



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Βελτιστοποίηση μαγνητικού αισθητήρα Hall για την επιτήρηση υγείας χάλυβα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Τρουμπέτας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βελτιστοποίηση μαγνητικού αισθητήρα Hall για την επιτήρηση υγείας
χάλυβα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Τρουμπέτας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Νοεμβρίου 2023.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σπυρίδων Αγγελόπουλος
Μεταδιδακτορικός
Ερευνητής ΕΜΠ

.....
Κλειώ Βόσου
Μεταδιδακτορικός
Ερευνητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Τρουμπέτας

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Copyright © Βασίλειος Τρουμπέτας, 2023.

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

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία καλύπτει τον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού, εστιάζοντας ιδιαίτερα στους μαγνητικούς αισθητήρες και τη χρήση τους στον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών, συγκεκριμένα του χάλυβα. Με γνώμονα αυτό πραγματοποιείται η ανάπτυξη και ειδικότερα η βελτιστοποίηση μιας διάταξης επιτήρησης της υγείας χάλυβα. Η ανάπτυξη της διάταξης δημιουργείται με την χρήση αισθητήρα Hall και η βελτιστοποίηση με την δημιουργία 4^{ων} διαφορετικών μετρητικών δομών πάνω στην ίδια διάταξη. Για να γίνει αυτό εφικτό αρχικά μελετήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά που διαθέτει αισθητήρας Hall. Έπειτα μοντελοποιήθηκε και κατασκευάστηκε το κύκλωμα της διάταξης. Στη συνέχεια προγραμματίστηκε ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε ώστε να γίνεται λήψη μετρήσεων από την υπό εξέταση περιοχή. Επίσης σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε 3D ένα πλαίσιο για την σταθεροποίηση της διάταξης. Τέλος έγιναν μετρήσεις σε δοκίμιο χάλυβα με φθορά, επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις και βγήκαν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Λέξεις-κλειδιά: *Αισθητήρας Hall, Μη καταστροφικός έλεγχος, Μαγνητισμός, Επιτήρηση χάλυβα, Βελτιστοποίηση Αισθητήρα*

Abstract

This postgraduate thesis covers the field of electromagnetism, focusing specifically on magnetic sensors and their use in the non-destructive testing of materials, especially steel. With this in mind, the development and, more importantly, the optimization of a steel health monitoring system is undertaken. The system is developed using a Hall sensor and optimized by creating four different measuring structures on the same system. To achieve this, the technical specifications of the Hall sensor were initially studied. Then the circuit of the system was modelled and constructed. Subsequently, the microcontroller used to take measurements from the area under examination was programmed. A 3D frame was also designed and printed to stabilize the system. Finally, measurements were taken on a steel sample with wear, the measurements were processed, and the results of the optimization were obtained.

Keywords: *Hall Sensor, Non Destructive Testing, Magnetization, Steel Monitoring, Sensor Optimization*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πρωτότυπο και ενδιαφέρον θέμα καθώς και για την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Μεταδιδάκτορα κ. Σπυρίδων Αγγελόπουλο, για την άμεση βοήθεια του όποτε υπήρχε ανάγκη, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητήρων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. για τη συνεργασία τους και την παροχή του εξοπλισμού τους κατά την εκπόνηση της Εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	iv
Abstract	vi
Ευχαριστίες	viii
Πίνακας Περιεχομένων	x
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xiv
Ευρετήριο Πινάκων	xvii
1. Κεφάλαιο: Εισαγωγή - Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού	1
1.1 Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία	1
1.2 Εξισώσεις Maxwell	3
1.3 Μαγνητική Υστέρηση	8
1.4 Μηχανισμοί Μαγνήτισης	11
1.5 Καμπύλη Υστέρησης και Συχνότητας	12
1.6 Ορισμός Μαγνητικού Πεδίου Διέγερσης	17
1.7 Ορισμός Σωληνοειδές πηνίου	21
1.8 Σύστημα Πηνίων Helmholtz	23
2. Κεφάλαιο: Μαγνητικοί αισθητήρες	25
2.1 Ορισμός Αισθητήρων	25
2.2 Κατηγορίες Αισθητήρων.....	26
2.3 Ορισμός Μαγνητικός Αισθητήρας	26
2.4 Είδη Μαγνητικών αισθητήρων.....	27
2.4.1 Αισθητήρες Hall	27
2.4.2 Αισθητήρες Flux-Gate.....	29
2.4.3 Αισθητήρες AMR	30
2.4.4 Αισθητήρες GMR	31
2.4.5 Αισθητήρες LVTD.....	32
2.4.6 Αισθητήρες MDL.....	33
2.4.7 Αισθητήρες SQUID.....	35
2.4.8 Μαγνητοοπτικοί Αισθητήρες	37
3. Κεφάλαιο: Μη Καταστροφικός Έλεγχος (Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα)	39
3.1 Εισαγωγή στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο.....	39

3.2	Εφαρμογές Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα.....	40
3.2.1	Έλεγχος Αγωγών	40
3.2.2	Έλεγχος Γέφυρας	41
3.2.3	Έλεγχος Σιδηροδρομικών Γραμμών	41
3.2.4	Έλεγχος Δεξαμενών	42
3.2.5	Έλεγχος σε Συρματόσχοινα	43
3.2.6	Έλεγχος στην Αεροπορική Βιομηχανία.....	44
3.3	Μέθοδοι Μη Καταστρεπτικών Ελέγχων	45
3.3.1	Ραδιογραφικές Μέθοδοι.....	45
3.3.2	Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά	45
3.3.3	Μέθοδος Δινορρευμάτων	46
3.3.4	Μέθοδοι Υπερήχων	47
3.3.5	Φασματοσκοπία Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD).....	48
3.3.6	Μέτρηση Θορύβου Barkhausen.....	49
3.3.7	Μέτρηση Μαγνητικής Διαπερατότητας.....	50
3.3.8	Μέτρηση μαγνητικής επαγωγής	51
4.	Κεφάλαιο: Ανάπτυξη και Βελτιστοποίηση Μαγνητικού Αισθητήρα Hall	53
4.1	Ανάπτυξη της Διάταξη με Αισθητήρα Hall	53
4.1.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Αισθητήρα Hall που Χρησιμοποιήθηκε... ..	53
4.1.2	Αρχή Λειτουργίας Μαγνητικής Διάταξης	56
4.1.3	Πειραματικές Διατάξεις προς Βελτιστοποίηση	57
4.2	Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας - Πειραματικός Εξοπλισμός	57
4.2.1	Εξοπλισμός Διάταξης.....	57
4.2.2	Διάταξη	59
4.2.3	Προγραμματισμός Κυκλώματος.....	62
4.2.4	Διάταξη Σταθεροποίησης Κυκλώματος.....	63
4.2.5	Κατασκευή Διάταξης	66
4.3	Μετρήσεις - Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	67
5.	Κεφάλαιο: Συμπεράσματα	76

5.1	Συμπεράσματα	76
5.2	Προτάσεις για Μελλοντική Μελέτη	77
	Βιβλιογραφία	78

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Δυναμικές γραμμές	2
Σχήμα 2: Πρώτος νόμος του Maxwell.....	4
Σχήμα 3: Δεύτερος νόμος του Maxwell.....	5
Σχήμα 4: Τρίτος νόμος του Maxwell.....	6
Σχήμα 5: Τέταρτος νόμος του Maxwell	7
Σχήμα 6: Μαγνητική καμπύλη υστέρησης	9
Σχήμα 7: Μεταβολή κατεύθυνσης μαγνητικού πεδίου κατά 180° εντός τοίχου	11
Σχήμα 8: Καμπύλης υστέρησης-Συχνότητα.....	15
Σχήμα 9: Μεταβολή συνιστώσας απώλειας ενέργειας - Συχνότητα	16
Σχήμα 10: Μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό σωληνοειδούς πηνίου	21
Σχήμα 11: Μεταβολή έντασης μαγνητικού πεδίου κατά μήκος σωληνοειδούς πηνίου	22
Σχήμα 12: Μαγνητικό πεδίο πηνίων Helmholtz.....	23
Σχήμα 13: Αισθητήρας Hall.....	29
Σχήμα 14: Αισθητήρας Flux-Gate	29
Σχήμα 15 Αισθητήρες AMR.....	31
Σχήμα 16 Αισθητήρας GMR.....	32
Σχήμα 17: Αισθητήρας LVTD.....	33
Σχήμα 18: Αισθητήρας MDL	35
Σχήμα 19: Αισθητήρας SQUID	36
Σχήμα 20: Μαγνητοοπτικός αισθητήρας	38
Σχήμα 21: Έλεγχος αγωγού.....	41
Σχήμα 22: Έλεγχος γέφυρας	41
Σχήμα 23: Έλεγχος σιδηροδρομικών γραμμών	42
Σχήμα 24: Έλεγχος δεξαμενής	43
Σχήμα 25: Εργαλείο ελέγχου σε συρματοσχοίνα.....	43
Σχήμα 26: Έλεγχος στοιχείων ενός αεροπλάνου	44
Σχήμα 27: Ραδιογραφικής μέθοδος	45
Σχήμα 28: Διαδικασία ελέγχου με διεισδυτικά Υγρά.....	46
Σχήμα 29: Αρχή λειτουργίας μεθόδου δινορρευμάτων.....	46

Σχήμα 30: Έλεγχος με μέθοδο υπερήχων.....	48
Σχήμα 31: Ανάλυση φασματοσκοπικής περίθλασης ακτίνων Χ	49
Σχήμα 32: Τυπικός αισθητήρας Hall νέας γενιάς.	54
Σχήμα 33 Κύκλωμα αισθητήρα Hall.	55
Σχήμα 34 Διαστάσεις του αισθητήρα Hall.....	56
Σχήμα 35: Αναπαράσταση της διάταξης του μαγνήτη σε «Π» [33].....	58
Σχήμα 36: Αναπαράσταση της διάταξης που κατασκευάστηκε [33].....	58
Σχήμα 37: Κύκλωμα διάταξης με 2 αισθητήρες Hall	59
Σχήμα 38: Τελική διάταξη μαγνητικού αισθητήρα Hall	60
Σχήμα 39: Μικροελεγκτής ESP32.....	61
Σχήμα 40: Σύνδεση αισθητήρα με breadboard.....	61
Σχήμα 41: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή	62
Σχήμα 42: Απεικόνιση προσανατολισμού πλαισίου στο Ultimaker Cura	63
Σχήμα 43: 3D Εκτυπωτής FDM	64
Σχήμα 44: 3D Εκτύπωση πλαισίου σταθεροποίησης.....	65
Σχήμα 45: Τελική διάταξη μετρήσεων.....	66
Σχήμα 46: Δοκίμιο φερρομαγνητικού χάλυβα με εμφανή φθορά	66
Σχήμα 47: Διάταξη κίνησης αισθητήρα σταθερής ταχύτητας.....	67
Σχήμα 48: Καθορισμός αισθητήρων στην διάταξη	68
Σχήμα 49: Τιμές αισθητήρα Bottom Right Left σε δοκίμιο χωρίς φθορά.....	69
Σχήμα 50: Τιμές αισθητήρα Mid σε δοκίμιο χωρίς φθορά	69
Σχήμα 51: Τιμές αισθητήρα Right σε δοκίμιο χωρίς φθορά	70
Σχήμα 52 Τιμές αισθητήρα Bottom Right Left σε δοκίμιο με φθορά	71
Σχήμα 53: Σύγκριση τιμών αισθητήρα Bottom Right Left σε δοκίμιο με φθορά και χωρίς φθορά	72
Σχήμα 54: Τιμές αισθητήρα Mid σε δοκίμιο με φθορά	73
Σχήμα 55: Σύγκριση τιμών αισθητήρα Mid σε δοκίμιο με φθορά και χωρίς φθορά	73
Σχήμα 56: Τιμές αισθητήρα Right σε δοκίμιο με φθορά	74
Σχήμα 57: Σύγκριση τιμών αισθητήρα Right σε δοκίμιο με φθορά και χωρίς φθορά	75

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Ηλεκτρικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.	55
Πίνακας 2: Κύριες ρυθμίσεις 3D εκτύπωσης.....	64

1. Κεφάλαιο: Εισαγωγή - Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία

Η έρευνα για την αλληλεπίδραση του ηλεκτρισμού με τον μαγνητισμό ξεκίνησε με ένα πείραμα του Hans Christian Oersted το 1819. Κατά την διάρκεια αυτού του πειράματος, ο Oersted τοποθέτησε έναν ηλεκτρικό αγωγό πάνω από μια πυξίδα και διαπίστωσε ότι η βελόνα της πυξίδας αντέδρασε όταν στο καλώδιο έγινε διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτή η διαπίστωση επέτρεψε την κατασκευή του πρώτου γαλβανόμετρου, ένα μέτρο για το ηλεκτρικό ρεύμα, βασισμένο σε αυτήν την αλληλεπίδραση.

Έναν χρόνο αργότερα, το 1820, ο André Ampère διατύπωσε μια μαθηματική θεωρία για να περιγράψει το πείραμα του Oersted. Η τελική του εξίσωση, που δημοσιεύθηκε το 1821, αποτέλεσε μια σημαντική συμβολή στην κατανόηση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. [1].

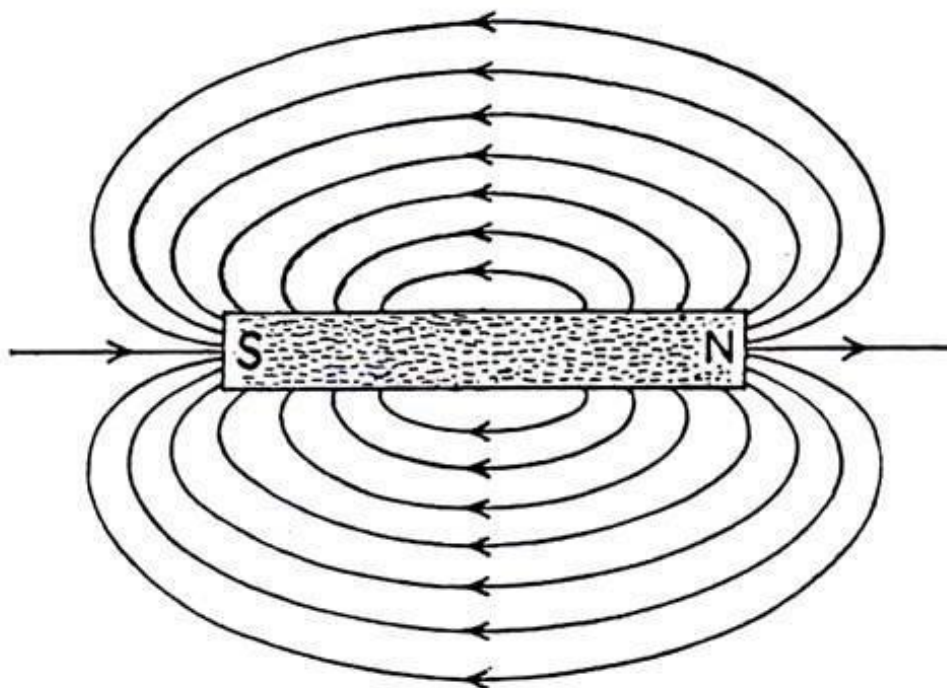
Παρ' όλ' αυτά, η πιο συστηματική μελέτη του ηλεκτρομαγνητισμού πριν τον James Clerk Maxwell, διεξήχθη από τον Michael Faraday. Ο Faraday μελέτησε εκτενώς ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα κατά τη περίοδο 1831 με 1855, ενώ παρήγαγε πάνω από 16000 οργανωμένες καταχωρήσεις στις εργαστηριακές του σημειώσεις [1].

Μεταξύ των πολυάριθμων πειραμάτων που διεξήγαγε, δύο ήταν αυτά που συνέβαλαν ιδιαίτερα στη θεωρία του James Clerk Maxwell. Η πρώτη κατηγορία πειραμάτων είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ενώ η δεύτερη κατηγορία ανέδειξε το φαινόμενο που αποκαλείται "lines of force". Ωστόσο, τα ευρήματα του Faraday δεν αναγνωρίστηκαν ευρέως από την επιστημονική κοινότητα, καθώς έλειπε η μαθηματική τους διατύπωση, πράγμα που τους στερούσε από την απαραίτητη επιστημονική επιβεβαίωση. [1].

Ο Maxwell ασχολήθηκε για πρώτη φορά με τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού το 1855 δημοσιεύοντας μια ανάλυση του φαινομένου που παρατήρησε ο Faraday

“lines of force”. Αργότερα, το 1873, δημοσίευσε το “A treatise on Electricity and Magnetism”, σε μια προσπάθεια να δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη πραγματεία επί της ηλεκτρικής επιστήμης.

Το μέγεθος του έργου, αλλά και η ασαφής διατύπωση σε ορισμένα σημεία κατέστησαν το έργο δυσανάγνωστο, έτσι δεν έχαιρε αναγνώρισης από την επιστημονική κοινότητα [1].



Σχήμα 1: Δυναμικές γραμμές

Δύο κρίσιμα στάδια συνέβαλαν στην ευρύτερη αποδοχή και διάδοση των εργασιών του Maxwell. Πρώτον, το 1881, ο Oliver Heaviside εξέλιξε και απλοποίησε τις εξισώσεις του Maxwell στις τέσσερις βασικές μορφές που είναι ευρέως γνωστές και χρησιμοποιούνται σήμερα. Δεύτερον, το 1887, ο Heinrich Hertz κατάφερε να πραγματοποιήσει πειραματική απόδειξη της θεωρίας του πεδίου που προώθησε ο Maxwell, ανιχνεύοντας την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε κενό χώρο. [3].

1.2 Εξισώσεις Maxwell

Παρακάτω διατυπώνονται οι τέσσερις νόμοι του Maxwell, τόσο στη διαφορική, όσο και στην ισοδύναμη ολοκληρωτική τους μορφή. Οι νόμοι παρουσιάζονται στη μορφή που έχουν στο καθιερωμένο σύστημα S.I. [4].

Τα μεγέθη που ορίζονται μέσω των νόμων είναι:

E: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

B: Η πυκνότητα μαγνητικής ροής

Σε συνάρτηση με τα εξής μεγέθη:

ϵ_0 : Η διηλεκτρική σταθερά στο κενό

μ_0 : Η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό

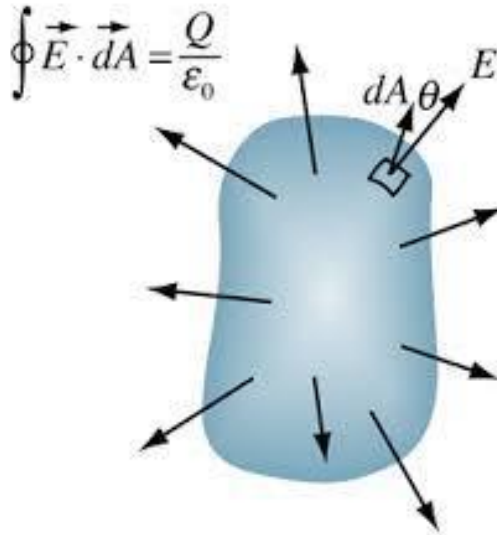
ρ : Η χωρική πυκνότητα φορτίου

J: Η πυκνότητα ρεύματος

Πρώτος Νόμος - Νόμος Gauss

Διαφορική μορφή :
$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

Ολοκληρωτική μορφή :
$$\oiint_{\partial\Omega} E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho dV \quad (2.2)$$



Σχήμα 2: Πρώτος νόμος του Maxwell

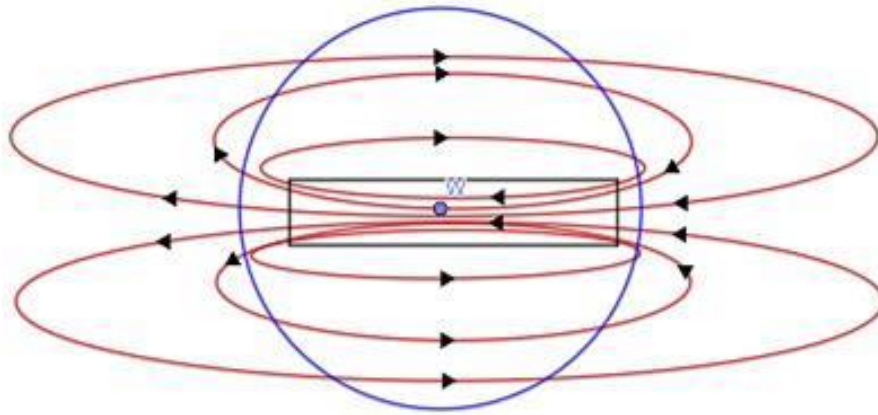
Αυτός ο νόμος μπορεί να ερμηνευτεί με τον εξής τρόπο: από ένα θετικό φορτίο εκπέμπονται ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, οι οποίες εκπέμπονται σφαιρικά προς τα έξω. Από την άλλη πλευρά, για ένα αρνητικό φορτίο, οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται και εισέρχονται σφαιρικά προς το εσωτερικό του.

Στην ολοκληρωτική μορφή του, ο νόμος ορίζει ότι το ολοκλήρωμα των προκείμενων ολοκληρωτικών γραμμών σε μια δεδομένη κλειστή επιφάνεια είναι ίσο με το φορτίο που περικλείεται από αυτήν την επιφάνεια, διαιρούμενο με την σταθερά της ηλεκτρικής διαπερατότητας στο κενό [4].

Δεύτερος Νόμος - Νόμος Gauss για το μαγνητισμό

$$\text{Διαφορική μορφή : } \nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{Ολοκληρωτική μορφή : } \oiint_{\partial\Omega} B \cdot dS = 0 \quad (2.4)$$



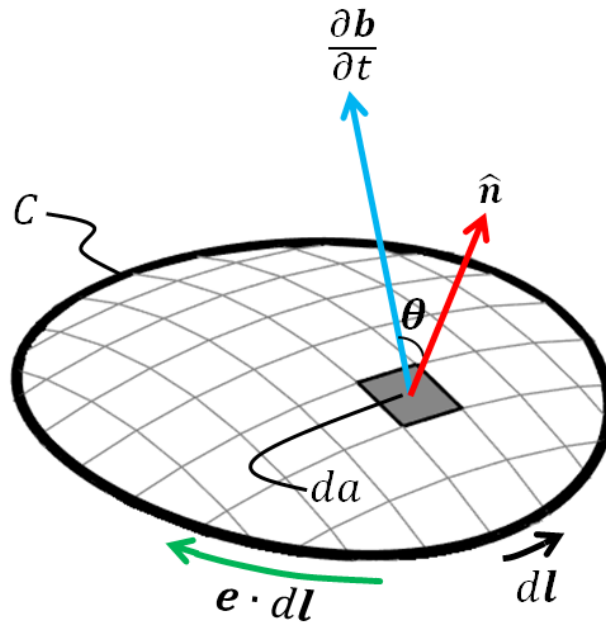
Σχήμα 3: Δεύτερος νόμος του Maxwell

Ο δεύτερος νόμος του Maxwell είναι ανάλογος του πρώτου για το μαγνητικό πεδίο. Στην ολοκληρωτική του μορφή καθορίζει τη μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια. Σύμφωνα, με το δεύτερο νόμο του Maxwell σε αυτή τη περίπτωση η συνολική μαγνητική ροή είναι πάντα μηδέν, αποκλείοντας έτσι την ύπαρξη μαγνητικού μονοπόλου, το οποίο θα αντιστοιχούσε στο στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα κλειστές καμπύλες, με αποτέλεσμα κάθε δυναμική γραμμή να εξέρχεται όσες φορές εισέρχεται σε μια κλειστή επιφάνεια.

Τρίτος Νόμος – Εξίσωση Maxwell-Faraday

$$\text{Διαφορική μορφή: } \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\text{Ολοκληρωτική μορφή: } \oint_{\partial \Sigma} E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} B \cdot dS \quad (2.6)$$



Σχήμα 4: Τρίτος νόμος του Maxwell

Οι εξισώσεις περιγράφουν το τρόπο με τον οποίο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρικό πεδίο. Σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό, το ηλεκτρικό πεδίο δε περιστρέφεται. Όμως, σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται τοπικά, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο περιστρεφόμενο γύρω από τη μεταβολή.

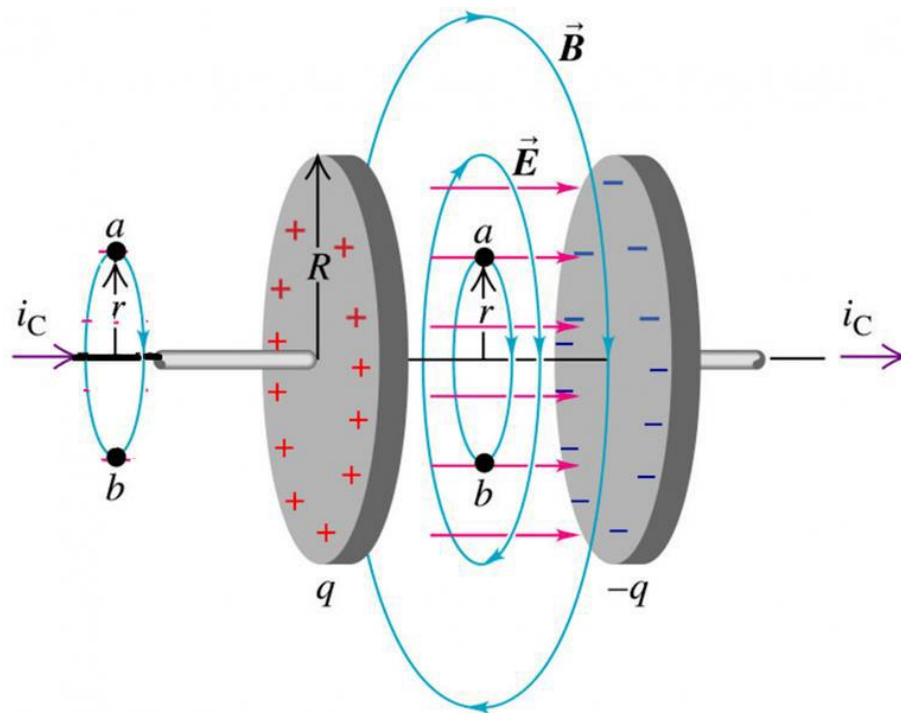
Σε ολοκληρωτική μορφή, εφόσον υπάρξει μεταβολή του συνολικού μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από μια επιφάνεια, εξ αιτίας της μεταβολής αυτής δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο σύνορο της επιφάνειας [4].

