



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«Συστήματα Αυτοματισμού»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Έλεγχος ατελειών σε χάλυβα ορθογωνικών διατομών  
με αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας**

Δημήτρης Παπασίμπας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Αθήνα, 2023





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«Συστήματα Αυτοματισμού»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Έλεγχος ατελειών σε χάλυβα ορθογωνικών διατομών  
με αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας**

Δημήτρης Παπασίμπας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Σπυρίδων Αγγελόπουλος  
Διδάκτωρ ΕΜΠ

Κλειώ Βόσσου  
Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, 2023



## Περίληψη

Ο χάλυβας ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλους τους τομείς βιομηχανικής δραστηριότητας των σύγχρονων οικονομιών και πιο συγκεκριμένα στην αυτοκινητοβιομηχανία, στον τομέα των κατασκευών, της ενέργειας, της ναυτιλίας, της συσκευασίας και της κατασκευής ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Επίσης, αποτελεί το κύριο υλικό για την κατασκευή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ηλιακών αιολικών πάρκων, ενώ χρησιμοποιείται και στην παραγωγή αγωγών μεταφοράς ενεργειακών προϊόντων π.χ. φυσικού αερίου, πετρελαίου κλπ. (Worldsteel association, 2015)

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κατασκευαστικός τομέας, συμπεριλαμβανομένων και των ειδών οικιακού εξοπλισμού, απορροφά το 50% της ετησίως παραγόμενης ποσότητας χάλυβα ενώ υπολογίζεται ότι μέχρι το 2050 η παγκόσμια παραγωγή ανά έτος, σχεδόν θα διπλασιαστεί ακολουθώντας την υψηλή ζήτηση ενός διαρκώς αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού (World Steel Association, 2015).

Από τα παραπάνω είναι εύκολο να συμπεράνουμε πως ο μη καταστροφικός έλεγχος των μετάλλων και της καταπόνησης αυτών, τόσο κατά την παραγωγή τους αλλά και την συντήρησή τους αποτελεί σημαντικό ρόλο για πολλούς τομείς .

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία θα γίνει μια πειραματική διάταξη, για να μελετηθεί μια προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου χαλύβων ορθογωνικών διατομών, μέσω της ανάπτυξης ενός Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον Αισθητήρα Μαγνητική Διαπερατότητας έγιναν στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π .

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσονται θέματα θεωρίας γύρω από τα φαινόμενα που συναντώνται κατά την πειραματική διαδικασία. Γενικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, πιο εξειδικευμένες ιδιότητες των φερρομαγνητικών υλικών, ορισμένα θέματα αισθητήρων και ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν στην πειραματική διαδικασία.

Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες βασικές έννοιες για την καλύτερη κατανόηση των εναπομενουσών τάσεων και των μη καταστροφικών ελέγχων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιοι από τους βασικούς μαγνητικούς αισθητήρες, καθώς και η αρχή λειτουργίας καθενός από αυτούς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και η διάταξη του αισθητήρα, περιγράφεται η λειτουργία, καθώς και η κατασκευή του.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία του πειράματος, ακολουθούμενες από την διαγραμματική παρουσίαση των μετρήσεων, η ανάλυση των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα.



# Abstract

Steel, as a raw material, is used in almost all sectors of industrial activity in modern economies. Specifically, it is utilized in the automotive industry, construction sector, energy industry, shipping, packaging, and the manufacturing of electrical and electronic equipment. It is also the primary material for the construction of renewable energy sources such as solar and wind parks, and it is used in the production of energy transportation pipelines for natural gas, oil, etc. (Worldsteel Association, 2015).

It is worth noting that the construction sector, including household appliances, accounts for 50% of the annual steel production. Furthermore, it is estimated that global annual production will nearly double by 2050, driven by the high demand from a continuously growing global population (World Steel Association, 2015).

From the above, it is evident that non-destructive testing of metals and their degradation plays a significant role in many industries, both during their production and maintenance.

In this master's thesis, an experimental setup will be developed to study a proposed method for testing rectangular steel sections using a Magnetic Permeability Sensor. The design, construction, and measurements with the Magnetic Permeability Sensor were conducted at the Electronic Sensors Laboratory, of the School of Electrical and Computer Engineering, at the National Technical University of Athens (NTUA).

The first chapter covers theoretical topics related to the phenomena encountered in the experimental process. It discusses the general principles of electromagnetism, specialized properties of ferromagnetic materials, some sensor-related issues, and properties of the materials involved in the experimental process. The second and third chapters provide an overview of basic concepts for better understanding residual stresses and non-destructive testing.

The fourth chapter discusses some of the basic magnetic sensors and their operating principles.

The fifth chapter presents the modeling and setup of the sensor, describing its operation and construction. Finally, the last chapter describes the experimental procedure, followed by a graphical presentation of the measurements, analysis of the results, and conclusions.





## Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για τις γνώσεις που απέκτησα κατά τη διάρκεια της διδασκαλίας του καθώς και για την άριστη επικοινωνία και συνεργασία κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους συναδέλφους στο εργαστήριο αισθητήρων, κ. Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο και κ. Χρόνη Παττακό για τις συμβουλές τους και την καθοδήγηση τους κατά τη συγγραφή και την πειραματική διαδικασία.

Θέλω να ευχαριστήσω τον φίλο μου Βασίλη Τσινιά για την κατανόηση και την παρέα του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου, καθώς και τους συμφοιτητές μου Λάμπρο Νέστορα και Ματθαίο Τσίνη για τη συνεργασία τους καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ είναι προς την οικογένεια μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου, Θόδωρο και Πολυξένη, που δεν έχουν πάψει στιγμή να πιστεύουν σε εμένα και τις δυνατότητες μου και που μου υπενθυμίζουν συνεχώς πως δεν χρειάζεται να τα προλάβουμε όλα, αλλά να είμαστε παρών και να απολαμβάνουμε τα όσα ζούμε.



# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	xi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Βασικές έννοιες Ηλεκτρομαγνητισμού .....	1
1.2. Μαγνητικά Υλικά και Ιδιότητες .....	6
1.2.1. Η έννοια του μαγνητικού πεδίου.....	6
1.2.2. Ορισμός διαπερατότητας $\mu$ και σχετική διαπερατότητα $\mu_r$ .....	7
1.2.3. Μαγνήτιση $M$ ενός υλικού.....	7
1.2.4. Κατηγορίες και Ταξινόμηση Μαγνητικών υλικών .....	8
1.2.4.1. Διαμαγνητικά Υλικά .....	9
1.2.4.2. Παραμαγνητικά Υλικά.....	10
1.2.4.3. Αντιφερρομαγνητικά ή αντισιδηρομαγνητικά υλικά .....	11
1.2.4.4. Φερριμαγνητικά ή σιδηριμαγνητικά υλικά.....	11
1.2.4.5. Φερρομαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά υλικά.....	11
1.2.5. Μαγνητικές Περιοχές .....	13
1.2.6. Μαγνητικά Τοιχώματα.....	15
1.2.7. Βρόχος Υστέρησης.....	17
1.2.7.1. Μαγνητική Υστέρηση.....	17
1.2.7.2. Θόρυβος Barkhausen.....	18
1.2.7.3. Μαγνήτιση Κορεσμού.....	19
1.2.7.4. Συνεκτικό Πεδίο .....	20
1.2.7.5. Θερμοκρασία Curie.....	20
1.2.7.6. Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά.....	21
2. Εναπομένουσες Τάσεις .....	22
3. Μη Καταστροφικός Έλεγχος.....	25
3.1. Οργανολογία.....	25
3.2. Τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου .....	27
4. Μαγνητικοί Αισθητήρες .....	29
4.1. Αισθητήρας Hall.....	30
4.2. Αισθητήρας Fluxgate .....	33
4.3. Αισθητήρας Squid .....	36
4.3.1. RF SQUID.....	37
4.3.2. DC SQUID .....	38
5. Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας .....	42
5.1. Μοντελοποίηση Κυκλώματος.....	45
5.2. Σχεδιασμός και Κατασκευή αισθητήρα .....	48
5.2.1. Τρισδιάστατη εκτόπωση .....	49
5.2.2. Ηλεκτρικός Χάλυβας - Πυρήνας (Yoke) .....	52
5.2.3. Εργαστηριακός Εξοπλισμός.....	53
6. Πειραματική Μελέτη και Αποτελέσματα.....	55
7. Συμπεράσματα .....	65
8. Βιβλιογραφία.....	66



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Εξάρτηση επιδεκτικότητας $\chi_m$ και θερμοκρασίας, βασικών κατηγοριών μαγνητικών υλικών .....	9
Πίνακας 3-1: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου [4] .....	28
Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά εμπορικών μαλακών άμορφων μετάλλων .....	44
Πίνακας 5-2: Οι επτά κατηγορίες τρισδιάστατων εκτυπώσεων .....	49
Πίνακας 6-1: Μέση Τιμή Μετρήσεων (V) – $V_{in}=200mV$ .....	63
Πίνακας 6-2: Μέση Τιμή Μετρήσεων (V) – $V_{in}=500mV$ .....	63
Πίνακας 6-3: Μέση Τιμή Μετρήσεων (V) – $V_{in}=800mV$ .....	63
Πίνακας 6-4: Απόκλιση Μέσων Τιμών τμημάτων από το υγιές τμήμα των δοκιμών – $V_{in}=200mV$ .....	63
Πίνακας 6-5: Απόκλιση Μέσων Τιμών τμημάτων από το υγιές τμήμα των δοκιμών – $V_{in}=500mV$ .....	64
Πίνακας 6-6: Απόκλιση Μέσων Τιμών τμημάτων από το υγιές τμήμα των δοκιμών – $V_{in}=800mV$ .....	64

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Απεικόνιση 1ου Νόμου Maxwell .....	2
Σχήμα 1-2: Απεικόνιση 2ου Νόμου Maxwell .....	3
Σχήμα 1-3: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου για όμοιους και αντίθετους πόλους .....	3
Σχήμα 1-4: Απεικόνιση 3ου Νόμου Maxwell .....	4
Σχήμα 1-5: Απεικόνιση 4ου Νόμου Maxwell .....	5
Σχήμα 1-6: Μαγνήτιση λόγω τροχιακής περιστροφής ηλεκτρονίου και εξαιτίας του spin του ηλεκτρονίου .....	6
Σχήμα 1-7: Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα, όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα, ανάλογα με το είδος του μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου [2] .....	8
Σχήμα 1-8: Μαγνητικές ροπές Διαμαγνητικών υλικών, πριν & μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [3] .....	9
Σχήμα 1-9: Μαγνητικές ροπές Παραμαγνητικών υλικών, πριν & μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου[4] .....	10
Σχήμα 1-10: Μαγνητικές ροπές Αντιφερρομαγνητικών υλικών, κατά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και σε θερμοκρασία $>T_{Neel}$ [3] .....	11
Σχήμα 1-11: Μαγνητικές ροπές Φερρομαγνητικών υλικών, πριν & μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, σε θερμοκρασίες μικρότερες και μεγαλύτερες της θερμοκρασίας Curie [3] .....	13
Σχήμα 1-12: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας μαγνητικών περιοχών: α) Μονοκρυστάλλος β) Δύο μαγνητικές περιοχές γ) Τέσσερις μαγνητικές περιοχές δ) Περιοχές με 90 ο μεταξύ τους .....	14
Σχήμα 1-13 Δομή τοιχώματος Bloch 180ο .....	15
Σχήμα 1-14 Άξονας περιστροφής σε ένα τοίχωμα Bloch και σε ένα τοίχωμα Neel αντιστοίχως .....	16
Σχήμα 1-15 Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού .....	17
Σχήμα 1-16 Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος των καμπυλών μαγνήτισης .....	19
Σχήμα 1-17 Αλλαγή συμπεριφοράς στη θερμοκρασία Curie .....	20
Σχήμα 1-18 Διαφορά βρόχου υστέρησης μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών .....	21
Σχήμα 2-1 Αποτέλεσμα εφελκυστικής και θλιπτικής τάσης σε υλικό .....	22

