



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Λαζαρίδη Θεόφилου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου

Αθήνα

2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Λαζαρίδη Θεόφилου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου	Δημήτριος Τσουκαλάς	Κωνσταντίνος Παρασκευαΐδης
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

.....

**Θεόφιλος Λαζαρίδης**

© (2018) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 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 το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την ευκαιρία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να πραγματοποιήσω την μεταπτυχιακή μου εργασία κάτω από την εποπτεία του. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις ιδανικές συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκε η κατασκευή της διάταξης αλλά και οι μετρήσεις των πειραμάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Σπύρο Αγγελόπουλο για την επίβλεψη του, το ενδιαφέρον που έδειξε κατά τη διάρκεια της εργασίας αλλά και για την καθοδήγηση του για να έχει η εργασία του το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε αυτή την προσπάθεια αλλά και το πανεπιστημιακό ίδρυμα ΕΜΠ στο οποίο διεκπεραιώθηκαν οι προπτυχιακές αλλά και οι μεταπτυχιακές σπουδές μου.



## Περίληψη

Αναμφισβήτητα τα μαγνητόμετρα αποτελούν στις σημερινές τεχνολογίες ένα πάρα πολύ σημαντικό εργαλείο. Η χρήση των μαγνητόμετρων είναι απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές. Αυτές καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος, που περιλαμβάνει τις Επιστήμες, τις μεταφορές, τη βιομηχανία και την ασφάλεια. Η διακρίβωσή τους, ωστόσο, αποτελεί διαχρονικά ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα.

Η ανάγκη για μέτρηση του μαγνητικού πεδίου με ακρίβεια, έχει αναγάγει την διακρίβωση σε σημαντικό παράγοντα για τη διόρθωση και την επαλήθευση των μαγνητικών μετρήσεων.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας υλοποιήθηκε η κατασκευή κατάλληλης διάταξης έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση δύο διαφορετικών μαγνητομέτρων. Ενός μαγνητομέτρου πύλης ροής (fluxgate) και ενός μαγνητικού αισθητήρα Hall. Η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται μέσω της αντιστάθμισης του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου και της επιβολής πεδίου γνωστής τιμής.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από δύο μέρη: Στο πρώτο μέρος αναπτύσσεται και αναλύεται η επιστήμη του μαγνητισμού σε θεωρητικό επίπεδο. Γίνεται αναφορά σε όλα τα σημαντικά φαινόμενα, καθώς και στις σημαντικότερες τεχνολογικές εφαρμογές. Στο δεύτερο μέρος γίνεται επεξήγηση και ανάλυση των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την κατασκευή της διάταξης διακρίβωσης και παρατίθενται οι μετρήσεις με τον σχετικό σχολιασμό.

**Λέξεις Κλειδιά.** Μαγνητικό πεδίο, Μαγνητικοί αισθητήρες, Διακρίβωση μαγνητόμετρων, Μαγνητική θωράκιση





## **Abstract**

Magnetometers are very useful, as they can be used to measure the magnetic field. The use of magnetometers is essential in many applications. It covers a wide range, including Science, Transport, Industry and Security. However, their calibration, is a very important problem over time. The magnetic field reading distortions occur in the presence of ferromagnetic elements found in the vicinity of the sensor and due to devices mounted in the vehicle's structure.

Because of the need for accurate measurement of the magnetic field, calibration has become an important factor in the correction and verification of magnetic measurements.

Within the framework of this thesis, the construction of a suitable arrangement was carried out, in order to calibrate two different types of magnetometers; a fluxgate magnetometer and a Hall sensor. Calibration is achieved by compensating the externally forced magnetic field and imposing a field of a known value.

This thesis consists of two parts: In the first part, the science of magnetism is analyzed on a theoretical level. Reference is made to all significant phenomena, as well as to the most important technological applications. In the second part, the actions performed in the laboratory for the construction of the calibration device are explained and the measurements are presented.

**Keywords.** Magnetic sensors, magnetic field, magnetometer, magnetometer calibration, magnetic shielding



## Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1	Ιστορία του μαγνητισμού .....	1
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	3
2.1	Θεωρία Μαγνητισμού .....	3
2.1.1	Δομή του ατόμου .....	3
2.1.2	Μαγνητισμός.....	4
2.1.3	Μαγνητόνη του Bohr.....	5
2.1.4	Φυσικά μεγέθη στον μαγνητισμό .....	5
2.2	Μαγνητικά Υλικά.....	8
2.2.1	Διαμαγνητικά.....	8
2.2.2	Παραμαγνητικά .....	9
2.2.3	Σιδηρομαγνητικά.....	10
2.2.4	Αντισιδηρομαγνητικά.....	20
2.2.5	Σιδηριμαγνητικά.....	21
2.3	Μαγνητικοί αισθητήρες .....	21
2.3.1	Μαγνητικοί αισθητήρες SQUIDS .....	22
2.3.2	Μαγνητικοί αισθητήρες fluxgate .....	24
2.3.3	Μαγνητικοί αισθητήρες Hall .....	26
2.4	Διακρίβωση μαγνητομέτρων .....	28
2.4.1	Διακρίβωση με πηνία .....	28
2.4.2	Διακρίβωση με σωληνοειδές .....	31
2.4.3	Μαγνητική θωράκιση.....	33
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	36
3.1	Σκοπός και σύντομη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	36
3.1.1	Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις .....	36
3.2	Σχεδιασμός και κατασκευή της διάταξης διακρίβωσης.....	39
3.3	Μετρήσεις με αισθητήρα fluxgate .....	45
3.3.1	Διεξαγωγή μετρήσεων .....	46
3.4	Μετρήσεις αισθητήρα Hall.....	51
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	57
5	ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	59
5.1	Ελληνική βιβλιογραφία .....	61
5.2	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία .....	61
5.3	Άρθρα .....	61

5.4	Ιστοσελίδες.....	62
-----	------------------	----

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ιστορία του μαγνητισμού

Ο Αριστοτέλης αποδίδει την πρώτη επιστημονική θεωρία του μαγνητισμού στον Θαλή, ο οποίος έζησε περίπου το 625 π.Χ. με περίπου 545 π.Χ. Η πρώτη γνώση μαγνητικών φαινομένων χρονολογείται από όταν ο Θαλής ο Μιλήσιος παρατήρησε ότι το ήλεκτρο μετά από τριβή, π.χ. με μάλλινο ύφασμα, αποκτά την ιδιότητα να έλκει μικρά ελαφρά σώματα. Ο Θαλής ο Μιλήσιος παρατήρησε, επίσης, την έλξη μεταξύ πέτρας και σιδήρου, καθώς και την ελκτική δράση που ασκεί ο φυσικός μαγνήτης πάνω σε τεμάχια σιδήρου.

Μια πιο ενδελεχής έρευνα έγινε στη συνέχεια από τον Pierre de Maricourt. Το 1269 δημοσίευσε την εργασία *Epistola de Magnete*. Σε αυτή την δημοσίευση η πολικότητα των μαγνητών περιγράφηκε για πρώτη φορά. Πιθανώς ήταν ο πρώτος που πρότεινε να χρησιμοποιηθεί μαγνήτης στην κατασκευή μηχανής για να αποκτήσει συνεχή κίνηση. Την εργασία του Pierre de Maricourt συνέχισε ο William Gilbert. Στην εργασία του *De Magnete* περιέγραψε την κίνηση μαγνητικής βελόνας στην πυξίδα, που δημιουργήθηκε από το μαγνητικό πεδίο. Παρατήρησε ότι η Γη συμπεριφέρεται σαν μεγάλος σφαιρικός μαγνήτης.

Ο Σαρλ Ωγκυστέν ντε Κουλόμπ (Charles Augustin de Coulomb) μελέτησε τις ηλεκτροστατικές και μαγνητικές δυνάμεις έλξης. Καθιέρωσε το νόμο Coulomb περιγράφοντας μαθηματικά την δύναμη  $F$  μεταξύ δύο υποθετικών μαγνητικών πόλων  $m_1$  και  $m_2$  οι οποίοι έχουν μεταξύ τους απόσταση  $r$ .

$$F = -\frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.1)$$

όπου  $\mu_0$  είναι η διαπερατότητα στον ελεύθερο χώρο.

Το μαγνητικό πεδίο προσπαθεί να ευθυγραμμίσει το μαγνητικό δίπολο στη διεύθυνση του πεδίου με ροπή

$$\tau = \mathcal{M} \times B \quad (1.2)$$

Το 1820, ο Δανός φυσικός Χανς Κρίστιαν Έρστεντ (Hans Christian Oersted) ανακάλυψε ότι όταν μια μαγνητική βελόνα κινείται κοντά σε σύρμα με ηλεκτρικό ρεύμα, εμφανίζεται ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο περικυκλώνει το σύρμα. Αυτή η επαναστατική ιδέα ενέπνευσε τον Αμπέρ να εξετάσει την υπόθεση ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η πηγή για κάθε μαγνητικό πεδίο.

Τον ίδιο χρόνο, οι Ζαν Μπατίστ Μπιότ (Jean Baptiste Biot) και Φέλιξ Σαβάρτ (Felix Savart) πρότειναν τον κανόνα που επέτρεψε τον προσδιορισμό της δύναμης του μαγνητικού πεδίου γύρω από ένα καλώδιο ηλεκτρικού ρεύματος. Το μαγνητικό πεδίο που προέκυψε από ρεύμα  $I$  σε απειροελάχιστο μήκος  $dL$  ενός αγωγού σε μία ακτινική απόσταση  $r$ , είναι  $dB = \frac{\mu_0 I dL \times l}{4\pi r^2}$ .

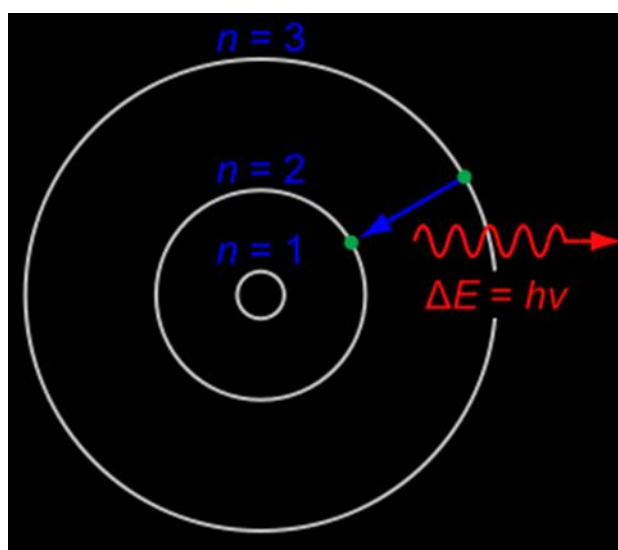
Το 1831, ο Μάικλ Φαραντέι (Michael Faraday) εδραίωσε έναν ακόμα βασικό νόμο του μαγνητισμού. Υποστήριξε ότι εάν μια μαγνητική ροή  $\Phi$  πλησιάζει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, ισχύει ότι  $V = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή [1].

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Θεωρία Μαγνητισμού

#### 2.1.1 Δομή του ατόμου

Ο Bohr υπέθεσε ότι το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου κινείται υπό την επίδραση της ελκτικής δύναμης Coulomb που ασκείται σε αυτό από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα, σύμφωνα με τους νόμους τα κλασικής μηχανικής, η οποία προβλέπει κυκλικές ή ελλειπτικές τροχιές, με τη δύναμη να κατευθύνεται πάντα προς τη μια εστία. Για λόγους ευκολίας, υιοθέτησε για τους υπολογισμούς του την κυκλική τροχιά, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η θεωρία αυτή όμως δεν μπορούσε να απαντήσει στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, σύμφωνα με την οποία το άτομο θα έπρεπε να είναι ασταθές, αλλά και στο ερώτημα γιατί το ηλεκτρόνιο κινείται σε μία ή περισσότερες διακριτές τροχιές.



Σχήμα 1 Το ατόμικο πρότυπο του Bohr [2]

Χρειάστηκε, λοιπόν, μια νέα θεωρία, που ονομάστηκε κβαντομηχανική, για να υποστηρίξει ότι το ηλεκτρόνιο κινείται σε καθορισμένες τροχιές γύρω από τον πυρήνα και ότι η ενέργειά του είναι κβαντισμένη.

Τα ηλεκτρόνια εκτελούν μια τροχιακή κίνηση γύρω από τον πυρήνα και μια περιστροφική κίνηση γύρω από τον εαυτό τους [3].

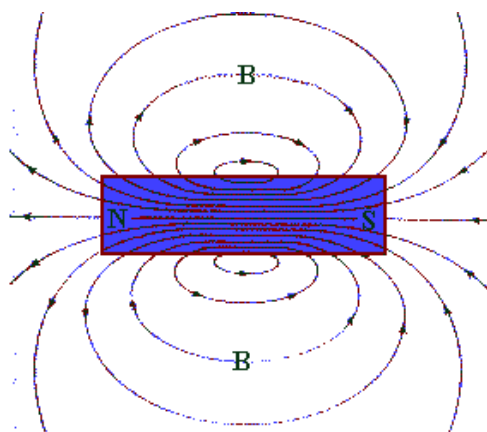
### 2.1.2 Μαγνητισμός

Ο μαγνητισμός εκφράζεται μέσα από το μαγνητικό πεδίο το οποίο προκαλείται μέσα από ένα κινούμενο φορτίο όπως το ηλεκτρόνιο μέσα σε ένα άτομο. Καθώς το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα, περιστρέφεται και γύρω από τον εαυτό του. Η περιστροφή αυτή δημιουργεί γύρω από κάθε άτομο ένα μαγνητικό πεδίο. Όπως το ηλεκτρικό πεδίο, έτσι και το μαγνητικό πεδίο είναι ένα διανυσματικό πεδίο, δηλαδή μια διανυσματική ποσότητα που σχετίζεται με κάθε σημείο του χώρου. Για το μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιείται το σύμβολο  $B$ .

Η μονάδα μέτρησης στο SI για το  $B$  είναι το Tesla προς τιμήν του Νικόλα Τεσλα (1857-1943), διακεκριμένου Σερβοαμερικανού επιστήμονα και εφευρέτη:

$$1\text{Tesla}=1\text{T}=1\frac{1\text{N}}{\text{Am}}$$

Η μονάδα του  $B$  στο σύστημα cgs είναι το Gauss ( $1\text{G}=10^{-4}\text{T}$ ). Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι της τάξης του  $10^{-4}\text{T}$ , ή 1G. Μαγνητικά πεδία της τάξης των 10T υπάρχουν στο εσωτερικό των ατόμων και είναι σημαντικά για την ανάλυση των ατομικών φασμάτων. Το μαγνητικό πεδίο αναπαρίσταται με γραμμές όπως ακριβώς και το ηλεκτρικό πεδίο [1].



Σχήμα 2 Μαγνητικές δυναμικές γραμμές [4]

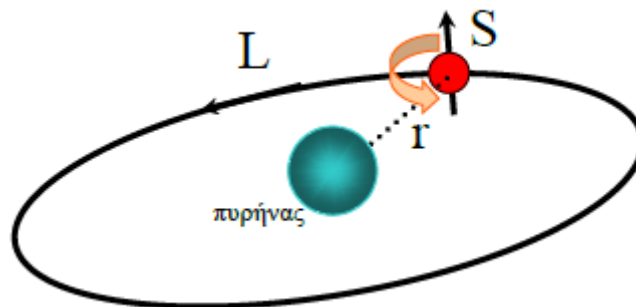


### 2.1.3 Μαγνητόνη του Bohr

Η περιστροφή (spin) των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους δημιουργούν μια ροπή  $m_s$  η οποία είναι ίση με  $m_s = \frac{e_m h}{4\pi}$  όπου  $h=6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$  είναι η σταθερά του Planck και  $e_m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ C/Kg}$  είναι το ειδικό φορτίο (φορτίο /μάζα) του ηλεκτρονίου.

Είναι γνωστό από τη κβαντομηχανική, ότι η στροφορμή είναι κβαντισμένη σε ακέραια πολλαπλάσια του  $\frac{h}{2\pi}$  όπου  $h=6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$  και τελικά έχουμε  $m_B = \frac{eh}{4\pi m_{el}}$   $=9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ . Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει τη μικρότερη μαγνητική ροπή, που είναι γνωστή ως μαγνητόνη του Bohr.

Μέσα σε ένα υλικό, τα διάφορα δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα στο χώρο, επειδή το ίδιο συμβαίνει και με τα επίπεδα στα οποία βρίσκονται οι τροχιές των ηλεκτρονίων. Συνεπώς, το υλικό δεν εμφανίζει, συνολικά, μαγνητική ροπή χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [5].



Σχήμα 3 Περιστροφική κίνηση του ηλεκτρονίου

### 2.1.4 Φυσικά μεγέθη στον μαγνητισμό

Μαγνητική ροή  $\Phi$ : Η μαγνητική ροή ορίζεται μέσα από μια επιφάνεια  $S$  και το μαγνητικό πεδίο έντασης  $B$  και συμβολίζεται με  $\Phi$  (*magnetic flux*). Ανάλογα προς την ηλεκτρική ροή, η στοιχειώδης μαγνητική ροή  $d\Phi$ , που διέρχεται από το

προσανατολισμένο στοιχείο επιφάνειας  $dS$  ορίζεται από τη σχέση  $d\Phi = BdS$  και η ολική ροή  $\Phi$  που διέρχεται από μια επιφάνεια  $S$  ορίζεται από την σχέση  $\Phi = \int_S B ds$ . Η μαγνητική ροή μετριέται σε Weber (Wb). Η ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια είναι ίση με μηδέν. Το σωληνόμορφο στερεό που σχηματίζουν οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, που διέρχονται από μια πεπερασμένη επιφάνεια, ονομάζεται μαγνητικός δυναμικός σωλήνας ή σωλήνας μαγνητικής ροής. Σε έναν όγκο  $V$  που περιορίζεται από την επιφάνεια  $S$  έχουμε

$$\oint_S BndS = \int_V \nabla B dV = 0 \quad (2.1)$$

Επομένως, προκύπτει πως η ροή που διέρχεται από ένα κύκλωμα είναι ανεξάρτητη από το είδος της επιφάνειας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό [6].

Μαγνητική επαγωγή  $B$ : Μονάδα της μαγνητικής επαγωγής είναι το Tesla(T), που ορίζεται ως η μαγνητική επαγωγή ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου που εμφανίζει ροή 1Wb σε  $1m^2$  επιφάνειας, τοποθετημένης κάθετα προς τη διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου. Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με τη μαγνητική πεδιακή ένταση, με τη σχέση  $B = \mu_0 H$ , όπου  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$  είναι η διαπερατότητα του κενού που αποτελεί παγκόσμια σταθερά. Παρ' όλα αυτά, το  $B$  δεν είναι γραμμική συνάρτηση του  $H$  και αυτό φαίνεται μέσα από το διάγραμμα του βρόχου υστέρησης.

Μαγνητική πεδιακή ένταση  $H$ : Ανάλογα προς την περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου, και για την περιγραφή του μαγνητικού πεδίου αρκεί η γνώση ενός άλλου χαρακτηριστικού διανυσματικού μεγέθους, της μαγνητικής πεδιακής έντασης  $H$ .

Η διεύθυνση της μαγνητικής πεδιακής έντασης (magnetic field intensity)  $H$  σε ένα σημείο του πεδίου ορίζεται από τη διεύθυνση προς την οποία προσανατολίζεται ο άξονας μιας μαγνητικής βελόνας όταν προσαχθεί στο σημείο αυτό. Η φορά της πεδιακής έντασης  $H$  καθορίζεται από τη φορά του διανύσματος που έχει ως αρχή τον νότιο πόλο και ως πέρασ τον βόρειο πόλο της βελόνας.

Το μέτρο της έντασης  $H$ , αντί να οριστεί από τη δύναμη που ασκείται πάνω στο μοναδιαίο θετικό μαγνητικό φορτίο ή την στρεπτική ροπή που ασκείται σε κατάλληλη μαγνητική βελόνα, ορίζεται από την πυκνότητα της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου.

Η μονάδα της μαγνητικής πεδιακής έντασης μπορεί να οριστεί από τη σχέση

$$\oint_c H dl \quad (2.2)$$

η οποία περιγράφει το νόμο του Ampere, σύμφωνα με τον οποίο η κυκλοφορία της μαγνητικής πεδιακής έντασης κατά μήκος τυχόντος κλειστού δρόμου  $c$  είναι ίση με την ένταση του ρεύματος που εμπλέκει τον δρόμο αυτό. Έχουμε συνεπώς,  $1H=1 \text{ A/m}$ .

