



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών,
Ηλεκτρονικής και Συστημάτων
Πληροφορικής

Εντοπισμός Ρωγμών Σε Μεταλλικά Δείγματα Με Την Μέθοδο Δοκιμής
Δινορευμάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΥΛΑΚΟΥ-ΜΠΟΚΟΛΑ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Επικοινωνιών,
Ηλεκτρονικής και Συστημάτων
Πληροφορικής

Εντοπισμός Ρωγμών Σε Μεταλλικά Δείγματα Με Την Μέθοδο Δοκιμής
Δινορευμάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΥΛΑΚΟΥ-ΜΠΟΚΟΛΑ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Ιουνίου 2021.

.....
Ε. Χριστοφόρου
Καθηγητής

.....
Π. Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Ι. Γκόνος
Αναπληρωτής
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2021

.....
Μαρία Παρασκευουλάκου-Μπόκολα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρία Παρασκευουλάκου-Μπόκολα, 2021.

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 ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλικά μέρη μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή στον κλάδο της βιομηχανίας και των κατασκευών. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλικά δοκίμια, βασιζόμενη στα δινορεύματα και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση ενός αισθητήρα GMR. Στο πρώτο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζεται η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού και των δινορευμάτων, καθώς και των μεθόδων ανίχνευσης ρωγμών σε μεταλλικές επιφάνειες με μη καταστροφικές μεθόδους δοκιμής δινορευμάτων.

Στην προσομοίωση εξετάστηκε η ανίχνευση ρωγμών στη μεταλλική πλάκα, καθώς και η σχέση της συχνότητας του μαγνητικού πεδίου. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια, στα οποία η ρωγμή βρισκόταν σε διαφορετικά βάθη, καθώς και το σενάριο που δεν υπάρχει ρωγμή στην μεταλλική πλάκα, ώστε να γίνει σύγκριση με τα δύο διαφορετικά σενάρια.

Λέξεις κλειδιά

Αισθητήρας, GMR, Eddy-Current Effect, Εντοπισμός Ρωγμών

Abstract

Detection of cracks in metal parts can be widely used in industry and construction. The present thesis focused on the detection of cracks in metal parts, based on eddy currents and a GMR sensor simulation was conducted. In the first part of the thesis the theory of electromagnetism and eddy currents is presented, as well as methods for detecting cracks in metal surfaces with non-destructive eddy current testing methods.

In the simulation the detection of cracks on the surface of the metal plate was examined, as well as the relationship between the frequency of the magnetic field. Two different scenarios were examined, in which the crack was at different depths, as well as the scenario where there is no crack in the metal surface, in order the two different scenarios to be compared.

Key-words

Sensor, GMR, Eddy-Current Effect, Crack Detection

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Χριστοφόρου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γ. Μπανή για την άψογη συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθεια του σε όλα τα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με συντρόφευσαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	8
Πρόλογος.....	10
Εισαγωγή.....	11
Θεωρητικό Μέρος	12
1.1 Μαγνητισμός.....	12
1.2 Μαγνητικά Κυκλώματα	17
1.3 Νόμοι του Maxwell	19
1.4 Μαγνητισμός Υλικών	21
1.5 Μέθοδος δινορευμάτων.....	30
1.6 Ανάλυση μεθόδου δινορευμάτων	33
1.7 Επιδερμικό φαινόμενο - τυπικό βάθος διείσδυσης.....	36
1.8 Μαγνητοανθεκτικοί Αισθητήρες.....	40
Πειραματικό μέρος.....	43
2.1 Περιγραφή διάταξης – Κατασκευή Προσομοίωσης.....	43
2.2 Σενάριο 0	49
2.3 Σενάριο προσομοίωσης ρωγμής σε βάθος 3mm.....	52
2.4 Σενάριο προσομοίωσης ρωγμής σε βάθος 5mm.....	63
2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης - Συμπεράσματα	74
Βιβλιογραφία – Bibliography	77

Πρόλογος

Τα ελαττώματα είναι πολύ συνήθη στα υλικά και μπορεί να υπάρχουν στην πρώτη ύλη ή μπορεί να εισαχθούν εξαιτίας των σταδίων επεξεργασίας και κατασκευής που περνά το υλικό μέχρι το τελικό προϊόν. Αυτά τα ελαττώματα μπορεί να είναι αποδεκτά ή όχι, αλλά και στις δύο περιπτώσεις, είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστή η ύπαρξή τους και τα φυσικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά τους. Η παρουσία και διάδοση μη αποδεκτών ελαττωμάτων μπορεί να είναι καταστροφική.

Για να περιοριστεί αυτό το πρόβλημα, είναι σημαντικό να παρακολουθείται η ποιότητα του προϊόντος πριν και κατά τη χρήση του. Η μη καταστροφική δοκιμή αναφέρεται στην εξέταση ενός εξαρτήματος χωρίς να επηρεάζει την αξία ή τις λειτουργικές του ιδιότητες και επικυρώνει την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την ποιότητα ενός εξαρτήματος.

Ο όρος Μη Καταστροφική Αξιολόγηση αναφέρεται σε ποσοτική μη καταστροφική δοκιμή, στην οποία το ελάττωμα χαρακτηρίζεται σε σχέση με το μέγεθος, το σχήμα και τη θέση του. Σήμερα, στη βιομηχανία υπάρχουν αρκετές καθιερωμένες τέτοιες μέθοδοι, μερικές από τις πιο σημαντικές είναι οι ακτίνες Χ, οι δοκιμές με υπερήχους και οι δοκιμές δινορευμάτων.

Πιο παλιά, ο εντοπισμός ατελειών σε ένα προϊόν είχε σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση του από την αγορά, οπότε και οι μη καταστροφικές δοκιμές εξυπηρετούσαν αυτόν τον στόχο. Μετά όμως από την δεκαετία του 1970 εισάχθηκε μια διαφορετική φιλοσοφία στην παραγωγή, η οποία όριζε τον καθορισμό των αποδεκτών ελαττωμάτων, έχοντας κάποιες συγκεκριμένες ανοχές. Με βάση αυτήν την φιλοσοφία, άλλαξε και ο στόχος των δοκιμών, οι οποίες πλέον αποσκοπούν σε ποσοτικές πληροφορίες, σχετικά με το μέγεθος, το σχήμα, τη θέση κτλ. των ελαττωμάτων. Επίσης είναι πολύ μεγάλης σημασίας, ειδικά σε κάποιους συγκεκριμένους κλάδους, να μπορούν να αποφανθούν για το αν ένα ελάττωμα θα μεγαλώσει και θα οδηγήσει σε αποτυχία.

Μία από τις μη καταστροφικές μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ατελειών και θα αναλυθεί στη συνέχεια, θεωρητικά και με χρήση προσομοίωσης, είναι η μέθοδος των δινορευμάτων.

Εισαγωγή

Από τις μη καταστροφικές μεθόδους εντοπισμού ατελειών σε αγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα, ξεχωρίζει η μέθοδος των δινορευμάτων λόγω της υψηλής ευαισθησίας, του χαμηλού κόστους και της δυνατότητας να αυτοματοποιηθεί.

Η μέθοδος των δινορευμάτων είναι μια γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδος για τον εντοπισμό ελαττωμάτων όπως ρωγμές κόπωσης, εγκλείσματα, κενά και διάβρωση που εμφανίζονται σε αγώγιμα υλικά. Ωστόσο, ο κύριος περιορισμός είναι η χαμηλή διείσδυση σε εξεταζόμενα μέρη, περιορίζεται σε λεπτά τοιχώματα ή / και ελαττώματα κοντά στην επιφάνεια. Επιπλέον, η συγκεκριμένη τεχνική είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε σιδηρομαγνητικά υλικά.

Αυτή η μελέτη αναφέρεται στη δοκιμή δινορευμάτων με βάση την επαγωγή ρευμάτων στο ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό που ελέγχεται - αλουμίνιο σε αυτήν την περίπτωση. Η μέθοδος βασίζεται στη δευτερογενή πυκνότητα μαγνητικής ροής που διαδίδεται από το μέταλλο που δοκιμάζεται λόγω των επαγόμενων ρευμάτων από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που διαδίδεται από τα πηνία.

Τα πιο κρίσιμα ελαττώματα που σχετίζονται με την κόπωση του υλικού και τη διάβρωση του είναι ελαττώματα τύπου ρωγμών. Για αυτά τα ελαττώματα, το μήκος και το βάθος είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος τους. Επομένως, για να χαρακτηριστούν τα ελαττώματα, οι κύριες παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι το μήκος και το προφίλ βάρους.

Η μη καταστροφική δοκιμή με την μέθοδο των δινορευμάτων είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για ανίχνευση ρωγμών. Η τεχνολογική πρόοδος των μαγνητικών αισθητήρων συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των μετρήσεων. Οι τεχνικές των μεθόδων που βασίζονται στα δινορεύματα μπορούν να αξιοποιηθούν χάρη στην πρόοδο των μαγνητικών αισθητήρων για τον εντοπισμό μικρότερων από ποτέ ελαττωμάτων και τον γεωμετρικό χαρακτηρισμό αυτών των ελαττωμάτων.

Θεωρητικό Μέρος

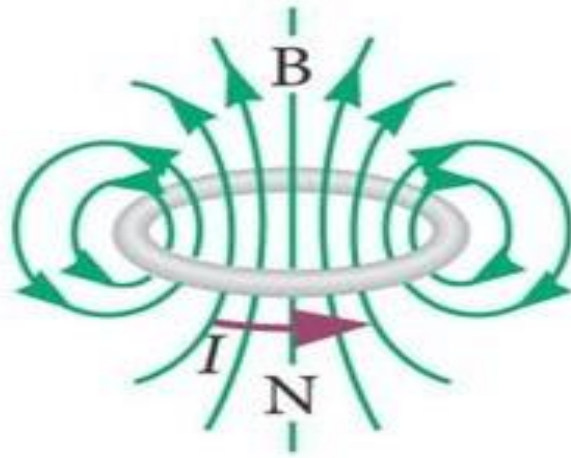
1.1 Μαγνητισμός

Μαγνήτης είναι οποιοδήποτε τμήμα υλικού ή σώμα το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο. Στην πράξη, το μαγνητικό πεδίο εντοπίζεται από την αλληλεπίδραση του μαγνήτη με άλλα σώματα, από την δυνατότητα του να έλκει ή να απωθεί άλλους μαγνήτες ή συγκεκριμένα μέταλλα. Ο μαγνήτης αποτελείται από δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο, μεταξύ των οποίων δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο. Η ροπή σε μια βελόνα πυξίδας, η οποία είναι ένα παράδειγμα μαγνητικού διπόλου, είναι ίσως η πιο γνωστή ιδιότητα ενός μαγνητικού πεδίου.

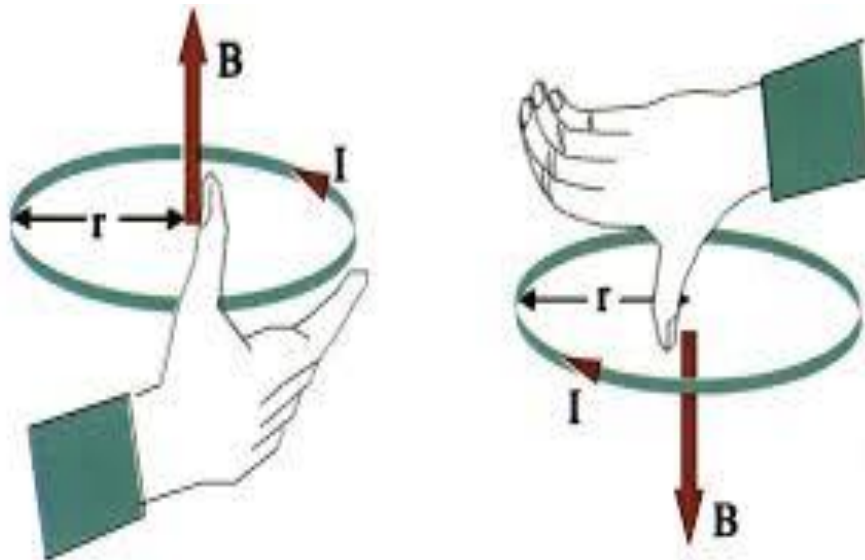
Σε πρώτο στάδιο διακρίνονται σε φυσικούς ή τεχνητούς. Οι φυσικοί μαγνήτες προέρχονται από το ορυκτό μαγνητίτη, το οποίο διαθέτει μαγνητικές ιδιότητες. Οι τεχνητοί μαγνήτες αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες από εξωτερική επίδραση και χωρίζονται με τη σειρά τους σε μόνιμους ή παροδικούς.

Για να προσδιοριστεί το μαγνητικό πεδίο προσδιορίζονται η ένταση, η κατεύθυνση του και απεικονίζεται στο χώρο μέσω των μαγνητικών δυναμικών γραμμών. Ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται όποτε υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο σε κίνηση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο διαρρέει έναν αγωγό. Ένας απλός ηλεκτρομαγνήτης είναι ένα πηνίο αποτελούμενο από N σπείρες, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Μαγνητικό πεδίο παράγεται και από έναν μόνιμο μαγνήτη. Σε αυτήν την περίπτωση δεν έχουμε συμβατικό ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά οι τροχιακές κινήσεις και οι περιστροφές των ηλεκτρονίων μέσα στον μόνιμο μαγνήτη, οδηγούν στην εσωτερική του μαγνήτιση και στην δημιουργία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να προσδιοριστεί σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα εφαπτόμενη στις μαγνητικές γραμμές, οι οποίες κατευθύνονται από τον βόρειο πόλο στον νότιο πόλο, απεικονίζοντας τη φορά της Έντασης του πεδίου. Η απεικόνιση των δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από τη διέλευση ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 1.1.1. και ο κανόνας του δεξιού χεριού στο σχήμα 1.1.2.



Σχήμα 1.1.1. Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από τη διέλευση ρεύματος μέσα από κυκλικό βρόχο [1]



Σχήμα 1.1.2. Κανόνας του δεξιού χεριού [1]

Για τον υπολογισμό της έντασης του μαγνητικού πεδίου \vec{H} (Amps /metres), το οποίο παράγεται από ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιείται ο νόμος Bio-Savart. Ο νόμος του Bio-Savart αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού. Είναι μια δήλωση πειραματικής παρατήρησης και όχι θεωρητικής πρόβλεψης. Στη συνήθη μορφή του ο νόμος δίνει τη

συνεισφορά στο πεδίο, η οποία παράγεται από το ρεύμα που διαρρέει ένα στοιχειώδες μήκος του αγωγού.

$$\delta \vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} i d\vec{l} \times \vec{u} \quad (1.1)$$

όπου i είναι το ρεύμα που διαρρέει ένα στοιχειώδες μήκος $d\vec{l}$ ενός αγωγού, r είναι η ακτινική απόσταση, \vec{u} είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος της ακτινικής κατεύθυνσης και δH είναι η συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίο σε απόσταση r εξαιτίας του διερχόμενου ρεύματος.

Η μαγνητική επαγωγή (ή πυκνότητα μαγνητική ροής) του μαγνητικού πεδίου έχει μονάδα μέτρησης το T (Tesla), $1T=1Wb/m^2$.

Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού στο οποίο εγκαθίσταται το μαγνητικό πεδίο, η οποία συμβολίζεται με μ .

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.2)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα υπολογίζεται σε σχέση με τη μαγνητική διαπερατότητα στο κενό, οπότε ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.3)$$

Όπου μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα, η οποία καθορίζει πόσο εύκολα μαγνητίζεται ένα υλικό και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό, η οποία παίρνει την τιμή:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (1.4)$$

Από τις εξισώσεις 1.1, 1.2, 1.3 ο νόμος Bio-Savart παίρνει τη εξής μορφή:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (1.5)$$

Όπου:

$d\vec{l}$: αγωγός απειροστού μήκους

\hat{r} : το διάνυσμα ενός στοιχείου του αγωγού σε κάποιο σημείο

μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα στο κενό,

Αν ληφθούν απειροστά μήκη αγωγού τότε:

Σε αγωγό γνωστού σχήματος αριθμητικά υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο παίρνοντας απειροστά μήκη αγωγού, υπολογίζοντας το άθροισμα των συνεισφορών τους. Με βάση αυτό, το ολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση για όλα τα στοιχειώδη $d\vec{l}$.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (1.6)$$

Για κυλινδρικό πηνίο, το οποίο αποτελείται από N συνεκτικές σπείρες, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του βρόχου του πηνίου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$B_x = \frac{\mu_0 NI}{2a}, \quad (1.7)$$

όπου a , η ακτίνα του πηνίου.

Οι δυναμικές γραμμές στο κέντρο του Σωληνοειδούς είναι παράλληλες μεταξύ τους και το πεδίο είναι ομοιογενές. Ενώ προς τα έξω η πυκνότητα των γραμμών είναι πιο αραιή και εξασθενεί το πεδίο.

Η χρήση ενός μαγνητικού πυρήνα (αντί για τον αέρα) μπορεί να αυξήσει τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου σε ένα πηνίο κατά αρκετές εκατοντάδες φορές.

Ο μαγνητικός πυρήνας είναι ένα κομμάτι μαγνητικού υλικού με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό και την καθοδήγηση μαγνητικών πεδίων σε ηλεκτρικές, ηλεκτρομηχανικές και μαγνητικές συσκευές, όπως ηλεκτρομαγνήτες, μετασχηματιστές, ηλεκτρικοί κινητήρες, γεννήτριες, επαγωγείς και μαγνητικές κεφαλές εγγραφής. Είναι κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό μέταλλο όπως σίδηρο ή φερριμαγνητικές ενώσεις όπως οι φερρίτες. Η υψηλή διαπερατότητα, σε σχέση με τον περιβάλλοντα αέρα, προκαλεί τη συγκέντρωση των γραμμών μαγνητικού πεδίου στο υλικό του πυρήνα. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται συχνά από ένα πηνίο μεταφοράς ρεύματος γύρω από τον πυρήνα.

Συνεχίζοντας, για δεδομένες διαστάσεις πηνίου, υπολογίζεται η ωμική αντίσταση του πηνίου από την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{4Dl\ell\omega}{d^3} \quad (1.8)$$

Όπου:

R : αντίσταση (Ohm)

D : διάμετρος πηνίου (cm)

L : μήκος πηνίου (cm)

l : αριθμός στρώσεων

ω : κυκλική συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος (Hz)

d : διάμετρος σύρματος (cm)

1.2 Μαγνητικά Κυκλώματα

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσα σε δακτύλιο από σιδηρομαγνητικό υλικό, με σταθερή μαγνητική διαπερατότητα, γύρω από το οποίο έχει τυλιχθεί ομοιόμορφα σπείρωμα N ελιγμάτων, το οποίο διαπερνάται συνεχώς από ρεύμα έντασης I , δίνεται από τη σχέση:

$$2\pi rH = NI \quad (1.9)$$

Το μέγεθος NI ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη F (ΜΕΔ). Η ΜΕΔ έχει διάσταση ρεύματος, αλλά για να διακρίνεται η φυσική της σημασία συνήθως μετριέται σε *Αμπεριλίγματα*.

Η μαγνητική ροή υπολογίζεται προσεγγιστικά συναρτήσει της μέσης μαγνητικής επαγωγής:

$$\varphi \cong F \frac{\mu A}{l_\mu} \quad (1.10)$$

και μετριέται σε Weber.

Όπου A η διατομή του δακτυλίου και l_μ το μέσο μήκος του μαγνητικού κυκλώματος.

Συμπερασματικά η μαγνητική ροή για σταθερή μαγνητική διαπερατότητα είναι ανάλογη της μαγνητεγερτικής δύναμης το οποίο είναι αντίστοιχο με το νόμο του Ohm για τα ηλεκτρικά κυκλώματα, όπου η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογη με την εξασκούμενη τάση.

Σε αυτήν τη λογική ορίζεται η μαγνητική αντίσταση ενός μαγνητικού κυκλώματος:

$$R = \frac{F}{\varphi} = \frac{l_\mu}{\mu A} \quad (1.11)$$

η οποία μετριέται σε *Αμπεριλίγματα ανά Weber*.

Η αναλογία αυτή μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων παρουσιάζεται συνοπτικά μέσα από τον πίνακα 1.2.1:

Πίνακας 1.2.1. Αντιστοιχία Μαγνητικών-Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

Μαγνητικό μέγεθος	Ηλεκτρικό μέγεθος
Μαγνητική ροή Φ (Wb)	Ένταση Ρεύματος I (A)
ΜΕΔ F (Αμπεριλίγματα)	Τάση V (Volt)
Μαγνητική Αντίσταση R (At/Wb)	Αντίσταση R (Ohm)
Μαγνητική διαπερατότητα μ (Wb/At)	Συντελεστής Αγωγιμότητας
Μαγνητική Επαγωγή B (T)	Πυκνότητα ρεύματος
Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H (At/m)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Στα πλαίσια αυτής της αναλογίας οι νόμοι του Kirchhoff ισχύουν και στα μαγνητικά κυκλώματα.

Δηλαδή:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \text{ (αφού } \nabla B = 0) \quad (1.12)$$

&

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i * R_m = F_m \text{ (νόμος διαρρεύματος)} \quad (1.13)$$

που αντιστοιχούν σε:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \text{ (νόμος ρευμάτων)} \quad (1.14)$$

&

$$\sum_{i=1}^n I_i * R_i = E \text{ (νόμος τάσεων)} \quad (1.15)$$

Όμως σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική αντίσταση δεν είναι σταθερή, διότι μεταβάλλεται η μαγνητική διαπερατότητα η οποία είναι εξαρτώμενη της έντασης του πεδίου (μη γραμμικά κυκλώματα).

1.3 Νόμοι του Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell αποτελούν μία πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων και ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα στην ιστορία της επιστήμης.

1.3.1 Νόμος Faraday

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτού του πεδίου κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής ισούται με τον αρνητικό ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από μια επιφάνεια που ορίζει αυτή η διαδρομή. Η ολοκληρωτική μορφή του νόμου επαγωγής είναι:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.16)$$

Η διαφορική μορφή του νόμου δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.17)$$

Η φυσική ερμηνεία του νόμου επαγωγής είναι ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Επίσης σύμφωνα με το νόμο του Lenz η φορά του επαγόμενου ρεύματος είναι τέτοια, ώστε το μαγνητικό πεδίο που παράγει να τείνει να εξουδετερώσει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής που δημιούργησε την ΗΕΔ.

1.3.2 Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο

Σύμφωνα με το νόμο αυτό η ροή μέσα από οποιαδήποτε επιφάνεια που περιβάλλει όλα τα φορτία είναι ανάλογη του συνολικού έγκλειστου σ' αυτή την επιφάνεια φορτίου $Q_{εγκ}$, δηλαδή ισχύει:

$$\Phi = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q_{εγκ}}{\epsilon_0} \quad (1.18)$$

Η εξίσωση (1.18) συνιστά την ολοκληρωτική μορφή του νόμου Gauss. Η διαφορική μορφή αυτού του νόμου είναι η εξής:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.19)$$

1.3.3 Νόμος Gauss για το μαγνητικό πεδίο

Σύμφωνα με το νόμο αυτό η μαγνητική ροή που περνά μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι πάντα μηδέν. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα στη φύση, δηλαδή οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές. Η ολοκληρωτική μορφή του νόμου αυτού είναι:

$$\Phi = \oiint \vec{B} \cdot \vec{da} = 0 \quad (1.20)$$

Η διαφορική μορφή του νόμου δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.21)$$

1.3.4 Νόμος Ampere-Maxwell

Ο νόμος αυτός δείχνει ότι το ρεύμα αγωγιμότητας i_c μαζί με το ρεύμα μετατόπισης, που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής ροής, δρουν ως πηγές του μαγνητικού πεδίου:

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (1.22)$$

Η διαφορική μορφή του νόμου δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (1.23)$$

Ο νόμος Ampere-Maxwell συνδέει το μαγνητικό πεδίο με το ηλεκτρικό πεδίο και την πυκνότητα ρεύματος. Ο δεύτερος όρος στις εξισώσεις είναι η συνεισφορά του Maxwell και αντιπροσωπεύει το ρεύμα μετατόπισης, το οποίο εξηγεί γιατί το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο [2-4].

1.4 Μαγνητισμός Υλικών

Οι μαγνητικές ιδιότητες στα υλικά προέρχονται σχεδόν αποκλειστικά από την κίνηση των ηλεκτρονίων. Αυτή η κίνηση συναντάται με τη μορφή της περιστροφής του ηλεκτρονίου γύρω από τον άξονά του, που είναι το spin και με τη μορφή της τροχιακής περιστροφής γύρω από τον πυρήνα. Και στις δύο περιπτώσεις δημιουργείται μια μαγνητική ροπή που σχετίζεται με την κίνηση του ηλεκτρονίου. Επίσης, ο πυρήνας του ατόμου δημιουργεί μαγνητικές ροπές, οι οποίες είναι 3 τάξεις μεγέθους πιο μικρές από τη ροπή του κάθε ηλεκτρονίου.