Σχήμα 2-2 Διακύμανση της τάσης σε συνάρτηση με τη μακροσκοπική δομή [23] .....	23
Σχήμα 4-1 Κάποια σημαντικά είδη μαγνητικών αισθητήρων και το φάσμα λειτουργίας(T) του καθενός [5] .....	29
Σχήμα 4-2 Φαινόμενο Hall .....	30
Σχήμα 4-3 Αισθητήρας Hall, A1321 Allegro Microsystems , συνδεσμολογία και διάγραμμα λειτουργίας.....	31
Σχήμα 4-4 Αισθητήρας HMC5883L magnetometer και διάγραμμα λειτουργίας .....	31
Σχήμα 4-5 : Μέτρηση ταχύτητας οδοντωτού τροχού και γραναζιού .....	32
Σχήμα 4-6 : Αισθητήρας Hall σε τυπική διάταξη μέτρησης ρεύματος αγωγών.....	33
Σχήμα 4-7 : Αισθητήρας Fluxgate παράλληλος(a) και ορθογώνιος (b) .....	34
Σχήμα 4-8 : Απεικόνιση χάρτη από μαγνητόμετρο στα 100m, με λευκό απεικονίζονται τα κτίσματα και οι μαύρες γραμμές και βέλη υποδεικνύουν τις σωληνώσεις και τα θαμμένα μεταλλικά αντικείμενα .....	35
Σχήμα 4-9 : Επαφή / Γέφυρα Josephson (Josephson Junction – JJ) .....	36
Σχήμα 4-10 : (a) Επαφή Φαινομένου σήραγγας, (b) Επαφή σημείου, (c) γέφυρα Dayem , (d) Επαφή SNS sandwich, (e) γέφυρα μεταβλητού πάχους, (f) γέφυρα απόθεσης ιόντων [15] .....	37
Σχήμα 4-11 : Κλειστός Βρόχος Υπεραγωγού με ένα μία γέφυρα Josephson σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο .....	37
Σχήμα 4-12 : Ο DC SQUID αποτελούμενος από 2 γέφυρες Josephson, a και b συνδεδεμένα παράλληλα.....	38
Σχήμα 4-13 : DC SQUID με 2 γέφυρες Josephson, ο πυκνωτής αντιπροσωπεύει την αυτό - χωρητικότητα της κάθε γέφυρας .....	38
Σχήμα 4-14 : Μαγνητική μικροσκοπική απεικόνιση του Αρειανού μετεωρίτη ALH84001[18] .....	39
Σχήμα 4-15 : Διατάξεις μετρήσεων αισθητήρων SQUID: a)γενικά ρεύματα, b) Εναπομένον μαγνητισμό, c) Ελαττώματα υλικού από διαταραχές στα εφαρμοσμένα ρεύματα, d) Θορύβου Johnson ή διάβρωση σε αγωγούς, e) δινορρέυματα προκαλούμενα από μαγνητικό πεδίο ac, f) μαγνητική υστέρηση από εφαρμογές πίεσης ή εφαρμοσμένου πεδίου, g) εντοπισμός διαμαγνητικών ή/και παραμαγνητικών υλικών σε εφαρμοσμένο πεδίο [17] .....	40
Σχήμα 4-16 : Απεικόνιση εξαρτημάτων Μαγνητικού τομογράφου Καρδιάς .....	41
Σχήμα 4-17 : Απεικόνιση εξαρτημάτων Μαγνητικού τομογράφου οργάνου(Ferritometry- Μέτρηση αποθήκης σιδήρου στο συκώτι).....	41
Σχήμα 4-18 : Απεικόνιση μετάδοσης ηλεκτρικού σήματος σε δύο μύες απόστασης 5cm.....	41
Σχήμα 4-19 : Απεικόνιση εξαρτημάτων Μαγνητικού τομογράφου πνεύμονα.....	41
Σχήμα 4-20 : Απεικόνιση Μαγνητικού τομογράφου για βρέφος .....	41
Σχήμα 5-1 : Έλεγχος σωληνώσεων με την αρχή του αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας.....	42
Σχήμα 5-2 : In Line inspection μηχανήμα για σωληνώσεις με περιμετρικούς αισθητήρες MFL .....	42
Σχήμα 5-3 : Προσανατολισμός κόκκων (Grain Oriented Steel).....	43
Σχήμα 5-4 : Προσανατολισμός κόκκων (CRGO - Αριστερά / CRNGO - Δεξιά).....	44
Σχήμα 5-5 : Ηλεκτρικό και Μαγνητικό κύκλωμα αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας με δύο yoke.....	45
Σχήμα 5-6 : Διάταξη αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας .....	48
Σχήμα 5-7 : Στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου FDM .....	50
Σχήμα 5-8 : Διαστάσεις Μπομπίνας (Όψη, Κάτοψη, Πλάγιες Όψεις & Πρόοψη) .....	51
Σχήμα 5-9 : Απεικόνιση προσανατολισμού δοκιμίου(αριστερά), απεικόνιση Gcode με supports( δεξιά).....	52

Σχήμα 5-10 : Διαστάσεις πυρήνα ηλεκτρικού χάλυβα (Yoke) .....	52
Σχήμα 5-11 : Τροφοδοτικό/Ενισχυτής KEPCO.....	53
Σχήμα 5-12 : Γεννήτρια κυματομορφής LXI Agilent 33220A.....	53
Σχήμα 5-13 : Παλμογράφος EZ Wideview DS-1510 .....	54
Σχήμα 6-1 : Απεικόνιση κατεργασίας που πραγματοποιήθηκε σε κάθε τμήμα των δοκιμίων .....	55
Σχήμα 6-2 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=200mV$ , σε συχνότητα 2 Hz .....	56
Σχήμα 6-3 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=200mV$ , σε συχνότητα 5 Hz .....	57
Σχήμα 6-4 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=200mV$ , σε συχνότητα 10 Hz .....	57
Σχήμα 6-5 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=500mV$ , σε συχνότητα 2 Hz .....	58
Σχήμα 6-6 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=500mV$ , σε συχνότητα 5 Hz .....	58
Σχήμα 6-7 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=500mV$ , σε συχνότητα 10 Hz .....	59
Σχήμα 6-8 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=800mV$ , σε συχνότητα 2 Hz .....	59
Σχήμα 6-9 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=800mV$ , σε συχνότητα 5 Hz .....	60
Σχήμα 6-10 : Σήμα αισθητήρα για $V_{in}=800mV$ , σε συχνότητα 10 Hz .....	60
Σχήμα 6-11 : Μέγιστη Διακύμανση Τάσεων/Τμήμα όλων των μετρήσεων για $V_{in}=200mV$ .....	61
Σχήμα 6-12 : Μέγιστη Διακύμανση Τάσεων/Τμήμα όλων των μετρήσεων για $V_{in}=500mV$ .....	61
Σχήμα 6-13 : Μέγιστη Διακύμανση Τάσεων/Τμήμα όλων των μετρήσεων για $V_{in}=800mV$ .....	61





## 1. Εισαγωγή

Για την καλύτερη κατανόηση της εργασίας αυτής θα παρουσιαστούν στην αρχή κάποιες βασικές έννοιες που αφορούν γενικά τον μαγνητισμό και τον ηλεκτρομαγνητισμό αλλά και κάποιες πιο ειδικές έννοιες που σχετίζονται με την μαγνητική διαπερατότητα των υλικών και τον τρόπο μέτρησής της.

### 1.1. Βασικές έννοιες Ηλεκτρομαγνητισμού

Στη φυσική με τον όρο μαγνητισμό χαρακτηρίζονται κάποια υλικά, λεγόμενα μαγνήτες, τα οποία ασκούν ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις σε άλλα υλικά. Υλικά που παρουσιάζουν εύκολα ανιχνεύσιμες μαγνητικές ιδιότητες είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, πολλά είδη ατσαλιού και το ορυκτό μαγνητίτης. Το 1864 με τις εξισώσεις που διατύπωσε ο Maxwell, που έδειξε ότι μαγνητισμός παρουσιάζεται εκεί όπου ηλεκτρικά φορτία είναι σε κίνηση, ότι αποτελεί μαζί με τον ηλεκτρισμό μέρος ενός γενικότερου φαινομένου που θα ονομαζόταν ηλεκτρομαγνητισμός.

Παρακάτω διατυπώνονται οι τέσσερις νόμοι του Maxwell στο κενό, σύμφωνα με το καθιερωμένο σύστημα S.I, τόσο στη διαφορική όσο και στην ισοδύναμη ολοκληρωτική τους μορφή. Τα μεγέθη που ορίζονται μέσω των νόμων είναι:

$E$  : η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, και

$B$  : η πυκνότητα μαγνητική ροής

σε συνάρτηση με τα εξής μεγέθη:

$\epsilon_0$  : η διηλεκτρική σταθερά στο κενό

$\mu_0$  : η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό

$\rho$  : η χωρική πυκνότητα φορτίου

$J$  : η πυκνότητα ρεύματος

### Πρώτος Νόμος – Νόμος του Gauss,

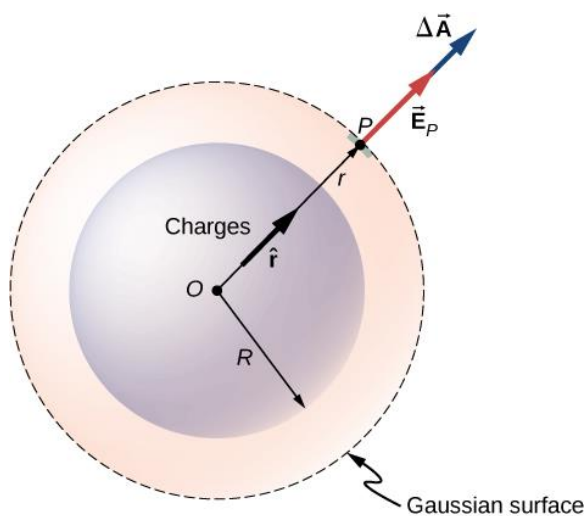
Διαφορική μορφή:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \, d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho \, dV \quad (1.2)$$

Ο νόμος του Gauss, γνωστός και ως θεώρημα ροής του Gauss, σχετίζεται με την κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει. Στην ολοκληρωμένη του μορφή, δηλώνει ότι η ροή του ηλεκτρικού πεδίου από μια αυθαίρετη κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το ηλεκτρικό φορτίο που περικλείεται από την επιφάνεια, ανεξάρτητα από το πώς κατανέμεται αυτό το φορτίο, συνήθως έχει ισχύει σε συμμετρικά φορτία που επιβάλλουν την ομοιομορφία του πεδίου. Όπου δεν υπάρχει τέτοια συμμετρία, ο νόμος του Gauss μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαφορική του μορφή, που δηλώνει ότι η απόκλιση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ανάλογη με την τοπική πυκνότητα του φορτίου.



**Σχήμα 1-1: Απεικόνιση 1ου Νόμου Maxwell**

Ο νόμος του Gauss ουσιαστικά περιγράφει τη συμπεριφορά ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, Ανάλογα με τη φόρτιση που έχει το σώμα, θετική ή αρνητική, οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές διαδίδονται αντίστοιχα προς τα έξω ή εισέρχονται προς τα μέσα.

Δεύτερος Νόμος – Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό

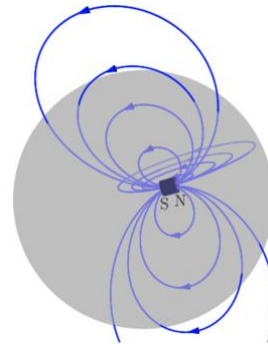
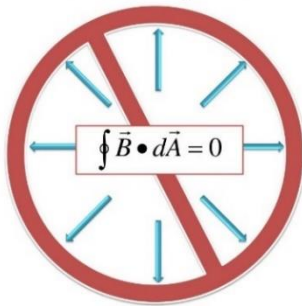
Διαφορική μορφή:

$$\nabla * B = 0 \quad (1.3)$$

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oiint_{\partial\Omega} B \cdot dS = 0 \quad (1.4)$$

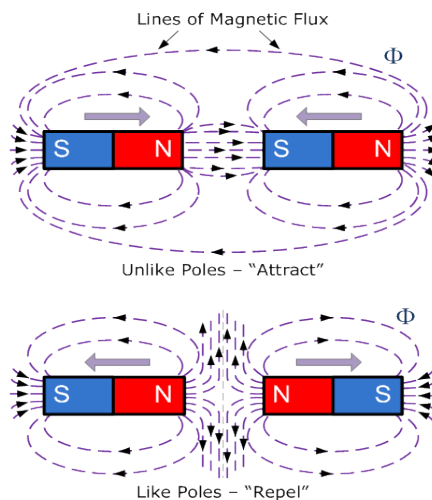
Gauss' Law for magnetic fields



Σχήμα 1-2: Απεικόνιση 2<sup>ου</sup> Νόμου Maxwell

Σε αναλογία με τον προηγούμενο Νόμο, στο μαγνητικό πεδίο το επιφανειακό ολοκλήρωμα του B σε μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν. Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο βλέπουμε πως η συνολική μαγνητική ροή είναι πάντα μηδέν, αποκλείοντας έτσι την ύπαρξη μαγνητικού μονόπολου, το οποίο θα αντιστοιχούσε στο στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται όταν πλησιάσουν δύο μαγνητικά δίπολα μεταξύ τους. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα κλειστές καμπύλες, με αποτέλεσμα κάθε δυναμική γραμμή να εξέρχεται όσες φορές εισέρχεται σε μια κλειστή επιφάνεια.



Σχήμα 1-3: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου για όμοιους και αντίθετους πόλους

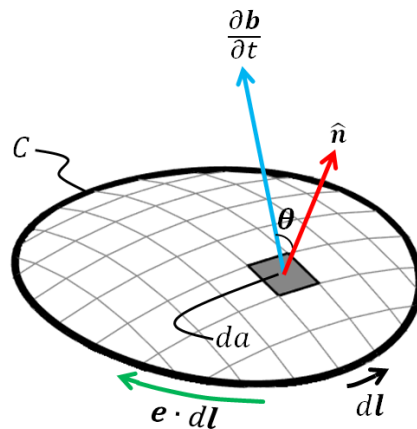
Τρίτος Νόμος – Εξίσωση Maxwell – Faraday

Διαφορική μορφή:

$$\nabla * E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.5)$$

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oint_{\partial \Sigma} E \, dl = - \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} B \, dS \quad (1.6)$$



**Σχήμα 1-4: Απεικόνιση 3<sup>ου</sup> Νόμου 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.

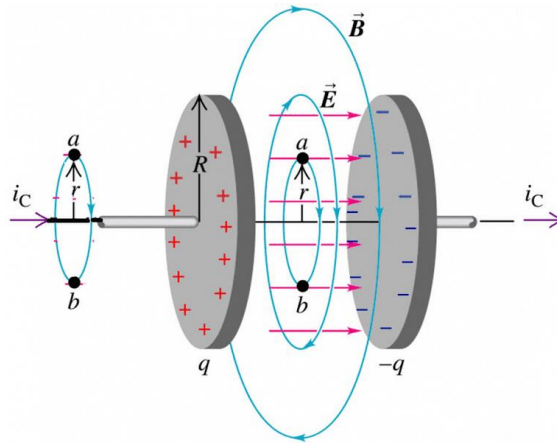
Τέταρτος Νόμος - Νόμος Ampere με προσθήκη Maxwell

Διαφορική μορφή:

$$\nabla * B = \mu_0 * (J + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}) \quad (1.7)$$

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oint_{\partial \Sigma} B dl = \mu_0 (\iint_{\Sigma} J dS + \varepsilon_0 * \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} E dS) \quad (1.8)$$



Σχήμα 1-5: Απεικόνιση 4<sup>ου</sup> Νόμου 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.

Μια περαιτέρω συνέπεια είναι η ύπαρξη αυτοσυντηρούμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που ταξιδεύουν στον κενό χώρο. Η ταχύτητα που υπολογίζεται για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η οποία θα μπορούσε να προβλεφθεί από πειράματα σε φορτία και ρεύματα, ταιριάζει με την ταχύτητα του φωτός. Πράγματι, το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (όπως είναι οι ακτίνες X & τα ραδιοκύματα). Ο Maxwell κατάλαβε τη σύνδεση μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και φωτός το 1861, ενοποιώντας έτσι τις θεωρίες του ηλεκτρομαγνητισμού και της οπτικής. Όλα τα παραπάνω διατυπώνονται με μεγαλύτερη κατανόηση στους τύπους των 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> νόμου σε Gaussian μονάδες, όπου επιλέγεται ένα σύστημα μεγεθών στην ταχύτητα του φωτός,  $c$ .