Τέταρτος Νόμος - Νόμος Ampere με προσθήκη Maxwell

$$\text{Διαφορική μορφή: } \nabla \times B = \mu_0 \left(J + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (2.7)$$

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oint_{\partial \Sigma} B \cdot dl = \mu_0 \left(\iint_{\Sigma} J \cdot dS + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} E \cdot dS \right) \quad (2.8)$$



Σχήμα 5: Τέταρτος νόμος του Maxwell

Οι εξισώσεις περιγράφουν την επαγωγή του μαγνητικού πεδίου εξ αιτίας τόσο της μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και της ύπαρξης ηλεκτρικού ρεύματος. Σε περίπτωση σταθερού ηλεκτρικού πεδίου το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται γύρω από τοπικό ηλεκτρικό ρεύμα, εφόσον υπάρχει. Σε περίπτωση μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου δημιουργείται συνιστώσα μαγνητικού πεδίου που περιστρέφεται γύρω από τη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου και υπερτίθεται στη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται από την υπέρθεση αυτή.

Στην ολοκληρωτική μορφή, όταν διέρχεται ρεύμα κάθετα σε επιφάνεια ή το ηλεκτρικό πεδίο που διέρχεται από αυτή μεταβάλλεται, τότε δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στην άκρη της [4].

1.3 Μαγνητική Υστέρηση

Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης εμφανίζεται σε φερρομαγνητικά υλικά και προσφέρει κεντρικές πληροφορίες για τον χαρακτηρισμό τους. Εκδηλώνεται σε μικροσκοπικό επίπεδο, και για την κατανόησή του, χρειαζόμαστε όρους όπως τη μαγνητική περιοχή και το μαγνητικό τοίχωμα. Για να το καταλάβουμε καλύτερα, συχνά αναφερόμαστε στο διάγραμμα B-H, που δείχνει την καμπύλη υστέρησης και την καμπύλη μαγνήτισης, όπου υπάρχουν σημειωμένες μερικές κρίσιμες καταστάσεις από a-f.

Όπως μπορεί να γίνει φανερό και στο Σχήμα 6, το διακεκομμένο καμπυλόγραμμο από το 0 μέχρι το a απεικονίζει την καμπύλη μαγνήτισης. Ένα φερρομαγνητικό υλικό μπορεί να διατηρεί κάποια μαγνήτιση ακόμη και χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Εάν για μηδενικό πεδίο δεν υπάρχει καμία παραμένουσα μαγνήτιση, τότε αναφερόμαστε στο φαινόμενο αυτό ως πλήρη απομαγνήτιση.

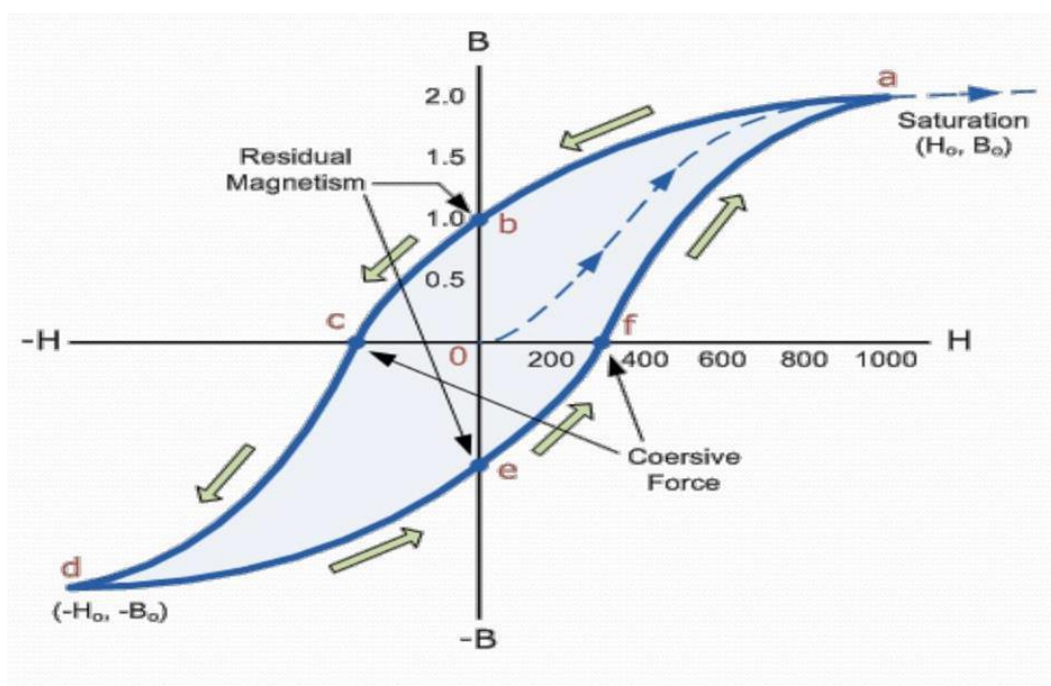
Η καμπύλη μαγνήτισης απεικονίζει την αλλαγή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο υλικό, από την αρχική κατάσταση όπου είναι πλήρως απομαγνητισμένο (κατάσταση 0) μέχρι την τελική κατάσταση του κορεσμού (κατάσταση a). Στο σημείο αυτό, το υλικό έχει μαγνητιστεί στο μέγιστο του δυναμικό, και περαιτέρω αυξήσεις στο μαγνητικό πεδίο έχουν ελάχιστες επιπτώσεις στην πυκνότητα της ροής. Για την λήψη αυτής της καμπύλης, το πρώτο βήμα είναι να φέρουμε το υλικό σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης, γεγονός που απαιτεί ειδική διαδικασία, καθώς σπανίως βρίσκεται φυσικά σε αυτήν την κατάσταση. Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε σταδιακά αυξανόμενες τιμές μαγνητικού πεδίου, μετρώντας κάθε φορά την αντίστοιχη πυκνότητα μαγνητικής ροής, μέχρι την επίτευξη της κατάστασης κορεσμού.

Η ανάλυση της καμπύλης υστέρησης ξεκινά από την κατάσταση a με πυκνότητα μαγνητικής ροής B_s . Εξετάζεται σε ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο με σταθερή συχνότητα και πλάτος ταλάντωσης, το οποίο αντιπροσωπεύει την πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού.

Το μαγνητικό πεδίο μειώνεται συνεχώς με σταθερή ταχύτητα, μέχρι να φθάσει στο μηδέν (κατάσταση b). Ενώ το φερρομαγνητικό υλικό δεν επανέρχεται πλήρως σε

κατάσταση απομαγνήτισης, υπάρχει μια υπολειπόμενη μαγνήτιση, που στο σχήμα αναφέρεται ως B_r .

Όταν το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται τώρα προς την αντίθετη διεύθυνση με τον ίδιο ρυθμό, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής πέφτει μέχρι να φθάσει στο μηδέν (κατάσταση c). Η δύναμη του μαγνητικού πεδίου που χρειάζεται για να μηδενίσει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής αναφέρεται ως συνεκτικό πεδίο H_c και απεικονίζεται στο σχήμα.



Σχήμα 6: Μαγνητική καμπύλη υστέρησης

Το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται διαρκώς μέχρι να καταλήξει στην κορυφαία του τιμή (κατάσταση d). Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι στην υψηλότερη του τιμή, το φερρομαγνητικό υλικό είναι κορεσμένο, παρουσιάζοντας πυκνότητα μαγνητικής ροής ίσου μεγέθους αλλά αντίθετου προσανατολισμού σε σχέση με την κατάσταση a.

Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο τώρα αρχίζει να μειώνεται, φθάνοντας εν τέλει στο μηδέν (κατάσταση e). Το φερρομαγνητικό υλικό διατηρεί μια υπολειπόμενη μαγνήτιση που είναι ίσου μεγέθους αλλά αντίθετης κατεύθυνσης σε σχέση με την κατάσταση b.

Στη συνέχεια το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο αυξάνεται διαρκώς μέχρι να καταλήξει στην υψηλότερη του τιμή (κατάσταση d). Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι στην κορυφαία του τιμή, το φερρομαγνητικό υλικό είναι κορεσμένο, παρουσιάζοντας πυκνότητα μαγνητικής ροής ίσου μεγέθους αλλά αντίθετου προσανατολισμού σε σχέση με την κατάσταση a.

Πλέον, η ένταση του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται, μέχρι το μηδενισμό της (κατάσταση e). Στο φερρομαγνητικό υλικό υπάρχει πάλι παραμένουσα μαγνήτιση ίδιου μέτρου και αντίθετης φοράς με της κατάστασης b.

Το μαγνητικό πεδίο αρχίζει πλέον να αυξάνεται προς την ίδια κατεύθυνση με αυτή της κατάστασης a, ωστόσο φτάσει σε τιμή τέτοια ώστε η πυκνότητα μαγνητικής ροής να μηδενίζεται (κατάσταση f). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να αυξάνεται, μέχρι να φτάσουμε στη κατάσταση a. Η καμπύλη υστέρησης διέπεται από αντισυμμετρία.

Μέσα από την καμπύλη υστέρησης, παρουσιάζονται σημαντικές παράμετροι όπως το συνεκτικό πεδίο H_c , η πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού B_s και η υπολειπόμενη μαγνήτιση B_r . Αυτές οι παράμετροι είναι ζωτικής σημασίας για την κατηγοριοποίηση των φερρομαγνητικών υλικών σε σκληρά και μαλακά. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι προτιμότερο να έχουν υψηλό συνεκτικό πεδίο και μεγάλη υπολειπόμενη μαγνήτιση, καθώς αυτό συνεπάγεται αυξημένη ενεργειακή αποθήκευση, που σχετίζεται με το γινόμενο $(B \cdot H)_{max}$.

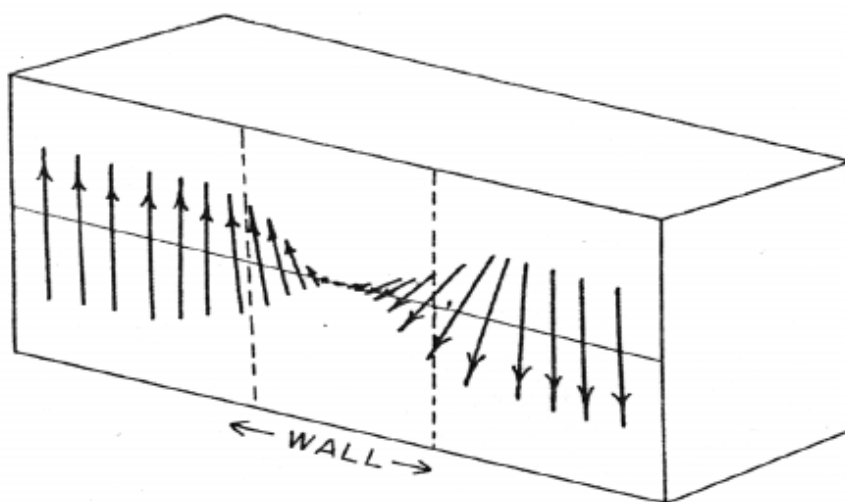
Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης δεν εμφανίζεται μόνο όταν η πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεστεί. Η υπολειπόμενη μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο είναι στενά συνδεδεμένα με την μέγιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τόσο η υπολειπόμενη μαγνήτιση όσο και το συνεκτικό πεδίο παρουσιάζουν μειωμένες τιμές όταν η μέγιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι χαμηλότερη.

Επιπλέον, το φαινόμενο της υστέρησης δεν παρατηρείται μόνο σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο και την πυκνότητα μαγνητικής ροής, αλλά επίσης και ανάμεσα στην ένταση του μαγνητικού πεδίου και την μαγνητική πόλωση, όπου εκεί ονομάζουμε την σχετική καμπύλη ως καμπύλη υστέρησης πόλωσης. Εξίσου, υπάρχει ένα συνεκτικό πεδίο για αυτή την καμπύλη, το οποίο καθορίζεται από την ένταση του μαγνητικού

πεδίου που είναι απαραίτητη για την εξάλειψη της υπολειπόμενης πόλωσης, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από το συνεκτικό πεδίο που αναφέρεται στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Για να αποφευχθεί η παρερμηνεία, το συνεκτικό πεδίο σημειώνεται ως H_{cB} για την καμπύλη B-H και ως H_{cJ} για την καμπύλη J-H. Στην περίπτωση των μαλακών μαγνητικών υλικών, καθώς οι καμπύλες B-H και J-H είναι σχεδόν ταυτόσημες, το συνεκτικό πεδίο απλώς αναφέρεται ως H_c . [5].

1.4 Μηχανισμοί Μαγνήτισης

Η μαγνήτιση εκδηλώνεται σε μικροσκοπικό επίπεδο. Τα μαγνητικά υλικά έχουν μια μικροσκοπική δομή που ελαχιστοποιεί την εξωτερική ενέργεια. Από αυτή την διαδικασία προκύπτουν περιοχές όπου τα μαγνητικά πεδία των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων έχουν ομοιογενή προσανατολισμό. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται στην αγγλική γλώσσα "domains". Η μετάβαση ανάμεσα στις περιοχές δεν είναι άμεση, αλλά διαμεσολαβούνται από δομές γνωστές ως μαγνητικά τοιχώματα (domain walls). Το κανονικό πλάτος ενός τοίχου στον σίδηρο σπάνια υπερβαίνει τα 40 nm, ενώ στα περισσότερα υλικά δεν ξεπερνά τα 10μm. Η εκτίμηση αυτών των διαστάσεων βασίζεται στην αρχή της ελαχιστοποίησης της ενέργειας.



Σχήμα 7: Μεταβολή κατεύθυνσης μαγνητικού πεδίου κατά 180° εντός τοίχου

Οι τοίχοι μπορούν να διαχωρίζουν περιοχές με διαφορά φάσης 180°, οπότε ονομάζονται τοίχοι Bloch 180°, αλλά μπορούν να διαχωρίζουν και περιοχές με

διαφορά φάσης 90° , με αυτήν να επηρεάζει ανάλογα το μήκος τους. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει κατά το μήκος του τοίχου [6].

Στον τομέα της μαγνήτισης, οι έννοιες της περιοχής και του τοίχου περιοχής παίζουν βασικό ρόλο στην κατανόηση της μαγνήτισης και απομαγνήτισης ενός υλικού. Δύο κύριοι μηχανισμοί διέπουν τη διαδικασία μαγνήτισης. Ο πρώτος είναι η αναδιάταξη των τοίχων περιοχής, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε χαμηλά επίπεδα εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Καθώς η ένταση του πεδίου αυξάνεται, οι περιοχές με συμφωνημένο μαγνητικό πεδίο επεκτείνονται, επικαλύπτοντας τις γειτονικές τους περιοχές. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την κορύφωση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού [6]. Ένα ενδιαφέρον παρεπόμενο αυτής της διαδικασίας είναι ο λεγόμενος θόρυβος Barkhausen, ο οποίος προκύπτει λόγω των ξαφνικών μεταβολών της θέσης των τοίχων περιοχής, προκαλώντας απότομες αλλαγές στη μαγνητική ροή μέσα στο υλικό. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να ανιχνευτούν ως ηλεκτρικοί παλμοί και εξαρτώνται από τη μικροδομή και την εσωτερική τάση του υλικού [7].

Μετά την κορύφωση της διαπερατότητας του υλικού, παρατηρείται ένας διαφορετικός μηχανισμός μαγνήτισης. Εδώ, το μαγνητικό πεδίο των διάφορων περιοχών προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με το εξωτερικό επιβαλλόμενο πεδίο. Οι διαδοχικές αυξήσεις στην μαγνητική ροή του υλικού είναι πολύ πιο ήπιες σε σύγκριση με εκείνες που σημειώνονται όταν επικρατεί ο πρώτος μηχανισμός και συνεχίζουν να μειώνονται όλο και περισσότερο, μέχρι το υλικό να φτάσει στην κατάσταση του κορεσμού. Καθώς η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται, αρχίζει να δρα η διαδικασία του "nucleation", κατά την οποία σχηματίζονται νέες μαγνητικές περιοχές μέσα στο υλικό [6].

1.5 Καμπύλη Υστέρησης και Συχνότητας

Η καμπύλη μαγνήτισης για δεδομένο φερρομαγνητικό δοκίμιο διαφέρει ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Παρατηρούμε, ότι η περικλειόμενη, από τη καμπύλη, περιοχή αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο, αλλά έχει αποδειχθεί, ότι οφείλεται

στις αυξημένες απώλειες ενεργείας, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από την αύξηση της περικλειόμενης περιοχής [5].

Για να ορίσουμε τις απώλειες ενέργειας ανά κύκλο λειτουργίας, είναι απαραίτητη η χρήση ενός φυσικού μεγέθους που ονομάζεται δiάνυσμα Poynting και ορίζεται ως:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.9)$$

Όπου:

S : το δiάνυσμα Poynting

E : το δiάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου

H : το δiάνυσμα του μαγνητικού πεδίου

Η στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας που προσφέρεται σε όγκο υλικού έχει βρεθεί ως:

$$p = \int_V \sigma \vec{E}^2 dV + \int_A \vec{S} d\vec{A} \quad (2.10)$$

Όπου:

p : η στιγμιαία πυκνότητα ενεργείας

σ : η ειδική αγωγιμότητα

E : η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

dV : η στοιχειώδης διάφορα δυναμικού

S : το δiάνυσμα Poynting

dA : το στοιχειώδες μαγνητικό δυναμικό

Ο πρώτος όρος της στιγμιαίας πυκνότητας ισχύος συσχετίζεται με τη διαχεόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο δεύτερος με τη ροή ενέργειας προς την επιφάνεια A . Για την ανάλυση

απωλειών ενέργειας σε ηλεκτρικό χάλυβα λαμβάνεται υπόψιν συνήθως μόνο ο δεύτερος όρος και υπολογίζεται ανά κύκλο λειτουργίας ως:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A \vec{S} d\vec{A} dt \quad (2.11)$$

Όπου:

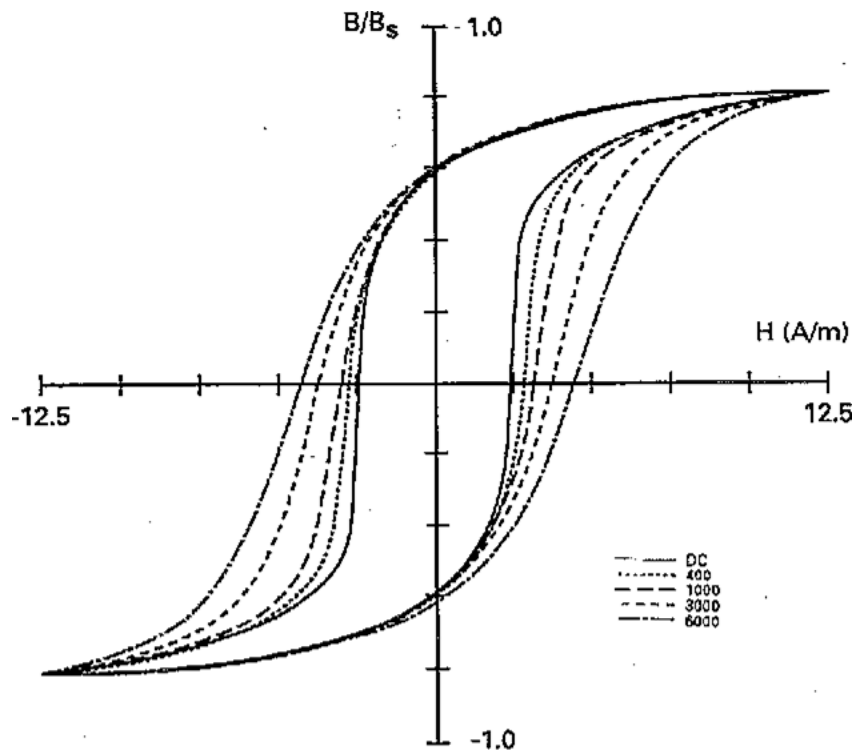
P: απώλειες ενέργειας

T: διάρκεια κύκλου λειτουργίας

S: διάνυσμα Poynting

A: η επιφάνεια προς την οποία γίνεται ροή ενέργειας

Οι απώλειες ενέργειας ανά κύκλο λειτουργίας μπορούν να αναλυθούν ως άθροισμα τριών παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι στατικές απώλειες ενέργειας, που οφείλονται στην απαραίτητη ενέργεια, ώστε να μαγνητίσουμε και να απομαγνητίσουμε το δοκίμιο και είναι παρών ανεξάρτητα της συχνότητας λειτουργίας. Ο δεύτερος παράγοντας οφείλεται στα δινορρεύματα και η επίδραση του γίνεται αντιληπτή, καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Το κλασικό μοντέλο που εξηγούσε τις απώλειες ενέργειας περιλάμβανε μόνο τους δύο παράγοντες, όμως στη πράξη βρέθηκε ότι οι απώλειες ενέργειας που προέβλεπε το μοντέλο απέκλιναν με αυξανόμενο ρυθμό καθώς αυξανόταν η συχνότητα από τις προβλεπόμενες. [2]



Σχήμα 8: Καμπύλης υστέρησης-Συχνότητα

Συνεπώς, το μοντέλο απωλειών ενέργειας διορθώθηκε, ώστε να περιλαμβάνει το τρίτο όρο απωλειών ενέργειας, που ονομάζονται πλεονάζουσες απώλειες (excess losses). Οι αυξημένες απώλειες αποδίδονται σε δυναμικά φαινόμενα, λόγω της κίνησης των μαγνητικών περιοχών (domain walls). Οι απώλειες ενέργειας μπορούν να γραφούν τελικά ως [8]:

$$P_{loss} = P_{hysteresis} + P_{eddy} + P_{excess} \quad (2.12)$$

όπου:

P_{loss} : οι απώλειες ενέργειας

$P_{hysteresis}$: οι απώλειες υστέρησης

P_{eddy} : οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων

P_{excess} : οι πλεονάζουσες απώλειες

Η κάθε συνιστώσα εξαρτάται από τη συχνότητα με διαφορετικό τρόπο. Οι στατικές απώλειες υπολογίζονται ως:

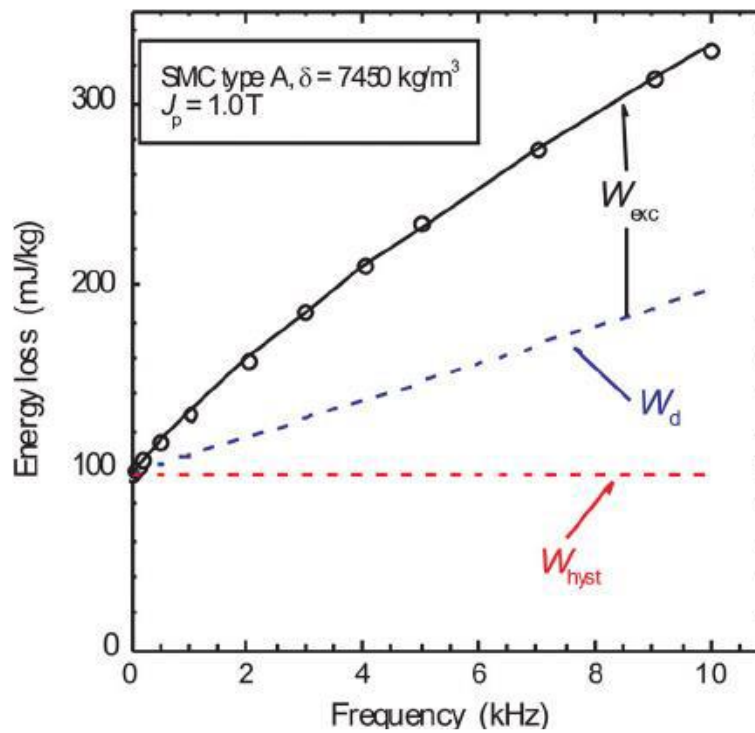
$$P_H = C_o B_m^2 f \quad (2.13)$$

Όπου:

C_o : τιμή χωρητικότητας πυκνωτή

B_m : πυκνότητα μαγνητικής ροής

F : η συχνότητα λειτουργίας



Σχήμα 9: Μεταβολή συνιστώσας απώλειας ενέργειας - Συχνότητα

Μεταβαίνοντας στο προσδιορισμό απωλειών ενέργειας λόγω δινορρευμάτων έχουμε:

$$P_{eddy} = \frac{\pi^2 t^2}{6\rho} (B_m f)^2 \quad (2.14)$$

Όπου:

t: πάχος δοκιμίου

ρ : ειδική αντίσταση δοκιμίου

B_m : πυκνότητα μαγνητικής ροής

Τέλος, οι πλεονάζουσες απώλειες ορίζονται ως :

$$P_{excess} = C_1 B_m f^{\frac{3}{2}} \quad (2.15)$$

Όπου:

C_1 : τιμή χωρητικότητας πυκνωτή

Ο διαχωρισμός των συνιστωσών στις οποίες οφείλονται οι απώλειες, μπορεί να γίνει με βάση το διάγραμμα P/f, [8].