Η συνισταμένη μαγνητική ροπή μπορεί να είναι μηδέν ή διάφορη του μηδενός. Από την ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα στο τροχιακό κάθε ενεργειακού επιπέδου υπάρχουν μέχρι 2 ηλεκτρόνια που περιστρέφονται με αντίθετη φορά γύρω από τον άξονά τους. Έχουν, δηλαδή, αντίθετους κβαντικούς αριθμούς spin και αντίθετη μαγνητική ροπή. Άρα, όταν τα τροχιακά είναι πλήρη, η συνολική μαγνητική ροπή του ατόμου είναι μηδέν. Όταν ένα άτομο διαθέτει περιττό αριθμό ηλεκτρονίων τότε και πάλι η συνολική μαγνητική ροπή του ατόμου είναι μηδέν. Στα στοιχεία μετάπτωσης του περιοδικού πίνακα, τα οποία έχουν μερικώς συμπληρωμένα τα τροχιακά 3d και παράλληλα διαθέτουν ηλεκτρόνια στην 4^η στοιβάδα, η συνολική μαγνητική ροπή δεν είναι μηδέν [5].

Η μαγνητική επαγωγή που ορίζεται σαν \vec{B} , είναι η απόκριση ενός υλικού στην παρουσία μαγνητικού πεδίου. Έτσι, για μια ένταση μαγνητικού πεδίου \vec{H} , η μαγνητική επαγωγή μπορεί να είναι διαφορετική για διαφορετικά υλικά.

Ορίζεται το πεδίο ενός υλικού παρουσία εξωτερικού πεδίου, το οποίο ισούται με τη μαγνητική ροπή \vec{m} ανά μονάδα όγκου V , ως μαγνήτιση (\vec{M}).

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (1.24)$$

Η μαγνήτιση αυξάνει συναρτήσει του αριθμού των παραλληλιζόμενων ηλεκτρονικών μαγνητικών ροπών σε μια κατεύθυνση. Όταν οι μαγνητικές ροπές σε ένα στερεό παραλληλιζονται σε μια διεύθυνση, η μαγνήτιση δεν μπορεί να μεγαλώσει περισσότερο και ονομάζεται μαγνήτιση κόρου.

Η μαγνήτιση \vec{M} συνεισφέρει μαζί με το μαγνητικό πεδίο \vec{H} , στη μαγνητική επαγωγή \vec{B} . Η σχέση μεταξύ \vec{M} , έντασης μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται (\vec{H}) και μαγνητικής επαγωγής (\vec{B}) έχει ως εξής:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.25)$$

Η μαγνήτιση αποτελεί ιδιότητα του υλικού, καθώς είναι η πυκνότητα των προσανατολισμένων μαγνητικών διπολικών ροπών στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και προκύπτει από την ηλεκτρονική δομή του στερεού. Εξαρτάται από τις επιμέρους μαγνητικές ροπές των ιόντων, ατόμων ή μορίων και από τον τρόπο που αυτές αλληλοεπιδρούν.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ προκύπτει από την σχέση:

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (1.26)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ορίζεται σύμφωνα με το νόμο Curie-Weiss και σε ένα παραμαγνητικό υλικό είναι ανάλογη του αντίστροφου της θερμοκρασίας σε βαθμούς Kelvin.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ενός υλικού μπορεί να είναι θετική ή αρνητική (αντίθετα με τις ηλεκτρικά ανάλογες επιδεκτικότητες).

Οι μεγαλύτερες κατηγορίες μαγνητικών υλικών ταξινομούνται σε διαμαγνητικά υλικά, παραμαγνητικά υλικά και σιδηρομαγνητικά υλικά σύμφωνα με τη μαγνητική επιδεκτικότητα κάθε υλικού όπως φαίνεται παρακάτω:

- Διαμαγνητικά υλικά: έχουν μικρές και αρνητικές τιμές επιδεκτικότητας λόγω της αντίθετης φύσης της μαγνήτισης, \vec{M} , ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο, \vec{H} και μαγνητίζονται μόνο κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.
- Παραμαγνητικά υλικά: έχουν μικρές και θετικές τιμές επιδεκτικότητας λόγω της ασθενούς μαγνήτισης, \vec{M} , που παρουσιάζουν εντός του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, \vec{H} , οι οποίες βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση και επίσης μαγνητίζονται μόνο κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

- Σιδηρομαγνητικά υλικά: οι μαγνητικές τους επιδεκτικότητες είναι θετικές και υψηλές λόγω της ισχυρής του μαγνήτισης, \vec{M} και διατηρούν τη μαγνητική τους κατάσταση ακόμα και κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

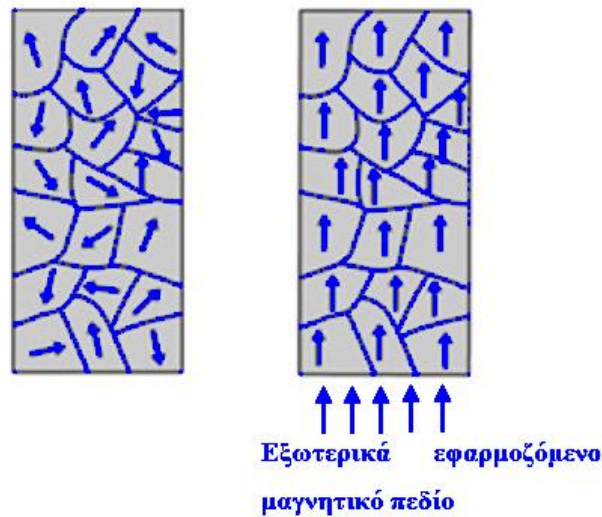
Ακολουθεί η ανάλυση των παραπάνω κατηγοριών μαγνητισμού:

Διαμαγνητισμός: Ο διαμαγνητισμός διατηρείται όσο εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο και αποτελεί ασθενή μορφή μαγνητισμού. Τα ηλεκτρονιακά spin και η τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων προκαλούν τις μαγνητικές ροπές, οι οποίες είναι μηδέν όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο. Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο τα τροχιακά των ηλεκτρονίων των ατόμων, σύμφωνα με το νόμο του Laplace μεταβάλλονται. Η μεταβολή αυτή συντελεί στη δημιουργία μαγνητικών δίπολων τα οποία αντιτίθεται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οπότε τα διαμαγνητικά υλικά απωθούνται από μόνιμους μαγνήτες. Η μαγνητική διαπερατότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι θετική και λίγο μικρότερη της μονάδας, ενώ η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή.

Παραμαγνητισμός: Όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, στα παραμαγνητικά υλικά οι μαγνητικές ροπές που προκύπτουν από τα ηλεκτρονιακά spin δεν αλληλοαναιρούνται με αποτέλεσμα κάθε άτομο να διαθέτει μαγνητική ροπή τυχαίας κατεύθυνσης. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, σε στατιστικά μεγαλύτερη περιοχή, εμφανίζεται μηδενική μαγνήτιση και μαγνητική ροπή στο υλικό. Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές των ηλεκτρονίων των ατόμων προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του πεδίου συμβάλλοντας στην ένταση του. Τα παραμαγνητικά υλικά διαθέτουν μαγνητική διαπερατότητα μεγαλύτερη της μονάδας και μαγνητική επιδεκτικότητα θετική με πολύ μικρή τιμή. Τα παραμαγνητικά υλικά έλκονται σε μικρό επίπεδο από μόνιμους μαγνήτες.

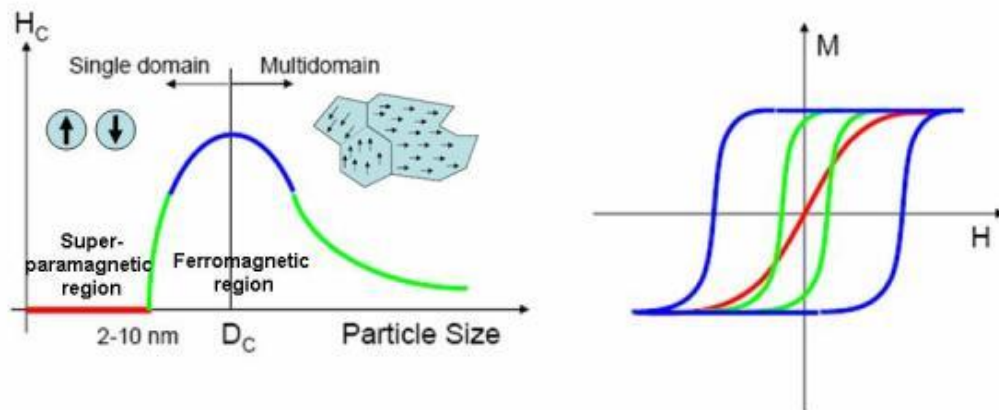
Σιδηρομαγνητισμός: Υπό κανονικές συνθήκες τα άτομα των σιδηρομαγνητικών υλικών αναπτύσσουν ισχυρές μαγνητικές ροπές εξαιτίας των ασύζευκτων ηλεκτρονιακών spin στα 3d τροχιακά τους. Στο υλικό δημιουργούνται μαγνητικές περιοχές με ομοιόμορφα spin, λόγω των ροπών που συνδυάζονται, οι οποίες ονομάζονται Weiss. Ως τοιχώματα Bloch ορίζονται τα όρια των περιοχών Weiss, στα οποία πραγματοποιείται σταδιακή μεταβολή στην κατεύθυνση των μαγνητικών ροπών. Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, η συνολική μαγνήτιση στο υλικό

είναι μηδέν. Αυτό οφείλεται στο ότι ο προσανατολισμός των περιοχών Weiss σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι τυχαίος. Υπό την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ο προσανατολισμός των περιοχών Weiss ακολουθεί την κατεύθυνση του πεδίου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το υλικό να εμφανίζει υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα. Με την παύση της εφαρμογής μαγνητικού πεδίου ο προσανατολισμός των περιοχών Weiss δεν μεταβάλλεται, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το υλικό να συνεχίζει να παρουσιάζει μαγνήτιση εν αντιθέσει με τα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά.



Σχήμα 1.4.1. Προσανατολισμός περιοχών Weiss απουσία (αριστερά) και παρουσία μαγνητικού πεδίου (δεξιά)

Υπερπαραμαγνητισμός: Ως τομέας ενός υλικού ορίζεται ένα σύνολο ιδιοπεριστροφών, οι οποίες διαθέτουν ίδιας κατεύθυνσης μαγνητικές ροπές και οι οποίες αντιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε μαγνήτιση. Σε κάθε υλικό οι τομείς χωρίζονται μεταξύ τους με τοιχώματα συγκεκριμένου πάχους και ενέργειας, τα οποία αποτελούν ιδιότητα του υλικού και εμπόδιο στη μαγνήτιση. Ο αριθμός των τομέων και των τοιχωμάτων αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος του σωματιδίου. Όσο μειώνεται το μέγεθος του σωματιδίου και τείνει προς μία κρίσιμη τιμή διαμέτρου D_c τα τοιχώματα καθίστανται δυσμενή από ενεργειακή άποψη ως προς την ύπαρξή τους. Μονού τομέα ορίζονται οι δομές οι οποίες αποτελούνται από έναν μόνο τομέα.



Σχήμα 1.4.2. Συνεκτικό πεδίο συναρτήσει μεγέθους των σωματιδίων (αριστερά) και μαγνήτιση για διάφορα μεγέθη συναρτήσει του εφαρμοζόμενου πεδίου (δεξιά) [6]

Όταν η διάμετρος είναι μικρότερη της διαμέτρου D_c , τα spin επηρεάζονται από τις θερμικές διακυμάνσεις και τα σωματίδια εμφανίζουν υπερμαγνητισμό. Υπό αυτές τις συνθήκες η μαγνήτιση δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί εξαιτίας των θερμικών διακυμάνσεων και το \vec{H}_c τείνει να μηδενιστεί.

Από πειραματική προσέγγιση έχει αποδειχθεί ότι οι καμπύλες μαγνήτισης δεν εμφανίζουν καμπύλη υστέρησης και ότι σε διάφορες θερμοκρασίες οι καμπύλες μαγνήτισης υπερκαλύπτονται σε γραφήματα \vec{M} συναρτήσει του \vec{H} .

Ο χρόνος ηρεμίας της μαγνήτισης ενός μαγνητικού σωματιδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (1.27)$$

Όπου:

ΔE : ο ενεργειακός φραγμός στη μεταβολή της μαγνητικής ροπής

$k_B T$: η θερμική ενέργεια

τ_0 : 10^{-12} - 10^{-10} s

Για τον ενεργειακό φραγμό συνήθως ισχύει:

$$\Delta E = KV \quad (1.28)$$

Όπου:

K : πυκνότητα ενέργειας της ανισοτροπίας του σχήματος

V : ο όγκος του σωματιδίου

Για σωματίδια μικρού μεγέθους το ΔE είναι παραπλήσιο του $K_B T$. Ο χρόνος κατά τον οποίο το σωματίδιο παραμένει υπερπαραμαγνητικό μεταβάλλεται συναρτήσει της μαγνήτισης [6]

Μαγνητική υστέρηση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν την ιδιότητα όταν μαγνητίζονται να διατηρούν τη μαγνήτισή τους. Συνεπώς, η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού δεν είναι μοναδική αλλά εξαρτάται από το αν αυτό έχει μαγνητιστεί στο παρελθόν. Η ιδιότητα αυτή προκαλεί το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης.

Υπό την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου \vec{H} σε σιδηρομαγνητικό υλικό που μαγνητίζεται για πρώτη φορά, αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή \vec{B} προς την κατεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται η ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, τα σύνορα των περιοχών Weiss μετατοπίζονται και η μαγνήτιση αυξάνεται.

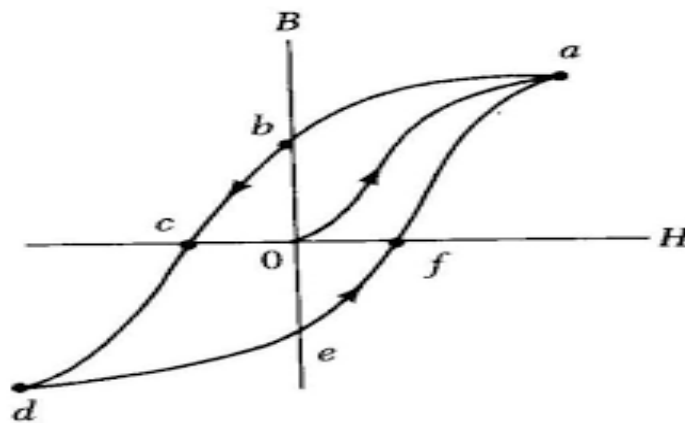
Από το σημείο a (σχήμα 1.4.3.) και έπειτα, περαιτέρω αύξηση του πεδίου \vec{H} επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή \vec{B} και τη μαγνήτιση \vec{M} του υλικού. Αυτό οφείλεται στην πλήρη ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Σ' αυτό το σημείο η μαγνητική επαγωγή είναι B_s (επαγωγή κόρου) και η μαγνήτιση M_s (μαγνήτιση κόρου), η οποία εξαρτάται από τη μαγνητική διπολική ροπή των ατόμων του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου.

Στην συνέχεια, καθώς μειώνεται το \vec{H} , η καμπύλη μετατοπίζεται προς το σημείο b όπου το εξωτερικό πεδίο είναι πλέον μηδενικό, αλλά η μαγνητική επαγωγή έχει μη μηδενική

παραμένουσα τιμή B_r . Σε αυτή τη φάση το υλικό λειτουργεί σαν μόνιμος μαγνήτης χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου, εξαιτίας την παραμένουσας μαγνήτισης M_r .

Αν εφαρμοστεί πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης, η μαγνητική επαγωγή μειώνεται και η καμπύλη μετατοπίζεται προς το σημείο c όπου η επαγωγή έχει μηδενιστεί ($B=0$) και το υλικό έχει απομαγνητιστεί. Αυτή τη στιγμή το εξωτερικό πεδίο έχει τιμή $-H_c$ και ονομάζεται συνεκτικό πεδίο. Περαιτέρω αύξηση του πεδίου σ' αυτή την κατεύθυνση μετατοπίζει την καμπύλη προς το σημείο d στο οποίο το υλικό φτάνει σε μαγνήτιση κόρου. Εάν μειωθεί το εξωτερικό πεδίο, η καμπύλη φτάνει στο σημείο e , όπου η ένταση του πεδίου είναι μηδέν και η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή είναι $-B_r$.

Τέλος, με εφαρμογή πεδίου στην αρχική κατεύθυνση η καμπύλη διέρχεται από το σημείο f στο οποίο η μαγνητική επαγωγή είναι μηδέν, ενώ το πεδίο είναι συνεκτικό με τιμή H_c . Η καμπύλη του βρόχου υστέρησης σχηματίζει επιφάνεια της οποίας το εμβαδόν ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό ανά μονάδα όγκου.



Σχήμα 1.4.3. Βρόχος υστέρησης φερρομαγνητικού υλικού [6]

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε σκληρά και μαλακά ανάλογα με την τιμή του συνεκτικού πεδίου. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά διαθέτουν ευρύ βρόχο υστέρησης και μεγάλο συνεκτικό πεδίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτούνται ισχυρά πεδία για να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν και χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες. Τα μαλακά μαγνητικά

υλικά διαθέτουν στενό βρόχο υστέρησης και μικρό συνεκτικό πεδίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται εύκολα, εφαρμόζοντας μικρό πεδίο.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο οι μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται αντιπαράλληλα μεταξύ τους, αλλά η συνισταμένη μαγνητική ροπή είναι μη μηδενική, καθώς τα μεγέθη των ιόντων διαφέρουν. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι οι φερρίτες (οξειδία του σιδήρου με άλλα μέταλλα). Αυτά ισχύουν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες μιας κρίσιμης τιμής, της θερμοκρασίας Curie. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.

Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά οι ατομικές μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται αντιπαράλληλα κι έτσι η συνολική μαγνητική ροπή τείνει στο μηδέν. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα γειτονικά άτομα αντιτίθενται αντί να ενισχύονται.

Μαγνητική ανισοτροπία

Η μαγνητική ανισοτροπία άπτεται της σχέσης της εσωτερικής ενέργειας με την κατεύθυνση της αυθόρμητης μαγνήτισης. Συγκεκριμένα, η αλληλεπίδραση spin-τροχιάς στο υλικό έχει σαν αποτέλεσμα την εγγενή ανισοτροπία, την επιφανειακή ανισοτροπία και την ανισοτροπία μαγνητικής στένωσης, ενώ η διπολική σύζευξη των μαγνητικών ροπών επιφέρει την ανισοτροπία σχήματος. Όσο μεγαλύτερη η ασυμμετρία τόσο μεγαλύτερη κι η ενέργεια ανισοτροπίας και αντίστροφα. Η ενέργεια ανισοτροπίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = KV \sin^2 \theta \quad (1.29)$$

Όπου,

K : η συνολική ενέργεια της μονοαξονικής ανισοτροπίας ανά μονάδα όγκου

V : ο όγκος των σωματιδίων

θ : η γωνία μεταξύ της "συνολικής" μαγνητικής ροπής και της "ενεργής" κατεύθυνσης της μονοαξονικής ανισοτροπίας

Η αλληλεπίδραση spin-τροχιάς στο υλικό και η διπολική σύζευξη των μαγνητικών ροπών δημιουργούν τον εύκολο και το δύσκολο άξονα μαγνήτισης και από τους δύο άξονες προτιμάται ο εύκολος.

Θεμελιώδη μαγνητικά μήκη

Οι μαγνητικές ιδιότητες των νανοϋλικών διαφέρουν από εκείνες των υλικών σε μεγαλύτερη κλίμακα. Όταν το κρίσιμο μήκος στο οποίο πραγματοποιούνται ορισμένα φαινόμενα είναι παραπλήσιο του μεγέθους των νανοσωματιδίων, ξεπερνιέται ένα ενεργειακό φράγμα κι έτσι παρουσιάζονται αλλαγές στη μαγνήτιση του υλικού. Για τα μαγνητικά υλικά, τα θεμελιώδη μαγνητικά μήκη είναι το μήκος κρυσταλλικής ανισοτροπίας I_K , το μήκος εφαρμοζόμενου πεδίου I_H και το μαγνητοστατικό μήκος I_s :

$$I_K = \sqrt{\frac{J}{K}} \quad (1.30)$$

$$I_H = \sqrt{\frac{2J}{HM_s}} \quad (1.31)$$

$$I_s = \sqrt{\frac{J}{2\pi M_s^2}} \quad (1.32)$$

Όπου,

K : η σταθερά ανισοτροπίας του υλικού που οφείλεται στην κυρίαρχη ανισοτροπία

J : η πυκνότητα ενέργειας εντός κόκκου του υλικού

Αν υπάρχουν παραπάνω από ένα είδος φραγμού, τότε αυτό που καθορίζει τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού είναι το μικρότερο χαρακτηριστικό μήκος. [7]

1.5 Μέθοδος δινορευμάτων

Η εφαρμογή των χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων επάγει ρεύματα στα αγώγιμα υλικά. Γενικά, ο αισθητήρας των δινορευμάτων χρησιμοποιεί ένα πηνίο διέγερσης για να εφαρμόσει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο αντικείμενο δοκιμής. Το ρεύμα μπορεί να εφαρμοστεί στο πηνίο με διαφορετικές μορφές διέγερσης, όπως ημιτονοειδής [8], high-harmonic [9] [10] ή παλμική [11] [12]. Τα δινορεύματα μπορούν επίσης να δημιουργηθούν με μόνιμους μαγνήτες [13] [14].

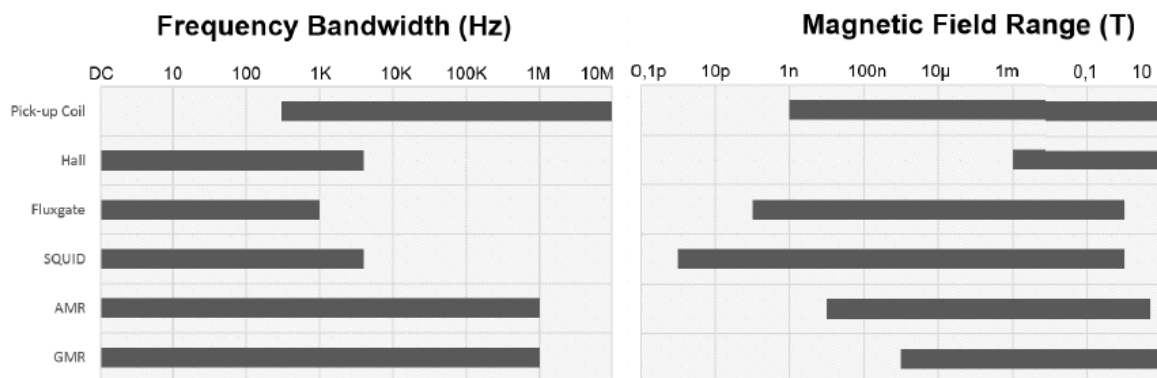
Η παρουσία ελαττωμάτων δρα ως εμπόδιο στη διέλευση των δινορευμάτων, διαταράσσοντας τα μονοπάτια τους και αυτή η διαταραχή εκδηλώνεται στην πυκνότητα μαγνητικής ροής που μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας διάφορα είδη ανιχνευτών, ανάλογα με το σκοπό και τα χαρακτηριστικά του δείγματος.

Ένα πηνίο διέγερσης με πηνία ανίχνευσης και πυρήνα αέρα ή πηνία ανίχνευσης με πυρήνα φερρίτη είναι παραδείγματα ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την ανίχνευση επιφανειακών ελαττωμάτων [15]. Μερικά όργανα δινορευμάτων χρησιμοποιούν ένα κύκλωμα γέφυρας AC Wheatstone για να ανιχνεύσουν τη μικρή διαφορά στην αντίσταση πηνίου μεταξύ δύο πηνίων. Σε επαγωγικούς διαφορικούς ανιχνευτές τα δύο πηνία ανίχνευσης συνδέονται σε σειρά και έχουν αντίθετες κατευθύνσεις περιέλιξης. Στην περίπτωση απόλυτων ανιχνευτών, η αντίσταση του πηνίου μετριέται μεταξύ ενός πηνίου ανίχνευσης και ενός πηνίου αναφοράς. Παρόλο που επιτρέπει την ακριβή ανίχνευση διαταραχών των δινορευμάτων κοντά στην υπό δοκιμή επιφάνεια, αυτή η μέθοδος παρέχει χαμηλή ευαισθησία και ανάλυση για ελαττώματα που βρίσκονται βαθιά κάτω από την επιφάνεια, λόγω άμεσης αναλογικότητας μεταξύ της ευαισθησίας των πηνίων συλλογής και της συχνότητας διέγερσης [16].

Έχουν γίνει νέες εξελίξεις για την αύξηση της ικανότητας ανίχνευσης ελαττωμάτων χρησιμοποιώντας μαγνητικούς αισθητήρες ενσωματωμένους στον ανιχνευτή, όπως Hall [11] [17], Fluxgate [18], Anisotropic Magnetoresistors (AMR) [19], GMR [20] [21] και υπεραγώγιμη συσκευή κβαντικών παρεμβολών (SQUID) [22] [23].

Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των συσκευών είναι η δυνατότητα χρήσης χαμηλής συχνότητας, επειδή η απόκριση μαγνητικού πεδίου μετριέται άμεσα και όχι από την παράγωγο του χρόνου. Η μείωση της τιμής συχνότητας ευνοεί τη διεύθυνση πεδίου σε όλο το δείγμα.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται μία σύγκριση διάφορων αισθητήρων. Μερικοί έχουν μεγάλη ευαισθησία, είναι ικανοί να μετρήσουν μαγνητικά πεδία ή κλίσεις μαγνητικών πεδίων στην περιοχή ενδιαφέροντος, μερικοί είναι μικροσκοπικοί επιτρέποντας καλή χωρική ανάλυση, μερικοί παρουσιάζουν μεγάλο εύρος ζώνης από DC έως τη ζώνη MHz. Το SQUID είναι ο πιο ευαίσθητος αισθητήρας χαμηλού πεδίου ($\sim 10-100 \text{ fT Hz}^{-1/2}$) όταν χρησιμοποιείται σήμα χαμηλής συχνότητας (10 kHz). Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το ευρύ δυναμικό τους εύρος (> 80 dB).

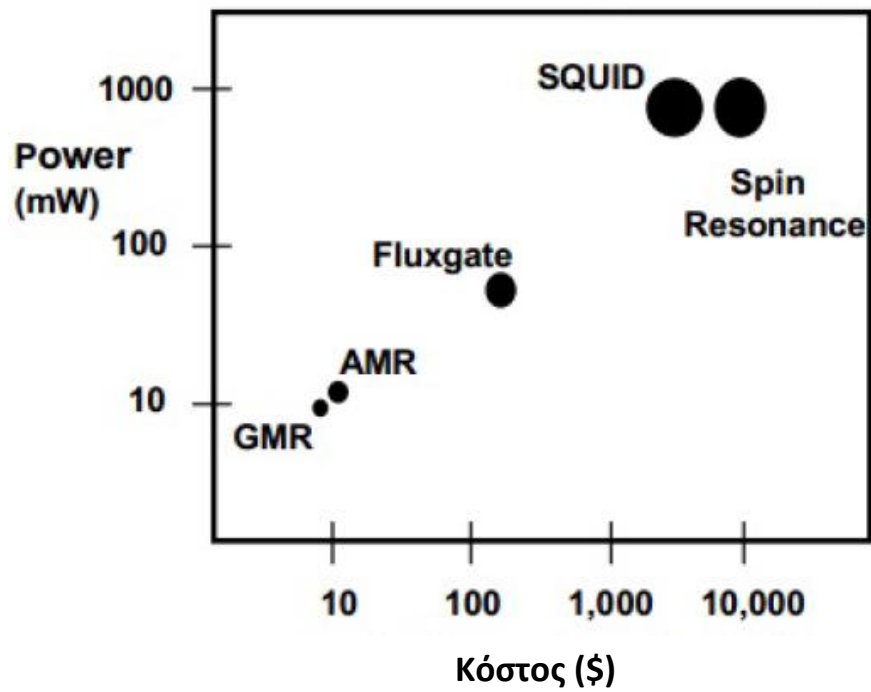


Σχήμα 1.5.1. Σύγκριση διάφορων αισθητήρων[24]

Ωστόσο, το πολύ υψηλό κόστος είναι σημαντικό μειονεκτήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5.2. Η τεχνολογία στερεάς κατάστασης κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη μικρών μαγνητικών αισθητήρων όπως οι AMR και GMR, παρουσιάζοντας ένα αρκετά μεγάλο μαγνητοανθεκτικό φαινόμενο για χρήση σε μετρήσεις.

Αυτοί οι αισθητήρες έχουν υψηλή ευαισθησία, σταθερή στο εύρος ζώνης ευρείας συχνότητας (DC έως 1 MHz) καθιστώντας δυνατό τον εντοπισμό επιφανειακών και κάτω από την επιφάνεια ελαττωμάτων. Τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά, η υψηλή ευαισθησία και η απόκριση συχνότητας που παρέχεται από τους GMR αισθητήρες τους καθιστά καλούς υποψηφίους στις

εφαρμογές ανίχνευσης ελαττωμάτων. Επιπλέον, οι GMR αισθητήρες είναι λιγότερο ακριβοί, επομένως είναι ιδανικοί για χαμηλού κόστους συστήματα [25].



Σχήμα 1.5.2. Κόστος Αισθητήρων [26]

1.6 Ανάλυση μεθόδου δινορευμάτων

Αυτό το φαινόμενο εξηγείται από τις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 1.3.

Οι εξισώσεις 1.17 και 1.23 εκφράζονται για ημιτονική μόνιμη κατάσταση με βάση τους αντίστοιχους φάσορες ως εξής:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (1.33)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \quad (1.34)$$

Καθώς η μέθοδος των δινορευμάτων αναφέρεται στη διεύθυνση μαγνητικών πεδίων σε ηλεκτρικούς αγωγούς, πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένες προσεγγίσεις. Από τις κάτωθι σχέσεις:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (1.35)$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (1.36)$$

Προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ των μεγεθών του \vec{J} και του $\partial D / \partial t$ είναι ίση με τη σχέση μεταξύ του σ και του $(\omega\epsilon)$.

Για αγωγούς όπως αλουμίνιο:

$$\epsilon = \epsilon_0 = (4\pi \times 9 \times 10^9)^{-1} \text{ F / m και} \quad (1.37)$$

$$\sigma = 5 \times 10^7 \text{ S/m} \quad (1.38)$$

η ισότητα επαληθεύεται για συχνότητες στην περιοχή ακτινών X, $f = 9 \times 10^{17} \text{ Hz}$.

Για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη ($f = 20\text{-}200 \text{ Hz}$), ο όρος της πυκνότητας ρεύματος μετατόπισης, $j\omega D$, μπορεί να αμεληθεί επειδή είναι πολύ μικρότερος από τα ρεύματα αγωγής \vec{J} στα αγωγίμα μέσα. Επίσης η εξίσωση 1.21 μπορεί να αμεληθεί επειδή ο αγωγός είναι ηλεκτρικά ουδέτερος ($\rho = 0$).

Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και περιγράφεται από την εξίσωση Maxwell-Faraday που παρουσιάζεται στην εξίσωση 1.16 και μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\oint_c \vec{E} dl = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} dS \quad (1.39)$$

όπου S η επιφάνεια που οριοθετείται από την κλειστή διαδρομή c ενός ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} και \vec{B} είναι το μαγνητικό πεδίο που διασχίζει την επιφάνεια S .

Ισχύει και το αντίστροφο, δηλαδή, όταν ένα πηνίο διέγερσης οδηγείται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα, το ηλεκτρικό πεδίο που μεταβάλλεται με το χρόνο προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με το χρόνο. Το μαγνητικό πεδίο ποικίλλει στον χρόνο όπως το ρεύμα διέγερσης στα πηνία και προκαλείται μια Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ). Σύμφωνα με τον Faraday, το εύρος της επαγόμενης ΗΕΔ είναι άμεσα ανάλογο με τον ρυθμό διακύμανσης του \vec{B} στον χρόνο.

$$\oint_c \vec{E} dl = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} dS \quad (1.40)$$

Η εξίσωση 1.40 περιγράφει την επαγόμενη ΗΕΔ γύρω από μία στάσιμη κλειστή διαδρομή c .

Η ΗΕΔ δημιουργεί ρεύματα εάν το υπό δοκιμή υλικό είναι αγωγίμο. Αυτά τα ρεύματα λόγω του μονοπατιού που ακολουθούν, καθώς σχηματίζονται ρεύματα κλειστού βρόχου όπως δίνες (στη μηχανική ρευστών) είναι γνωστά ως δινορεύματα. Τα δινορεύματα απουσιάζουν εάν το υπό δοκιμή υλικό είναι μονωτής. Αυτά τα ρεύματα δημιουργούν ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο αντίθετο του πεδίου διέγερσης.

Η συνήθης διαδρομή των δινορευμάτων εξαρτάται από την αγωγιμότητα του υλικού. Εάν υπάρξει κάποια ασυνέχεια (κενό αγωγιμότητας) το ρεύμα παρεκκλίνει επιδρώντας στην πυκνότητα του επακόλουθου μαγνητικού πεδίου. Στη μη καταστροφική δοκιμή με τη μέθοδο των δινορευμάτων χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας για τη μέτρηση της δευτερογενούς πυκνότητας μαγνητικού πεδίου και έτσι είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι ανωμαλίες που προκαλούνται από ελαττώματα και ασυνέχειες στο υλικό.

Η μαγνητική διαπερατότητα (μ) ενός υλικού, όπως έχει αναφερθεί, είναι η ικανότητα ενός υλικού να άγει ένα μαγνητικό πεδίο εντός του και εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο όπως εκφράζεται στην εξίσωση 1.2. Η διαπερατότητα μπορεί επίσης να εκφραστεί ως αδιάστατη ποσότητα σε σχέση με τη διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$) και είναι πάντα ίση ή μεγαλύτερη από την μονάδα.

Στον πίνακα 1.6.1 παρουσιάζονται οι τιμές της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας για κάποια κοινά υλικά. [27].

Πίνακας 1.6.1. Υλικά - Σχετική μαγνητική διαπερατότητα

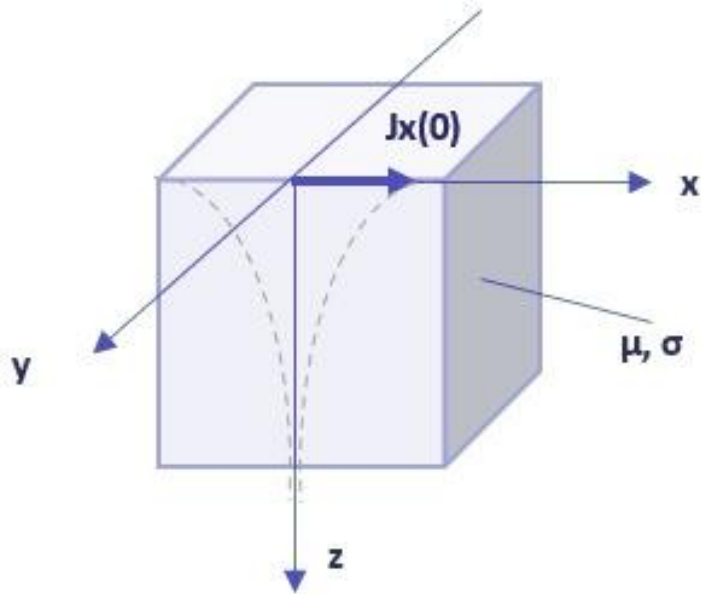
Υλικό	Σχετική μαγνητική διαπερατότητα (κατά προσέγγιση)
Inconel 600	1.05
Stainless steel 304	1
Ξύλο	1
Αλουμίνιο	1
Ορείχαλκος/Χαλκός	1
Ανθρακούχος χάλυβας	~200
Κατεργασμένος σίδηρος	~2000
Φερρίτης	~10000

1.7 Επιδερμικό φαινόμενο - τυπικό βάθος διείσδυσης

Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα κατανέμεται μη ομοιόμορφα σε έναν αγωγό. Καθώς η χρήση της μη καταστροφικής δοκιμής με τη μέθοδο των δινορευμάτων βασίζεται στην επαγωγή ρευμάτων στην περιοχή του προς ανάλυση υλικού, είναι σημαντικό να είναι γνωστό πώς κατανέμονται αυτά τα ρεύματα στο υπό δοκιμή υλικό. Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος κατανέμεται πλευρικά (παράλληλα με την επιφάνεια) καθώς και μέσω του βάθους του υλικού. Στην πλευρική κατανομή, τα δινορεύματα είναι στο μέγιστο ακριβώς κάτω από το probe και μειώνονται γρήγορα με την αύξηση της πλευρικής απόστασης από το probe. Είναι σαφές ότι η πυκνότητα των δινορευμάτων μειώνεται όσο αυξάνει το βάθος.

Η επαγωγή δινορευμάτων προκαλεί δευτερεύοντα μαγνητικά πεδία. Τα δευτερεύοντα πεδία, σε αντίθεση με το πρωτεύον πεδίο, εμποδίζουν εν μέρει το πρωτεύον πεδίο από περαιτέρω διείσδυση στο βάθος του υλικού. Το επαγόμενο ρεύμα περιορίζεται σε ένα στρώμα κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Το πάχος αυτού του στρώματος είναι ανάλογο της συχνότητας που χρησιμοποιείται και της αγωγιμότητας του υπό δοκιμή υλικού. Σε πολύ υψηλές συχνότητες, το ρεύμα περιορίζεται ουσιαστικά στην επιφάνεια του αγωγού. Εξαιτίας αυτής της ακραίας περίπτωσης ολόκληρο το φαινόμενο της μη ομοιόμορφης κατανομής των χρονομεταβλητών ρευμάτων των αγωγών είναι γνωστό ως επιδερμικό φαινόμενο. Αυτό το φαινόμενο, όπως και όλα τα άλλα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, διέπεται από τις εξισώσεις Maxwell.

Στην περίπτωση όπου ένα ημιτονοειδές ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} και πυκνότητα ρεύματος \vec{J} επιβάλλονται στην επιφάνεια ενός ομοιογενούς αγωγού, το ρεύμα ρέει μόνο στην κατεύθυνση x με γνωστή πυκνότητα $\vec{J} = J_x u_x$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7.1, το οποίο εξαρτάται μόνο από το z . Υποθέτοντας μια ημιτονοειδή παραλλαγή χρόνου, από τώρα και στο εξής οι εξισώσεις θα γράφονται με βάση τα σύνθετα πλάτη τους, (π.χ. $J_x(z, t) = \text{Re}\{J_x e^{i\omega t}\}$).



Σχήμα 1.7.1. Η διακύμανση πλάτους του διανύσματος της πυκνότητας ρεύματος με την απόσταση z από την οριακή επιφάνεια σε μία ομοιογενή επαγωγή όταν επιβάλλεται ένα ημιτονοειδές πεδίο.

Μετατρέποντας τις εξίσωσης 1.33 και 1.34 βάση των αντίστοιχων θεμελιικών εξισώσεων 1.2 και 1.35 προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις:

$$\nabla \times J = -j\omega\sigma B \quad (1.41)$$

$$\nabla \times B = \mu J \quad (1.42)$$

Από τις ιδιότητες του εξωτερικού προϊόντος και τις αρχικές συνθήκες για την ομοιομορφία J_x , προκύπτει ότι υπάρχει μόνο ένα στοιχείο y του διανύσματος \vec{B} . Σύμφωνα με την έκφραση για ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, οι εξισώσεις 1.41 και 1.42 γίνονται αντίστοιχα :

$$\frac{dJ_x}{dz} = -j\omega\sigma B_y, \quad (1.43)$$

$$-\frac{dB_y}{dz} = \mu J_x \quad (1.44)$$

Χρησιμοποιούνται συνήθεις διαφορικές αντί μερικών διαφορικών επειδή τα J_x και B_y εξαρτώνται μόνο από το z . Το B_y μπορεί να εξαλειφθεί για να δημιουργηθεί μια εξίσωση στο J_x :

$$\frac{d^2 J_x}{dz^2} = j\omega\mu\sigma J_x \quad (1.45)$$

Αυτή η εξίσωση έχει μια γενική λύση:

$$J_x(z) = J_1 e^{Kz} + J_2 e^{-Kz} \quad (1.46)$$

όπου η σταθερά J_1 ισούται με μηδέν επειδή ο πρώτος όρος μεγαλώνει στο άπειρο με το z . Επομένως, το J_2 αντιπροσωπεύει την τιμή του J_x στο $z = 0$, $J_x(z = 0) = J_0$. Έτσι, η τελική έκφραση του στοιχείου x της πυκνότητας ρεύματος σε μια πλάκα με άπειρο πάχος ποικίλλει κατά μήκος του άξονα z σύμφωνα με την εξίσωση:

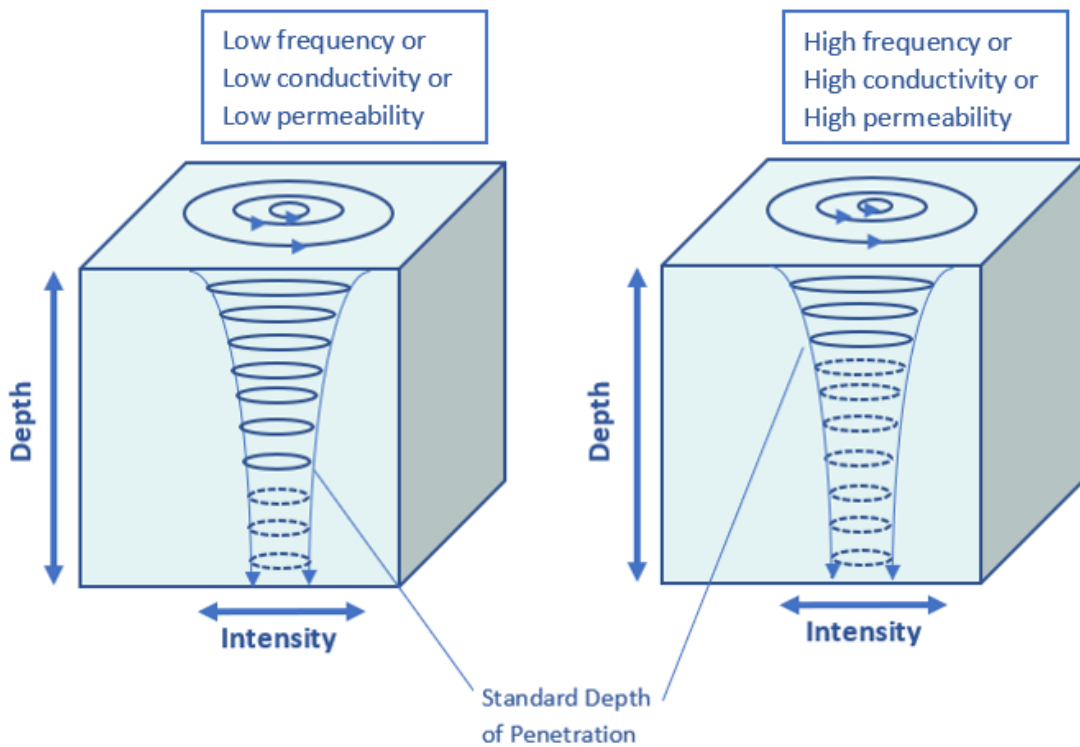
$$J_x(z) = J_0 e^{-Kz} \quad (1.47)$$

Η ροή των επαγόμενων ρευμάτων εντός της πλάκας εξαρτάται από τη γωνιακή συχνότητα διέγερσης ω που σχετίζεται με τη συχνότητα του ημιτονοειδούς ρεύματος που επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης. Τα επαγόμενα δινορεύματα και το συνοδευτικό μαγνητικό πεδίο διεισδύουν στο αγώγιμο υλικό και εξασθενούν σε αυτή τη διαδρομή, έτσι ώστε το μέγιστο του μεγέθους τους να εμφανίζεται στην επιφάνεια του υλικού. Η μείωση είναι πιο γρήγορη σε υψηλότερες συχνότητες και για υψηλότερες μαγνητικές διαπερατότητες. Το πλάτος του J_x μειώνεται εκθετικά προς το εσωτερικό των αγώγιμων μέσων, πέφτοντας στο $1/e$ (ή περίπου 37%) της τιμής τους στην επιφάνεια σε μια απόσταση που ονομάζεται τυπικό βάθος διείσδυσης (SDP), δ [28],

$$\delta = \frac{1}{\kappa} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} [m] \quad (1.48)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση 1.48, το τυπικό βάθος διείσδυσης εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας ($\omega = 2\pi f$) [rad/sec], από την αγωγιμότητα σ [S/m] και από τη διαπερατότητα μ [H/m] του υλικού. Η προηγούμενη ανάλυση ισχύει για μια κατανομή ρεύματος σε οποιονδήποτε αγωγό του οποίου η ακτίνα καμπυλότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από το επιδερμικό φαινόμενο.

Καθώς είτε η συχνότητα f είτε η αγωγιμότητα σ τείνουν προς το άπειρο, τα πεδία και τα ρεύματα τείνουν να συγκεντρώνονται σε ένα προσδευτικά λεπτότερο στρώμα, κοντά στην επιφάνεια του αγωγίου μέσου. Επομένως, για να εξεταστεί μια βαθιά ρωγμή ή υλικά με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, χαμηλότερες συχνότητες πρέπει να εφαρμοστούν και ισχύει και το αντίστροφο (για την ανίχνευση ρωγμών στην επιφάνεια, πρέπει να εφαρμόζονται υψηλότερες συχνότητες δοκιμής).



Σχήμα 1.7.2. Σχηματική απεικόνιση του τυπικού βάθους διείσδυσης των δινορευμάτων

1.8 Μαγνητοανθεκτικοί Αισθητήρες

Οι τεχνολογίες των μαγνητοανθεκτικών αισθητήρων προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στα συστήματα μη καταστροφικής αξιολόγησης. Ένα βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων αισθητήρων είναι η επίπεδη απόκριση, καθιστώντας τους ιδιαίτερα ελκυστικούς για ανίχνευση ρεύματος χαμηλής συχνότητας και πολλαπλών συχνοτήτων, για βαθύτερη ανίχνευση ελαττωμάτων και για σκιαγράφηση του προφίλ βάθους.

Η μαγνητική αντίσταση είναι η ιδιότητα ενός υλικού ή συστήματος υλικών που οδηγεί σε αλλαγή αντίστασης όταν εκτίθεται σε μαγνητικό πεδίο. Η ανακάλυψη μεγάλων μαγνητοανθεκτικών φαινομένων οδήγησε στην ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων στερεάς κατάστασης που μπορούν να αντικαταστήσουν ακριβότερους αισθητήρες σε μια ποικιλία εφαρμογών. Όλοι οι αγωγοί εμφανίζουν ένα ασθενές φαινόμενο γνωστό ως συνηθισμένη μαγνητοαντίσταση, το οποίο είναι συνήθως πολύ ασθενές για χρήση σε αισθητήρες. Πολλά μαγνητικά υλικά, ωστόσο, παρουσιάζουν ένα μεγαλύτερο μαγνητοανθεκτικό φαινόμενο γνωστό ως ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση, το οποίο είναι αρκετά υψηλό ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αισθητήρες. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία εναπόθεσης λεπτών υμενίων επέτρεψαν στους ερευνητές να δημιουργήσουν νανοδομημένες πολυεπίπεδες συσκευές με διαδοχικά μεγαλύτερα φαινόμενα μαγνητοαντίστασης (GMR) και μαγνητοαντίστασης σήραγγας (TMR).

Συνήθως το κέρδος υπολογίζεται με τον παρακάτω δείκτη MR:

$$MR[\%] = \frac{\text{Αλλαγή στην Αντίσταση}}{\text{Ελάχιστη Αντίσταση}} \times 100 \quad (1.49)$$

ο οποίος μπορεί να υπερβαίνει το 100%. Ο δείκτης MR δείχνει το μέγιστο σήμα που μπορεί να αποκτηθεί από τον αισθητήρα. Οι συσκευές AMR έχουν συνήθως 1-2 % κέρδος, οι GMR επιτυγχάνουν 20-50 % κέρδος και οι διατάξεις TMR 50-60% κέρδος. [29]

GMR Αισθητήρας

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας GMR αισθητήρας για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι ειδικά προσαρμοσμένοι στην τρέχουσα μέθοδο δοκιμών δινορευμάτων καθώς παρουσιάζουν πολύ υψηλή ευαισθησία στο χαμηλά μαγνητικά πεδία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πεδία με διαφορετικές συχνότητες, καθώς παρέχουν έναν συνδυασμό υψηλής ευαισθησίας και εξαιρετικά υψηλού δυναμικού εύρους [22].

Χαρακτηρίζονται επίσης από υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο και υψηλή χωρική ανάλυση. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες έχουν σχεδιαστεί για τη μέτρηση ή την ανίχνευση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων και την άμεση ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου και όχι τον ρυθμό μεταβολής στο μαγνητικό πεδίο. Επομένως, είναι χρήσιμοι ως αισθητήρες πεδίου DC. Έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τους συμβατικούς ανιστροπικούς αισθητήρες μαγνητοανθεκτικότητας (AMR) ή αισθητήρες Hall και είναι σε θέση να λειτουργούν σε πεδία πολύ πάνω από το εύρος των αισθητήρων AMR. Επιπλέον, τα υψηλά πεδία δεν θα «αναστρέψουν» τους αισθητήρες GMR ούτε θα αντιστρέψουν την έξοδο τους όπως είναι δυνατό να γίνει με τους αισθητήρες AMR. Επίσης, τα υψηλά πεδία δεν προκαλούν ζημιά στους αισθητήρες GMR.