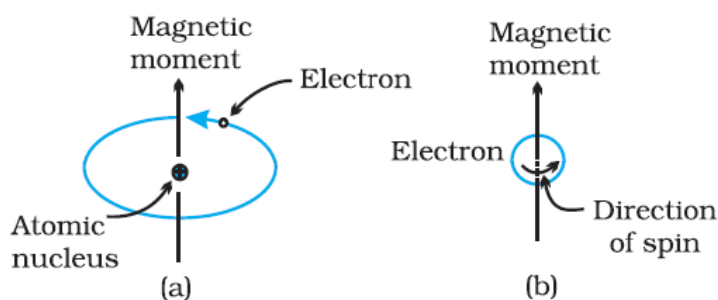
## 1.2. Μαγνητικά Υλικά και Ιδιότητες

Θα αναφερθούν σε αυτό το σημείο κάποιες βασικές έννοιες για την καλύτερη κατανόηση του μαγνητισμού και των ιδιοτήτων αυτού από τα υλικά που θα αναφερθούν παρακάτω.

### 1.2.1. Η έννοια του μαγνητικού πεδίου

Ανακεφαλαιώνοντας όσα είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι νόμοι του Maxwell έδειξαν ότι ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι είτε μαγνητοστατικό, είτε χρονικά μεταβαλλόμενο. Το μαγνητοστατικό πεδίο παράγεται από σταθερά (μόνιμα) ρεύματα ή μόνιμους μαγνήτες, χαρακτηριστικό του δε διάνυσμα είναι η μαγνητική επαγωγή  $B$  (ή πυκνότητα μαγνητικής ροής). Ένα μαγνητοστατικό πεδίο μπορεί να υφίσταται ανεξάρτητα από την παρουσία ή όχι ενός ηλεκτρικού πεδίου  $E$  ακριβώς όπως και ένα ηλεκτροστατικό πεδίο μπορεί να υφίσταται ανεξάρτητα ή όχι από την παρουσία μαγνητικού πεδίου  $H$ . Στο χρονικά όμως, μεταβαλλόμενο πεδίο, η συνύπαρξη ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι αναπόφευκτη.

Σε πρακτικό επίπεδο η έννοια του μαγνητικού πεδίου, που αποτελεί μία από τις πιο στοιχειώδεις αρχές στον μαγνητισμό και είναι πάντα το αποτέλεσμα της κίνησης ηλεκτρικού φορτίου, μπορεί να παράγεται είτε από το συμβατικό ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, είτε στην περίπτωση του μόνιμου μαγνήτη από τις τροχιακές κινήσεις και τα spin των ηλεκτρονίων (Αμπεριανά ρεύματα). Οι κινήσεις αυτές των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα την μαγνήτιση στο εσωτερικό του υλικού αυτού και τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου έξω απ' αυτό. Οι κινήσεις αυτές συναντώνται με την μορφή της περιστροφής του ηλεκτρονίου γύρω από τον άξονά του, που είναι το spin και με την μορφή της τροχιακής περιστροφής γύρω από τον πυρήνα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έτσι κάθε ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένας μικρός μαγνήτης που έχει μόνιμες τροχιακές ροπές και λόγω spin μαγνητικές ροπές.



Σχήμα 1-6: Μαγνήτιση λόγω τροχιακής περιστροφής ηλεκτρονίου και εξαιτίας του spin του ηλεκτρονίου

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 πιο αδύνατες από την ροπή του κάθε ηλεκτρονίου. Για σύγκριση αναφέρεται ότι η πυρηνική μαγνητόνη είναι

$\mu_B = 5.051 \times 10^{-27} \text{ Am}^2$ , σε σύγκριση με την ηλεκτρονική μαγνητόνη που λέγεται μαγνητόνη του Bohr που είναι  $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$

Τα μαγνητικά πεδία παράγονται συνήθως από σωληνοειδή και ηλεκτρομαγνήτες. Το σωληνοειδές φτιάχνεται τυλίγοντας ελικοειδώς, πάνω σε έναν μονωμένο σωλήνα, ένα μονωμένο σύρμα χαλκού σε πολλές σπείρες. Τα σωληνοειδή είναι συνήθως κυλινδρικά στο σχήμα. Ένας ηλεκτρομαγνήτης φτιάχνεται με παρόμοιο τρόπο, με μόνη διαφορά ότι οι περιελίξεις είναι από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως ο μαλακός σίδηρος. Ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας του ηλεκτρομαγνήτη δημιουργεί υψηλότερη μαγνητική επαγωγή  $B$  από ένα σωληνοειδές για την ίδια ένταση πεδίου  $H$ . [6]

### 1.2.2. Ορισμός διαπερατότητας $\mu$ και σχετική διαπερατότητα $\mu_r$

Τα μεγέθη της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$  καθώς και της μαγνητικής επαγωγής  $B$ , είναι ανάλογα μεταξύ τους. Ο συντελεστής αναλογίας, ορίζεται ως η διαπερατότητα  $\mu$  του υλικού και οι μονάδες μέτρησης του είναι το  $H/m$ . Η διαπερατότητα, όπως και η επιδεκτικότητα που ακολουθεί παρακάτω, είναι δύο μεγέθη βάσει των οποίων γίνεται ο διαχωρισμός των μαγνητικών υλικών στις διάφορες κατηγορίες.

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (1.9)$$

Προφανώς, συνεπάγεται ότι ανάλογα με τον τύπο του υλικού του μέσου, η διαπερατότητα μπορεί να μην είναι σταθερή. Μερικές φορές αντί της διαπερατότητας χρησιμοποιείται ο όρος της σχετικής διαπερατότητας. Η σχετική διαπερατότητα  $\mu_r$  ενός υλικού ορίζεται από τη παρακάτω σχέση, και ουσιαστικά δείχνει πως η μαγνητική επαγωγή του υλικού μεταβάλλεται σε σχέση με την αντίστοιχη του κενού για την ίδια ένταση μαγνητικού πεδίου. Η σχετική διαπερατότητα του κενού είναι μονάδα [1].

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (1.10)$$

Όπου  $\mu_0 = 4 * 10^{-7}$  (διαπερατότητα του κενού)

### 1.2.3. Μαγνήτιση $M$ ενός υλικού

Ο τρόπος που επιδρά ένα μαγνητικό πεδίο στη μαγνητική επαγωγή του υλικού, όταν το πεδίο διαπερνά το υλικό περιγράφεται από το φαινόμενο της μαγνήτισης. Ως μαγνήτιση  $M$  ορίζεται η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού και μετριέται σε  $A/m$ . Πρόκειται για ένα διανυσματικό μέγεθος, που εκφράζει τη δράση των στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων ως πηγών του μαγνητικού πεδίου.

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (1.11)$$

Η μαγνήτιση  $M$  ενός υλικού, συνδέεται με τη μαγνητική επαγωγή  $B$ , μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\vec{B} = \mu_0 * \vec{M} \quad (1.12)$$

Ενώ σε περίπτωση που υπάρχει ταυτόχρονα μαγνήτιση και μαγνητικό πεδίο, η συνεισφορά τους αθροίζεται με αποτέλεσμα να προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0 * (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.13)$$

Όπου το μαγνητικό πεδίο  $H$  παράγεται από ηλεκτρικά ρεύματα που βρίσκονται έξω από το υλικό, όπως από σωληνοειδές ή ηλεκτρομαγνήτη ή μόνιμο μαγνήτη και η μαγνήτιση  $M$  είναι το αποτέλεσμα του spin ή της τροχιακής περιστροφής των ηλεκτρονίων του υλικού. Στο εσωτερικό του μαγνήτη, αναπτύσσεται ένα πεδίο απομαγνήτισης με κατεύθυνση αντίθετη από τη μαγνήτιση. Έτσι η μαγνητική επαγωγή  $B$  που παράγεται από το μαγνήτη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_{int} = H_{ext} - N * M \quad (1.14)$$

όπου  $N$ : ο συντελεστής απομαγνήτισης που εξαρτάται από το σχήμα του υλικού [1]

### 1.2.4. Κατηγορίες και Ταξινόμηση Μαγνητικών υλικών

Οι μαγνητικές ιδιότητες ενός σώματος οφείλονται στην περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα αλλά και στην ιδιότητα του spin που έχουν. Άρα κρίσιμο μέγεθος για την ταξινόμηση τους αποτελεί η επιδεκτικότητα  $\chi$ . Βασικές κατηγορίες, ως προς την μαγνήτιση τους, τα υλικά κατατάσσονται σε Διαμαγνητικά, Παραμαγνητικά, Φερρομαγνητικά, Φερριμαγνητικά ή αντιφερρομαγνητικά υλικά. Παρακάτω ακολουθεί σχήμα με τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα και σε ποια κατηγορία ανήκουν, καθώς και πίνακας με την επιδεκτικότητα και εξάρτηση της  $\chi_m$  από τη θερμοκρασία, ανά κατηγορία.

1 H																	2 He								
3 Li		4 Be																		5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na		12 Mg																		13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr								
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe								
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn								
87 Fr	88 Ra	89 Ac																							
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu												

■ **Ferromagnetic**    ■ **Antiferromagnetic**  
 **Paramagnetic**     **Diamagnetic**

Σχήμα 1-7: Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα, όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα, ανάλογα με το είδος του μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου [2]



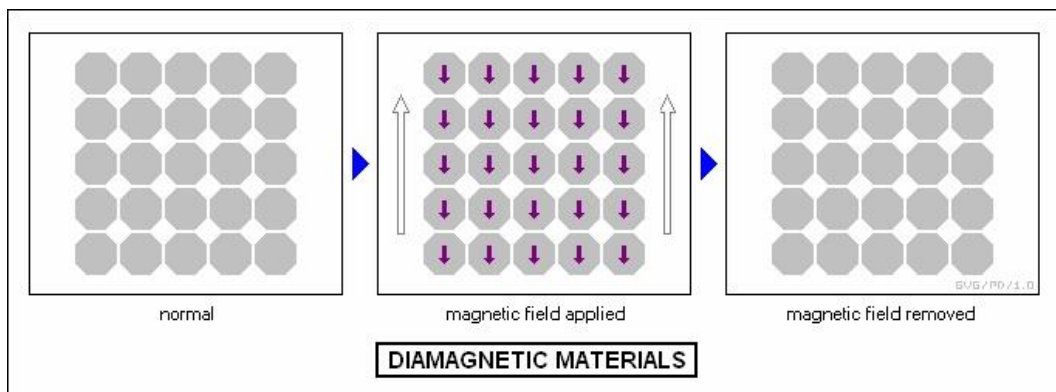
Πίνακας 1-1: Εξάρτηση επιδεκτικότητας  $\chi_m$  και θερμοκρασίας. βασικών κατηγοριών μαγνητικών υλικών

Κατηγορία	Επιδεκτικότητα $\chi_m$	Εξάρτηση της $\chi_m$ από τη θερμοκ.(T)
Διαμαγνητικά	Αρνητική και μικρή ( $-10^{-6}$ )	Ανεξάρτητη της θερμοκρασίας
	Αρνητική και μεγάλη ( $-1$ )	Κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία
Παραμαγνητικά	Θετική και μικρή ( $10^{-5} - 10^{-3}$ )	Ανεξάρτητη της θερμοκρασίας
	Θετική και πολύ μεγάλη	Νόμος Curie – Weiss
Φερρομαγνητικά	Θετική και πολύ μεγάλη	Σιδηρ. ( $T < T_c$ ) & Παραμ. ( $T > T_c$ )
Αντιφερρομαγνητικά	Θετική και μικρή	Αντ. ( $T < T_{Neel}$ ) & Παραμ. ( $T > T_{Neel}$ )
Φερριμαγνητικά	Θετική και πολύ μεγάλη	Σιδηρ. ( $T < T_c$ ) & Παραμ. ( $T > T_c$ )

### 1.2.4.1. Διαμαγνητικά Υλικά

Η πρώτη κατηγορία υλικών έχει μικρό και αρνητικό  $\chi_m \approx -10^{-5}$ . Είναι υλικά που δεν έχουν μόνιμη μαγνητική ροπή στα άτομά τους, διότι έχουν συμπληρωμένες τις ηλεκτρονικές τους στιβάδες. Δηλαδή, τα ηλεκτρόνια ευρίσκονται κατά ζεύγη των spin up & down, τα οποία θα ονομάζουμε συζευγμένα ηλεκτρόνια και έτσι οι μαγνητικές ροπές τους αλληλοαναιρούνται. Όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο τα τροχιακά των ηλεκτρονίων αλλάζουν προσανατολισμό σύμφωνα με τον νόμο του Lenz σε τρόπο ώστε το τροχιακό δυναμικό να προσπαθεί να αναιρέσει το εξωτερικό αίτιο (Εικόνα 8). Έτσι, η συνολική ροπή των τροχιακών είναι στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του επιβαλλόμενου πεδίου, με αποτέλεσμα η επιδεκτικότητα  $\chi_m$  να είναι αρνητική. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο χαλκός, ο άργυρος, ο χρυσός, το βισμούθιο και το βηρύλλιο.

