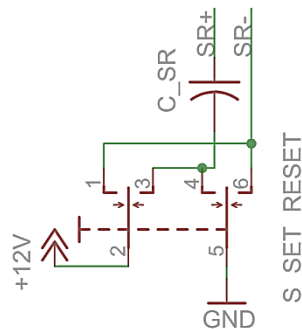


Σχήμα 4.18: Ενεργό σύστημα αντιστάθμισης με χρήση ρεύματος.

Για υλοποίηση προτιμήθηκε το πρώτο κύκλωμα με τον παθητικό έλεγχο ρεύματος. Το κύκλωμα με την ενεργή αντιστάθμιση δεν προτιμήθηκε μίας και το κόστος κατασκευής του είναι πολύ υψηλό, πράγμα που προκλήθηκε από την ανάγκη για μονή τροφοδοσία.

### 4.2.3 Κύκλωμα δημιουργίας παλμών τοποθέτησης-επανατοποθέτησης.

Το κύκλωμα για δημιουργία των παλμών τοποθέτησης επανατοποθέτησης είναι το απλούστερο δυνατό. Η επιλογή του κυκλώματος αυτού έγινε δια τον λόγο ότι στο σύστημα επικοινωνίας δεν περιλαμβάνετε καμία ψηφιακή έξοδο που θα μπορούσε να ελέγχει το κύκλωμα αυτό. Επιπλέον δεν επιλέγηκε η δημιουργία των παλμών με βάση ένα ρολόι. Οι παλμοί τοποθέτησης – επανατοποθέτησης δημιουργούνται με την μετακίνηση του διακόπτη. Οι παλμοί αυτοί τους δημιουργούσαμε πριν από κάθε σειρά μετρήσεων.



Σχήμα 4.19: Κύκλωμα υλοποίησης τοποθέτησης – επανατοποθέτησης με χρήση διακόπτη.

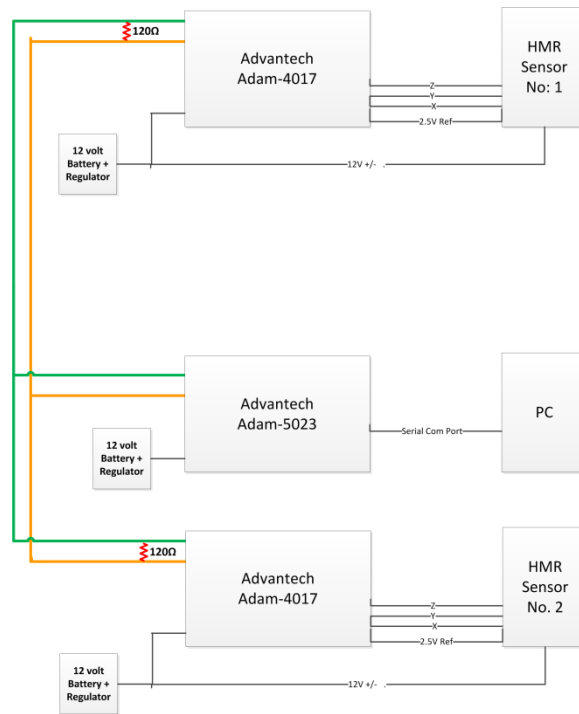
Παρόλο που το κύκλωμα αυτό είναι πολύ απλοϊκό είναι αποτελεσματικό. Το κύκλωμα αυτό όμως έχει δύο μειονεκτήματα. Το πρώτο μειονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο ξεπεράσει το όριο των 10gauss δεν υπάρχει αυτόματος μηχανισμός για επαναφορά των μαγνητικών περιοχών του αισθητήρα στον επιθυμητό άξονα μαγνήτισης. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την νέα τιμή της τάσης απόκλισης στο ενδεχόμενο μεταβολής της θερμοκρασίας. Η λύση για το δεύτερο αυτό μειονέκτημα είναι να γίνει εργαστηριακή μελέτη του αισθητήρα σε σχέση με την θερμοκρασία ώστε να είναι σε θέση το σύστημα να ανακαλεί από την βάση δεδομένη δεδομένων.

#### 4.2.4 Σύστημα δειγματοληψίας και επικοινωνία.

Το σύστημα δειγματοληψίας επιτρέπει την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακή μορφή. Είναι γνωστό ότι ένα ψηφιακό σήμα έχει μεγαλύτερη ανοχή σε θόρυβο. Επιπλέον μπορεί να κωδικοποιηθεί ευκολότερα και να αποσταλεί σε μακρινές αποστάσεις. Η επιλογή του δειγματολήπτη έγινε με βάση μία σειρά από κριτήρια. Πρώτον θέλουμε ένα σύστημα δειγματοληψίας τουλάχιστο 16bit ώστε το ηλεκτρονικό να πλησιάζει της προδιαγραφές του HMR2300. Ο HMR2300 είναι ένα πλήρες σύστημα για μαγνητικές μετρήσεις. Το σύστημα αισθητήρα HMR2300 περιέχει τον αισθητήρα HMR2003 μαζί με όλα τα ηλεκτρονικά τοποθέτησης-επανατοποθέτησης, τα ηλεκτρονικά ισοστάθμισης και τα ηλεκτρονικά δειγματοληψίας. Ο δειγματολήπτης που έχει μέσα ο HMR2300 έχει ανάλυση 16bit στο εύρος τάσης από 0Volt έως 5Volt. Δεύτερον θέλουμε ένα σύστημα δειγματοληψίας που να διαθέτει και σύστημα αποστολής των δεδομένων. Το HMR2300 διατίθεται σε δύο εκδόσεις την RS-232 και στην RS-485. Η RS-232 είναι η γνωστή σειριακή θύρα. Η RS-232 έχει δύο μειονέκτημα, το πρώτο είναι ότι δεν μπορεί να αποστείλει τα δεδομένα σε μακρινή απόσταση και το δεύτερο είναι ότι δεν υποστηρίζεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας πολλές συσκευές στην ίδια γραμμή. Το σύστημα επικοινωνίας RS-485 υποστηρίζει πολλαπλές συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους έως ολόκληρο το μήκος της γραμμής χωρίς επαναλήπτες μπορεί να φτάνει τα 1.2Km. Η τρίτη προδιαγραφή που θα θέλαμε να ικανοποιεί ένα σύστημα δειγματοληψίας είναι να έχει δοκιμαστεί σε εξωτερικές συνθήκες. Ένα τέτοιο σύστημα δειγματοληψίας που κακοποιεί τις προδιαγραφές αυτές είναι η σειρά καρτών δειγματοληψίας της ADVANTECH ADAM-40XX. Τελικά επιλέχθηκε η κάρτα ADAM-4017. Η κάρτα αυτή όχι μόνο ικανοποιεί τις προηγούμενες προδιαγραφές αλλά διαθέτει οχτώ αναλογικές εισόδους, οι έξι από αυτές είναι διαφορικής εισόδου. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που έχει η κάρτα αυτή είναι ότι μπορείς να επιλέξεις το εύρος τάσεως εισόδου έτσι ώστε να μπορούμε να πάρουμε ένα εύρος της τάσεως εξόδου του αισθητήρα και σε αυτό το εύρος να έχουμε την ανάλυση των 16bit. Μετά από διάφορα πειράματα και μετρήσεις αποφάσισα να χρησιμοποιήσω το εύρος  $\pm 500\text{mV}$ . Το εύρος αυτό όμως αντιστοιχεί σε  $\pm 625\text{mV}$  και κατά συνέπεια σε περίπου  $\pm 625\text{mgauss}$ . Αυτό αντιστοιχεί σε μια ανάλυση  $19.07\mu\text{V}$ .  $\approx 19.07\mu\text{gauss}$ . η ανάλυση αυτή διπλάσια από την ανάλυση του αισθητήρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μην χάνω σε ανάλυση από την πληροφορία του αισθητήρα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κάρτα ADAM-4017.



Σχήμα 4.20: Εικόνα της κάρτας ADAM-4017.



Σχήμα 4.21: Σύστημα επικοινωνίας των καρτών δειγματοληψίας με το υπολογιστή.

### 4.3 Χαρακτηρισμός Αισθητήρα.

Το σημαντικότερο ζήτημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές κατά την διάρκεια φυσικών μετρήσεων είναι το θέμα του χαρακτηρισμού του αισθητήρα. Με τον όρο χαρακτηρισμός αναφερόμαστε τόσο στην βαθμονόμηση του αισθητήρα όσο και στην πυκνότητα ισχύος θορύβου σε σχέση με την συχνότητα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του αισθητήρα που μετρήσαμε είναι το εύρος ζώνης του.

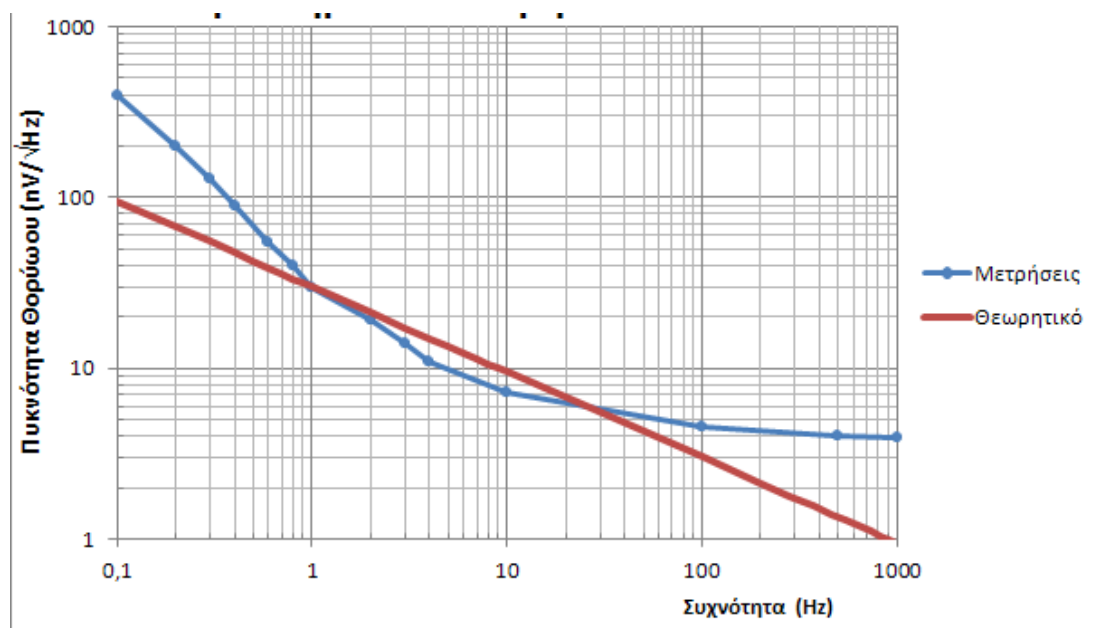
Ο χαρακτηρισμός του αισθητήρα είναι το κλειδί για να κατανοήσει κανείς τις επιδράσεις του περιβάλλοντος όπως επίσης και εάν η έξοδος του είναι θόρυβος ή πραγματικό σήμα. Στην περίπτωση μας θέλουμε να μετρούμε την διαταραχή στο μαγνητικό πεδίο. Όμως το μαγνητικό πεδίο δεν είναι σταθερό, και προπάντων δεν είμαστε σε μαγνητικά απομονωμένο χώρο. Αυτό έχει σαν συνέπεια να εισάγεται μαγνητικός θόρυβος στις μετρήσεις μας. Ο μαγνητικός θόρυβος δεν είναι η μόνη πηγή θορύβου στις μετρήσεις μας. Στην πραγματικότητα έχουμε πολλές πηγές θορύβου και μίας ο αισθητήρας έχει ηλεκτρονικά ο κυρίαρχος θόρυβος στα ηλεκτρονικά είναι ο θόρυβος Johnson–Nyquist γνωστός και ως θερμικός θόρυβος. Ο θόρυβος αυτός πολλές φορές υπερκαλύπτει το θόρυβο του αισθητήρα και ένα πολύ γνωστό παράδειγμα ενός τέτοιου γεγονότος είναι τα μαγνητόμετρα SQUID στα οποία ο κύριος περιορισμός τους προέρχεται από τα ηλεκτρονικά που τα συνοδεύουν.

Όπως κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα έτσι και οι αισθητήρες έχουν ένα εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Πέραν του εύρους λειτουργίας αυτού, το σήμα του αισθητήρα εξασθενεί. Για τον αισθητήρα HMC2003 το ονομαστικό εύρος λειτουργίας είναι από 0Hz έως 1KHz. Το εύρος αυτό όμως δεν είναι αντιπροσωπευτικό για τον αισθητήρα μιας αυτός βρίσκεται θωρακισμένος σε περίβλημα αλουμινίου. Το περίβλημα αυτό, επιτρέπει στο συνεχές μαγνητικό πεδίο να περνά έως μερικά Hz, πέραν ενός ορίου συχνότητας αρχίζει να λειτουργεί σαν κλωβός Faraday εμποδίζοντας έτσι το υψίσυχο μαγνητικό πεδίο να εισέρθει μέσα στο κλωβό. Για το λόγο αυτό πρέπει να βρούμε την νέα συχνότητα αποκοπής.

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα αποτελεί το τρίτο βήμα στην μελέτη του αισθητήρα προκειμένου να τον χαρακτηρίσουμε πλήρως. Μέσω της βαθμονόμησης θα δούμε τα όρια που μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας και με πόση ακρίβεια μπορεί να το κάνει αυτό. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε χωρίς το σύστημα δειγματοληψίας που επιλέξαμε. Ο λόγος που γίνεται η μέτρηση χωρίς το σύστημα δειγματοληψίας αλλά με πολύμετρο ακριβείας είναι ότι δεν ξέρουμε εξ αρχής πόση ανάλυση έχει ο αισθητήρας μας παρόλο που ο κατασκευαστής ισχυρίζεται ότι μπορεί να μετρά με βήμα 40μgauss. Θα μπορούσαμε να βάλουμε ένα δειγματολήπτη με μεγαλύτερη ανάλυση από αυτή που μας λέει ο κατασκευαστής και στην συνέχεια να το βαθμονομήσουμε με βάση τον αριθμό των βημάτων.

### 4.3.1 Εύρεση της πυκνότητας φάσματος θορύβου του HMC2003.

Ο αισθητήρας HMC2003 όπως είπαμε αποτελείται από ένα HMC1001 και ένα HMC1002. Η κατασκευάστρια εταιρία Honeywell αναφέρει στο φυλλάδιο προδιαγραφών ότι η πυκνότητα θορύβου για συχνότητες από 0.1-10Hz είναι 27μgauss (p-p). Το ακόλουθο σχήμα αποτελεί μια τυπική γραφική παράσταση που παρέχει η Honeywell. Η γραφική παράσταση αυτή είναι χωρίς τα ηλεκτρονικά του αισθητήρα. Λόγω του ότι ο αισθητήρας που έχουμε έρχεται με τους εργαστηριακούς ενισχυτές AMP04 η πυκνότητα θορύβου είναι διαφορετική. Επιπλέον λόγω διαφορών στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά πήραμε την πυκνότητα φάσματος θορύβου για καθεμία από τις συνιστώσες του κάθε αισθητήρα.