Οι αισθητήρες GMR αποτελούνται από μαγνητικό μεταλλικό πολυστρώμα όπως Fe / Cr, Co / Cu και NiCo / Cu στο οποίο τα σιδηρομαγνητικά στρώματα διαχωρίζονται από μη μαγνητικά στρώματα πάχους μερικών νανομέτρων. Ο όρος «Giant» στο GMR αναφέρεται σε μια μεγάλη αλλαγή στην αντίσταση, μειώνεται συνήθως 4% μέχρι πάνω από 20%, όταν οι συσκευές υπόκεινται σε μαγνητικό πεδίο. Αυτή η μεταβολή στην αντίσταση αποτελεί το φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης. Η εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου σε αυτά τα μεταλλικά στρώματα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης των στρωμάτων εξαιτίας της εξαρτώμενης από το spin σκέδασης των ηλεκτρονίων στις διεπιφάνειες. Σε μεγάλο όγκο υλικών, τα ηλεκτρόνια αυτών των υλικών μπορούν να ταξιδέψουν σημαντικές αποστάσεις πριν να σκεδαστούν αλλάζοντας spin ή αλλάζοντας κατεύθυνση εξαιτίας της σύγκρουσης με άλλα ατομικά σωματίδια (μέσο ελεύθερο μήκος διαδρομής). Παρ' όλα αυτά, σε υλικά που είναι πολύ λεπτά, ένα ηλεκτρόνιο δε μπορεί να ταξιδέψει το μέγιστο μέσο ελεύθερο μήκος

διαδρομής. Είναι περισσότερο πιθανό το ηλεκτρόνιο να φτάσει το όριο του υλικού και να σκεδαστεί εκεί, παρά να σκεδαστεί συγκρουόμενο με άλλο ατομικό σωματίδιο. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια των αγωγών να ταξιδεύουν δυσκολότερα σε πολύ λεπτά υλικά. Κατά συνέπεια, παρατηρείται και μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση. Με σκοπό να αξιοποιηθεί το φαινόμενο αυτό, τα GMR films κατασκευάζονται από πολύ λεπτά εναλλασσόμενα στρώματα μαγνητικών και μη μαγνητικών υλικών.

Πειραματικό μέρος

2.1 Περιγραφή διάταξης – Κατασκευή Προσομοίωσης

Σκοπός της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση της ικανότητας ανίχνευσης ελαττωμάτων και εκτίμησης του βάθους τους σε μεταλλικές επιφάνειες χρησιμοποιώντας έναν μη καταστροφικό έλεγχο με δινορεύματα. Η εξέλιξη των μαγνητικών αισθητήρων έχει κάνει δυνατή τη χρήση πεδίων διέγερσης χαμηλών συχνοτήτων και έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικότητας αυτής της μεθόδου.

Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός σχεδιάστηκε ένα probe, το οποίο θα επιφέρει δινορεύματα και θα διαθέτει έναν μαγνητικό αισθητήρα, ο οποίος θα ανιχνεύει τις διαταραχές στην πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου. Από αυτές τις διαταραχές στην πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου εντοπίζονται οι ρωγμές.

Στην προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας GMR, για να ανιχνεύσει ρωγμές και το βάθος αυτών σε μεταλλική επιφάνεια. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτός ο αισθητήρας είναι η υψηλή ευαισθησία του και η απόκριση συχνότητας (10Hz- 1MHz).

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τρία διαφορετικά σενάρια (case 0, case 1, case 2) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Ansys 3D Electric.

Στο σενάριο 0 δεν υπάρχει κάποια ρωγμή στην αλουμινένια πλάκα, ενώ στα σενάρια 1 και 2 υπάρχει μία ρωγμή $5*2*0.1\text{mm}$. Στο σενάριο 1 βρίσκεται σε βάθος 3mm και στο σενάριο 2 σε βάθος 5mm.

Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στον x άξονα, ώστε να εντοπιστεί η αποκόλληση των metallic filaments σε σύνθετο μεταλλικό υλικό παράλληλων filaments.

Αναλυτικά περιγράφονται τα στοιχεία της διάταξης στον πίνακα 2.1.1:

Πίνακας 2.1.1. Στοιχεία Διάταξης Προσομοίωσης

Σενάριο 1

Αλουμιένια πλάκα: 100*100*10mm

Πηνίο: Ύψος: 40mm, ακτίνα: 21mm

Πυρήνα: ύψος: 80mm ακτίνα 10mm

Ρωγμή: 5*2*0.1mm

Σενάριο 1: Βάθος: 3mm (κέντρο ρωγμής)

Σενάριο 2: βάθος: 5mm (κέντρο ρωγμής)

Απόσταση του αισθητήρα από πλάκα: 5mm

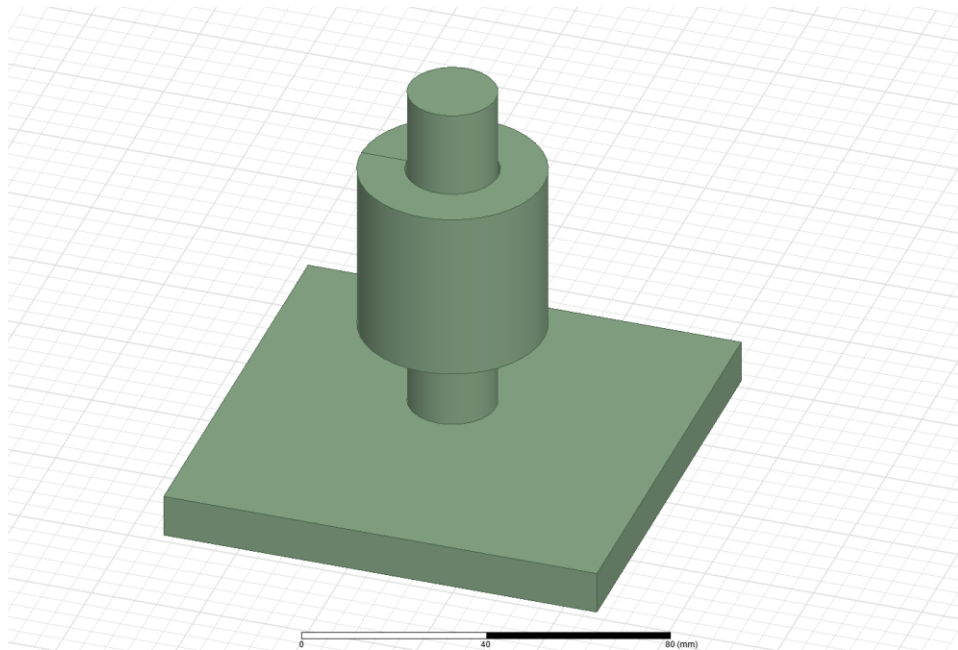
2mm από GMR αισθητήρα και 3mm από πλάκα

Διάμετρος χαλκού 1.25mm

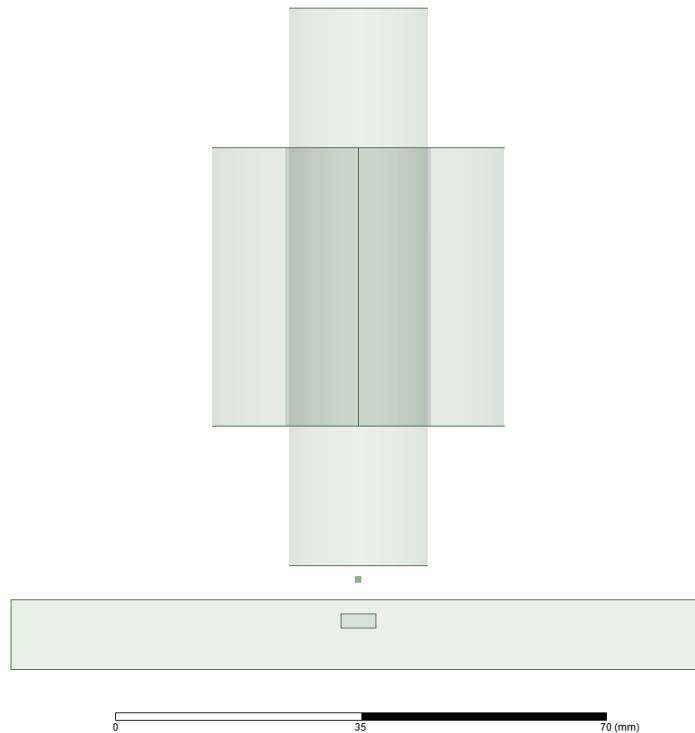
1 ampere

N = 320 (αριθμός ελιγμάτων)

Η διάταξη όπως προκύπτει και από το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, αποτελείται από μία αλουμιένια πλάκα, έναν χαλύβδινο πυρήνα, γύρω από το οποίο τυλίγεται πηνίο και έναν αισθητήρα GMR.



Σχήμα 2.1.1. Διάταξη προσομοίωσης



Σχήμα 2.1.2. Διάταξη προσομοίωσης

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου και του χάλυβα που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση.

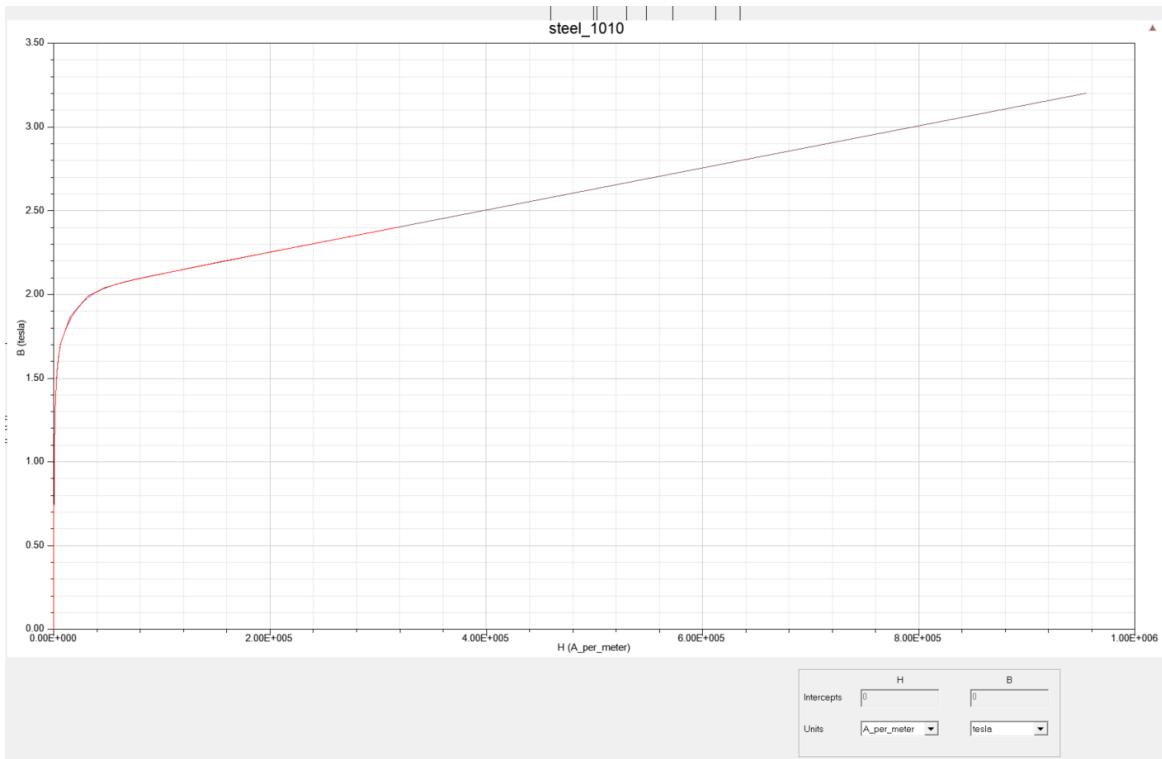
Πίνακας 2.1.2 Τιμές αλουμινίου

Όνομα	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	1.000021	Siemens/m
Bulk Conductivity	Simple	38000000	
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	w/m ³
Core Loss Model		None	Kg/m ³
Mass Density	Simple	2689	
Composition		Solid	

Πίνακας 2.1.3 Τιμές Steel_1010

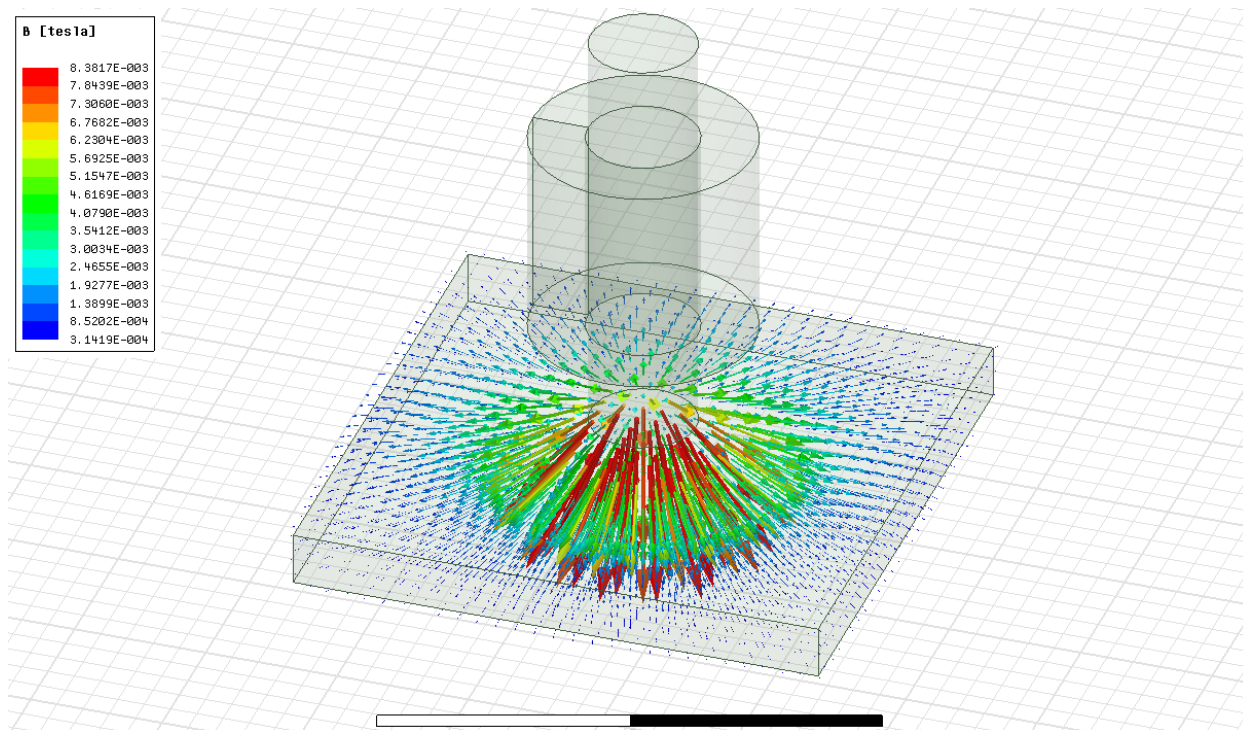
Όνομα	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve	Siemens/m
Bulk Conductivity	Simple	2000000	
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	w/m ³
Core Loss Model		None	Kg/m ³
Mass Density	Simple	7872	
Composition		Solid	

Η καμπύλη μαγνήτισης του χάλυβα που επιλέχθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.3.

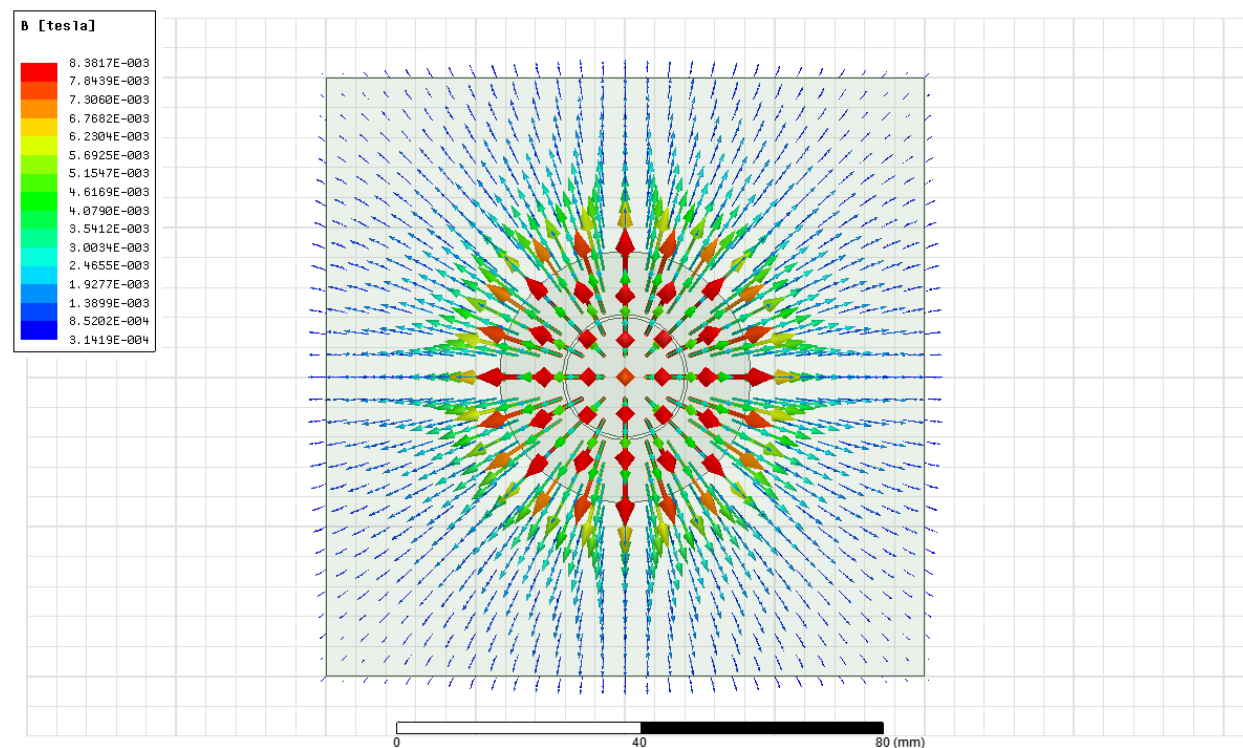


Σχήμα 2.1.3. Καμπύλη μαγνήτισης (B-H Curve)

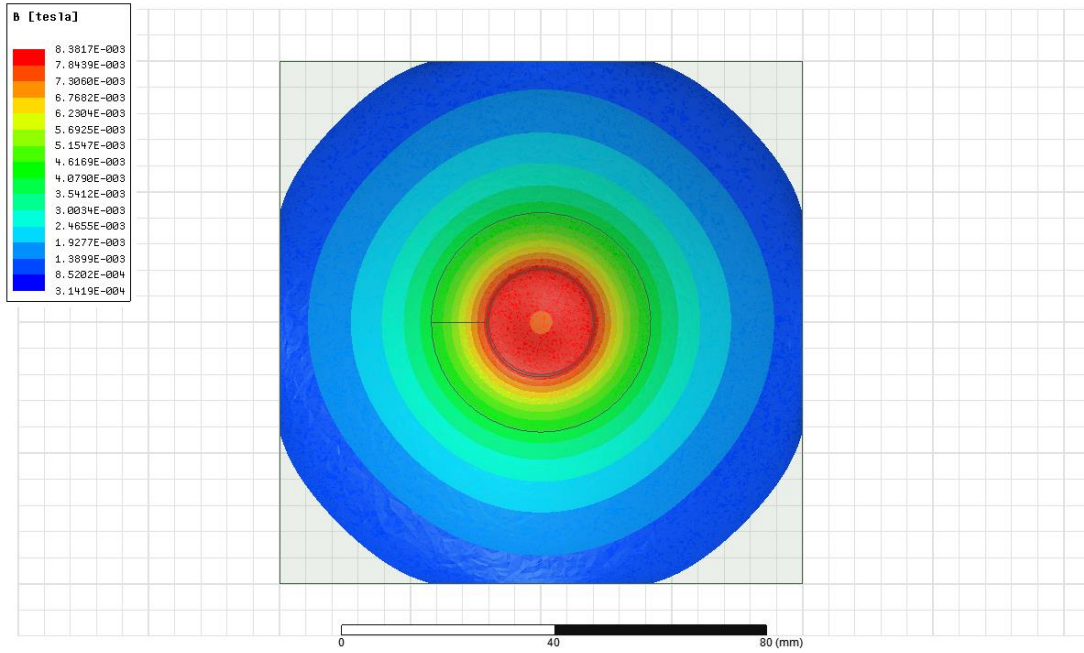
Με βάση την διάταξη που έχει πραγματοποιηθεί, ο χάλυβας με το πηνίο που έχει τυλιχθεί γύρω του προκαλεί μαγνητικό πεδίο στην αλουμινένια πλάκα. Εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα με συχνότητες από (20-200)Hz και λόγω του εναλλασσόμενου ρεύματος προκύπτουν δινορεύματα τα οποία δημιουργούν ένα νέο μαγνητικό πεδίο το οποίο ανιχνεύεται από τον αισθητήρα.



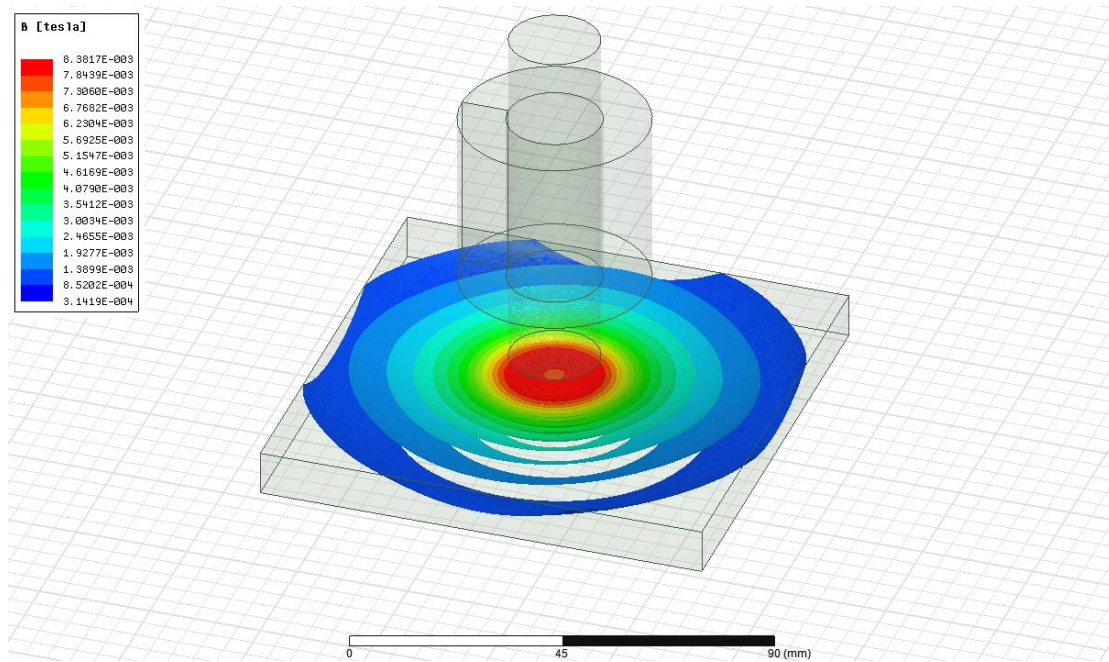
Σχήμα 2.1.4. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου.