Μία υποκατηγορία διαμαγνητικών υλικών είναι οι υπεραγωγοί, για τους οποίους το  $\chi_m \approx -1$ , οι οποίοι βρίσκουν πολλές εφαρμογές. Η επιδεκτικότητα των υπεραγωγών οφείλεται στα μακροσκοπικά ρεύματα υψηλής έντασης μέσα στο υλικό, τα οποία αντιτίθενται στο εφαρμοζόμενο πεδίο, και όχι στην τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων. Για τον λόγο αυτό αποτελούν μία ειδική περίπτωση. Η επιδεκτικότητά τους είναι εξαρτημένη από τη θερμοκρασία, αφού πάνω από μία κρίσιμη τιμή χάνουν τις υπεραγωγίμες και κατά συνέπεια τις διαμαγνητικές τους ιδιότητες. [5],[7]



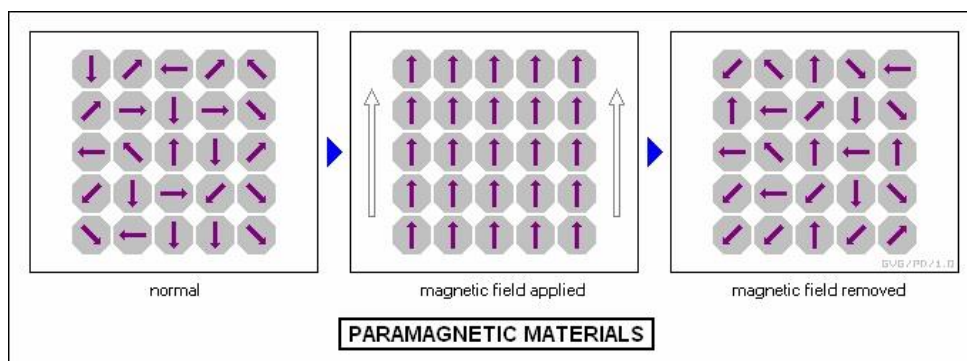
Σχήμα 1-8: Μαγνητικές ροπές Διαμαγνητικών υλικών, πριν & μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.]

### 1.2.4.2. Παραμαγνητικά Υλικά

Μία δεύτερη κατηγορία υλικών, για τα οποία το  $\chi$  είναι μικρό αλλά θετικό με τιμές που κυμαίνονται  $10^{-5} \leq \chi \leq 10^{-3}$  είναι οι παραμαγνήτες. Η μαγνήτιση των υλικών αυτών είναι ασθενής και προσανατολίζεται προς την ίδια διεύθυνση με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

*Τα παραμαγνητικά υλικά αποτελούνται συνήθως από άτομα με μονό αριθμό ηλεκτρονίων στην εξωτερική στιβάδα, ώστε να υπάρχουν μονήρη ηλεκτρόνια, των οποίων τα spin να δημιουργούν μαγνητική ροπή. Στα υλικά αυτά συγκαταλέγονται τα άτομα και τα ιόντα που δεν έχουν συμπληρώσει πλήρως τις εξωτερικές στιβάδες, όπως για παράδειγμα τα στοιχεία μεταπτώσεως. Υπάρχουν και παραμαγνητικά υλικά με ζυγό αριθμό ηλεκτρονίων στην εξωτερική στιβάδα. Πρόκειται συνεπώς για υλικά που έχουν μόνιμη μαγνητική ροπή εξαιτίας της ύπαρξης ασύζευκτων spin ηλεκτρονίων. Σε μηδενικό πεδίο οι μαγνητικές ροπές αυτών των υλικών είναι τυχαία προσανατολισμένες, αλλά κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου μπορούν να προσανατολισθούν στην κατεύθυνση του πεδίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το αποτέλεσμα αυτού του προσανατολισμού των ροπών στην κατεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου είναι ότι η μαγνήτιση είναι παράλληλη στο πεδίο και έτσι η επιδεκτικότητα είναι θετική. Γενικά όμως, χρειάζονται πολύ μεγάλα πεδία για τον προσανατολισμό των ροπών στην κατεύθυνση του πεδίου και έτσι, η επιδεκτικότητα είναι μεν θετική αλλά πολύ μικρή δε, με τυπική τιμή της τάξης του  $10^{-5}$ , διότι σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά τα δίπολα των ατόμων δεν αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.*

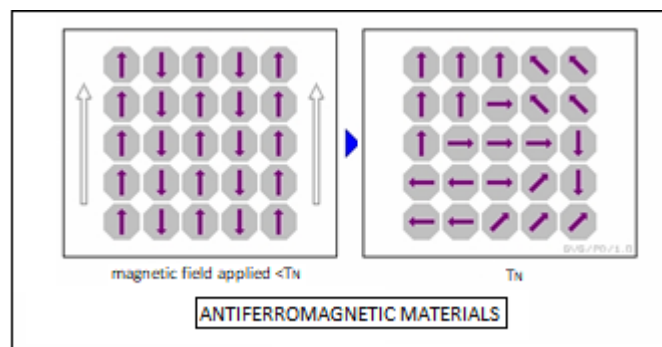
Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών αποτελούν ο λευκόχρυσος, το αλουμίνιο, το οξυγόνο και διάφορα άλατα π.χ. χλωριούχα, θειικά, ανθρακικά του μαγγανίου, του χρωμίου, του σιδήρου και του χαλκού. Τα άλατα και τα οξείδια των σπάνιων γαιών είναι ισχυρώς παραμαγνητικά. Την ιδιότητά τους αυτή την προσδίδουν τα ηλεκτρόνια της 4f υποστιβάδας. Αυτά είναι σε απόσταση από τον πυρήνα σχετικά πολύ μικρότερη από τις πλεγματικές αποστάσεις, τον οποίο προστατεύουν από τα εξωτερικά ηλεκτρόνια. Επίσης, παραμαγνητικές ιδιότητες αποκτούν όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά πάνω από τη θερμοκρασία Curie. [5],[6],[7]



Σχήμα 1-9: Μαγνητικές ροπές Παραμαγνητικών υλικών, πριν & μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου[4]

### 1.2.4.3. Αντιφερρομαγνητικά ή αντισιδηρομαγνητικά υλικά

Τα αντιφερρομαγνητικά υλικά έχουν χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα και γι' αυτό χαρακτηρίζονται συχνά ως παραμαγνητικά. Η επιδεκτικότητά τους είναι θετική και παίρνει χαμηλές τιμές, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία Νέελ, η διευθέτηση των ατόμων και ιόντων γίνεται με τρόπο παράλληλο αλλά αντίθετης φοράς, με αποτέλεσμα οι μαγνητικές ροπές να αλληλοεξουδετερώνονται. Σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία Νέελ, συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά υλικά. Οι μαγνητικές ροπές των αντισιδηρομαγνητικών υλικών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1-10: Μαγνητικές ροπές Αντιφερρομαγνητικών υλικών, κατά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και σε θερμοκρασία  $>T_{Neel}$  [Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.]

### 1.2.4.4. Φερριμαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα φερριμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που τα κάνουν να έχουν ομοιότητες τόσο με τα φερρομαγνητικά, όσο και με τα αντιφερρομαγνητικά υλικά. Ο φερριμαγνητισμός είναι τύπος μόνιμου μαγνητισμού, που οφείλεται στην αυθόρμητη διευθέτηση ατόμων ή ιόντων. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτή η διευθέτηση γίνεται κατά τρόπο παράλληλη, όπως συμβαίνει στο φερρομαγνητισμό και σε άλλες περιπτώσεις κατά τρόπο αντιπαράλληλο, όπως συμβαίνει στον αντιφερρομαγνητισμό. Στην περίπτωση που είναι σε αντίθετη διεύθυνση οι μαγνητικές ροπές δεν αλληλοεξουδετερώνονται. Τα φερριμαγνητικά υλικά, όπως και τα φερρομαγνητικά, χάνουν τη μαγνήτισή τους και συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία Curie [31,32].

### 1.2.4.5. Φερρομαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά υλικά

Μακράν η πιο σημαντική και διαδεδομένη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι οι σιδηρομαγνήτες. Η διαπίστωση αυτή προκύπτει τόσο από τη θεωρία όσο και από τις πολλαπλές πρακτικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται εξαιτίας των υψηλών τιμών διαπερατότητας, οι οποίες επιτρέπουν την επίτευξη υψηλών μαγνητικών επαγωγών από μέτρια μαγνητικά πεδία  $H$ . Εξαιτίας της ιδιότητάς τους να διατηρούν την μαγνήτισή τους και να δρουν ως πηγή μαγνητικού πεδίου και φυσικά εξαιτίας της ροπής μαγνητικού δίπολου που εμφανίζουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Είναι πραγματικά

εκπληκτικό πως τα λίγα αυτά στοιχεία (σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο και μερικές λανθανίδες καθώς και κράματα αυτών) είναι τόσο ζωτικής τεχνολογικής σημασίας. Η επιδεκτικότητα των υλικών αυτών είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη από 1 και οι τιμές της κυμαίνονται  $50 \leq \chi_m \leq 10^4$  με εξαίρεση τους μόνιμους μαγνήτες (σκληρά μαγνητικά υλικά) που δεν έχουν τόσο υψηλές τιμές επιδεκτικότητας.

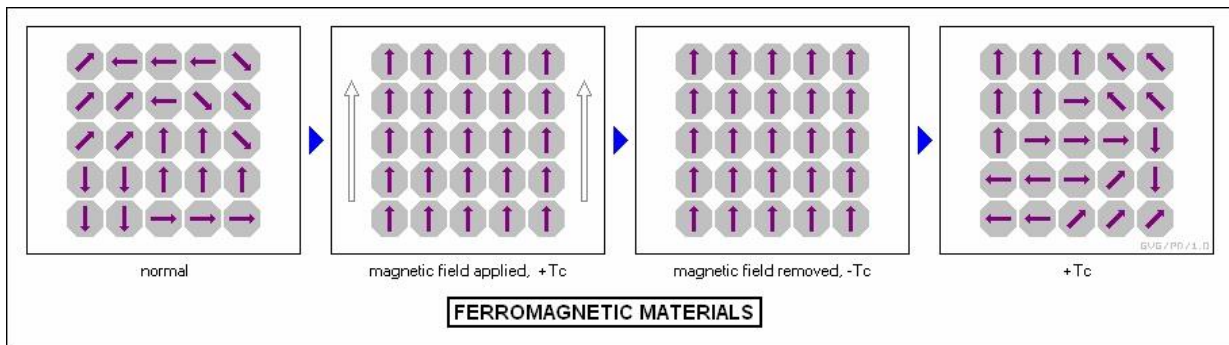
Οι μόνιμες μαγνητικές ροπές στα σιδηρομαγνητικά υλικά προέρχονται από τις ατομικές μαγνητικές ροπές εξαιτίας της ροπής λόγω spin του ηλεκτρονίου. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε μη εξουδετερωμένες στροφορμές του spin του ηλεκτρονίου ως συνέπεια της ηλεκτρονιακής δομής. Υπάρχει επίσης και η συνεισφορά της τροχιακής μαγνητικής ροπής που είναι μικρή σε σχέση με την ροπή του spin. Επιπλέον, σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, οι αλληλεπιδράσεις σύζευξης έχουν σαν αποτέλεσμα, οι μαγνητικές ροπές προσκείμενων ατόμων να προσανατολίζονται η μία με την άλλη, ακόμη και απουσία εξωτερικού πεδίου. Η προέλευση αυτών των δυνάμεων σύζευξης δεν είναι απόλυτα κατανοητή αλλά πιστεύεται πως προέρχεται από την ηλεκτρονιακή δομή του μετάλλου.

Υπάρχουν δύο πιθανές αιτίες για την ατομική μαγνητική ροπή των σιδηρομαγνητών. Κατά την πρώτη, το υλικό έχει από πριν μικρές μαγνητικές διπολικές ροπές τυχαία προσανατολισμένες εκτός πεδίου, που προσανατολίζονται υπό την επίδραση ενός πεδίου. Η θεωρία αυτή προτάθηκε από τον Wilhelm Weber. Κατά τη δεύτερη θεωρία που διατύπωσε ο Poisson, εκτός μαγνητικού πεδίου δεν υπάρχουν καθόλου μαγνητικές διπολικές ροπές, οι οποίες δημιουργούνται με την επίδραση ενός πεδίου.

Ο αμοιβαίος προσανατολισμός της ροπής του spin υπάρχει σε τμήματα σχετικά μεγάλου όγκου του κρυστάλλου τα οποία ονομάζονται περιοχές. Η θεωρία των μαγνητικών περιοχών εξηγεί πως μεταβάλλεται η μαγνήτιση μικροσκοπικά μέσα στο μαγνητικό υλικό. Κατά την απομαγνήτιση για παράδειγμα, χωρίς τη θεωρία των μαγνητικών περιοχών, δεν μπορούμε να απαντήσουμε στο ερώτημα αν η μαγνήτιση είναι παντού μηδέν ή αν υπάρχουν τοπικά μεγάλες τιμές μαγνητικών διπόλων οι οποίες αθροιζόμενες κάνουν μηδέν.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά, χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ιδιότητες:

- Μεγάλη σχετική διαπερατότητα  $\mu_r$
- Η διαπερατότητά τους  $\mu$ , δεν είναι σταθερή όπως στα παραμαγνητικά αλλά προκύπτει μέσω ενός μεγάλου εύρους τιμών από τις μετρήσεις των B και H.
- Μεγάλη αντίσταση απομαγνήτισης
- Παραμένουσα μαγνήτιση  $M_r$  καθώς διατηρούν τη μαγνήτιση τους ακόμα και όταν απομακρυνθούν από το πεδίο που τα μαγνήτισε εν αντιθέσει με τα παραμαγνητικά που τη χάνουν.
- Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή  $B_r = \mu_0 * M_r$ , όπως θα δούμε παρακάτω



**Σχήμα 1-11: Μαγνητικές ροπές Φερρομαγνητικών υλικών, πριν & μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, σε θερμοκρασίες μικρότερες και μεγαλύτερες της θερμοκρασίας Curie [Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.]**

### 1.2.5. Μαγνητικές Περιοχές

Η μαγνήτιση είναι ένα φαινόμενο που οφείλεται στο εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Η θεωρία των μαγνητικών περιοχών, αντίστοιχα, εξηγεί πώς μεταβάλλεται η μαγνήτιση μικροσκοπικά μέσα στο μαγνητικό υλικό.