Σχήμα 4.22: Τυπική πυκνότητα φάσματος θορύβου της οικογένειας HMC1001-2

Πριν συνεχίσουμε στα εργαστηριακά αποτελέσματα της πυκνότητας φάσματος θορύβου ας δούμε μια μαθηματική του θορύβου Johnson–Nyquist. Στην μελέτη της γέφυρας Wheatstone για την περίπτωση του αισθητήρα μας είδαμε ότι η τάση εξόδου δίνεται από τον τύπο (4.1) και η αντίσταση εξόδου δίνεται από τον τύπο (4.2).

$$V_L = \frac{V_b \cdot R_L \cdot (R_2 \cdot R_3 + R_4 - R_4 \cdot (R_1 + R_2))}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_4 + R_3 \cdot R_4 \cdot R_1 + R_2 + R_L \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (4.1.a)$$

$$V_L = \frac{V_b \cdot R_L}{2R \cdot R_L} \quad (4.1.β)$$

$$R_{Bridge-out} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (4.2.a)$$

$$R_{Bridge-out} = R \quad (4.2.β)$$



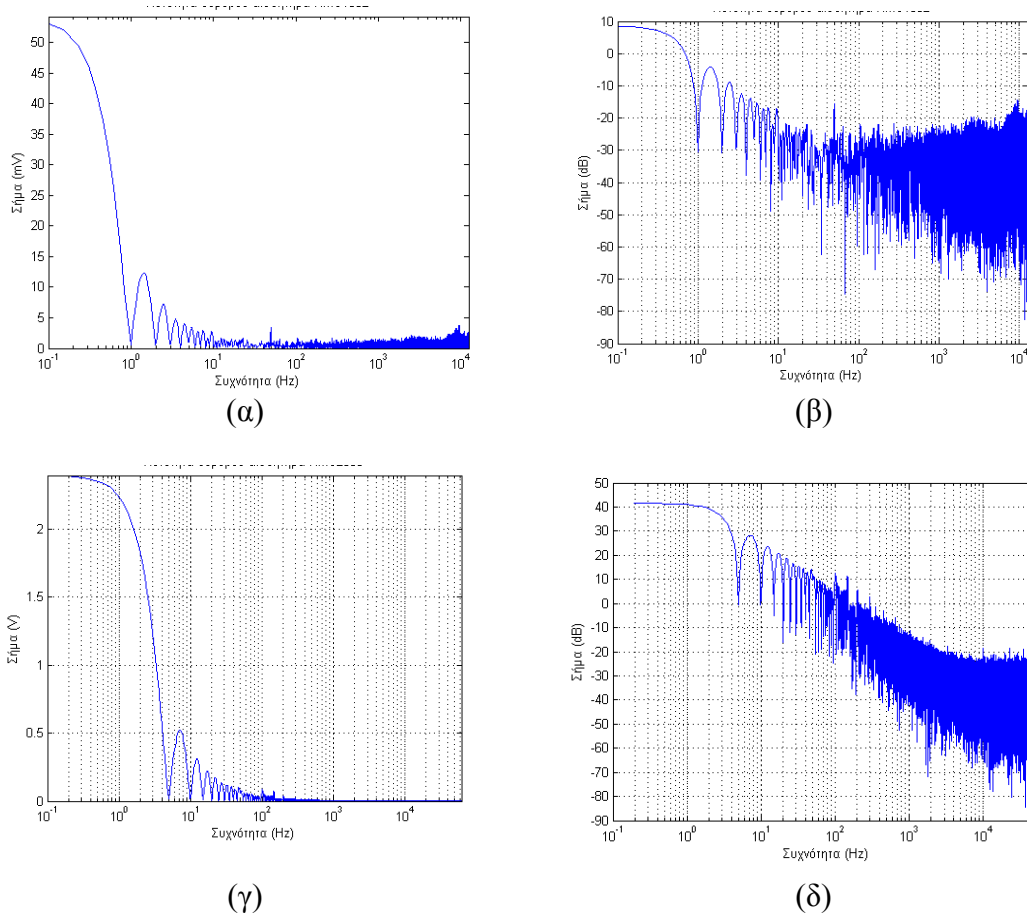
Όπως γνωρίζουμε ο υπολογισμός του θορύβου Johnson–Nyquist σε ένα σύνθετο κύκλωμα δίνεται από το άθροισμα των τετραγώνων των πηγών θορύβου. Έτσι προκύπτει ο θόρυβος εξόδου είναι:

$$e_{n_{rb}} = \sqrt{4KT \frac{R}{2}} \cong 0.13 \sqrt{\frac{R}{2}} = 0.13 \sqrt{425} = 2.68 nV / \sqrt{Hz}$$

$$e_{n_i} = i_{nn} \sqrt{\frac{R}{2}} = 0.9 \cdot \sqrt{425} = 382.5 pV / \sqrt{Hz}$$

$$e_{in_i} = \sqrt{2e_{n_i}^2 + 2e_{n_{rb}}^2} \approx \sqrt{2 \cdot 0.3825^2 + 2 \cdot 2.68^2} \approx 3.83 nV / \sqrt{Hz}$$

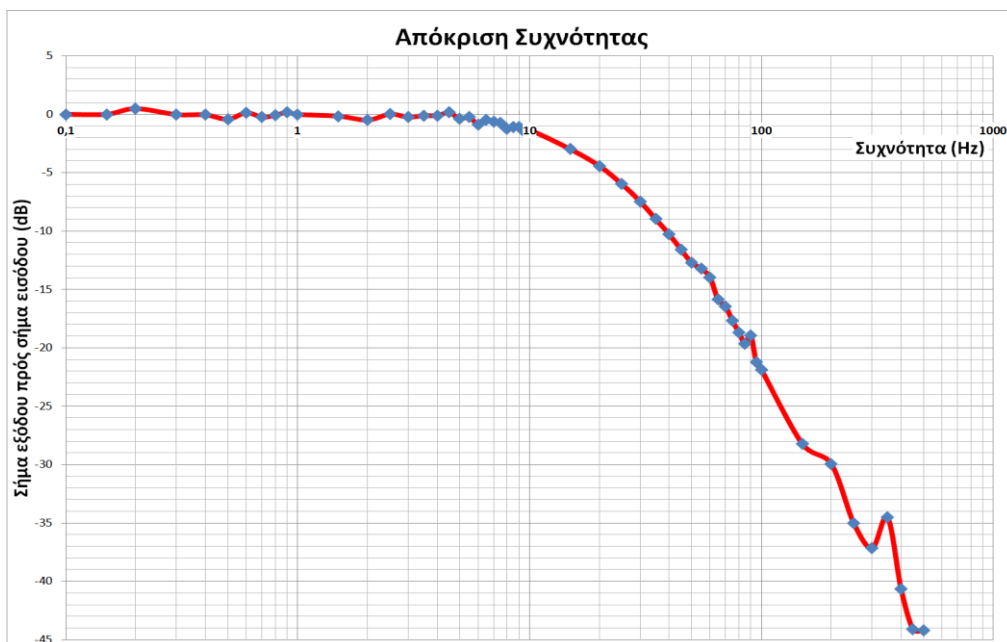
Η ανάλυση αυτή αφορά την γέφυρα χωρίς τα ηλεκτρονικά. Η ανάλυση που περιλαμβάνει όλα τα ηλεκτρονικά είναι πολύπλοκη, ενώ η ανάλυση θορύβου του ενισχυτή οργάνων είναι πιο απλή.



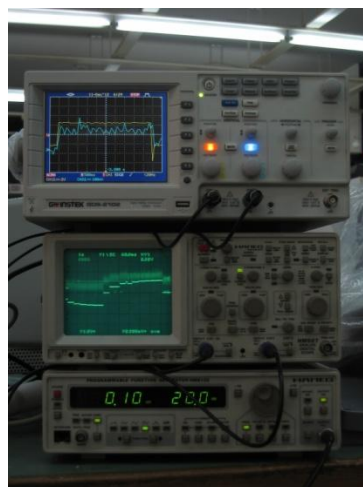
**Σχήμα 4.23:** Πειραματική μελέτη θορύβου αισθητήρα HMR2003. Στα (α) και (β) είναι η μετρήσεις ακριβός στην έξοδο του αισθητήρα ενώ στα (γ) και (δ) είναι μετά τον ενισχυτή AMP04. Επιπλέον στα (α) και (γ) το σήμα εξόδου σε Volt και στα (β) και (δ) η έξοδος κοινωνικοποιημένη σε dB.

### 4.3.2 Εύρεση της απόκρισης συχνότητας της διάταξης του αισθητήρα.

Οι αισθητήρες HMC1001 και HMC1002 που υπάρχουν πάνω στο HMC2003 έχουν συχνότητα αποκοπής τα 5MHz. Στην συνέχεια το σήμα που προκύπτει ενισχύεται από τους ενισχυτές οργάνων AMP04. Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη ενίσχυση επιλέγουμε σε ένα τελεστικό ενισχυτή τόσο περισσότερο μειώνεται το εύρος ζώνης του. Ο HMC2003 έχει επιλεγμένα τα κέρδη των τελεστικών έτσι ώστε να κάνει ενίσχυση 68 φορές, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα η νέα συχνότητα αποκοπής να είναι περίπου στα 2KHz. Η τοποθέτηση του αισθητήρα σε αλουμινένιο κουτί έχει επιπλέον μείωση της συχνότητας αποκοπής. Το αλουμινένιο κουτί λειτουργεί ως κλωβός Faraday και κατά συνέπεια ως βαθυπερατό φίλτρο στις μαγνητικές διαταραχές. Μετά από πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο η νέα συχνότητα αποκοπής είναι 13Hz.



Σχήμα 4.24: Γραφική παράσταση απόκριση σήματος διάταξης.



Σχήμα 4.25: Διάταξη εργαστηρίου μελέτης της συχνότητας απόκρισης της διάταξης του αισθητήρα.

## 4.4 Συσκευασία του αισθητήρα.

### 4.4.1 Κατασκευή.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής όπως προείπαμε είναι ο εντοπισμός πλοίου ειδικότερα σε κακές καιρικές συνθήκες. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία ανάπτυξης του αισθητήριου συστήματος, έτσι ώστε να είναι εύκολα τροποποιήσιμο σε μελλοντική έρευνα. Για το σκοπό έχουμε είδη περιγράψουμε μερικές διαδικασίες που υλοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την ταυτοποίηση του αισθητήρα.

Η συσκευασία του αισθητήρα δεν περιλαμβάνει μόνο το εξωτερικό περίβλημα αλλά λαμβάνει υπόψη και τα ηλεκτρονικά που χρειάζονται για την υλοποίηση ενός συστήματος τηλεμετρίας. Η επιλογή του εξωτερικού περιβλήματος καθορίζεται και από τα ηλεκτρονικά δηλαδή το μέγεθος τους και τις ανάγκες τους για ψύξη όπως επίσης από το περιβάλλον στο οποίο θα βρίσκεται η δομή αυτή. Αφού έχει γίνει ήδη η επιλογή των ηλεκτρονικών μας, μένει να μελετήσουμε την θήκη που θα είναι ο αισθητήρας μαζί με τα ηλεκτρονικά.

Υπήρχαν δυο σκέψεις για τις προδιαγραφές της θήκης του αισθητήρα. Η πρώτη σκέψη ήταν να υπάρχει δυνατότητα καταπόντισης του αισθητήρα στον πυθμένα του λιμανιού. Η δεύτερη σκέψη είναι αυτή της τοποθέτησης των αισθητήρων πάνω στις αποβάθρες.



Σχήμα 4.26: Η συσκευασία του αισθητήρα.

#### 4.4.2 Καταπόντιση αισθητήρα στο λιμάνι.

Η καταπόντιση του αισθητήρα στο λιμάνι αποτελεί δύσκολο εγχείρημα. Όχι μόνο το περίβλημα χρειάζεται και πρέπει να εγγραφεί την στεγανότητα του αισθητήρα αλλά συνάμα και την μη ολίσθηση της συσκευασίας στον πυθμένα. Η στεγανότητα του αισθητήρα στην περίπτωση αυτή απαιτεί την τοποθέτηση του σε κουτί που να συμμορφώνετε με τον κώδικα IP68. Ο πρώτος αριθμός δίνει την στεγανότητα σε σχέση με αντικείμενα, στην περίπτωση μας ο αριθμός 6 υποδηλώνει πλήρη προστασία από την σκόνη. Ο δεύτερος αριθμός υποδηλώνει την στεγανότητα σε σχέση με το νερό. Ο αριθμός 8 υποδηλώνει βύθιση του κουτιού σε βάθος μεγαλύτερο του 1m χωρίς διείσδυση του νερού εντός του κυτίου. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται οι κώδικες για το πρότυπο IP (International Protection Rating).

<b>Πίνακας επεξήγησης πρώτου αριθμού στο κώδικα IP.</b>		
<b>Επίπεδο</b>	<b>Μέγεθος αντικειμένου</b>	<b>Αποτελεσματικότητα</b>
0	-	Καμία προστασία στην διείσδυση των αντικειμένων.
1	>50mm	Προστασία από μεγάλα αντικείμενα όπως μεγάλες επιφάνειες του σώματος.
2	>12.5mm	Προστασία από δάκτυλα και όμοια αντικείμενα.
3	>2.5mm	Προστασία από εργαλεία και μεγάλα καλώδια.
4	>1mm	Προστασία από τα περισσότερα καλώδια και βίδες.
5	Προστασία από σκόνη.	Δεν υπάρχει πλήρη προστασία από την διείσδυση σκόνης. Πλήρη προστασία κατά την επαφή.
6	Στεγανότητα από σκόνη.	Δεν υπάρχει διείσδυση της σκόνης, Πλήρη προστασία κατά την επαφή.

Πίνακας (4.1): Εξήγησης πρώτου αριθμού στο κώδικα IP.

<b>Πίνακας επεξήγησης δεύτερου αριθμού στο κώδικα IP.</b>		
<b>Επίπεδο</b>	<b>Προστασία σε</b>	<b>Αποτελεσματικότητα σε</b>
0	Καμία.	Καμία προστασία στο νερό.
1	Νερό που στάζει.	Νερό που στάζει κάθετα.
2	Νερό που στάζει με γωνία έως και 15°.	Νερό που στάζει κατακόρυφα και το περίβλημα έχει κλίση έως ±15° από την κανονική του θέση.
3	Ψεκασμό νερού	Νερό που πέφτει ως ψεκασμός σε οποιαδήποτε γωνία έως ±60° από την κατακόρυφο.
4	Πιτσίλισμα από νερό.	Νερό εκτοξεύεται εναντίον του περιβλήματος από οποιαδήποτε κατεύθυνση.
5	Πίδακες νερού.	Νερό εκτοξεύονται από ένα ακροφύσιο

		(6,3 mm) ενάντια του περιβλήματος από οποιαδήποτε κατεύθυνση.
6	Ισχυρούς πίδακες νερού.	Νερό εκτοξεύονται από ακροφύσιο (12,5 mm) υπό μορφή ισχυρών πιδάκων κατά του περιβλήματος από οποιαδήποτε κατεύθυνση.
7	Βύθιση έως 1m.	Εισροή νερού σε επιβλαβείς ποσότητες δεν θα είναι δυνατή όταν το περίβλημα είναι βυθισμένο στο νερό κάτω από καθορισμένες συνθήκες πίεσης και χρονικής διάρκειας (μέχρι 1 m από βύθιση).
8	Βύθιση πέραν του 1m.	Συνεχή εμβάπτιση σε νερό από συνθήκες που καθορίζονται από τον κατασκευαστή.

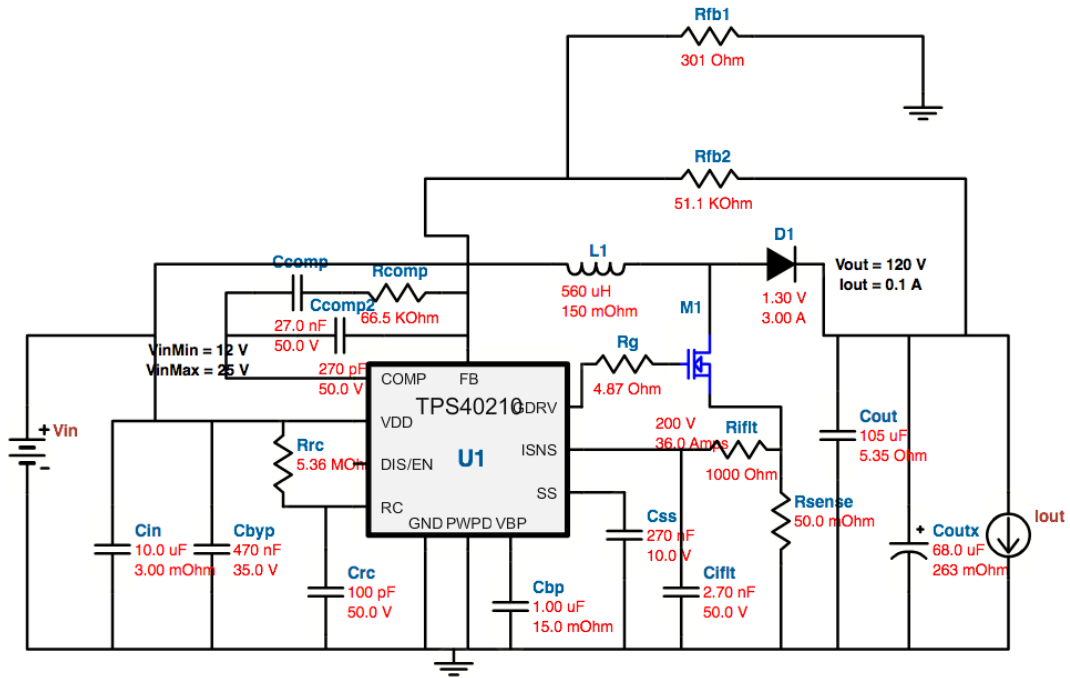
Πίνακας (4.2): Εξήγησης δεύτερου αριθμού στο κώδικα IP.