1.6 Ορισμός Μαγνητικού Πεδίου Διέγερσης

Είναι επιθυμητό το μαγνητικό πεδίο διέγερσης να είναι ομοιόμορφο. Δύο διατάξεις που χρησιμοποιούνται ευρύτατα για δημιουργία ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου είναι τα πηνία Helmholtz και το σωληνοειδές πηνίο. Το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί η κάθε διάταξη θα δοθεί αναλυτικά στη συνέχεια [9]. Προς το σκοπό αυτό, υπολογίζεται αρχικά το μαγνητικό πεδίο ενός δακτυλίου, το οποίο θα αποτελέσει “σκαλοπάτι” προς τον υπολογισμό του πεδίου ενός μονοστρωματικού πηνίου, ώστε τελικά να υπολογιστεί το πεδίο για τη κάθε διάταξη [9].

Τα προαναφερθέντα μαγνητικά πεδία θα βρεθούν ως εφαρμογή του νόμου Biot-Savart, ο οποίος είναι ισοδύναμος του νόμου Ampere. Ο νόμος Biot-Savart υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε στοιχειώδες ρευματοφόρο μήκος σε μια δεδομένη απόσταση από αυτό, [9] ως:

$$\vec{dH} = \frac{1}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{v}}{a^2} \quad (2.16)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} I \int \frac{d\vec{l} \times \vec{v}}{a^2} \quad (2.17)$$

Όπου:

H : η ένταση του μαγνητικού πεδίου

I : η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το στοιχειώδες μήκος

$d\vec{l}$: το στοιχειώδες μήκος

A : η απόσταση από το στοιχειώδες μήκος του μετρούμενης έντασης

\vec{v} : το μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση από το στοιχειώδες μήκος προς το σημείο που μετράμε την ένταση

Αντικαθιστώντας το μέτρο του εξωτερικού γινομένου στο τύπο 2.16 έχουμε :

$$dH = \frac{I}{4\pi} \frac{r_\delta^2}{R^3} dl \quad (2.18)$$

όπου:

dH : ένταση μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί το στοιχειώδες μήκος

I : ένταση του ρεύματος

r_δ : ακτίνα του δακτυλίου

R : η απόσταση από το στοιχειώδες μήκος

dl : το στοιχειώδες μήκος

Τελικά, το μαγνητικό πεδίο προκύπτει με ολοκλήρωση του στοιχειώδους μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του δακτυλίου ως:

$$H = \frac{1}{2} I \frac{r_{\delta}^2}{\sqrt{(r_{\delta}^2 + x^2)}^3} \quad (2.19)$$

Όπου:

H: ένταση μαγνητικού πεδίου

r_{δ} : ακτίνα δακτυλίου

X: η απόσταση από το κέντρο του δακτυλίου

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου πηνίου χρειάζεται να υπολογισθεί το μαγνητικό πεδίο δακτυλίου, με ορισμένο αριθμό σπειρών μιας στρώσης και με μήκος πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα του, το οποίο συνιστά μια υποπερίπτωση σωληνοειδούς πηνίου.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να βρεθεί με τη βοήθεια της αρχής της υπέρθεσης, ως άθροισμα του μαγνητικού πεδίου της κάθε σπείρας, το μαγνητικό πεδίο της οποίας θεωρείτε στοιχειώδες και ισοδύναμο με του δακτυλίου [9]. Για τον κάθε δακτύλιο ως εξής:

$$H_{\delta} = \frac{1}{2} I_{\delta} \frac{r_{\delta}^2}{R^3} \quad (2.20)$$

Όπου:

H_{δ} : το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο λόγω δακτυλίου

I_{δ} : το ρεύμα που διαρρέει το δακτύλιο

R: η απόσταση από σημείο του δακτυλίου ως το σημείο στο οποίο μετράμε το πεδίο

Η σχέση που συνδέει το ρεύμα του στοιχειώδους δακτυλίου και το ρεύμα του πηνίου είναι η εξής:

$$I_{\delta} = \left(n \frac{dl}{2L}\right)I \quad (2.21)$$

Όπου:

I: το ρεύμα του πηνίου

I_δ: το ρεύμα του δακτυλίου

n: ο αριθμός σπειρών

2L: το μήκος πηνίου

Επομένως, το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η κάθε σπείρα του πηνίου, αντικαθιστώντας το ρεύμα του δακτυλίου στον τύπο του μαγνητικού πεδίου του δακτυλίου εκφράζεται ως:

$$dH = \frac{nI}{4L} \frac{r_{\delta}^2}{R^3} dl \quad (2.22)$$

Τελικά, με κατάλληλη ολοκλήρωση του μαγνητικού πεδίου στοιχειώδους δακτυλίου το μαγνητικό πεδίο προκύπτει:

$$H = \frac{nI}{4L} \left[\frac{L+x}{\sqrt{r_{\delta}^2 + (L+x)^2}} + \frac{L-x}{\sqrt{r_{\delta}^2 + (L-x)^2}} \right] \quad (2.23)$$

Όπου:

H: το μαγνητικό πεδίο του πηνίου

x: η απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του πηνίου

1.7 Ορισμός Σωληνοειδές πηνίου

Το σωληνοειδές πηνίο χρησιμοποιείται συχνά ως πηγή μαγνητικού πεδίου. Διατάξεις στις οποίες συνήθως χρησιμοποιείται είναι διατάξεις ελέγχου με φερρομαγνητικό πυρήνα, αλλά και σε διατάξεις όπως τα ρελέ [9].

Στη γενική περίπτωση το σωληνοειδές πηνίο είναι πολυστρωματικό και το μαγνητικό του πεδίο υπολογίζεται κατά επέκταση του μαγνητικού πεδίου μονοστρωματικού σωληνοειδούς ως:

$$H = \frac{nl}{4L(r_2 - r_1)} \left[(L + x) \ln \left(\frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (L + x)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (L + x)^2}} \right) + (L - x) \ln \left(\frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (L - x)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (L - x)^2}} \right) \right] \quad (2.24)$$

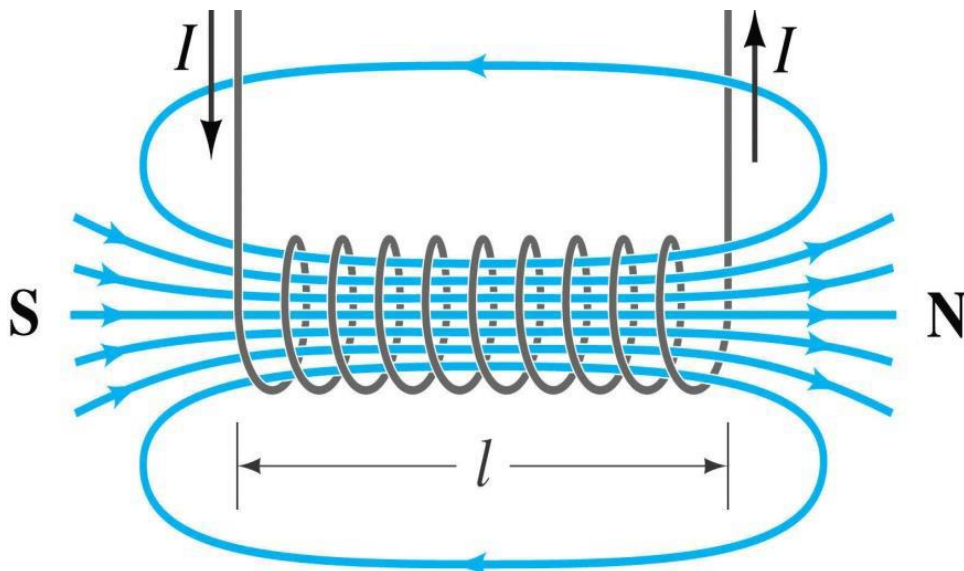
Όπου:

H: το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου

2r₁: η εσωτερική διάμετρος του πηνίου

2r₂: η εξωτερική διάμετρος του πηνίου

2L: το μήκος του σωληνοειδούς πηνίου

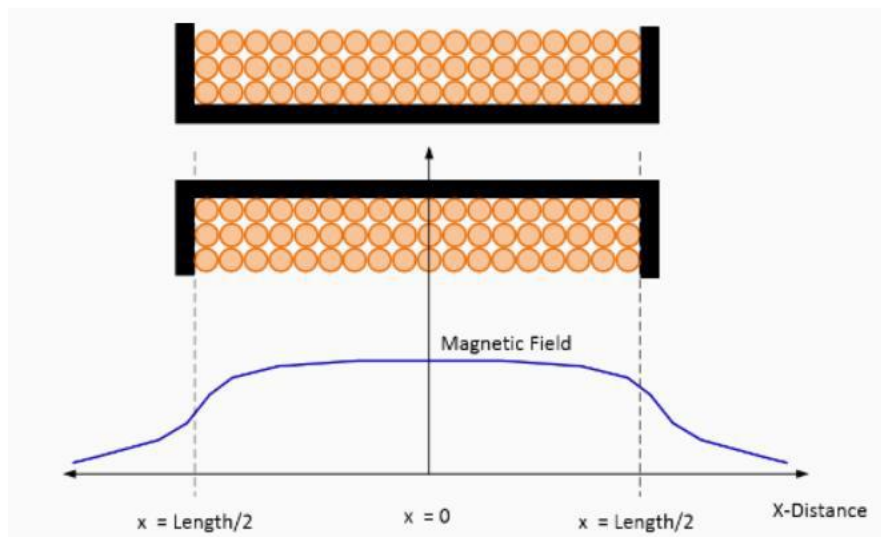


Σχήμα 10: Μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό σωληνοειδούς πηνίου

Το μαγνητικό πεδίο μεγιστοποιείται στο κέντρο του σωληνοειδούς, αρά η μέγιστη τιμή του προκύπτει ως:

$$H_{max} = H(x = 0) = \frac{nI}{2L} \quad (2.25)$$

Το διάγραμμα εξάρτησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο του πηνίου φαίνεται στο Σχήμα 11. Η σχηματική απεικόνιση της συνάρτησης του κανονικοποιημένου μαγνητικού πεδίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού καθιστά άμεσα αναγνωρίσιμο το γεγονός της αργής χωρικής μεταβολής του μαγνητικού πεδίου σε περιοχή κοντά στο κέντρο του. Εκ του διαγράμματος γίνεται επίσης οπτικά αντιληπτό ότι υπάρχει έντονη πτώση της τιμής του μαγνητικού πεδίου σε περιοχή κοντά στα άκρα του [9].

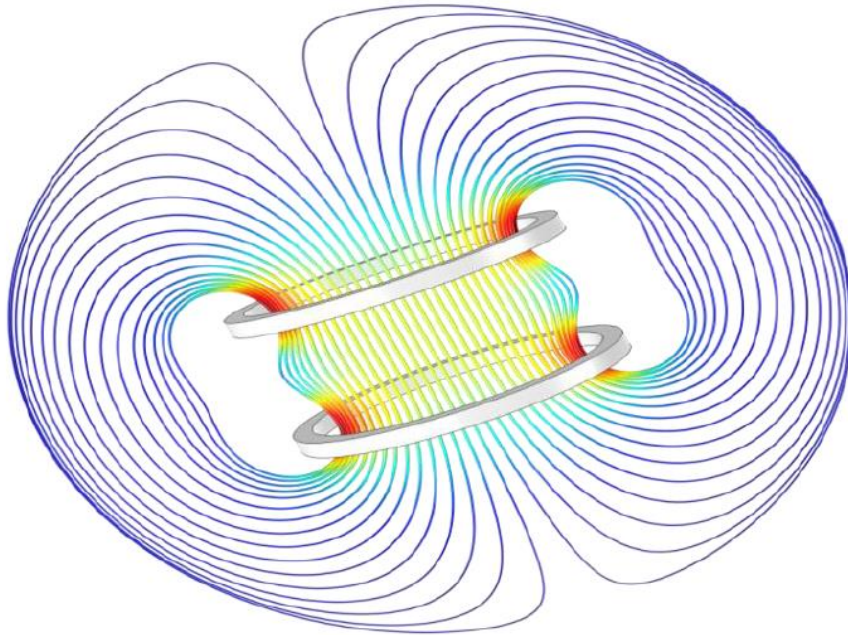


Σχήμα 11: Μεταβολή έντασης μαγνητικού πεδίου κατά μήκος σωληνοειδούς πηνίου

Αν η απότομη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου κοντά στα άκρα του πηνίου καθίσταται πρόβλημα στη σωστή λειτουργία της διάταξης, τότε υπάρχουν μέθοδοι να αποφευχθεί, χωρίς να αλλάξει το μήκος του πηνίου. Ένας τρόπος να γίνει αυτό είναι με το πηνίο να έχει κάποιες επιπλέον στρώσεις κοντά στα άκρα, ενώ ένας άλλος είναι με μια ομαλή αυξητική μεταβολή των στρώσεων από το κέντρο προς τα άκρα [9].

1.8 Σύστημα Πηνίων Helmholtz

Μια εναλλακτική υλοποίηση πηγής ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου είναι τα πηνία Helmholtz. Η διάταξη χρησιμοποιεί δύο πανομοιότυπα σωληνοειδή πηνία σε μια καθορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται, με χρήση της αρχής υπέρθεσης, εκ του μαγνητικού πεδίου του καθενός πηνίου [5].



Σχήμα 12: Μαγνητικό πεδίο πηνίων Helmholtz

Στην ειδική περίπτωση, όπου το κάθε σωληνοειδές πηνίο είναι μονοστρωματικό, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$H = H_1 + H_2 = \frac{nIr^2}{2} \left([r^2 + (\frac{L}{2} + x)^2]^{-\frac{3}{2}} + [r^2 + (\frac{L}{2} - x)^2]^{-\frac{3}{2}} \right) \quad (2.26)$$

Όπου:

H: το συνολικό μαγνητικό πεδίο

H₁: η συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίου του πρώτου πηνίου

H₂: η συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίου του δεύτερου πηνίου

r: η ακτίνα του κάθε πηνίου

L: η απόσταση μεταξύ των πηνίων

x: η απόσταση του σημείου από το γεωμετρικό κέντρο της διάταξης

Η διάταξη έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει βρεθεί ότι στη περίπτωση των μονοστρωματικών πηνίων η ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου επιτυγχάνεται με βέλτιστο τρόπο, όταν η απόσταση μεταξύ των πηνίων ισούται με την ακτίνα τους, δηλαδή $r=L$ [5].

Για τη γενική περίπτωση, όπου τα σωληνοειδή πηνία είναι πολυστρωματικά, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί πάλι με την αρχή της υπέρθεσης κατά ανάλογο τρόπο. Σε αυτή τη περίπτωση συμπεραίνεται ότι, όταν ικανοποιείται η συνθήκη $r_{\mu}=L_{\mu}$, όπου r_{μ} η μέση ακτίνα και L_{μ} το μέσο μήκος, τότε η ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου βελτιστοποιείται.

2. Κεφάλαιο: Μαγνητικοί αισθητήρες

2.1 Ορισμός Αισθητήρων

Ως αισθητήρες ορίζονται οι συσκευές, οι οποίες λαμβάνουν ένα ερέθισμα και παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα (σήμα εξόδου) [12]. Η κατηγοριοποίηση τους γίνεται βάσει του ερεθίσματος στο οποίο αντιδρούν και το οποίο συνήθως είναι ένα φυσικό φαινόμενο. Οι αισθητήρες που προορίζονται για τα ίδια ερεθίσματα διαφοροποιούνται μεταξύ τους βάσει των ακόλουθων κυριότερων χαρακτηριστικών τους [13]:

1. *Συνάρτηση μεταφοράς*: είναι η σχέση μεταξύ ερεθίσματος και σήματος εξόδου.
2. *Ευαισθησία*: είναι ο λόγος μιας μικρής αλλαγής στο σήμα εξόδου προς μια μικρή αλλαγή στο ερέθισμα. Μπορεί να εκφραστεί ως η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς.
3. *Δυναμικό εύρος*: το εύρος του ερεθίσματος για το οποίο ο αισθητήρας λειτουργεί. Τιμές εκτός αυτού οδηγούν σε μεγάλη ανακρίβεια ή ακόμα και πλήρως λανθασμένο σήμα εξόδου.
4. *Ακρίβεια ή αβεβαιότητα*: ορίζεται συνήθως ως το μεγαλύτερο δυνατό σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου σήματος εξόδου και του αναμενόμενου.
5. *Υστέρηση*: το φαινόμενο που εμφανίζεται σε ορισμένους αισθητήρες κατά το οποίο επαναλαμβανόμενη εφαρμογή και αφαίρεση του ίδιου ερεθίσματος δε δίνει το ίδιο σήμα εξόδου.
6. *Μη-γραμμικότητα (ή Γραμμικότητα)*: η μέγιστη απόκλιση από μία γραμμική συνάρτηση μεταφοράς στο δυναμικό εύρος του αισθητήρα.
7. *Θόρυβος*: η μεταβολή του σήματος εξόδου η οποία δεν προέρχεται από αντίστοιχη μεταβολή του ερεθίσματος του αισθητήρα, αλλά από ατέλειες της κατασκευής, από τα υλικά κατασκευής και από το περιβάλλον.
8. *Ανάλυση*: η ανάλυση του αισθητήρα ορίζεται ως η μικρότερη ανιχνεύσιμη μεταβολή στο ερέθισμα.

9. *Εύρος ζώνης*: ονομάζεται το εύρος συχνοτήτων στη μεταβολή του ερεθίσματος που μπορεί να ανιχνευθεί από τον αισθητήρα.

2.2 Κατηγορίες Αισθητήρων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να κατηγοριοποιηθούν οι αισθητήρες. Ένας από αυτούς είναι βάσει της ανάγκης για εξωτερική διέγερση ή ενέργεια για να λειτουργήσουν, χωρίζοντάς τους σε ενεργούς και παθητικούς. Μπορούν επίσης να καταταχθούν με βάση τη λειτουργία που εκτελούν, όπως η μέτρηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης. Καθώς επίσης και με βάση τη φυσική αρχή πάνω στην οποία λειτουργούν, όπως οι αγώγιμοι, ημιαγώγιμοι, διηλεκτρικοί, μαγνητικοί ή υπεραγώγιμοι αισθητήρες. Επιπρόσθετα, η ταξινόμησή τους μπορεί να γίνει βάσει των πεδίων εφαρμογής τους, όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές, η αυτοκίνηση, η ιατρική, το περιβάλλον, ο στρατός κ.λπ. Τέλος, υπάρχουν απόλυτοι και σχετικοί αισθητήρες. Οι πρώτοι έχουν μέτρηση που αναφέρεται σε μια ακριβή, ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης, φυσική κλίμακα (π.χ. μετρητής πίεσης με αναφορά το κενό), ενώ οι δεύτεροι παράγουν σήμα που αναφέρεται σε μια ειδική κλίμακα τιμών, όπως για παράδειγμα το μανόμετρο. [10].

2.3 Ορισμός Μαγνητικός Αισθητήρας

Οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου, ανεξάρτητα από το αν προέρχεται από τη Γη ή από άλλη πηγή. Ένα πρωτότυπο παράδειγμα ενός απλού μαγνητικού αισθητήρα είναι η πυξίδα. Ορισμένοι μαγνητικοί αισθητήρες παρέχουν και πρόσθετες δυνατότητες μέτρησης, όπως την καταγραφή της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους καθώς και το κόστος τους είναι διαφορετικά, γεγονός που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά και την απόδοσή τους. Οι μαγνητικοί αισθητήρες βρίσκουν εφαρμογές σε ποικίλες βιομηχανίες και τομείς, όπως η καθημερινή κατανάλωση με παραδείγματα όπως τα smartphones, η μεταφορά, η ιατρική, ο βιομηχανικός τομέας και η στρατιωτική τεχνολογία. [11].

2.4 Είδη Μαγνητικών αισθητήρων

2.4.1 Αισθητήρες Hall

Οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου είναι οι αισθητήρες Hall. Λόγω του χαμηλού τους κόστους και του μικρού τους μεγέθους, έγιναν γρήγορα κατάλληλοι για ενσωμάτωση στα αυτοκίνητα, αλλά και σε πολλές καταναλωτικές συσκευές, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα.

Η λειτουργία των αισθητήρων Hall βασίζεται στο αντίστοιχο φαινόμενο. Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον E. H. Hall το 1879 [12]. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό που διαρρέεται από ρεύμα, τότε αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού που είναι κάθετη στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο και ονομάζεται τάση Hall. Συνεπώς, ένας αισθητήρας Hall μπορεί να ανιχνεύσει μαγνητικά πεδία, θέση, καθώς και μετατόπιση αντικειμένων.

Ως γνωστόν, η δύναμη ενός ηλεκτρονίου που κινείται σε ένα μαγνητικό πεδίο δίνεται από τον τύπο:

$$q = F \cdot u \cdot B \quad (3.1)$$

Όπου:

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$: το φορτίο του ηλεκτρονίου

u : η ταχύτητά του

B : το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Εάν τοποθετήσουμε μια πλάκα η οποία διαρρέεται από ρεύμα και είναι κατασκευασμένη από αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό, μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και συνδέσουμε τα άκρα της σε ένα βολτόμετρο, θα παρατηρήσουμε ότι λόγω αυτού του μαγνητικού πεδίου θα δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού στα δύο άκρα της. Αυτή είναι η λεγόμενη τάση Hall και οφείλεται στη μετακίνηση των ηλεκτρονίων, λόγω της δύναμης που δέχονται από το μαγνητικό πεδίο.

Για σταθερή θερμοκρασία, η τάση Hall δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = h * I * B * \sin \alpha \quad (3.2)$$

Όπου:

α : είναι η γωνία μεταξύ του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου και της πλάκας,

I : το ρεύμα που τη διαρρέει

h : ένας συντελεστής ευαισθησίας, του οποίου η τιμή εξαρτάται από το υλικό της πλάκας, τη γεωμετρία της και τη θερμοκρασία

Η συνολική ευαισθησία εξαρτάται από το συντελεστή Hall, ο οποίος δίνεται από τον τύπο:

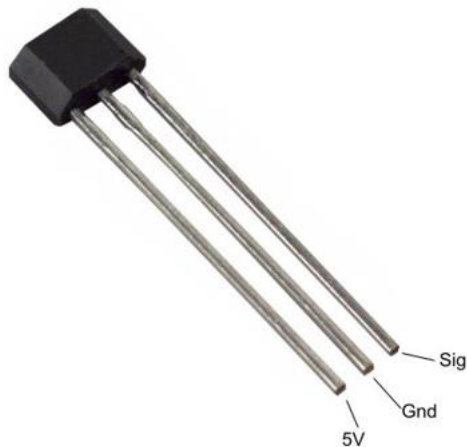
$$H = \frac{1}{Ncq} \quad (3.3)$$

Όπου:

N : Αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου

c : η ταχύτητα του φωτός.

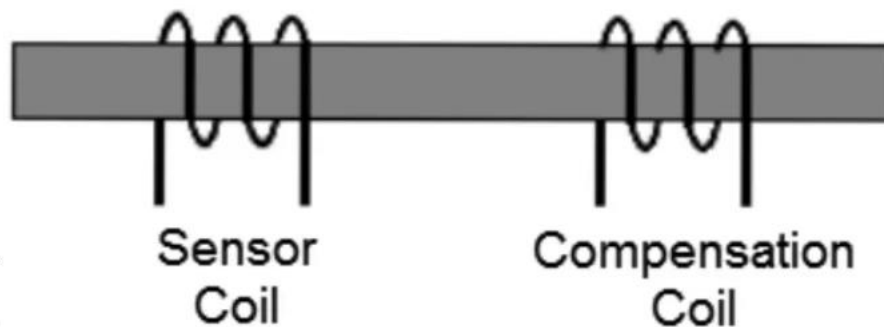
Ως υλικό κατασκευής ενός αισθητήρα Hall συνήθως χρησιμοποιείται το πυρίτιο. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα InSb, InAs, Ge και GaAs. Οι αισθητήρες Hall κατασκευάζονται είτε ως αυτόνομοι, είτε ως ενσωματωμένοι σε άλλες διατάξεις. Η ενσωμάτωση μπορεί να γίνει κατά το στάδιο της παρασκευής, ώστε να τοποθετηθούν σε κάποιο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Ως αισθητήρες είναι ευαίσθητοι στις τάσεις που δέχονται, αλλά και στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις [11].



Σχήμα 13: Αισθητήρας Hall

2.4.2 Αισθητήρες Flux-Gate

Οι αισθητήρες πύλης ροής χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες εγγύτητας, ως αισθητήρες προσδιορισμού θέσης και ταχύτητας, αλλά και σε όργανα πλοήγησης ή μέτρησης μαγνητικού πεδίου. Κατασκευάζονται από υλικά με μη γραμμικό βρόχο υστέρησης, όπως είναι ο χάλυβας.



Σχήμα 14: Αισθητήρας Flux-Gate

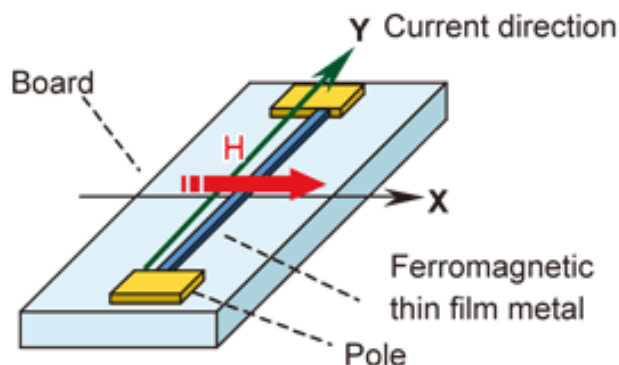
Ένας αισθητήρας πύλης ροής αποτελείται από δυο πηνία, ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης, τα οποία συνδέονται μέσω ενός φερρομαγνητικού πυρήνα. Το πηνίο διέγερσης δέχεται εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που επαγωγικά παράγει ρεύμα και στο πηνίο λήψης. Το πηνίο λήψης

χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των αλλαγών στην ένταση και την φάση του ρεύματος. Κάθε αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει το πηνίο λήψης καταγράφεται ως αλλαγή στις τιμές αυτές. Χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι τιμές που λαμβάνονται από το πηνίο λήψης θα είναι συγκεκριμένες. Εάν, ωστόσο, επηρεαστούν από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε οι μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν θα διαφέρουν από τις αναμενόμενες. Αναλύοντας αυτές τις διαφορές, μπορεί να εξαχθεί η πυκνότητα και ο προσανατολισμός των μαγνητικών γραμμών ροής. Ο αισθητήρας μπορεί να ανταποκριθεί σε εύρος ευαισθησίας από 1μG έως 100G. [11].