Η έννοια των μαγνητικών περιοχών προτάθηκε από τον Weiss που βασίστηκε σε παλαιότερες εργασίες που είχαν πραγματοποιηθεί από τους Ampere, Weber και Ewing, που είχαν πρότειναν την ύπαρξή τους. Τα συμπεράσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι, εντός μίας από τις περιοχές αυτές, τα μαγνητικά δίπολα που μπορεί να είναι προσανατολισμένα παράλληλα είναι  $10^{12} - 10^{18}$ , σε πολύ μεγαλύτερο όγκο από ό,τι υποπευόταν προηγουμένως (Μαγνητικά Υλικά Group, University of Birmingham). Η μαγνήτιση εντός της περιοχής είναι κορεσμένη και θα βρίσκεται πάντα στην εύκολη κατεύθυνση της μαγνήτισης όταν δεν υπάρχει εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Η διεύθυνση προσανατολισμού από περιοχή σε περιοχή, είναι περισσότερο ή λιγότερο τυχαία, και ως εκ τούτου η μαγνήτιση ενός δείγματος μπορεί να είναι μηδενική, παρατηρούμε πάντως ότι τα δίπολα επιλέγουν να προσανατολίζονται σε διευθύνσεις κύριων κρυσταλλογραφικών αξόνων, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Τα άμεσα συμπεράσματα της παραπάνω θεωρίας είναι:

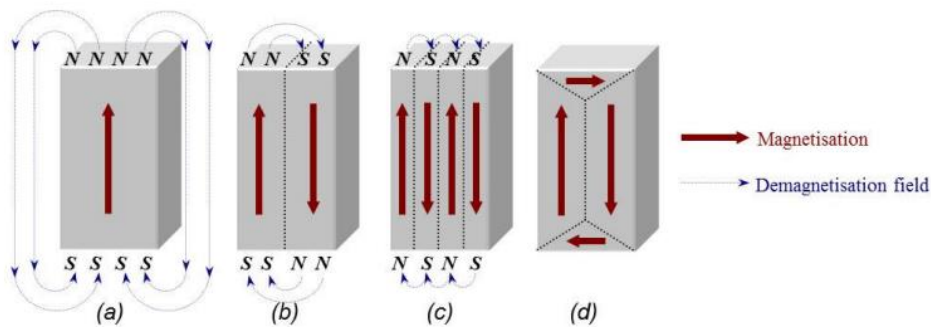
- i. Τα ατομικά μαγνητικά δίπολα υπάρχουν και δεν δημιουργούνται από το πεδίο,
- ii. Τα δίπολα είναι μικροσκοπικώς παραλληλισμένα ακόμα και όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση,
- iii. Οι μαγνητικές περιοχές είναι αυτές που έχουν τυχαίες διευθύνσεις, όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση,
- iv. Κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης επαναπροσανατολίζονται οι μαγνητικές περιοχές, έτσι ώστε είτε περισσότερες μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται προς το μαγνητικό πεδίο, είτε ο χώρος των μαγνητικών περιοχών που είναι προσανατολισμένες προς το πεδίο να είναι μεγαλύτερος από τον χώρο των περιοχών που αντιτίθενται στο πεδίο.

Για την καλύτερη κατανόηση των τοιχωμάτων έστω ο κρύσταλλος [Σχήμα 1-12(β)] που αποτελείται από μία μόνο περιοχή με την αυθόρμητη μαγνήτιση του κατά μήκος εύκολου άξονα. Η ενέργεια που αναπτύσσεται εξαρτάται από τον παράγοντα απομαγνήτισης  $N$ , το σχήμα του διπόλου, μήκος και

διάμετρος, γενικά τη γεωμετρία του, και τη μαγνήτιση κορεσμού. Αν το μονοκρυσταλλικό αυτό δίπολο χωριστεί σε δύο περιοχές αντίθετα μαγνητισμένες, η μαγνητοστατική ενέργεια του μειώνεται στο μισό, αφού οι βόρειοι και νότιοι πόλοι έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους και συνεπώς μειώνεται η χωρητική έκταση του πεδίου. Ο περαιτέρω διαχωρισμός του, σε μικρότερες περιοχές επιφέρει συνεχή μείωση της μαγνητοστατικής ενέργειας, σε αναλογία  $1/N$ , επομένως όπως βλέπουμε στο ίδιο σχήμα στη περίπτωση ( $\gamma$ ) του σχήματος θα έχουμε το  $1/4$  της αρχικής μαγνητοστατικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη διαδικασία δε μπορεί να συνεχιστεί απεριόριστα διότι κάθε τοίχωμα Bloch που δημιουργείται περιέχει ενέργεια η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$E_W = \frac{\gamma^* L}{D} \quad (1.15)$$

Όπου:  $\gamma$  η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του τοιχώματος,  $L$  το μήκος και  $D$  το πάχος της περιοχής. Η διαδικασία του διαχωρισμού μπορεί να συνεχιστεί μέχρι την ελαχιστοποίηση της ολικής ενέργειας του κρυστάλλου.



**Σχήμα 1-12: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας μαγνητικών περιοχών: α) Μονοκρύσταλλος β) Δύο μαγνητικές περιοχές γ) Τέσσερις μαγνητικές περιοχές δ) Περιοχές με  $90^\circ$  μεταξύ τους**

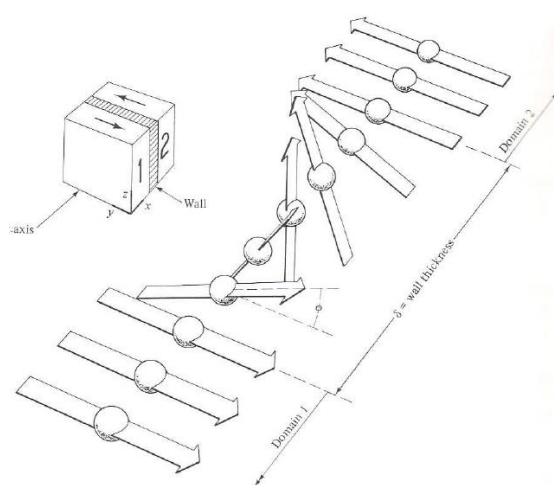
Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί μηδενική μαγνητοστατική ενέργεια πρέπει τα γειτονικά πεδία να βρίσκονται σε  $90$  μοίρες γωνία μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-12(δ).

### 1.2.6. Μαγνητικά Τοιχώματα

Μια πρώτη επιβεβαίωση της έννοιας της μαγνητικής περιοχής βρέθηκε από τον Barkhausen. Ανακάλυψε ότι η διαδικασία μαγνήτισης είναι συχνά ασυνεχής, εμφανίζοντας ένα χαρακτηριστικό θόρυβο όταν ακούγεται από έναν ενισχυτή. Αρχικά, τα άλματα Barkhausen είχαν ερμηνευθεί ως αλλαγή περιοχής. Αν και η ερμηνεία αυτή δεν θεωρείται έγκυρη ακόμη και σήμερα, η περαιτέρω μελέτη του φαινομένου Barkhausen οδήγησε σε μια καθοριστική ανακάλυψη. Ορισμένα πειράματα έδειξαν ότι στην πραγματικότητα μόνο ένα γιγάντιο άλμα οδηγεί άμεσα από μια κορεσμένη κατάσταση σε μια αντίθετη κορεσμένη [19, 20]. Η ανάλυση της δυναμικής αυτής διαδικασίας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα εν λόγω άλματα θα μπορούσαν να συμβούν μόνο με μια χωρικά ανομοιογενή διαδικασία, δηλαδή μόνο από την ύπαρξη ενός ορίου μεταξύ των περιοχών με αντίθετη μαγνήτιση. Αυτή η υπόθεση σύντομα επιβεβαιώθηκε από τα διάσημα πειράματα των Sixtus και Tonks [21].

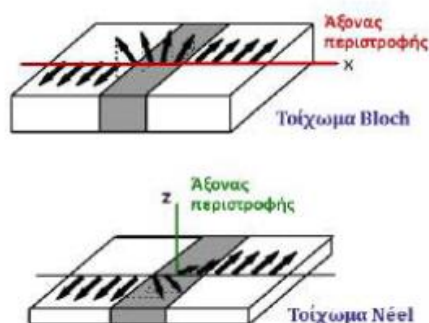
Όπως είδαμε και στο σχήμα του προηγούμενου κεφαλαίου, τα μαγνητικά τοιχώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τοιχώματα 180ο και σε μη-180ο, δηλαδή σε τοιχώματα που χωρίζουν αντιπαράλληλες και μη αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές.

Γενικά τα μαγνητικά τοιχώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τοιχώματα 180ο και σε μη-180ο, δηλαδή σε τοιχώματα που χωρίζουν αντιπαράλληλες και μη αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές. Τα τοιχώματα 180ο συναντώνται σχεδόν σε όλα τα υλικά και διαφέρουν από όλα τα άλλα τοιχώματα στο ότι δεν επηρεάζονται από την επιβολή μηχανικής τάσης. Στα τοιχώματα αυτά οι διευθύνσεις της μαγνήτισης σε γειτονικές περιοχές είναι αντιπαράλληλες και κατά συνέπεια οι μαγνητικές ροπές των περιοχών αυτών έχουν διευθύνσεις ισοδύναμων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Στο σχήμα 1.13 απεικονίζεται ένα τοίχωμα 180ο που διαχωρίζει δύο περιοχές με μαγνήτιση σε αντίθετες διευθύνσεις. Αν η μαγνήτιση περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στην επιφάνεια του τοιχώματος, τότε το τοίχωμα καλείται τοίχωμα Bloch.



Σχήμα 1-13 Δομή τοιχώματος Bloch 180°

Εκτός από τα τοιχώματα Bloch, υπάρχει ένα ακόμη είδος μαγνητικών τοιχωμάτων. Σε σιδηρομαγνητικά δείγματα πολύ λεπτού πάχους (μικρότερου ή ίσου μερικών  $\mu\text{m}$ ), στα οποία το πλάτος των μαγνητικών τοιχωμάτων προσεγγίζει το πλάτος του υλικού, η δημιουργία τοιχωμάτων Bloch δεν ευνοείται ενεργειακά, καθώς αυξάνει σημαντικά τη μαγνητοστατική ενέργεια στην επιφάνεια των τοιχωμάτων. Στην περίπτωση αυτή, σχηματίζονται μαγνητικά τοιχώματα Néel, στα οποία ο άξονας περιστροφής των μαγνητικών ροπών είναι κάθετος στην επιφάνεια των τοιχωμάτων, και όχι παράλληλος προς αυτήν, όπως συμβαίνει στα τοιχώματα Bloch. Στο **Σχήμα 1-14**, παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίο αναπροσανατολίζονται οι μαγνητικές ροπές σε ένα τοίχωμα Bloch και σε ένα τοίχωμα Néel αντιστοίχως.



**Σχήμα 1-14** Άξονας περιστροφής σε ένα τοίχωμα Bloch και σε ένα τοίχωμα Néel αντιστοίχως.

Συμπερασματικά τα τοιχώματα Bloch συναντώνται συνήθως σε δοκίμια που έχουν μεγάλες και τις τρεις διαστάσεις τους και οι ενεργειακοί όροι ανισοτροπίας και ανταλλαγής παίζουν σημαντικό ρόλο στους υπολογισμούς της δομής και του πάχους του. Αντίθετα τα τοιχώματα Néel σχηματίζονται μόνο σε λεπτά υμένια καθώς παράγουν μεγάλα ποσοστά ενέργειας απομαγνήτισης μέσα στον όγκο του τοιχώματος. Στον υπολογισμό της δομής και του πάχους των τοιχωμάτων Néel πρέπει να λάβουμε υπόψη και την μαγνητοστατική ενέργεια καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο στην δομή του τοιχώματος λόγω των «πόλων» που δημιουργούνται στην τομή του τοιχώματος με τις επιφάνειες του υμενίου.

Τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών μπορούν να επιφέρουν αρνητικά ή θετικά αποτελέσματα στο υλικό ανάλογα με την εφαρμογή του. Τα μαγνητικά σωματίδια, για παράδειγμα, που χρησιμοποιούνται στην μαγνητική εγγραφή δεν πρέπει να περιέχουν τοιχώματα μαγνητικών περιοχών, διότι τα τοιχώματα αυτά μειώνουν το συνεκτικό πεδίο και λειτουργούν σαν πηγή θορύβου. Επίσης τα σωματίδια που χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες δεν θα πρέπει να έχουν τοιχώματα μαγνητικής περιοχής, διότι λόγω αυτών μπορούν πολύ εύκολα να απομαγνητιστούν. Από την άλλη πλευρά όταν τα σωματίδια χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μιας ελαστικής μαγνητικής ασπίδας τότε τα τοιχώματα μαγνητικών περιοχών θα πρέπει να υπάρχουν στα σωματίδια.

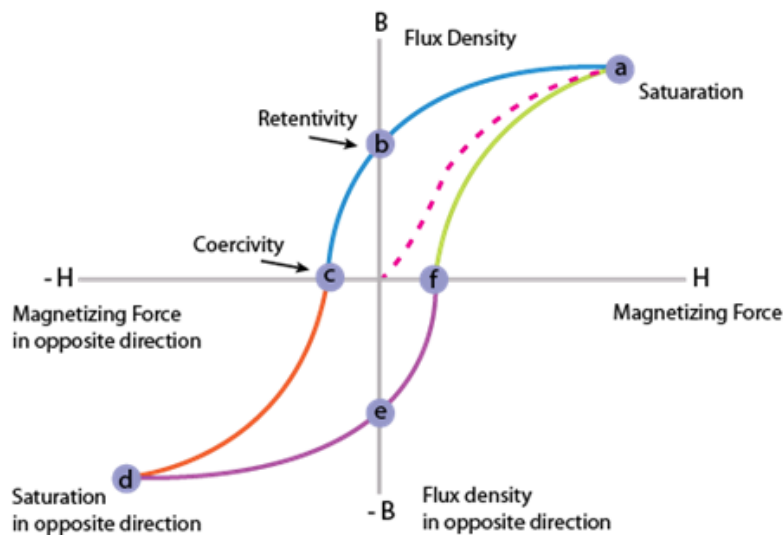


## 1.2.7. Βρόχος Υστέρησης

### 1.2.7.1. Μαγνητική Υστέρηση

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος του της μαγνητικής επαγωγής  $B$  συναρτήσει του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$  που αποτελεί την καμπύλη του βρόχου υστέρησης. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες.

Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης φαίνεται στο σχήμα 1.16. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.