Η μονάδα της μαγνητικής πεδιακής έντασης μπορεί, επίσης, να οριστεί και ως η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον μεταξύ δύο απέναντι παραλλήλων επίπεδων ταινιών χώρο, όπου οι ταινίες διαρρέονται από δύο παράλληλα, ίσα και αντίθετα επιφανειακά ρεύματα πυκνότητας  $1 \text{ A/m}$ .

Μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ : Σε ένα ομογενές γραμμικό και ισότροπο μέσο η μαγνητική επαγωγή και η μαγνητική πεδιακή ένταση συνδέονται με τη σχέση  $B = \mu_0 H$ . Το  $\mu_0$  ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα και έχει διαφορετικές τιμές από υλικό σε υλικό. Η διαπερατότητα  $\mu$  είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος καθώς δίνει άμεσες πληροφορίες για τα μαγνητικά υλικά .

Μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$ : Το ποσό κατά το οποίο η σχετική διαπερατότητα υπερβαίνει τη μονάδα ονομάζεται μαγνητική επιδεκτικότητα και συμβολίζεται με  $\chi_m$ .

$$\chi_m = K_m - 1 \quad (2.3)$$

Και οι δύο ποσότητες  $K_m$  και  $\chi_m$  είναι αδιάστατα μεγέθη. Η μαγνητική επιδεκτικότητα ελαττώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

Μαγνήτιση  $M$ : Η μαγνήτιση  $M$  ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού.

$$M = \frac{\mu_{tot}}{V} \quad (2.4)$$

Η μαγνητική ροπή συνδέεται με τη μαγνητική ροή με τη σχέση  $m \frac{\Phi l}{\mu_0}$ , όπου  $l$  είναι το μήκος του μαγνητικού δίπολου. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση ανάμεσα στο  $M$  και στο  $B$ . Αν  $V = AI$  τότε  $M = \frac{B}{\mu_0}$ .

Το επιπλέον μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από τη μαγνήτιση του υλικού αποδεικνύεται ότι είναι ίσο με  $\mu_0 M$ , όπου  $\mu_0$  είναι η ίδια σταθερά που εμφανίζεται στους νόμους Biot-Savart και Ampere [5]. Αν ένα υλικό περιβάλλει τελείως έναν αγωγό, το ολικό μαγνητικό πεδίο  $B$  μέσα στο υλικό είναι

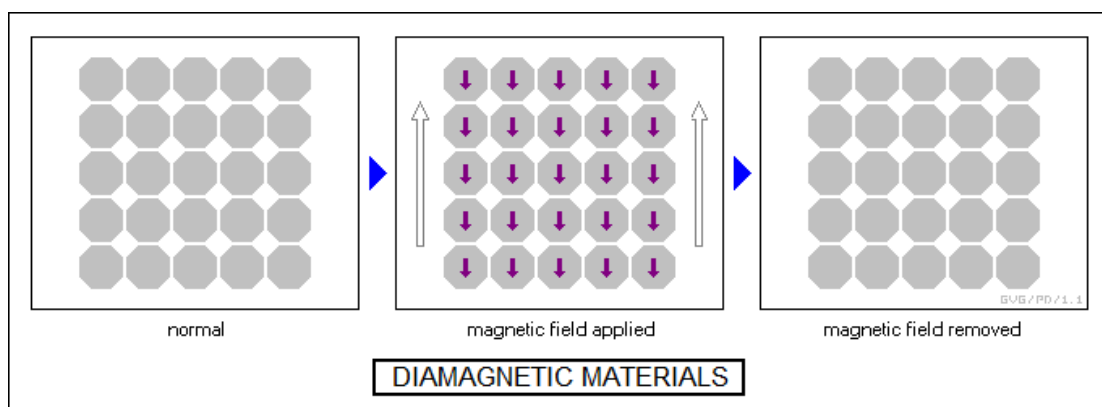
$$B = B_0 + \mu_0 M \quad (2.5)$$

## 2.2 Μαγνητικά Υλικά

### 2.2.1 Διαμαγνητικά

Είναι τα υλικά που προκαλούν εξασθένηση του επιβαλλόμενου σε αυτά εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι ελαφρώς μικρότερη της μονάδας ( $\mu_r < 1$ ). Κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού υλικού η μαγνητική ροπή που οφείλεται στα spin των ηλεκτρονίων εξουδετερώνεται από την αντίθετη ροπή που δημιουργεί η περί τον πυρήνα τροχιακή τους κίνηση, με αποτέλεσμα η συνολική μαγνητική ροπή κάθε ατόμου να είναι ίση με μηδέν. Όταν όμως επιβληθεί κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αλλάζει η κινητική κατάσταση των ηλεκτρονίων με επακόλουθο να εμφανιστεί μια ατομική μαγνητική ροπή που αντιτίθεται στο εξωτερικό πεδίο. Η ροπή αυτή, όπως είναι φυσικό, συντελεί στην εξασθένηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Από τα διαμαγνητικά υλικά, τις πιο έντονες διαμαγνητικές ιδιότητες εμφανίζει το βισμούθιο, του οποίου η σχετική μαγνητική διαπερατότητα έχει τιμή  $\mu_r = 1 - 170 \times 10^{-6}$ . Διαμαγνητικά υλικά είναι επίσης ο χαλκός ( $\mu_r = 1 - 10^{-5}$ ), ο άργυρος ( $\mu_r = 1 - 19 \times 10^{-6}$ ) ο

ψευδάργυρος ( $\mu_r = 1 - 14 \times 10^{-6}$ ), ο χρυσός ( $\mu_r = 1 - 29 \times 10^{-6}$ ) και το νερό ( $\mu_r = 1 - 9 \times 10^{-6}$ ) [6].



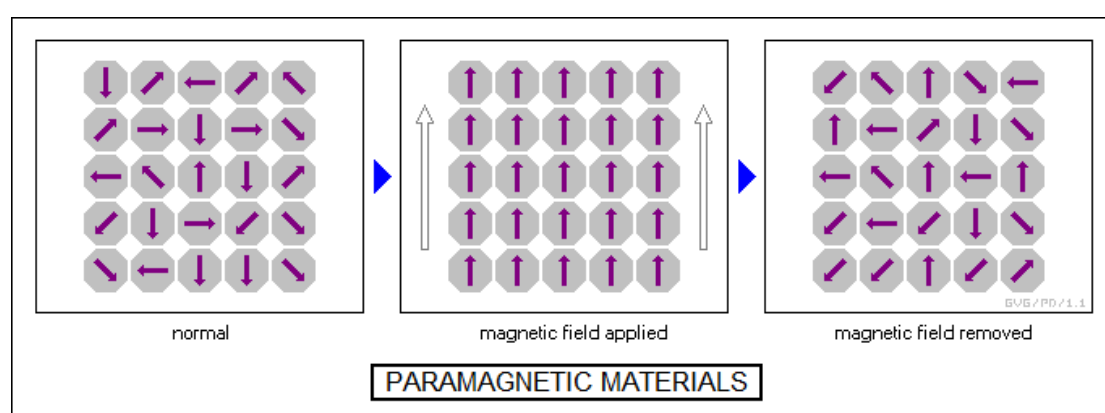
Σχήμα 4 Μαγνήτιση διαμαγνητικού υλικού που βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο [7].

### 2.2.2 Παραμαγνητικά

Είναι τα υλικά που προκαλούν ενίσχυση του επιβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας ( $\mu_r > 1$ ).

Στα παραμαγνητικά υλικά δεν παρατηρείται αλληλεξουδετέρωση μεταξύ των δύο μαγνητικών ροπών που οφείλονται στα spin των ηλεκτρονίων και στην τροχιακή τους κίνηση, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια μικρή μαγνητική ροπή σε κάθε άτομο. Λόγω όμως του τυχαίου προσανατολισμού όλων των μικροσκοπικών αυτών ατομικών-μαγνητικών δίπολων, σ' ένα δοκίμιο παραμαγνητικού υλικού – που φυσικά περιέχει ένα πολύ μεγάλο αριθμό ατόμων – η συνολική (συνισταμένη) μαγνητική ροπή είναι ίση με μηδέν. Παρατηρείται δηλαδή ότι και τα παραμαγνητικά υλικά, κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, δεν εμφανίζουν μαγνητικές δράσεις. Όταν όμως επιβληθεί κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $B$ , προκαλείται ένας επαναπροσανατολισμός των στοιχειωδών ατομικών διπόλων προς την κατεύθυνση ενίσχυσης του πεδίου (παραμαγνητικές δράσεις). Συγχρόνως όμως εξακολουθούν να υφίστανται οι διαμαγνητικές δράσεις οι οποίες οφείλονται στην

αλλαγή της κινητικής κατάστασης των ηλεκτρονίων και προκαλούν μια μικρή εξασθένηση του πεδίου. Αν οι διαμαγνητικές δράσεις είναι υπέρτερες των παραμαγνητικών, έχουμε ως καθαρό αποτέλεσμα των εξασθένηση του εξωτερικού πεδίου και το υλικό εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται ως διαμαγνητικό. Όταν όμως οι παραμαγνητικές δράσεις είναι μεγαλύτερες από τις διαμαγνητικές, παρατηρείται ενίσχυση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και το υλικό χαρακτηρίζεται ως παραμαγνητικό ( $\mu_r > 1$ ). Μερικά παραμαγνητικά υλικά είναι ο λευκόχρυσος ( $\mu_r = 1 + 0,36 \times 10^{-3}$ ), το αλουμίνιο ( $\mu_r = 1 + 22 \times 10^{-6}$ ), ο αέρας ( $\mu_r = 1 + 0,4 \times 10^{-6}$ ) και το οξυγόνο ( $\mu_r = 1 + 1,8 \times 10^{-6}$ ) [7].



Σχήμα 5 Μαγνήτιση παραμαγνητικού υλικού που βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο[7].

### 2.2.3 Σιδηρομαγνητικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν σαφώς διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες από τα υλικά των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Έτσι, η παρουσία τους σε κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο προκαλεί κατά πολλές φορές την ενίσχυσή του. Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών μπορεί να είναι εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μεγαλύτερη της διαπερατότητας του κενού ( $\mu_r \gg 1$ ). Επίσης τα σιδηρομαγνητικά υλικά εξακολουθούν να παραμένουν μαγνητισμένα και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το νικέλιο, η τρίτη ηλεκτρονική υποστοιβάδα είναι ασυμπλήρωτη και έχει αντίστοιχα 6,7 και 8 ηλεκτρόνια αντί 10. Ειδικά στον σίδηρο, ένα από τα 6 αυτά ηλεκτρόνια στρέφεται περί τον άξονά του με

φορά αντίθετη προς τη φορά περιστροφής των υπόλοιπων 5, με αποτέλεσμα να έχουμε μια καθαρή ατομική μαγνητική ροπή που προκύπτει από τα μη εξουδετερωμένα spin. Τα αντίστοιχα μη εξουδετερωμένα spin για το κοβάλτιο και το νικέλιο είναι 3 και 2. Λόγω της εμφάνισης ασυμπλήρωτων στοιβάδων με μη εξουδετερωμένα spins, μερικά ηλεκτρόνια ενός ατόμου μπορούν να βρεθούν πολύ κοντά στον πυρήνα κάποιου γειτονικού ατόμου και να σημειωθεί έτσι μια ανταλλαγή ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο ατόμων. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις (γνωστές ως κβαντομηχανικές δυνάμεις ανταλλαγής), είναι ηλεκτροστατικής φύσεως και σχετίζονται με την ενέργεια και το πεδίο ανταλλαγής. Το πεδίο αυτό που μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, στα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι θετικό.

Οι δυνάμεις ανταλλαγής είναι εκείνες που προκαλούν τον παράλληλο προσανατολισμό των γειτονικών spins στα σιδηρομαγνητικά υλικά, ενώ οι αμοιβαίες εσωτερικές δράσεις μεταξύ των γειτονικών διπόλων τείνουν να προσανατολιστούν τα γειτονικά άτομα έτσι, ώστε οι ροπές τους να είναι αντιπαράλληλες. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται με την παρουσία μαγνητικών περιοχών στα σιδηρομαγνητικά υλικά.

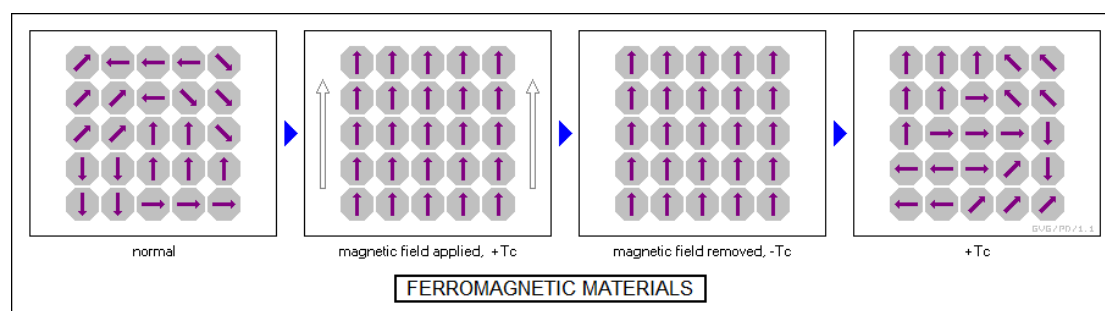
Ένα κύριο χαρακτηριστικό των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ότι απαρτίζονται από πολλές μικρές μαγνητικές περιοχές που είναι της τάξης μερικών μm. Τα ατομικά δίπολα αυτών των περιοχών έχουν κοινό προσανατολισμό. Τελικά, κάθε τέτοια περιοχή εμφανίζεται ως ένας μικρός μαγνήτης που η διεύθυνσή του εξαρτάται από την εντατική του κατάσταση, τη μαγνητική προϊστορία και την κρυσταλλική δομή του υλικού.

Κάτω από κανονικές συνθήκες και για ένα αρχικά αμαγνήτιστο κρύσταλλο ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, οι μαγνητικές περιοχές είναι παράλληλες προς τη διεύθυνση εύκολης μαγνήτισης εμφανίζοντας σε μακροσκοπική θεώρηση ένα τυχαίο προσανατολισμό. Έτσι λόγω της αλληλεξουδετέρωσης των μαγνητικών ροπών των περιοχών, το υλικό μακροσκοπικά εμφανίζεται αμαγνήτιστο. Όταν όμως επιβληθεί κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, οι μαγνητικές περιοχές αναδιατάσσονται, τείνοντας να προσανατολισθούν προς τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, ακριβώς όπως μια μαγνητική βελόνα τείνει να ευθυγραμμιστεί με το γήινο μαγνητικό πεδίο. Αν η ένταση του εξωτερικού πεδίου αυξάνει συνεχώς,

το υλικό φθάνει στην κατάσταση του μαγνητικού κορεσμού όπου έχουμε την ευθυγράμμιση προς το εξωτερικό επιβαλλόμενο πεδίο όλων σχεδόν των μαγνητικών περιοχών. Αλλά και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου το σιδηρομαγνητικό υλικό παραμένει μαγνητισμένο επειδή πολλές μαγνητικές περιοχές διατηρούν τον προσανατολισμό που απόκτησαν κατά τη μαγνήτιση του υλικού.

Οι σιδηρομαγνητικές ιδιότητες των υλικών εξαφανίζονται όταν αυτά θερμανθούν μέχρι το σημείο Curie. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες του σημείου Curie τα σιδηρομαγνητικά υλικά συμπεριφέρονται σαν παραμαγνητικά.

Συνηθέστερα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους με μαγγάνιο, αλουμίνιο, χρώμιο και πυρίτιο. Επίσης, σιδηρομαγνητικές ιδιότητες παρατηρούνται και σε μερικά κράματα μη σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως για παράδειγμα στα κράματα χαλκού-μαγγανίου και αλουμινίου λευκόχρυσου [6].



*Σχήμα 6 Μαγνήτιση σιδηρομαγνητικού υλικού που βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο[7].*

### 2.2.3.1 Βρόχος υστέρησης

Ας θεωρήσουμε ότι ένα αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό βρίσκεται σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού. Επιβάλλουμε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με ένταση  $H$  σε αυτό το κομμάτι, μέσω ενός πηνίου τυλιγμένου γύρω του, το οποίο διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$ . Για  $H=0$  είναι και  $B=0$ . Αν αυξήσουμε το  $H$  μέσα από την αύξηση του ρεύματος  $I$  και αποτυπώσουμε τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής  $B$  στο υλικό σαν συνάρτηση του  $H$ , θα παρατηρήσουμε ότι θα αρχίσει να πραγματοποιείται προσανατολισμός των μαγνητικών διπόλων των διαφόρων



περιοχών του υλικού, προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Το φαινόμενο θα εξελιχθεί σταδιακά, ανάλογα με την τιμή του πεδίου.

Για μικρές τιμές του  $H$  εκείνες οι μαγνητικές περιοχές του υλικού που έχουν μαγνητικές ροπές προσανατολισμένες σε κατευθύνσεις παραπλήσιες με αυτήν του εξωτερικού πεδίου, αυξάνονται σε βάρος των υπόλοιπων περιοχών. Αυτό το οποίο συμβαίνει είναι η μετακίνηση των συνόρων μεταξύ των μαγνητικών περιοχών σε βάρος δευτέρων. Αρχίζει, έτσι, να αυξάνεται η τιμή του  $B$ . Παρατηρούμε ότι οι μικρές τιμές του  $H$  δίνουν πολύ μεγάλες τιμές του  $B$ , λόγω του προσανατολισμού μεγάλου τμήματος των μαγνητικών ροπών προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, ή σε κατευθύνσεις παραπλήσιες με αυτήν.

Στη συνέχεια, αυξάνουμε ακόμη περισσότερο την τιμή της  $H$ . Οι περιοχές που αυξάνονταν πριν σε βάρος των άλλων, αυξάνονται ακόμη περισσότερο τώρα. Επίσης, το  $B$  αυξάνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Για μεγάλες τιμές του  $H$  οι μαγνητικές ροπές των διαφόρων περιοχών στρέφονται να προσανατολιστούν προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Όταν ο προσανατολισμός γίνει πλήρης, όλο το κομμάτι του σιδηρομαγνητικού υλικού καταλήγει σε μία ενιαία, μεγάλη μαγνητική περιοχή. Φτάνει τότε στην κατάσταση του μαγνητικού κόρου. Έστω  $H_k$  η τιμή του  $H$  και  $B_k$  η τιμή του  $B$ . Η μεταβολή στο τμήμα της καμπύλης είναι μη αντιστρεπτή και σε αυτήν ακριβώς οφείλεται η δημιουργία του βρόχου μαγνητικής υστέρησης. Αύξηση του  $H$  πέρα από την τιμή  $H_k$ , μεταβάλλει πολύ λίγο το  $B$  από την τιμή  $B_k$ . Το υλικό βρίσκεται στη κατάσταση του μαγνητικού κόρου και συμπεριφέρεται σαν μαγνητικό υλικό.

Έστω ότι  $H > H_k$ , δηλαδή το υλικό βρίσκεται στην κατάσταση του μαγνητικού κόρου. Στη συνέχεια, αρχίζουμε να ελαττώνουμε το ρεύμα στο πηνίο, επομένως και το  $H$ , μέχρι το σημείο όπου  $H=H_k$ , διότι η μεταβολή είναι αντιστρεπτή. Αν όμως το  $H$  γίνει μικρότερο του  $H_k$ , δεν ακολουθείται η αρχική καμπύλη μαγνήτισης. Στο υλικό σχηματίζονται και πάλι μαγνητικές περιοχές, με σύνορα που διαφέρουν σε κάποιο βαθμό από τα αρχικά. Για  $H=0$  η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται, αλλά παίρνει την τιμή  $B_r > 0$ , η οποία ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική επαγωγή. Αυτό οφείλεται στο ότι πολλές από τις μαγνητικές περιοχές εξακολουθούν να έχουν μαγνητικές ροπές, που διατηρούν τον προσανατολισμό τους προς την αρχική κατεύθυνση του

εξωτερικού πεδίου. Δηλαδή, για  $H=0$  (χωρίς εξωτερική διέγερση) το υλικό παραμένει αυθόρμητα μαγνητισμένο. Για να μηδενίσουμε τη μαγνητική επαγωγή αντιστρέφουμε τη φορά του ρεύματος στο πηνίο, επομένως και τη φορά του  $H$ . Η τιμή  $H_c$  ονομάζεται συνεκτικό πεδίο.