Η καταπόντιση του κουτιού στο πυθμένα του λιμανιού θέτει και ένα άλλο ζήτημα. Οι αισθητήρες χρειάζονται τροφοδοσία. Η τροφοδοσία μέσω μπαταριών καθίσταται ασύμφορη γιατί αυτές θα χρειάζονται φόρτιση και η αλλαγή τους δεν μπορεί να γίνει μέσα στο νερό. Δεν απορρίπτουμε την ύπαρξη μπαταριών στους αισθητήρες αλλά η φόρτισή τους θα πρέπει να γίνεται χωρίς την εξαγωγή της μπαταρίας. Μίας και ο αισθητήρας μας επικοινωνεί με χρήση χάλκινων καλωδίων θα μπορούσαμε να εξετάσουμε την περίπτωση να υπάρχουν περισσότερα σύρματα μέσα στο ίδιο καλώδιο, τα οποία δεν χρησιμοποιούνται. Στα σύρματα αυτά θα μπορούσαμε να βάλουμε ένα μεγαλύτερο δυναμικό τάσης από αυτό που χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα, για παράδειγμα 120V αν το επιτρέπουν οι μονώσεις. Με τον τρόπο αυτό θα ξεπεράσουμε δυσκολίες όπως η πτώση τάσης και η θέρμανση του καλωδίου λόγω του ρεύματος. Στην συνέχεια μέσα στο κουτί θα πρέπει να υπάρχει κύκλωμα που θα κατεβάζει την τάση στα επίπεδα λειτουργίας του αισθητήρα και της τάσης φόρτισης της μπαταρίας. Παρόλο που το σύστημα επικοινωνίας υποστηρίζει μέχρι και 1200 μέτρα με ένα περιστρεμμένο ζεύγος καλωδίων με το ίδιο καλώδιο η πτώση τάσης εξακολουθεί να είναι υψηλή. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή του καλωδίου είναι σημαντική στο να αποτρέψει πτώσεις τάσης. Στο σχήμα (4.27) βλέπουμε ένα κύκλωμα ανύψωσης τάσης και στο σχήμα (4.28) ένα κύκλωμα υποβιβασμού τάσης.

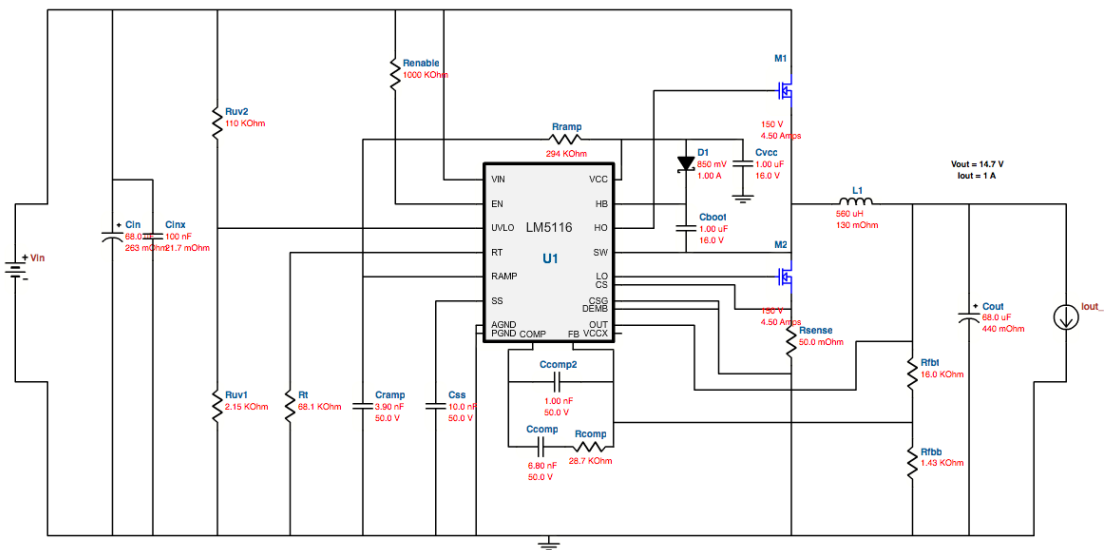
Ένα άλλο πρόβλημα που συναντάμε στη περίπτωση καταπόντισης είναι ο τρόπος σύνδεσης του καλωδίου.

- Ένας τρόπος είναι η χρήση του σωστού τύπου στυπιοθλύπη ο οποίος στεγανοποιεί την είσοδο του καλωδίου στο κουτί. Οι συνδέσεις των συρμάτων του καλωδίου γίνονται στο εσωτερικό του κουτιού.

- Ένας άλλος τρόπος σύνδεσης του καλωδίου είναι με χρήση βύσματος. Υπάρχουν ειδικά αδιάβροχα βύσματα για υποβρύχιες συνδέσεις. Αυτή η λύση υπερτερεί σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο για το λόγο ότι η καταπόντιση του καλωδίου μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από τα κουτιά. Στην περίπτωση αυτή η αφαίρεση ενός κουτιού δεν συνεπάγεται την έξοδο του καλωδίου από την θάλασσα.



Σχήμα 4.27: Κύκλωμα ανόψωσης τάσης. Σχεδιασμός μέσω του προγράμματος WEBENCH της Texas Instruments.



Σχήμα 4.28: Κύκλωμα ανόψωσης τάσης. Σχεδιασμός μέσω του προγράμματος WEBENCH της Texas Instruments.

#### **4.4.3 Τοποθέτησης των αισθητήρων στις προβλήτες του λιμανιού.**

Η τοποθέτηση των αισθητήρων στις προβλήτες του λιμανιού επιλύει πολλές δυσκολίες που είχε η προηγούμενη μέθοδος. Λόγω του ότι η διάταξη βρίσκεται ακόμα υπό ανάπτυξη και χρειάζεται συχνή λήψη και τροποποιήσεις των αισθητήρων καλό είναι να μην είναι μέσα στο νερό ώστε να υπάρχει άμεση πρόσβαση. Στην περίπτωση που οι αισθητήρες είναι έξω από το νερό η πρόσβαση είναι ταχύτερη και ευκολότερη. Επιπλέον το κόστος για εξειδικευμένα καλώδια, κουτιά και βύσματα εξαλείφεται. Μειονέκτημα αποτελεί ο αναγκαίος συμβιβασμός σε ότι αφορά την απόδοση της διάταξης. Τελικά έγινε αυτή η επιλογή παρά τη μείωση στην ανάλυση λόγω της απόστασης από τα σκάφη. Έγινε επιλογή κουτιών που δεν ήταν συμβατά με βύθιση αλλά μονωμένα καλά από σκόνη και σε πίδακες νερού. Το καλώδιο που επιλέγηκε για χρήση στην επικοινωνία είναι καλώδιο τηλεφωνικό για εξωτερική χρήση. Το τηλεφωνικό καλώδιο του τύπου αυτού περιέχει θωράκιση αγωγούς του τόσο ηλεκτρομαγνητική όσο και μηχανική.

#### **4.4.4 Τροφοδοσία.**

Η τροφοδοσία στον κάθε αισθητήρα μαζί με την κάρτα δειγματοληψίας του γίνεται από μία μπαταρία μολύβδου τάσης 12V και χωρητικότητας 7Ah. Η χρήση μπαταριών του τύπου αυτού προσφέρουν αξιοπιστία και αντοχή αλλά συνάμα χαμηλό κόστος. Η μπαταρία που επιλέχθηκε μπορεί να παρέχει μία αυτονομία του συστήματος περίπου 43 ώρες. Η αυτονομία αυτή πέφτει στις 20 ώρες όταν γίνεται χρήση των συστημάτων για διόρθωση της απόκλισης τάσης και είναι υπεραρκετή για την διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων. Η χρήση της μεθόδου ανύψωση τάσης από την πηγή – κέντρο ελέγχου και στην συνέχεια ο υποβιβασμός της τάσης στα επίπεδα λειτουργίας του αισθητήρα δεν χρησιμοποιήθηκε. Παρόλο που δεν έγινε χρήση της τεχνικής αυτής παραμένει στην δυνατότητες μας για επόμενη εφαρμογή. Η χρήση των μπαταριών προσθέτει επίσης βάρος στην κατασκευή και την κάνει πιο στιβαρή. Επιπλέον πλεονέκτημα των μπαταριών σε σχέση με τις μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται ευρεία είναι η αντοχή τους στην θερμοκρασία. Οι μπαταρίες λιθίου είναι ασταθείς για θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 60°C με επιπλέον κίνδυνο ανάφλεξης σε βαθιές εκφορτίσεις και φορτίσεις. Άρα στην περίπτωση χρήσης μπαταριών λιθίου θα απαιτούνταν και άλλα ηλεκτρονικά για τον έλεγχο τουλάχιστο της εκφόρτισης. Έτσι η επιλογή των μπαταριών μολύβδου είναι μονόδρομος.





## 5 Πειραματικό Μέρος και Μετρήσεις.

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε μία σειρά από πειράματα και τις μετρήσεις που επήραμε από αυτά. Εκτός από τα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο για ταυτοποίηση του αισθητήρα τα είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο έγιναν και μερικά άλλα πειράματα σχετικά με:

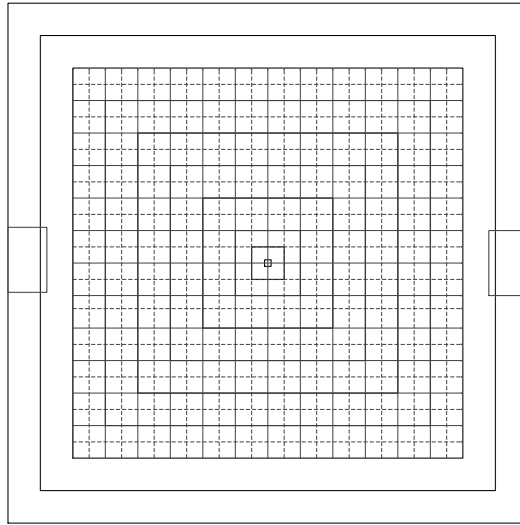
- α) τον εντοπισμό της θέσης του μαγνήτη σε ένα πλέγμα.
- β) τον εντοπισμό αυτοκινήτου.
- γ) τον εντοπισμό φουσκωτού σκάφους στο λιμάνι.

Τα πειράματα αυτά μας έδωσαν την καταλληλότητα του αισθητήρα αυτού στις περιπτώσεις αυτές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα πειράματα αυτά.

## 5.1 Εντοπισμός της θέσης του μαγνήτη σε πλέγμα.

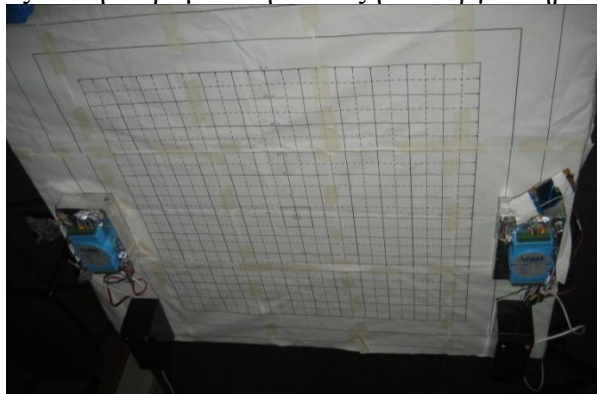
Στο πείραμα αυτό είχαμε ένα μαγνήτη νεοδυμίου διαστάσεων 5mmx 5mmx 5mm, τον οποίο κινούσαμε σε ένα πλέγμα 5cmx 5cm. Το συνολικό μέγεθος του πλέγματος ήταν 70cmx70cm. Μετακινούσαμε το μαγνήτη στις διάφορες θέσεις του πλέγματος με προσανατολισμούς  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ . Τα δεδομένα αυτά καταγράφονταν σε πίνακες. Σκοπός του πειράματος ήταν να μελετήσουμε τη δυνατότητα εντοπισμού της θέσης του μαγνήτη στο πλέγμα αυτό.

Στο σχήμα (5.1) φαίνεται αυτό το πλέγμα. Παρατηρούμε ότι τοποθετήσαμε τους δύο αισθητήρες έτσι ώστε να έχουν συνευθειακό τον άξονα y.



Σχήμα 5.1: Πλέγμα για μετρήσεις με μόνιμο μαγνήτη.

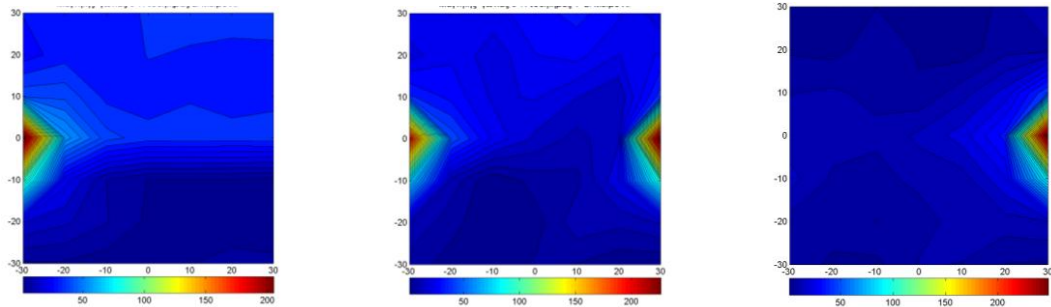
Ένα από τα προβλήματα που έπρεπε να επιλύσουμε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ήταν η αποφυγή παρουσίας άλλων ferromagnetic υλικών σε απόσταση αρκετών μέτρων από τη διάταξη. Παρά τις όποιες προσπάθειες που έγιναν, δεν κατέστη δυνατό να βρούμε έναν τέτοιο χώρο. Έτσι, το πείραμα έγινε στο χώρο του εργαστηρίου σε ένα ξύλινο πάγκο από τον οποίο αφαιρέσαμε τα συρτάρια, για να μειώσουμε την επίδραση από τα υλικά που υπήρχαν σε αυτά. Ως εκ τούτου τα καλώδια τροφοδοσίας του κτηρίου, ο οπλισμός του σκυροδέματος και η ύπαρξη άλλων μεταλλικών σωλήνων αγνοήθηκαν, καθότι μιας και μια μελέτη που θα τα περιελάμβανε και αυτά θα ήταν πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί. Στο σχήμα () που ακολουθεί παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη στο εργαστήριο.



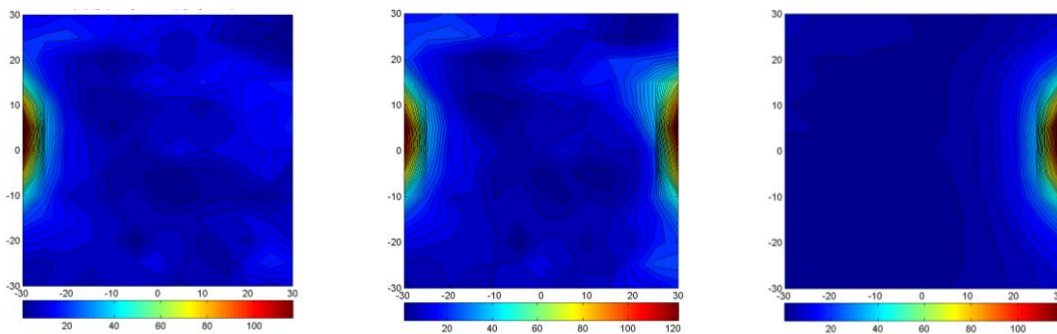
Σχήμα 5.2: Φωτογραφία από το εργαστήριο.