Σχήμα 2.1.5. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου



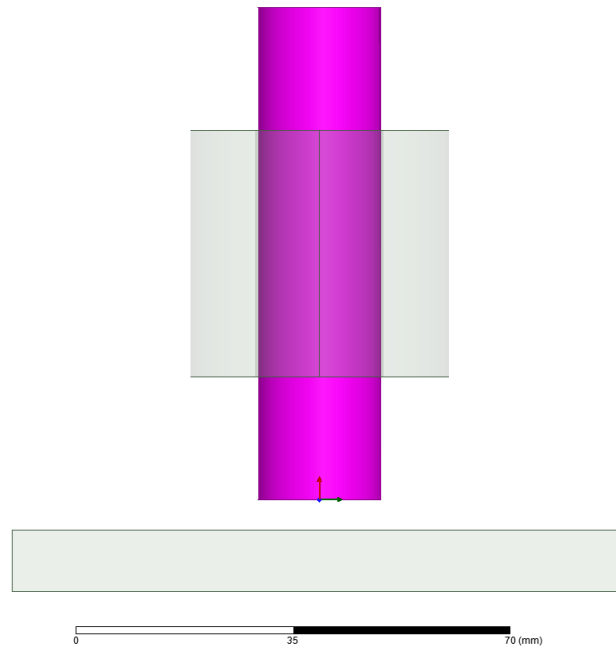
Σχήμα 2.1.6. Αναπαράσταση έντασης μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου



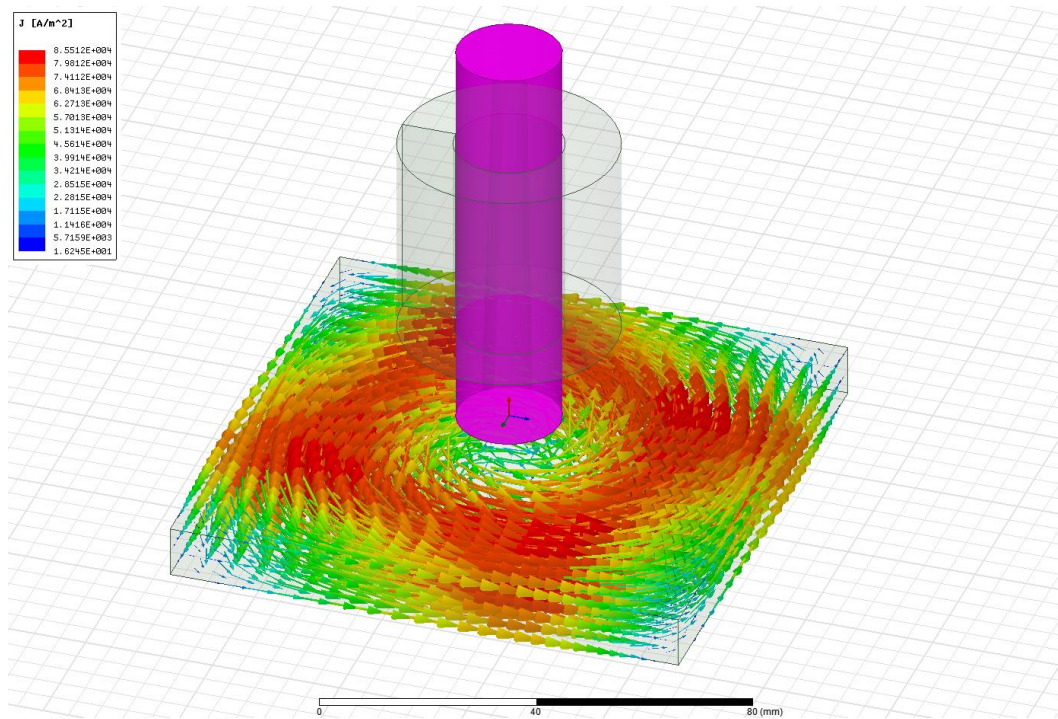
Σχήμα 2.1.7. Αναπαράσταση έντασης μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου

2.2 Σενάριο 0

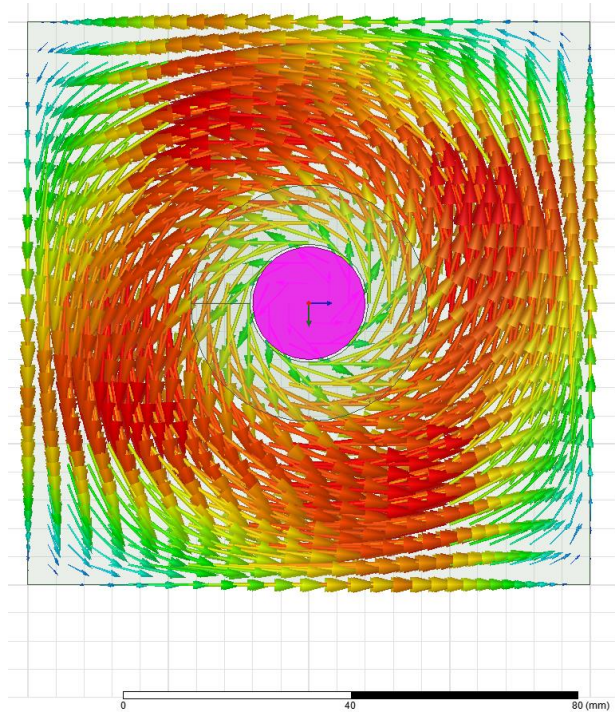
Το πρώτο βήμα ήταν να προσδιοριστεί η τιμή του μαγνητικού πεδίου που λαμβάνει ο αισθητήρας για δοκίμιο αλουμίνιου στο οποίο δεν υπάρχει ρωγμή.



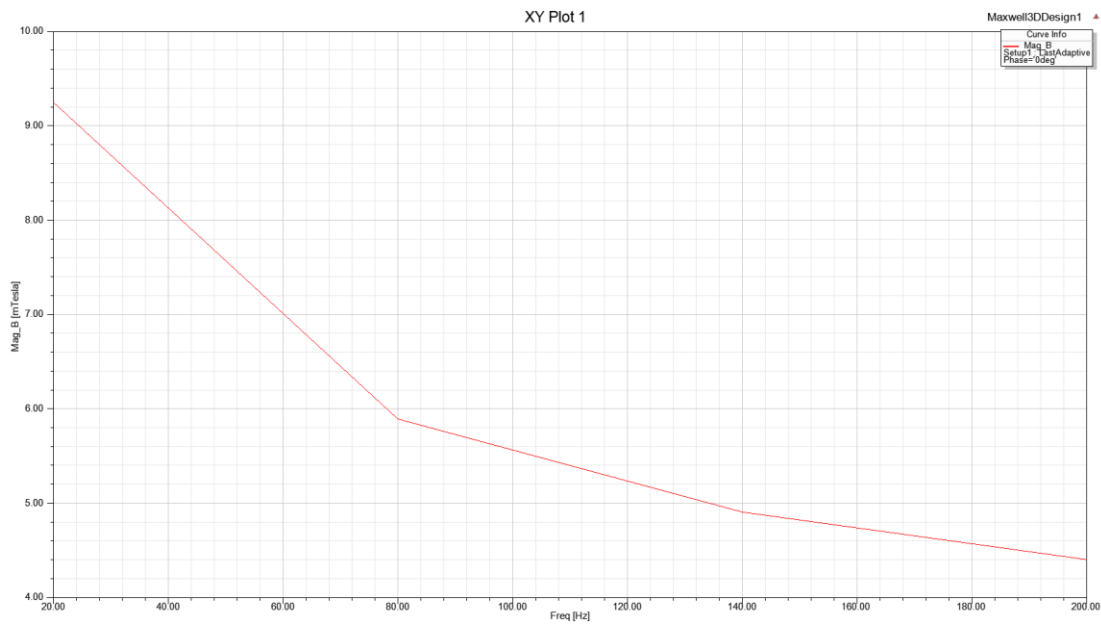
Σχήμα 2.2.1. Διάταξη σενάριο 0 (χωρίς ρωγμή)



Σχήμα 2.2.2. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (σενάριο 0)



Σχήμα 2.2.3. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (σενάριο 0)



Σχήμα 2.2.4. Μαγνητικό πεδίο (σενάριο 0)

Στο σχήμα 2.2.4 φαίνεται η τιμή του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου. Στον παρακάτω πίνακα είναι οι τιμές του για τις συχνότητες (20, 80, 140, 200) Hz.

Πίνακας 2.2.1. Μαγνητικό πεδίο (σενάριο 0)

Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.250613
80	5.896148
140	4.910002
200	4.40760

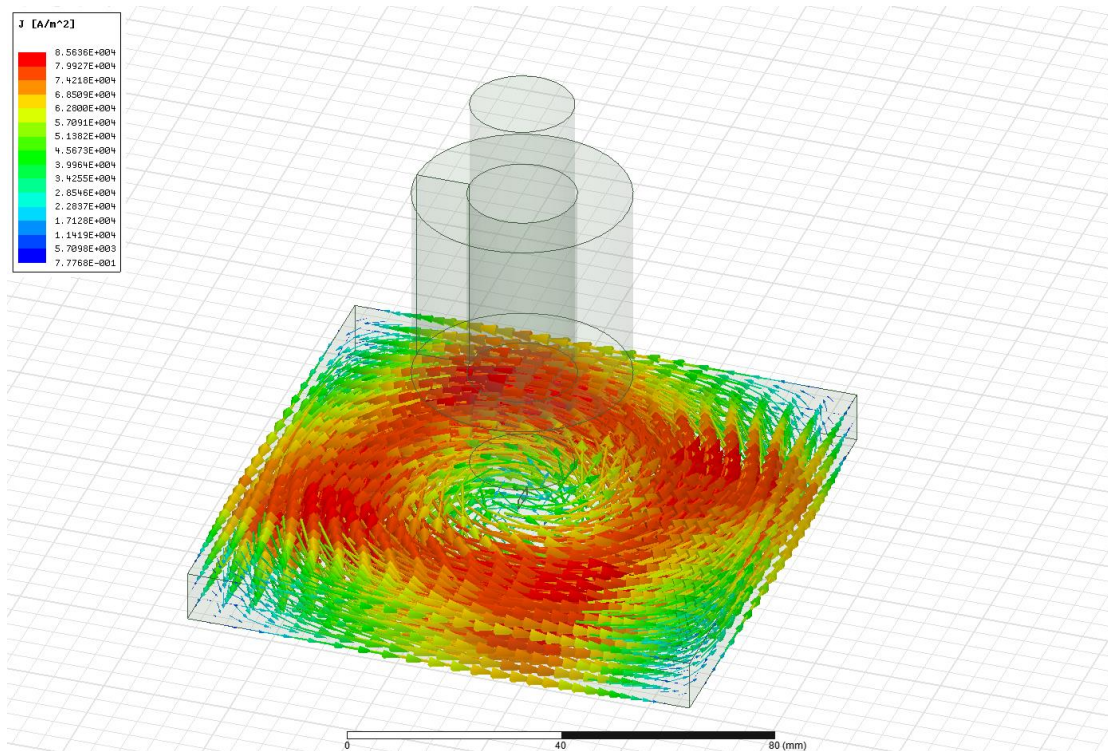
2.3 Σενάριο προσομοίωσης ρωγμής σε βάθος 3mm

Στο συγκεκριμένο σενάριο υπάρχει ρωγμή $5*2*0.1\text{mm}$, σε βάθος 3mm στο κέντρο της.

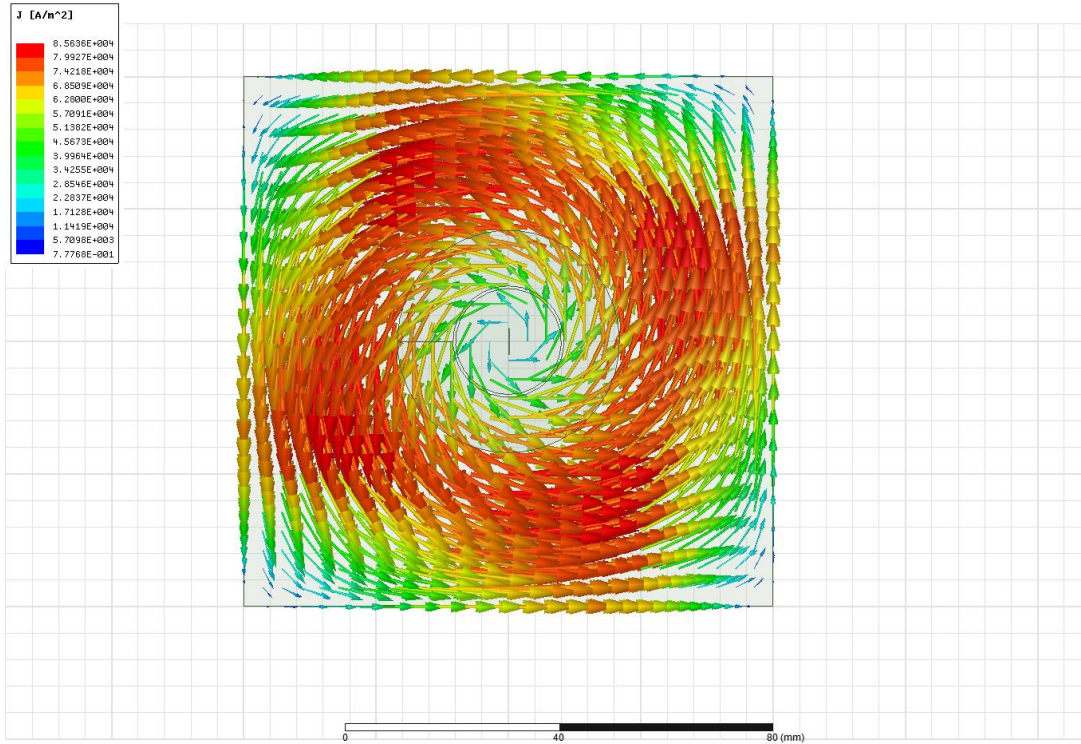
Ο αισθητήρας κατά αυτήν την προσομοίωση μετακινείται στον x άξονα και μετρίεται το μαγνητικό πεδίο σε αποστάσεις από τη ρωγμή $X=0\text{mm}$, $X=3\text{mm}$, $X=9\text{mm}$ και $X=12\text{mm}$. Για λόγους ευκολίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μετακινήθηκε η ρωγμή αντί για τον αισθητήρα.

$X=0\text{mm}$

Για $X=0\text{mm}$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα, τα οποία προκαλούνται από τον αισθητήρα στην πλάκα αλουμινίου.

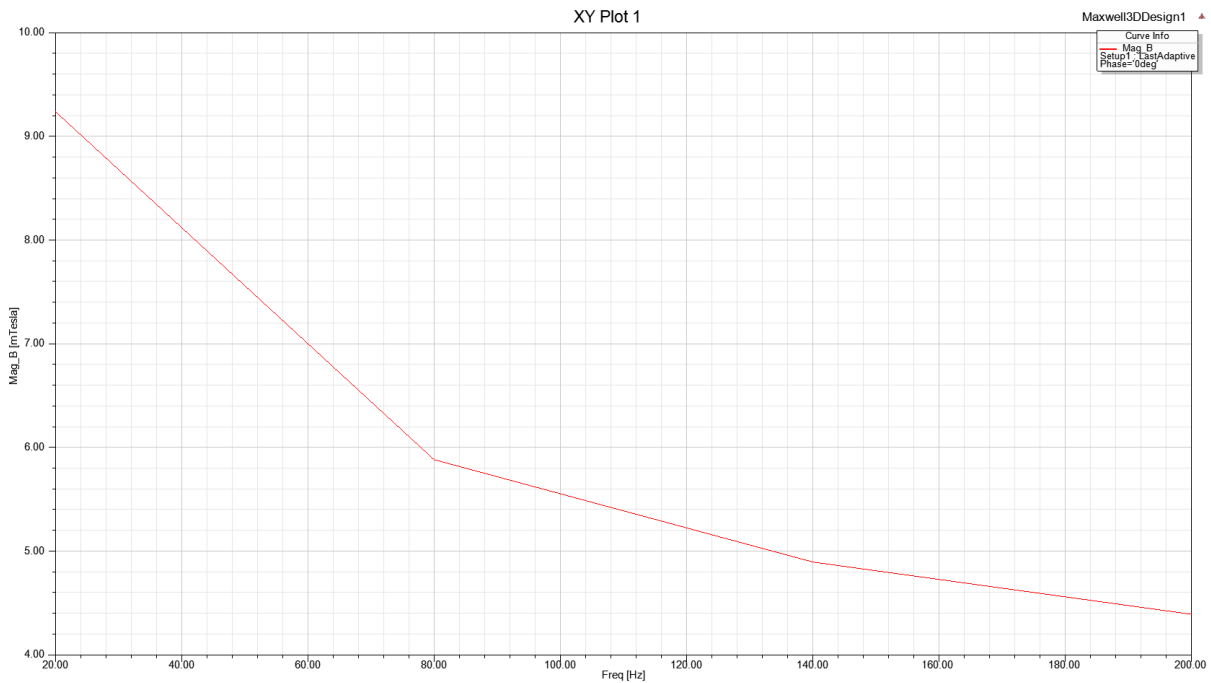


Σχήμα 2.3.1. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου (Σενάριο 1, $X=0\text{mm}$)



Σχήμα 2.3.2. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (Σενάριο 1, $X=0mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



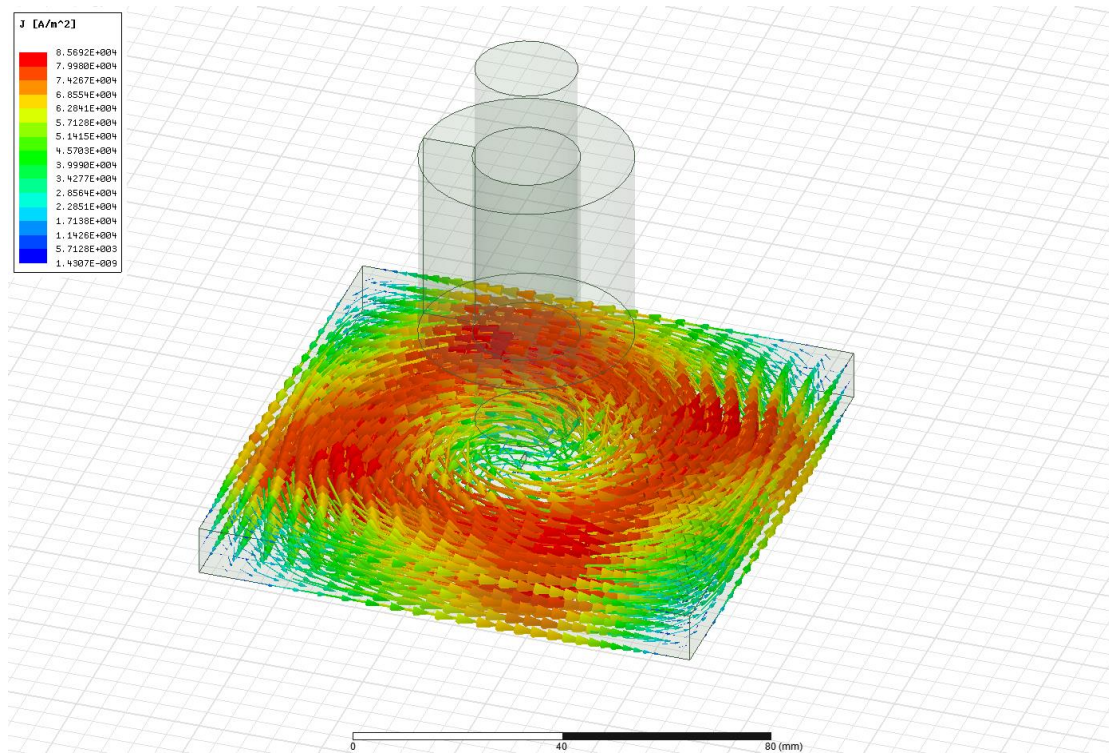
Σχήμα 2.3.3. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $X=0mm$)

Πίνακας 2.3.1. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $X=0mm$)

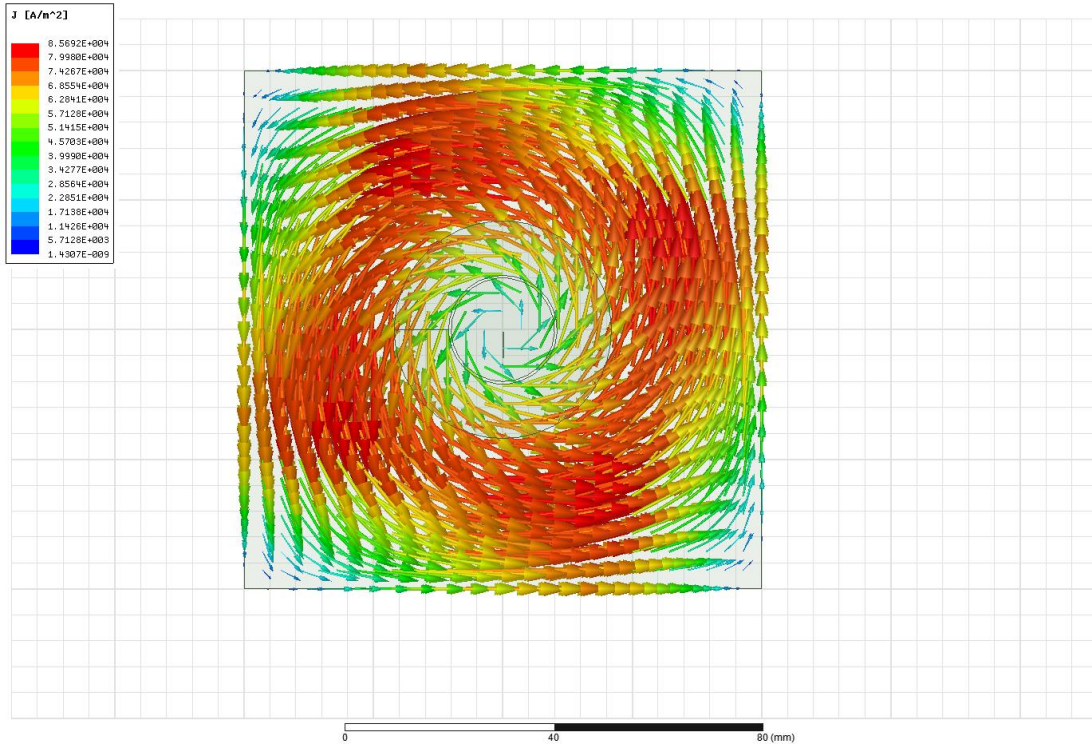
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.240184
80	5.885749
140	4.899236
200	4.395978

$X=3mm$

Για $X=3mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διονορεύματα.

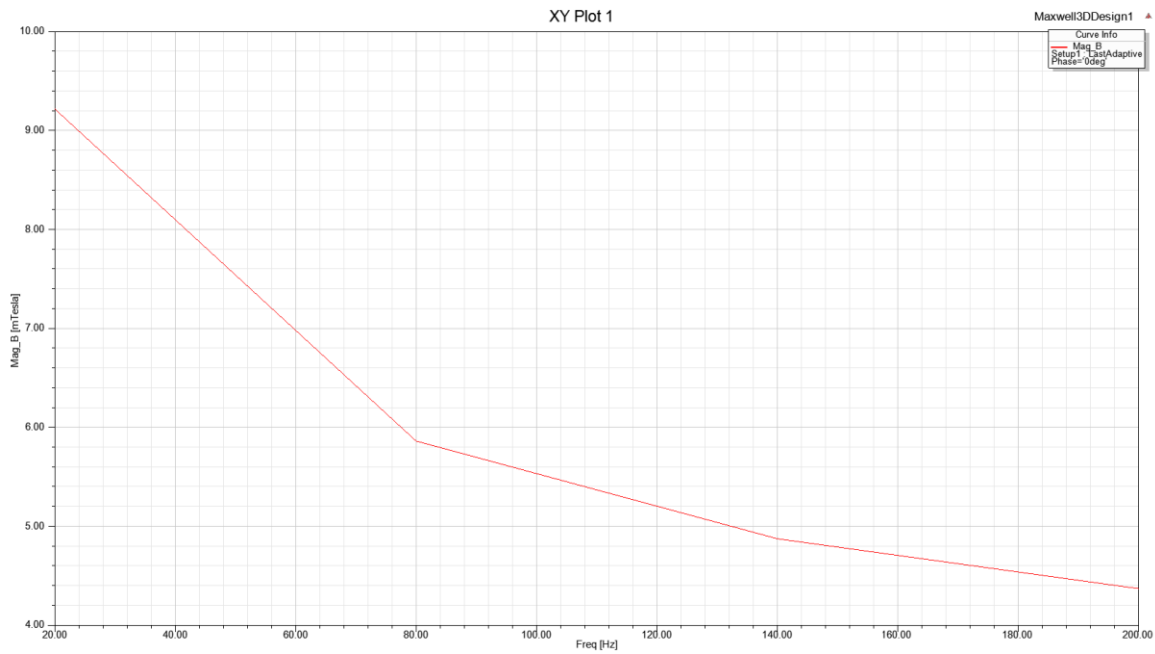


Σχήμα 2.3.4. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (Σενάριο 1, $X=3mm$)



Σχήμα 2.3.5. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου(Σενάριο 1, $\chi=3mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



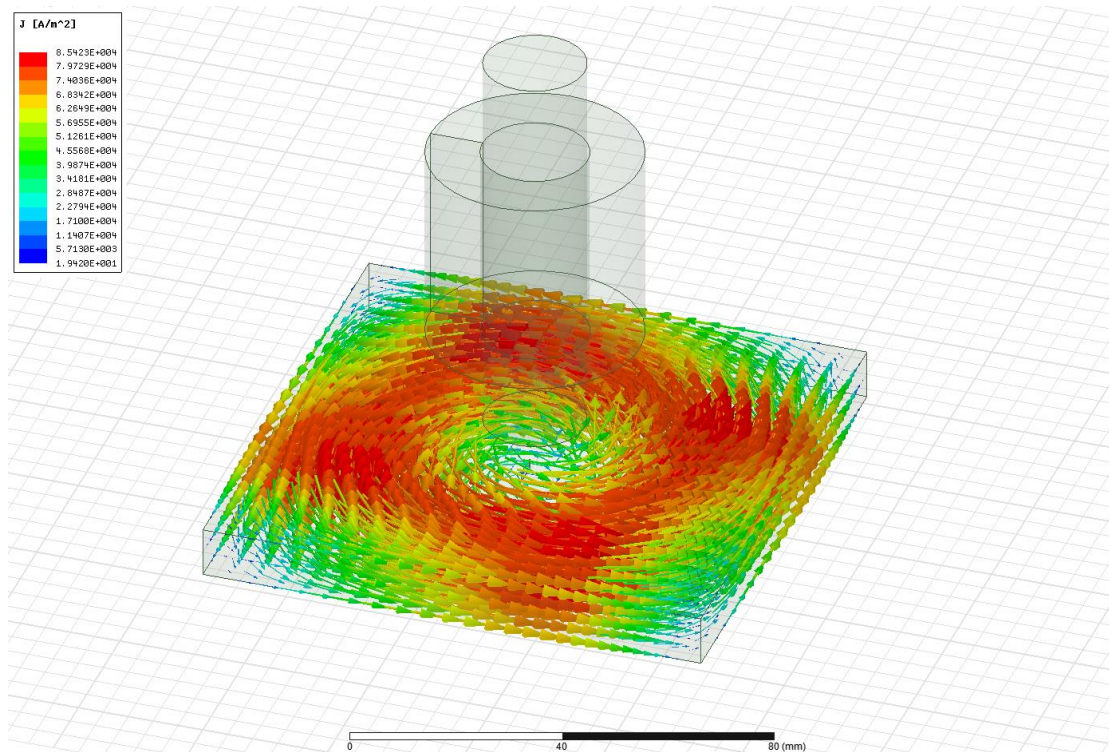
Σχήμα 2.3.6. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $\chi=3mm$)

Πίνακας 2.3.2. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $X=3mm$)

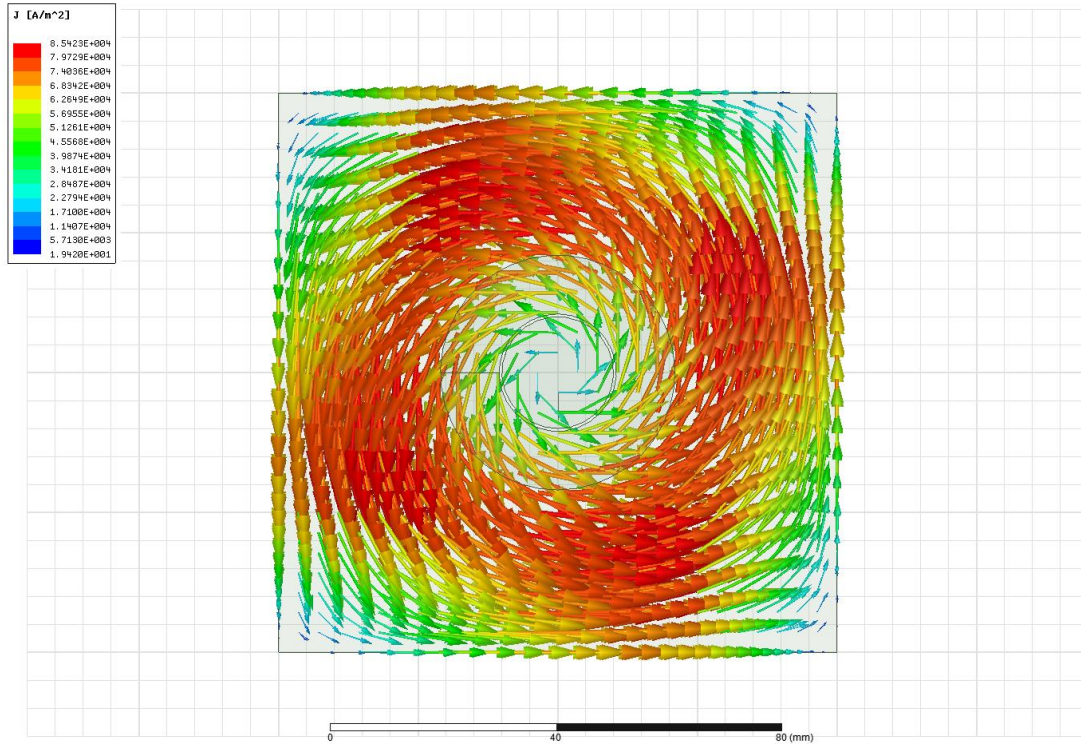
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.218303
80	5.864974
140	4.878074
200	4.374275

$X=6mm$

Για $X=6mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα.