Αν το  $H$ , αντί να μεταβάλλεται μεταξύ των αντίθετων τιμών, συμμετρικών ως προς την αρχή των συντεταγμένων, μεταβάλλεται μεταξύ δύο οποιονδήποτε τυχαίων τιμών, σχηματίζονται βρόχοι υστέρησης μη συμμετρικοί ως προς την αρχή, οι οποίοι βέβαια βρίσκονται στο εσωτερικό του μέγιστου βρόχου.

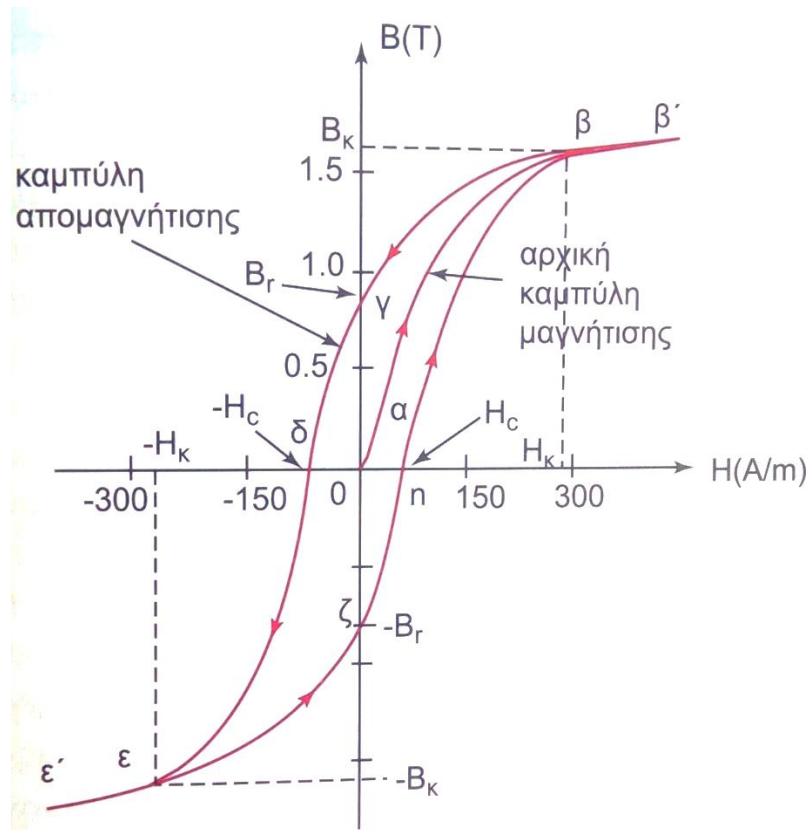
Είναι, λοιπόν, προφανές ότι για να βρούμε την τιμή του  $B$ , η οποία αντιστοιχεί σε κάποια συγκεκριμένη τιμή του  $H$ , πρέπει να γνωρίζουμε τη διαδικασία μαγνήτισης στην οποία υποβλήθηκε το υλικό και μάλιστα αν το  $H$  είναι αυξανόμενο ή μειούμενο.

Σημειώνεται, τέλος, ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά μεταβάλλουν ελαφρώς τις διαστάσεις τους (επιμηκύνονται ή βραχύνονται κατά την διαδικασία της μαγνήτισής τους). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητοσυστολή. Σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία γίνεται αντιληπτό από την παραγωγή βόμβου.

Αν στη συνέχεια αρχίσουμε να μειώνουμε βαθμιαία τη διέγερση (δηλαδή την ένταση του μαγνητικού πεδίου) προκύπτει και πάλι το ίδιο τμήμα της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης μέχρι το σημείο  $K$ .

Αν όμως εξακολουθήσουμε να μειώνουμε τη διέγερση και κάτω από σημείο  $K$  ( $H < H_K$ ), οι νέες τιμές της μαγνητικής επαγωγής δεν είναι ίδιες, αλλά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης. Έτσι, παρατηρούμε ότι ακόμα και όταν η διέγερση  $H$  μηδενιστεί, εξακολουθεί να υπάρχει στο σιδηρομαγνητικό υλικό η μαγνητική επαγωγή  $B_r$  που ονομάζεται παραμένων μαγνητισμός ή παραμένουσα μαγνητική επαγωγή.

Για τον μηδενισμό της μαγνητικής επαγωγής χρειάζεται να αντιστραφεί η φορά του επιβαλλόμενου πεδίου και η ένταση του να φθάσει κάποια αρνητική τιμή  $-H_c$  [5].



Σχήμα 7 Βρόγχος Υστέρησης Σιδηρομαγνητικού υλικού [5].

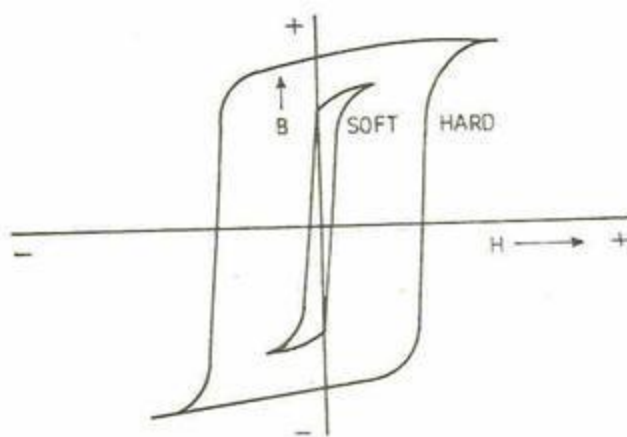
### 2.2.3.2 Κατηγορίες σιδηρομαγνητικών μαγνητικών υλικών

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διαιρούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα μαλακά (soft) και στα σκληρά (hard) μαγνητικά υλικά.

Στα μαλακά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης αυξάνεται απότομα ενώ ο οριακός βρόχος υστέρησης είναι στενός με μικρό εμβαδό. Λόγω του μικρού εμβαδού του βρόχου, οι απώλειες υστέρησης στα υλικά αυτά είναι, επίσης, μικρές. Μερικά από τα πιο κοινά μαλακά μαγνητικά υλικά είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας, τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου permalloy κ.λπ. Η χρησιμοποίηση μαλακών μαγνητικών υλικών σε διατάξεις και συστήματα που υπόκεινται στην επίδραση χρονικά εναλλασσόμενων ισχυρών μαγνητικών πεδίων

(π.χ. μετασχηματιστές ισχύος, ηλεκτρικοί κινητήρες, ηλεκτρικές γεννήτριες κ.λπ.) είναι επιβεβλημένη.

Στα σκληρά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν αυξάνεται απότομα ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο. Οι απώλειες υστέρησης στα υλικά είναι επίσης μεγάλες. Τυπικά σκληρά μαγνητικά υλικά είναι τα κράματα Alnico. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, στους οποίους επιδιώκουμε μεγάλες τιμές τόσο για την παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$ , όσο και για τη συνέχουσα δύναμη  $H_c$ , ώστε να μην είναι εύκολη η απομαγνήτισή τους[8].



Σχήμα 8 Βρόγχος Υστέρησης σκληρών και μαλακών υλικών [8]

### 2.2.3.3 Σιδηρομαγνητικές περιοχές

Ένα κομμάτι σιδήρου μπορεί να υπάρχει είτε σε μαγνητισμένη, είτε σε μη μαγνητισμένη κατάσταση. Η απάντηση σε αυτό είναι ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό διασπάται σε περιοχές. Κάθε περιοχή είναι πλήρως μαγνητισμένη, αλλά οι διάφορες περιοχές μπορούν να έχουν τυχαίο προσανατολισμό και επομένως να εμφανίζονται ως αμαγνήτιστες από μακροσκοπική άποψη. Ο Weiss ήταν ο πρώτος που θεμελίωσε αξιωματικά την ύπαρξη των περιοχών το 1907.

Κατά τη διέλευση από μια περιοχή σε μία γειτονική της, το διάνυσμα της ατομικής ροπής  $m_0$  περιστρέφεται βαθμιαία από την αρχική προς τη νέα του διεύθυνση σε ένα

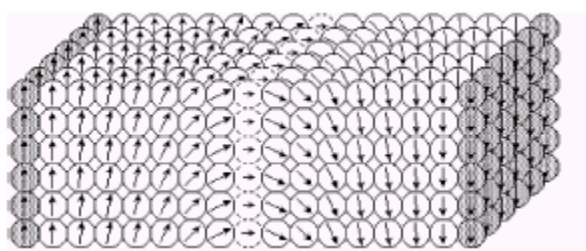
σύνολο από περίπου 100 άτομων. Αυτός ο χώρος μεταξύ δύο περιοχών ονομάζεται μαγνητικό τοίχωμα. Αποδεικνύεται ότι μια ατομική ροπή του σπιν στο χώρο του τοιχώματος υπόκειται σε ένα ελαφρώς μικρότερο μοριακό πεδίο απ' ό,τι μια ατομική ροπή του σπιν στο εσωτερικό της περιοχής. Αυτή η παρατήρηση από μόνη της θα ευνοούσε μια απλή διαμόρφωση περιοχών. Από την άλλη, ένα υλικό που αποτελείται από μία και μοναδική περιοχή πρέπει να διατηρεί ένα μεγάλο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ενώ ένα υλικό με πολλές περιοχές έχει μικρότερη μαγνητική ενέργεια που σχετίζεται με τη δομή του πεδίου του. Συνεπώς, μια δομή πολλών περιοχών συνήθως ευνοείται από ενεργειακή άποψη.

Τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της μαγνήτισης σε σιδηρομαγνητικά υλικά σχετίζονται με μεταβολές στη διαμόρφωση περιοχών. Η αύξηση της μαγνήτισης που προκύπτει από τη δράση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου συμβαίνει μέσω δύο ανεξάρτητων διαδικασιών: μέσω μιας αύξησης του όγκου που είναι ευνοϊκά προσανατολισμένες ως προς το πεδίο, σε βάρος περιοχών που δεν είναι ευνοϊκά προσανατολισμένες (κίνηση του τοιχώματος της περιοχής), ή, μέσω περιστροφής της μαγνήτισης των περιοχών προς τη διεύθυνση του πεδίου.

Σε ασθενή εξωτερικά πεδία, η μαγνήτιση συνήθως μεταβάλλεται μέσω της κίνησης των τοιχωμάτων περιοχής. Σε καθαρά υλικά που αποτελούνται από μία και μοναδική φάση, η κίνηση του τοιχώματος της περιοχής είναι σε μεγάλο βαθμό αντιστρεπτή στην περιοχή ασθενούς πεδίου. Σε ισχυρότερα πεδία, η μαγνήτιση εξελίσσεται μέσω μη αντιστρεπτής κίνησης του τοιχώματος και τελικά, μέσω της περιστροφής της περιοχής. Σε αυτές τις συνθήκες το υλικό παραμένει μαγνητισμένο, όταν απομακρυνθεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Η πειραματική μελέτη των περιοχών έγινε δυνατή μέσω μιας τεχνικής που αναπτύχθηκε αρχικά από τον F.H. Bitter . Μια πολύ καλά επεξεργασμένη μαγνητική σκόνη σκορπίζεται στην επιφάνεια του υλικού και τα σωματίδια της, τα οποία συγκεντρώνονται κατά μήκος των συνόρων των περιοχών, μπορούν να παρατηρηθούν μέσω μικροσκοπίου. Μέσω αυτής της τεχνικής, κατέστη δυνατή η παρατήρηση της κίνησης των τοιχωμάτων κάτω από τη δράση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μέγεθος των περιοχών κυμαίνεται πολύ, και εξαρτάται από το

είδος του υλικού, το ιστορικό του και ούτω καθεξής. Τυπικές τιμές αυτής της διακύμανσης είναι από  $10^{-6}$  έως  $10^{-2} \text{ cm}^3$  [8].



Σχήμα 9 Μετακίνηση μαγνητικών περιοχών [8].

#### 2.2.3.4 Μαγνητικά τοιχώματα

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται από περιοχές, στις οποίες η μαγνήτιση προσανατολίζεται κατά μήκος των εύκολων αξόνων. Η περιοχή μετάβασης, κατά την οποία ο προσανατολισμός αλλάζει από την εύκολη διεύθυνση σε κάποια άλλη, λέγεται μαγνητικό τοίχωμα. Διακρίνονται διάφοροι τύποι μαγνητικών τοιχωμάτων, ανάλογα με τον προσανατολισμό της μαγνήτισης εντός του τοιχώματος σε σχέση με αυτόν των γύρω περιοχών. Ένας τύπος τοιχώματος ονομάζεται τοίχωμα Neel. Μέσα σε ένα τοίχωμα Neel η μαγνήτιση έχει μη μηδενική απόκλιση  $\nabla \cdot M$ , ενώ σε ένα τοίχωμα Bloch είναι  $\nabla \cdot M \equiv 0$ . Η μη μηδενική απόκλιση δημιουργεί ένα πεδίο μαγνητικής αποπόλωσης  $H_{dep}$  και το βαθμωτό γινόμενο του πεδίου αυτού με τη μαγνήτιση  $H_{dep}$  συνεισφέρει στην ενέργεια του τοιχώματος [9].

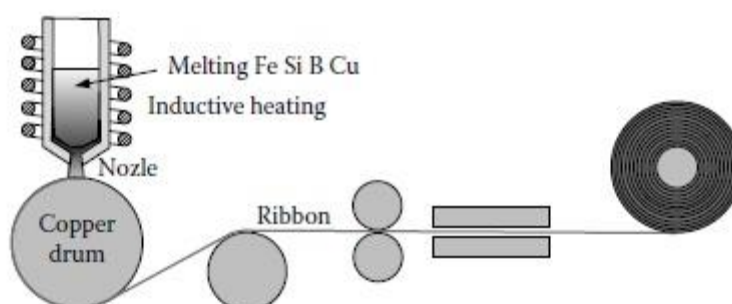
#### 2.2.3.1 Παραγωγή άμορφων ταινιών

Οι άμορφες ταινίες αποτελούν είδος μαλακού μαγνητικού υλικού. Το υλικό το οποίο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση ψύχεται σε πολύ γρήγορο χρόνο έτσι ώστε να μην μπορεί να προλάβει να σχηματιστεί η κρυσταλλική δομή.

Για να εξυπηρετηθεί ο σχηματισμός της άμορφης κατάστασης προστίθενται μικρές ποσότητες μεταλλοειδών έτσι ώστε να βελτιωθεί το ιξώδες του τηγμένου μετάλλου. Όταν η ταινία ψύχεται και είναι πολύ μικρή και το πάχος της δεν ξεπερνάει τα 50  $\mu\text{m}$ . Το πλάτος της ταινίας επίσης είναι πολύ μικρό και ξεπερνάει τα 20  $\mu\text{m}$ .

Οι άμορφες ταινίες που έχουν στη βάση τους το κοβάλτιο παρουσιάζουν πολύ σημαντικές ιδιότητες. Πολύ υψηλή διαπερατότητα και αμελητέα μαγνητοσυστολή. Τα μειονεκτήματά τους ωστόσο είναι ότι δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση και πολύ χαμηλές θερμοκρασίες Curie.

Από την άλλη πλευρά οι ταινίες που είναι βασισμένες σε σίδηρο παρουσιάζουν υψηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση, αλλά υστερούν σε διαπερατότητα. Οι μαγνητικές ιδιότητες των άμορφων ταινιών μπορούν να βελτιωθούν με ανόπτηση σε διάμηκες μαγνητικό πεδίο. Επειδή το υλικό είναι εύθραυστο, η ανόπτηση γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις στην τελική μορφή του πυρήνα [12].



Σχήμα 10 Διάταξη παραγωγής άμορφης ταινίας [12]

Στα άμορφα σύρματα με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή όπως το Co-Fe-Si-B η ανισοτροπία τους θεωρείται συχνά όμοια με αυτή των άμορφων συρμάτων με αρνητική μαγνητοσυστολή αν και επηρεάζεται από τη θερμική και μηχανική επίδραση.

Μελέτες γύρω από την επίδραση του εφελκυσμού και της ανόπτησης στα άμορφα σύρματα έχουν δείξει ότι η ανόπτηση υπό την επίδραση του εφελκυσμού ή

μαγνητικού πεδίου εισάγει μαγνητικές ανισοτροπίες που είναι υπεύθυνες για τη διαμόρφωση της δομής των μαγνητικών περιοχών. Στα μαγνητικά σύρματα με ηλεκτρόλυση, οι μαγνητικές περιοχές στην εξωτερική επιφάνεια έχουν είτε ακτινική είτε κυκλική ανισοτροπία αλλά το εσωτερικό του σύρματος είναι ένας μη μαγνητικός αγωγός.

Στα άμορφα σύρματα με περίβλημα υάλου με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή, όπως ο πυρήνας Co-Fe-Si-B, λόγω της διακύμανσης μαγνητοσυστολικών και μαγνητοελαστικών ενεργειών, ο βρόχος υστέρησης είναι κανονικός και δεν εμφανίζονται άλματα Barkhausen [13].

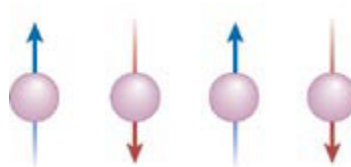
#### 2.2.4 Αντισιδηρομαγνητικά

Αντισιδηρομαγνητισμός ονομάζεται το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο οι ισχυρές δυνάμεις ανταλλαγής, οι οποίες ασκούνται μεταξύ των γειτονικών ατόμων μαγνητικών διπόλων, προσανατολίζουν παράλληλα και αντίρροπα τις μαγνητικές ροπές. Οι μαγνητικές ροπές σε αυτή την περίπτωση έχουν ίσα μέτρα, σε αντίθεση με τα σιδηριμαγνητικά υλικά, όπου οι δύο αντιπαράλληλες ομάδες μαγνητικών ροπών έχουν άνισα μέτρα. Αντισιδηρομαγνητικά υλικά είναι το χρώμιο και το μαγγάνιο καθώς και οι διάφορες ενώσεις όπως π.χ. MnO, FeO, CoO, NiO, FeF<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>, MnS κτλ. Οι αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές εξουδετερώνονται μεταξύ τους στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά, με αποτέλεσμα αυτά να εμφανίζονται αμαγνήτιστα χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όμως, ακόμη και η παρουσία ενός τέτοιου μαγνητικού πεδίου προκαλεί μικρή μόνο συνολική καθαρή μαγνητική ροπή και επομένως μικρή μαγνήτιση του υλικού.

Αυτό συμβαίνει σε χαμηλές θερμοκρασίες. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η θερμική ενέργεια τείνει να καταστρέψει τον αντιπαράλληλο προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών και ένα εξωτερικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη μαγνήτιση του υλικού. Σε μια κρίσιμη θερμοκρασία  $T_N$ , χαρακτηριστική για κάθε αντισιδηρομαγνητικό υλικό, η οποία ονομάζεται θερμοκρασία Neel, οι μαγνητικές



ροπές αποκτούν τυχαίους προσανατολισμούς και επάνω από την  $T_N$  το υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό[14].



Σχήμα 11 Μαγνητικές ροπές αντισιδηρομαγνητικού υλικού [6].

### 2.2.5 Σιδηριμαγνητικά

Ο σιδηριμαγνητισμός είναι φαινόμενο ανάλογο με τον αντισιδηρομαγνητισμό, με τη μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή οι δύο ομάδες των αντιπαράλληλων ατομικών μαγνητικών ροπών, λόγω των spins, έχουν διαφορετικά μέτρα. Επομένως προκύπτει μία συνισταμένη μαγνητική ροπή ίση με τη διαφορά των ροπών των δύο ομάδων. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά εμφανίζονται μακροσκοπικά αμαγνήτιστα χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, διότι και σε αυτά υπάρχουν μαγνητικές περιοχές, αυθόρμητα μαγνητισμένες, με διευθύνσεις τυχαία διαφορετικές από περιοχή σε περιοχή. Συμπεριφέρονται ανάλογα με τα σιδηρομαγνητικά εμφανίζοντας βρόχους υστέρησης, αν και η τιμή της μαγνητικής επαγωγής κόρου  $B_K$ , δεν είναι τόσο μεγάλη, όσο στα τελευταία[7].