### 5.1.1 Μετρήσεις – Αποτελέσματα:

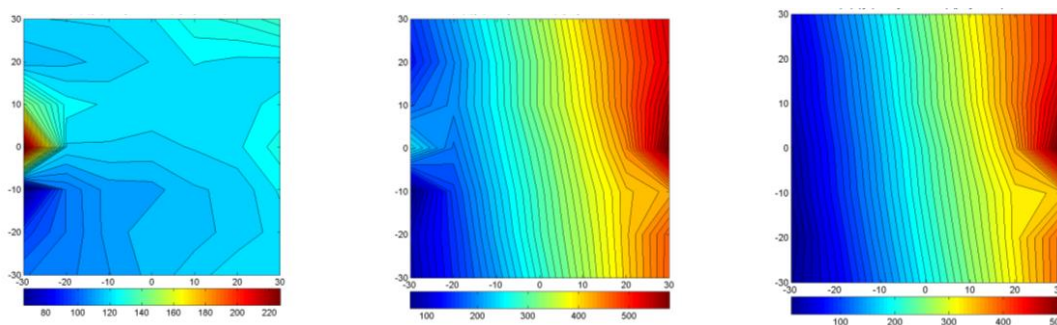
Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων αυτών παρατίθενται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα. Τα πρώτα τρία διαγράμματα στα σχήματα (5.3, 5.4, 5.5) παρουσιάζουν το μέτρο του πεδίου, αρχικά όπως το βλέπει ο αριστερός αισθητήρας, δεύτερον όπως το βλέπουν και οι δύο μαζί και τρίτον όπως το βλέπει ο δεξιός αισθητήρας.



Σχήμα 5.3: Μέτρο του πεδίου από το μετρούμενο πεδίο. Ο μαγνήτης γωνία  $0^\circ$  και βήμα 10cm. Αριστερά, το μέτρο που μετρήθηκε από τον αριστερό αισθητήρα, στο κέντρο το άθροισμα των δύο και δεξιά το μέτρο από τον δεξιό αισθητήρα.

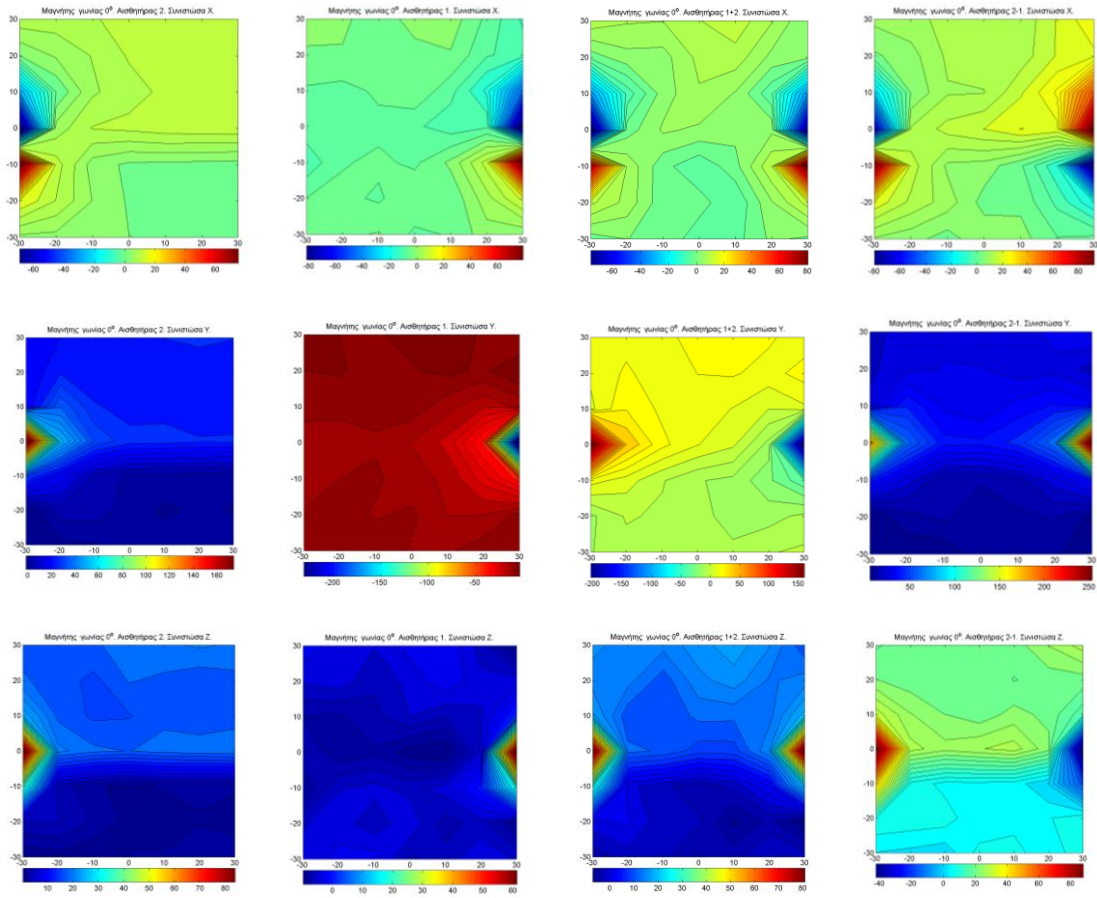


Σχήμα 5.4: Μέτρο του πεδίου από το μετρούμενο πεδίο. Ο μαγνήτης γωνία  $0^\circ$  και βήμα 5cm. Αριστερά, το μέτρο που μετρήθηκε από τον αριστερό αισθητήρα, στο κέντρο το άθροισμα των δύο και δεξιά το μέτρο από τον δεξιό αισθητήρα.

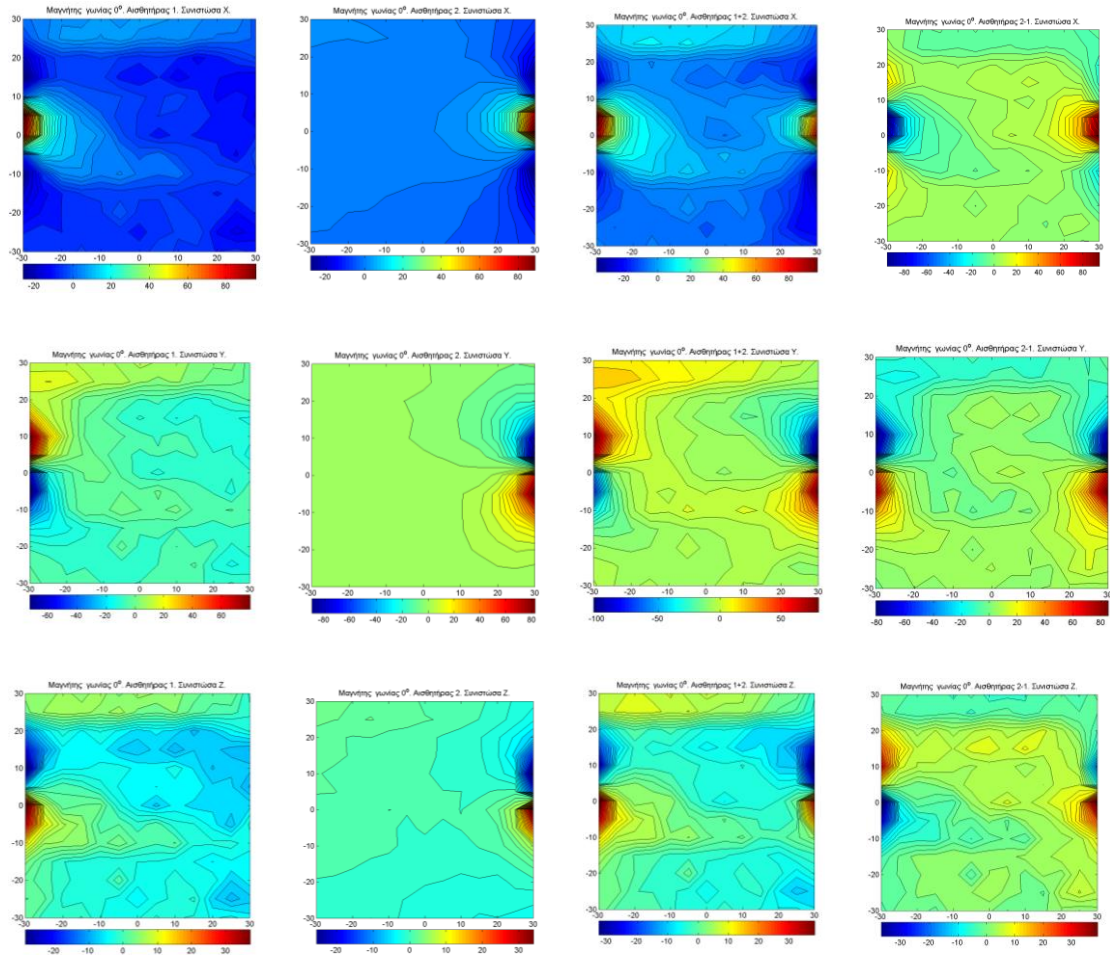


Σχήμα 5.5: Μέτρο του πεδίου από το μετρούμενο πεδίο. Ο μαγνήτης γωνία  $90^\circ$  και βήμα 10cm. Αριστερά, το μέτρο που μετρήθηκε από τον αριστερό αισθητήρα, στο κέντρο το άθροισμα των δύο και δεξιά το μέτρο από τον δεξιό αισθητήρα.

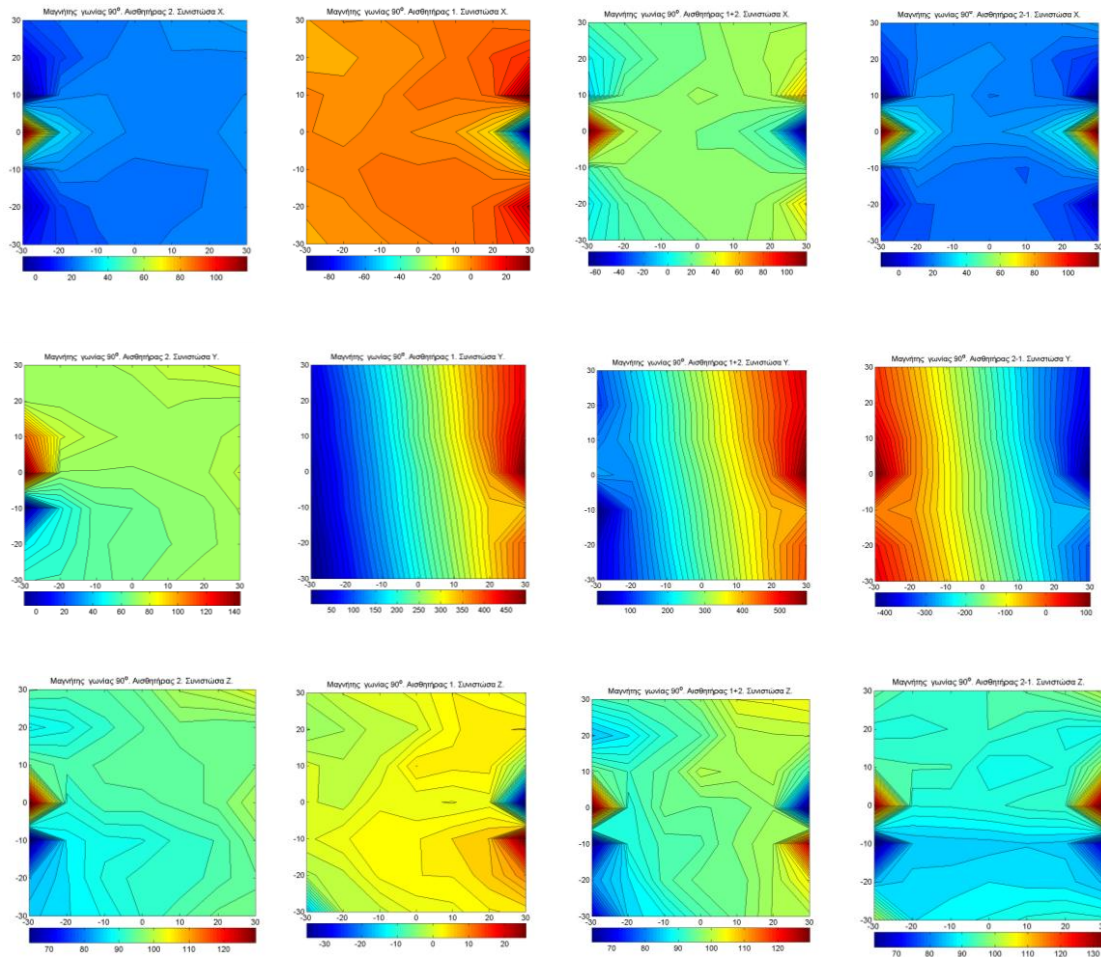
Στη συνέχεια ακολουθούν αντίστοιχα διαγράμματα για τις  $x, y, z$  συνιστώσες του πεδίου, όπως επίσης και για τις  $x_1+x_2, y_1+y_2, z_1+z_2, x_2-x_1, y_2-y_1$  και  $z_2-z_1$ .



Σχήμα 5.6: Μετρήσεις με βήμα 10cm και γωνία μαγνήτη  $0^\circ$ .



Σχήμα 5.7: Μετρήσεις με βήμα 5cm και γωνία μαγνήτη 0°.



Σχήμα 5.8: Μετρήσεις με βήμα 10cm και γωνία μαγνήτη 90°.

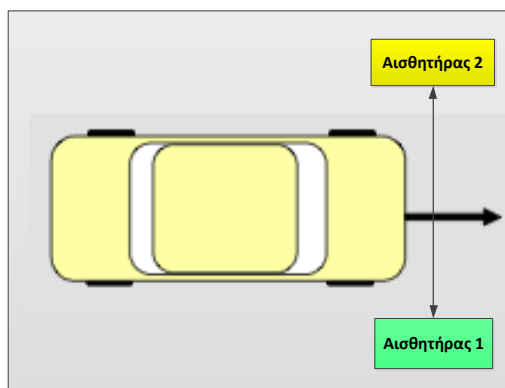
Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιώντας πυκνότερο πλέγμα στην καταγραφή των αποτελεσμάτων έχουμε καλύτερη και πιο αξιόπιστη χαρτογράφηση του πεδίου που δημιουργεί ο μαγνήτης όταν τοποθετείται σε διάφορες θέσεις. Το πυκνότερο πλέγμα διευκολύνει την ανίχνευση και αναγνώριση των διαταραχών του γύρω πεδίου με λεπτομερέστερα βήματα ανάγνωσης. Παρατηρούμε ότι η παρουσία μαγνήτη διαταράσσει το πεδίο και ο συνδυασμός της μαγνητικής απόκρισης από τους δύο αισθητήρες παρουσιάζει την υπέρθεση των πεδίων που ανιχνεύουν ξεχωριστά.

## 5.2 Μετρήσεις με αυτοκίνητο.

Η μέτρηση της ταχύτητας και θέσης οχήματος είναι ένα ενδιαφέρον αντικείμενο προς έρευνα. Παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν εγκαταστάσεις διόδων κυκλοφορίας, χώρων στάθμευσης και άλλων σημείων στα οποία χρειάζεται συστηματικός έλεγχος. Σε αυτό το πειραματικό μέρος δοκιμάσαμε να δούμε την απόδοση ενός συστήματος με δύο αισθητήρες. Σχεδιάστηκαν δυο πειράματα. Στο πρώτο πείραμα είχαμε δύο αισθητήρες στην ίδια ευθεία με το αυτοκίνητο να κινείται ανάμεσά τους. Το δεύτερο πείραμα ήταν όμοιο με το πρώτο, με τη διαφορά ότι το αυτοκίνητο παράλληλα στην ευθεία των δύο αισθητήρων. Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν να δούμε την απόδοση του αισθητήρα αυτού σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Μία αποτυχία μέτρησης του αυτοκινήτου σε κοντινή απόσταση θα έθετε σε αμφισβήτηση τη δυνατότητα μέτρησης μικρών καϊκιών και την έγκαιρη αναγνώριση πλοίων.

### 5.2.1 Πρώτο Πείραμα.

Στο πείραμα αυτό τοποθετήσαμε τις δυο διατάξεις με τους AMR αισθητήρες, έτσι ώστε οι  $y$  άξονές τους να είναι συνευθειακοί. Στη συνέχεια το κινούμενο όχημα περνούσε μεταξύ των δύο αισθητήρων. Από τις εξόδους των δύο αισθητήρων, εκτός από τις συνιστώσες που μετρούσαμε, βλέπαμε και τη διαφορά των συνιστωσών  $x_1-x_2$ ,  $y_1-y_2$ ,  $z_1-z_2$ . Το πείραμα αυτό αποσκοπούσε στον εντοπισμό της ύπαρξης οχήματος στην περιοχή του αισθητήρα. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει οι αισθητήρες να είναι επακριβώς βαθμονομημένοι και να έχουν μηδενιστεί οι τάσεις απόκλισης για κάθε συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Ο μηδενισμός αποσκοπεί στο να δίνει μηδενική έξοδο όταν δεν υπάρχει όχημα στην περιοχή. Φυσικά, οτιδήποτε το φερρομαγνητικό θα προκαλούσε απόκλιση από το μηδενισμό, αλλά στην περίπτωση μας ενδιαφέρουν τα οχήματα. Αυτά θα έχουν πολύ μεγαλύτερο μαγνητικό αποτύπωμα από άλλα αντικείμενα. Επιπλέον οι μεταβολές της θερμοκρασίας και του μαγνητικού πεδίου πρέπει να εξαλείφονται. Όταν αφαιρούμε τις συνιστώσες των 2 αισθητήρων, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου εξόδου από αυτούς τους δύο παράγοντες. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη αυτή.