Σχήμα 1-15 Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, ακολουθεί αρχικά την διακεκομμένη γραμμή του σχήματος, καθώς το εξωτερικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται. Είναι προφανές, ότι για ένα μεγάλο γενικά εύρος τιμών του  $H$ , το  $B$  συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται. Φτάνοντας στο σημείο  $a$ , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή. Σε αυτό το σημείο λέμε ότι το υλικό έχει φτάσει τη μαγνήτιση κορεσμού. Στη συνέχεια, καθώς το  $H$  αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο  $a$  στο  $b$ . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν είναι μηδέν. Το σημείο  $b$  παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης (retentivity) του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο  $c$  μηδενίζεται. Το σημείο αυτό δίνει πληροφορίες για το συνεκτικό πεδίο του υλικού, (coercivity). Καθώς το πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει

σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο d). Στη συνέχεια, το εξωτερικό πεδίο ελαττώνεται και η καμπύλη περνάει από το σημείο e όπου αντιστοιχεί στην αντίσταση απομαγνήτισης της αντίστροφης φοράς. Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H, η καμπύλη δεν θα περάσει ξανά από την αρχή των αξόνων, αλλά από το σημείο f, λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης (remanence). Παρατηρούμε λοιπόν ότι σε έναν πλήρη κύκλο το φαινόμενο μαγνήτισης και απομαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού δεν είναι αντιστρεπτό. Παρατηρείται μία καθυστέρηση της μαγνητικής επαγωγής ως προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου που ονομάζεται μαγνητική υστέρηση. Ο κλειστός δρόμος που χαράσσεται κατά τη μαγνήτιση και απομαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού ονομάζεται βρόχος υστέρησης.

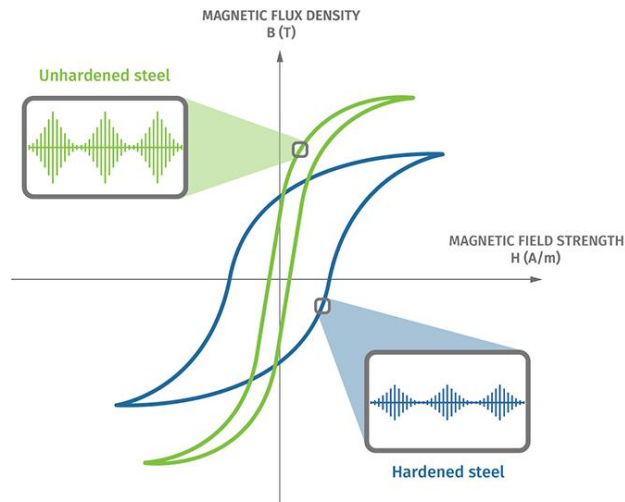
### 1.2.7.2. Θόρυβος Barkhausen

Σύμφωνα με το φαινόμενο Barkhausen, ενώ το εξωτερικά επιβαλλόμενο, μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο συναρτήσει του χρόνου, παρατηρείται ασυνεχής μετάβαση στην πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Η αρχική παρατήρηση του φαινομένου έγινε όταν ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω από ένα δείγμα σιδήρου συνδέθηκε με ενισχυτή και ηχείο. Καθώς το πεδίο H αυξανόταν ομοιόμορφα, το ηχείο παρήγαγε μια σειρά ασθενών ήχων, τα οποία οφείλονταν σε μικρού πλάτους παλμούς που επάγονταν στο σημείο λήψης.

Αρχικά, το φαινόμενο αποδόθηκε στην αιφνίδια περιστροφή της μαγνήτισης μιας περιοχής από ένα κύριο άξονα σε ένα άλλο κύριο άξονα, πλησιέστερο στη διεύθυνση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Σήμερα, είναι γνωστό ότι κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που προκαλεί το θόρυβο Barkhausen, μολοντί και οι δύο μηχανισμοί είναι υπαρκτοί και συμβάλλουν στο φαινόμενο.

Από τα είδη των μαγνητικών τοιχωμάτων, εκείνα στα οποία οφείλεται ο θόρυβος Barkhausen περισσότερο είναι τα τοιχώματα 180°. Τα τοιχώματα 90° είναι λιγότερο ευκίνητα καθώς συνδέονται με πεδία τάσεων και η κίνηση τους παρεμποδίζεται περισσότερο. Κάθε απότομο άλμα στη μετακίνηση των τοιχωμάτων, αυξανόμενου του μαγνητικού πεδίου, προκαλεί ένα παλμό εξόδου. Το σύνολο των παλμών αποτελεί το θόρυβο Barkhausen.



Σχήμα 1-16 Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος των καμπυλών μαγνήτισης

Ο θόρυβος εμφανίζεται στα σημεία του βρόχου υστέρησης όπου η κλίση είναι μεγάλη καθώς η κλίση του διαγράμματος του βρόχου υστέρησης αποτελεί τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Όλες οι ανομοιογένειες του κρυσταλλικού πλέγματος μπορούν να αποτελέσουν σημεία αγκύρωσης και κατ' επέκταση είναι υπεύθυνα για την πρόκληση μαγνητικής εκπομπής θορύβου Barkhausen. Αυτές, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να είναι σημειακές ατέλειες, εγκλείσματα, διαταραχές, κατακρημνίσματα, παραμένουσες τάσεις ή ακόμη και τα όρια κόκκων.

Γενικά, η αύξηση των ατελειών του κρυσταλλικού πλέγματος επιφέρει αύξηση της μαγνητικής απόκρισης του θορύβου Barkhausen, αφού τα τοιχώματα συναντούν περισσότερα εμπόδια στην κίνησή τους. Επίσης, αύξηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen επιφέρει η ύπαρξη εφελκυστικών τάσεων παράλληλα στον άξονα μαγνήτισης, ενώ το αντίθετο αποτέλεσμα έχει η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων παράλληλα στον άξονα μαγνήτισης.

Τέλος, ο θόρυβος Barkhausen έχει ανάλογη σχέση με το μέγεθος κόκκου. Έτσι όσο πιο λεπτοκρυσταλλικό είναι ένα υλικό, τόσο υψηλότερη απόκριση εμφανίζει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα όρια των κόκκων είναι τοποθεσίες που ευνοούν την αγκύρωση των μαγνητικών τοιχωμάτων.

### 1.2.7.3. Μαγνήτιση Κορεσμού

Από το βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Με εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  προς την διεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο  $H$ , η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε μια τιμή  $M_0$ . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$  και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται από το

μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου με βάση την επόμενη σχέση:

$$\vec{M}_0 = n * \vec{m} \quad (1.16)$$

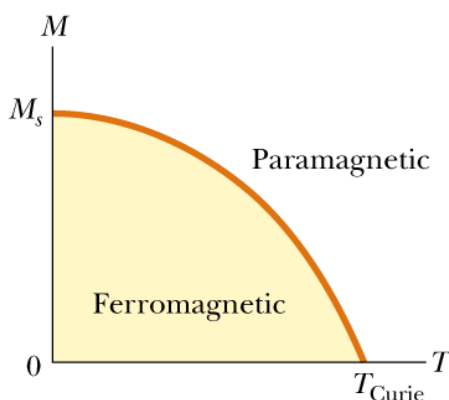
Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο αν το υλικό έχει  $n$  στοιχειώδη ατομικά μαγνητικά δίπολα στη μονάδα του όγκου, το καθένα με μαγνητική ροπή  $m$ , τότε η μαγνητική ροπή στη μονάδα του όγκου του υλικού, όταν όλα τα δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα, καλείται μαγνήτιση κορεσμού  $M_0$ . Το  $M_0$  εξαρτάται μόνο από το υλικό και από τη μικροδομή του.

#### 1.2.7.4. Συνεκτικό Πεδίο

Για την επαναφορά ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός αντίστροφου εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικά πεδίου έντασης  $H_c$ . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercive field) και αντιστοιχεί στις τιμές του  $H$  στα σημεία  $c$  και  $f$  της καμπύλης υστέρησης.

#### 1.2.7.5. Θερμοκρασία Curie

Όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 1-1, όλα τα σιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά υλικά όταν υπερβούν μια κρίσιμη θερμοκρασία, την θερμοκρασία Curie, χάνουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες και γίνονται παραμαγνητικά. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν αλλά τις αποτρέπει επίσης από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie, εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραματικών.

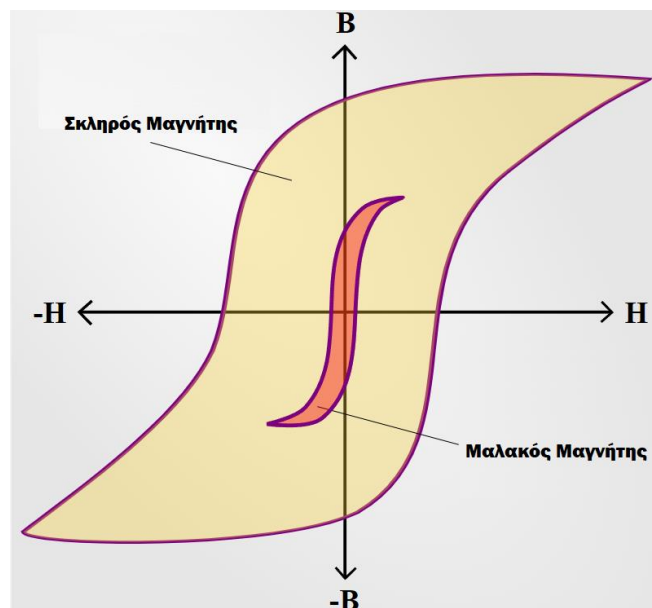


Σχήμα 1-17 Αλλαγή συμπεριφοράς στη θερμοκρασία Curie

### 1.2.7.6. Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Το εμβαδόν της επιφάνειας των βρόχων υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι μικρό και, ως εκ τούτου, οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο είναι μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά, έχοντας μικρό συνεκτικό πεδίο, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά από την άλλη πλευρά, έχοντας μεγάλο συνεκτικό πεδίο, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και για αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές.

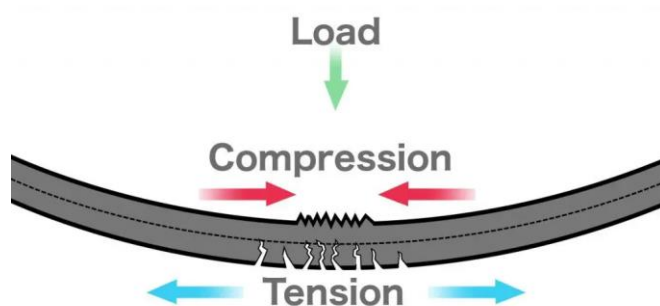


Σχήμα 1-18 Διαφορά βρόχου υστέρησης μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών

## 2. Εναπομένουσες Τάσεις

Οι εναπομένουσες τάσεις είναι το αποτέλεσμα όλων των ενσωματωμένων παραμορφώσεων στο υλικό, εν απουσία ή μετά την απομάκρυνση, μηχανικού ή θερμικού φορτίου. Οπότε, οι εναπομένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την ισορροπία του σώματος με το περιβάλλον γι' αυτό και μπορούν και παραμένουν. Ουσιαστικά, οι εναπομένουσες τάσεις είναι προϊόν πλευρικών ανωμαλιών και εκτοπισμών σωματιδίων που σχετίζονται με τη σύνθεση καθώς και με το ιστορικό του υλικού [21].

Οι τάσεις που δέχεται ένα υλικό είναι εφελκιστικές (tensile stress) ή θλιπτικές (compressive stress). Η εφελκιστική μπορεί να είναι επιβλαβής για το υλικό, ενώ η θλιπτική, για τιμές εντός του εύρους της πλαστικής παραμόρφωσης, ευεργετική. Συγκεκριμένα υπάρχουν ενδείξεις ότι η εφελκυστική τάση αυξάνει τη πιθανότητα ρήγματος του υλικού, ενώ η θλιπτική τάση αυξάνει την αντοχή προς τη φθορά και διάβρωση. Επιπρόσθετα, αυξάνει την αντοχή σε κάθετες δυνάμεις που τείνουν να επαναφέρουν το υλικό στην αρχική του μορφή.



Σχήμα 2-1 Αποτέλεσμα εφελκυστικής και θλιπτικής τάσης σε υλικό

Όσον αφορά τα θερμικά φορτία, για την καλύτερη κατανόηση θα αναφερθούμε στις εναπομένουσες τάσεις που δημιουργούνται στη συγκόλληση. Η συγκόλληση αποτελείται από δύο φάσεις, η πρώτη είναι αυτή κατά την οποία το υλικό θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και η δεύτερη είναι ο ρυθμός που ψύχεται. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι το υλικό να υποβάλλεται σε μια διαδοχική εναλλαγή φάσεων στην επιφάνεια της και στην ευρύτερη ζώνη της συγκόλλησης, η οποία όμως δεν συμβαίνει με τον ίδιο τρόπο στο σώμα του υλικού και έτσι δημιουργούνται εναπομένουσες τάσεις. Επιπρόσθετα, καθώς η συγκόλληση διακρίνεται σε ζώνες, με άλλες μεταβολές της θερμοκρασία η κάθε μια, η κάθε ζώνη έχει και διαφορετική ένταση εναπομενουσών τάσεων.