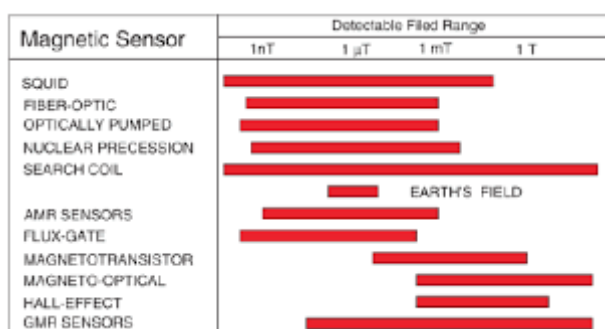
### 2.3 Μαγνητικοί αισθητήρες

Οι μαγνητικοί αισθητήρες εντοπίζουν και μετρούν τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου γύρω τους. Οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι αισθητήρες ροής πυκνότητας του μαγνητικού πεδίου. Γνωστοί μαγνητικοί αισθητήρες είναι οι αισθητήρες fluxgate, οι αισθητήρες Hall, οι αισθητήρες SQUID, οι αισθητήρες GMR και οι αισθητήρες AMR.

Τα πολύ μικρά μαγνητικά πεδία όπως είναι τα βιομαγνητικά πεδία, μετρούνται με τους αισθητήρες SQUID. Για τιμές πάνω από 0.1 nT, δύο είδη αισθητήρων μπορούν

να χρησιμοποιηθούν: Οι αισθητήρες μετάπτωσης πρωτονίου και οι αισθητήρες πύλης ροής (fluxgate). Οι αισθητήρες μετάπτωσης πρωτονίου έχουν πολύ μεγάλη ανάλυση και ανιχνεύουν τη βάθμωση του μαγνητικού πεδίου. Για αυτό το λόγο, συνήθως χρησιμοποιούνται στην Γεωφυσική και για έρευνες στο διάστημα. Πιο πολύπλευροι σε ένα παρόμοιο εύρος είναι οι αισθητήρες fluxgate. Σε ένα εύρος γύρω από το μαγνητικό πεδίο της Γης, πολύ οικονομικότεροι είναι οι ανιστροπικοί μαγνητικοί αισθητήρες αντίστασης (AMR) και οι (GMR) αισθητήρες. Μεγάλα μαγνητικά πεδία μετρούνται από τους αισθητήρες Hall.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται στα συστήματα ελέγχου για την ανίχνευση της θέσης εξ αποστάσεως χωρίς φθορές εκεί όπου δεν αντέχουν οι επαγωγικοί διακόπτες. Καθώς τα μαγνητικά πεδία διαπερνούν και όλα τα μη μαγνητιζόμενα υλικά, οι αισθητήρες μπορούν να αναγνωρίζουν μαγνητικά πεδία διαμέσου τοιχωμάτων π.χ. από μη σιδηρούχα μέταλλα, χάλυβα, αλουμίνιο, πλαστικό ή ξύλο. Το πλεονέκτημα συγκριτικά με τους επαγωγικούς αισθητήρες είναι ότι οι μαγνητικοί έχουν σημαντικά μεγαλύτερη απόστασης ανίχνευσης και μικρότερο μέγεθος.



Σχήμα 12 Εύρος μετρήσεων μαγνητομέτρων[16].

### 2.3.1 Μαγνητικοί αισθητήρες SQUIDS

#### 2.3.1.1 Φαινόμενο Josephson

Η ένωση Josephson είναι μία ένωση μεταξύ δύο υπεραγωγών οι οποίοι χωρίζονται από έναν λεπτό μονωτή (με πάχος ορισμένα νανόμετρα). Αν το μονωτικό φράγμα

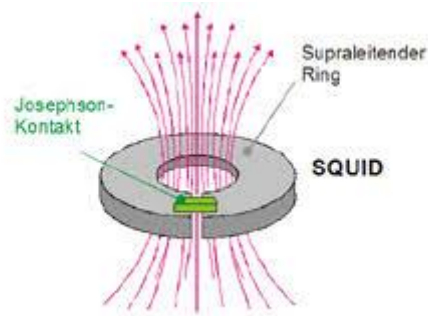
είναι αρκετά λεπτό, τότε υπάρχει η πιθανότητα ένα ζεύγος Cooper να διασχίσει την ένωση λόγω του φαινομένου της σήραγγας. Η φάση της κυματοσυνάρτησης  $\Psi$  του ζεύγους Cooper αλλάζει κατά  $\theta$  όταν το ζεύγος διασχίσει την ένωση, αφού το ζεύγος υπερπηδά ένα φράγμα δυναμικού. Το μέγιστο υπεραγώγιμο ρεύμα  $I_c$  που είναι δυνατόν να ρέει μέσα από αυτήν την ένωση εξαρτάται, από το πάχος και την επιφάνεια του μονωτικού, καθώς και από τα υπεραγώγιμα υλικά και τη θερμοκρασία. Το ρεύμα  $I$  που ρέει δια μέσου της ένωσης λόγω του φαινομένου της σήραγγας, καθορίζεται από τη γωνία φάσης  $\theta$ , έχει ως εξής:

$$I = I_c \sin\theta \quad (2.6)$$

όπου  $I_c$  είναι το μέγιστο ή κρίσιμο ρεύμα. Αν το ρεύμα στην ένωση ελέγχεται από ένα εξωτερικό κύκλωμα, τότε τα ζεύγη Cooper σε κάθε πλευρά της ένωσης (στους υπεραγωγούς) θα προσαρμόσουν τις φάσεις τους ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω εξίσωση [9].

#### 2.3.1.1 Αισθητήρες SQUIDS

Πρόκειται για πολύ ευαίσθητα μαγνητόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν πολύ ασθενή σήματα, όπως για παράδειγμα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του ανθρώπινου σώματος. Με τη χρήση της επαφής Josephson, τα SQUIDS ανιχνεύουν μεταβολές της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας 100δισ φορές ασθενέστερες από την ενέργεια που κινεί την βελόνα μιας πυξίδας. Τα μαγνητόμετρα SQUID αποτελούνται από δύο μικροσκοπικούς βρόχους υπεραγωγών που λειτουργούν ως επαφές Josephson, με τους οποίους επιτυγχάνεται υπέρθεση. Τα SQUIDS έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για δοκιμαστικούς σκοπούς που απαιτούν ιδιαίτερη ευαισθησία, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, ιατρικών και γεωλογικών εξοπλισμών. Λόγω του ότι μετρούν μεταβολές σε μαγνητικά πεδία με μεγάλη ευαισθησία, δεν είναι απαραίτητο να έρθουν σε επαφή με το σύστημα το οποίο ελέγχουν.



Σχήμα 13 Μαγνητόμετρο SQUID και τρόπος λειτουργίας [10].



Σχήμα 14 Μαγνητόμετρα SQUID [10]

### 2.3.2 Μαγνητικοί αισθητήρες fluxgate

Οι αισθητήρες fluxgate είναι γνωστοί από το 1936 και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα εξαιτίας πολλών πλεονεκτημάτων που τους χαρακτηρίζουν. Η ανάλυση ξεκινάει από 1pT. Η λειτουργία ενός τέτοιου αισθητήρα βασίζεται στο γεγονός ότι η καμπύλη μαγνητίσεως είναι συμμετρική. Οι αισθητήρες fluxgate είναι μία εξαιρετική επιλογή για το εύρος μεταξύ των SQUID και των AMR αισθητήρων, δηλαδή του εύρους μεταξύ 1nT και 100μT. Εξαιτίας της τάσης τα τελευταία χρόνια να γίνονται όλο και μικρότερα τα τεχνολογικά συστήματα, έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες fluxgate μικρού μεγέθους οι οποίοι είναι συμβατοί με ημιαγωγούς και μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα [15].

### 2.3.2.1 Λειτουργία μαγνητομέτρων fluxgate

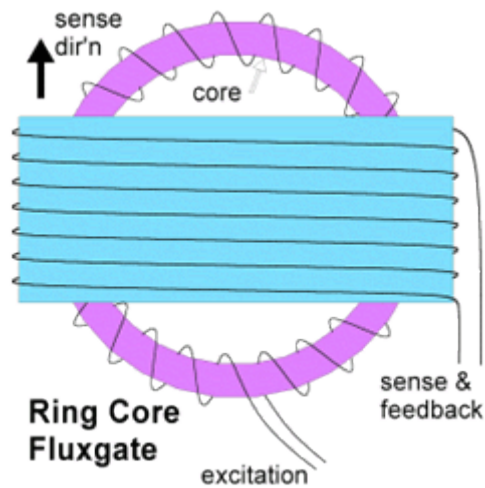
Τα μαγνητόμετρα τύπου fluxgate χρησιμοποιούν έναν πυρήνα υψηλής διαπερατότητας ο οποίος βοηθάει στη συγκέντρωση του προς μέτρηση μαγνητικού πεδίου. Χρησιμοποιούν, επίσης, κατάλληλα πηνία διέγερσης και λήψης, σε διάφορες τοπολογίες. Ένα εναλλασσόμενο πεδίο που δημιουργείται από το πηνίο διέγερσης διοχετεύεται στον πυρήνα προκαλώντας έντονη μαγνητική ροή. Στη συνέχεια, ο πυρήνας φθάνει στον θετικό και αρνητικό κορεσμό. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης εμφανίζει μέγιστα και ελάχιστα μετατοπισμένα ως προς το πλάτος και το χρόνο. Η συμμετρία αυτών των στοιχείων διαταράσσεται όταν επιβληθεί ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο στον αισθητήρα. Η μέτρηση αυτών των διαφορών μπορεί να δώσει πληροφορίες για την τιμή και διεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου. Δύο χαρακτηριστικοί τύποι αισθητήρων fluxgate, παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Parallel fluxgate**

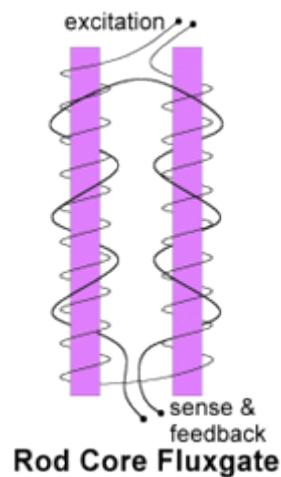
Η ονομασία προέρχεται από το γεγονός ότι το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Αποτελείται από έναν μαγνητικό δακτύλιο ή από πυρήνα που έρχεται περιοδικά σε κορεσμό και από τις δύο διευθύνσεις, από εναλλασσόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το πηνίο διέγερσης λαμβάνει το σήμα του εναλλασσόμενου πεδίου ενώ η τάση εξόδου λαμβάνεται από το πηνίο λήψης[15].

- **Orthogonal fluxgate**

Σε αυτή την κατηγορία το πεδίο διέγερσης είναι κάθετο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου και από εκεί προκύπτει η ονομασία. Αποτελούνται από κυλινδρικό πυρήνα μαλακού μαγνητικού υλικού και από ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω του. Το ρεύμα διέγερσης ρέει μέσα από τον πυρήνα, προκαλώντας πεδίο  $H_D$ , το οποίο σε συνδυασμό με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H$  φέρνει τον πυρήνα σε κορεσμό περιοδικά με αντίθετες πολώσεις. Η τάση εξόδου λαμβάνεται και εδώ μέσω του πηνίου λήψης[16].



Σχήμα 15 Τύπος αισθητήρα fluxgate με τοροειδές πηνίο[15]



Σχήμα 16 Τύπος αισθητήρα fluxgate με δύο πηνίο διέγερσης[15]

### 2.3.3 Μαγνητικοί αισθητήρες Hall

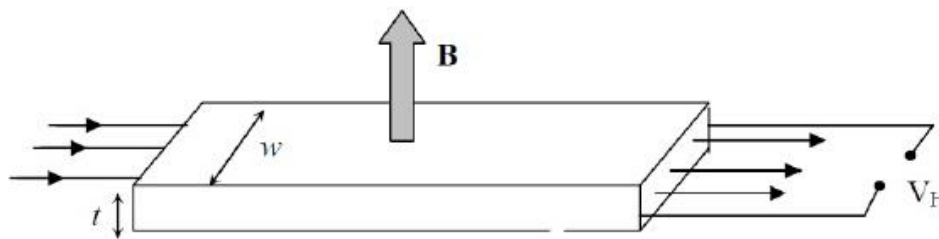
Με τους αισθητήρες Hall αποφεύγονται οι μεταλλικές επαφές και τα προβλήματα αυτών. Η μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων Hall έχουν κατεβάσει τόσο φθηνά το κόστος, ώστε ένας αισθητήρας Hall να είναι να είναι κατά πολύ φθηνότερος σε σχέση με άλλους μαγνητικούς αισθητήρες.

Ο μαγνητικός αισθητήρας Hall ανακαλύφθηκε το 1879 από τον φοιτητή Edwin Hall. Βασίζεται στη δύναμη Lorentz, η οποία επιδρά με ηλεκτρικό φορτίο  $q$  το οποίο κινείται με ταχύτητα  $v$  και περιγράφεται με τα μεγέθη  $E$  και  $B$  από την σχέση

$$F = q(E + v \times B) \quad (2.7)$$

Μπορούμε να περιγράψουμε το ηλεκτρικό πεδίο Hall σαν  $E_H = -\frac{1}{qN} (J \times B) = -R_H (J \times B)$  όπου  $R_H$  είναι ο συντελεστής Hall.

Έτσι, για μία δοσμένη τιμή ρεύματος  $I$ , ο αισθητήρας Hall μετρά την τιμή του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετο σε αυτό, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα [17].



*Σχήμα 17 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall*

Η τάση που προκύπτει και είναι κάθετη στην ένταση του ρεύματος και στο μαγνητικό πεδίο, ονομάζεται τάση Hall και δίνεται από τον τύπο[17]:

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{t} \quad (2.8)$$

όπου

- $R_H$  ο συντελεστής Hall
- $I_x$  η ένταση του ρεύματος κατά τη διεύθυνση του άξονα  $x$
- $B_z$  το μαγνητικό πεδίο κατά τη διεύθυνση του άξονα  $z$
- $t$  το πάχος του ημιαγωγού

## 2.4 Διακρίβωση μαγνητομέτρων

Τα μαγνητόμετρα συναντώνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών που περιλαμβάνει τις επιστήμες, τις μεταφορές και τη βιομηχανία. Η διακρίβωση των μαγνητομέτρων είναι μια απαραίτητη διαδικασία για την σωστή και αξιόπιστη λειτουργία τους. Η επίτευξη της διακρίβωσης του μαγνητόμετρου προϋποθέτει την εξάλειψη του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου από τον περιβάλλοντα χώρο στον οποίο διενεργούνται μετρήσεις. Για να διακριβωθεί ένα σύστημα από αισθητήρες μαγνητόμετρων απαιτείται μια μέθοδος που θα παρέχει γνωστές τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου για κάθε άξονα[28].

Οι παραμορφώσεις και οι παραλλαγές του μαγνητικού πεδίου της Γης κάνουν τη διακρίβωση για τους αισθητήρες μαγνητικού πεδίου ιδιαίτερα δύσκολη, με το αστικό περιβάλλον να αποτελεί το δυσκολότερο πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μαγνητικής μόλυνσης από όλα τα είδη πηγών, όπως μπορεί να είναι τα διερχόμενα αυτοκίνητα, τα τρένα, τα πλοία ή επίσης από τα κοντινά αντικείμενα που θα μπορούσαν να είναι μετακινούμενες καρέκλες ή προσωπικά αντικείμενα με μαγνητικό μηχανισμό, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν μη επιθυμητές ανωμαλίες, που παρεμποδίζουν τη διαδικασία βαθμονόμησης. Γι' αυτό το λόγο, συνήθως επιλέγονται μαγνητικά ήσυχες περιοχές, μακριά από το αστικό περιβάλλον[29].

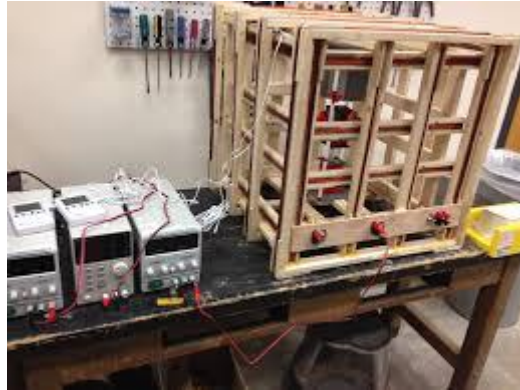
### 2.4.1 Διακρίβωση με πηνία

Η διακρίβωση με πηνία είναι μια ακριβή μέθοδος. Ένα από τα πλεονεκτήματά της είναι ότι επιτρέπει την εκτέλεση αυτοματοποιημένων μετρήσεων.

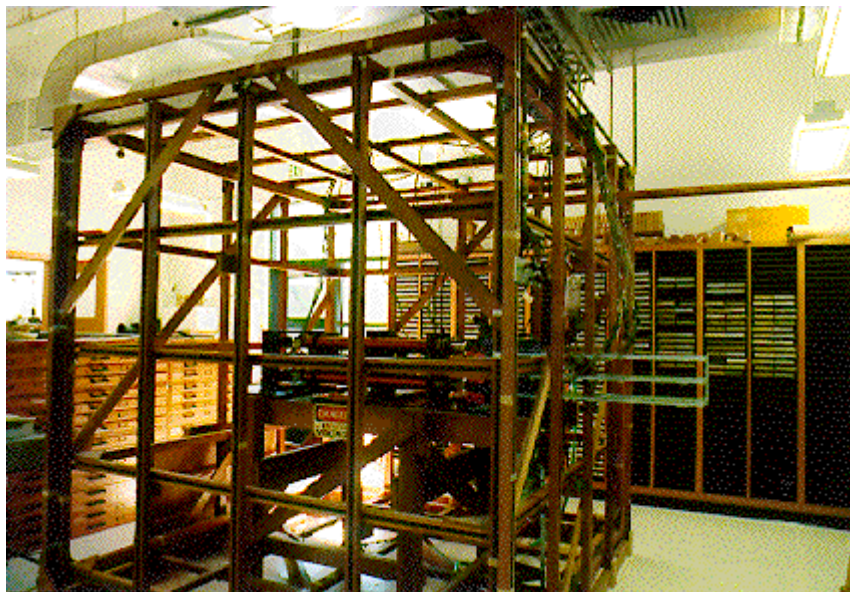
Σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιούνται πηνία συγκεκριμένων διαστάσεων. Τα πιο γνωστά πηνία που χρησιμοποιούνται είναι τα πηνία Helmholtz. Τα πηνία Helmholtz αποτελούνται από δύο όμοια και με ίδιο αριθμό σπειρών πηνία, με κοινό άξονα,



συνδεδεμένα σε σειρά και με ίδια φορά περιέλιξης. Η απόσταση μεταξύ των πηνίων είναι ίση με την κοινή τους ακτίνα. Αυτό συμβαίνει για να επιτευχθεί η δημιουργία ενός ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου στο χώρο που υπάρχει ανάμεσά τους [30].



*Σχήμα 18 Πηνία Helmholtz σε μορφή κύβου [18].*

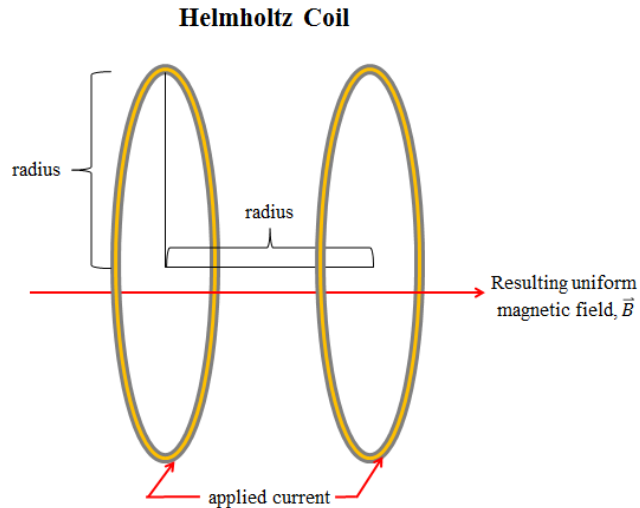


*Σχήμα 19 Χώρος διακρίβωσης μαγνητομέτρων με πηνία Helmholtz [19].*

Τα ζεύγη πηνίων Helmholtz χρησιμοποιούνται για να εξουδετερωθεί το μαγνητικό πεδίο της Γης ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που το μετρούμενο πεδίο είναι κατά πολύ ασθενέστερο του πεδίου της. Πρωταρχικός σκοπός των πηνίων αυτών είναι να θέτουν ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο, ίσο και αντίθετο με το μαγνητικό πεδίο της Γης, ώστε να το εκμηδενίζουν και να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις. Η τοποθέτηση τριών τέτοιων ζευγών πηνίων Helmholtz έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των μαγνητικών πεδίων και στις τρεις διαστάσεις. Αυτό προϋποθέτει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος με ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο, για την τροφοδοσία των πηνίων. Οπότε, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που θα επιτρέπουν τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου και την προσαρμογή της τροφοδοσίας των πηνίων[28].