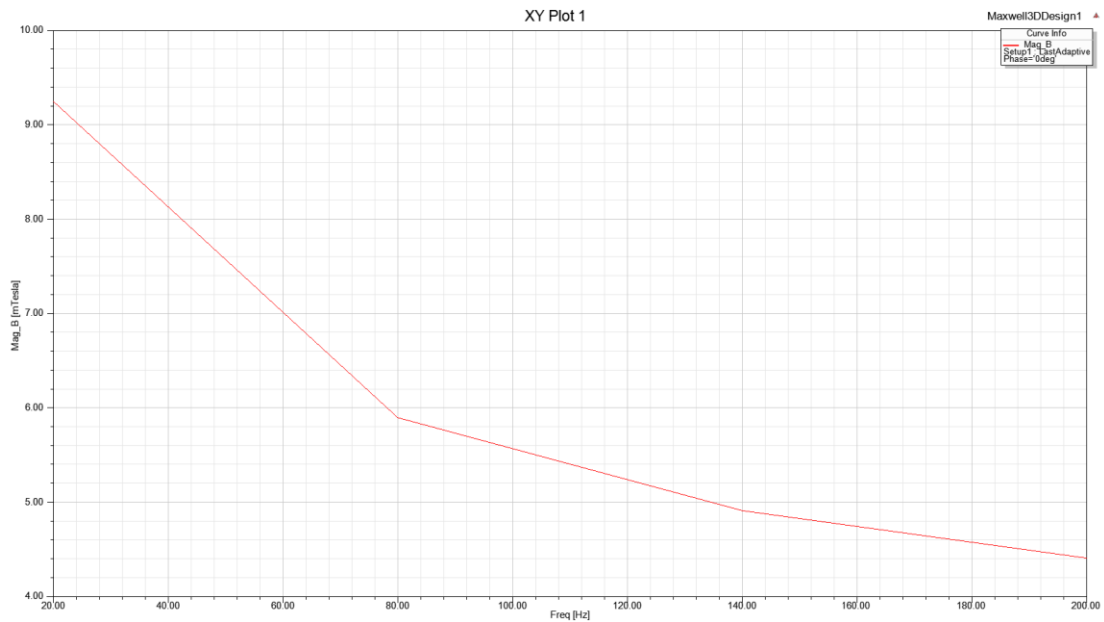


Σχήμα 2.3.7. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 1, $X=6mm$)



Σχήμα 2.3.8. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 1, $\chi=6mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



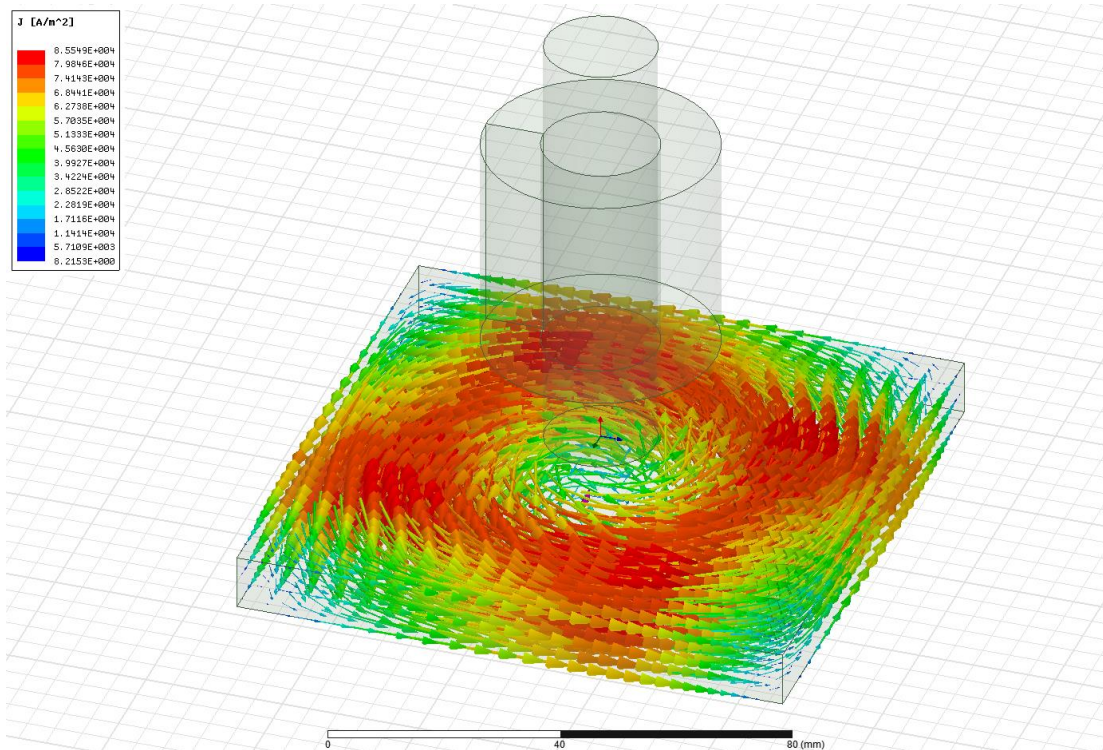
Σχήμα 2.3.9. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $\chi=6mm$)

Πίνακας 2.3.3. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $X=6mm$)

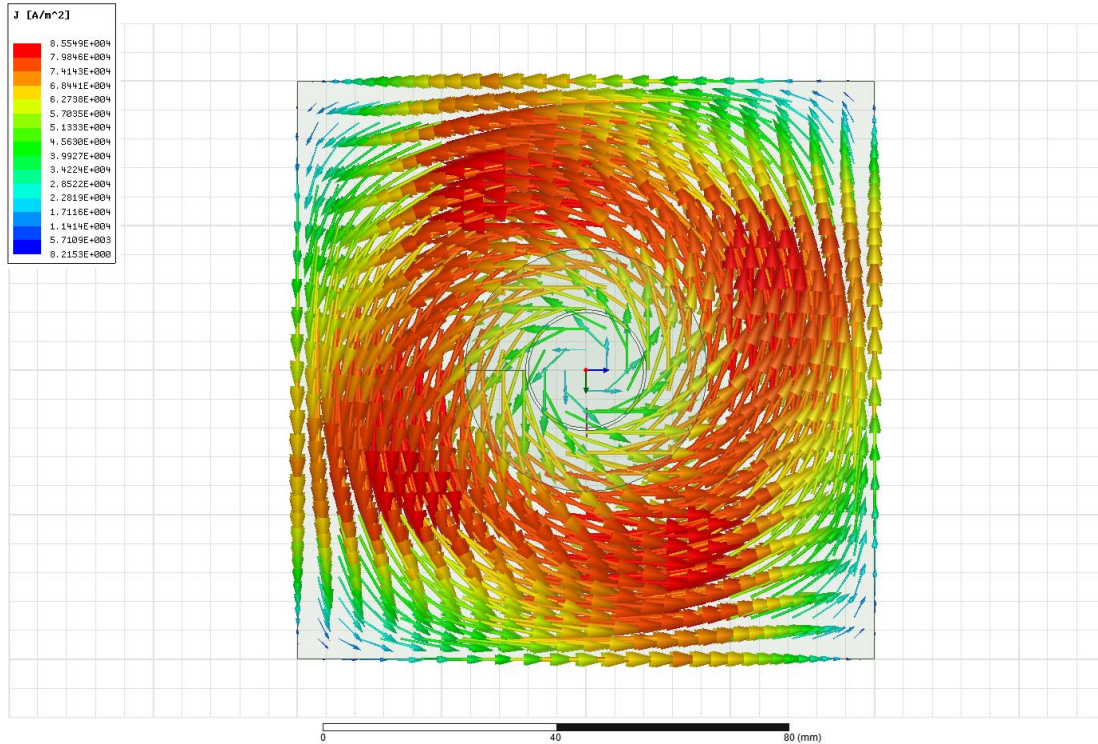
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.249503
80	5.899363
140	4.914722
200	4.412103

$X=9mm$

Για $X=9mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα.

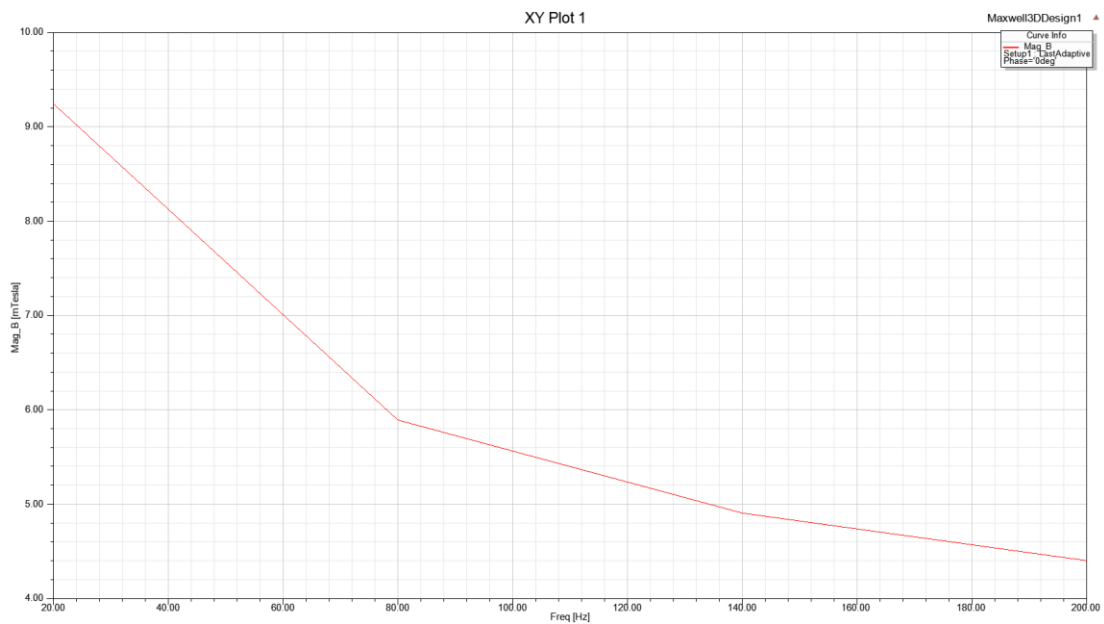


Σχήμα 2.3.10. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 1, $X=9mm$)



Σχήμα 2.3.11. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου (Σενάριο 1, $\chi=9mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



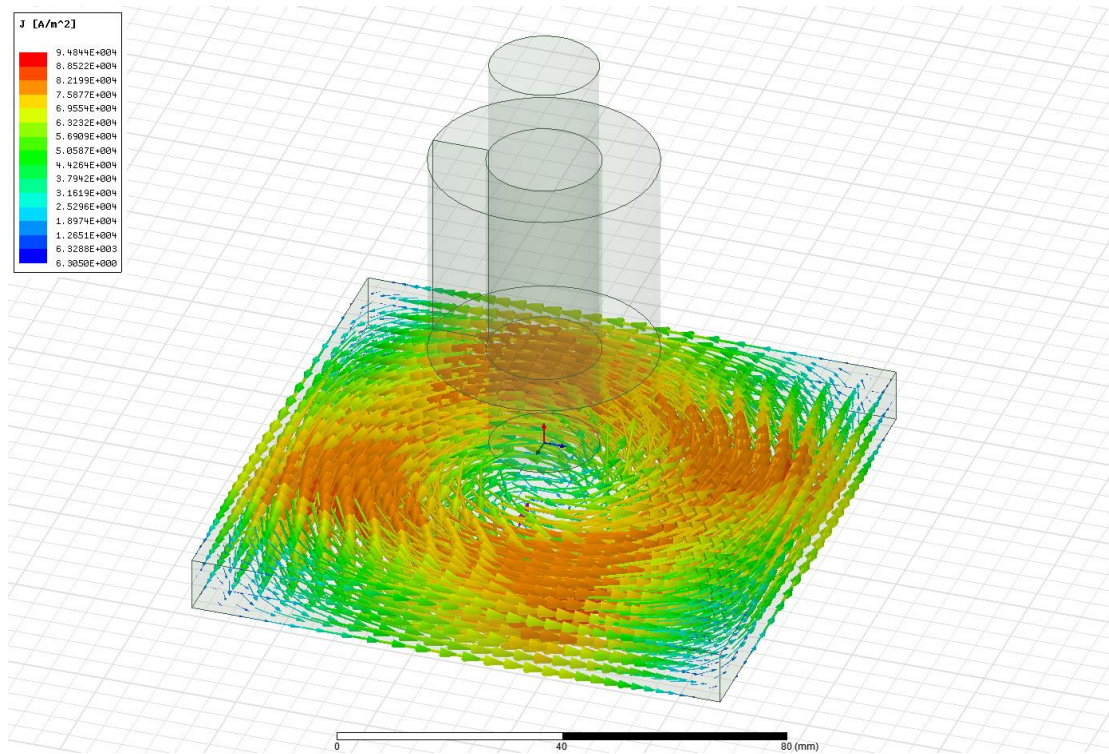
Σχήμα 2.3.12. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $\chi=9mm$)

Πίνακας 2.3.4. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $X=9mm$)

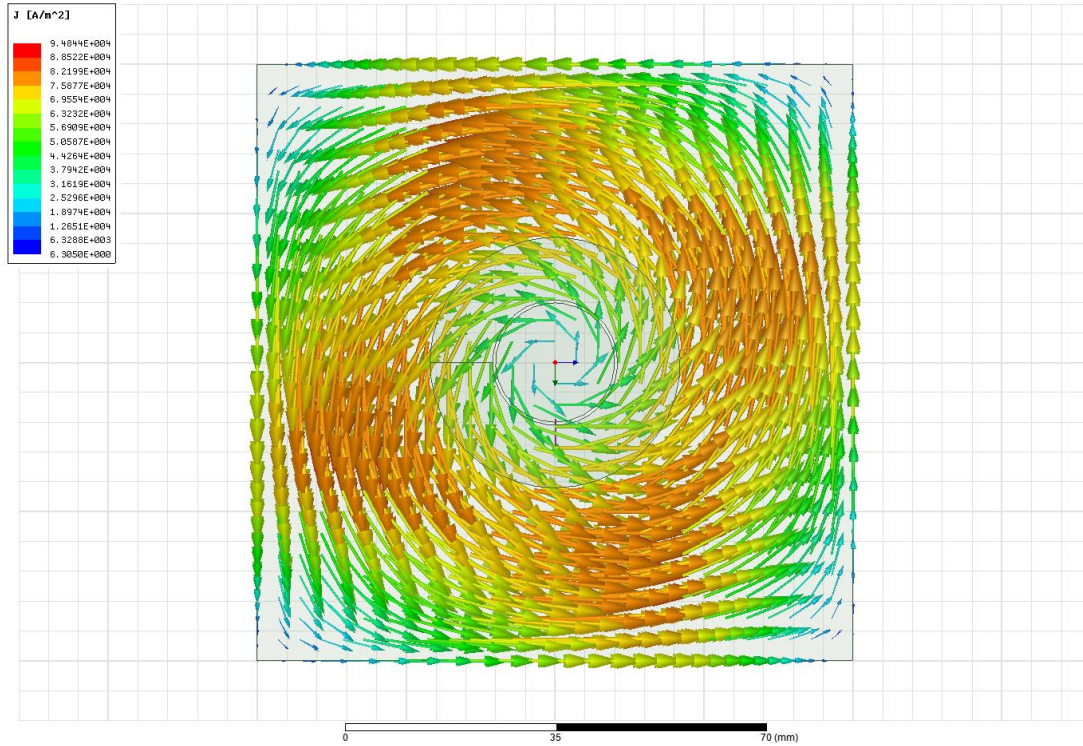
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.246182
80	5.895639
140	4.910058
200	4.406571

$X=12mm$

Για $X=12mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διανορεύματα.

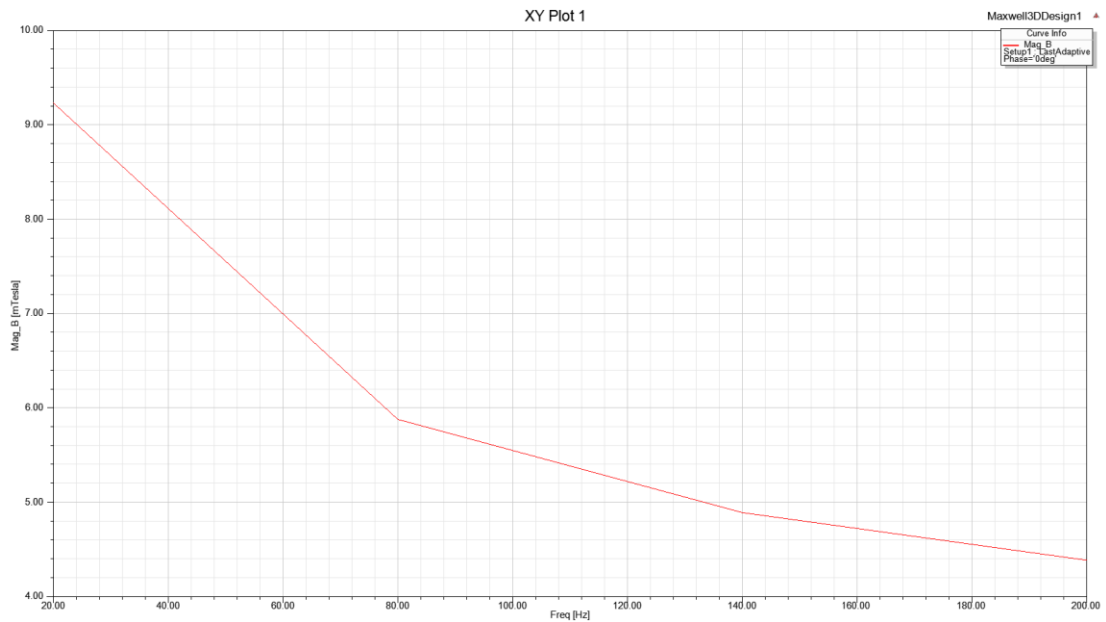


Σχήμα 2.3.13. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 1, $X=12mm$)



Σχήμα 2.3.14. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (Σενάριο 1, $\chi=12\text{mm}$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 2.3.15. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, $\chi=12\text{mm}$)

Πίνακας 2.3.5. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 1, X=12mm)

Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.233339
80	5.881140
140	4.894040
200	4.389602

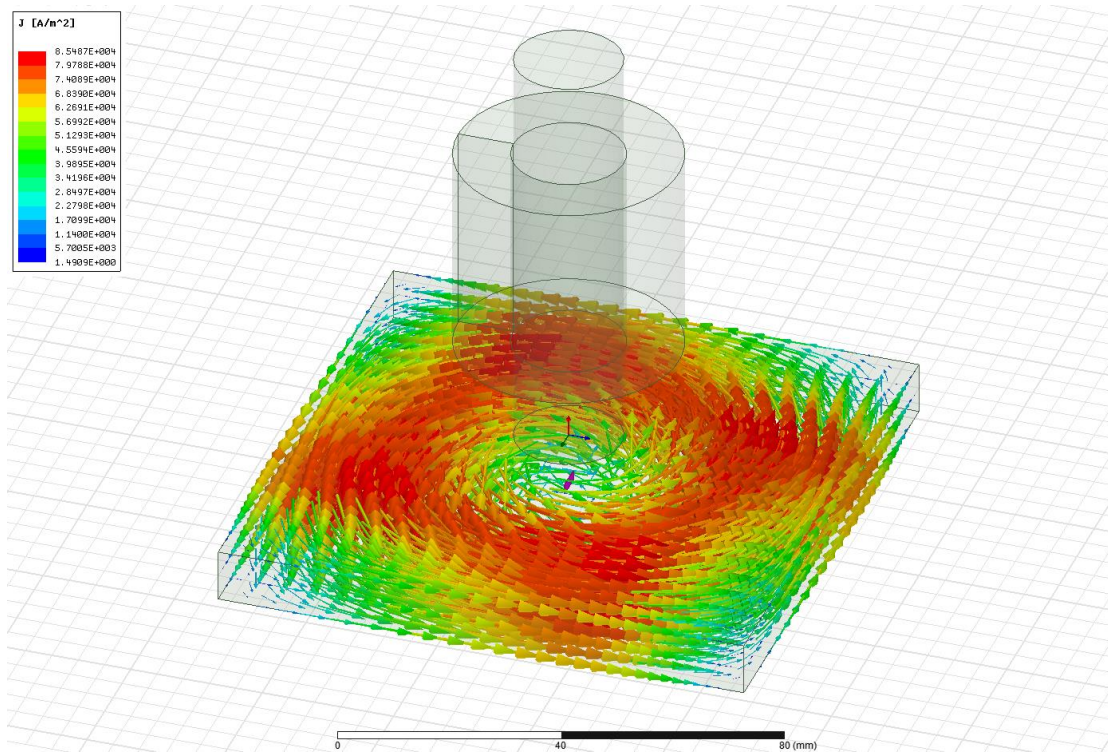
2.4 Σενάριο προσομοίωσης ρωγμής σε βάθος 5mm

Στο συγκεκριμένο σενάριο υπάρχει ρωγμή $5*2*0.1\text{mm}$, βάθους 5mm στο κέντρο της πλάκας.