Σχήμα 5.9: Διάταξη μέτρησης οχημάτων με δύο αισθητήρες και κίνηση των οχημάτων ανάμεσά τους.

Το πείραμα αυτό διεξήχθη σε χώρο στάθμευσης του Πολυτεχνείου. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η περιοχή αυτή.

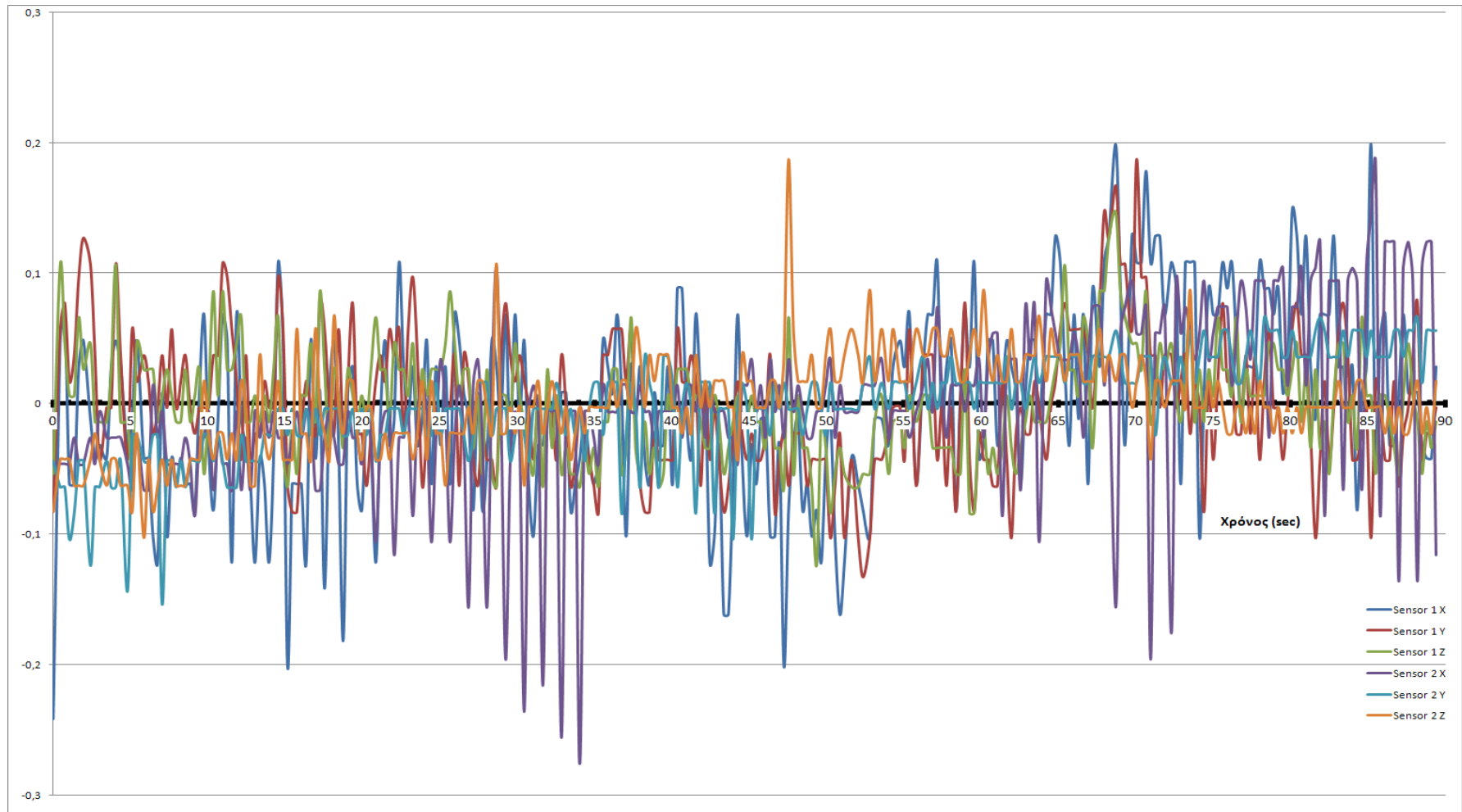


Σχήμα 5.10: Φωτογραφία της διάταξης στο χώρο στάθμευσης του Πολυτεχνείου.

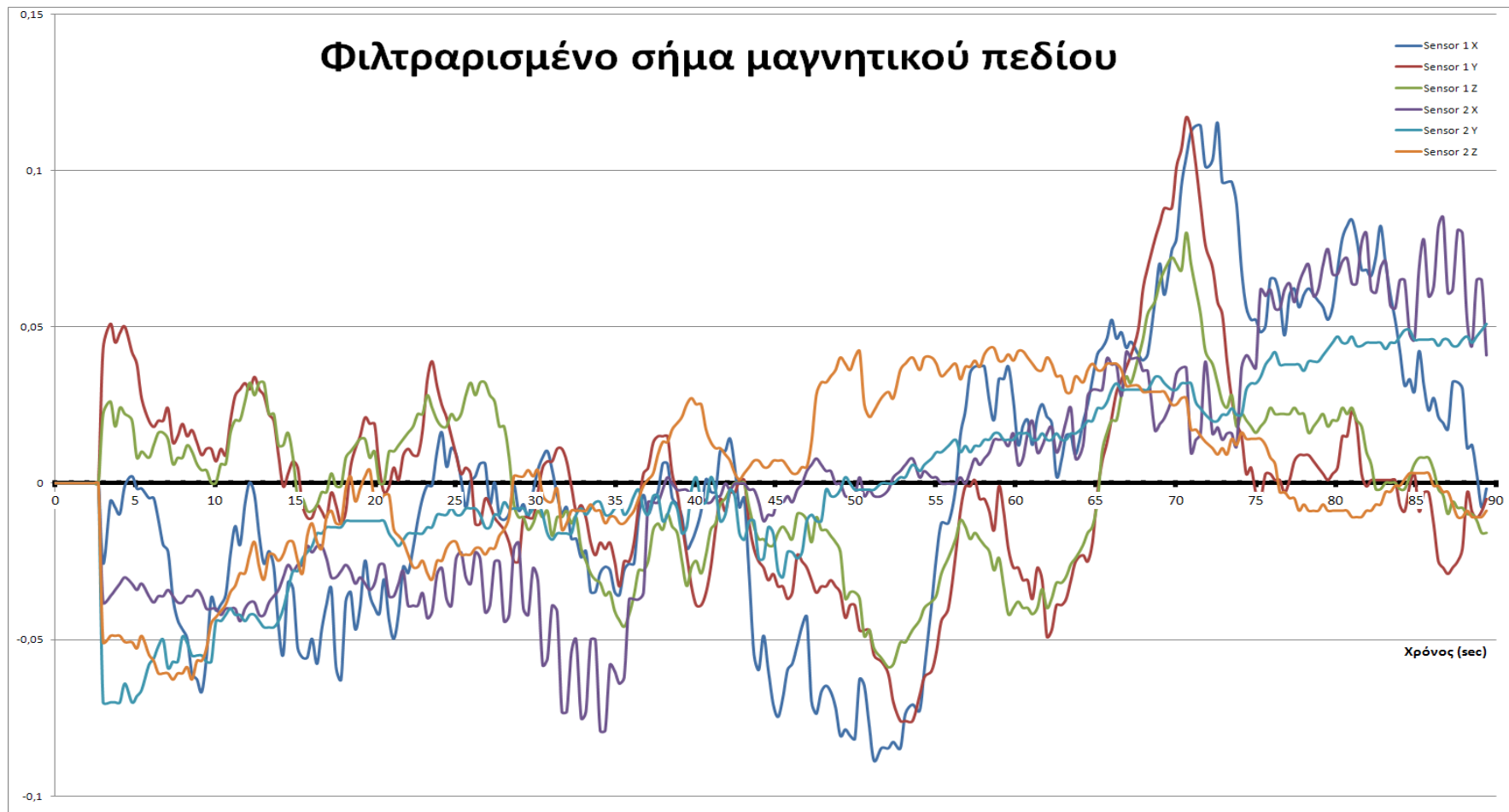
#### **5.2.1.1 Μετρήσεις – Αποτελέσματα.**

Στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις βλέπουμε τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που πήραμε.

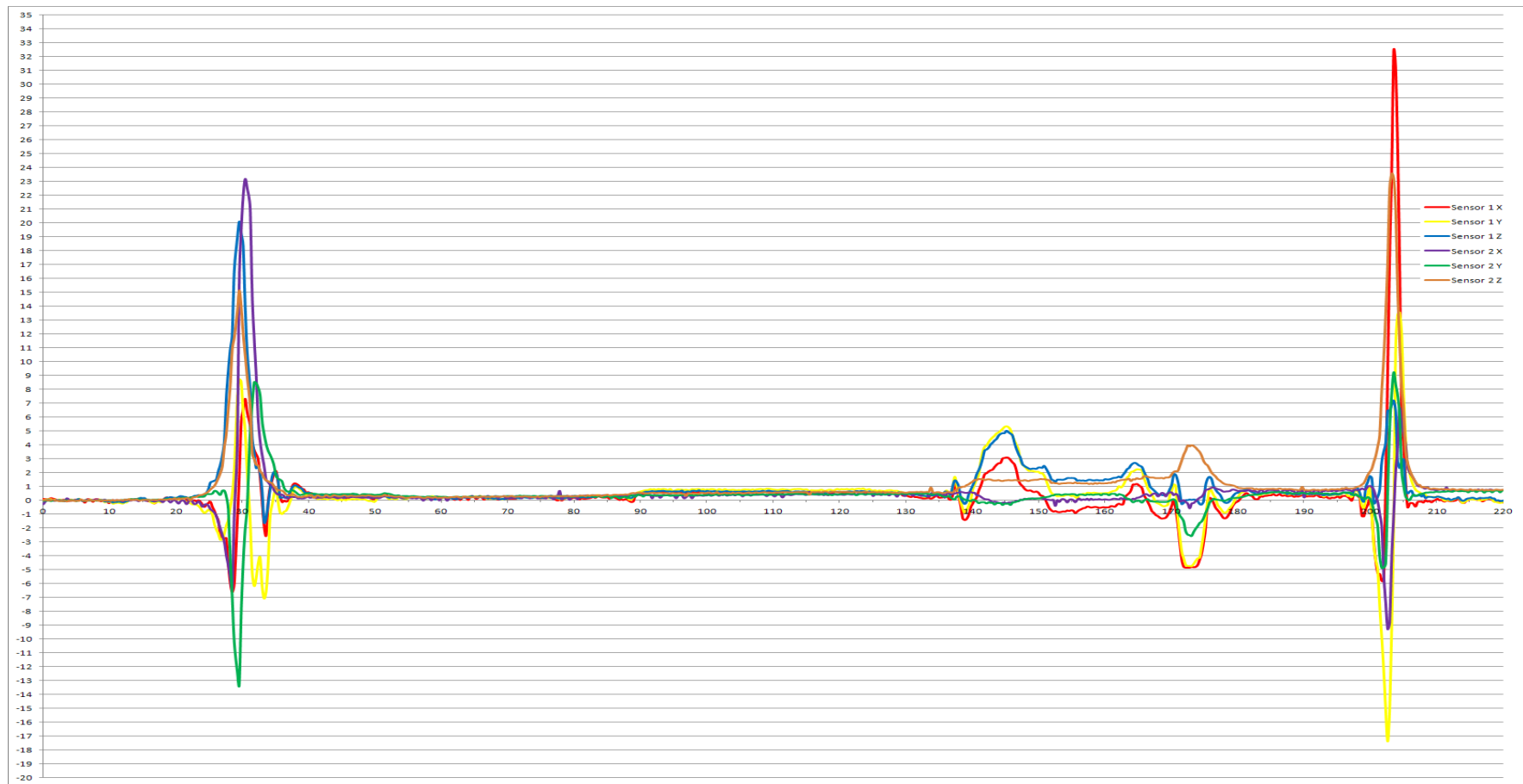




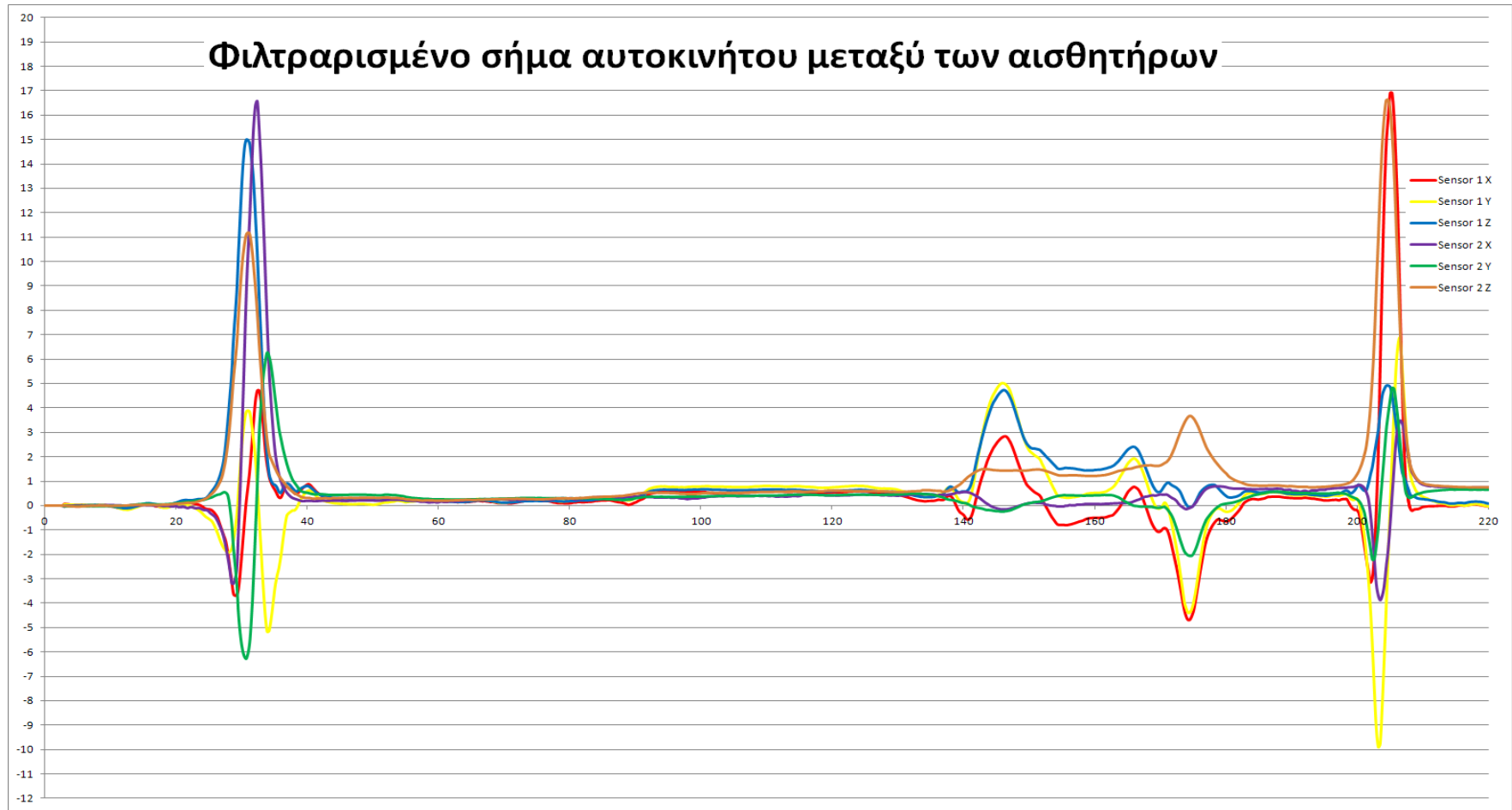
Σχήμα 5.11: Σήμα της διαταραχής του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή μέτρησης.