*Σχήμα 20 Πηνία Helmholtz [20]*



Σχήμα 21 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά πηνίων Helmholtz [21]

#### 2.4.2 Διακρίβωση με σωληνοειδές

Για να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο, ώστε να πραγματοποιηθεί η διακρίβωση των αισθητήρων σε έναν άξονα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σωληνοειδές αρκετά μεγάλο σε μέγεθος, ώστε να δημιουργείται ομογενές πεδίο στο κέντρο του. Τότε, το πεδίο θα δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu_0 nI \quad (2.9)$$

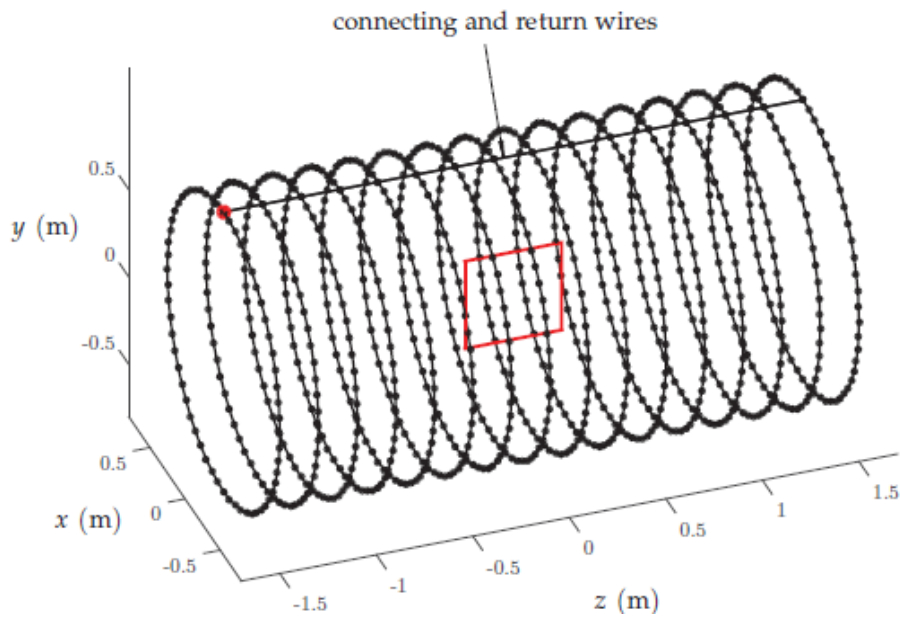
όπου  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα και  $I$  η ένταση του ρεύματος. Για ένα σωληνοειδές για το οποίο το μήκος είναι προσδιορισμένο οι στροφές του πηνίου ανά μονάδα μήκους μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση  $n = \frac{N}{L}$ .

Λόγω του περιορισμένου μήκους οποιουδήποτε σωληνοειδούς, το μαγνητικό πεδίο δεν θα είναι τέλειο και θα παρεκκλίνει από το  $B_\infty$  σε όλο τον όγκο του σωληνοειδούς.

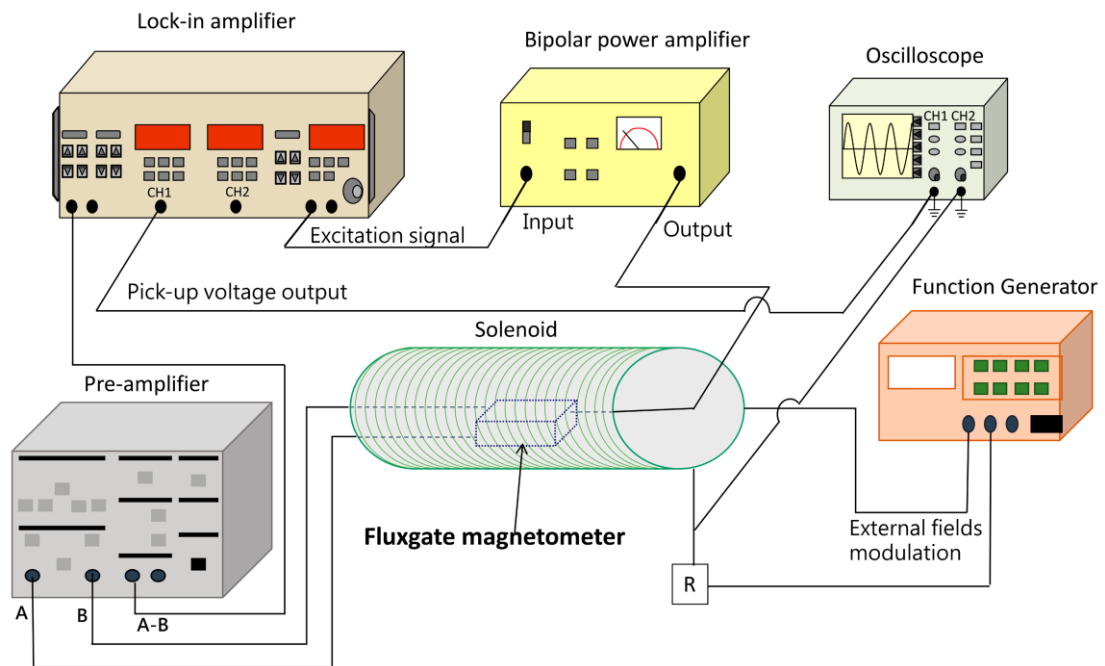
Σε αυτήν την περίπτωση, ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$B = \frac{\mu NI}{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} \quad (2.10)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα του σωληνοειδούς[22].



Σχήμα 22 Περιελίξεις σωληνοειδούς[23]



Σχήμα 23 Χρήση σωληνοειδούς σε διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρου fluxgate [24]

### 2.4.3 Μαγνητική θωράκιση

Το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει στη Γη αλλά και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα επηρεάζουν τις συσκευές μέτρησης των μαγνητικών πεδίων όπως είναι και οι συσκευές μαγνητομέτρων. Ειδικότερα στα αστικά και βιομηχανικά σημεία, είναι πολύ έντονη η παρουσία τέτοιου είδους μαγνητικών πεδίων. Σε πολλές μαγνητικές εφαρμογές, ανεπιθύμητα μαγνητικά πεδία όπως το γεωμαγνητικό πεδίο και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες παρεμβαίνουν στην σωστή λειτουργία τους. Για παράδειγμα σε βιομαγνητικές μετρήσεις όπως η μαγνητοκαρδιογραφία (MCG) και μαγνητοεγκεφαλογραφία (MEG) όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι της τάξεως των 10pT και 1pT αντίστοιχα, το μαγνητικό πεδίο για να μετρηθεί σωστά πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί μαγνητική θωράκιση[25]. Ο συνήθης τρόπος για να πραγματοποιηθεί η μαγνητική θωράκιση της εφαρμογής από τα επιβαλλόμενα μαγνητικά πεδία είναι να χρησιμοποιούνται θωρακισμένοι μαγνητικά χώροι οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι με τη χρήση μαγνητικών υλικών. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες οι οποίες έχουν ως στόχο να πραγματοποιηθεί η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια[26].

Η μαγνητική θωράκιση μιας διάταξης διακρίβωσης μαγνητόμετρων, μπορεί να είναι είτε παθητική είτε ενεργητική. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται κατάλληλα υλικά, όπως είναι το αλουμίνιο, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, δημιουργώντας μια ευκολότερη οδό διελεύσεως των μαγνητικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου. Όμως, στην περίπτωση των συνεχών μαγνητικών πεδίων και των μαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων, οι διατάξεις παθητικής μαγνητικής θωράκισης κρίνονται αναποτελεσματικές με συνέπεια να είναι αναγκαία η χρήση τεχνικών ενεργητικής μαγνητικής θωράκισης.

Η ενεργητική μαγνητική θωράκιση είναι μία τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα πηνία Helmholtz που αναλύθηκαν παραπάνω, αποτελούν μια οικονομική μέθοδο για αυτή την εφαρμογή. Με την

ενεργητική μαγνητική θωράκιση, δημιουργείται ένας χώρος εξάλειψης του μαγνητικού πεδίου, μέσω της αντιστάθμισης βάσει ενός συστήματος κλειστού βρόχου, που λαμβάνει μετρήσεις και προσαρμόζει κατάλληλα την ένταση του ρεύματος που θα δημιουργήσει το πεδίο αντιστάθμισης[27].



### **3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

#### 3.1 Σκοπός και σύντομη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διακρίβωση μαγνητομέτρων, βασισμένη στην κατασκευή ενός σωληνοειδούς. Για τη δοκιμή της διάταξης, χρησιμοποιήθηκαν ένας αισθητήρας fluxgate ο οποίος κατασκευάστηκε στο εργαστήριο αισθητήρων και ένας αισθητήρας Hall. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο κέντρο του σωληνοειδούς, ώστε να υποβληθούν υπό την επίδραση σταθερού μαγνητικού πεδίου.

Αρχικά, το μαγνητόμετρο fluxgate τοποθετήθηκε στο κέντρο της διάταξης διακρίβωσης. Στο πηνίο διέγερσης του μαγνητόμετρου δόθηκε ημιτονοειδές σήμα 5Vpp με συχνότητα 1kHz. Τα αποτελέσματα απόκρισης του μαγνητικού αισθητήρα εμφανίζονται στον παλμογράφο. Τροφοδοτώντας το σωληνοειδές με διαφορετικές τιμές DC τάσης, δημιουργείται το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στον αισθητήρα. Με τη σωστή επεξεργασία των δεδομένων, θα γίνει η βαθμονόμησή του.

Στο δεύτερο μέρος του πειράματος ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και για τον αισθητήρα Hall SS49E.

##### 3.1.1 Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις

#### **ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ AGILENT 33220A**

Η γεννήτρια σήματος Agilent 33220A είναι το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για να παρέχεται το εναλλασσόμενο σήμα στο πηνίο διέγερσης του αισθητήρα fluxgate. Ένα ημιτονοειδές ή τριγωνικό σήμα, τάσης 5-10 Vpp και συχνότητας 1-10 kHz, κρίνεται βιβλιογραφικά κατάλληλο για χρήση ως σήμα διέγερσης του αισθητήρα. Τα σήματα εξέρχονται από την γεννήτρια μέσω ομοαξονικού (θωρακισμένου) καλωδίου το οποίο συνδέεται στη γεννήτρια μέσω βύσματος BNC. Το ομοαξονικό καλώδιο με βύσμα BNC είναι ουσιαστικά δύο καλώδια και είναι κατασκευασμένο ως εξής: Το ένα



καλώδιο, το οποίο μεταφέρει το σήμα, είναι στο εσωτερικό και καταλήγει στο κέντρο του βύσματος BNC. Το δεύτερο καλώδιο που αντιστοιχεί στη γείωση, περιβάλλει ομοαξονικά το εσωτερικό καλώδιο και όταν συνδεθεί το BNC βύσμα στη γεννήτρια, καταλήγει στο περίβλημά του.



*Σχήμα 24 Γεννήτρια AGILENT 33220A*

### **Παλμογράφος AGILENT DS03102A**

Ο παλμογράφος (oscilloscope) είναι ένα όργανο το οποίο καταρχάς παρέχει τη δυνατότητα να απεικονισθούν γραφικά:

1. Μια τάση σε σχέση με το χρόνο (λειτουργία X/T)
2. Μια τάση σε σχέση με μια τάση (λειτουργία X/Y)

Στη λειτουργία X/T απεικονίζονται τα σήματα σε σχέση με τον χρόνο. Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα να γίνουν και πράξεις μεταξύ των σημάτων και να απεικονισθεί το ολικό σήμα.

Στη λειτουργία X/Y απεικονίζονται τα σήματα, το ένα σε σχέση με το άλλο.

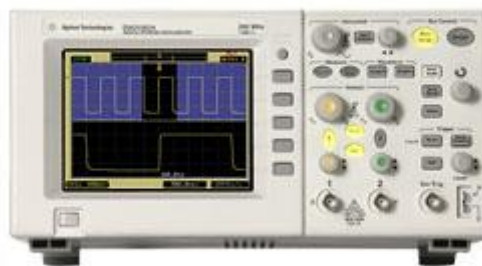
Ένας παλμογράφος πρέπει να μπορεί να απεικονίσει τάσεις από 100V έως 1μV και σε χρονικά διαστήματα από 15s έως 10ns.

Οι τάσεις εισέρχονται στον παλμογράφο μέσω ομοαξονικών καλωδίων, τα οποία συνδέονται στις εισόδους του παλμογράφου μέσω βυσμάτων BNC. Συνήθως οι

παλμογράφοι μπορούν να απεικονίσουν δύο τάσεις και οι αντίστοιχες είσοδοι περιγράφονται ως 1 & 2. Οι είσοδοι ονομάζονται κανάλια και οι τάσεις ονομάζονται σήματα. Η γείωση του καλωδίου BNC είναι συνδεδεμένη με το περίβλημα του παλμογράφου καθώς και με τη γείωση από την πρίζα στην οποία είναι συνδεδεμένος. Η γείωση της πρίζας καταλήγει τελικά στην γη, οπότε ο παλμογράφος έχει πραγματική γείωση στη γη και όλα τα σήματα μετρούν ως προς αυτή. Σε κάθε κανάλι συνδέεται ένα καλώδιο με βύσμα BNC. Στην άλλη άκρη το καλώδιο καταλήγει σε δύο ξεχωριστά καλώδια εκ των οποίων μία είναι η μετρητική λαβή (probe) και η άλλη είναι η γείωση.

Κύριο τμήμα του παλμογράφου αποτελεί η οθόνη πάνω στην οποία είναι χαραγμένο σύστημα ορθοκανονικών αξόνων. Κάθε άξονας είναι διαιρεμένος σε τμήματα (divisions), συνήθως δέκα και κάθε τμήμα διαιρείται σε 5 υποτμήματα. Έτσι πάνω στην οθόνη σχηματίζεται ένα πλέγμα δέκα επί δέκα το οποίο χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη λήψη των μετρήσεων.

Οι ψηφιακοί παλμογράφοι έχουν τη δυνατότητα να εκτελέσουν πολύπλοκες μαθηματικές πράξεις, να εκτελούν μετασχηματισμό Fourier σε πραγματικό χρόνο, να μετρούν αυτόματα συχνότητα, περίοδο, διαφόρους χρόνους πάνω στο σήμα, πλάτος ενεργό τιμή και άλλα χρήσιμα μεγέθη.



*Σχήμα 25 Παλμογράφος AGILENT DS03102A*

### ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ EXTECH 382270

Τα τροφοδοτικά (power supplies) είναι συσκευές που παρέχουν την απαραίτητη ισχύ στα κυκλώματα (ή αλλιώς στο φορτίο). Υπάρχουν διάφοροι τύποι τροφοδοτικών. Το πλέον απλό μοντέλο που μπορούμε να θεωρήσουμε για ένα τροφοδοτικό είναι από μια ανεξάρτητη πηγή. Υπάρχουν όμως και πιο προηγμένα τροφοδοτικά με προστασία ως προς τη μέγιστη τάση ή το ρεύμα που επιτρέπεται να παρέχουν στο φορτίο:

- Πηγή τάσης: Το τροφοδοτικό παρέχει στο φορτίο σταθερή τάση ανεξάρτητη από το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο.
- Πηγή ρεύματος: Το τροφοδοτικό παρέχει στο φορτίο σταθερό ρεύμα ανεξάρτητο από την τάση στα άκρα του φορτίου.

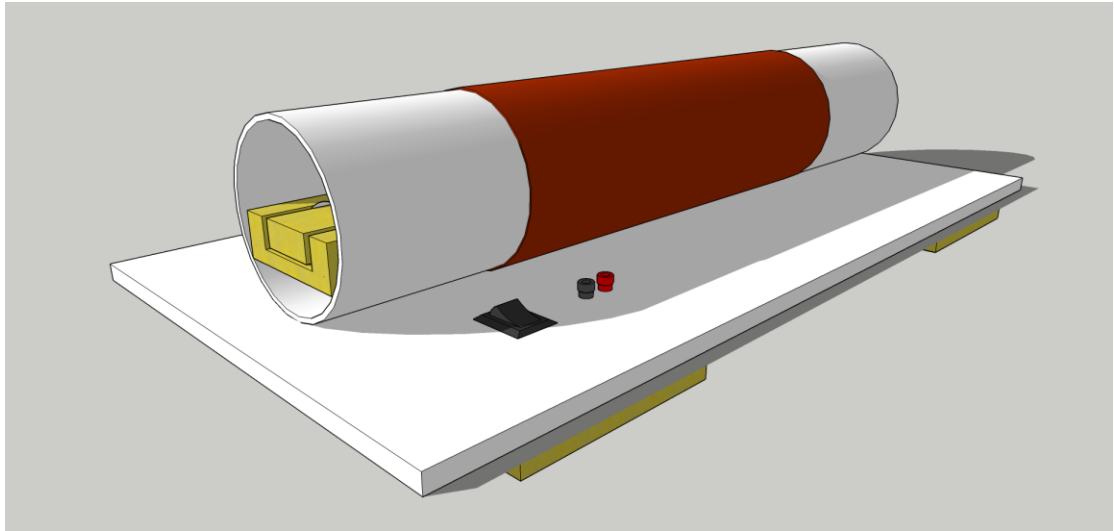


*Σχήμα 26 Τροφοδοτικό EXTECH 382270*

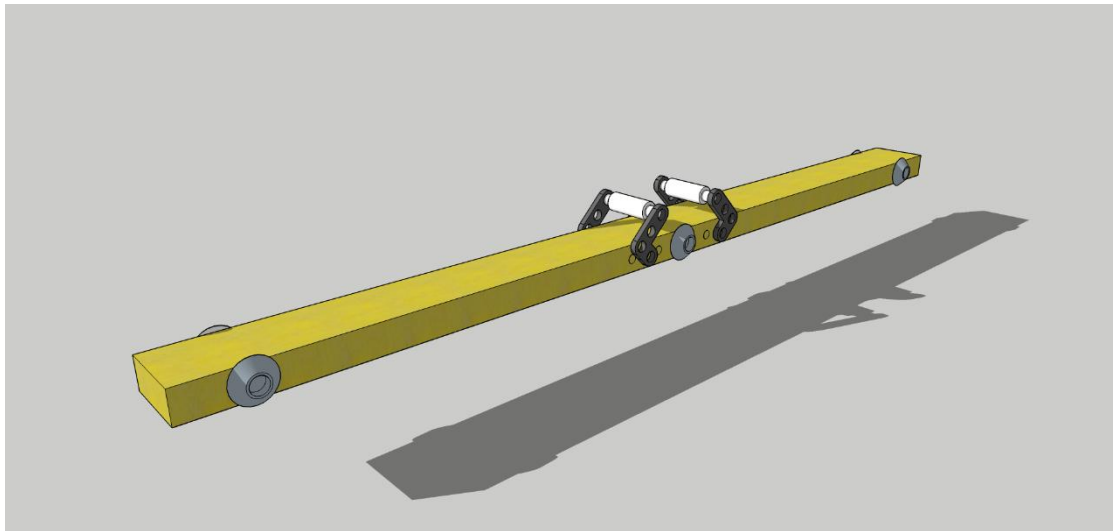
### 3.2 Σχεδιασμός και κατασκευή της διάταξης διακρίβωσης

Το σωληνοειδές που κατασκευάστηκε αποτελεί το κύριο στοιχείο της διάταξης διακρίβωσης. Μέσω της τροφοδοσίας του με συνεχή τάση, παράγεται ελεγχόμενο μαγνητικό πεδίο γνωστής τιμής, που είναι ικανό να αντισταθμίσει το εξωτερικώς επιβαλλόμενο πεδίο. Η ανάγκη για δημιουργία του καλύτερου δυνατού ομογενούς πεδίου στο κέντρο του σωληνοειδούς, είχε ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν εξ ολοκλήρου εξαρτήματα με μη μεταλλικά υλικά για την κατασκευή της διάταξης.