2.4.3 Αισθητήρες AMR

Βάσει του φαινομένου της μαγνητοαντίστασης, η εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό το οποίο διαπερνάται από ρεύμα, θα προκαλέσει μια αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση του υλικού. Τα συνήθη υλικά που επιλέγονται για τέτοιες εφαρμογές είναι κράματα νικελίου και σιδήρου σε μορφή λεπτών ταινιών. Η αντίσταση υποχωρεί όταν η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου αποκλίνει από την κατεύθυνση του ρεύματος που διαπερνά το υλικό. Η αντίσταση εξαρτάται από το τετράγωνο του συνημιτόνου της γωνίας μεταξύ τους. Έτσι, η μέγιστη αντίσταση παρατηρείται όταν η μαγνήτιση είναι παράλληλη με το υλικό, ενώ το ελάχιστο επίπεδο αντίστασης παρατηρείται όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο σε αυτό. Η μαγνήτιση των διπόλων του υλικού προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Όταν οι μαγνητικοί δίπολοι είναι προσανατολισμένοι κάθετα στη διεύθυνση του ρεύματος, προκύπτουν σκεδάσεις των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα την μείωση της κινητικότητάς τους και κατ' επέκταση, την αύξηση της αντίστασης του υλικού. [11].

(field strength and ferromagnetic thin film metal)



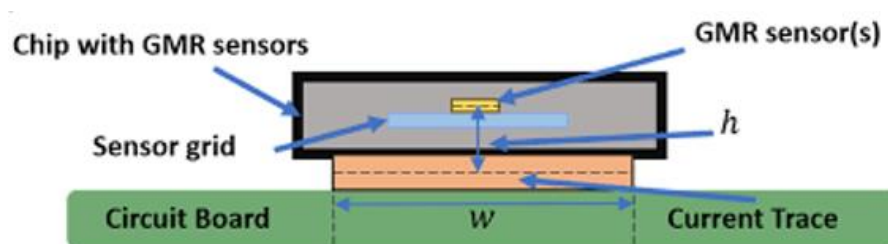
Σχήμα 15 Αισθητήρες AMR

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης συνήθως ενσωματώνονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ως διατάξεις τεσσάρων αισθητήρων σε γέφυρα Wheatstone. Τοποθετούνται σε ρομποτικές διατάξεις, αλλά και σε μεταφορικά μέσα, κυρίως ως αισθητήρες προσανατολισμού [14]. Επιπλέον έχουν γίνει και κάποιες προσπάθειες ώστε να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για την ανίχνευση βιομορίων, με σκοπό την αντικατάσταση της χρήσης μεθόδων φθορισμού σε διαγνωστικές εξετάσεις. Αντί των φθοριζουσών ουσιών, δοκιμάστηκε η εισαγωγή καταλλήλων μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία είναι ικανά να ανιχνεύονται από τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και να παράγουν κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα [17].

2.4.4 Αισθητήρες GMR

Οι αισθητήρες GMR (Giant MagnetoResistance - γιγάντιας μαγνητοαντίστασης) λειτουργούν με βάση τις ίδιες αρχές όπως οι απλοί αισθητήρες μαγνητοαντίστασης. Εντούτοις, διακρίνονται από την σημαντικά μεγαλύτερη αλλαγή στην ηλεκτρική αντίστασή τους, η οποία μπορεί να φτάσει σε επίπεδα αύξησης της τάξης του 10% έως 20%. Αυτοί οι αισθητήρες αποτελούνται από λεπτές φερρομαγνητικές ταινίες, μεταξύ των οποίων τοποθετείται ένα πολύ λεπτό, αγωγίμο, αλλά μη μαγνητικό στρώμα, συνήθως από χαλκό. Αν και ο χαλκός είναι αγωγίμος, παρουσιάζει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση εξαιτίας του ελάχιστου πάχους του και της αυξημένης διάχυσης

των ηλεκτρονίων που διαρρέουν μέσα σε αυτόν. Τα φερρομαγνητικά στρώματα εμφανίζουν αντι-φερρομαγνητική σύζευξη, με τους μαγνητικούς δίπολους τους να έχουν αντίθετο προσανατολισμό. Ωστόσο, στην παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου με κατάλληλη κατεύθυνση, η αντίθετη σύζευξη διαλύεται και οι μαγνητικοί δίπολοι ευθυγραμμίζονται με το πεδίο, επιτρέποντας την ανίχνευση του εν λόγω μαγνητικού πεδίου. [11].



Σχήμα 16 Αισθητήρας GMR

Τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης, καθώς και σε βιοαισθητήρες. Η ανακάλυψη των αισθητήρων GMR οδήγησε στην απονομή του βραβείου Nobel στους ερευνητές Albert Fert και Peter Grünberg το 2007 [16].

2.4.5 Αισθητήρες LVDT

Ένας LVDT αισθητήρας (Linear Variable Differential Transformer - Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής) είναι ικανός να μετρήσει τη γραμμική μετακίνηση ενός αντικειμένου. Αυτό το σύστημα αποτελείται από ένα πρωτεύον πηνίο που τροφοδοτείται από ένα ημιτονοειδές σήμα σταθερού πλάτους και δύο δευτερεύοντα πηνία που δημιουργούν εναλλασσόμενο ρεύμα. Ένας φερρομαγνητικός πυρήνας τοποθετείται εντός του πρωτεύοντος πηνίου, χωρίς να έρχεται σε άμεση επαφή με αυτό. Όταν ο πυρήνας είναι στην κεντρική θέση, η συνολική τάση εξόδου είναι μηδέν, καθώς τα σήματα των δευτερευόντων πηνίων και του πρωτεύοντος αντισταθμίζονται. Με τη μετακίνηση του πυρήνα από το κέντρο, η μαγνητική ροή αλλάζει και δημιουργείται ένα σήμα εξόδου. Η τάση που παράγεται είναι ανάλογη με την μετακίνηση, επομένως, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η

μετακίνηση του φερρομαγνητικού πυρήνα και να καθοριστεί η κατεύθυνση της μετακίνησής του, βάσει της φασικής διαφοράς μεταξύ της τάσης εισόδου και εξόδου.

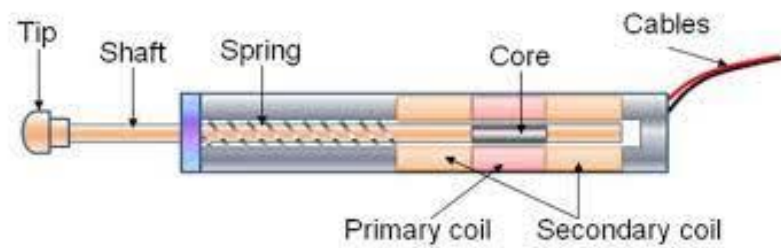


Figure 2.2.6 Construction of LVDT sensor

Σχήμα 17: Αισθητήρας LVTD

Οι αισθητήρες LVDT δεν προκαλούν φθορές, αφού δεν έρχονται σε επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Η υστέρηση είναι αμελητέα, ενώ δεν επηρεάζονται πολύ από το θόρυβο του περιβάλλοντος και από άλλες παρεμβολές. Εκτός από αμιγείς εφαρμογές μετατόπισης, οι αισθητήρες LVDT χρησιμοποιούνται και σε διατάξεις εφελκυσμού, σε αισθητήρες θερμοκρασίας, δύναμης, πίεσης και ταχύτητας.

2.4.6 Αισθητήρες MDL

Οι αισθητήρες MDL (Magnetostrictive Delay Lines – Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης) βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Σύμφωνα με αυτό, το μέγεθος των φερρομαγνητικών υλικών μεταβάλλεται όταν ένα μαγνητικό πεδίο ασκηθεί σε αυτά. Η μαγνητοσυστολή δίδεται ως κλασματική μεταβολή από τον τύπο:

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4)$$

Όπου:

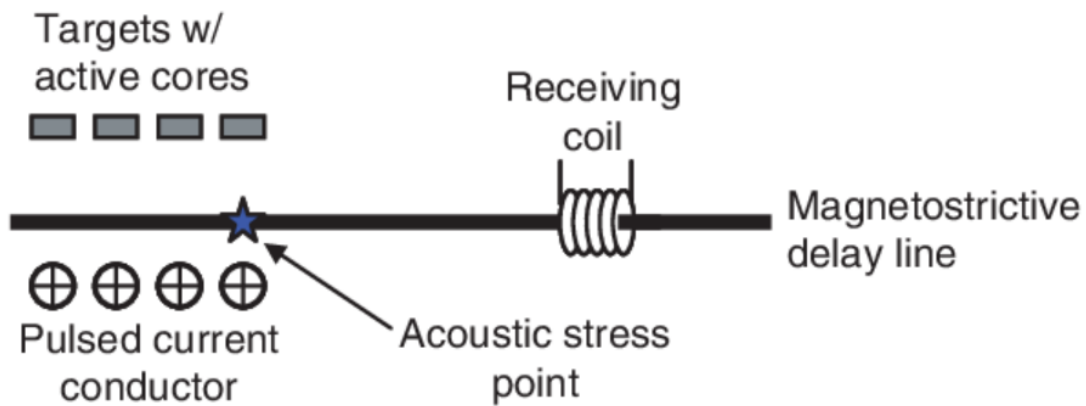
L: το μετρούμενο μέγεθος του υλικού

ΔL : η διαφορά μεταξύ του μετά της μαγνήτισης μεγέθους και του αρχικού

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής βασίζεται στη δομή των φερρομαγνητικών υλικών. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών στο εσωτερικό του υλικού μετακινούνται, ώστε να διαταχθούν καταλλήλως, προκαλώντας αλλαγές στις διαστάσεις του.

Υλικά όπως σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο και τα κράματά τους χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αισθητήρων MDL. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν συχνά τη μορφή ενός σύρματος, για να επιτρέπεται η εύκολη παρακολούθηση των διαστασιακών αλλαγών. Το σύρμα διέλευσης ρεύματος εκπέμπει παλμούς, λειτουργώντας ουσιαστικά ως κυματοδηγός. Ένας μαγνήτης που είναι συνδεδεμένος με ένα μηχανικό ή υδραυλικό σύστημα κινείται γύρω από τον κυματοδηγό. Αρχικά, στέλνεται ένας παλμός στον κυματοδηγό για να καθοριστεί η θέση του μαγνήτη, ενώ παράλληλα αρχίζει μια χρονομέτρηση. Ο παλμός παράγει ένα κύμα που διαδίδεται μέσα στον κυματοδηγό. Όταν το κύμα φτάνει στο τέλος, η χρονομέτρηση τελειώνει. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ του μαγνήτη και του φερρομαγνητικού υλικού, με βάση τη διάρκεια της μετακίνησης και την πληροφορία ότι η ταχύτητα της είναι η ίδια με αυτήν του ήχου [11].

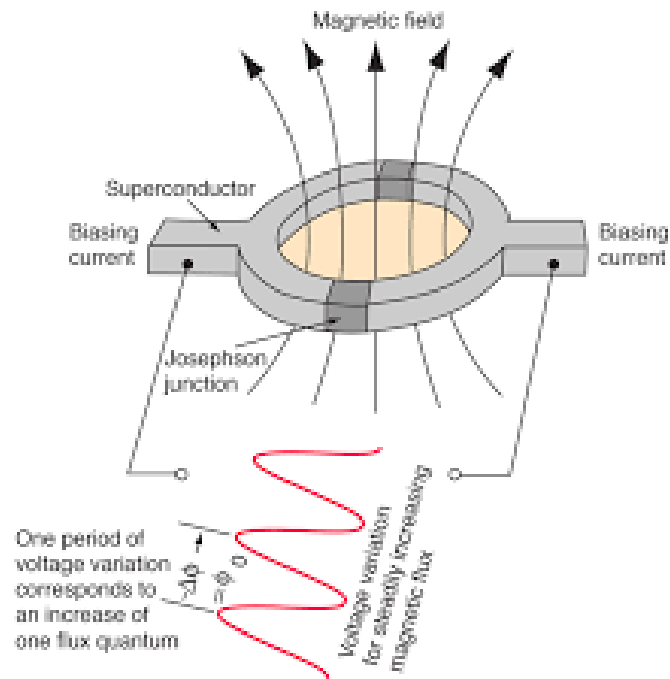
Ο συγκεκριμένος αισθητήρας θέσης δεν φθείρεται, αλλά και δεν προκαλεί φθορές στο εξεταζόμενο υλικό, αφού δεν έρχεται σε επαφή με αυτό. Επίσης, το μήκος του εξεταζόμενου υλικού μπορεί να είναι μεγάλο, ακόμα και 60 m, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές [13]. Έτσι, οι αισθητήρες MDL χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτοκινήτων και γενικότερα σε μέρη μηχανών, όπως είναι οι υδραυλικοί κύλινδροι, ώστε να παρακολουθείται και να ελέγχεται η θέση τους και η λειτουργία τους.



Σχήμα 18: Αισθητήρας MDL

2.4.7 Αισθητήρες SQUID

Οι πιο ευαίσθητοι αισθητήρες που υπάρχουν είναι οι SQUID αισθητήρες. Με την χρήση αυτών των αισθητήρων, μπορεί να ανιχνευθούν μαγνητικά πεδία που έχουν ένταση μερικών nanoTesla [20]. Το όνομά τους αποτελεί ακρωνύμιο που προέρχεται από την Αγγλική φράση "Superconducting Quantum Interference Device". Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους είναι υπεραγώγιμα, δηλαδή τα υλικά τα οποία η ηλεκτρική τους αντίσταση γίνεται σχεδόν μηδενική όταν η θερμοκρασία τους πέσει κάτω από ένα κρίσιμο όριο. Υπάρχουν δύο τύποι SQUID αισθητήρων, ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν: οι LTS (Low Temperature SQUIDs) και οι HTS. Οι LTS λειτουργούν σε θερμοκρασίες της τάξης των -270o C και είναι κατασκευασμένοι από νιόβιο ή μολύβδινα κράματα και χρυσό. Η λειτουργία τους απαιτεί ψύξη με υγρό ήλιο, γεγονός που τους κάνει λιγότερο πρακτικούς για χρήση.



Σχήμα 19: Αισθητήρας SQUID

Αντιθέτως, οι High Temperature (HTS) αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως και περίπου $-130\text{ }^\circ\text{C}$. Κατασκευάζονται από YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο είναι πιο εύχρηστο σε σχέση με το υγρό ήλιο και έχει χαμηλότερο κόστος. Η λειτουργία τους βασίζεται στο κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson, σύμφωνα με το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο μη υπεραγωγίμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγωγίμων υλικών. Όταν αυτοί οι αισθητήρες ψύχονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, παράγεται μια συνεχής μαγνητική ροή. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί την αιφνίδια αλλαγή της ροής, επιφέροντας και μια αντίστοιχη απώλεια ενέργειας. Η μέτρηση αυτής της ενέργειας μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την τιμή του μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, οι αισθητήρες SQUID, παρά την υψηλή τους ευαισθησία, δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε καταναλωτικά προϊόντα λόγω των εξειδικευμένων συνθηκών που απαιτούνται για τη λειτουργία τους. Έτσι, οι SQUID αισθητήρες βρίσκουν κυρίως χρήση σε ερευνητικά εργαστήρια [11].

2.4.8 Μαγνητοοπτικοί Αισθητήρες

Βασισμένοι στο φαινόμενο Faraday, οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες λειτουργούν με την αρχή ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να επηρεάσει και να αλλάξει τις οπτικές ιδιότητες ενός υλικού. Πιο συγκεκριμένα, το μαγνητικό πεδίο προκαλεί μια περιστροφή στο επίπεδο πόλωσης του φωτός κατά την διέλευση του από ένα μαγνητοοπτικό μέσο. Η γωνία στροφής της πόλωσης δίνεται από τον τύπο [18]:

$$\beta = V \cdot d \cdot B \quad (3.5)$$

Όπου

V: η σταθερά Verdet που εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός και το δείκτη διάθλασης του συγκεκριμένου υλικού

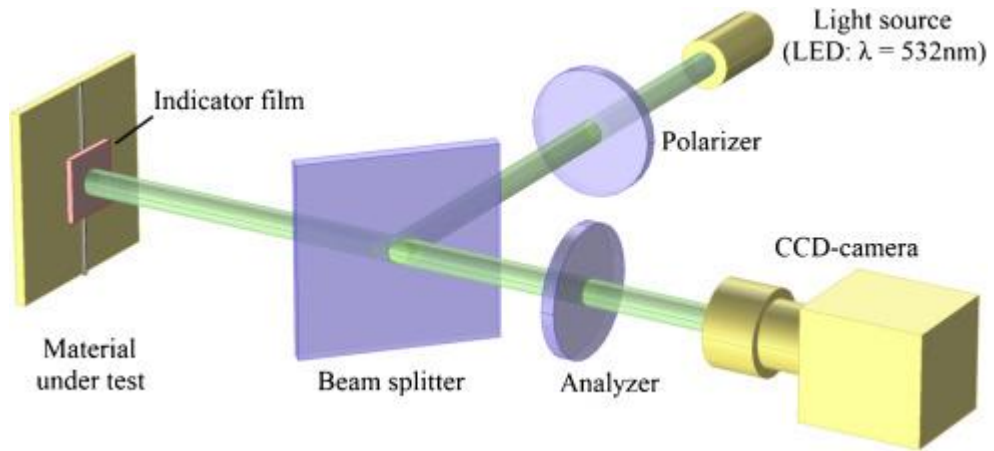
d: είναι η απόσταση που διανύει το φως μέσα στο μαγνητοοπτικό μέσο και

B: είναι η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Συνεπώς, γνωρίζοντας την παραπάνω γωνία είναι δυνατός ο υπολογισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μαγνητοοπτικών αισθητήρων είναι κυρίως κρυσταλλικά. Συχνά χρησιμοποιούμενοι κρύσταλλοι είναι οι TGG (Terbium Gallium Garnet), CdMnTe και CdMnHgTe. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά Verdet ενός υλικού, τόσο πιο ακριβή αποτελέσματα προκύπτουν από τον αισθητήρα.

Οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες, αντίθετα με τους άλλους τύπους αισθητήρων, βασίζονται σε οπτικά και όχι σε ηλεκτρικά φαινόμενα. Εκτός από την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου, έχουν τη δυνατότητα ψηφιακής απεικόνισης του πεδίου σε πραγματικό χρόνο, μέσω κατάλληλου λογισμικού. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να εφαρμοστούν επίσης στην ανάλυση και τον χαρακτηρισμό άλλων μαγνητικών

προϊόντων, όπως οι μόνιμοι μαγνήτες, τα κράματα χάλυβα, οι μαγνητικές κάρτες και οι μαγνητικοί κωδικοποιητές.



Σχήμα 20: Μαγνητοοπτικός αισθητήρας

3. Κεφάλαιο: Μη Καταστροφικός Έλεγχος (Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα)

3.1 Εισαγωγή στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο

Υλικά και προϊόντα περνούν συνήθως μέσα από μια σειρά ελέγχων πριν τεθούν στη διάθεση του καταναλωτή, προκειμένου να επαληθεύσουν ότι ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και παραμένουν αξιόπιστα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ένα θεμελιώδες κριτήριο είναι ότι οποιοσδήποτε έλεγχος πραγματοποιείται σε ένα προϊόν προορισμένο για μελλοντική χρήση δεν θα πρέπει να επηρεάζει αρνητικά την απόδοσή του. Οποιαδήποτε μέθοδος χρησιμοποιείται για τέτοιου είδους ελέγχους αναφέρεται ως Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ).

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η δοκιμή είναι αναγκαία όχι μόνο κατά την διάρκεια της κατασκευής, αλλά επίσης σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα καθ' όλη την διάρκεια της προβλεπόμενης χρήσης. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας κατά την διεξαγωγή ελέγχων σε σημαντικές περιοχές των δομών και των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα όπως αεροπλάνα, πυρηνικές διεργασίες, χημικά εργοστάσια και εγκαταστάσεις εξόρυξης πετρελαίου σε ανοιχτή θάλασσα. Αυτές οι δομές και εξαρτήματα μπορεί να εκτεθούν σε συνθήκες υψηλής τάσης, φθοράς από τη χρήση και διάβρωσης. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να δημιουργηθούν και να εξελιχθούν ελαττώματα ή ατέλειες, όπως ρωγμές, οι οποίες μπορεί να προχωρήσουν γρήγορα σε τέτοιο βαθμό που προκαλούν αστοχίες με πιθανές καταστροφικές συνέπειες.

Συνολικά λοιπόν, οι κύριοι λόγοι για τη διεξαγωγή Μη Καταστροφικού Ελέγχου είναι οι παρακάτω:

- Για να εξασφαλιστεί η ελευθερία από ελαττώματα που ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβη.
- Για να διαπιστωθούν οι διαστάσεις ενός στοιχείου ή δομής.
- Για τον προσδιορισμό ορισμένων φυσικών και δομικών ιδιοτήτων οποιωνδήποτε υλικών σε ένα προϊόν.

Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά από διάφορα στάδια της διαδικασίας κατασκευής, όπως κατά τη χύτευση, τη συγκόλληση, τη σφυρηλάτηση και την μηχανική επεξεργασία των μετάλλων. Επιπρόσθετα, μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη λειτουργία τους, προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανή ζημιά που προκαλείται από συνθήκες όπως η εξέλιξη ρωγμών και η διάβρωση. Η ανάγκη για την εφαρμογή του ΜΚΕ πρέπει να αξιολογηθεί διεξοδικά και, σε περίπτωση κρίσιμων εφαρμογών, είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση ενδεδειγμένων ερευνών για την πρόβλεψη της πιθανότητας εμφάνισης δομικών αλλαγών και ελαττωμάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε πιθανές αποτυχίες. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη το περιβάλλον στο οποίο τα στοιχεία της εγκατάστασης θα είναι υπόθεση να λειτουργήσουν, συμπεριλαμβανομένων των πιθανοτήτων έκθεσης σε εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, σε ακραίες συνθήκες πίεσης, όπως αυτές που προκαλούνται από ισχυρούς ανέμους και υψηλό κυματισμό, καθώς και σε διαβρωτικές ή τοξικές ουσίες. [21].

3.2 Εφαρμογές Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα

3.2.1 Έλεγχος Αγωγών

Στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες, αγωγοί χιλιομέτρων μεταφέρουν πλήθος ρευστών, όπως νερό, φυσικό αέριο, υγραέριο και πετρέλαιο. Ο αγωγός είναι πολύ ευαίσθητος στην εσωτερική και εξωτερική διάβρωση, σε διάφορα είδη ρηγμάτωσης.



Σχήμα 21: Έλεγχος αγωγού

3.2.2 Έλεγχος Γέφυρας

Οι γέφυρες παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης, ρηγμάτωσης. Τα κύρια μέρη στα οποία γίνονται ΜΚΕ είναι στα υποστυλώματα και τις κύριες κολώνες μίας γέφυρας τόσο στα μεταλλικά μέρη όσο και στο σκυρόδεμα καθώς και στη επιφάνεια του οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 22: Έλεγχος γέφυρας

3.2.3 Έλεγχος Σιδηροδρομικών Γραμμών

Οι σιδηροδρομικές ράγες υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση κατά τη διέλευση της αμαξοστοιχίας. Ως αποτέλεσμα η παραμικρή ύπαρξη μιας ασυνέχειας να διευρύνεται έως ότου η κατασκευή να απαλλαγεί από τις ανεπιθύμητες τάσεις που υπάρχουν

εσωτερικά της δομής. Εκτός της δυναμικής φόρτισης, μεγάλο πρόβλημα αποτελεί η έκθεση των ραγών στα καιρικά φαινόμενα και την υγρασία που δημιουργεί διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών.



Σχήμα 23: Έλεγχος σιδηροδρομικών γραμμών

3.2.4 Έλεγχος Δεξαμενών

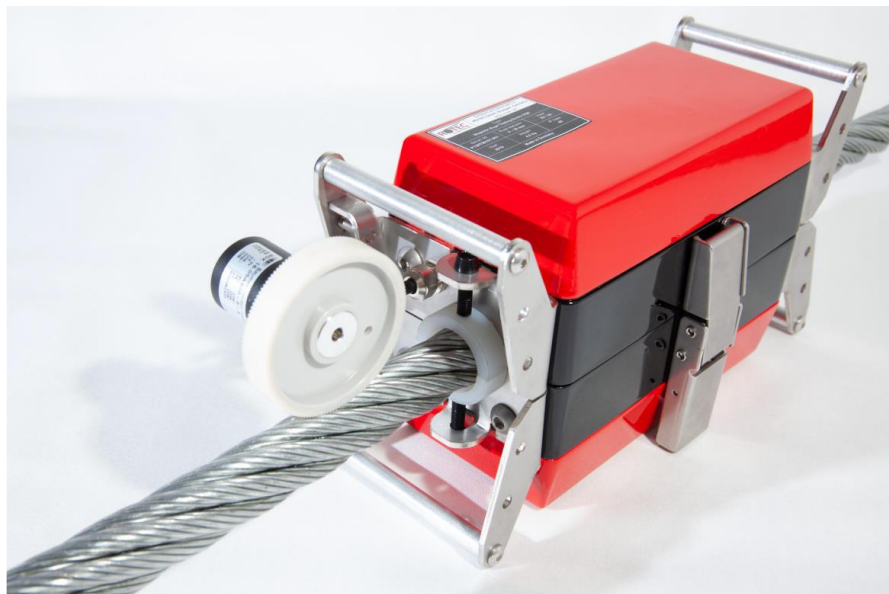
Οι μεγάλες δεξαμενές χημικών, πετρελαίου και παραγόντων του, οι οποίες μπορούν να περιλαμβάνουν πολλούς τόνους επικίνδυνων εύφλεκτων υγρών να ελέγχονται τόσο στα μέρη των συγκολλήσεων όσο και στο σύνολο του μετάλλου. Πρώτα για κατασκευαστικές ασυνέχειες αλλά και για εμφάνιση διάβρωσης και ρωγμών, λόγω χρήσης τους.