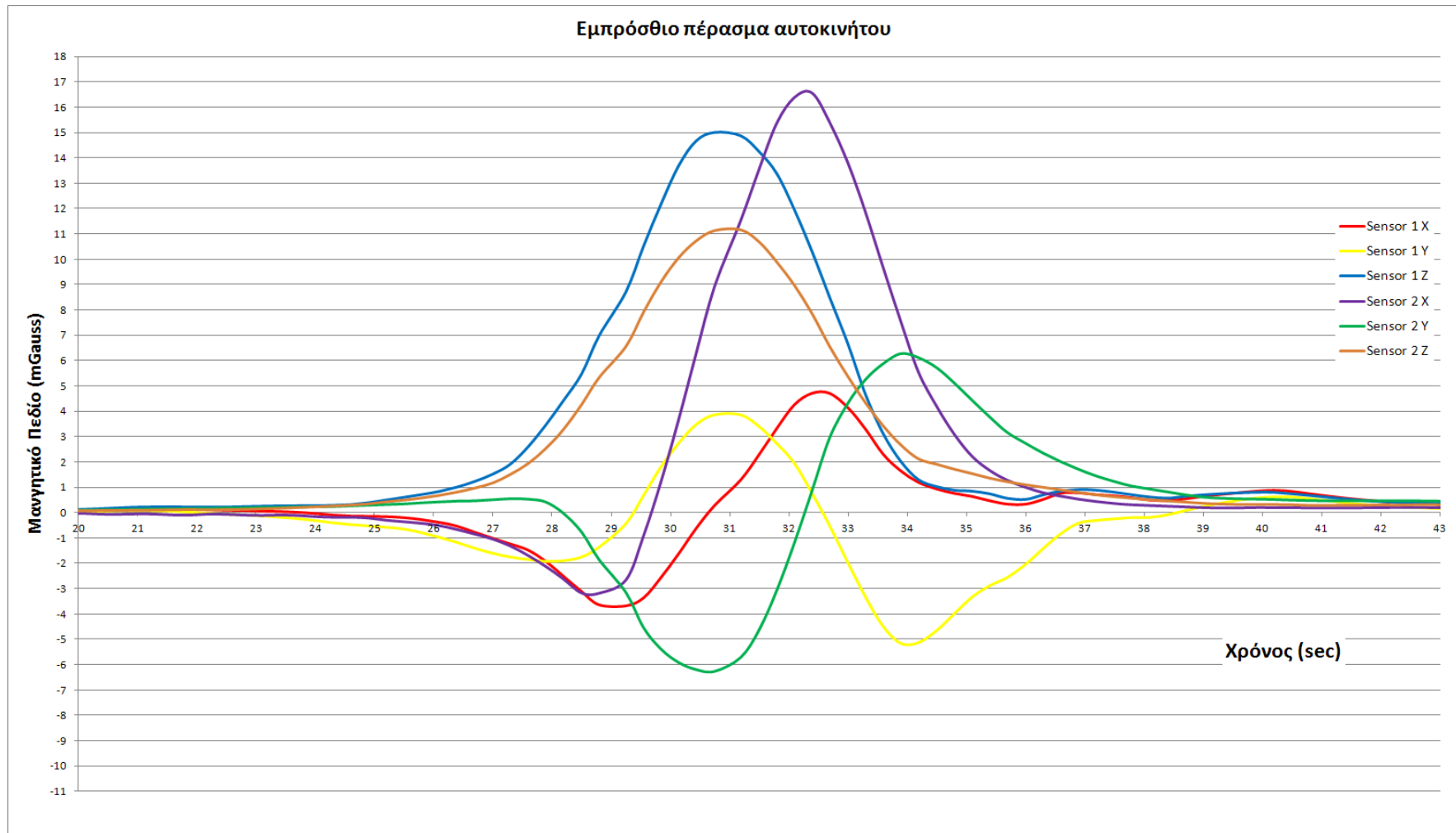
Σχήμα 5.12: Φιλτραρισμένο σήμα με τη μέθοδο μέσης τιμής 10 σημείων της διαταραχής του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή μέτρησης.



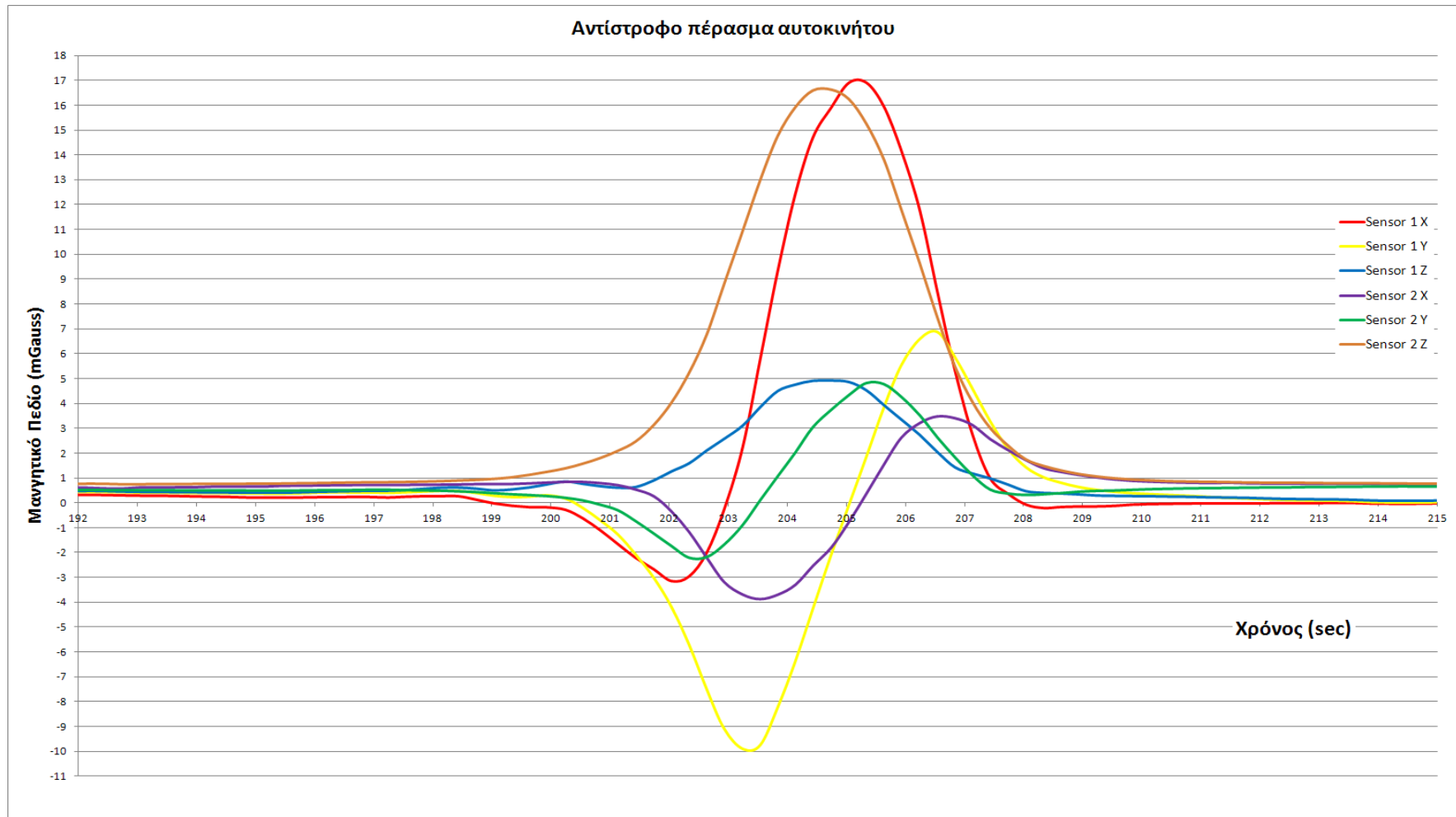
Σχήμα 5.13: Αφιλτράριστο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου.



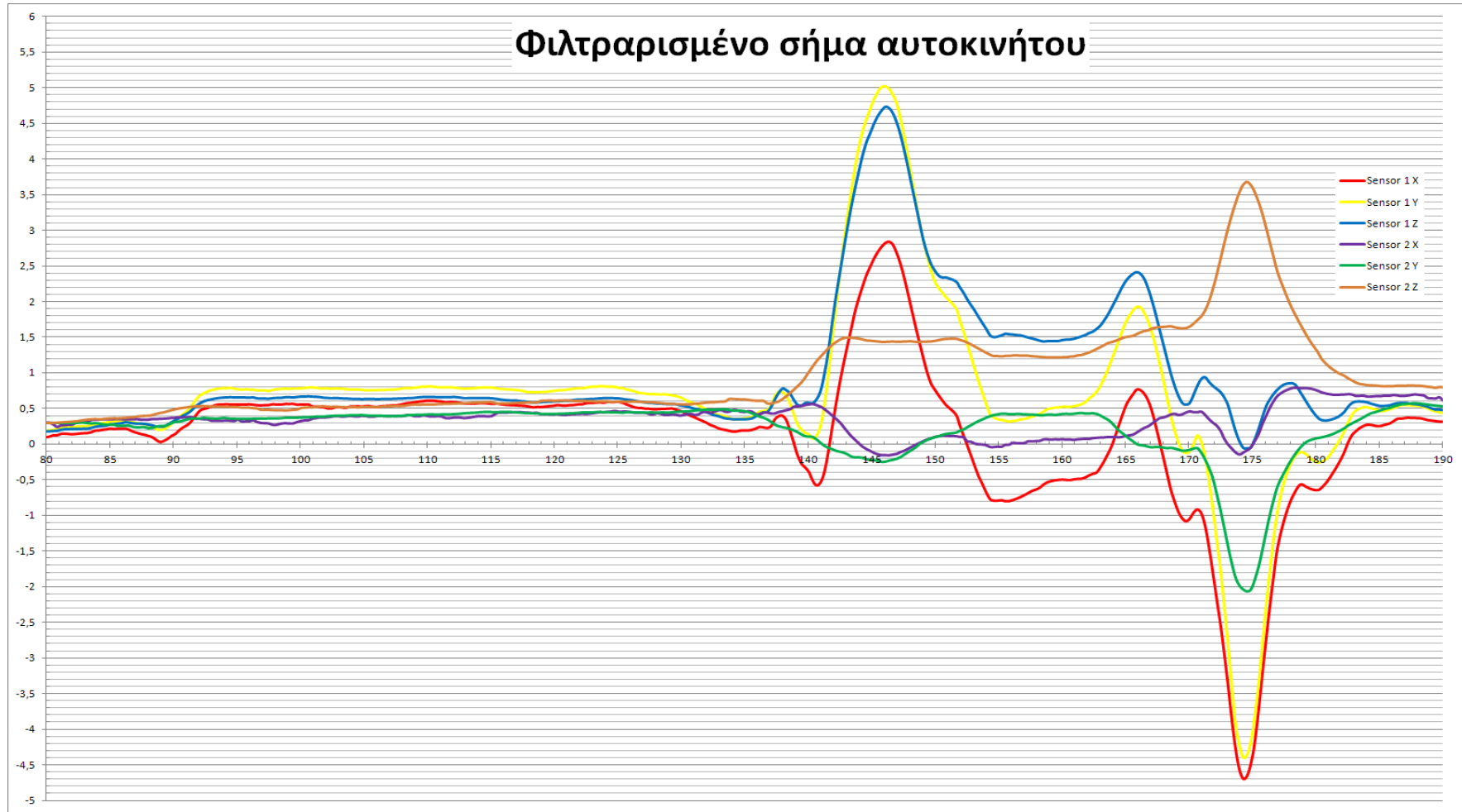
Σχήμα 5.14: Φιλτραρισμένο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου.



Σχήμα 5.15: Φιλτραρισμένο σήμα από εμπρόσθιο πέρασμα του αυτοκινήτου.



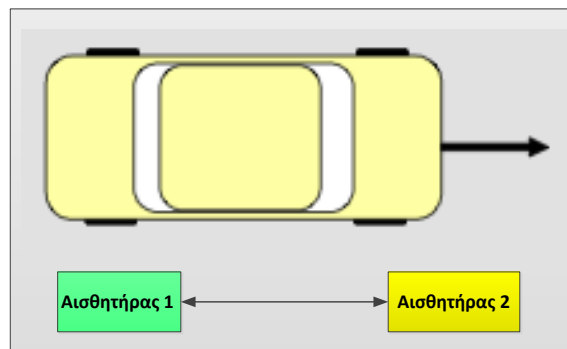
Σχήμα 5.16: Φιλτραρισμένο σήμα από αντίστροφο πέρασμα του αυτοκινήτου.



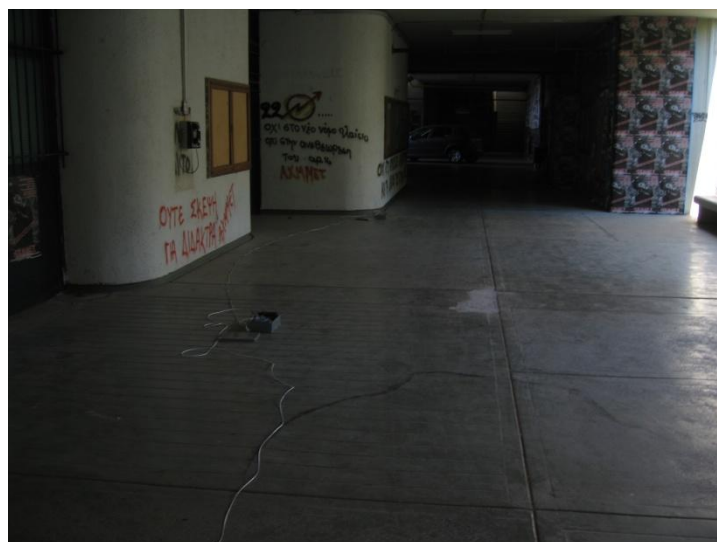
Σχήμα 5.17: Φιλτραρισμένο σήμα από περιστροφή του αυτοκινήτου.

### 5.2.2 Δεύτερο Πείραμα.

Σκοπός του δεύτερου πειράματος ήταν να μελετήσουμε την απόδοση που έχει η νέα διάταξη των αισθητήρων, έτσι ώστε να μετρά τη θέση, την ταχύτητα και τη διεύθυνση κίνησης του οχήματος. Όσον αφορά την απόσταση, την ταχύτητα και τη διεύθυνση του οχήματος οι παρατηρήσεις έγιναν οπτικά χωρίς κανένα καταγραφικό μέσο. Χρησιμοποιήσαμε δύο αισθητήρες AMR. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετήθηκαν έτσι ώστε οι x άξονες τους να είναι συνευθειακοί και προς την ίδια κατεύθυνση. Στη συνέχεια το όχημα κινείται προς τη x διεύθυνση. Έτσι, μέσω της προπορίας ή καθυστέρησης φάσης μεταξύ των δυο αισθητήρων θα ξέρουμε τη φορά κίνησης. Το μέτρο και η διαφορά φάσης μπορεί να μας δώσουν την ταχύτητα, αφού πρώτα γνωρίζουμε με ακρίβεια την απόσταση που βρίσκονται οι δύο αισθητήρες. Στη συνέχεια υπολογίζουμε από τη στιγμιαία διαφορά πλάτους των αισθητήρων την απόσταση στην οποία βρίσκεται το υπό μελέτη όχημα. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη.



Σχήμα 5.18: Διάταξη δεύτερου πειράματος αυτοκινήτου.