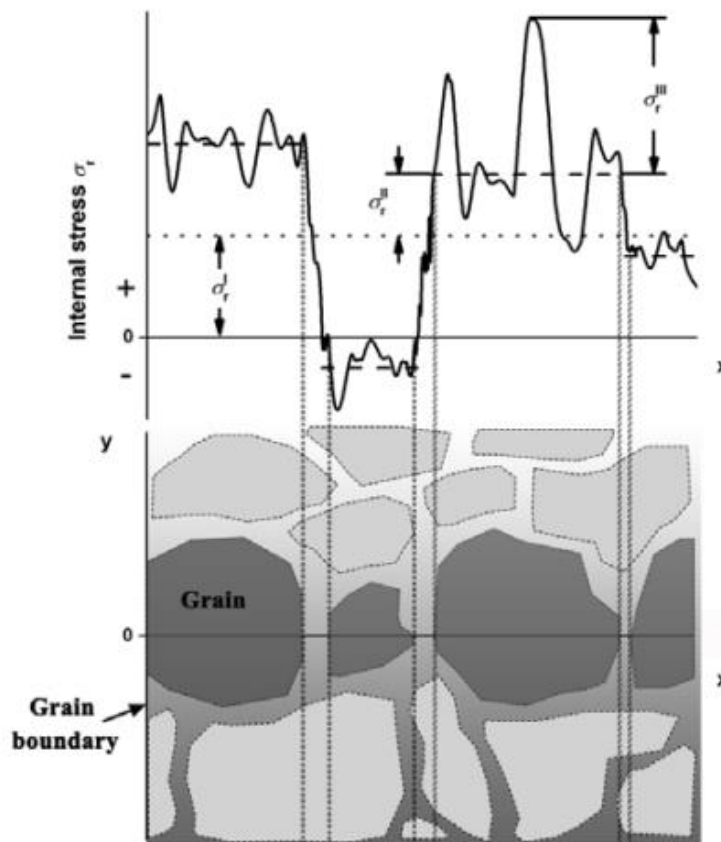
Παραπάνω είδαμε την επιρροή των μηχανικών και θερμικών φορτίων στη δημιουργία εναπομενουσών τάσεων. Τέλος, μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση της τάσης μπορεί να γίνει με βάση το μέγεθος του όγκου στο οποίο οι επιμέρους τάσεις αλληλοαναιρούνται, ώστε η συνολική τάση να είναι μηδενική. Το μέγεθος του όγκου στο οποίο οι επιμέρους τάσεις αλληλοαναιρούνται αναφέρεται παρακάτω ως κλίμακα αυτοεξισορρόπησης [21].

Η γνώση του τύπου τάσης που θέλουμε να μετρήσουμε, ανάλογα με τη κλίμακα αυτοεξισορρόπησης του κατέχει κομβικό ρόλο στη επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μετρήσεων. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο μπορούμε να έχουμε τάση τύπου I, τύπου II και τύπου III. Ως τύπου I, ορίζεται η τάση που αυτοεξισορροπείται σε μακροσκοπικές διαστάσεις. Η τάση τύπου I συχνά οφείλεται σε ανομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση ή σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές.

Ως τύπου II, ορίζεται η τάση που δημιουργείται στα σύνορα κόκκων. Η τάση τύπου II, σε πολυκρυσταλλικά υλικά συμβαίνει λόγω διαφορετικού προσανατολισμού συνορευόντων κόκκων, οπότε σε αυτή τη περίπτωση είναι χαμηλής έντασης. Στην περίπτωση που η τάση τύπου II οφείλεται στο ότι η μικροδομή του υλικού έχει διαφορετικές φάσεις, τότε συγκριτικά η τάση είναι υψηλότερης έντασης .

Τέλος, η τάση τύπου III συμβαίνει σε ατομικό επίπεδο. Ισοδύναμα, για τη τάση τύπου III και τη τάση τύπου II μπορεί να διατυπωθεί ότι συμβαίνουν σε μικροσκοπικές και υπομικροσκοπικές διαστάσεις .

Επιπλέον παράμετρος που χαρακτηρίζει τους εξεταζόμενους τύπους τάσης είναι ο χαρακτηριστικός όγκος  $V_0$ . Ο όγκος  $V_0$  ορίζεται ως ο όγκος πάνω από τον οποίο η τιμή του τύπου τάσης στον οποίο αναφέρεται τείνει στο μηδέν. Ο χαρακτηριστικός όγκος  $V_0$  είναι ανάλογος του κύβου του χαρακτηριστικού μήκους  $l_0$ :  $V_0 \propto l_0^3$ , ενώ συνοδεύεται από δείκτη ο οποίος υποδηλώνει το τύπο τάσης στον οποίο ο όγκος αναφέρεται. Παραδείγματος χάριν, για το τύπο II γράφεται ως  $V(0,II)$  [22].



Σχήμα 2-2 Διακύμανση της τάσης σε συνάρτηση με τη μακροσκοπική δομή [23]

Η κρισιμότητα του χαρακτηριστικού όγκου έγκειται στο ότι καθορίζει το κατάλληλο μέγεθος δειγματικού όγκου σε σχέση με τον επιθυμούμενο προς μέτρηση τύπο τάσης. Στην πράξη παρατηρούμε ότι οι περισσότερες τεχνικές αφαίρεσης υλικού αφαιρούν περιοχές μακροσκοπικών διαστάσεων, οπότε μπορούν να μετρήσουν μόνο τάση τύπου I .

Αυτομάτως, λοιπόν αυτές οι τεχνικές κρίνονται ακατάλληλες σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να μετρήσουμε τάση μικροσκοπικών διαστάσεων. Αντιθέτως, αυτού του είδους οι τεχνικές ενδείκνυνται για περιπτώσεις όπου η τάση τύπου I έχει καίριο ρόλο, όπως οι μεταλλικές κατασκευές. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως η μέτρηση τάσης σε σύνθετα υλικά, θα πρέπει να επιλεγεί άλλη τεχνική αφού σε αυτές κυρίαρχο ρόλο έχει η τάση τύπου II [22]. .

Η κατανόηση, τόσο της αιτίας, όσο και της κλίμακας της τάσης επιτρέπει τόσο τη κατάλληλη επιλογή του τρόπου μέτρησης του όσο και την αποτελεσματικότερη σχεδίαση συστημάτων. Όπως προαναφέρθηκε στη περίπτωση μας αντιμετωπίζουμε τάση τύπου I.



### 3. Μη Καταστροφικός Έλεγχος

Η ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό υλικών και δομών που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών (π.χ. αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, θαλάσσιες κατασκευές, πυρηνική βιομηχανία, κατασκευές πολιτικού μηχανικού, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, κλπ.) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και οργανολογίας. Δυστυχώς πολλές από τις μεθόδους αυτές χαρακτηρισμού απαιτούν κοπή, η οποία καταστρέφει την υπό εξέταση δομή. Μια ιδανική μέθοδος χαρακτηρισμού θα πρέπει να παρέχει στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με τη μικροδομή και τη μακροδομή του χωρίς την ανάγκη τεμαχισμού της δομής. Τέτοιου είδους δεδομένα μπορούν να ληφθούν μόνο χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) .

Οι όροι μη καταστροφικός έλεγχος (nondestructive inspection – NDI), μη καταστροφική δοκιμή (nondestructive testing – NDT) ή μη καταστροφική αξιολόγηση (nondestructive evaluation – NDE) αναφέρονται στη χρήση των ΜΚΕ, μιας κατηγορίας δηλαδή φυσικών δοκιμών που επιτρέπουν την ανίχνευση ή/και μέτρηση ιδιοτήτων του υλικού ή ατελειών χωρίς όμως να εμποδίζεται η λειτουργική χρήση της δομής . Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι είναι απαραίτητοι για σχεδόν οποιοδήποτε βιομηχανικό προϊόν και έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των υλικών διότι επιτρέπουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υλικού (όπως η μικροδομή και η μακροδομή, η μηχανική τάση, οι φυσικές ιδιότητες, και τα ελαττώματα/βλάβες) σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο, γραμμή, επιφάνεια, ή όγκο ενδιαφέροντος και σε σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Λόγω του μεγάλου αριθμού πιθανών μεθόδων και τεχνικών μη καταστροφικού χαρακτηρισμού και αξιολόγησης υλικών και δομών, οι ΜΚΕ δεν είναι ένα μεμονωμένο πεδίο, αλλά μια συνέργεια πολλών επιστημονικών και τεχνικών ειδικοτήτων.

#### 3.1. Οργανολογία

Ο ρόλος της οργανολογίας μη καταστροφικού ελέγχου είναι σημαντικός για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων. Η οργανολογία θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να απολαμβάνει ευρείας αποδοχής στην επιστημονική και τεχνική κοινότητα:

- Ακρίβεια: Το όργανο θα πρέπει να πραγματοποιεί μετρήσεις με ακρίβεια για τον προσδιορισμό είτε των ιδιοτήτων του υλικού ή της παρουσίας ατελειών/βλάβης σ' αυτό.
- Αξιοπιστία: Το όργανο θα πρέπει να ανιχνεύει συνεχώς και να ποσοτικοποιεί ατέλειες/βλάβη ή ιδιότητες του υλικού με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Αν ένα όργανο δεν είναι αξιόπιστο, τότε δεν μπορεί να ανιχνεύσει τη βλάβη που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του εξαρτήματος, ή μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία μιας ατέλειας εκεί που δεν υπάρχει. Η ανίχνευση μιας πλασματικής ατέλειας (phantom flaw) μπορεί να σημαίνει ότι ένα κατάλληλο εξάρτημα απορρίπτεται, το οποίο είναι ένα δαπανηρό λάθος.

- Απλότητα: Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα όργανα στο πεδίο είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται από τεχνικούς στο εργοστάσιο ή για επισκευές, και όχι από εξειδικευμένους χειριστές.
- Χαμηλό Κόστος: Ένα όργανο δεν χρειάζεται να είναι χαμηλού κόστους με την απόλυτη έννοια του όρου. Όμως, θα πρέπει να είναι φθηνό σε σχέση είτε με την αξία του υπό έλεγχο εξαρτήματος ή σε σχέση με το κόστος της αποτυχίας ή της κρισιμότητας της εφαρμογής. Για παράδειγμα, στον τομέα της αεροναυπηγικής, έως και το 12 % της αξίας του εξαρτήματος μπορεί να δαπανηθεί για την επιθεώρηση ενός εξαρτήματος που κρίνεται ως κρίσιμο για την ασφαλή πτήση του αεροσκάφους

Γίνεται κατανοητή λοιπόν η αναγκαιότητα εφαρμογής μεθόδων ΜΚΕ οι οποίες με γρήγορο, αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο θα επιτρέψουν την κατάστρωση σχεδίου συντήρησης των κατασκευών βάσει της φθοράς που έχει υποστεί η ακεραιότητά τους και της επικινδυνότητας της λειτουργίας τους. Ο έλεγχος των υλικών στο πεδίο πραγματοποιείται συχνά συγκρίνοντας τα δεδομένα της επιθεώρησης με τα αποτελέσματα από ένα πρότυπο δοκίμιο, επισημαίνοντας τυχόν σημαντικές αποκλίσεις. Αυτό σημαίνει ότι καλά καθορισμένα πρότυπα δοκίμια θα πρέπει να είναι διαθέσιμα για τη βαθμονόμηση της οργανολογίας ελέγχου. Για την αποφυγή εσφαλμένων αποτελεσμάτων, τα πρότυπα δοκίμια θα πρέπει να εμπεριέχουν ενσωματωμένες ατέλειες που να προσομοιάζουν εκείνες που εμφανίζονται φυσικά στο υπό έλεγχο υλικό ή δομή.

Η ανάπτυξη μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MicroElectroMechanical Systems – MEMS) με βάση νέες συσκευές ημιαγωγών και ταυτοποίησης ραδιοσυχνοτήτων (Radio-Frequency Identification – RFI), καθώς και των ενσωματωμένων πλεγμάτων ιών Bragg, επιτρέπει την εμφύτευση συσκευών ελέγχου και παρακολούθησης σε ένα υλικό κατά τη στιγμή της κατασκευής του, ώστε να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση της υγειούς λειτουργίας ( Structural Health Monitoring -SHM) της δομής σε πραγματικό χρόνο. Το SHM αναφέρεται στη διαδικασία εφαρμογής μιας στρατηγικής για την απομακρυσμένη ανίχνευση βλάβης και την παρακολούθηση της υποβάθμισης του υλικού σε τεχνολογικές δομές και κατασκευές. Συσκευές και μέθοδοι SHM επιτρέπουν την εξ αποστάσεως ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας του υλικού, καθιστώντας δυνατή τη διαχείριση των εξαρτημάτων μιας κατασκευής για τη βέλτιστη χρήση τους κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους.

### 3.2. Τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου

Οι κύριες τεχνικές των ΜΚΕ είναι οι εξής:

- Οπτικός Έλεγχος
- Έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες (penetrating radiation)
- Μαγνητικός- Ηλεκτρικός Έλεγχος
- Έλεγχος με μηχανικές δονήσεις
- Θερμικός Έλεγχος
- Χημικός και ηλεκτρομηχανικός έλεγχος

Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες:

- a. πηγή ενέργειας ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες X, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία),
- b. φύση των σημάτων και η εικόνα ή υπογραφή που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο (εξασθένιση των ακτίνων X, ανάκλαση των υπερήχων),
- c. μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι)
- d. μέθοδοι καταγραφής των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπερύθρου),
- e. ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ποσοτική ή ποιοτική).

Αντικείμενο της κάθε μεθόδου είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

- Ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.)
- Δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.)
- Διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.)
- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.)
- Σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμείξεις κ.ά.)
- Στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής, φθορά από τριβή κ.ά.)
- Ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος, περιεχόμενο εικόνας κ.ά.)
- Μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας

Τέλος, στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αυτών.