Σχήμα 24: Έλεγχος δεξαμενής

3.2.5 Έλεγχος σε Συρματόσχοινα

Τα συρματόσχοινα είναι ένα σύμπλεγμα πολλών μικρότερων μονόκλωνων συρμάτων χάλυβα που περιπλέκονται κατάλληλα προσδίδοντας μεγάλη αντοχή σε εφελκύστηκες δυνάμεις. Το συρματόσχοινο ελέγχεται για φθορά, διάβρωση και κόπωση.



Σχήμα 25: Εργαλείο ελέγχου σε συρματόσχοινα

3.2.6 Έλεγχος στην Αεροπορική Βιομηχανία

Τα βασικά στοιχεία ενός αεροπλάνου ελέγχονται πριν συναρμολογηθούν, γίνονται περιοδικοί έλεγχοι και κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αεροσκαφών. Τα επιμέρους στοιχεία των αεροσκαφών καταπονούνται λόγω του βάρους που μεταφέρουν και πολλές φορές εμφανίζουν ρωγμές. Οι ρωγμές μπορεί να είναι κόπωσης είτε να προέρθουν από χτύπημα κεραυνού.

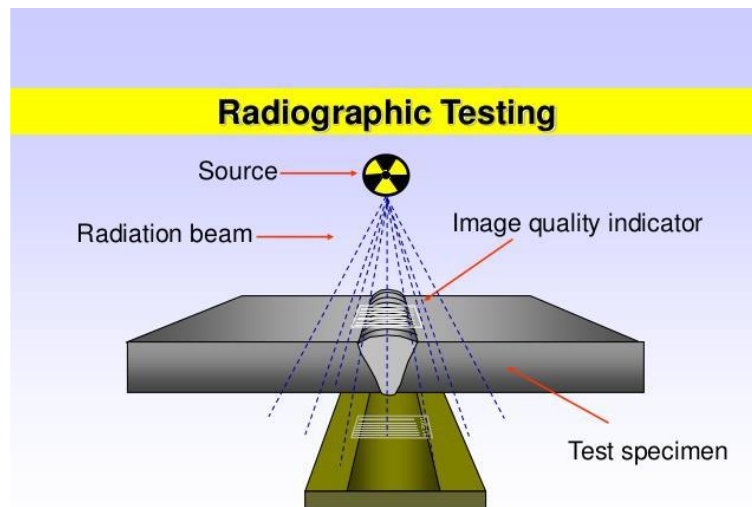


Σχήμα 26: Έλεγχος στοιχείων ενός αεροπλάνου

3.3 Μέθοδοι Μη Καταστρεπτικών Ελέγχων

3.3.1 Ραδιογραφικές Μέθοδοι

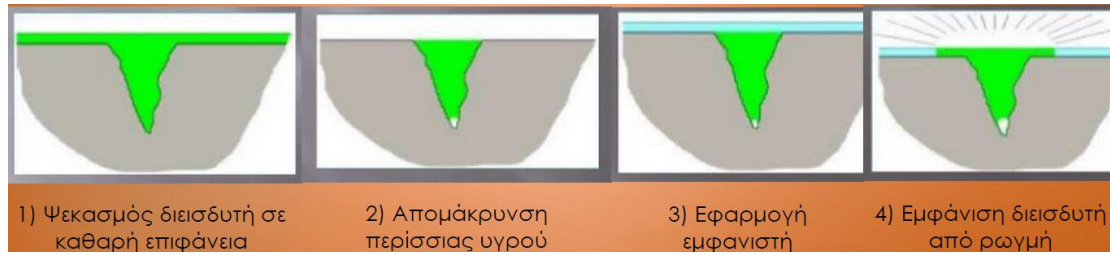
Η ραδιογράφιση με φιλμ πραγματοποιείται με χρήση μηχανημάτων παραγωγής ακτίνων Χ ή με χρήση πηγών ακτίνων γ που περνούν διαμέσου του αντικειμένου προς έλεγχο και δημιουργούν μια εικόνα πάνω σε ένα ραδιογραφικό φιλμ που τοποθετείται στην απέναντι πλευρά [19].



Σχήμα 27: Ραδιογραφικής μέθοδος

3.3.2 Έλεγχος με Διεσδυτικά Υγρά

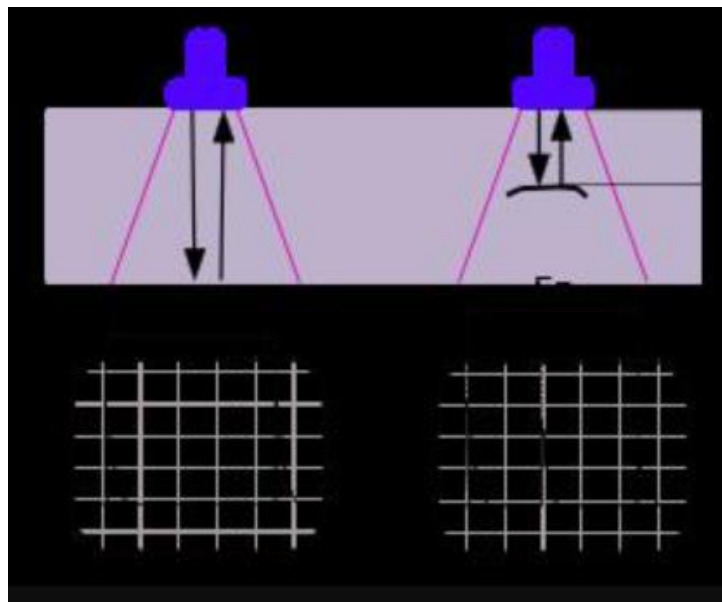
Ο έλεγχος με διεσδυτικά υγρά αποτελεί μια μέθοδο ανίχνευσης ατελειών που φθάνουν στην ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου. Η ανίχνευση των ατελειών βασίζεται στο τριχοειδές φαινόμενο. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα υλικά τα οποία έχουν σχετικά λεία επιφάνεια είτε αυτά είναι σιδηρομαγνητικά είτε όχι.



Σχήμα 28: Διαδικασία ελέγχου με διεισδυτικά Υγρά

3.3.3 Μέθοδος Δινορρευμάτων

Τα δινορρεύματα μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο των υλικών. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους είναι ότι μπορεί ως μέθοδος να εφαρμοστεί και σε υλικά που δεν είναι μαγνητικά, αρκεί να είναι ηλεκτρικά αγώγιμα. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτείται ένα πηνίο που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, επιβάλλοντας μαγνητικό πεδίο που θα διαδοθεί κάθετα στο εξεταζόμενο υλικό. Εάν τοποθετηθεί κοντά ένα αγώγιμο υλικό, θα αναπτυχθούν δινορρεύματα σε κλειστούς βρόχους [22].



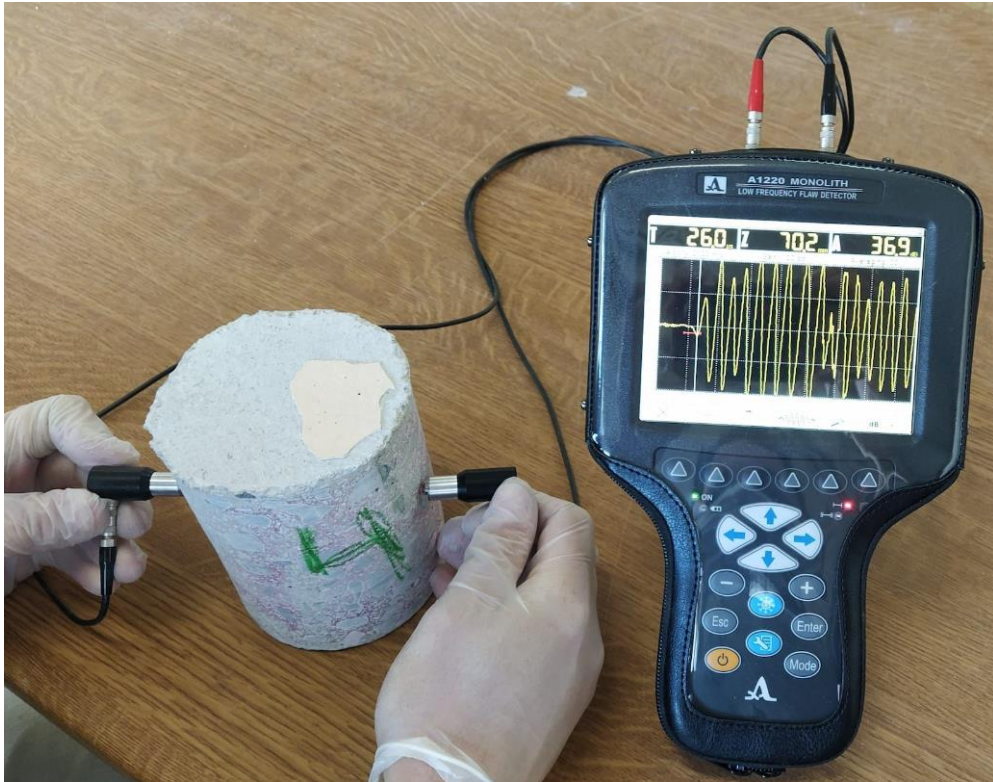
Σχήμα 29: Αρχή λειτουργίας μεθόδου δινορρευμάτων

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτά μπορεί να ληφθεί μέσω ενός δευτέρου πηνίου και να αναλυθεί, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού και των ατελειών του. Ο έλεγχος με δινορρέυματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέθοδος χαρακτηρισμού υλικών για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας, της μαγνητικής τους διαπερατότητας, αλλά και του πάχους τους. Οι ατέλειες που είναι δυνατόν να εντοπιστούν πρέπει να βρίσκονται στην επιφάνεια ή σε μικρό βάθος ως προς το εξεταζόμενο υλικό. Η ανίχνευση γίνεται χωρίς να είναι απαραίτητη η άμεση επαφή με το δοκίμιο, αλλά και χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του. Ωστόσο, απαιτείται εμπειρία για την κατανόηση των αποτελεσμάτων και την απομόνωση του σήματος από τον περιβαλλοντικό θόρυβο [26][27].

3.3.4 Μέθοδοι Υπερήχων

Ο Έλεγχος με Υπερήχους (Ultrasonic Testing) βασίζεται στην εκπομπή ενός ηχητικού κύματος υψηλής συχνότητας, το οποίο αποστέλλεται στο εξεταζόμενο υλικό. Τα ηχητικά κύματα διαπερνούν το υλικό και συλλέγονται κατά την έξοδό τους. Μελετώντας το χρονικό διάστημα που πέρασε για τη διέλευση των υπερηχητικών κυμάτων, καθώς και την ενέργεια που αυτά είχαν κατά την έξοδο, προκύπτουν συμπεράσματα για τη δομή του υλικού, τα χαρακτηριστικά του και την ύπαρξη ατελειών.

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπερτερεί στο μεγάλο βάθος διεϊσδυσης για το οποίο είναι ικανή να εξαγάγει αποτελέσματα. Έτσι, δημιουργείται μια συνολική εικόνα της κατάστασης του υλικού. Από την άλλη πλευρά, δεν είναι εύκολη η χρήση σε πολύ λεπτά δοκίμια, καθώς και η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων με μία μόνο μέτρηση. Για παράδειγμα, ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία ανίχνευσης γραμμικών ατελειών που είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης των ηχητικών κυμάτων [11].



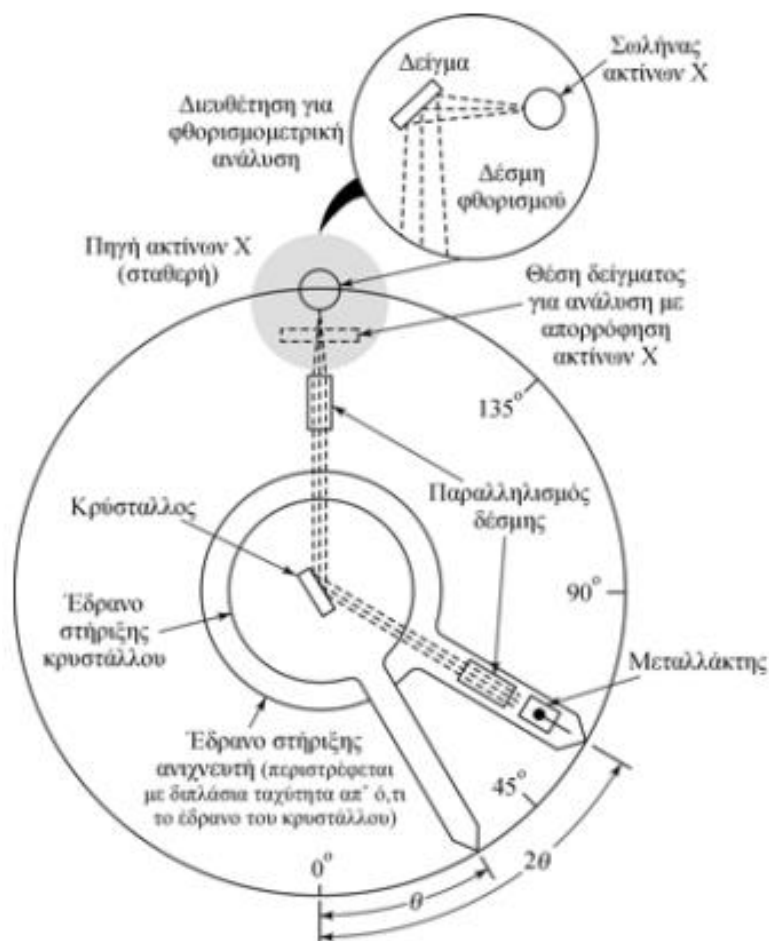
Σχήμα 30: Έλεγχος με μέθοδο υπερήχων

3.3.5 Φασματοσκοπία Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD)

Με τη φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων Χ (X – Ray Diffraction - XRD) είναι δυνατός ο έλεγχος και χαρακτηρισμός ενός μεγάλου φάσματος κρυσταλλικών υλικών, όπως είναι τα μέταλλα, τα πολυμερή, τα οργανικά και τα κεραμικά. Προσφέρει σημαντική διακριτική ικανότητα, ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της δομής ενός υλικού και η μέτρηση των ενδοατομικών αποστάσεων στο κρυσταλλικό του πλέγμα [11].

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην εκπομπή μιας εστιασμένης δέσμης ακτίνων Χ στο δείγμα, με καθορισμένη γωνία πρόσπτωσης. Ανάλογα με την κρυσταλλική δομή του υλικού, θα υπάρξουν και διαφορετικοί τρόποι περίθλασης των ακτίνων. Με περιστροφή του δοκιμίου, λαμβάνονται νέα δεδομένα για διαφορετικές ακτίνες περίθλασης. Συνεπώς, από τη συλλογή και καταγραφή της έντασης και της γωνίας των ακτίνων περίθλασης, προκύπτουν συμπεράσματα για την ταυτότητα, τα χαρακτηριστικά και τις ατέλειες του εξεταζόμενου δείγματος. Οι ακτίνες Χ, έχοντας

μικρότερο μήκος κύματος από τις ακτίνες φωτός, προσφέρουν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Ως μέθοδος, η φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων X χρησιμοποιείται στον χαρακτηρισμό υλικών, στη Γεωλογία, στη Βιολογία, στη Μικροηλεκτρονική και στη βιομηχανία [11].



Σχήμα 31: Ανάλυση φασματοσκοπικής περίθλασης ακτίνων X

3.3.6 Μέτρηση Θορύβου Barkhausen

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μη καταστροφική και βασίζεται στη λήψη του σήματος που παράγεται κατά τη μαγνήτιση του υπό εξέταση υλικού. Η μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων που πραγματοποιείται κατά τη μαγνήτιση ενός φερρομαγνητικού υλικού είναι απότομη και ασυνεχής και όταν καταγράφεται μέσω ενός πηνίου λήψης, μοιάζει με θόρυβο. Οι ατέλειες και οι παραμορφώσεις που επηρεάζουν το υλικό επιδρούν στο λαμβανόμενο σήμα. Έχοντας βαθμονομήσει

καταλλήλως τον αισθητήρα Barkhausen, είναι δυνατή η ανάλυση του σήματος και η διεξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση του υλικού. Σε αυτό το είδος μέτρησης λαμβάνεται η ενεργός τιμή του καταγραφόμενου σήματος, καθώς και ο αριθμός των λεγόμενων “αλμάτων Barkhausen”, δηλαδή των τιμών σήματος που ξεπερνούν ένα ορισμένο κατώφλι και υποδηλώνουν την απότομη και ασυνεχή μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων του φερρομαγνητικού υλικού [24][25].

Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ανάγκη για πολύ καλή επαφή μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου, η χαμηλή συχνότητα διέγερσης που συνεπάγεται και χαμηλό ρυθμό λήψης μετρήσεων και η ύπαρξη παρεμβολών στο χαμηλής τάσης λαμβανόμενο σήμα [22]

3.3.7 Μέτρηση Μαγνητικής Διαπερατότητας

Οι μηχανικές τάσεις μπορούν να συσχετιστούν με τις μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας ενός υλικού, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του υλικού και τις ιδιότητές του. Μέσω ενός κατάλληλα βαθμονομημένου μαγνητικού αισθητήρα, είναι δυνατή η εξαγωγή των παραπάνω πληροφοριών [28][29].

Μια συνήθης διάταξη μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας αποτελείται από ένα πηνίο διέγερσης, το οποίο περιελίσσεται γύρω από έναν πυρήνα ηλεκτρικού χάλυβα σε σχήμα «Π» (yoke). Στον ίδιο πυρήνα ή στο δείγμα τοποθετείται και ένα πηνίο λήψης. Το μαγνητικό κύκλωμα ολοκληρώνεται όταν το yoke τοποθετείται πάνω ή πολύ κοντά στο υπό εξέταση υλικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Για την ελάττωση των παραγόμενων δινορρευμάτων, το yoke μπορεί να αποτελείται από πολλά φύλλα με μονωτικά στρώματα μεταξύ αυτών. Σε μια παραλλαγή του παραπάνω τρόπου μέτρησης, τα πηνία τυλίγονται απευθείας πάνω στο εξεταζόμενο υλικό. Αν και αυτός είναι πιο άμεσος τρόπος μέτρησης, αφού δεν περιλαμβάνει άλλο υλικό πέραν του εξεταζόμενου, παρ' όλα αυτά απαιτεί την επέμβαση στο υπό εξέταση δοκίμιο για την τοποθέτηση των πηνίων, κάτι που δεν είναι πάντοτε εφικτό.

Η αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας συνδέεται με τις μηχανικές τάσεις μέσω του φαινομένου Villari, σύμφωνα με το οποίο η αλλαγή των διαστάσεων ενός υλικού προκαλεί την αλλαγή της μαγνητικής του διαπερατότητας μ και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο [30]:

$$\mu = \frac{J_s^2}{3\mu_0\lambda_s\sigma} = \frac{J_s^2}{3\mu_0\lambda_s Y \varepsilon} \quad (3.1)$$

Όπου:

J_s : η μαγνητική πόλωση κορεσμού

λ_s : ο συντελεστής μαγνητοσυστολής

σ : το μέτρο της επιβαλλόμενης τάσης

Y : το μέτρο ελαστικότητας

ε : η ανοιγμένη παραμόρφωση του υλικού.

Τελικά, από τη μελέτη του σήματος που λαμβάνεται, μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του υλικού και για τη δομή του, αφού οι ατέλειές του δημιουργούν μεταβολές στη μαγνητική ροή. Με αυτήν τη μέθοδο μπορούν να ανιχνευθούν ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού ή και σε όσο βάθος επιτρέπει το επιδερμικό φαινόμενο. Για τη διεξαγωγή της μέτρησης δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του δοκιμίου και μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και με χαμηλό κόστος [20].

3.3.8 Μέτρηση μαγνητικής επαγωγής

Για την λήψη μετρήσεων μαγνητικής επαγωγής, υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες που μπορούν να τοποθετήσουν στην επιφάνεια ή κοντά σε ένα υλικό. Αυτοί οι αισθητήρες λαμβάνουν τοπικές μετρήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την κατάσταση του υλικού σε εκείνο το σημείο. Μερικοί από αυτούς τους αισθητήρες είναι οι αισθητήρες

μαγνητοαντίστασης και Hall. Λόγω της ανισοτροπίας των υλικών, χρειάζεται να πραγματοποιούμε μετρήσεις από διάφορες γωνίες. Αυτό μπορεί να γίνει πιο εύκολα με αισθητήρες πολλαπλών διαστάσεων. Είναι σημαντικό να τοποθετηθεί σωστά ο αισθητήρας, γνωρίζοντας τον προσανατολισμό του σε σχέση με το υλικό. Λόγω των μικρών τους μεγεθών, πολλοί αισθητήρες έχουν αυξημένη αβεβαιότητα στις μετρήσεις τους [22]. Η τάση εξόδου V_{out} από ένα πηνίο μέτρησης μαγνητικής επαγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, από την παρακάτω σχέση:

$$V_{out} = -A \cdot N \cdot \frac{dB}{dt} \quad (3.1)$$

Όπου:

B : η μαγνητική επαγωγή

A : το εμβαδόν διατομής

N : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου.

4. Κεφάλαιο: Ανάπτυξη και Βελτιστοποίηση Μαγνητικού Αισθητήρα Hall

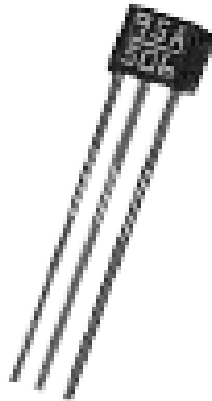
4.1 Ανάπτυξη της Διάταξη με Αισθητήρα Hall

Οι δύο κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη λήψη τέτοιου είδους μετρήσεων βασίζονται στους αισθητήρες πιεζοαντίστασης (strain gauge) και στις οπτικές ίνες (Fiber-Bragg Grating). Όμως, αυτές οι μέθοδοι εμφανίζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα: Πρώτον, προϋποθέτουν την προσεκτική τοποθέτηση των αισθητήρων σε κρίσιμα σημεία για την επιτήρηση της κατάστασης της υπό εξέταση περιοχής (π.χ. κύτος πλοίου, τοιχώματα δεξαμενής κ.λπ.). Ανεπαρκής επαφή με το υλικό ή ελλιπής δειγματοληψία θα οδηγήσει σε ασαφή αποτελέσματα. Δεύτερον, δεν είναι ικανές να ανιχνεύσουν τις προϋπάρχουσες φθορές του υλικού, δηλαδή την κόπωση που είχε υποστεί προτού τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Η λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων είναι η χρήση κάποιας μεθόδου, η οποία θα είναι ικανή να ανιχνεύσει τόσο την τρέχουσα κατάσταση του υλικού, όσο και την κόπωση που υφίσταται λόγω των μηχανικών τάσεων που δέχεται [22].

4.1.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Αισθητήρα Hall που Χρησιμοποιήθηκε

Οι Hall effect αισθητήρες είναι διαθέσιμοι είτε με ψηφιακή είτε με γραμμική έξοδο. Το σήμα εξόδου για γραμμικούς (αναλογικούς) αισθητήρες λαμβάνεται απευθείας από την έξοδο του ενισχυτή, με την τάση εξόδου να είναι ανάλογη με το μαγνητικό πεδίο που διέρχεται από τον αισθητήρα Hall. Αυτή η τάση εξόδου Hall δίνεται από τον εξής τύπο:

$$V_H = R_H \left(\frac{I * B}{t} \right) \quad (4.1)$$



Σχήμα 32: Τυπικός αισθητήρας Hall νέας γενιάς.

Οι γραμμικοί ή αναλογικοί αισθητήρες δίνουν μία έξοδο συνεχούς τάσης που αυξάνεται με ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο και μειώνεται με ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο. Στους αισθητήρες Hall με γραμμική έξοδο, καθώς η δύναμη του μαγνητικού πεδίου αυξάνει, το σήμα εξόδου από τον ενισχυτή αυξάνεται επίσης. Έπειτα αρχίζει ο κορεσμός μέχρι ένα όριο που επιβάλλεται από την παροχή ενέργειας. Κάθε πρόσθετη αύξηση του μαγνητικού πεδίου δεν θα έχει καμία επίπτωση στο αποτέλεσμα, αλλά το οδηγεί σε επιπλέον κορεσμό [31].