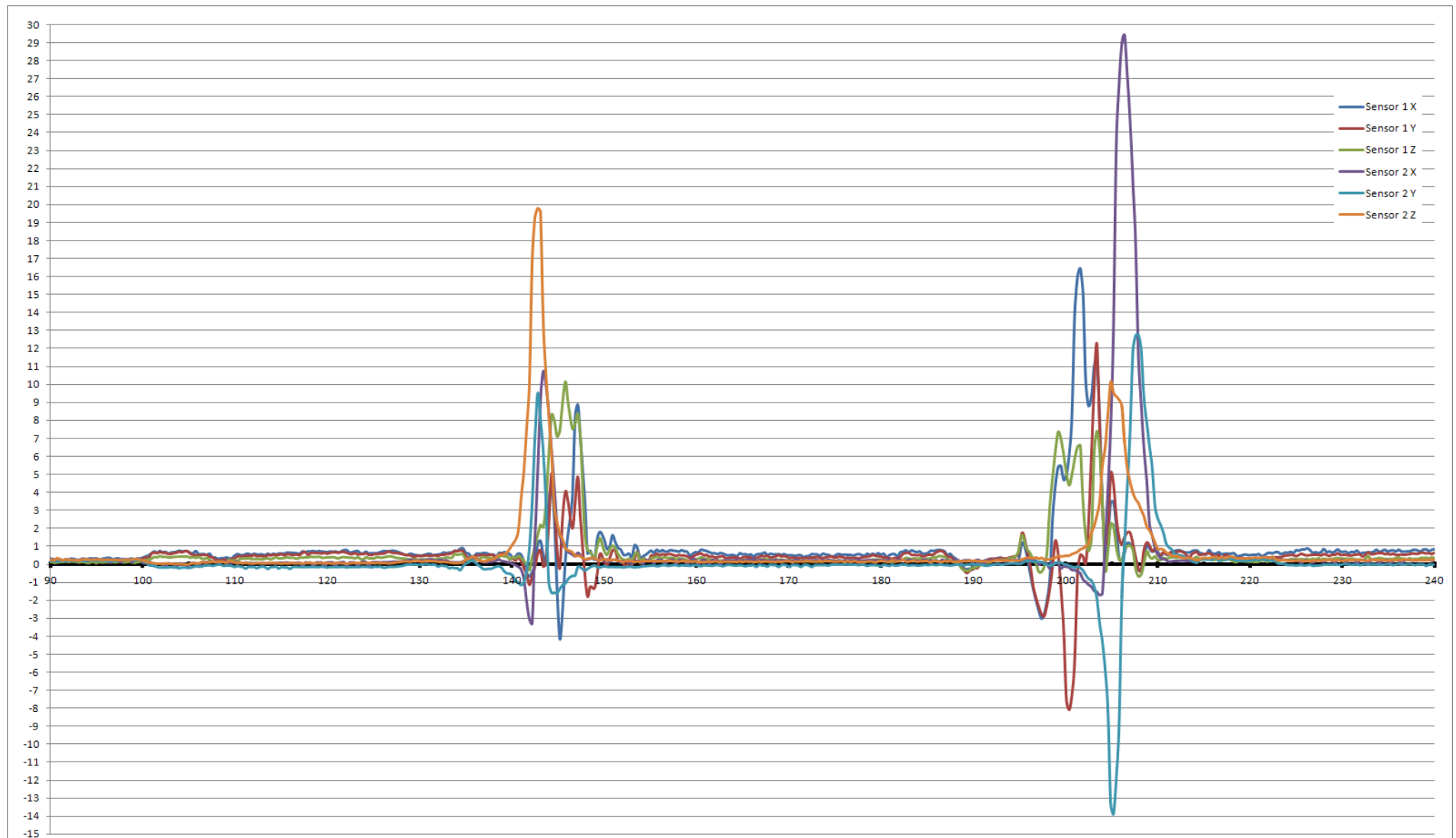
Σχήμα 5.19: Διάταξη στο φυσικό χώρο.

Το πείραμα αυτό έγινε στον ίδιο χώρο στάθμευσης του Πολυτεχνείου, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Επιλέξαμε μία ώρα που να μην έχει άλλα αυτοκίνητα, έτσι ώστε να μειώσουμε την αβεβαιότητα μεταβολής από άλλα κινούμενα οχήματα.

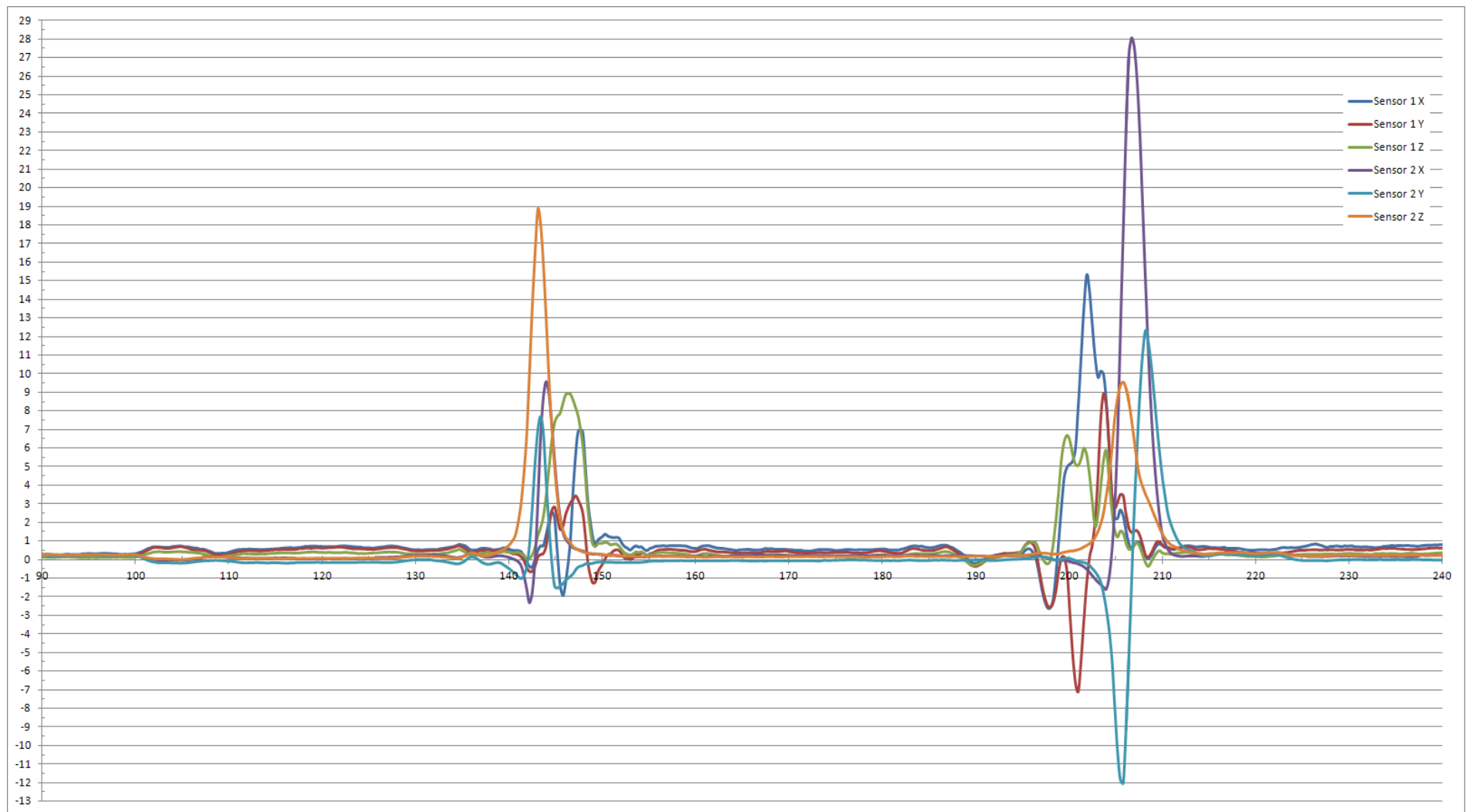


### **5.2.2.1 Μετρήσεις – Αποτελέσματα.**

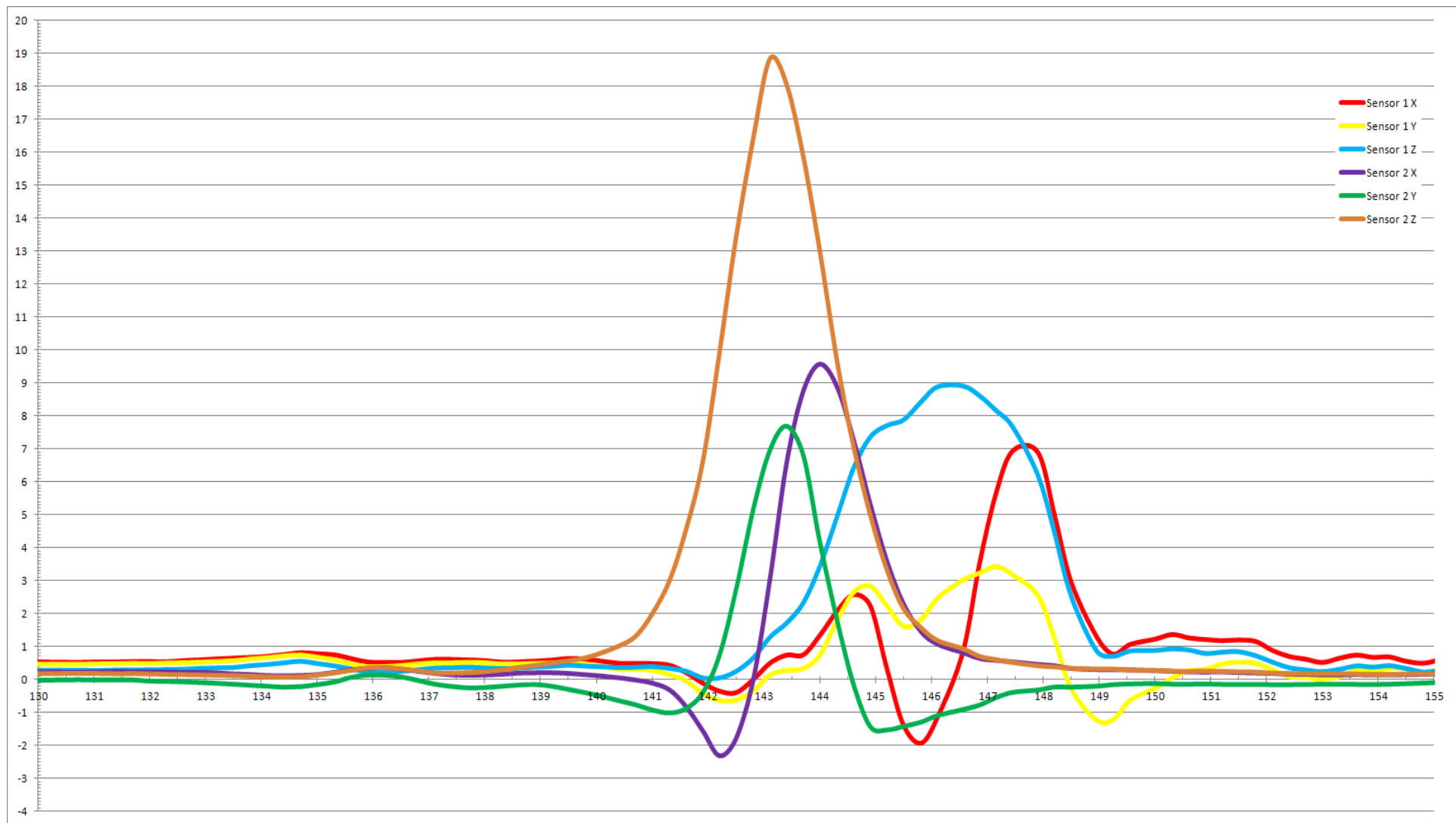
Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την ανίχνευση αυτοκινήτου ήταν αναμενόμενα.



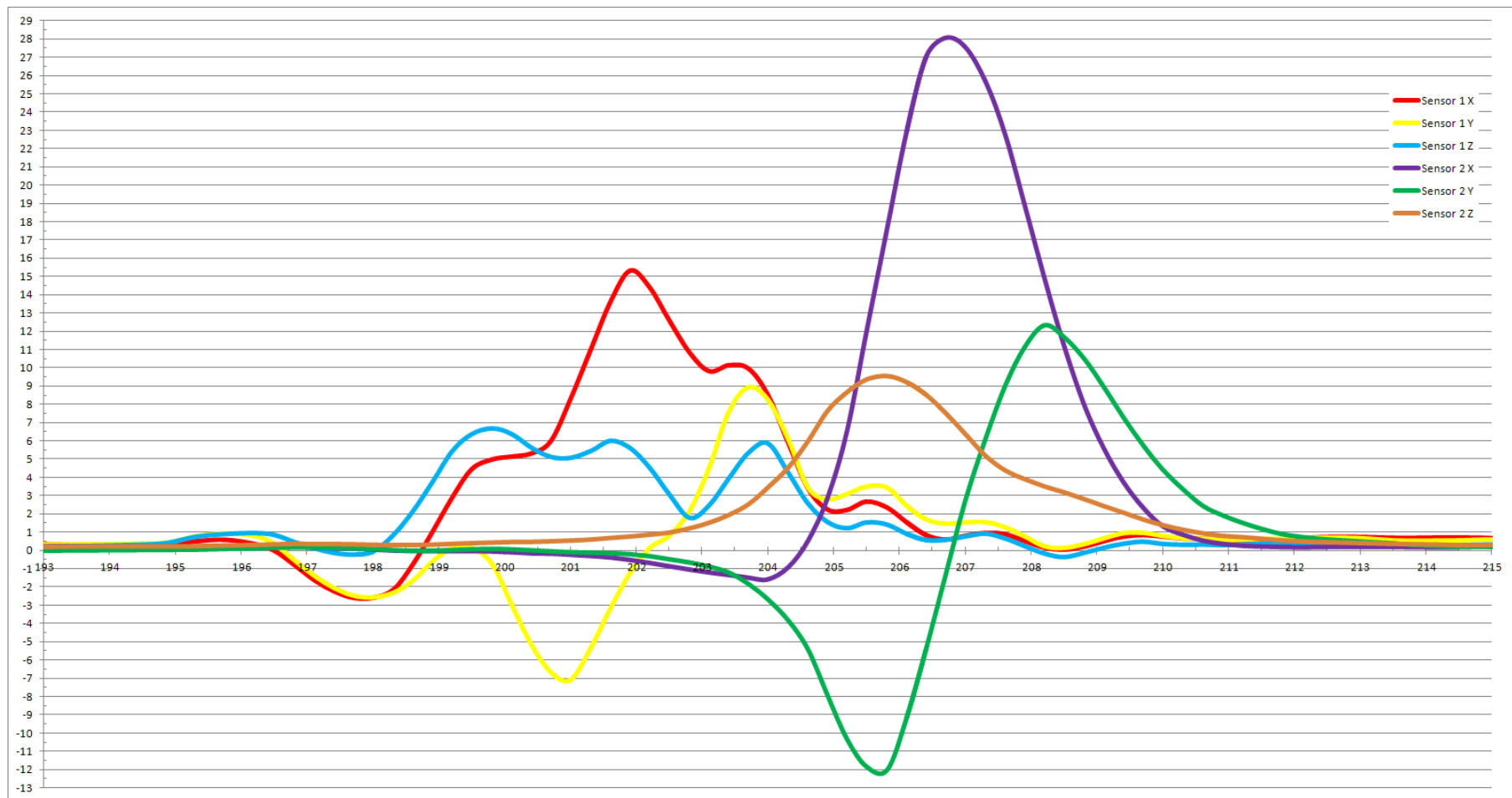
Σχήμα 5.20: Αφιλτράριστο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου.



Σχήμα 5.21: Φιλτραρισμένο σήμα από διέλευση αυτοκινήτου.



Σχήμα 5.22: Φιλτραρισμένο σήμα από εμπρόσθιο πέρασμα του αυτοκινήτου.



Σχήμα 5.23: Φιλτραρισμένο σήμα από αντίστροφο πέραςμα του αυτοκινήτου.

Στην πραγματικότητα τα δύο πειράματα θα μπορούσαν να είναι τα ίδια με τη διαφορά ότι θα είχαμε τέσσερις αισθητήρες σε ορθογωνική διάταξη. Εφόσον, όμως έχουμε μόνο δύο αισθητήρες για μέτρηση, η διάταξη αυτή είναι ανέφικτη. Η ορθογωνική διάταξη θα έδινε αναλυτικότερα αποτελέσματα. Η χρήση εξαγωνικής διάταξης θα αύξανε τον αριθμό των αισθητήρων. Επειδή το κόστος των αισθητήρων είναι υψηλό, θα προτιμούσαμε την ορθογωνική διάταξη. Η πυκνότητα των αισθητήρων σε ένα εξαγωνικό πλέγμα είναι κατά  $\sqrt{3}$  2 μεγαλύτερη σε σχέση με ένα τετραγωνικό πλέγμα.