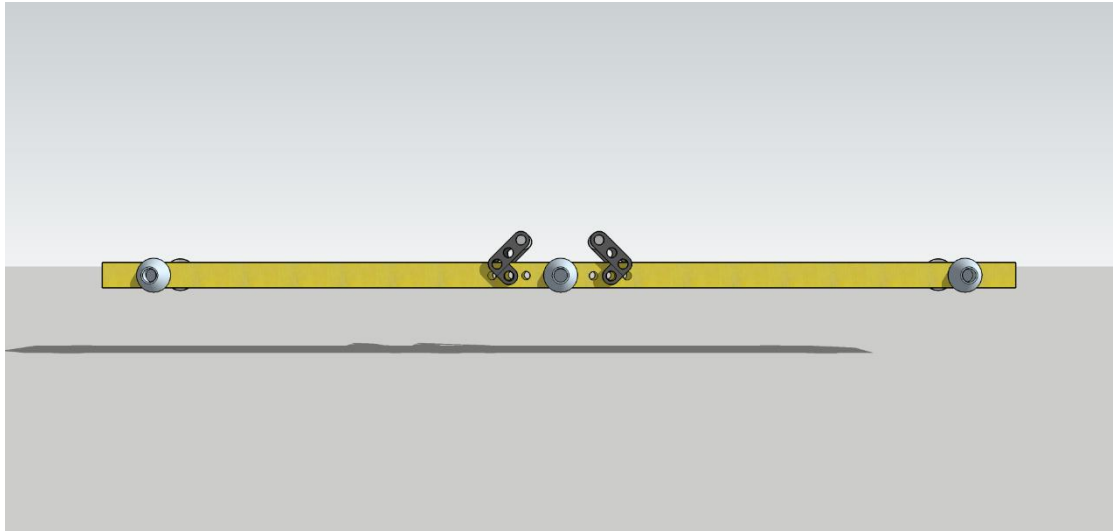
Παρακάτω εμφανίζεται μία τριδιάστατη απεικόνιση της διάταξης διακρίβωσης, όπως σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Trimble Sketchup:



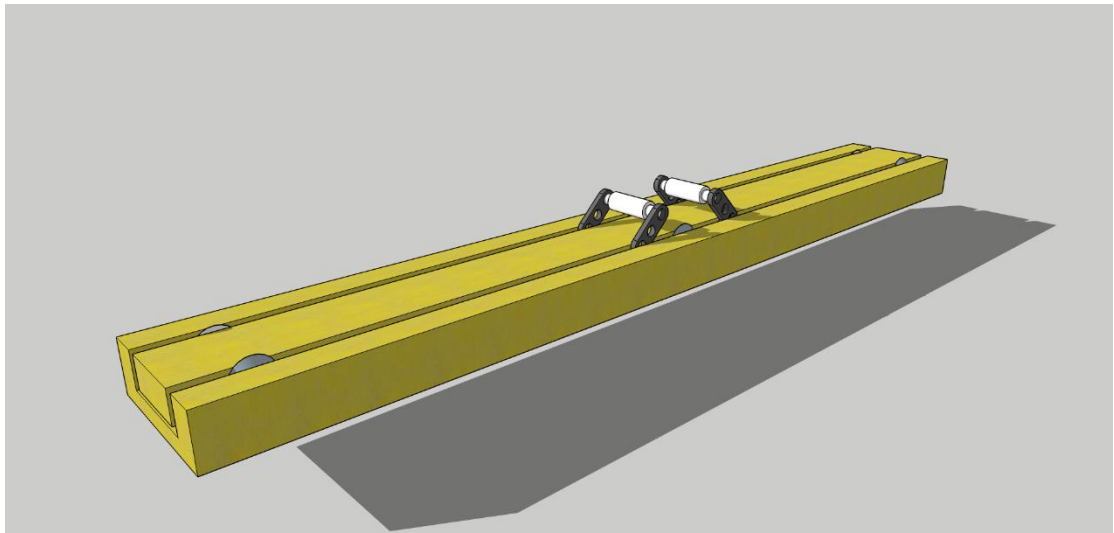
*Σχήμα 27 Τριδιάστατη απεικόνιση της διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρου*



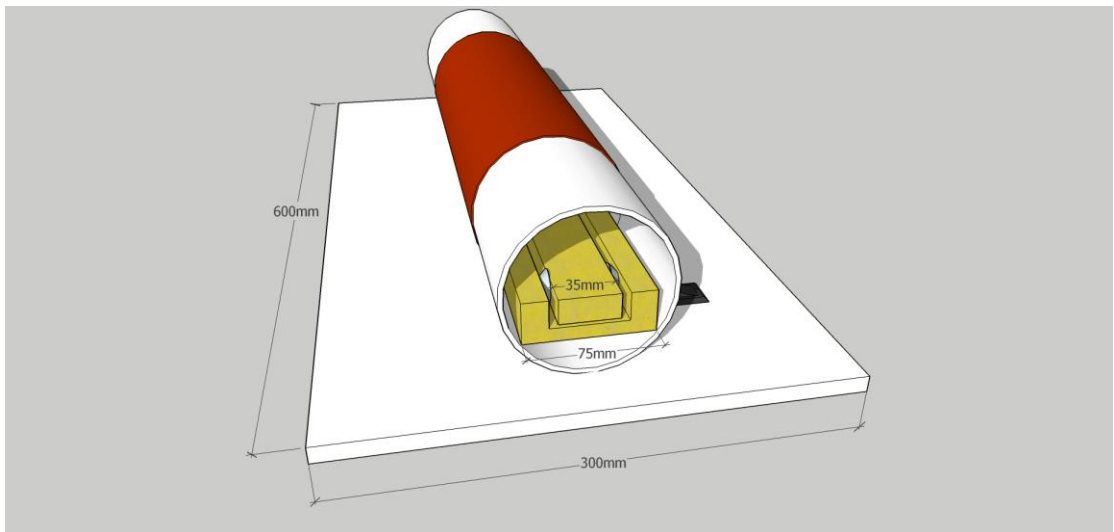
*Σχήμα 28 Συρώμενη βάση τοποθέτησης μαγνητομέτρου*



Σχήμα 29 Πλάγια όψη της συρόμενης βάσης



Σχήμα 30 Ξύλινη κατασκευή στήριξης της συρόμενης βάσης



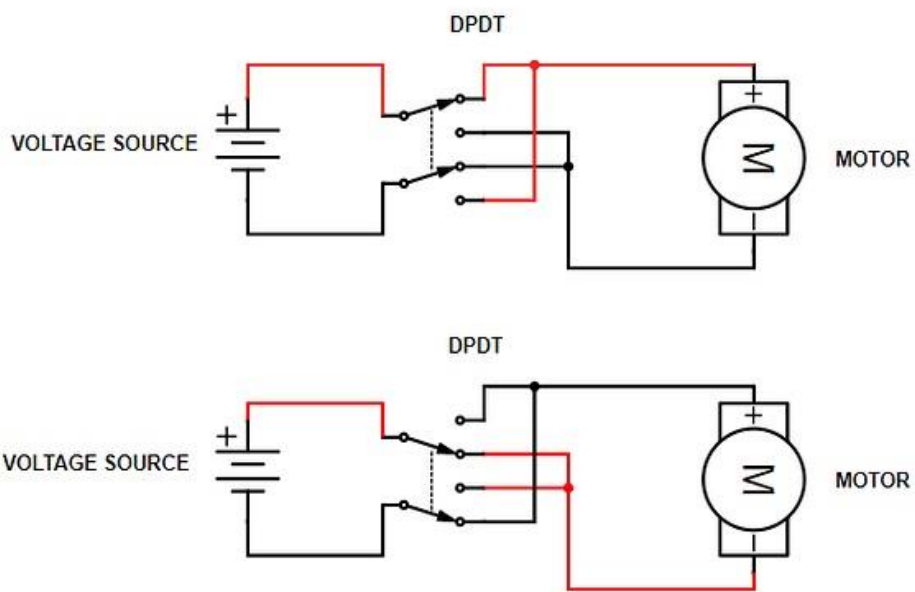
Σχήμα 31 Η συνολική διάταξη με τις διαστάσεις της

Αρχικά, κατασκευάστηκε το σωληνοειδές, που αποτελείται από δύο στρώματα των 290 περιελίξεων το καθένα, κατασκευασμένα από σύρμα χαλκού εμαγιέ  $\varnothing 1\text{mm}$ . Η περιέλιξη των συρμάτων πραγματοποιήθηκε πάνω σε σωλήνα υλικού PVC, μήκους 54cm και διαμέτρου 10cm. Το συνολικό μήκος του σωληνοειδούς είναι 30cm και η ακτίνα του είναι 5cm. Ο χώρος που περιβάλλεται από το σωληνοειδές λειτουργεί ως χώρος βαθμονόμησης του μαγνητομέτρου, όπου το μαγνητικό πεδίο μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια μέσω της ρύθμισης του παρεχόμενου ρεύματος συνεχούς ρεύματος που παράγεται από μια ελεγχόμενη μονάδα τροφοδοσίας DC.

Το σωληνοειδές τοποθετήθηκε σε μία ξύλινη επιφάνεια μήκους 60cm και πλάτους 30cm. Αυτή η ξύλινη επιφάνεια στηρίζεται πάνω σε 4 βάσεις κατασκευασμένες και αυτές από ξύλο, με διαστάσεις ύψους 3cm, μήκους 12cm και πλάτους 5cm. Ο πλαστικός σωλήνας στον οποίο βρίσκεται το πηνίο συνδέθηκε με την επιφάνεια με πλαστικές βίδες.

Οι βίδες αυτές, επίσης, έχουν συνδέσει την ξύλινη επιφάνεια και το πηνίο, με μία συρόμενη βάση που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του σωληνοειδούς. Η συγκεκριμένη κατασκευή, όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα σχήματα, αποτελείται από μία εξωτερική βάση σχήματος Π με πλάτος 7,5cm και εσωτερικά 3,5cm. Το μήκος της ξύλινης κατασκευής είναι ίσο με το μήκος του πλαστικού σωλήνα που είναι 54cm. Για την σταθερότητα των αισθητήρων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, τοποθετήθηκαν μετακινούμενες λαβές στήριξης, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με πλαστικούς αποστάτες και πλαστικές βίδες. Σκοπός της τοποθέτησης των αποστατών είναι η ευθυγράμμιση των λαβών και η ομοιόμορφη συγκράτηση των μαγνητομέτρων.

Τέλος, για την τροφοδοσία του σωληνοειδούς, χρησιμοποιήθηκαν υποδοχές που τοποθετήθηκαν στην ξύλινη επιφάνεια. Μεταξύ των υποδοχών και των άκρων του σωληνοειδούς, τοποθετήθηκε ένας διακόπτης τύπου DPDT. Με κατάλληλη συνδεσμολογία αυτού του διακόπτη, κατέστη δυνατή η αλλαγή της πολικότητας της παρεχόμενης τάσης στα άκρα του σωληνοειδούς, χωρίς την ανάγκη για αφαίρεση και αντιστροφή των καλωδίων του τροφοδοτικού. Έτσι, είναι δυνατή η αλλαγή της φοράς του μαγνητικού πεδίου που παρέχεται από το σωληνοειδές.

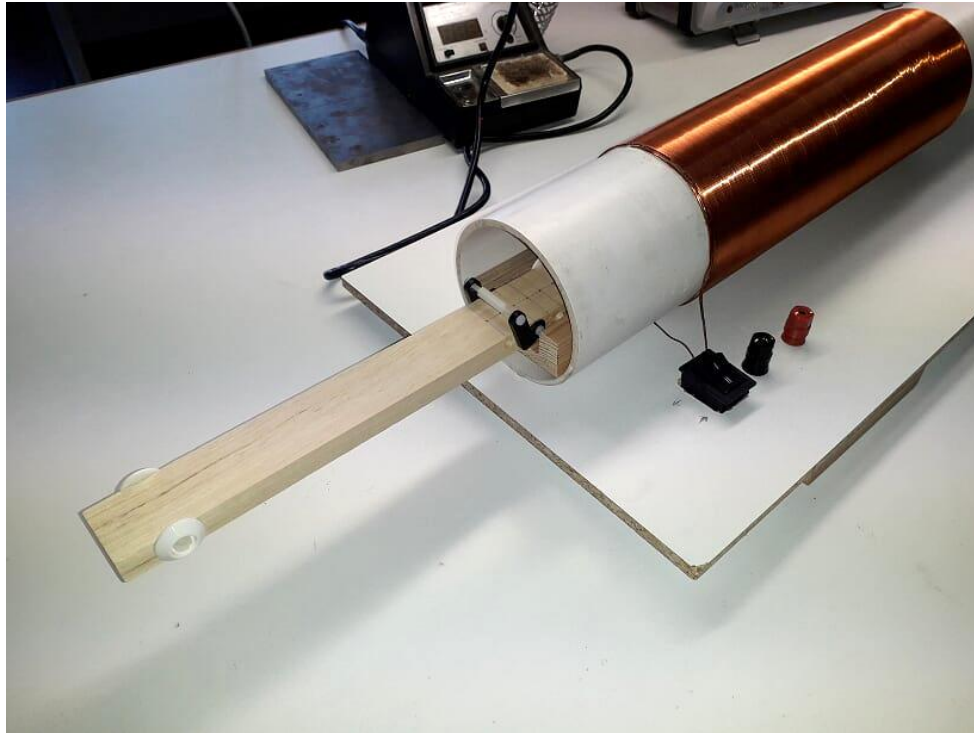


*Σχήμα 32 Διάγραμμα σύνδεσης διακόπτη DPDT για αλλαγή της πολικότητας*

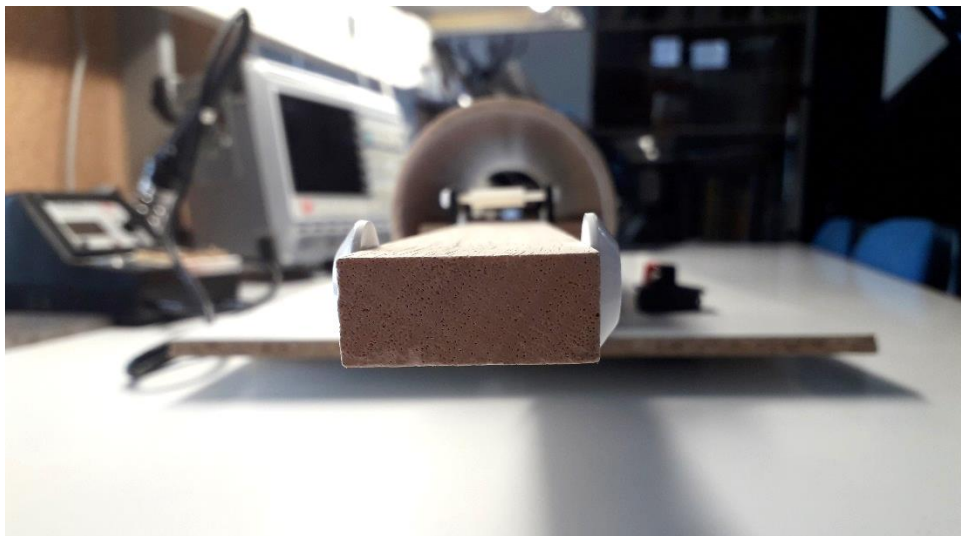
Παρακάτω, παρουσιάζονται φωτογραφίες της τελικής διάταξης:



*Σχήμα 33 Κάτοψη της διάταξης*

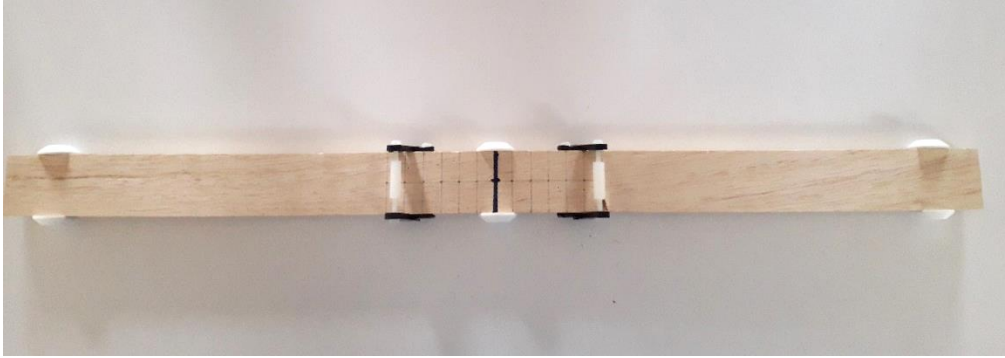


*Σχήμα 34 Η συρόμενη βάση τοποθέτησης των μαγνητομέτρων*

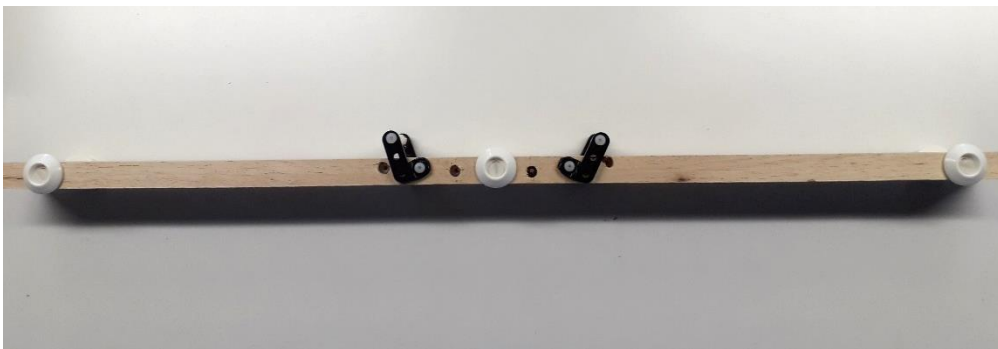


*Σχήμα 35 Πλάγια όψη της διάταξης*





Σχήμα 36 Κάτοψη της συρόμενης βάσης τοποθέτησης των μαγνητομέτρων



Σχήμα 37 Πλάγια όψη της συρόμενης βάσης τοποθέτησης των μαγνητομέτρων

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά σωληνοειδούς

Μήκος L(cm)	Ακτίνα R(cm)	Στρώσεις	Σπείρες/στρώση	Σύνολο σπειρών
30	5	2	290	580

### 3.3 Μετρήσεις με αισθητήρα fluxgate

Για τις ανάγκες των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας fluxgate με μονό πυρήνα στο κέντρο, ο οποίος περιβάλλεται εξωτερικά από δύο πηνία τα οποία είναι τυλιγμένα γύρω από έναν γυάλινο σωλήνα.

Ο αισθητήρας είναι κατασκευασμένος από γυάλινο σωλήνα μήκους 7cm και διαμέτρου 1mm για την κατασκευή των πηνίων του μαγνητόμετρου. Ως πυρήνας, χρησιμοποιήθηκε άμορφο μαγνητικό σύρμα διαμέτρου 101μm, το οποίο τοποθετείται μέσα στον γυάλινο σωλήνα. Το μαγνητικό υλικό του σύρματος είναι CoFeSiB, το οποίο έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και προσφέρει υψηλή ευαισθησία. Για την είσοδο και έξοδο του σήματος, είναι τοποθετημένες υποδοχές τύπου BNC.



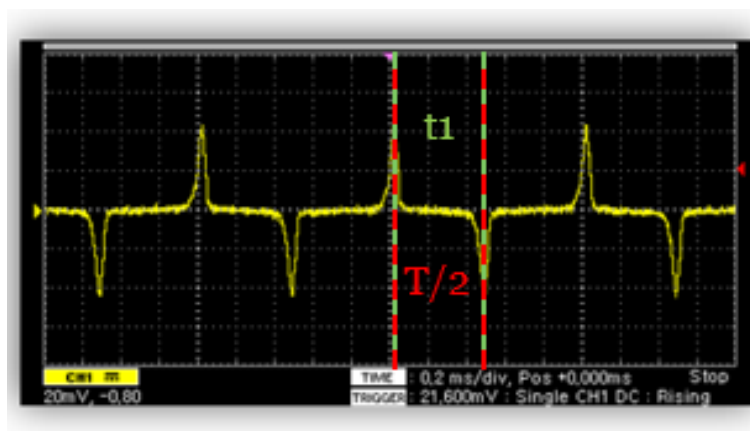
*Σχήμα 38 Ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο*

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο του σωληνοειδούς, ενώ ήταν συνδεδεμένος με τη γεννήτρια και με τον παλμογράφο. Μέσω ενός τροφοδοτικού που συνδέθηκε με τους ακροδέκτες του σωληνοειδούς, δόθηκε DC ρεύμα για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου εντός του σωληνοειδούς.