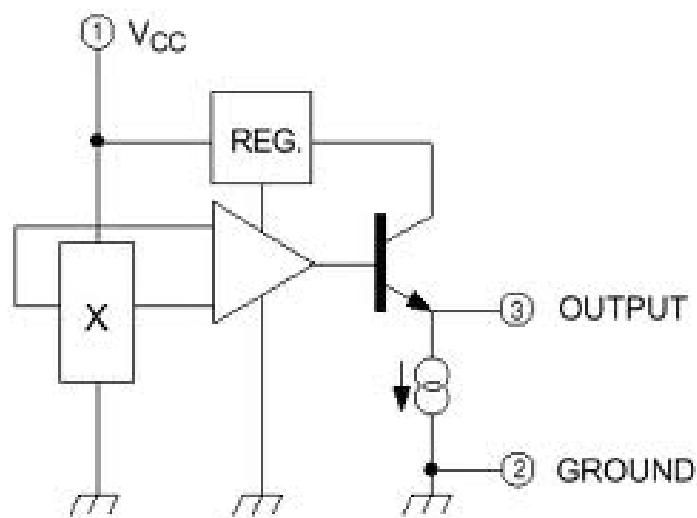
Συγκεκριμένα ο αισθητήρας SS49 που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση, είναι γραμμικός με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η έξοδός του, σε τάση είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.
- Τμηματικά συνεχής έξοδος
- Μεγαλύτερη ευαισθησία
- Μέγιστη σταθερότητα σε μεταβολές θερμοκρασίας
- Λειτουργία σε τάση μεταξύ 4.5 V και 6V
- Μικρό σε μέγεθος
- Μεγάλη αξιοπιστία

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά του μαγνητικού αισθητήρα, καθώς και ο τρόπος υπολογισμού όλων των κρίσιμων μεγεθών που διέπουν τη λειτουργία του για τάση $V_{cc} = 5\text{ V}$ και ρεύμα I_o .

Πίνακας 1: Ηλεκτρικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

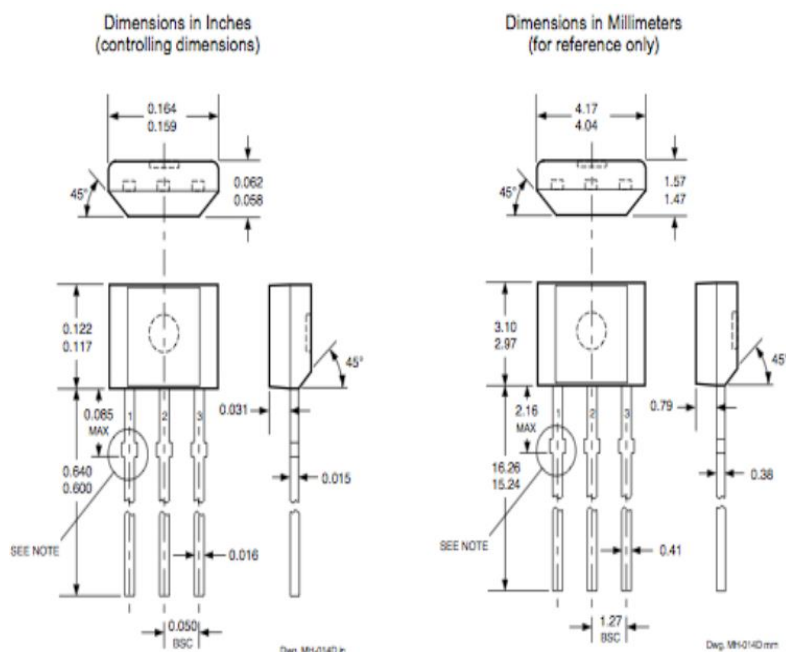
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max	Units
Operating Voltage	V_{cc}		4.5	—	6.0	V
Supply Current	I_{CC}		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	V_{OUT}	B=0G	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	ΔV_{OUT}	B = 0 G to $\pm 900\text{ G}$	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
Broadband Output Noise	V_{out}	BW = 10 Hz to 10 kHz	—	90	—	μV
Output Resistance	R_{out}		—	50	220	Ω



Dwg. FH-007

Σχήμα 33 Κύκλωμα αισθητήρα Hall.

Παρακάτω παρατίθενται οι διαστάσεις του αισθητήρα SS49 που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση.



Σχήμα 34 Διαστάσεις του αισθητήρα Hall.

4.1.2 Αρχή Λειτουργίας Μαγνητικής Διάταξης

Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης διάταξης βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του υπό εξέταση υλικού, μέσω της μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής που ανιχνεύουν οι αισθητήρες Hall. Όταν η διάταξη πλησιάζει ή έρχεται σε επαφή με το υλικό, δημιουργείται ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα διάδοσης του συνεχούς μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από τον μόνιμο μαγνήτη. Η δημιουργηθείσα μαγνητική ροή, ακολουθώντας την οδό της υψηλότερης μαγνητικής διαπερατότητας, θα διαδοθεί μέσα από το εξεταζόμενο υλικό, το οποίο αποτελεί μέρος του μαγνητικού κυκλώματος.

Κατά τη μαγνήτιση, οι ροπές των μαγνητικών περιοχών του φερρομαγνητικού υλικού τείνουν να ευθυγραμμιστούν με το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών επιτυγχάνεται μέσω της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων. Τυχόν ατέλειες στη δομή του υλικού εμποδίζουν την ομαλότητα αυτής της κίνησης και μπορούν να γίνουν αντιληπτές μέσω της λήψης του σήματος. Στην περίπτωση ενός θετικά μαγνητοσυστολικού υλικού, η επιβολή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του άξονα μαγνήτισης οδηγεί στην αύξηση της

μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. Ομοίως, θλιπτικές δυνάμεις οδηγούν στη μείωσή της.

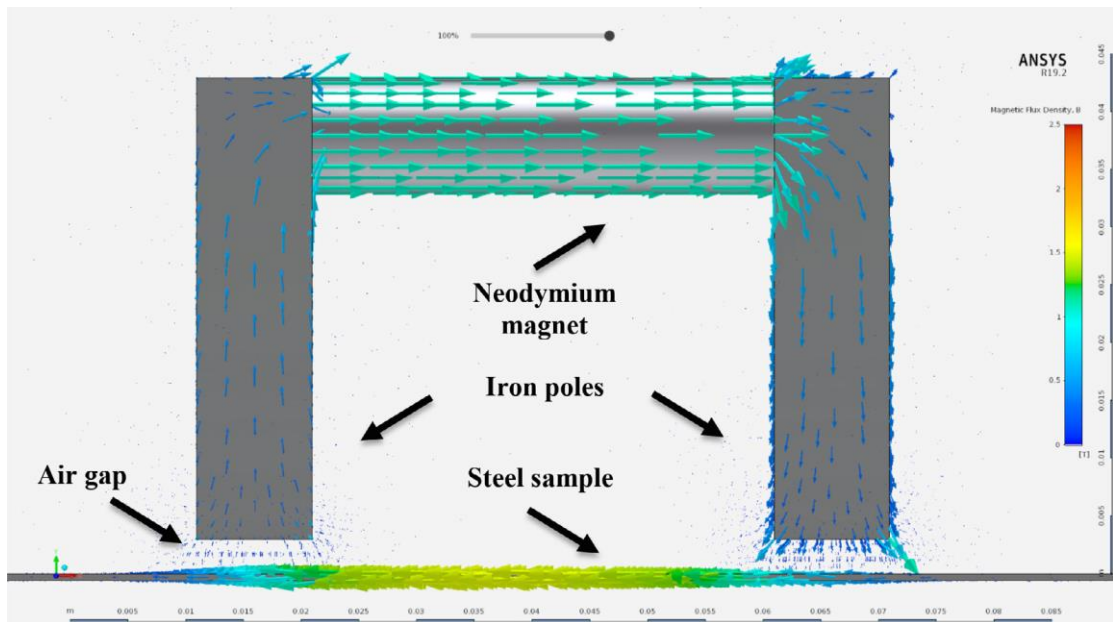
4.1.3 Πειραματικές Διατάξεις προς Βελτιστοποίηση

Η παρούσα πειραματική διατριβή βασίζεται, στην υπάρχουσα διάταξη του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητήρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία αναπτύχθηκε από τους (Aggelopoulos et al.) [32]. Καθώς και από την διάταξη που είχε αναπτυχθεί από τους (Misron et al.) [31]. Ο σκοπός της είναι να συγκρίνει και βελτιστοποιήσει τον αισθητήρα, με αλλαγή της πρότερης διάταξης, σύγκριση των τιμών που αποδίδει η κάθε μια και τέλος επιλέγοντας την βέλτιστη δομή. Με στόχο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

4.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας - Πειραματικός Εξοπλισμός

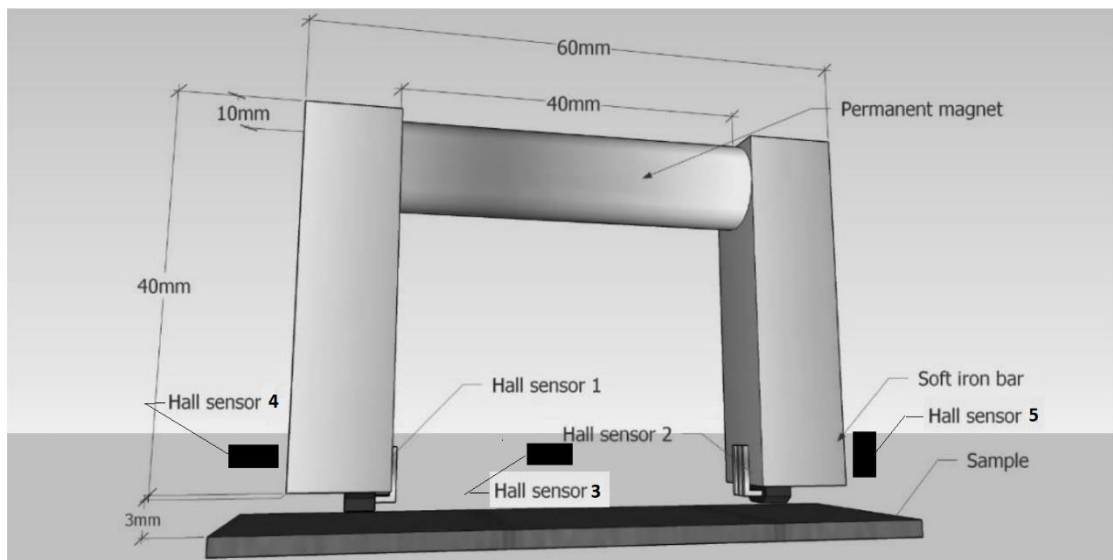
4.2.1 Εξοπλισμός Διάταξης

Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, με αισθητήρες Hall, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση φθοράς σε ένα φερρομαγνητικό υλικό. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί αναπτύσσοντας μία διάταξη, η οποία αποτελείται από έναν παραλληλόγραμμο μόνιμο μαγνήτη, δύο ράβδους μαλακού σιδήρου και 5 αισθητήρες Hall, στην ίδια πλακέτα. Οι 5 αισθητήρες θα χρησιμοποιηθούν για να βρεθεί η βέλτιστη δομή για την διενέργεια μετρήσεων. Οι δύο ράβδοι σιδήρου τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα ως προς τον μόνιμο μαγνήτη, σχηματίζοντας ένα «Π». Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται ώστε να αποφευχθεί η χρήση πηνίων για τη μαγνήτιση του εξεταζόμενου υλικού και για τη λήψη του παραγόμενου σήματος. Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη «Π» που χρησιμοποιήθηκε:



Σχήμα 35: Αναπαράσταση της διάταξης του μαγνήτη σε «Π» [33]

Η σύγκριση μετρήσεων θα γίνει για 4 διαφορετικές δομές, με διαφορετική θέση του αισθητήρα Hall όπως φαίνεται στο Σχήμα 36.



Σχήμα 36: Αναπαράσταση της διάταξης που κατασκευάστηκε [33]

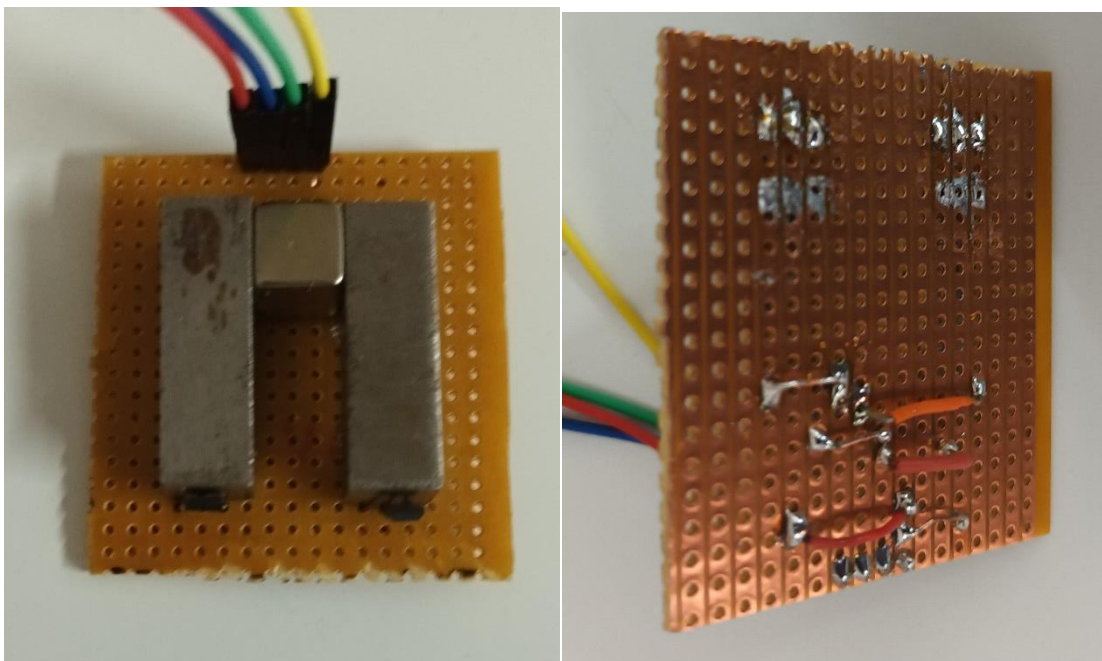
- 1^η δομή: Hall sensor 1 και Hall sensor 2
- 2^η δομή: Hall sensor 3

- 3^η δομή: Hall sensor 4
- 4^η δομή: Hall sensor 5

4.2.2 Διάταξη

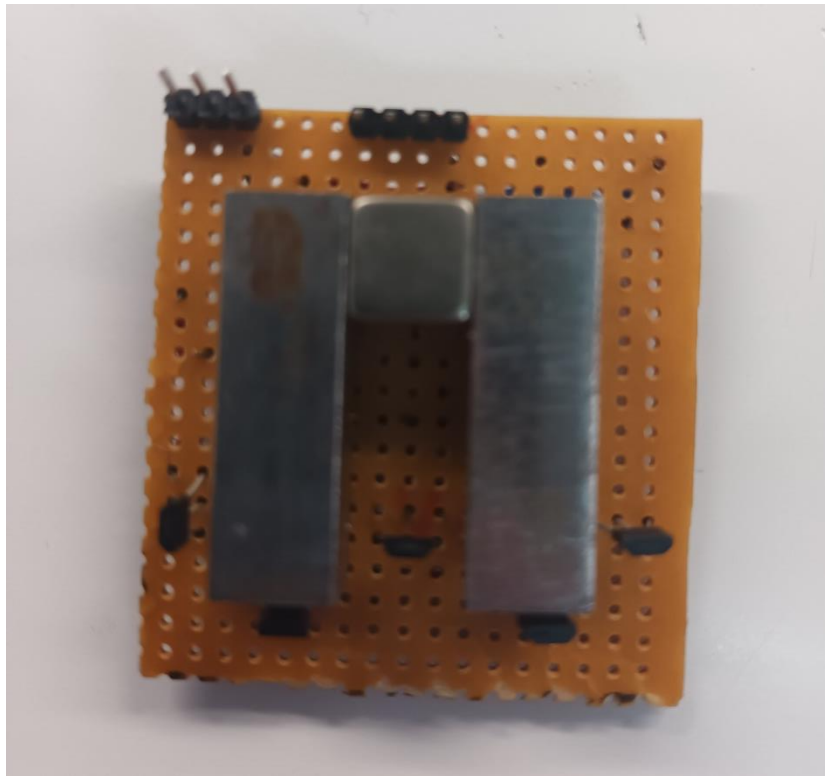
Με βάση το άνω κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη δοκιμή του κυκλώματος της διάταξης, με κύριο γνώμονα να βρίσκονται και οι 5 αισθητήρες στην ίδια διάταξη, για ταυτόχρονη μέτρηση μαγνητικής επαγωγής. Αυτό θα γίνει εφικτό με την επιπλέον σύνδεση ενός μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος θα αποστέλλει τις μετρήσεις των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του υπολογιστή.

Το πρώτο βήμα για να δημιουργηθεί το απαιτούμενο κύκλωμα είναι η τοποθέτηση και συγκόλληση δύο ράβδων σιδήρου παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα ως προς τον μόνιμο μαγνήτη, σχηματίζοντας ένα «Π» πάνω σε μια κενή πλακέτα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν δυο αισθητήρες Hall εμπρός των ράβδων σιδήρου και συνδέθηκαν με τις αντίστοιχες εισόδους, εξόδους και γείωση για την ορθή τους λειτουργία.



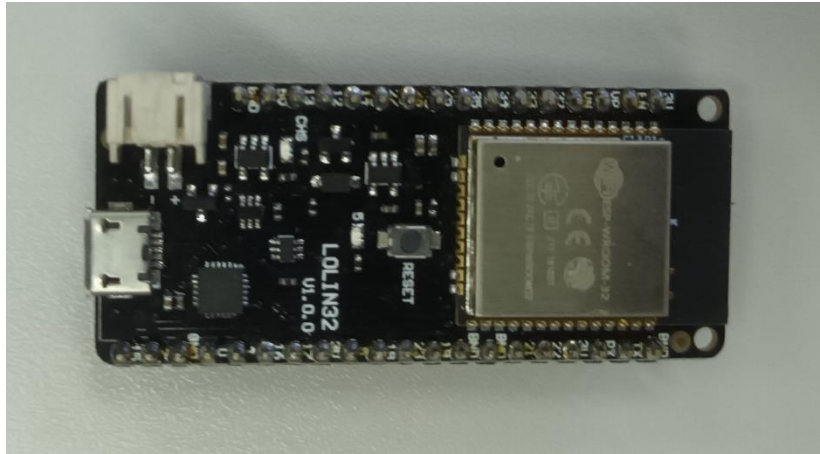
Σχήμα 37: Κύκλωμα διάταξης με 2 αισθητήρες Hall

Έπειτα τοποθετήθηκαν επιπλέον 3 αισθητήρες σε διαφορετικές θέσεις πάνω στην ίδια διάταξη, όπως απαιτείται για να επιλεγεί μετά το πέρας των μετρήσεων η βέλτιστη θέση.



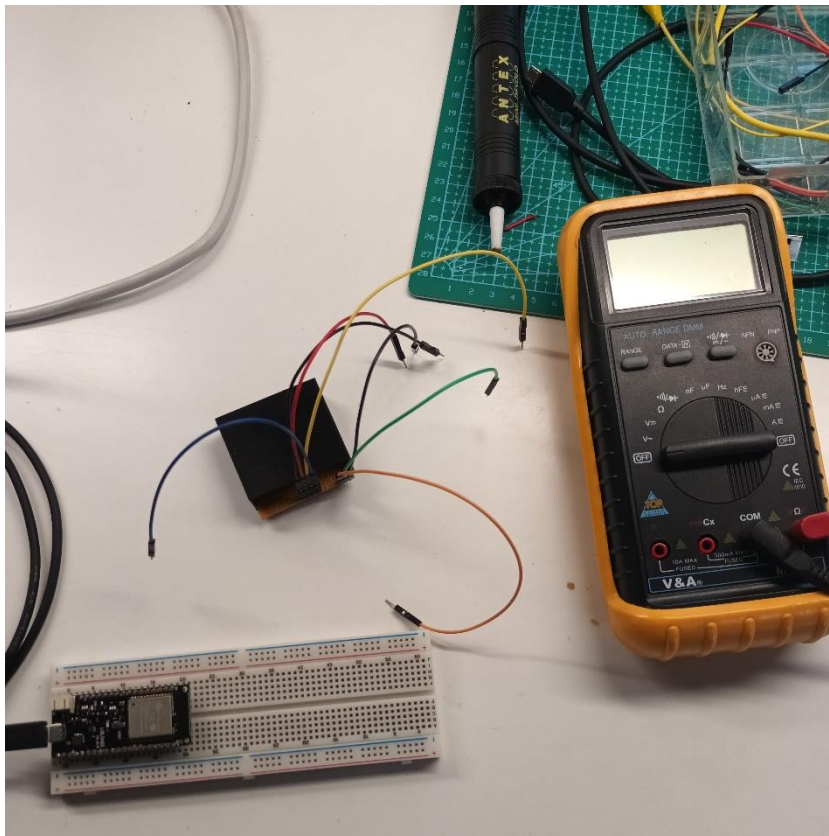
Σχήμα 38: Τελική διάταξη μαγνητικού αισθητήρα Hall

Το επόμενο βήμα ήταν επιλογή και σύνδεση στο κύκλωμα ενός μικροελεγκτή ESP32, ώστε να είναι εφικτή η διασύνδεση και αποστολή των μετρήσεων και έπειτα η επεξεργασία τους. Πριν από την εισαγωγή του αισθητήρα στο πλαίσιο σταθεροποίησης έγινε μείωση της απόστασης που δημιουργούσε η πλακέτα, για επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων μέτρησης.



Σχήμα 39: Μικροελεγκτής ESP32

Θέλοντας ομαλή σύνδεση του ESP32 με το κύκλωμα χωρίς αναταράξεις επιλέχθηκε να συνδεθεί σε μια σταθερή breadboard και μόνο ο αισθητήρας να μετακινείται για τη σάρωση του χάλυβα. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η περαιτέρω μείωση των αναταράξεων.



Σχήμα 40: Σύνδεση αισθητήρα με breadboard

4.2.3 Προγραμματισμός Κυκλώματος

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την ορθή λειτουργία της διάταξης.

```
int Hall_pins[5] = { 25, 26, 27, 14, 13 };
int offset[5];
int vcc = 3300;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  for (int i = 0; i < 5; i++) {
    offset[i] = analogRead(Hall_pins[i]);
  }
}

void loop() {
  for (int i = 0; i < 5; i++) {
    int sensorValue = analogRead(Hall_pins[i]) + offset[i];
    float voltage = (sensorValue / 4095.0) * vcc;
    int mT = map(voltage, 0, 3300, -100, 100);
    Serial.print(mT);
    if (i < 4) {
      Serial.print(",");
    } else {
      Serial.println();
    }
  }
  delay(100);
}
```

Σχήμα 41: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση του κώδικα:

Variables:

- **Hall_pins[]**: Προσδιορίζει με ποιους ακροδέκτες συνδέονται οι αισθητήρες Hall.
- **offset[]**: Αποθηκεύει τις αρχικές τιμές μέτρησης για κάθε αισθητήρα, οι οποίες διαβάζονται κατά την εκκίνηση.
- **vcc**: Η τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα.

Setup function:

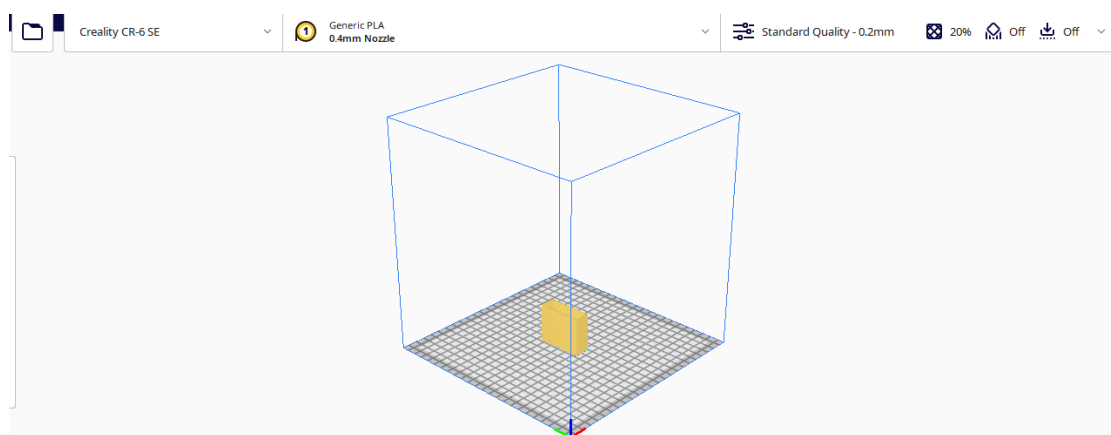
- Εκκινεί τη σειριακή επικοινωνία σε ρυθμό 115200.
- Διαβάζει και αποθηκεύει τις αρχικές τιμές όλων των αισθητήρων Hall στη διάταξη μετατόπισης.

Loop function:

- Διαβάζει τις τιμές κάθε αισθητήρα Hall σε βρόχο, τις προσαρμόζει με την προηγουμένως αποθηκευμένη διαφορά και υπολογίζει την αντίστοιχη τάση.
- Στη συνέχεια, η τάση μετατρέπεται σε μαγνητική επαγωγή σε millitesla (mT) μεταξύ -100 και 100.
- Αυτή η τιμή εμφανίζεται στη συνέχεια στην οθόνη.
- Μετά την εμφάνιση και των πέντε τιμών, ο κώδικας περιμένει για 100 ms πριν διαβάσει ξανά.

4.2.4 Διάταξη Σταθεροποίησης Κυκλώματος

Για την σταθεροποίηση του κυκλώματος του αισθητήρα πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός και τρισδιάστατη εκτύπωση ενός πλαισίου, στο οποίο θα εφαρμόζει η πλακέτα με τους αισθητήρες και τον μαγνήτη. Αυτό το πλαίσιο είναι σημαντικό για την μείωση των παρεμβολών από ακούσια μετακίνηση.