### 5.3 Μετρήσεις σκάφους στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων.

Ο απότερος σκοπός της διπλωματικής αυτής ήταν να εντοπίσουμε τη θέση ενός σκάφους με τη χρήση μαγνητικών αισθητήρων εντός ενός λιμένα. Τα πειράματα αυτά έγιναν στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων (ΣΝΔ). Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κάτοψη του λιμένα της ΣΝΔ.



Σχήμα 5.24: Λιμάνι της ΣΝΔ και του Πειραιά.



Σχήμα 5.25: Πλησιέστερη εικόνα του λιμανιού της ΣΝΔ.

Εξετάζοντας τον παραπάνω χώρο αποφασίσαμε να τοποθετήσουμε τους δύο αισθητήρες στις δύο προβλήτες του λιμανιού. Το διαθέσιμο σκάφος για μετρήσεις ήταν ένα φουσκωτό σκάφος με βενζινομηχανή. Ένα παρόμοιο σκάφος φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 5.26: Εικόνα φουσκωτού σκάφους όμοιο με αυτό των πειραμάτων.



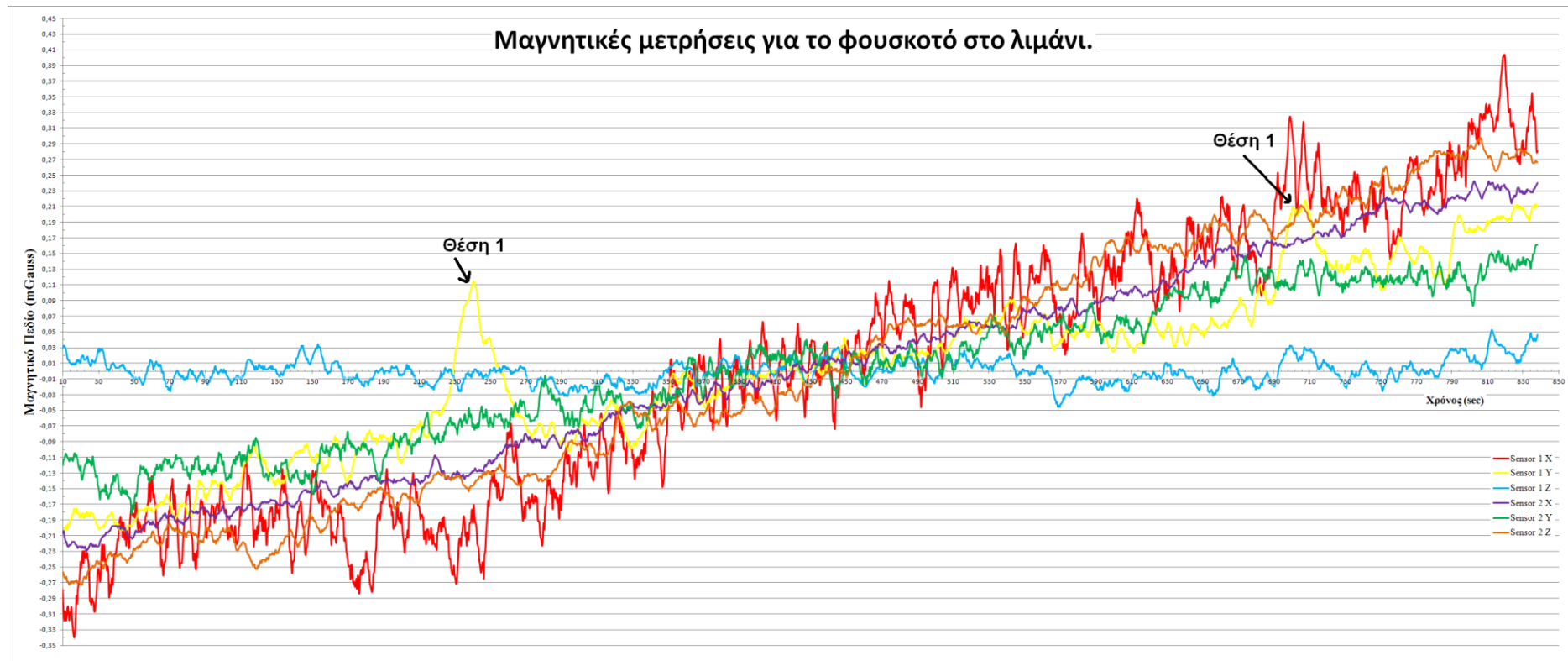
Σχήμα 5.27: Θέση των αισθητήρων στο λιμάνι.

Ο μεγαλύτερος προβληματισμός ήταν ότι το φουσκωτό αυτό έχει μια πολύ μικρή μηχανή και δεν έχει σχεδόν καθόλου άλλα μεταλλικά μέρη. Έτσι το μαγνητικό αποτύπωμα είναι πολύ μικρό και κατά συνέπεια το αναμενόμενο είναι να βλέπουμε το σκάφος μόνο όταν πλησιάζει κοντά στην αποβάθρα, όπου είναι οι αισθητήρες. Το δεύτερο πρόβλημα είναι το ύψος τοποθέτησης του αισθητήρα σε σχέση με το αντικείμενο προς μέτρηση. Όπως είδαμε στη βιβλιογραφική αναφορά και



διαπιστώσαμε στα πειράματά μας για ανίχνευση οχημάτων, η βέλτιστη θέση για ανίχνευση ενός οχήματος είναι στο πλαϊνό τμήμα αυτού και στο ύψος όπου βρίσκεται εγκατεστημένος ο πλαϊνός καθρέφτης. Εναλλακτικά ο αισθητήρας μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από το όχημα. Όπως είδαμε η τοποθέτηση των αισθητήρων κάτω από το επίπεδο της θάλασσας ήταν στα υπόψη κατά το σχεδιασμό της συσκευασίας. Τελικά όμως πάρθηκε η απόφαση να μην καταποντιστούν οι αισθητήρες στη θάλασσα. Για το λόγο αυτό κάναμε τα πειράματα με τους αισθητήρες στις προβλήτες πάνω από το επίπεδο του φουσκωτού. Η θέση αυτή δεν είναι ιδανική για το φουσκωτό σκάφος, αλλά για άλλου τύπου πλοία μεγαλύτερου μεγέθους θα ήταν ιδανική θέση. Ένα άλλο στοιχείο που θέλαμε να εξετάσουμε στο λιμάνι αυτό είναι η δυνατότητα μέτρησης των μεγάλων σκαφών στο γειτονικό λιμάνι του Πειραιά. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι θέσεις των αισθητήρων.

Το σκάφος κινήθηκε πρώτα στη θέση (2) και μετά κινήθηκε προς την θέση (1) και πάλι. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 5.28: Φιλτραρισμένο σήμα από τις μετρήσεις με το φουσκοτό σκάφος.



## 6 Συμπεράσματα.

Σε ότι αφορά τη διαδικασία των μετρήσεων, ιδιαίτερο βάρος θα πρέπει να δοθεί στην ταχύτητα δειγματοληψίας του σήματος εξόδου του αισθητήρα. Για εφαρμογές που αφορούν ανίχνευση πλοίων τα οποία κινούνται με μικρή ταχύτητα, οι αργές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου δεν απαιτούν ιδιαίτερα γρήγορη δειγματοληψία. Κάτι τέτοιο όμως είναι απαραίτητο στην περίπτωση που επιθυμούμε να διαβάσουμε και πεδία που μεταβάλλονται πιο γρήγορα, π.χ. στη συγκεκριμένη εφαρμογή ταχύπλοα σκάφη τα οποία διαθέτουν την απαιτούμενη μαγνητική μάζα ώστε να εντοπιστούν από τον αισθητήρα. Ο αισθητήρας HMC2003 έχει συχνότητα αποκοπής 3dB στο 1KHz, άρα ένας δειγματολήπτης περίπου στα 10KHz θα ήταν μία καλή επιλογή. Ο περιορισμός της συχνότητας αποκοπής προέρχεται από το φίλτρο που υπάρχει στον τελεστικό ενισχυτή για την ενίσχυση του σήματος. Ο αισθητήρας σαν αισθητήριο στοιχείο έχει συχνότητα αποκοπής τα 5MHz. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα να ανιχνεύει και ταχύπλοα τα οποία θα έχουν επαρκή μαγνητική μάζα.

Ένα πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίσαμε και το οποίο είναι αρκετά κοινό στην περίπτωση μαγνητικών μετρήσεων με απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας είναι η επίδραση του περιβάλλοντος εγκατάστασης στην απόκριση του αισθητήρα. Συγκεκριμένα και σε ότι αφορά τη μέτρηση πλοίων στην ΣΝΔ, η ύπαρξη ενός μεταλλικού πλέγματος για λόγους προστασίας των επισκεπτών της προβλήτας κοντά στον αισθητήρα 1 δημιούργησε αρκετές παρεμβολές λόγω της ταλάντωσης του πλέγματος ανάλογα με την ταχύτητα και τη διεύθυνση του αέρα. Χρησιμοποιώντας καλύτερους δειγματολήπτες θα μπορούσαμε να καταγράψουμε με ακρίβεια το προερχόμενο από το πλέγμα σήμα έτσι ώστε στη συνέχεια να υπολογίσουμε τα επίπεδα έντασης και τις συχνότητες ταλάντωσης και τελικά με χρήση φίλτρων να πάρουμε ένα πιο καθαρό σήμα στην έξοδο.

Επιπλέον ο δειγματολήπτης που χρησιμοποιήσαμε ήταν των 16bit και για την πλήρη ακρίβεια του αισθητήρα επιλέξαμε το εύρος μετρήσεων  $\pm 625\text{mV}$ . Αν τώρα θεωρήσουμε τις τάσεις απόκλισης μηδενικές, τότε η αντιστοιχία σε Gauss είναι 1:1, άρα  $\pm 625\text{mgauss}$ . Το ερώτημα που γεννάται είναι πώς αντιμετωπίζεται η απαίτηση για ανίχνευση μεγάλων σκαφών των οποίων το μαγνητικό αποτύπωμα υπερβαίνει αυτά τα όρια. Μία λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα νέο δειγματολήπτη με εύρος  $\pm 2.5\text{V}$  ή 0-5V και ανάλυση ίση και μεγαλύτερη των 20bit. Τα 20bit στο εύρος αυτό της τάσης θα μας δώσουν ανάλυση της τάξης των . Η ανάλυση αυτή είναι 8.5 φορές καλύτερη από την ανάλυση που μας δίνει ο αισθητήρας. Με τον τρόπο αυτό θα είχαμε πλήρη ανάλυση σε όλο το εύρος της κλίμακας και κατά επέκταση θα είχαμε τη δυνατότητα να μετρούμε και μεγαλύτερες μαγνητικές μάζες με πλήρη ακρίβεια. Θα μπορούσαμε επιπλέον με τον ίδιο αισθητήρα να αυξήσουμε το εύρος μέτρησης στα  $\pm 4\text{gauss}$  από τα  $\pm 2\text{ gauss}$ , που είναι το ωφέλιμο εύρος ευαισθησίας τους, κάνοντας χρήση των πηνίων αντιστάθμισης και εφαρμόζοντας γνωστό εξωτερικό πεδίο.

Τα παραπάνω μας οδηγούν στην επιτακτική ανάγκη του σχεδιασμού και της υλοποίησης ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, το οποίο θα περιλαμβάνει τους αισθητήρες (HMC1001, HMC1002), τους τελεστικούς ενισχυτές, τους δειγματολήπτες, τον μικροελεγκτή, καθώς και άλλα βοηθητικά ηλεκτρονικά, όπως για παράδειγμα σταθεροποιητές τάσης, φιλτραρίσματα και για επικοινωνίες των

ηλεκτρονικών. Φυσικά το κόστος της κατασκευής θα είναι μεγαλύτερο από αυτό που έχουμε τώρα, όμως θα μας δίνει πολύ περισσότερες δυνατότητες.

Για παράδειγμα ο μικροελεγκτής θα εκτελεί τους κύκλους τοποθέτησης – επανατοποθέτησης αυτόματα σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να μειώνεται η αβεβαιότητα μέτρησης. Επιπλέον το γεγονός ότι έχουμε μικροελεγκτή κοντά στον αισθητήρα μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε κατάλληλο λογισμικό, το οποίο θα χαρακτηρίζει τον αισθητήρα στο περιβάλλον λειτουργίας του, δηλαδή, θα βρίσκει ξανά τον λόγο μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της τάσης εξόδου.

Ένα άλλο σημείο που χρήζει αναφοράς είναι η περίπτωση που παρουσιαστεί η ανάγκη να καταποντίσουμε τους αισθητήρες στον πυθμένα του λιμανιού. Στην περίπτωση αυτή δεν θα έχουμε εύκολη πρόσβαση να τους αφαιρούμε, να τους επιδιορθώνουμε και να τους επαναταυτοποιούμε. Έτσι, η μέθοδος που προτείνουμε πιο πάνω θα έλυνε το πρόβλημα αυτό μιας και δεν θα υπάρχει ανάγκη αφαίρεσής τους. Η διαδικασία της επαναρίθμησης και επαναταυτοποίησης μπορεί να γίνεται ακόμη και αυτόματα χωρίς να χρειάζεται η παρέμβαση του χειριστή του συστήματος.

Κατά την ανάπτυξη του συστήματος σε ευρεία κλίμακα θα πρέπει να προσεχθούν συγκερασμένες παράμετροι, οι οποίες δεν είναι σημαντικές σε μικρό σκέλος. Οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι:

Τέλος, το πρωτόκολλο επικοινωνίας που αφορά την λειτουργία του δικτύου περισσότερων αισθητήρων είναι ίσως από τα πλέον σημαντικά ζητήματα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλων εγκαταστάσεων, καθώς αυτό καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία του δικτύου. Το πρωτόκολλο συνδέεται έμμεσα με το φυσικό μέσο επικοινωνίας, αλλά και με τις ταχύτητες επικοινωνίας και με την διευθυνσιοδότηση των αισθητήρων. Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε ένα δίκτυο 1000 αισθητήρων για τους οποίους γίνεται συνεχώς ανάγνωση των τριών συνιστωσών τους. Αν χρησιμοποιήσουμε δειγματολήπτη 24bits με συχνότητα δειγματοληψίας 10KHz θεωρούμε ότι μετά από το φιλτράρισμα έχουμε 1KHz. Αν υποθέσουμε επιπλέον ότι οι αισθητήρες διευθυνσιοδοτούνται με 16bit ώστε το σύστημα να είναι επεκτάσιμο, το πακέτο δεδομένων μας θα έχει ως εξής:

Με ένα δίκτυο 1000 αισθητήρων, με 1000 δείγματα το δευτερόλεπτο ο καθένας και με 11Bytes ο καθένας, θα έχουμε μία ταχύτητα επικοινωνίας στα 10,5MB/sec. Αν υπολογίζουμε τώρα και την αποστολή εντολών θα έχουμε τουλάχιστο άλλα 3MB/sec, 16bits διεύθυνση και 8 bits εντολή. Ο διάυλος επικοινωνίας θα θέλαμε να έχει εύρος ζώνης διπλάσιας ταχύτητας από τα 13,5MB/sec δηλαδή 27MB/sec. Μία τέτοια ταχύτητα θα ήταν αρκετή για την εφαρμογή αυτή.



## 7 Βιβλιογραφία.

National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) - The World Magnetic Model  
<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>

Magnetic Effects in Sensing Applications  
Evangelos Hristoforou Laboratory of Physical Metallurgy, National Technical  
University of Athens

Magnetic\_Sensors\_And\_Magnetometers  
Pavel Ripka (Artech\_House,\_2001) ISBN 1-58053-057-5

Application Note 211 Applications of Magnetic Position Sensor  
Honeywell

Application Note 212 Handling Sensor Bridge Offset  
Honeywell

Application Note 213 Set Reset Function  
Honeywell

Application Note 214 Reference Design Low Cost Compass  
Honeywell

Application Note 218 Vehicle Detection Using AMR Sensors  
Honeywell

Magnetic Sensor Overview  
Honeywell

HMC\_1001-1002-1021-1022 Data Sheet  
Honeywell

HMC 2003  
Honeywell

HMR 2300  
Honeywell

Hall Effect Sensing and Application  
Honeywell

A New Perspective on Magnetic Field Sensing  
Michael J. Caruso, Tamara Bratland, Dr. Carl H. Smith  
Robert Schneider

HANDBOOK OF MODERN SENSORS Physics, Designs, and Application  
Jacob Fraden