### 3.3.1 Διεξαγωγή μετρήσεων

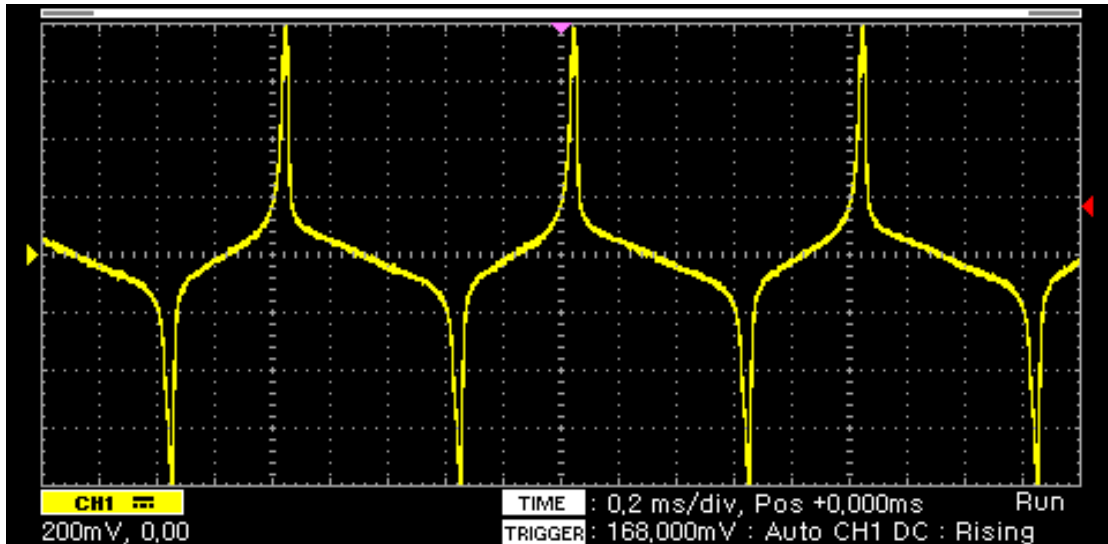
Αφού γίνει η τροφοδότηση του σωληνοειδούς με DC ρεύμα, δημιουργείται DC μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα, όταν τροφοδοτηθεί το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα fluxgate με εναλλασσόμενο σήμα, ο μαγνητικός πυρήνας του αισθητήρα θα οδηγείται σε ίσους χρόνους σε αρνητικό και θετικό κορεσμό. Το σήμα που έχουμε ως αποτέλεσμα στο δευτερεύον πηνίο είναι ανάλογο της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής  $B$  ως προς τον χρόνο, δηλαδή  $V_{out} \approx \frac{dB}{dt}$ . Σαν αποτέλεσμα, η χρονική μεταβολή μεταξύ της εμφάνισης των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος, αντιστοιχούν στο εξωτερικώς επιβαλλόμενο άγνωστο μαγνητικό πεδίο.

Όταν δεν εμφανίζεται εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, ο μαγνητικός αισθητήρας εμφανίζει ελάχιστη και μέγιστη τιμή σε ίσο χρονικό διάστημα, αφού επηρεάζεται μόνο από το εναλλασσόμενο σήμα που τροφοδοτεί το πρωτεύον πηνίο. Σε αυτή την περίπτωση η χρονική μεταβολή  $\Delta t$ , μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων, είναι μηδενική. Στην περίπτωση επιβολής ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που θα επιδρά στον πυρήνα, η διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων στο σήμα εξόδου, θα είναι διάφορη του μηδενός. Επομένως, διεξάγοντας την κατάλληλη βαθμονόμηση, είναι δυνατός ο συσχετισμός της χρονικής διαφοράς μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής και του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

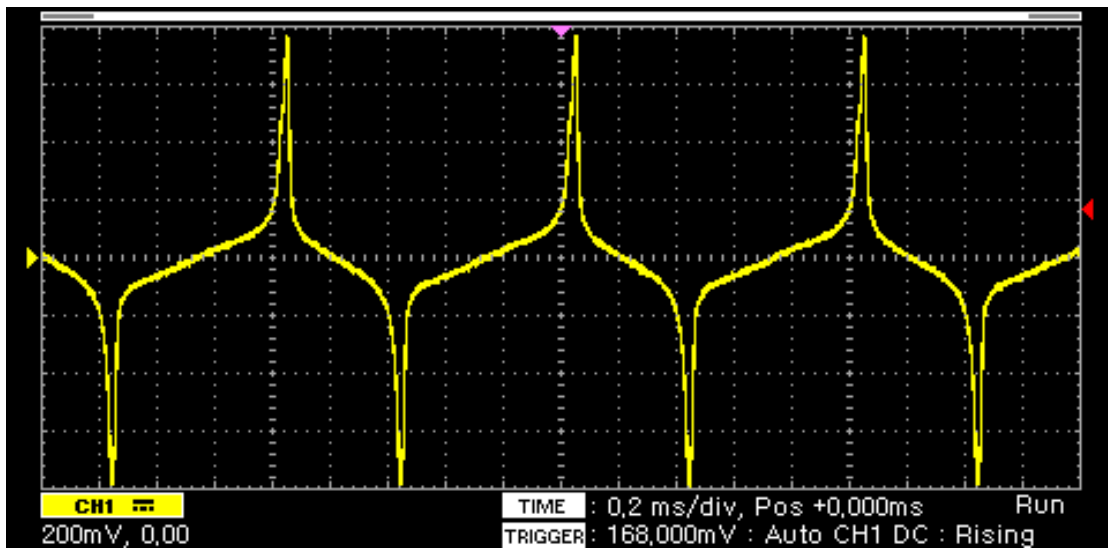


*Σχήμα 39 Σήμα εξόδου του αισθητήρα χωρίς την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου*

Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις με τον αισθητήρα fluxgate.



Σχήμα 40 Σήμα εξόδου του αισθητήρα με την επιβολή θετικού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 41 Σήμα εξόδου του αισθητήρα με την επιβολή αρνητικού εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου

Πίνακας 2 Ενδεικτικά αποτελέσματα μετρήσεων αισθητήρα fluxgate

I(AMPERE)	Δt(ms)	B(mT)
-1	-0,22	-2,30366
-0,5	-0,1	-1,15183
0	0	0
0,5	-0,11	1,151828
1	-0,22	2,303656

Στον παραπάνω πίνακα αποτυπώνονται οι μετρήσεις για τον αισθητήρα fluxgate. Στην πρώτη στήλη, η ένταση του ρεύματος όπως δόθηκε από το τροφοδοτικό στο σωληνοειδές.

Στη δεύτερη στήλη η χρονική διαφορά Δt σε ms, που αποτυπώνει το χρόνο μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων.

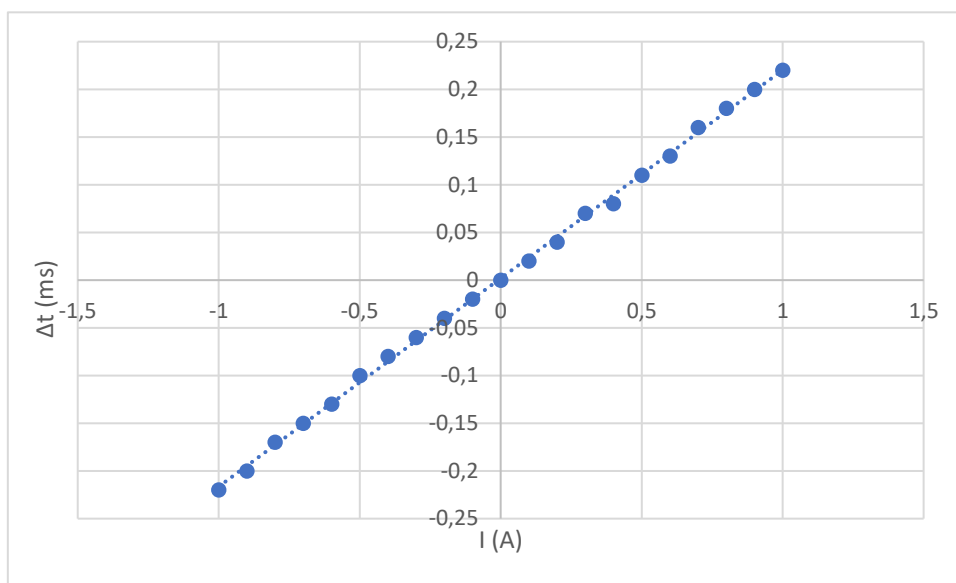
Στην τρίτη στήλη, παρουσιάζεται ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου, όπως προκύπτει από τη σχέση:

$$H_x = \Delta t \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\sqrt{H_{ext}^2 - H_c^2}}{4} \quad (3.1)$$

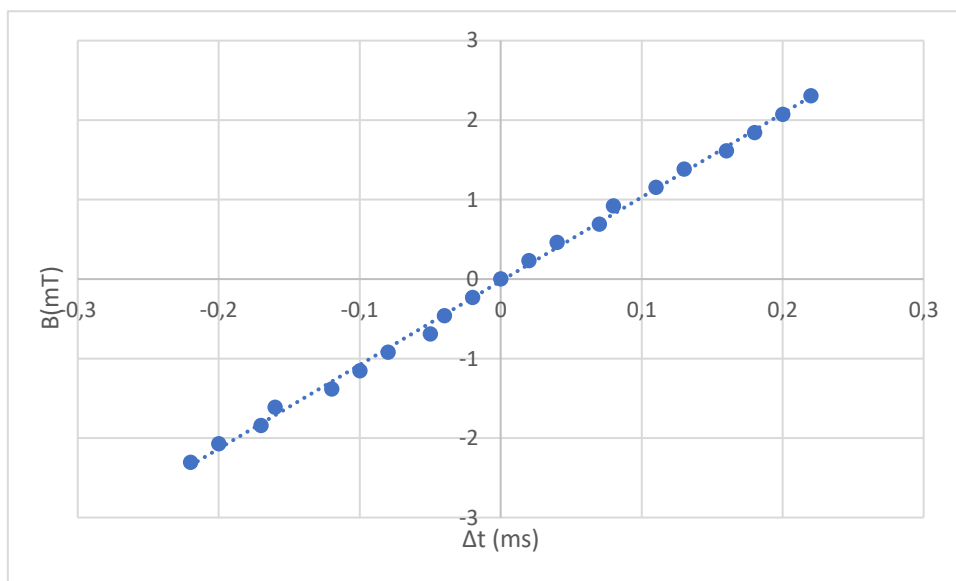
όπου  $H_{ext}$  είναι το πεδίο διέγερσης,  $f$  η συχνότητα διέγερσης και  $H_c$  το συνεκτικό πεδίο του πυρήνα.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Το πρώτο διάγραμμα εκφράζει τη μεταβολή της χρονικής διαφοράς συναρτήσει του ρεύματος που τροφοδοτεί το σωληνοειδές, ενώ το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει τη σχέση

μεταξύ της μετρούμενης χρονικής διαφοράς και της έντασης μαγνητικού πεδίου που προκύπτει.

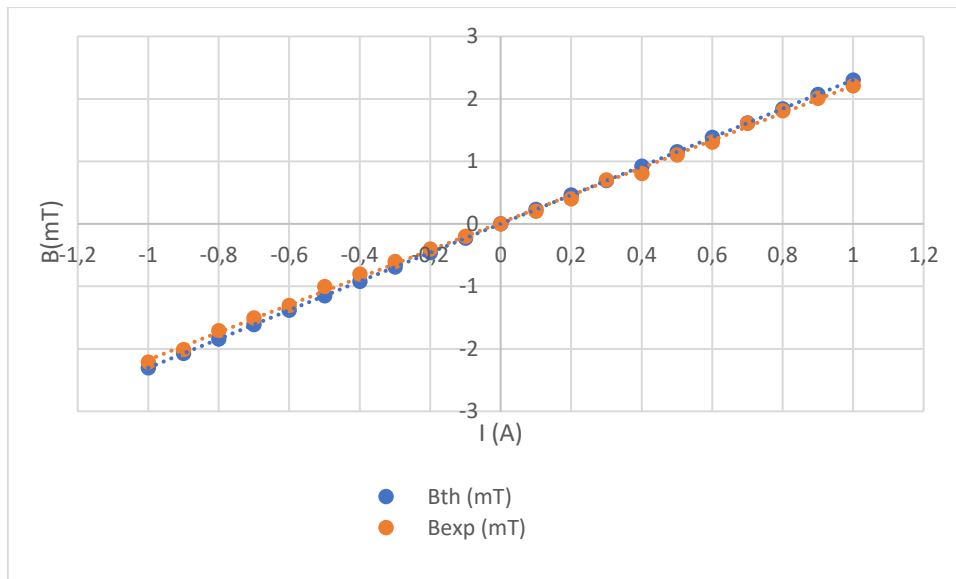


Σχήμα 42 Σχέση χρονικής διαφοράς και παρεχόμενου ρεύματος σωληνοειδούς



Σχήμα 43 Σχέση μαγνητικού πεδίου και χρονικής διαφοράς

Τέλος, στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς, όπως προκύπτει από τον παραπάνω τύπο, καθώς και η πειραματική καμπύλη, όπως προέκυψε από τη διεξαγωγή των μετρήσεων.



*Σχήμα 44 Σχέση θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης*

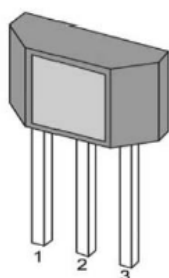
Είναι εμφανές ότι υπάρχει σύμπτωση των δύο καμπυλών, της θεωρητικής και της πειραματικής, κάτι που αποδεικνύει τόσο την ορθή λειτουργία της διάταξης βαθμονόμησης, όσο και την ορθή χρήση των υπολογιστικών σχέσεων.

### 3.4 Μετρήσεις αισθητήρα Hall

Ο αισθητήρας Hall SS49E ανήκει σε μία σειρά αισθητήρων Hall μαζί με τον SS39ET και τον SS59ET. Είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να είναι ανταγωνιστικοί λόγω της χαμηλής τους τιμής. Η γραμμική τάση εξόδου τους ποικίλλει ανάλογα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Έχουν χαμηλή τάση λειτουργίας, που ξεκινά από τα 2.7 Vdc και μειωμένη κατανάλωση ρεύματος (6 mA στα 5Vdc), δυνατότητες οι οποίες συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα παρουσιάζει χαμηλό θόρυβο στην έξοδό του, πράγμα που καθιστά περιττή τη χρήση κάποιου εξωτερικού φίλτρου.

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες έχουν θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από τους  $-40^{\circ}\text{C}$  έως τους  $100^{\circ}\text{C}$  και είναι κατάλληλοι για βιομηχανικά και ιατρικά περιβάλλοντα.

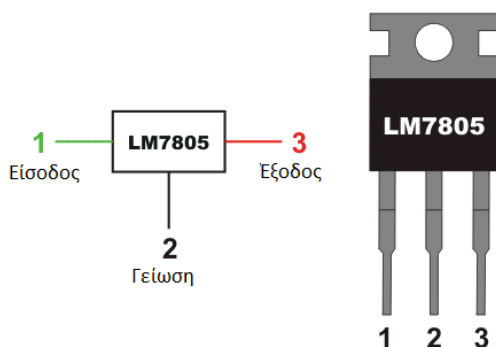
Όπως και στην περίπτωση του αισθητήρα fluxgate, για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα Hall χρησιμοποιήθηκε η ανεπτυγμένη διάταξη διακρίβωσης. Συνεπώς, ασκώντας μαγνητικό πεδίο γνωστής έντασης στον αισθητήρα, που ήταν τοποθετημένος στο κέντρο του σωληνοειδούς της διάταξης, ήταν δυνατή η μέτρηση της τάσης εξόδου του αισθητήρα, άρα και η βαθμονόμηση του. Έτσι, λαμβάνοντας τιμές για θετικά και αρνητικά επιβαλλόμενα πεδία, είναι δυνατή η βαθμονόμηση του αισθητήρα στο εύρος λειτουργίας του.



- 1: Τροφοδοσία
- 2: Γείωση
- 3: Έξοδος

*Σχήμα 45 Είσοδοι και έξοδοι του αισθητήρα Hall SS49*

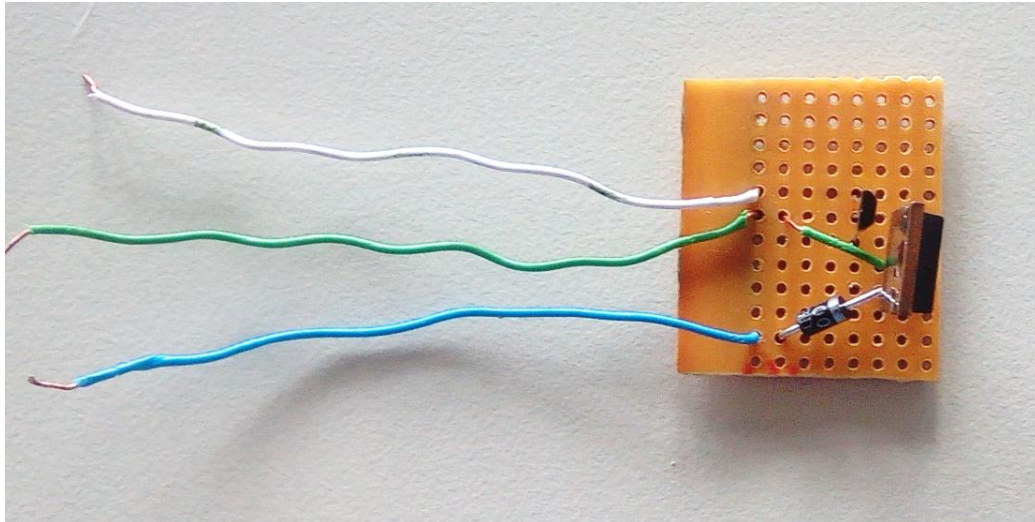
Για την προστασία του αισθητήρα Hall από την τροφοδοσία με τάση εκτός των ασφαλών ορίων, προστέθηκαν στη διάταξη μέτρησης δύο στοιχεία: μία δίοδος (1N4001) και ένας σταθεροποιητής τάσης (LM7805).



*Σχήμα 46 Συνδεσμολογία του σταθεροποιητή τάσης LM7805*

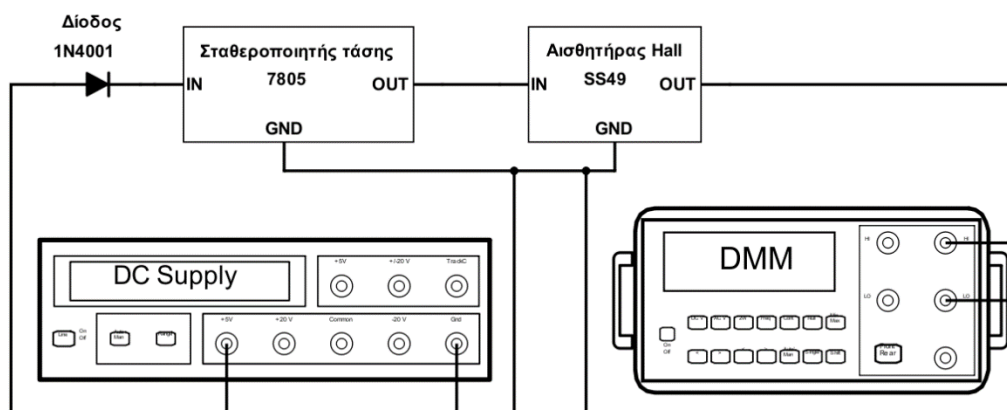
Ο αισθητήρας Hall, μαζί με τη δίοδο και τον σταθεροποιητή, συγκολλήθηκαν σε μία διάτρητη πλακέτα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.





Σχήμα 47 Πλακέτα με τον αισθητήρα Hall

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική διάταξη για τη λειτουργία του αισθητήρα Hall. Το τροφοδοτικό παρέχει την τάση λειτουργίας του αισθητήρα, η οποία περνά από τη δίοδο και τον σταθεροποιητή. Ο σταθεροποιητής αναλαμβάνει να τροφοδοτεί τον αισθητήρα Hall με σταθερή τάση 5V. Τότε, βάσει του τρόπου λειτουργίας του συγκεκριμένου αισθητήρα Hall, η τάση που θα παράγεται στην έξοδο του αισθητήρα για μηδενική επιβολή μαγνητικού πεδίου, θα είναι ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας, δηλαδή περίπου 2.5V. Οποιαδήποτε επιβολή μαγνητικού πεδίου ίδιας ή αντίθετης φοράς με αυτή του αισθητήρα, δημιουργεί αύξηση ή μείωση, αντίστοιχα, της εμφανιζόμενης τάσης εξόδου.



Σχήμα 48: Συνολική διάταξη μέτρησης

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι μετρήσεις που είναι απαραίτητες για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα Hall.