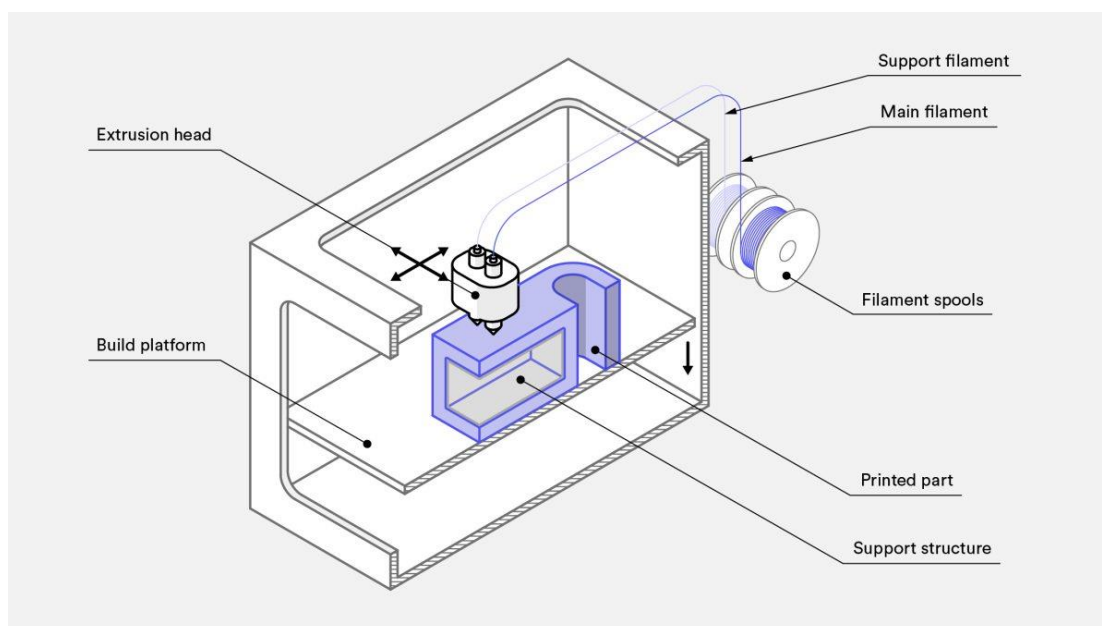
Σχήμα 42: Απεικόνιση προσανατολισμού πλαισίου στο Ultimaker Cura

Το πλαίσιο σχεδιάστηκε στο Autodesk Inventor και στη συνέχεια παραμετροποιήθηκε, ώστε να αποσταλεί για εκτύπωση στο Ultimaker Cura. Η

τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η Fused Deposition Modelling – FDM, η οποία είναι η πιο διαδεδομένη. Η διαδικασία αποτελείται από 3 στάδια όπως φαίνεται.

- Στην αρχική φάση, το νήμα περνά είτε μέσα από έναν σωλήνα PTFE, είτε άμεσα μέσα στο hotend.
- Στην άκρη του hotend βρίσκεται η κεφαλή εκτύπωσης, η οποία θερμαίνεται στην κατάλληλη θερμοκρασία που μετράται με τη βοήθεια ενός θερμίστορ NTC, ανάλογα με το υλικό.
- Το υλικό, που πλέον είναι τηγμένο, τοποθετείται σε μια επιφάνεια που θερμαίνεται, γνωστή ως επιφάνεια εκτύπωσης.

Οι δύο αυτές θερμοκρασίες είναι καθοριστικές για την επιτυχή κατεργασία, διότι βοηθούν τις στρώσεις να κολλήσουν μεταξύ τους και την πρώτη στρώση με την επιφάνεια, αποτρέποντας έτσι τυχόν αποκολλήσεις. [35].



Σχήμα 43: 3D Εκτυπωτής FDM

Παρακάτω καταγράφονται οι κύριες ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση του πλαισίου:

Πίνακας 2: Κύριες ρυθμίσεις 3D εκτύπωσης

3D Εκτυπωτής	Creality CR-6 SE
Υλικό εκτύπωσης	PLA
Διάμετρος ακροφυσίου	0.4 mm
Τύπος Πλήρωσης (Infill Pattern):	Cubic
Θερμοκρασία Κεφαλής:	200 °C
Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης:	60 °C
Ταχύτητα Ανεμιστήρα (Fan Speed):	100%

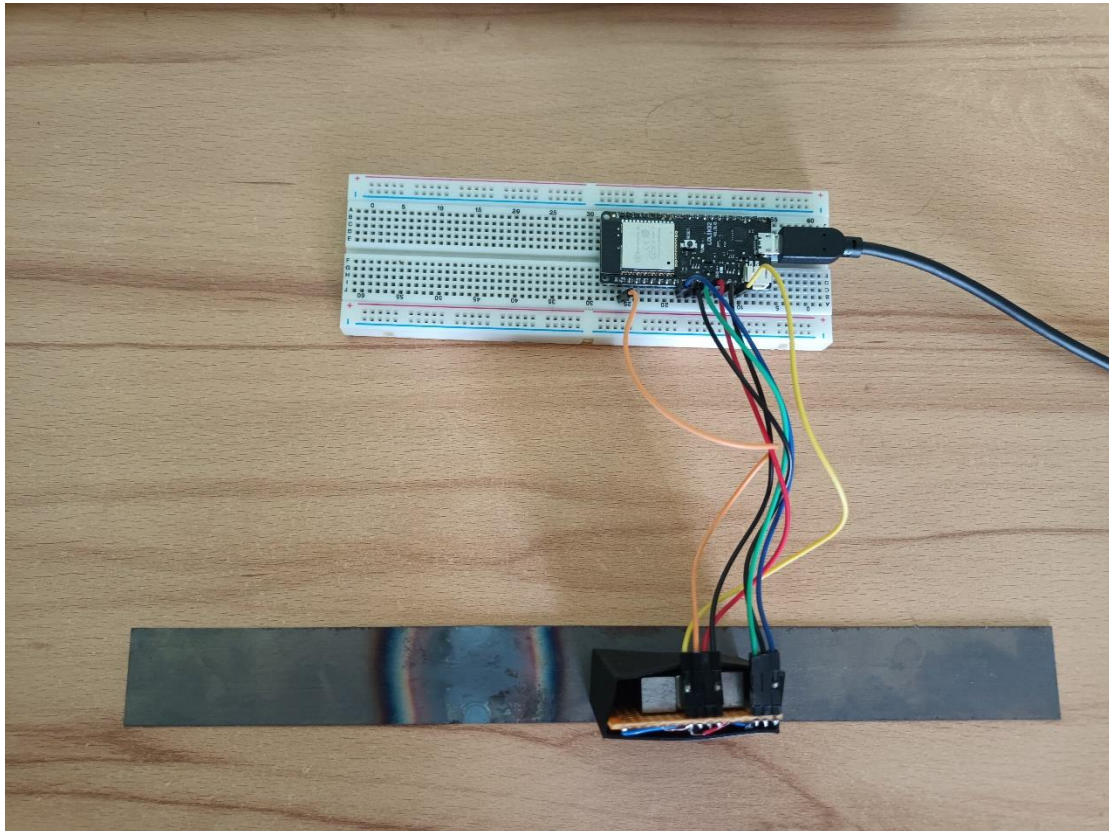
Τέλος παρακάτω φαίνεται η εκτύπωση του πλαισίου.



Σχήμα 44: 3D Εκτύπωση πλαισίου σταθεροποίησης

4.2.5 Κατασκευή Διάταξης

Το τελικό στάδιο κατασκευής της διάταξης παρουσιάζεται παρακάτω. Πλέον η πλακέτα με τους 5 αισθητήρες Hall έχει συνδεθεί με τον μικροελεγκτή ESP32. Επιπλέον έχει γίνει ο προγραμματισμός και έχει αποσταλεί ο κώδικας στον μικροελεγκτή, ώστε να αποστέλλει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του υπολογιστή. Επίσης, το πλαίσιο σταθεροποίησης έχει εφαρμοσθεί για τη μείωση των αναταράξεων.



Σχήμα 45: Τελική διάταξη μετρήσεων



Σχήμα 46: Δοκίμιο φερρομαγνητικού χάλυβα με εμφανή φθορά

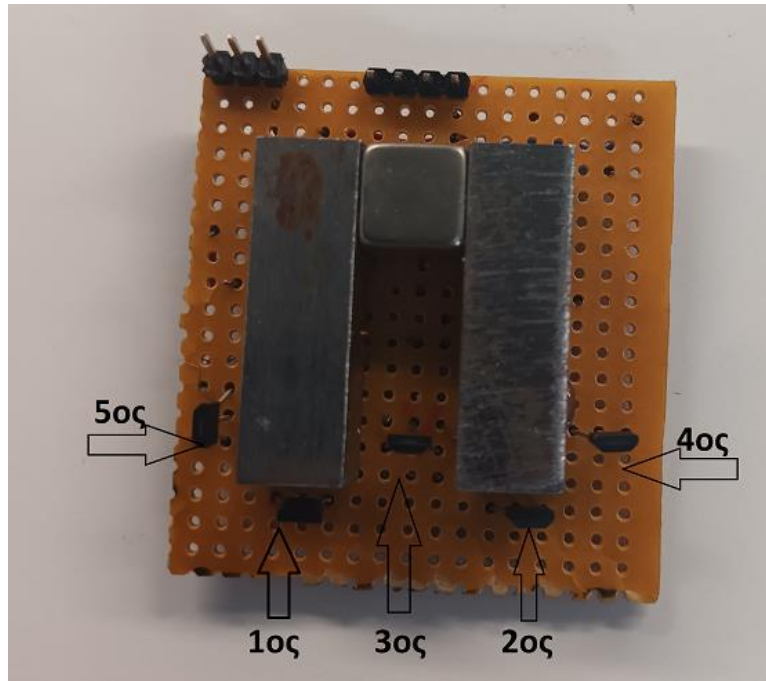
4.3 Μετρήσεις - Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης δομής της παρούσας διάταξης αποτελούμενης από 5 αισθητήρες Hall, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, σε δοκίμιο χάλυβα. Πρώτα σε δοκίμιο το οποίο δεν φέρει φθορά και έπειτα σε δοκίμιο με φθορά. Λόγω της απαίτησης ακριβείας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε διάταξη του εργαστήριου Ηλεκτρονικών Αισθητήρων, στην οποία σταθεροποιήθηκε ο αισθητήρας, ώστε να έχουμε σταθερή ταχύτητα και απόσταση από το δείγμα.



Σχήμα 47: Διάταξη κίνησης αισθητήρα σταθερής ταχύτητας

Έτσι μέσα από σύγκριση των επιμέρους μετρήσεων και διαγραμμάτων θα καταγραφεί η βέλτιστη θέση των αισθητήρων με γνώμονα την ποιότητα μετρήσεων. Όλες οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν υπό την επίδραση του μαγνήτη στην διάταξη γοκε, όπως έχει αναλυθεί ανωτέρω.



Σχήμα 48: Καθορισμός αισθητήρων στην διάταξη

1^{ος} Αισθητήρας : Bottom Left

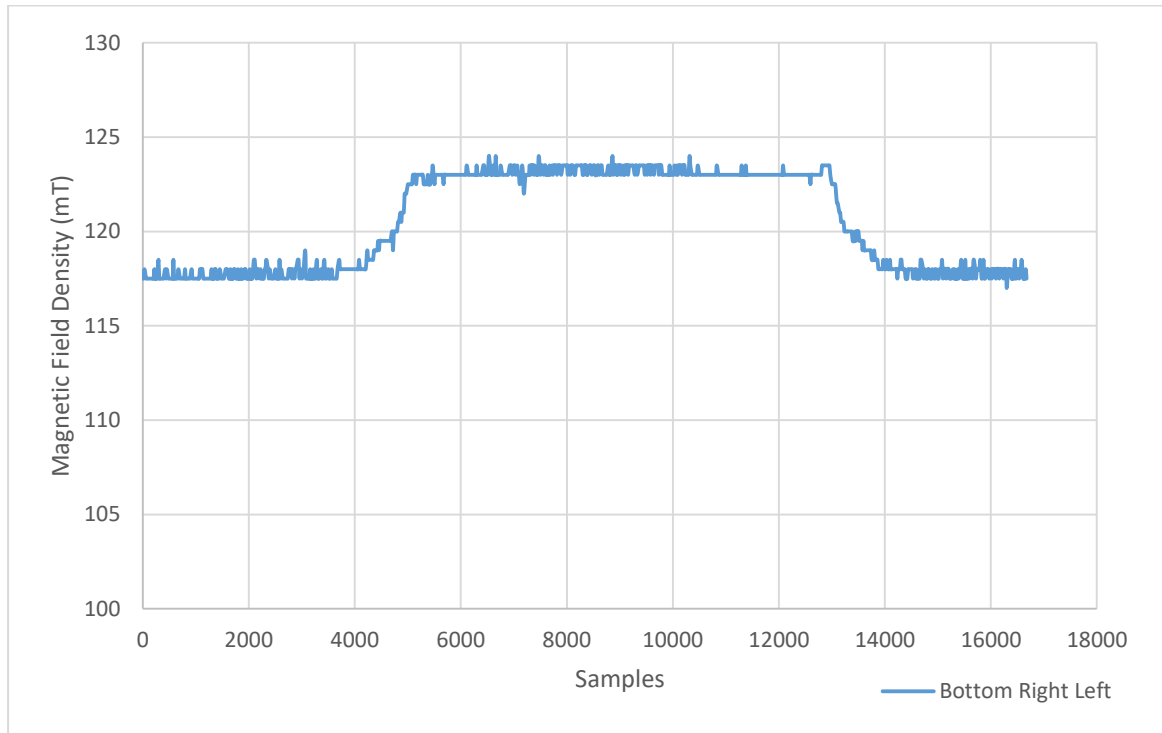
2^{ος} Αισθητήρας : Bottom Right

3^{ος} Αισθητήρας : Mid

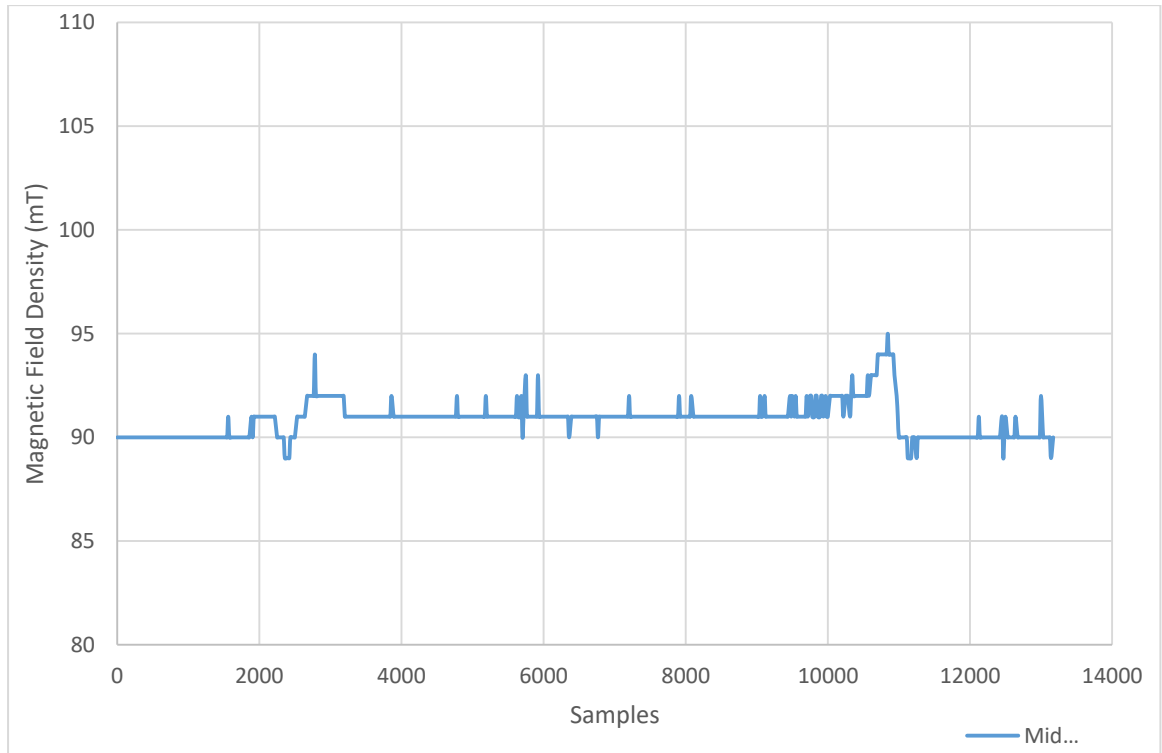
4^{ος} Αισθητήρας : Right

5^{ος} Αισθητήρας : Left

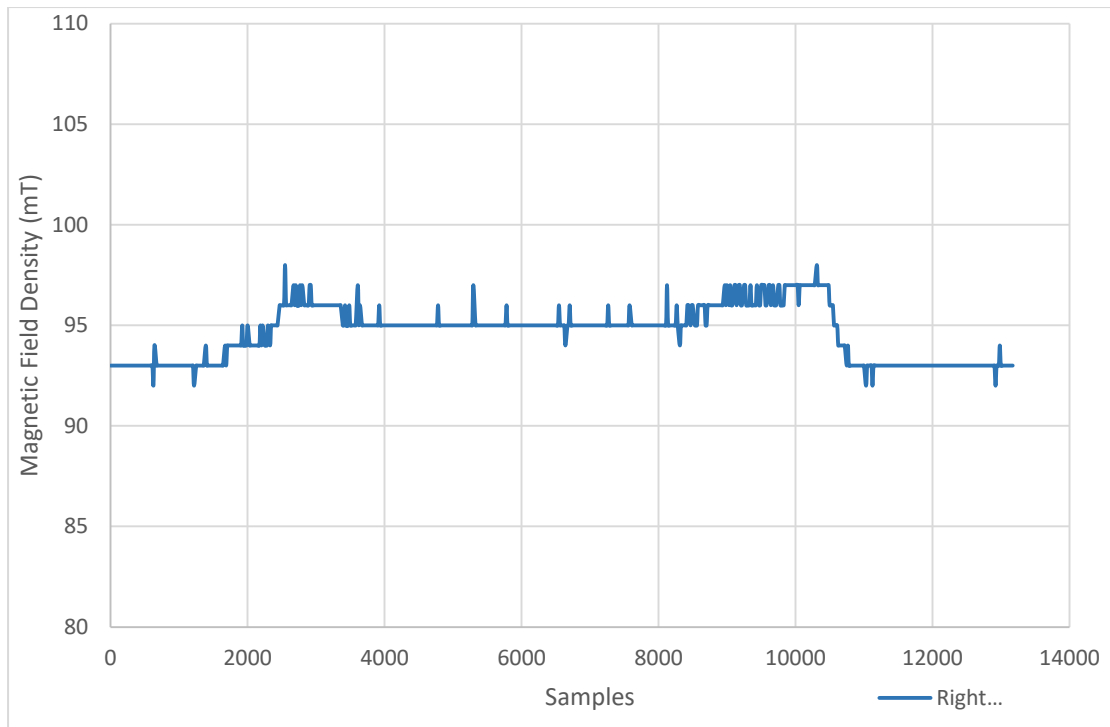
1^η Μέτρηση: Σε δοκίμιο χωρίς φθορά



Σχήμα 49: Τιμές αισθητήρα Bottom Right Left σε δοκίμιο χωρίς φθορά



Σχήμα 50: Τιμές αισθητήρα Mid σε δοκίμιο χωρίς φθορά



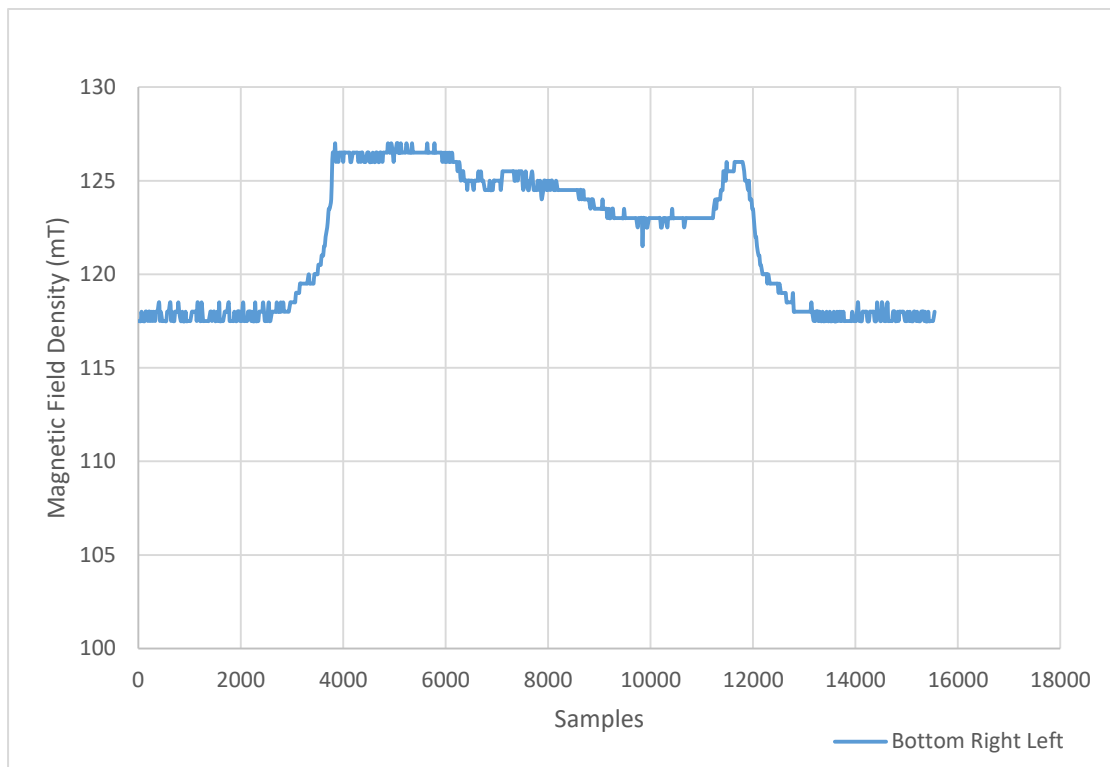
Σχήμα 51: Τιμές αισθητήρα Right σε δοκίμιο χωρίς φθορά

Η πρώτη μέτρηση της διάταξης που κατασκευάστηκε πραγματοποιήθηκε δοκιμαστικά σε χάλυβα, ο οποίος δεν έχει υποστεί φθορά. Αυτό η απόφαση πάρθηκε, διότι χρειαζόταν καταρχάς να γίνει φανερό ότι η διάταξη μπορεί να αναγνωρίσει την παρουσία χάλυβα όταν έρχεται κοντά στο εύρος μαγνήτισής της. Στη συνέχεια με βάση τις πρώτες μετρήσεις και συγκρίνοντας αυτές με τις μετρήσεις του κάθε αισθητήρα σε δοκίμιο με φθορά αλλά και μεταξύ των αισθητήρων θα γίνει και η επιλογή της διάταξης η οποία παρέχει τις πιο ακριβείς τιμές.

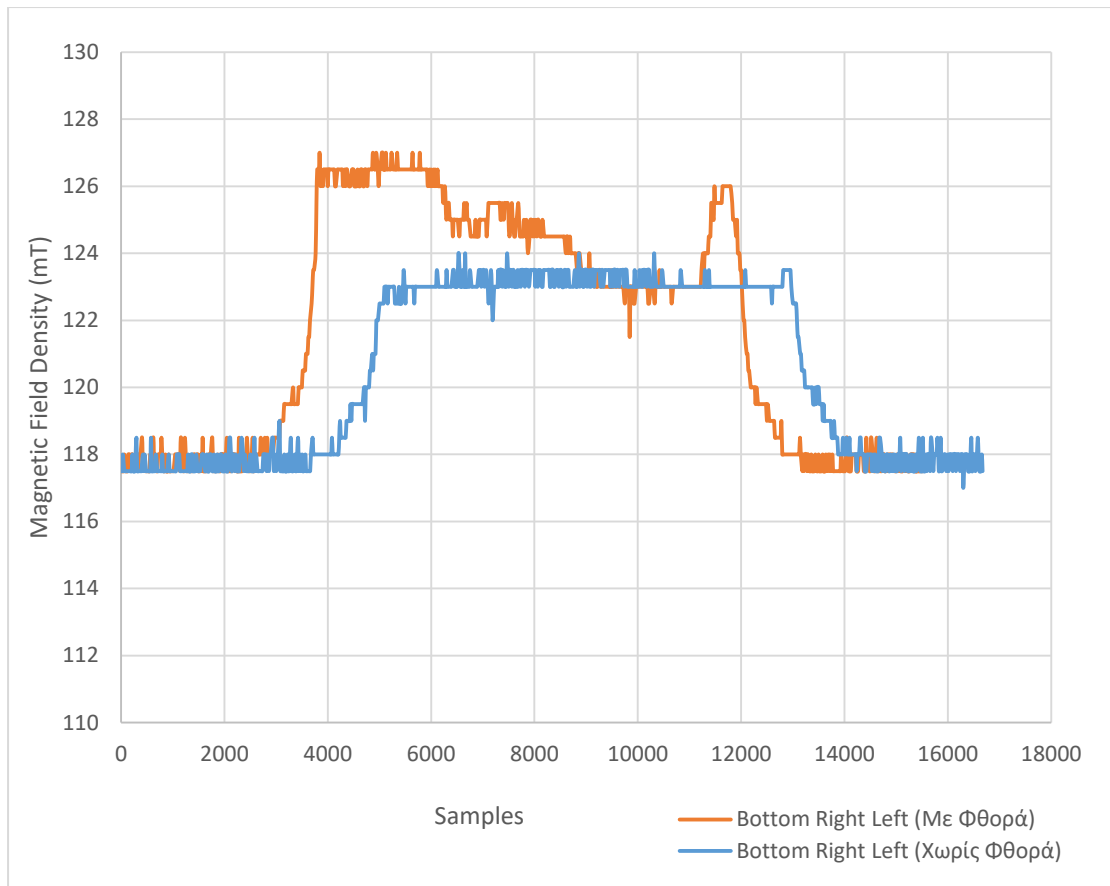
Αρχικά παρατηρήθηκε πως ο αισθητήρας 5 – Left δεν είχε ορθή απόκριση στα δοκίμια που ερχόταν σε επαφή μαγνήτισης για αυτό αποκλείστηκε από τις σε συγκρίσεις σε αυτό το σημείο. Από τα ανωτέρω σχήματα 49, 50, 51 γίνεται αντιληπτό το σημείο κατά το οποίο η τιμή του αισθητήρα αλλάζει, καθώς η διάταξη φθάνει στην αρχή του δοκιμίου. Αυτό μας υποδεικνύει πως και οι τρεις διατάξεις αναγνωρίζουν αξιόπιστα την ύπαρξη χάλυβα κοντά τους. Επίσης, παρατηρείται ότι οι μετρήσεις φθάνουν στα όρια ανάλυσης του 12-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) του μικροελεγκτή ESP32, κάτι που γίνεται αντιληπτό από τις διακριτές διακυμάνσεις μεταξύ των διαφορετικών τιμών εξόδου των αισθητήρων Hall.