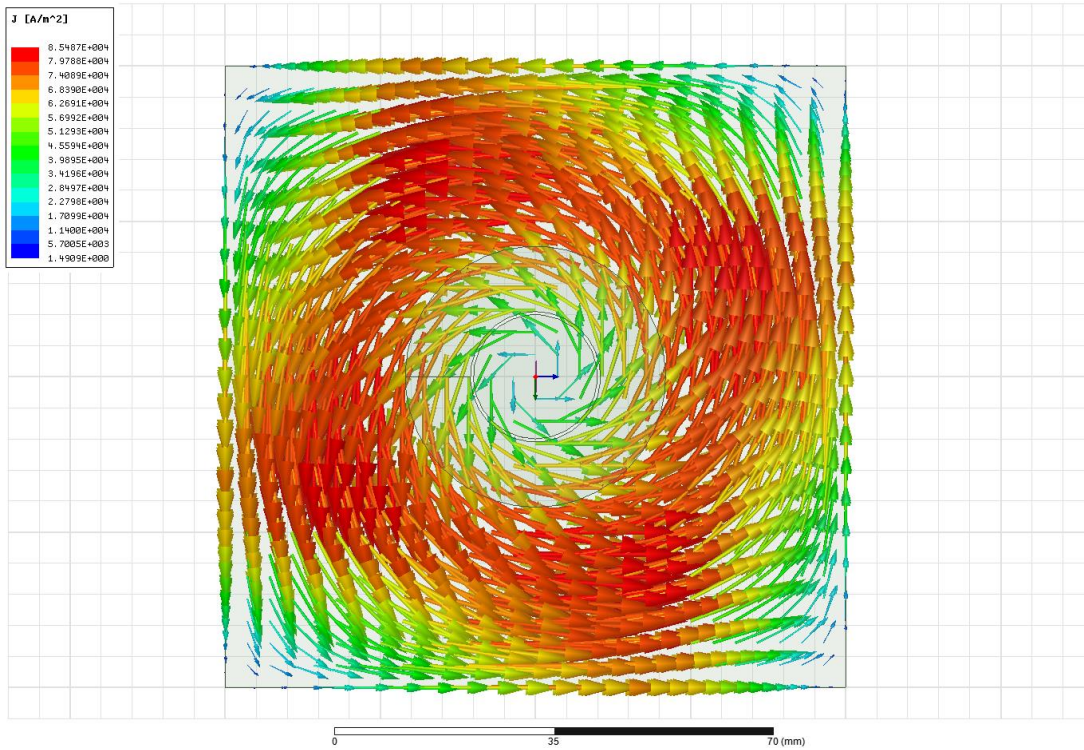
Ο αισθητήρας κατά αυτήν την προσομοίωση μετακινείται στον x άξονα και μετρείται το μαγνητικό πεδίο για αποστάσεις του αισθητήρα από την ρωγμή $X=0\text{mm}$, $X=3\text{mm}$, $X=9\text{mm}$ και $X=12\text{mm}$. Για λόγους ευκολίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μετακινήθηκε η ρωγμή και όχι ο αισθητήρας.

$X=0\text{mm}$

Για $X=0\text{mm}$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα.

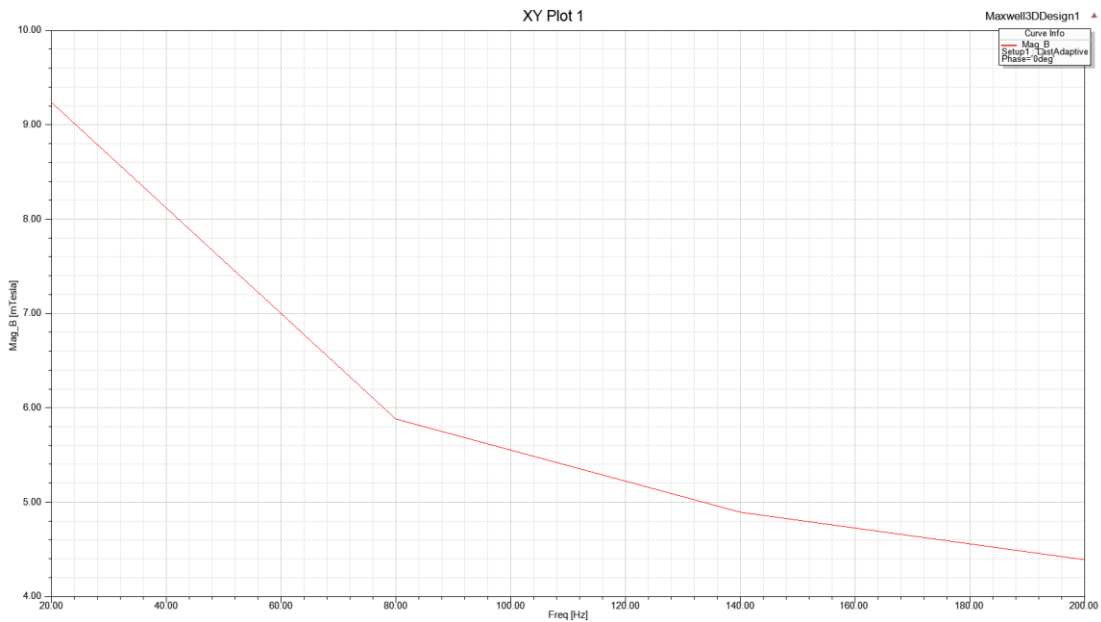


Σχήμα 2.4.1. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 2, $X=0\text{mm}$)



Σχήμα 2.4.2. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου(Σενάριο 2, $X=0mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



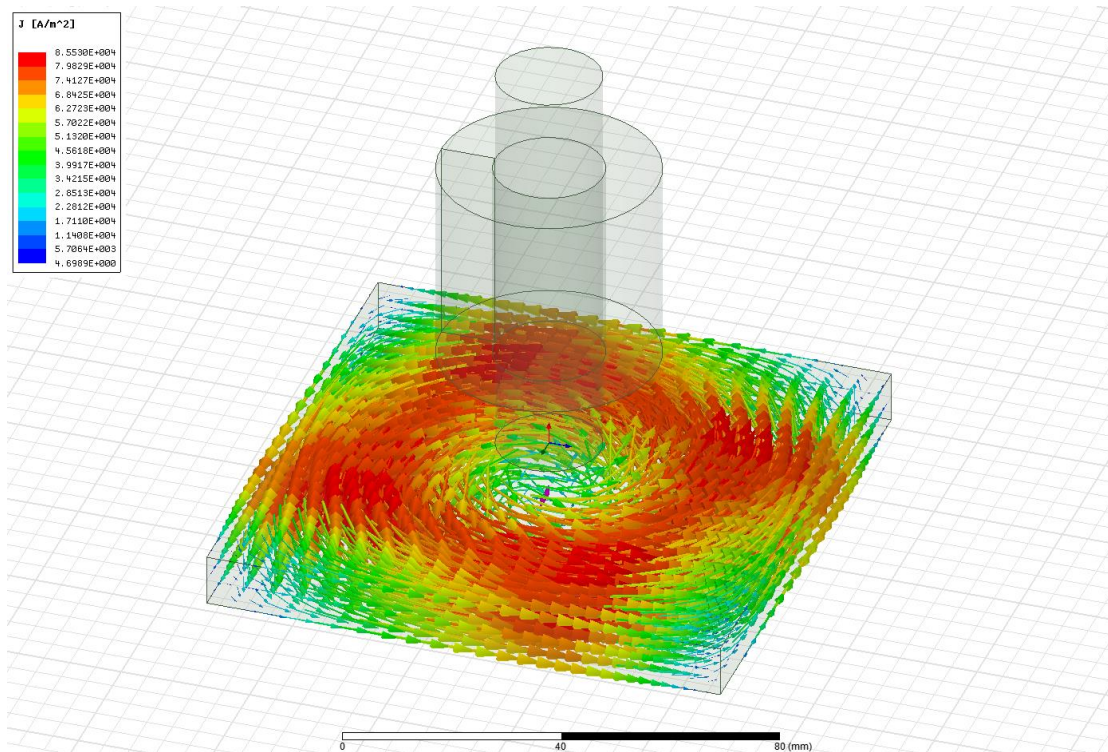
Σχήμα 2.4.3. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $X=0mm$)

Πίνακας 2.4.1. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $X=0$)

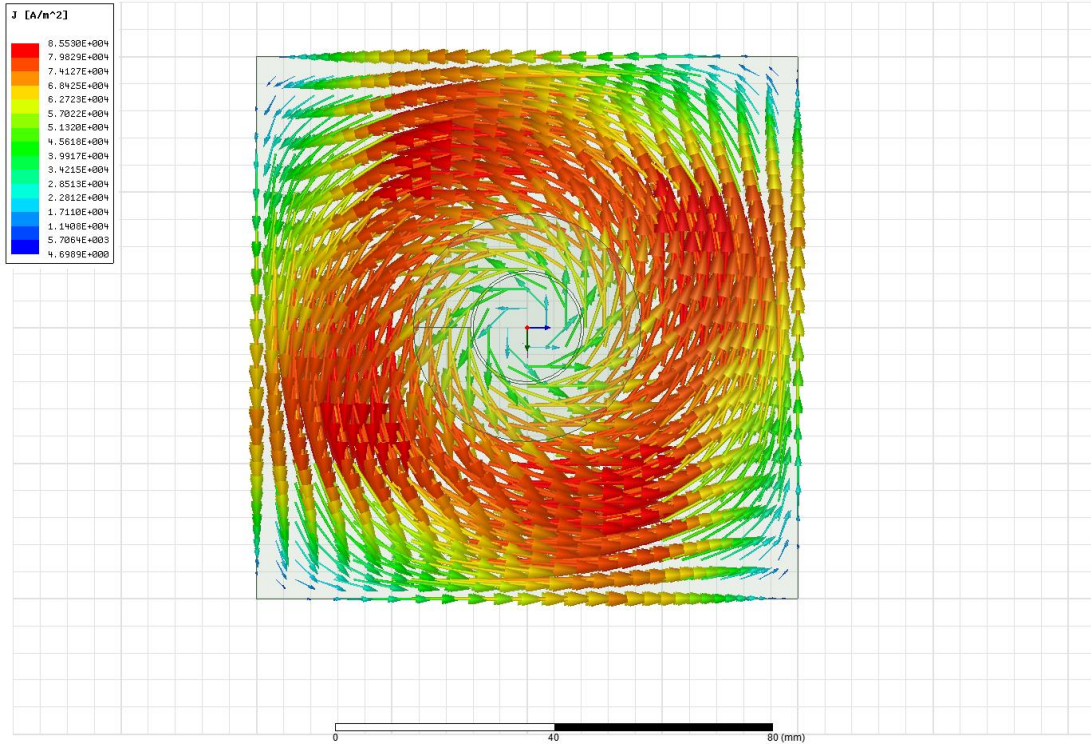
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.239959
80	5.885082
140	4.898093
200	4.394433

$X=3\text{mm}$

Για $X=3\text{mm}$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα.

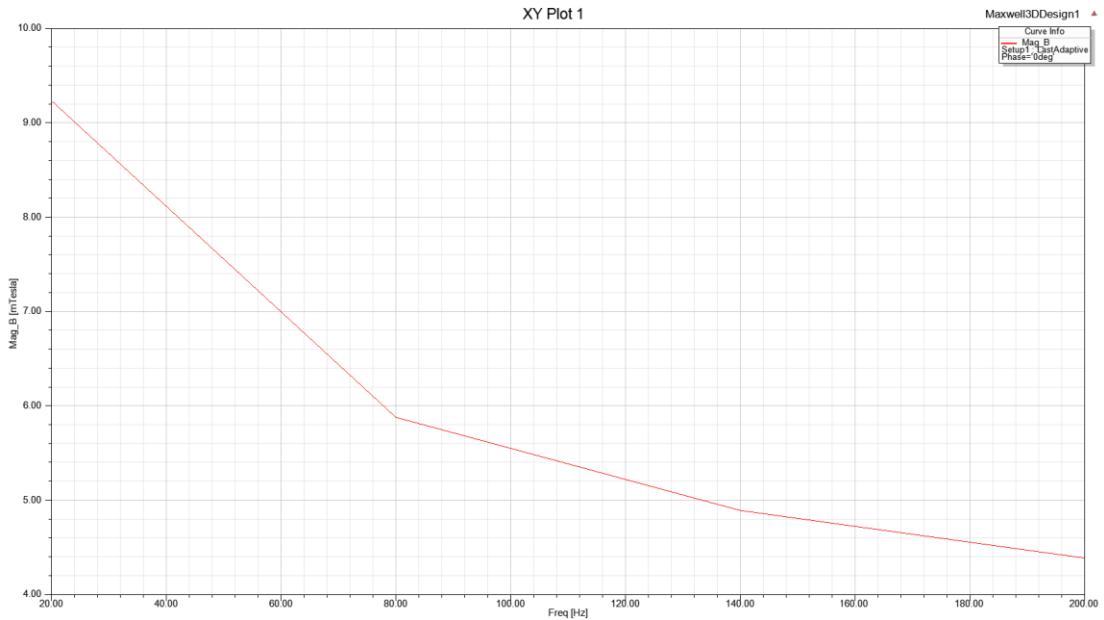


Σχήμα 2.4.4. Αναπαράσταση διανομών μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (Σενάριο 2, $X=3\text{mm}$)



Σχήμα 2.4.5. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου(Σενάριο 2, $\chi=3mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



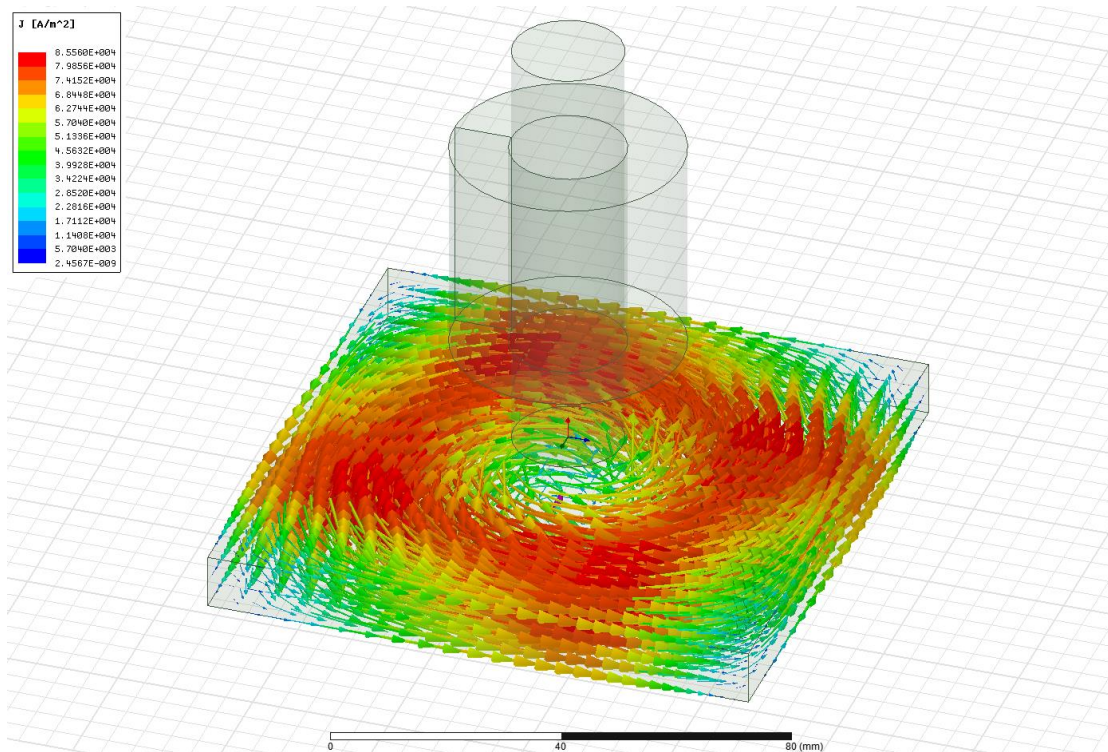
Σχήμα 2.4.6. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $\chi=3mm$)

Πίνακας 2.4.2. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $X=3mm$)

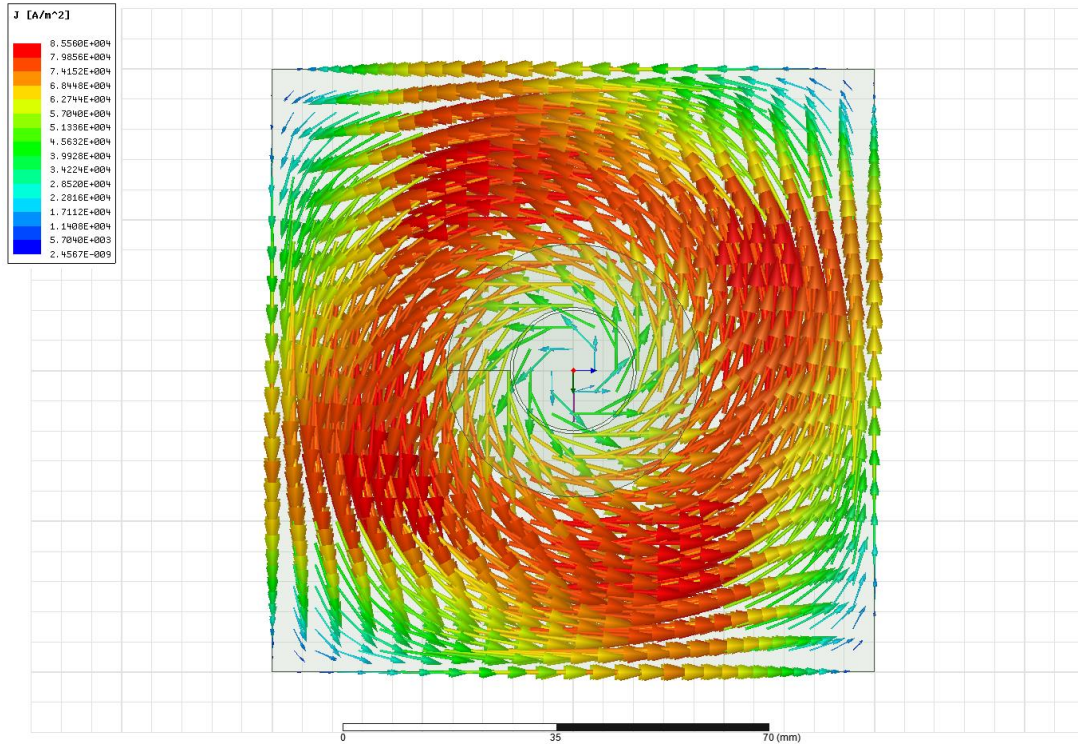
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (Tesla)
20	9.236703
80	5.882267
140	4.895126
200	4.391110

$X=6mm$

Για $X=6mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα.

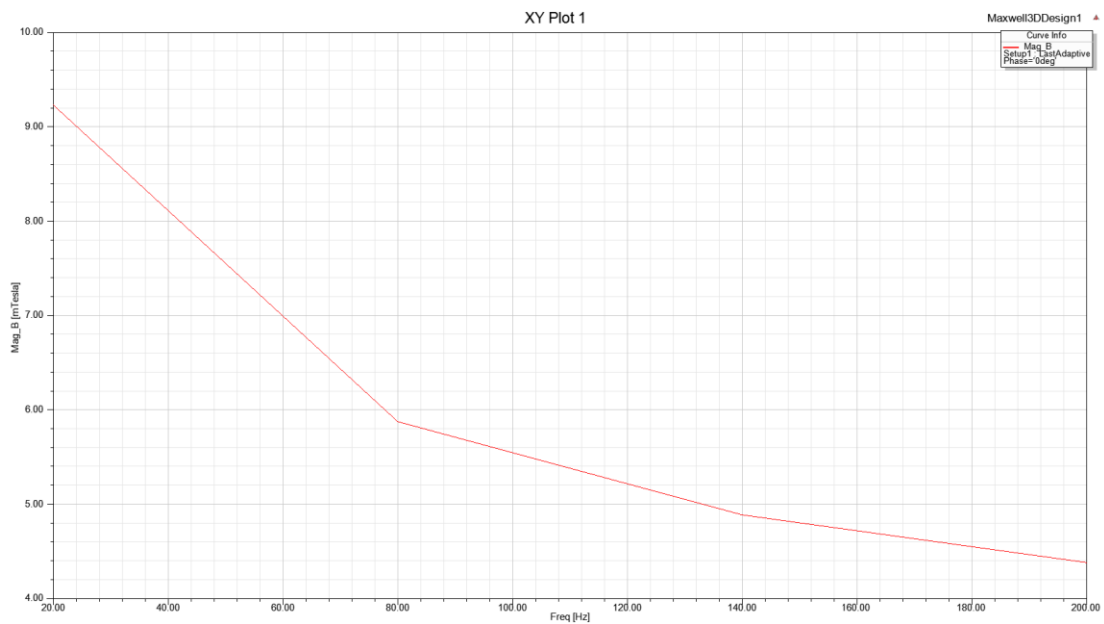


Σχήμα 2.4.7. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 2, $X=6mm$)



Σχήμα 2.4.8. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου(Σενάριο 2, $X=6mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



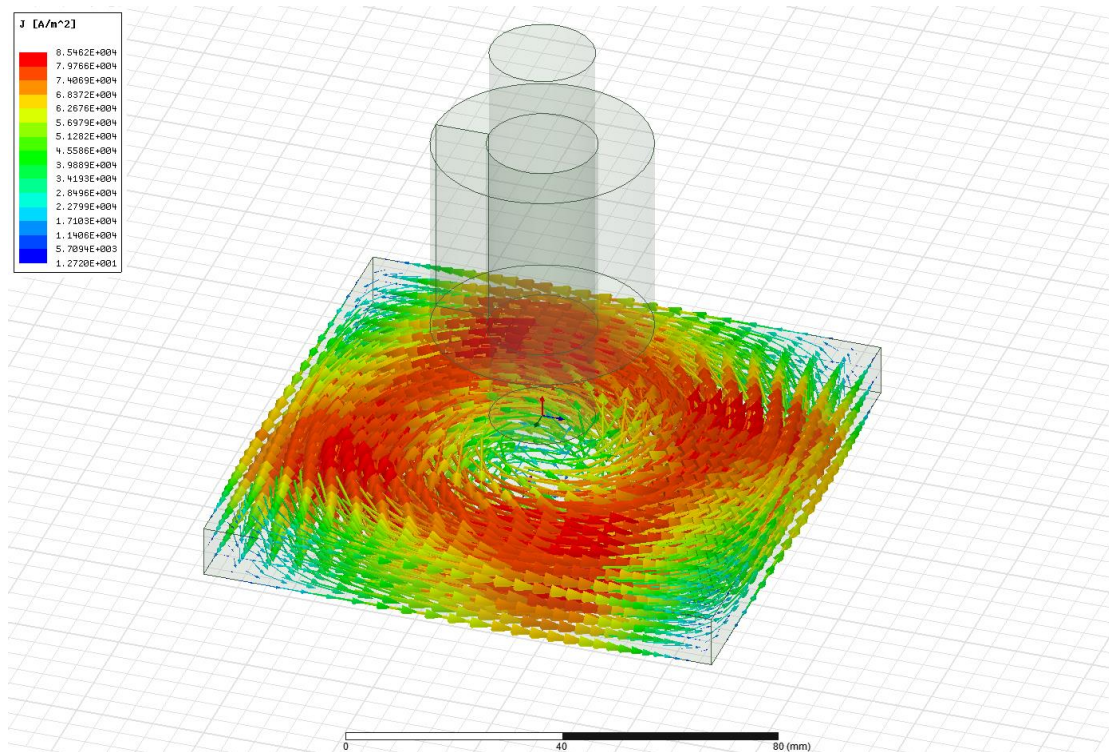
Σχήμα 2.4.9. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $X=6mm$)

Πίνακας 2.4.3. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $X=6mm$)

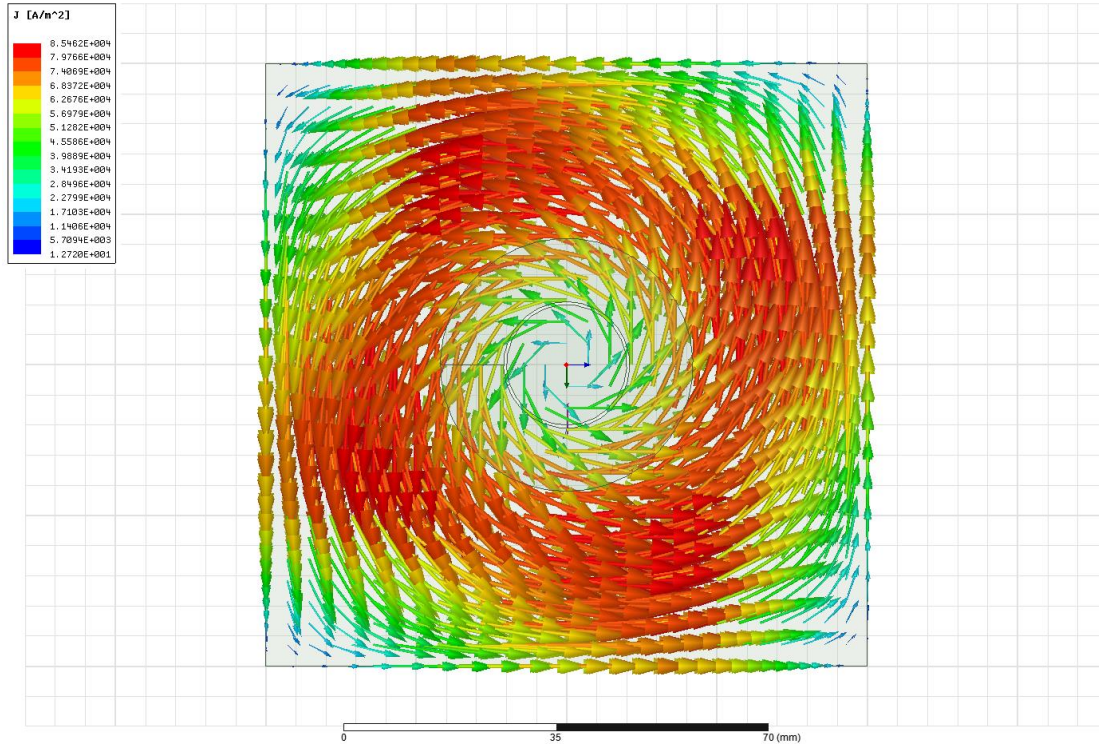
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.231918
80	5.878245
140	4.890757
200	4.386132

$X=9mm$

Για $X=9mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δινορεύματα.