Στην πρώτη στήλη είναι η ένταση του ρεύματος που δίνεται από το τροφοδοτικό στο σωληνοειδές.

Στη δεύτερη στήλη η τάση Hall όπως μετρήθηκε από το πολύμετρο για την εκάστοτε ένταση του ρεύματος, μειωμένη κατά έναν παράγοντα (offset) του αισθητήρα.

Στην τρίτη στήλη το μαγνητικό πεδίο σε Gauss το οποίο υπολογίστηκε με βάση τις τιμές της δεύτερης στήλης διαιρεμένων με το συντελεστή 1,4 ο οποίος είναι ο συντελεστής μετατροπής από τάση σε mV σε πεδίο σε Gauss για θερμοκρασία δωματίου για τον αισθητήρα Hall SS49E.

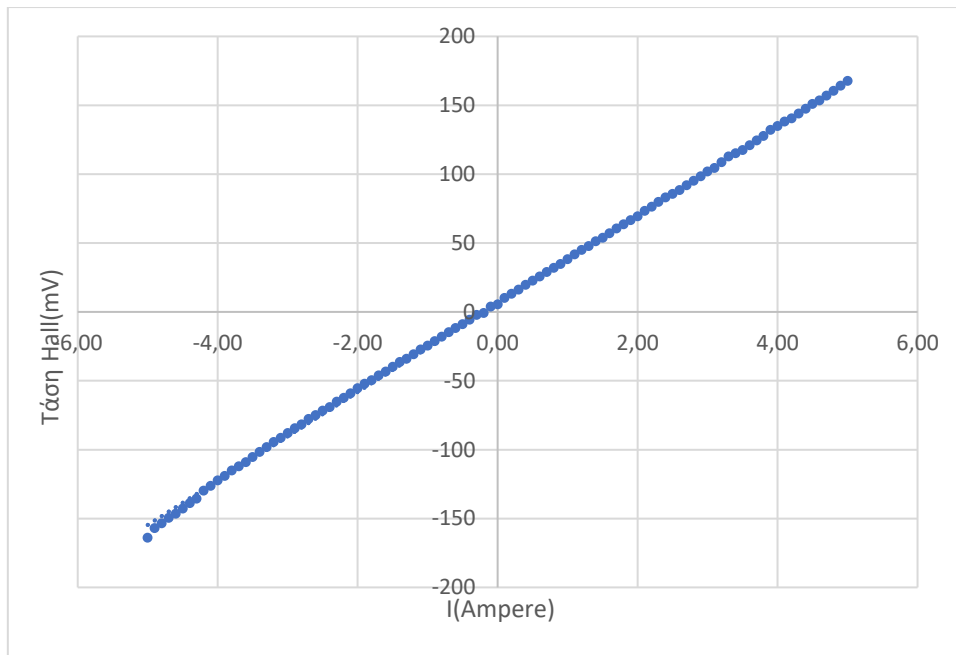
Στην τέταρτη στήλη η μαγνητική επαγωγή υπολογισμένη σε Tesla.

Στις δύο τελευταίες στήλες παρατίθενται οι τιμές μαγνητικού πεδίου σε milliTesla, όπως προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις και από τους θεωρητικούς υπολογισμούς για το συγκεκριμένο σωληνοειδές.

*Πίνακας 3 Ενδεικτικές τιμές μέτρησης με τον αισθητήρα Hall*

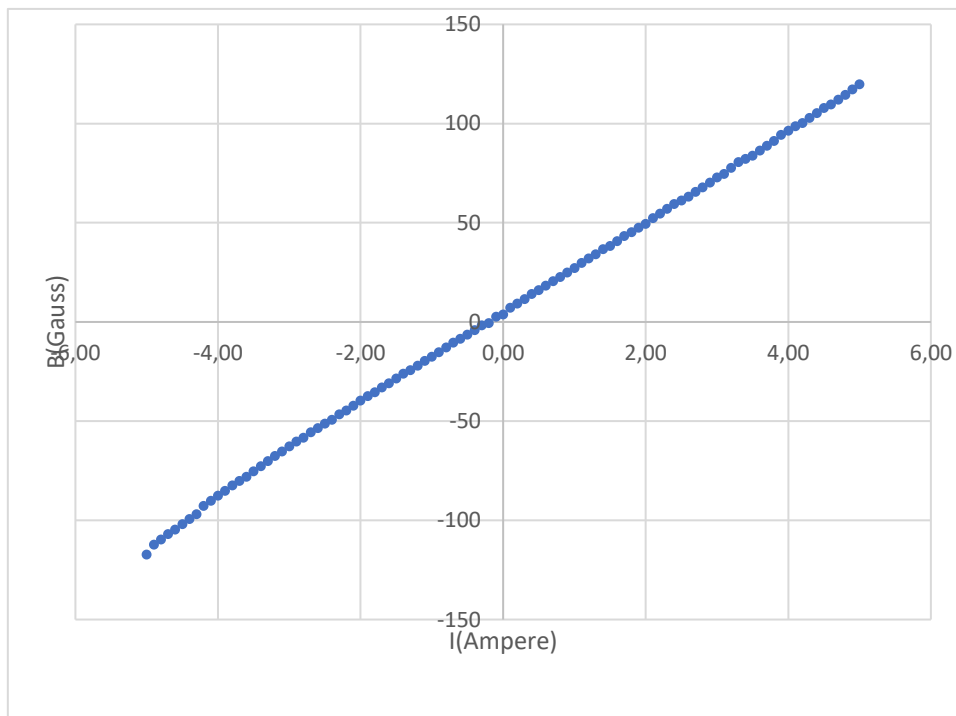
I(Ampere)	VHall-offset(mV)	B(Gauss)	B(Tesla)	Bexp (mT)	Bth (mT)
-5	-162,2	-115,86	-0,01159	-11,59	-11,52
-2,5	-77,1	-55,27	-0,00551	-5,51	-5,76
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
2,5	80,4	57,43	0,00574	5,74	5,76
5	162,4	116,00	0,01160	11,60	11,52

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η μετρούμενη τάση Hall σε σχέση με την ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας του σωληνοειδούς.



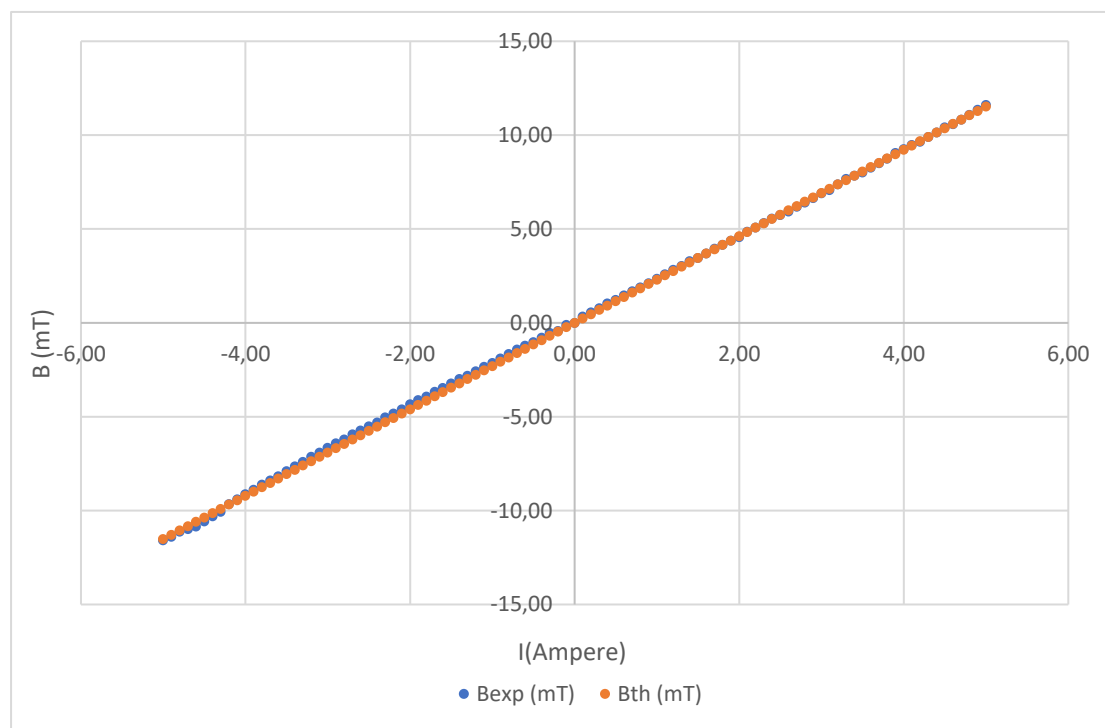
*Σχήμα 49 Σχέση τάσης Hall και τροφοδοσίας σωληνοειδούς*

Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε Gauss, όπως μετρήθηκε από τον αισθητήρα Hall, συναρτήσει της τροφοδοσίας του σωληνοειδούς.



*Σχήμα 50 Σχέση έντασης μαγνητικού πεδίου και τροφοδοσίας σωληνοειδούς*

Τέλος, στο τρίτο διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη των θεωρητικών τιμών έντασης μαγνητικού πεδίου για το συγκεκριμένο σωληνοειδές, καθώς και η καμπύλη των πειραματικών τιμών, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον αισθητήρα Hall.



*Σχήμα 51 Σχέση πειραματικών & θεωρητικών τιμών έντασης μαγνητικού πεδίου με την τροφοδοσία του σωληνοειδούς*

Από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι εμφανής η γραμμικότητα των μετρήσεων. Επίσης, παρατηρείται ότι οι μετρήσεις μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα Hall συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τις θεωρητικές τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου, όπως προκύπτουν από τους υπολογισμούς για τις συγκεκριμένες τιμές έντασης ρεύματος τροφοδοσίας του σωληνοειδούς.

#### **4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Η διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων που κατασκευάστηκε προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός χώρου επιβολής ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου, γνωστής έντασης. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας γνωστές τιμές έντασης ρεύματος τροφοδοσίας του σωληνοειδούς, είναι δυνατή η δημιουργία μαγνητικού πεδίου γνωστής τιμής.

Η αποφυγή χρήσης μεταλλικών εξαρτημάτων εξαλείφει πιθανές αλλοιώσεις του πεδίου που πιθανώς θα μπορούσαν να δημιουργηθούν. Επίσης, το κόστος όλης της διάταξης είναι πολύ χαμηλό, λόγω των διαδεδομένων υλικών στα οποία βασίστηκε.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τους δύο τύπους αισθητήρων, fluxgate και Hall, έδειξαν ότι υπάρχει μεγάλη γραμμικότητα στις ληφθείσες μετρήσεις, άρα και αντίστοιχη γραμμικότητα στην παραγωγή του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Επόμενο βήμα αποτελεί η κατασκευή ζευγών πηνίων Helmholtz, τα οποία μπορούν να παράγουν ομογενές πεδίο αντιστάθμισης σε μία ή περισσότερες διαστάσεις. Επίσης, θα ήταν χρήσιμη η βελτιστοποίηση του μεγέθους και του κόστους και των υπολοίπων μερών της διάταξης, με αυτοματοποίηση της διαδικασίας επιβολής μαγνητικού πεδίου συγκεκριμένης έντασης, καθώς και της λήψης και καταγραφής των μετρήσεων.



## 5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] H. Young, *Ηλεκτρομαγνητισμός σύγχρονη οπτική φυσική*, Εκδόσεις Παπαζήση
- [2] <https://physicsgg.me/2013/06/09>
- [3] Δ. Πάνιας, *Γενική Χημεία*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 2005
- [4] <http://physiclessons.blogspot.gr/2013/04/>
- [5] Θ. Τσιμπούκης, *Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο Βασική Θεωρία και εφαρμογές*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης
- [6] Π. Βουρνά, *Αισθητήρας Μαγνητικού πεδίου Βασισμένος στο φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης*, ΕΜΠ, 2010
- [7] Ι. Ρουμेलιώτης, Ι. Τσαμαλέγκας, *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία*, Εκδόσεις Τζιόλα
- [8] I. Harald, *Φυσική στερεάς κατάστασης Εισαγωγή στις αρχές της Επιστήμης των υλικών*, Εκδόσεις Ζήτη, 2012
- [9] S.O Kasap, *Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004
- [10] <http://www.supracon.com/cms/html/2/browse/232>
- [11] J.R Reitz, F.J Milford, R.W Christy, *Τα θεμέλια της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 2004
- [12] M.E Mc Henry, Willard M.A., Laughlin D.E, 1999, "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as softmagnets", *Materials transactions* 43(8):2000-2005 · August 2002
- [13] H. Chiriac, T. Ovari, Marinescu CS. "Comparative study of the giant magneto-impedance effect in CoFeSiB glass-covered and cold-drawn amorphous wires". *IEEE Trans Magn* 33:3352–4, 1997
- [14] K.Yoshida, *Theory of Magnetism*, Springer, 1996
- [15] La Malfa, Salvatore, "Rtd Fluxgate Magnetometers", Chapter1, pp.1-3, 2012
- [16] Mattia Butta, "Orthogonal Fluxgates", *SSM*, vol. 19, pp.1-3
- [17] D.C Wiley, *Magnetism Principles and Applications*, Wiley, 1995
- [18] [https://www.researchgate.net/figure/Figures-1a-and-1b-a-Drawing-by-author-of-the-Helmholtz-coil-design-b\\_fig1\\_289294812](https://www.researchgate.net/figure/Figures-1a-and-1b-a-Drawing-by-author-of-the-Helmholtz-coil-design-b_fig1_289294812)

- [19] <https://about.illinoisstate.edu/avidal/Pages/Magnetic%20orientation%20and%20transduction.aspx>
- [20] E. Χατζηπαναγιώτου, *Διάταξη διακρίβωσης Μαγνητομέτρου*, ΕΜΠ, 2016
- [21] [https://www.researchgate.net/figure/Figures-1a-and-1b-a-Drawing-by-author-of-the-Helmholtz-coil-design-b\\_fig1\\_289294812](https://www.researchgate.net/figure/Figures-1a-and-1b-a-Drawing-by-author-of-the-Helmholtz-coil-design-b_fig1_289294812)
- [22] T. Richards, E. Lucas. “A robust calibration and alignment procedure for collocated magnetometer and accelerometer sensors” DRDC-RDDC 2015-N009
- [23] P. Ripka “Advances in fluxgate sensors” Elsevier Physical, Vol. 106,pp. 1–3, 2003
- [24] Razmkhah, M. J. Eshraghi, F. Forooghi, F. Sarreshtedari, M. “Fundamental mode fluxgate magnetometers for active magnetic shielding”,19th Iranian Conference on Electrical Engineering Pages: 1 – 4
- [25] Chih-Cheng Lu 1,2,\* , Jeff Huang 1, Po-Kai Chiu 1, Shih-Liang Chiu 1 and Jen-Tzong Jeng, “High sensitivity Low-noise Miniature Fluxgate Magnetometers Using a flip chip Conceptual design in Sensors”, 14(8):13815-29 · August 2014
- [26] Ken Evans, “Fluxgate Magnetometers Explained”, INVASENS, pp. 1-2, 2006.
- [27] Y. Okazaki, S. Yananse, and N. Sugimoto, “Active magnetic shielding with Magneto-Impedance Sensor”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 13, no. 1-4,
- [28] M. Diaz-Michelena, R. Sanz, M.F. Cerdan, and A.B Fernandez, “Calibration of QM-MOURA three axis magnetometer and gradiometer”, Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, Vol. 4, no. 2015, pp.1-18
- [29] J. Vcelak P.Ripka, J.Kubik, A.Platil, P.Kaspar “AMR navigation systems and methods of their calibration” volumes 123–124, 23 September 2005, Pages 122-128
- [30] F. Jin “Mathematical approaches for the Calibration of the Champ Satellite Magnetic Field Measurements” Measurement Science and Technology, Volume 22, Number 5
- [31] [https://geomaps.wr.usgs.gov/gump/common/rubens\\_coil.html](https://geomaps.wr.usgs.gov/gump/common/rubens_coil.html)
- [32] <https://forum.digikey.com/t/polarity-reversal-using-a-dpdt-switch/626>



## 5.1 Ελληνική βιβλιογραφία

- H. Young, *Ηλεκτρομαγνητισμός σύγχρονη οπτική φυσική*, Παπαζήση
- Δ. Πάνιας, *Γενική Χημεία*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 2005
- Θ. Τσιμπούκης, *Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο Βασική Θεωρία και εφαρμογές*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης
- Ι. Ρουμελιώτης, Ι. Τσαμαλέγκας, *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία*, Τζιόλα
- S.O Kasap, *Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων*, Παπασωτηρίου, 2004
- Π. Βουρνά, *Αισθητήρας Μαγνητικού πεδίου Βασισμένος στο φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης*, ΕΜΠ, 2010
- Ε. Χατζηπαναγιώτου, *Διάταξη διακρίβωσης Μαγνητομέτρου*, ΕΜΠ, 2016

## 5.2 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- I. Harald, *Φυσική στερεάς κατάστασης Εισαγωγή στις αρχές της Επιστήμης των υλικών*, Ζήτη, 2012
- J.R Reitz, F.J Milford, R.W Christy, *Τα θεμέλια της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 2004
- K.Yoshida, *Theory of Magnetism*, Springer, 1996
- D.C Wiley, *Magnetism Principles and Applications*, Wiley, 1995

## 5.3 Άρθρα

- M.E Mc Henry, Willard M.A., Laughlin D.E, 1999, "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as softmagnets", *Materials transactions* 43(8):2000-2005 · August 2002.
- T. Richards, E. Lucas. "A robust calibration and alignment procedure for collocated magnetometer and accelerometer sensors" DRDC-RDDC 2015-N009.
- P. Ripka "Advances in fluxgate sensors" Elsevier Physical, Vol. 106,pp. 1–3, 2003

- Razmkhah, M. J. Eshraghi, F. Forooghi, F. Sarreshtedari, M. “Fundamental mode fluxgate magnetometers for active magnetic shielding”, 19th Iranian Conference on Electrical Engineering Pages: 1 – 4
- Chih-Cheng Lu 1,2,\* , Jeff Huang 1, Po-Kai Chiu 1, Shih-Liang Chiu 1 and Jen-Tzong Jeng, “High sensitivity Low-noise Miniature Fluxgate Magnetometers Using a flip chip Conceptual design in Sensors”, 14(8):13815-29 · August 2014
- Ken Evans, “Fluxgate Magnetometers Explained”, INVASENS, pp. 1-2, 2006
- Y. Okazaki, S. Yananse, and N. Sugimoto, “Active magnetic shielding with Magneto-Impedance Sensor”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 13, no. 1-4,
- M. Diaz-Michelena, R. Sanz, M.F. Cerdan, and A.B Fernandez, “Calibration of QM-MOURA three axis magnetometer and gradiometer”, Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, Vol. 4, no. 2015, pp.1-18
- J. Vcelak P.Ripka, J.Kubik, A.Platil, P.Kaspar “AMR navigation systems and methods of their calibration” volumes 123–124, 23 September 2005, Pages 122-128
- F.Jin “Mathematical approaches for the Calibration of the Champ Satellite Magnetic Field Measurements” Measurement Science and Technology, Volume 22, Number 5
- H. Chiriac, T. Ovari, Marinescu CS. “Comparative study of the giant magneto-impedance effect in CoFeSiB glass-covered and cold-drawn amorphous wires”. IEEE Trans Magn 33:3352–4, 1997
- La Malfa, Salvatore, “Rtd Fluxgate Magnetometers”, Chapter1, pp.1-3, 2012
- Mattia Butta, “Orthogonal Fluxgates”, SSM, vol. 19, pp.1-3

#### 5.4 Ιστοσελίδες

1. <https://physicsgg.me/2013/06/09>
2. <http://physiclessons.blogspot.gr/2013/04/>
3. [https://www.researchgate.net/figure/Figures-1a-and-1b-a-Drawing-by-author-of-the-Helmholtz-coil-design-b\\_fig1\\_289294812](https://www.researchgate.net/figure/Figures-1a-and-1b-a-Drawing-by-author-of-the-Helmholtz-coil-design-b_fig1_289294812)

4. <https://about.illinoisstate.edu/avidal/Pages/Magnetic%20orientation%20and%20transduction.aspx>
5. [https://geomaps.wr.usgs.gov/gump/common/rubens\\_coil.html](https://geomaps.wr.usgs.gov/gump/common/rubens_coil.html)
6. <https://forum.digikey.com/t/polarity-reversal-using-a-dpdt-switch/626>
7. <http://www.supracon.com/cms/html/2/browse/232>