Επίσης, στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως για μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων και για να έχουν όλοι οι αισθητήρες την ίδια απόσταση από το δοκίμιο, μετά την μέτρηση των Bottom Right Left, το εμπρόσθιο τμήμα της διάταξης απομακρύνθηκε και επαναλήφθηκαν μετρήσεις για τους υπόλοιπους αισθητήρες.

2^η Μέτρηση: Σε δοκίμιο με φθορά

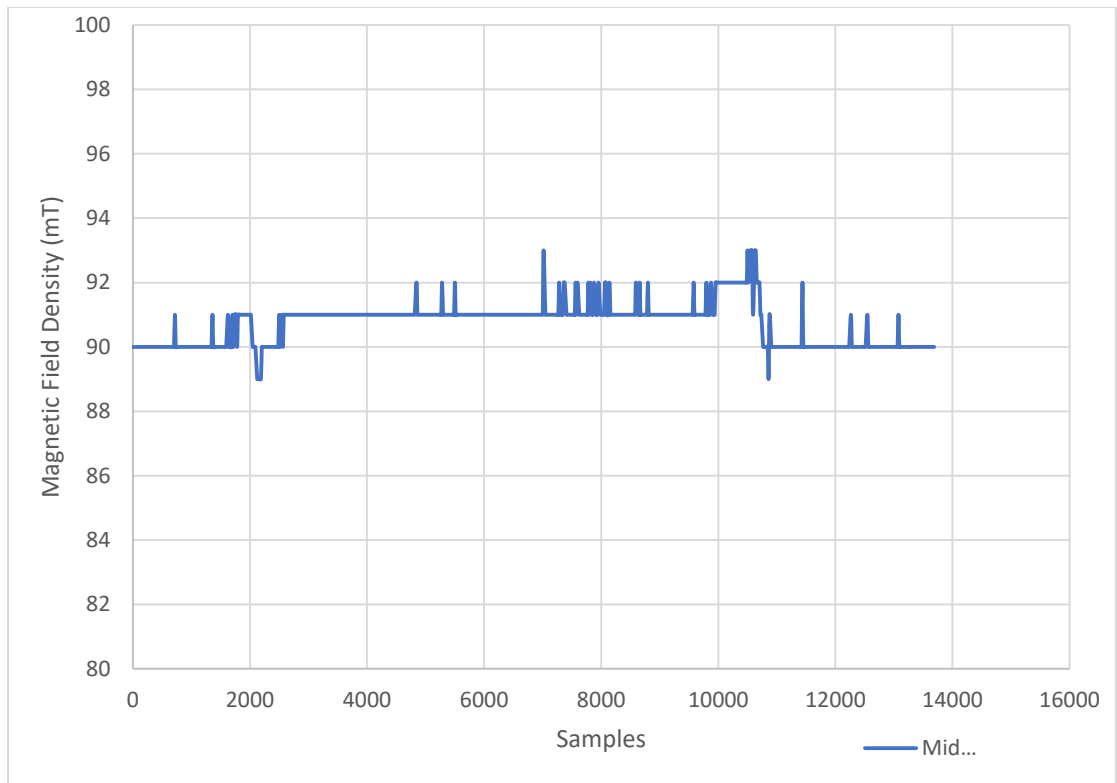


Σχήμα 52 Τιμές αισθητήρα Bottom Right Left σε δοκίμιο με φθορά

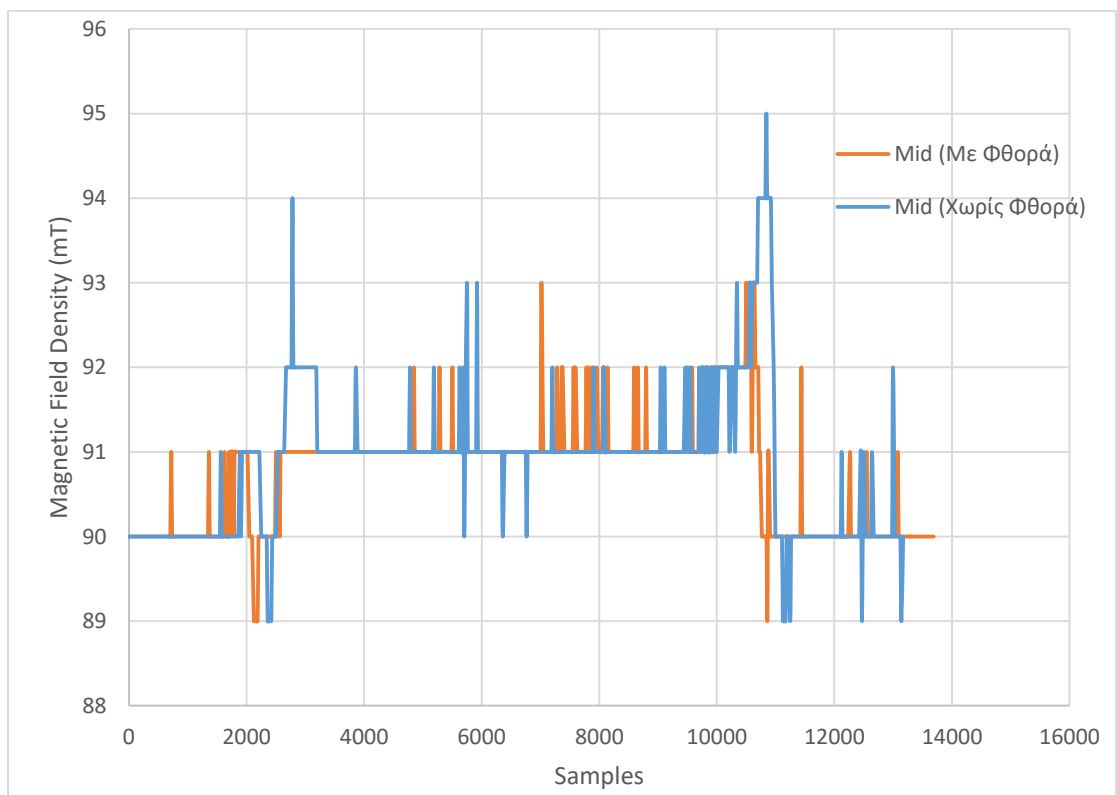


Σχήμα 53: Σύγκριση τιμών αισθητήρα Bottom Right Left σε δοκίμιο με φθορά και χωρίς φθορά

Παρατηρώντας το σχήμα 52 και συγκρίνοντας τις τιμές του σχήματος 53, φαίνεται πως ο αισθητήρας Bottom Right Left αναγνωρίζει σε ένα αξιόπιστο επίπεδο την φθορά του χαλύβδινου, καθώς είναι φανερή η διακύμανση των τιμών του στο τμήμα των 4000-8000 samples, σε αντίθεση με τις τιμές σε δοκίμιο χωρίς φθορά.

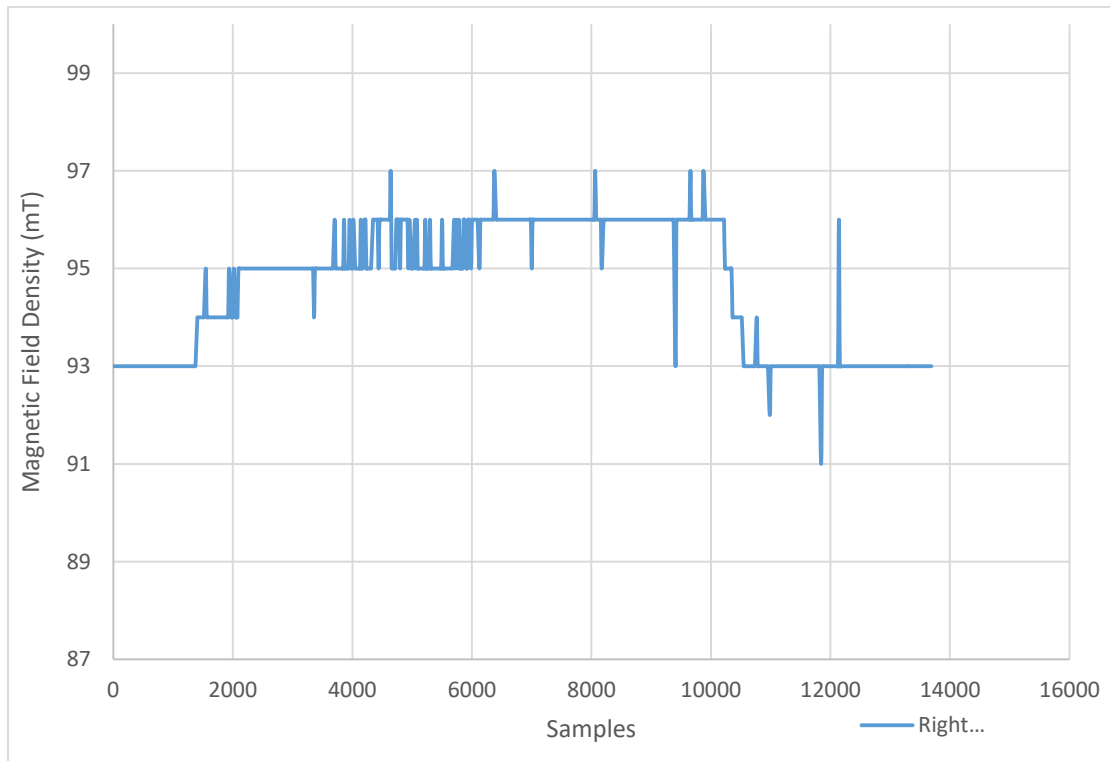


Σχήμα 54: Τιμές αισθητήρα Mid σε δοκίμιο με φθορά

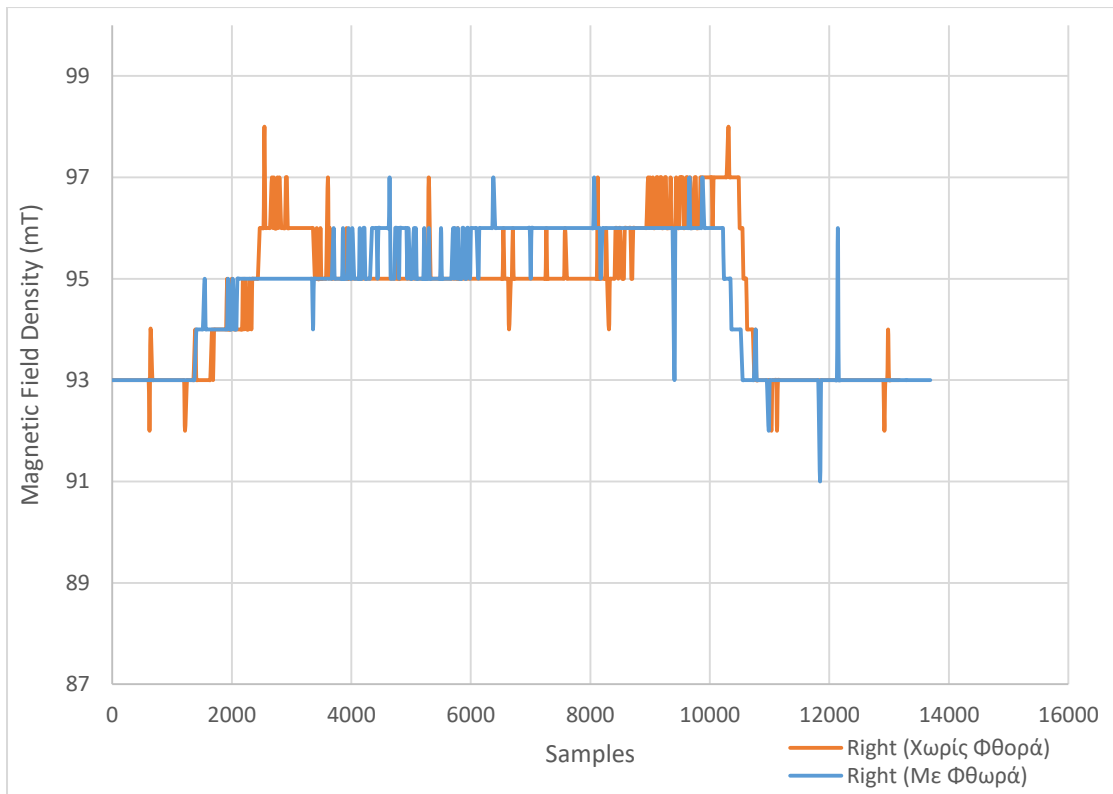


Σχήμα 55: Σύγκριση τιμών αισθητήρα Mid σε δοκίμιο με φθορά και χωρίς φθορά

Παρατηρώντας το σχήμα 54 και το συγκριτικό των τιμών του σχήματος 55, φαίνεται πως ο αισθητήρας Mid αναγνωρίζει σε ένα πολύ καλό επίπεδο την ύπαρξη χάλυβα κοντά στο μαγνητικό του πεδίο. Παρ' όλα αυτά δεν έχει αναγνωρίσει την φθορά του χαλύβδινου δοκιμίου, καθώς δεν υπάρχει φανερή διακύμανση των τιμών του.



Σχήμα 56: Τιμές αισθητήρα Right σε δοκίμιο με φθορά



Σχήμα 57: Σύγκριση τιμών αισθητήρα Right σε δοκίμιο με φθορά και χωρίς φθορά

Παρατηρώντας το σχήμα 56 και το συγκριτικό των τιμών του σχήματος 57, φαίνεται πως και ο αισθητήρας Right αναγνωρίζει σε ένα πολύ καλό επίπεδο την ύπαρξη χάλυβα κοντά στο μαγνητικό του πεδίο. Παρ' όλα αυτά δεν έχει αναγνωρίσει την φθορά του χαλύβδινου δοκιμίου, καθώς δεν υπάρχει φανερή διακύμανση των τιμών του.

Συμπερασματικά ολοκληρώνοντας τις πειραματικές μετρήσεις η καλύτερη θέση για την διάταξη των αισθητήρων είναι η Bottom Right Left. Δηλαδή δύο αισθητήρες στις άκρες των ράβδων του μαλακού σιδήρου, καθώς παρατηρήθηκε άμεση αναγνώριση της φθοράς με διακύμανση των μετρήσεων στο σημείο, αλλά και αξιόπιστη αναγνώριση των χαλύβδινων δοκιμίων. Τέλος να σημειωθεί πως και οι δυο διατάξεις Mid και Right αναγνώρισαν το χαλύβδινο δοκίμιο, παρ' όλα αυτά δεν υπήρξε εμφανής διακύμανση κατά το πέρασμα από το σημείο φθοράς. Ο αισθητήρας Left δεν λειτούργησε ορθά για την παροχή μετρήσεων.

5. Κεφάλαιο: Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Γνωρίζουμε ότι η βιβλιογραφική έρευνα έχει ελλείψεις στον τομέα της μελέτης διαφορετικών τοπολογιών των διατάξεων που στηρίζονται στη χρήση αισθητήρων και γokes για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο φερρομαγνητικών υλικών, καθώς οι υπάρχουσες λύσεις δεν καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες μέτρησης, παρακολούθησης και ελέγχου, για τις διάφορες πιθανές εφαρμογές. Επίσης, η διαδικασία προετοιμασίας των υλικών, αλλά και η διεξαγωγή των μετρήσεων, αποτελούν χρονοβόρες διεργασίες, αποτρέποντας τη διεξαγωγή τους σε τακτικά χρονικά διαστήματα.

Με γνώμονα αυτό και έχοντας υπόψιν την ορθή λειτουργία της διάταξης από προηγούμενη εργαστηριακή ερευνά (Angelopoulos et al.) είναι φανερό πως υπήρχε ανάγκη για βελτίωση της διάταξης με σκοπό την εφαρμογή της σε πραγματικές συνθήκες.

Η διάταξη προσφέρει δυνατότητες:

- Επί τόπου ελέγχου της υγείας των φερρομαγνητικών υλικών στο πεδίο.
- Διεξαγωγής μετρήσεων με υψηλή ταχύτητα και αρίστη ποιότητα.
- Αποφυγής προετοιμασίας των υπό εξέταση υλικών.
- Φορητότητας της συσκευής επιτρέποντας την απευθείας μέτρηση σε πραγματικό χρόνο και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- Ασύρματης μετάδοσης των δεδομένων στον δέκτη ή σε οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth. Έτσι, καθιστά εφικτή την τοποθέτηση της συσκευής σε δυσπρόσιτα σημεία, χωρίς την ανάγκη της ενσύρματης σύνδεσής της.
- Άμεσης λήψης πληροφορίας για την καταπόνηση που κάποιο σημείο έχει δεχθεί, ακόμη και πριν από την τοποθέτηση των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο.

- Ανάπτυξής της με χαμηλό κόστος.
- Ελάχιστης συντήρησης, λόγω έλλειψης κινούμενων μερών στους αισθητήρες.
- Έγκαιρης ενημέρωσης για πιθανή αστοχία ενός συγκεκριμένου υλικού, δίνοντας την άμεση δυνατότητα πραγματοποίησης προληπτικών ενεργειών.

Παρατηρώντας τις μετρήσεις που έγιναν με 4 διαφορετικές δομές αισθητήρων πάνω στην ίδια διάταξη, το πρώτο που γίνεται κατανοητό είναι η ορθή λειτουργία των 3 δομών. Αναλύοντας τα διαγράμματα του πορηγούμενου κεφαλαίου είναι φανερό ότι για το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε, η πιο αξιόπιστη δομή είναι αυτή των αισθητήρων Bottom Right Left, η οποία φέρει δυο αισθητήρες Hall στις άκρες των δύο ράβδων μαλακού σιδήρου. Αφού η είναι η μόνη που αναγνώρισε σε ένα πολύ καλό επίπεδο τιμών την φθορά στον χάλυβα. Επίσης πρέπει να τονισθεί πως και οι δομές Mid και Right αναγνώρισαν το δοκίμιο χάλυβα όταν βρέθηκε εντός της περιοχής μέτρησής τους.

Συμπερασματικά η διάταξη μας δίνει μεγάλη ακρίβεια και χαμηλό κόστος ταυτόχρονα. Με τις παρούσες δομές μπορεί να γίνει κατανοητό πως παρέχουν άμεση εφαρμογή και σε πραγματικές συνθήκες. Με την υπάρχουσα βελτιστοποίηση και με περαιτέρω ανάπτυξή της, είναι δυνατή η μέτρηση υλικών μεγαλύτερου πάχους καθώς και διαφορετικών διατομών αλλά και επιφανειών.

5.2 Προτάσεις για Μελλοντική Μελέτη

Πιθανή μελλοντική μελέτη με τους εν λόγω αισθητήρες είναι η ευρύτερη εφαρμογή τους στη μέτρηση διαφόρων υλικών. Καίριος παράγοντας στις μετρήσεις είναι το βάθος διείσδυσης, που μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να λαμβάνονται δεδομένα από υλικά με διαφορετικό πάχος. Οι αισθητήρες, λόγω της φορητότητάς τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα περιβαλλοντικά πλαίσια και να τοποθετηθούν σε διατάξεις με στόχο την πλήρη ανάλυση φερρομαγνητικών δομών, αξιολογώντας την κατάστασή τους και τις μηχανικές τάσεις που τους επηρεάζουν.

Βιβλιογραφία

- [1] D. O. Forfar, "*James Clark Maxwell: Maker of Waves* "., Victorian Web, 1995.
- [2] Μ. Κ. Παπαϊωάννου, "*Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Αισθητήρα Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα*", ΕΜΠ, 2020.
- [3] A. A. Huurdeman, "*The Worldwide History of Telecommunications*", Wiley, 2003.
- [4] E. M. Purcell, "*Electricity and Magnetism* ", Mc Graw-Hill Inc., 1985.
- [5] S. Tumanski, "*Handbook of magnetic measurements*", CRC Press, 2011
- [6] D. C. Jiles, "*Introduction to magnetism and magnetic materials*", Chapman and Hall, 1991.
- [7]. H. Barkhausen, "*Two phenomena uncovered with the help of the new amplifier*", Z.Phys., 20, pp. 401-403, 1919.
- [8] J. E. L. Bishop, "*Enhanced eddy current loss due to domain displacement*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 49, Issue 3, pp. 241-249, April 1985.
- [9] Δ. Παπασιμπας, "*Έλεγχος ατελειών σε χάλυβα ορθογωνικών διατομών με αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας*", ΕΜΠ, 2023.
- [10] E. Herceg, *Handbook of measurement and control : an authoritative treatise on the theory and application of the LVDT*, Rev. ed. Pennsauken New Jersey: Schaevitz Engineering, 1976.
- [11] Σ. Αγγελόπουλος, "*Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen*", ΕΜΠ, 2014.
- [12] J. Fraden, "*Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*", Springer, 2010.
- [13] S. C. Mukhopadhyay and R. Y.-M. Huang, "*Sensors: Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and Practical Applications*", Springer, 2008.

- [14] M. J. Caruso, "Applications of magnetic sensors for low cost compass systems," in Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000, 2000, pp. 177–184.
- [15] T. Kenny, "Electromagnetism in Sensing", Sensor Technology Handbook, Volume 1, Oxford, 2005, pp. 223-235.
- [16] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/.
- [17] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, "Magnetoresistive sensors," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 19, no. 16, p. 165221, Apr. 2007.
- [18] M. Koschny and M. Lindner, "Magneto-Optical Sensors Accurately Analyze Magnetic Field Distribution of Magnetic Materials," *Advanced Materials & Processes*, vol. 170, no. 2, p. 13, Feb. 2012.
- [19] Α. Κυργιαζόγλου, "Εισαγωγή στους Μη Καταστροφικούς Ελέγχους", Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
- [20] D. Drung, C. Assmann, J. Beyer, A. Kirste, M. Peters, F. Ruede, and T. Schurig, "Highly Sensitive and Easy-to-Use SQUID Sensors", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 699–704, 2007.
- [21] Γ. Λεπίπας, "Αισθητήρας για Παρακολούθηση Εντοπισμένης Υπολειμματικής Τάσης σε Επιφάνειες Χάλυβα με Χρήση της Τεχνικής των Μαγνητοσυστολικών Γραμμών Καθυστέρησης", ΕΜΠ, 2020.
- [22] Σ. Αγγελόπουλος, "Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων και διατάξεων χαρακτηρισμού των, με χρήση μαγνητικών φαινομένων", ΕΜΠ, 2020.
- [23] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. Gulf Professional Publishing, 1998.
- [24] C.-G. Stefanita, "From Bulk to Nano: The Many Sides of Magnetism", Springer Science & Business Media, 2008.
- [25] R. Albanese, G. Rubinacci, T. Takagi, and S. S. Udpa, "Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II)", IOS Press, 1998.
- [26] E. Current "Characterization of Materials and Structures", ASTM International, 1981.

- [27] M.-U. Rahman, *“Optimization of In-line Defect Detection by Eddy Current Technique”* Kassel University press GmbH, 2011
- [28] D. Atherton, D. Jiles, *“Effects of stress on the magnetization of steel”*, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 19, no. 5, pp. 2021–2023, Sep. 1983.
- [29] P. Vourna, E. Hristoforou, A. Ktena, P. Svec, and E. Mangiorou, *“Dependence of Magnetic Permeability on Residual Stresses in Welded Steels,”* *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 4, pp. 1–4, Apr. 2017.
- [30] G. Hinz and H. Voigt, *“Magnetoelastic Sensors,”* *Sensors*, Mar. 2008.
- [31] Δ. Μπότσαρης, *“Συσκευή USB για μέτρηση μαγνητικού πεδίου με αισθητήρα Hall”*, ΑΠΘ, 2013.
- [32] N. Misron, N. W. Shin, S. Shafie, M. H. Marhaban, N. F. Mailah *“A Mobile Ferromagnetic Shape Detection Sensor Using a Hall Sensor Array and Magnetic Imaging”*, *Sensors*, Nov. 2011.
- [33] S. Angelopoulos, D. Misiaris, G. Banis, K. Liang, P. Tsarabaris, A. Ktena, E. Hristoforou *“Steel health monitoring device based on Hall sensors”*, 2020.
- [34] P. Pattakos, S. Angelopoulos, A. Katsoulas, A. Ktena, E. Hristoforou *“Magnetic Harvester for an Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements”*, Dec. 2022.
- [35] F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, *“Basics of Fused Deposition Modelling (FDM),”* *Fused Deposition Modeling*, p. 1, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-48259-6_1.