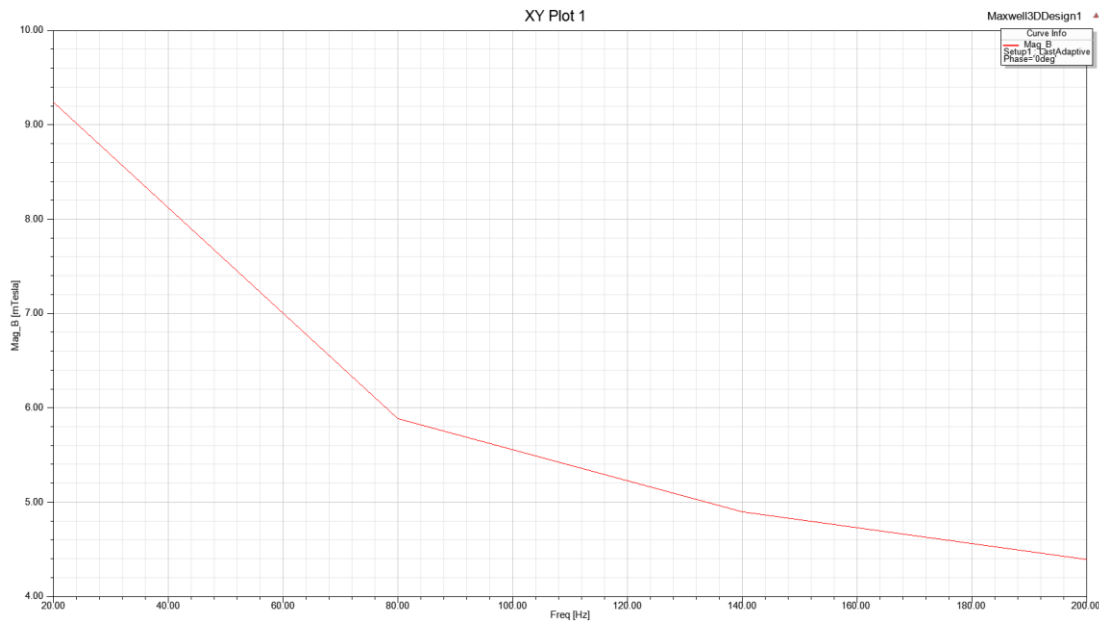


Σχήμα 2.4.10. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 2, $X=9mm$)



Σχήμα 2.4.11. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμινίου (Σενάριο 2, $\chi=9mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



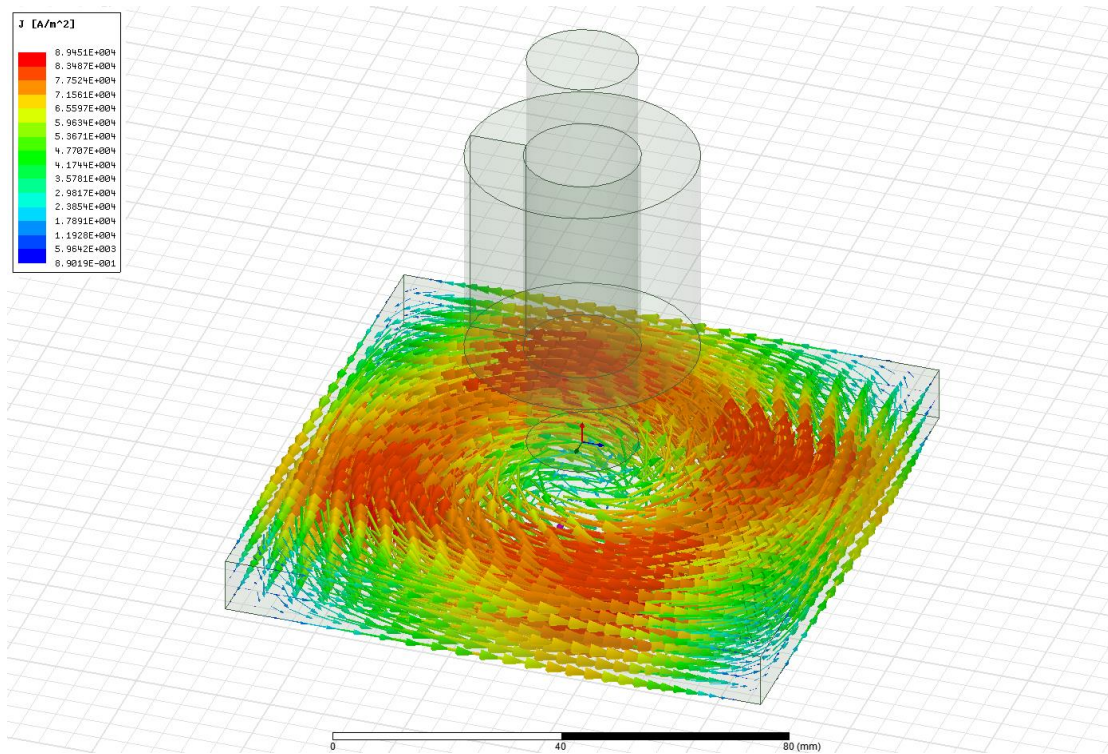
Σχήμα 2.4.12. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $\chi=9mm$)

Πίνακας 2.4.4. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $X=9mm$)

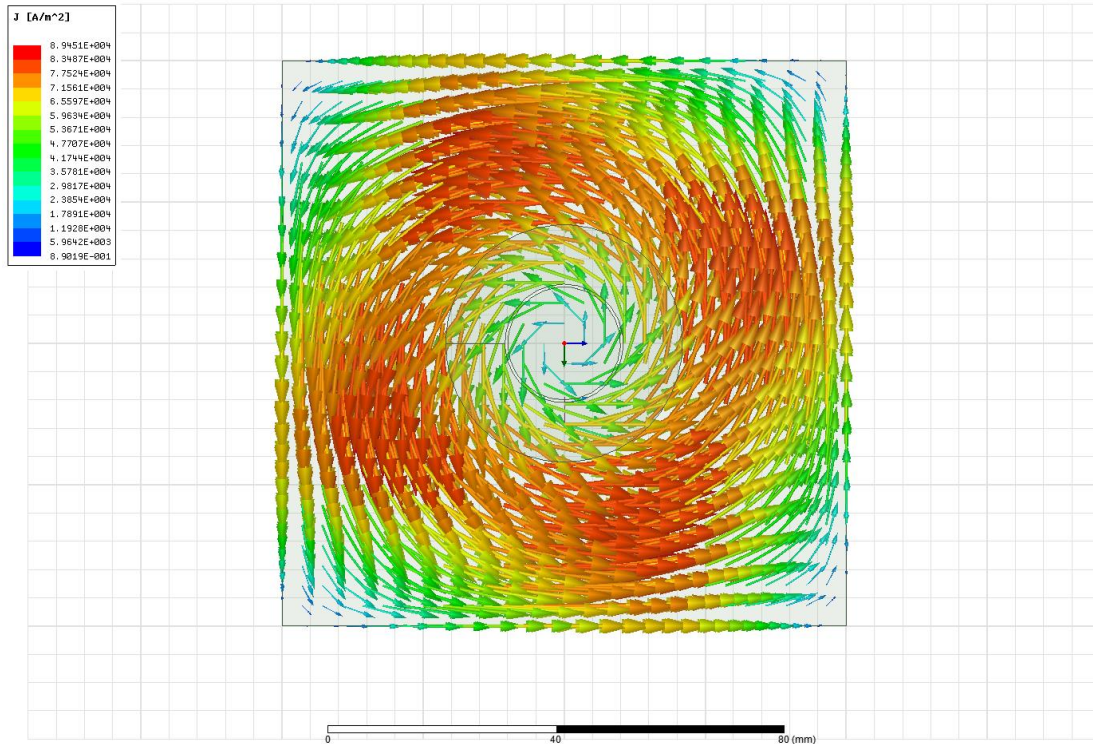
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.241539
80	5.889244
140	4.902181
200	4.397694

$X=12mm$

Για $X=12mm$ στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διανορεύματα.

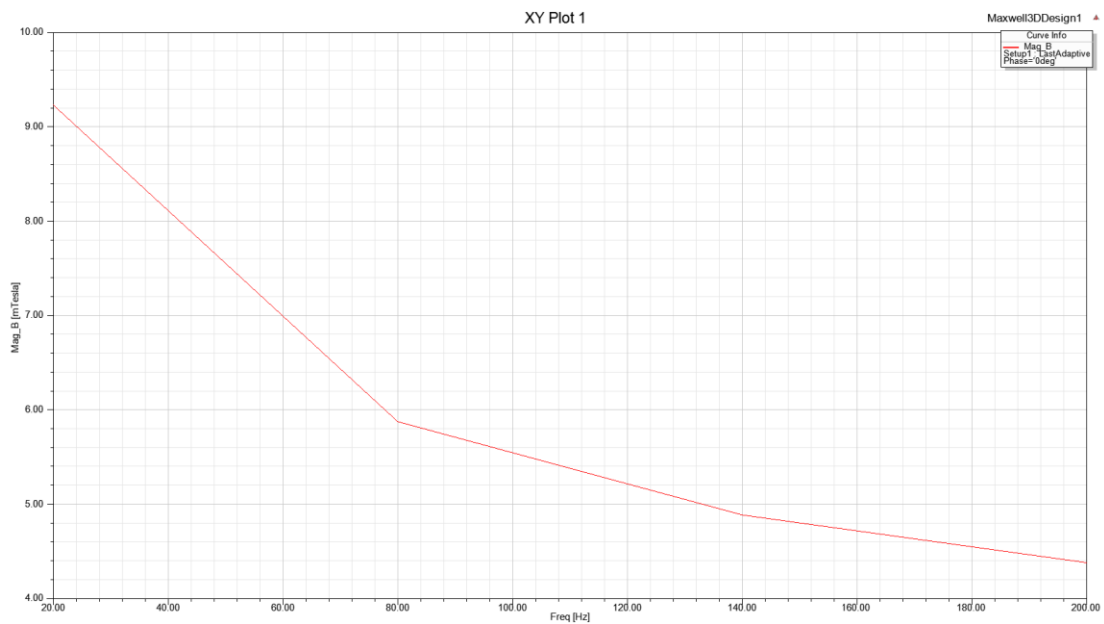


Σχήμα 2.4.13. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου(Σενάριο 2, $X=12mm$)



Σχήμα 2.4.14. Αναπαράσταση διανυσμάτων μαγνητικού πεδίου που παράγει ο αισθητήρας στην πλάκα αλουμίνιου (Σενάριο 2, $\chi=12mm$)

Στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση προέκυψε το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την συχνότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη και στον παρακάτω πίνακα.



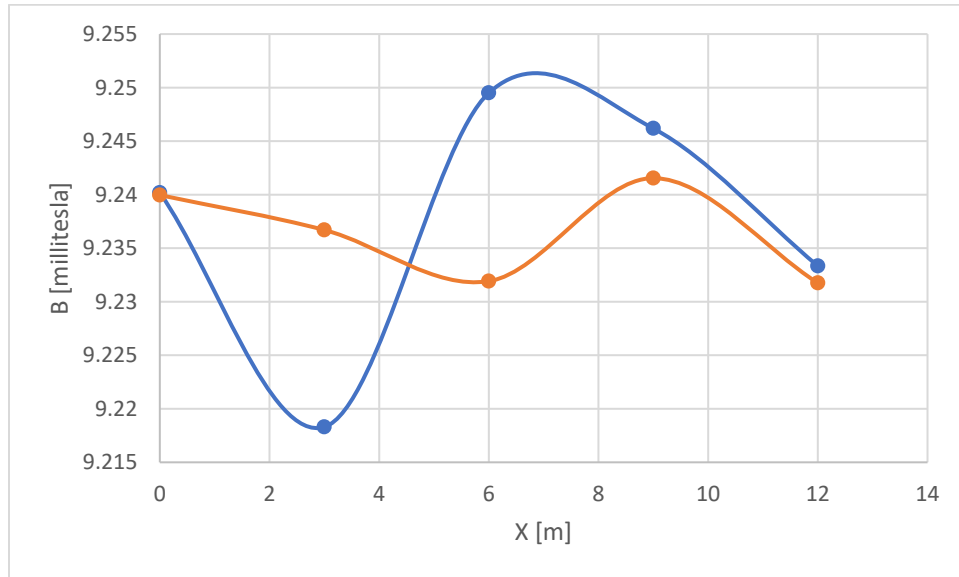
Σχήμα 2.4.15. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, $\chi=12mm$)

Πίνακας 2.4.5. Μαγνητικό πεδίο (Σενάριο 2, X=12mm)

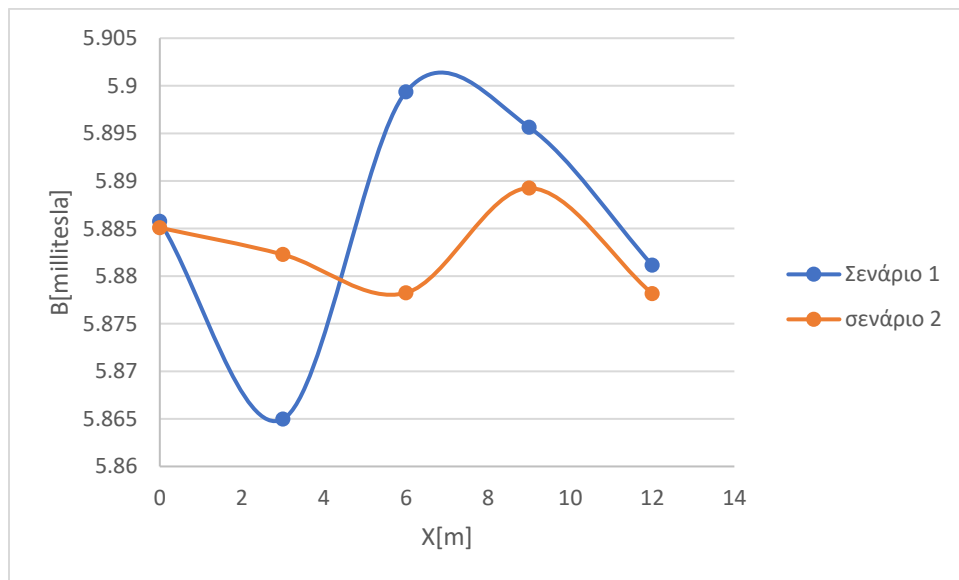
Συχνότητα (Hz)	Μαγνητικό πεδίο (millitesla)
20	9.231748
80	5.878151
140	4.889917
200	4.384858

2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης - Συμπεράσματα

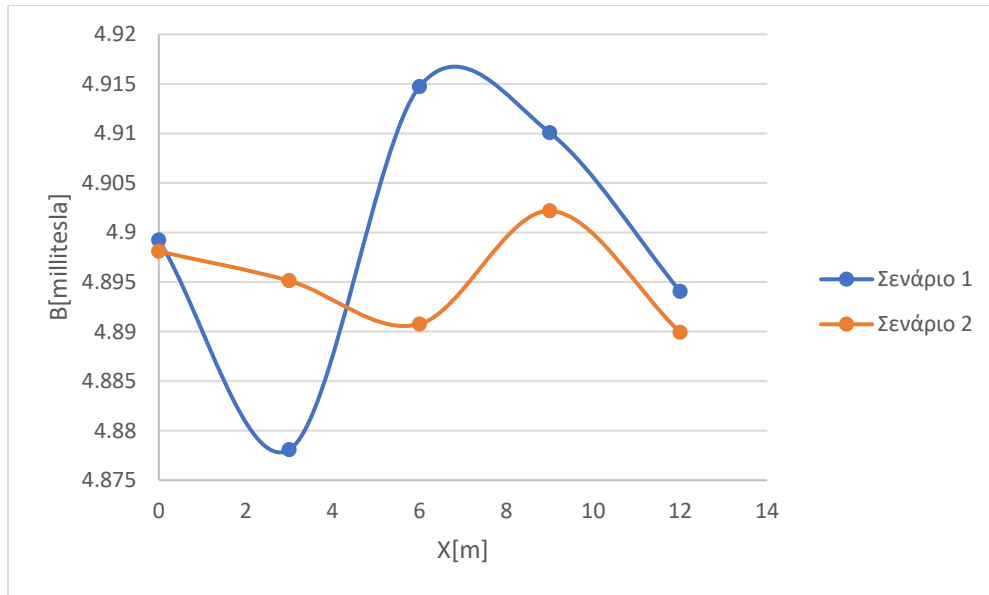
Συγκρίθηκαν οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου για αποστάσεις ρωγμής από τον αισθητήρα: $X=0\text{mm}$, $X=3\text{mm}$, $X=6\text{mm}$, $X=9\text{mm}$, $X=12\text{mm}$. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για τα 2 διαφορετικά σενάρια για κάθε συχνότητα και παρουσιάζεται στα παρακάτω σχεδιαγράμματα.



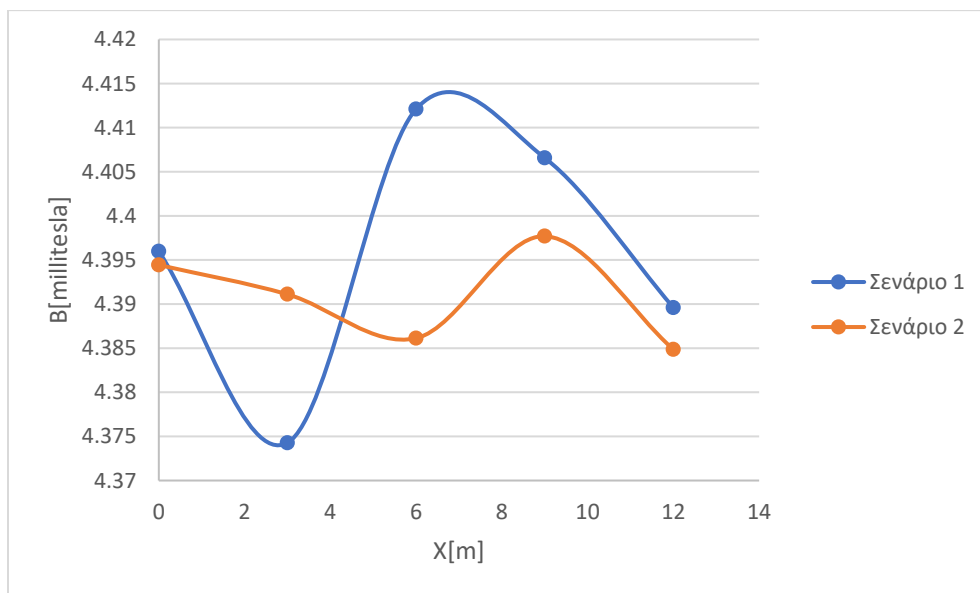
Σχήμα 2.5.1. 20 Hz μεταβολή μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την μετατόπιση X



Σχήμα 2.5.2. 80 Hz μεταβολή μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την μετατόπιση X



Σχήμα 2.5.3. 140 Hz μεταβολή μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την μετατόπιση X



Σχήμα 2.5.4. 200 Hz μεταβολή μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την μετατόπιση X

Στην συγκεκριμένη διπλωματική παρουσιάστηκε μια μέθοδος για την αξιολόγηση του βάθους των ρωγμών σε αλουμινένια πλάκα.

Στις καμπύλες παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφορετικές κορυφές ανάλογα με το αν η ρωγμή βρίσκεται σε βάθος 3mm ή 5mm (σχήματα 2.5.1.-2.5.4.).

Οπότε επαληθεύεται ότι το βάθος των ελαττωμάτων μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με το πλάτος του μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι όσο βαθύτερο είναι το

ελάττωμα τόσο μικρότερη είναι η τιμή του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου. Στα σημεία που υπάρχουν ρωγμές εμποδίζεται η ροή των δινορευμάτων με αποτέλεσμα σε εκείνο το σημείο το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που παράγεται να μην είναι αρκετά ισχυρό.

Η προσομοίωση που σχεδιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία επιβεβαίωσε τα θεωρητικά αποτελέσματα σχετικά με τον εντοπισμό των ρωγμών σε μεταλλικές επιφάνειες. Όμως οι μη καταστροφικές δοκιμές συνεχώς εξελίσσονται και η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να συνεχιστεί στο μέλλον είτε μελετώντας τη συμπεριφορά ενός διαφορετικού τύπου αισθητήρα ή/και τον εντοπισμό του μήκους μιας ρωγμής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των δινορευμάτων.

Βιβλιογραφία – Bibliography

- [1] David J. Introduction to magnetism and magnetic materials. Boca Raton CRC Press, Taylor & Francis Group (2016).
- [2] “A Dictionary of Physics.” Oxford University Press (2009).
- [3] Poyser A.W. Magnetism and Electricity: A Manual for Students in Advanced Classes. Longmans, Green, & Company (1892).
- [4] “VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field.” Philosophical Transactions of the Royal Society of London Vol. 155 (1865).
- [5] Jackson J.D., Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons (1999).
- [6] Shevkoplyas S.S., Siegel A.C., Westervelt R.M., Prentiss M.G., and Whitesides G.M. “The force acting on a superparamagnetic bead due to an applied magnetic field.” Lab on a chip Vol. 7 No. 10 (2007): pp. 1294–1302. DOI 10.1039/b705045c
- [7] Coey, J. M. D. “Magnetism and Magnetic Materials.” (2012). DOI 10.1017/CBO9780511845000.
- [8] J.H. Espina-Hernández, E. Ramírez-Pacheco, F. Caleyó, J.A. Pérez-Benitez, and J.M. Hallen. Rapid estimation of artificial near-side crack dimensions in aluminium using a gmr-based eddy current sensor. NDT & E International, 51(1):94–100, 2012.
- [9] C. Mandachea and J.H.V. Lefebvre. Transient and harmonic eddy currents: Lift-off point of intersection. NDT & E International, 39(1):57–60, 2006.
- [10] A. Lopes Ribeiro, H. Geirinhas Ramos, and J. Couto Arez. Liftoff insensitive thickness measurement of aluminum plates using harmonic eddy current excitation and a gmr sensor. Measurement, 45(9):2246–2253, 2012.
- [11] Y. He, F. Luo, M. Pan, F. Weng, X. Hu, J. Gao, and B. Liu. Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures. NDT & E International, 43(2):176–181, 2010.
- [12] D.F. He, M. Shiwa, J.P. Jia, J. Takatsubo, and S. Moriya. Multi-frequency ect with amr sensor. NDT & E International, 44(5):438–441, 2011.
- [13] S. Yang, Y. Sun, L. Upda, S. S. Upda, and W. Lord. 3d simulation of velocity induced fields for nondestructive evaluation application. IEEE Transactions on Magnetics, 35(3):1754–1756, May 1999.
- [14] H. G. Ramos, T. Rocha, D. Pasadas, and A. L. Ribeiro. Velocity induced eddy currents technique to inspect cracks in moving conducting media. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, pages 931–934, May 2013.
- [15] A. Bernieri, G. Betta, and L. Ferigno. Characterization of an eddy-current-based system for nondestructive testing. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 51(2):241–245, 2002.
- [16] A. L. Ribeiro and H. G. Ramos. Inductive probe for flaw detection in non-magnetic metallic plates using eddy currents. IEEE Instr. & Meas. Tech, I2MTC, pages 1447–1451, 2008.

- [17] K. Kosmas, Ch. Sargentis, D. Tsamakis, and E. Hristoforou. Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using hall sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 161(1–2):359–362, 2005.
- [18] Pavel Ripka. Advances in fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 106(1–3):8–14, 2003.
- [19] P. Ripka, M. Vop`alensk`y, A. Platil, M. D`oscher, K. Lenssen, and H. Hauser. Amr magnetometer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254:639–641, 2003.
- [20] T. Dogaru and S.T. Smith. Giant magnetoresistance-based eddy current sensor. *IEEE Trans. Magnetics*, 37(5):3831–3838, 2001.
- [21] O. Postolache, A. Ribeiro, and H. Ramos. Uniform eddy current probe based on gmr sensor array and image processing for ndt. pages 458–463, May 2012.
- [22] Chris Carr, David Graham, John C Macfarlane, and Gordon B Donaldson. Recent developments in squid nde. *Physica*, 16(12):1387–1390, 2003.
- [23] R. Nagendran, N. Chinnasamy, M.P. Janawadkar, R. Baskaran, L.S. Vaidhyanathan, and C.S. Sundar. Optimum eddy current excitation frequency for subsurface defect detection in squid based non-destructive evaluation. *NDT & E International*, 43(8):713–717, 2010.
- [24] Helena G. Ramos and A. Lopes Ribeiro. Present and future impact of magnetic sensors in NDE 2014.
- [25] D. Pasadas, T. Rocha, H. G. Ramos, and A. L. Ribeiro. Evaluation of portable ect instruments with positioning capability. *Measurement*, 45(1):393–404, 2012.
- [26] Carl H. Smith and Robert W. Schneider. Low-field magnetic sensing with gmr sensors. *Nonvolatile Electronics, Inc.*, pages 1361–1366, 1999.
- [27] B.P.C. Rao. *Practical Eddy Current Testing*. Indian Society for Non-Destructive Testing, 2007 ISBN:978-1842652992.
- [28] H. Ramos, O. Postolache, F. Alegria, and A. Ribeiro. Using the skin effect to estimate cracks depths in mettalic structures. *IEEE Instr. & Meas. Tech, I2MTC*, pages 1361–1366, 2009.
- [29] Albrecht Jander, Carl Smith, and Robert Shneider. Magneto-resistive sensors for nondestructive evaluation. *Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*.