Πίνακας 3-1: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου [3]

Μέθοδος ΜΚΕ	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Ραδιογραφία</b>	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολλήσεις, δομικές κατασκευές	Ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες, εφαρμόσιμη για μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Υψηλό κόστος, χαμηλή ευαισθησία σε λεπτές στρωματικές ατέλειες, όπως κλειστές ρωγμές κόπωσης και αποκολλήσεις, πιθανός κίνδυνος για την υγεία
<b>Διεισδυτικά υγρά</b>	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολλήσεις, εξαρτήματα που υπόκεινται σε κόπωση ή ρηγμάτωση λόγω καταπόνησης και διάβρωσης	Χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων	Το ελάττωμα πρέπει να είναι ανοικτό σε μια προσιτή επιφάνεια, το επίπεδο ανιχνευσιμότητας εξαρτάται από τον χειριστή
<b>Δινορρέυματα</b>	Σωληνώσεις, μεταλλικά ελάσματα, διαλογή κράματος, μέτρηση πάχους επικάλυψης	Μέτριο κόστος, αυτοματοποίηση, φορητότητα	Ανιχνεύει ατέλειες που μεταβάλλουν την αγωγιμότητα των μετάλλων, μικρό βάθος διείσδυσης, ευαίσθητη στη γεωμετρία του δοκιμίου
<b>Μαγνητικά σωματίδια</b>	Χύτευση, σφυρηλασία, διέλαση	Απλή, χαμηλό κόστος, ανιχνεύει επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες	Εφαρμόσιμη μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, συχνά παρατηρούνται άσχετες ενδείξεις, εξαρτάται από τον χειριστή
<b>Θερμογραφία</b>	Πολυστρωματικές δομές, κυψελοειδείς δομές, ηλεκτρονικά κυκλώματα	Πλήρους πεδίου, σε πραγματικό χρόνο, θερμική απεικόνιση που ερμηνεύεται εύκολα	Δυσκολία ελέγχου της εκπνευσιμότητας της επιφάνειας, μικρή διακριτική ικανότητα ανάμεσα σε ατέλειες διαφορετικών τύπων
<b>Υπέρηχοι</b>	Σύνθετα υλικά, σφυρηλασία, χύτευση, συγκολλήσεις, σωλήνες	Εξαιρετικό βάθος διείσδυσης, καλή ευαισθησία και ανάλυση, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Απαιτεί ακουστικό μέσο σύζευξης με το εξάρτημα, χαμηλής ταχύτητας, η ερμηνεία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη

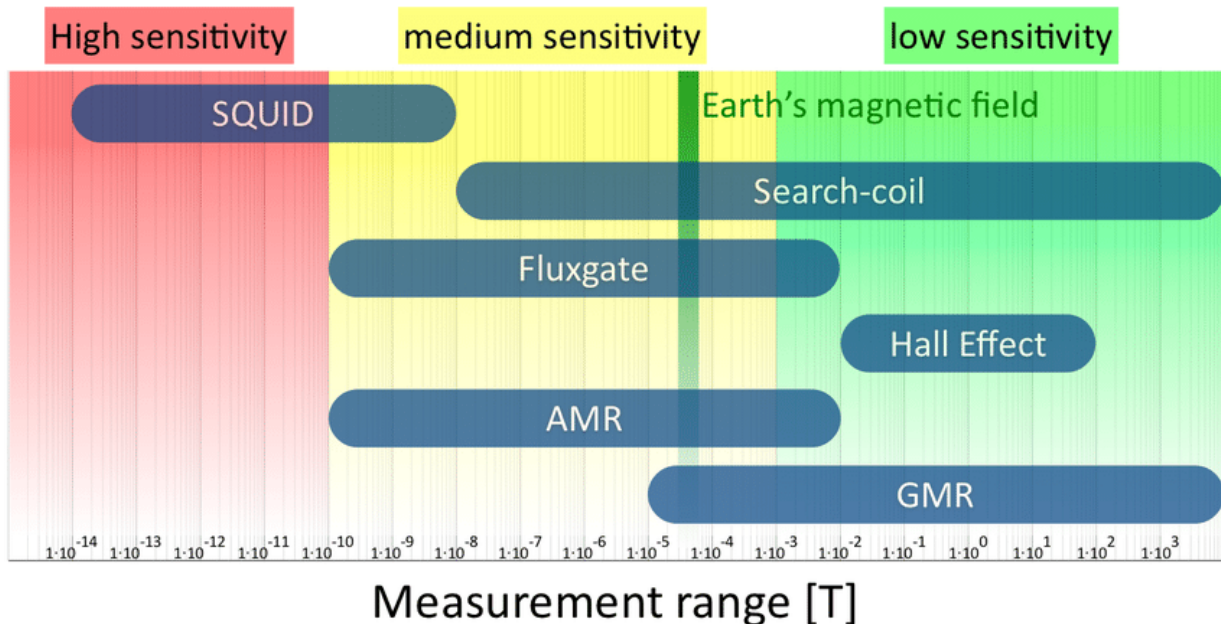
## 4. Μαγνητικοί Αισθητήρες

Κατά βάση, οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι αισθητήρες πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$ . Οι αισθητήρες αυτοί διαχωρίζονται ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους και ανάλογα με το επίπεδο πυκνότητας μαγνητικής ροής που ανιχνεύουν.

Κατά την ανάπτυξη ενός καινούριου μαγνητικού αισθητήρα είναι πολλοί οι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη μέχρι τελικά ο αισθητήρας να βρει πρακτική εφαρμογή. Θεωρητικά θα ήταν αρκετό να βρεθεί η σχέση μεταξύ μαγνητικού πεδίου και σήματος εξόδου, ωστόσο για να θεωρηθεί ότι οι μετρήσεις του αισθητήρα έχουν κάποια χρησιμότητα είναι αναγκαίο να εξεταστούν διάφοροι παράγοντες οι οποίοι χαρακτηρίζουν την λειτουργία του. Ενδεικτικά, κάποιοι τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Το επίπεδο και η ανάλυση θορύβου.
- Το offset του σήματος εξόδου.
- Η σταθερότητά του σε βάθος χρόνου
- Η ευαισθησία του
- Η μη γραμμικότητά του
- Το εύρος τιμών του
- Το εύρος συχνοτήτων του
- Η αντοχή στη θερμοκρασία
- Το κόστος παραγωγής του.

Παρακάτω στο σχήμα βλέπουμε συγκριτικά τα είδη των μαγνητικών αισθητήρων ανάλογα με το φάσμα λειτουργίας τους.



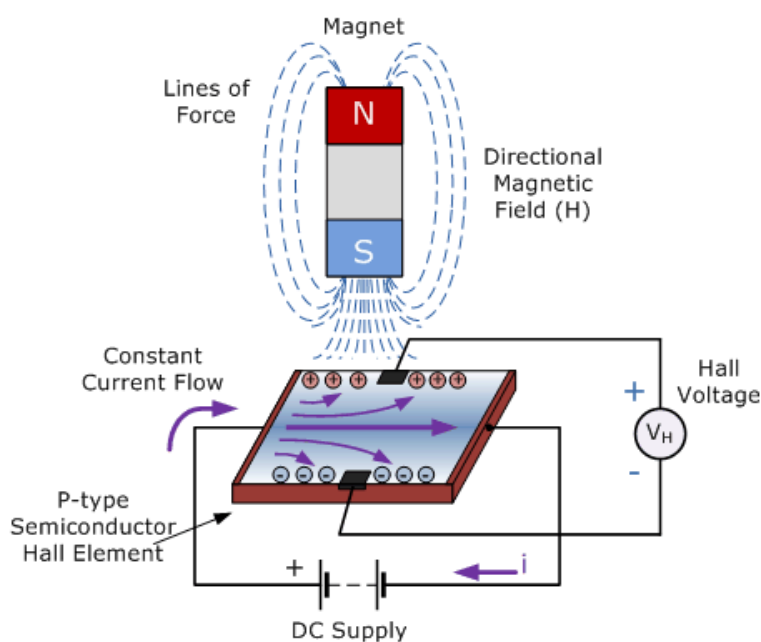
Σχήμα 4-1 Κάποια σημαντικά είδη μαγνητικών αισθητήρων και το φάσμα λειτουργίας(T) του καθενός [5]

Στη συνέχεια αναλύονται τα πιο σημαντικά είδη μαγνητικών αισθητήρων και κάποιες εφαρμογές αυτών.

## 4.1. Αισθητήρας Hall

Η λειτουργία του μαγνητικού αισθητήρα Hall βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο, που ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Edwin Hall. Βάσει αυτού, όταν ένα ρεύμα διαρρέει μία πλάκα και ταυτόχρονα στο υλικό εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος, τότε εμφανίζεται μια τάση, η οποία είναι κάθετη τόσο στο ρεύμα, όσο και στο μαγνητικό πεδίο και οφείλεται στη δύναμη Lorentz που επιδρά στα κινούμενα φορτία. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φαινόμενο Hall και αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας του ομώνυμου αισθητήρα.

Παρόλο που ο αισθητήρας Hall είναι αισθητήρας μαγνητικού πεδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βασικό εξάρτημα σε πολλών ειδών αισθητήρες (αισθητήρια ρεύματος, θερμοκρασίας, πίεσης, θέσης, κλπ.). Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε πολλών ειδών συσκευές. Αν στη μετρούμενη ποσότητα περιλαμβάνεται ή μπορεί να ενσωματωθεί μαγνητικό πεδίο τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας Hall.



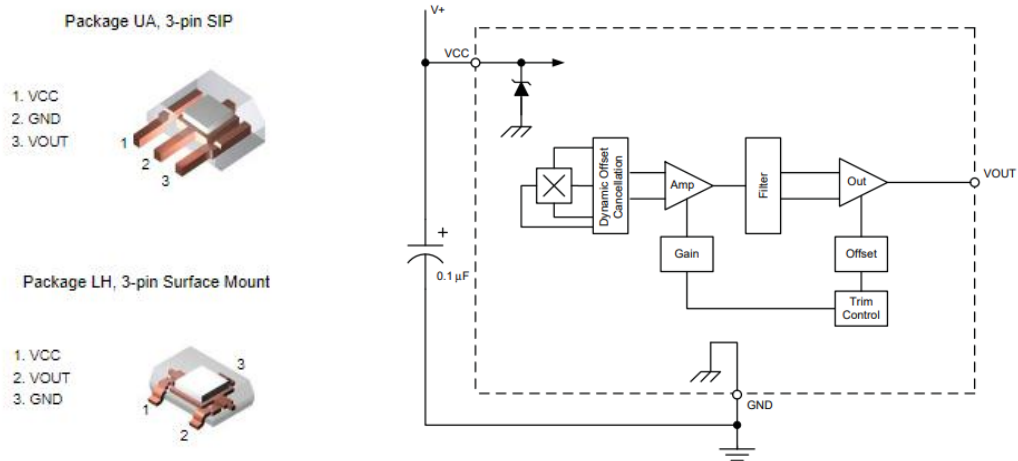
Σχήμα 4-2 Φαινόμενο Hall

Παρακάτω παρατίθενται τα κύρια μετρούμενα μεγέθη που μετρούνται από αισθητήρες Hall καθώς κάποια παραδείγματα από τις εφαρμογές τους.

- **Ισχύς μαγνητικού πεδίου:** Το συναντάμε σε ψηφιακές πυξίδες κινητών. Μια τέτοια πυξίδα χρησιμοποιεί τον αισθητήρα Hall για να μετρήσει την ισχύ και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Ο αισθητήρας Hall είναι τοποθετημένος σε έναν άξονα περιστροφής, επιτρέποντάς του να περιστρέφεται ελεύθερα. Ο αισθητήρας ανιχνεύει το μαγνητικό πεδίο και

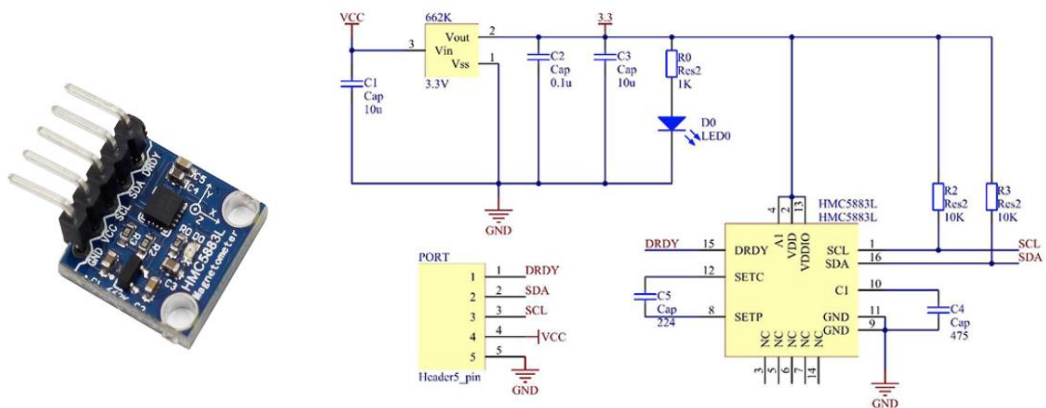
παράγει μια τάση ανάλογη με την ένταση του πεδίου. Αυτή η τάση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θέσης μιας βελόνας που είναι επίσης τοποθετημένη στον άξονα περιστροφής. Η βελόνα ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, στραμμένη προς τον μαγνητικό Βορρά.

Η τάση εξόδου του αισθητήρα Hall τροφοδοτείται σε έναν μικροελεγκτή που καθορίζει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου με βάση την πολικότητα της τάσης. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής περιστρέφει τη βελόνα για να ευθυγραμμιστεί με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Ο συνδυασμός του αισθητήρα Hall και του μικροελεγκτή επιτρέπει στην πιξίδα να παρέχει ακριβή ανάγνωση της κατεύθυνσης του μαγνητικού Βορρά. Στο Σχήμα 4-3 βλέπουμε ένα παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα.



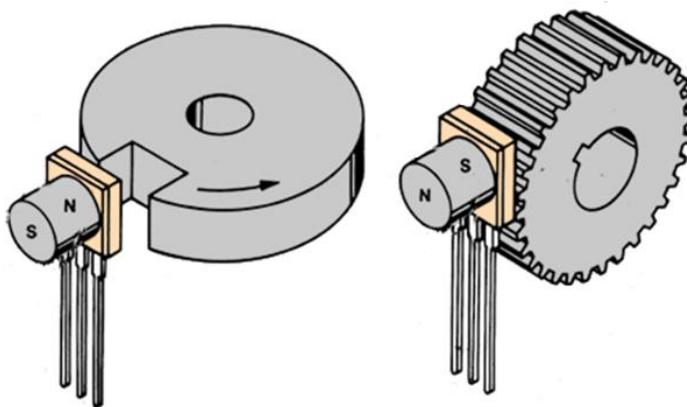
Σχήμα 4-3 Αισθητήρας Hall, A1321 Allegro Microsystems , συνδεσμολογία και διάγραμμα λειτουργίας

- Κατεύθυνση Μαγνητικού πεδίου:** Παρομοίως με τον προηγούμενο Hall αισθητήρα μετριέται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, αυτή τη φορά στους τρεις άξονες X, Y και Z και παρέχει πληροφορίες κατεύθυνσης. Πρακτικά αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τρεις αισθητήρες μαζί που είναι τοποθετημένοι κάθετα μεταξύ τους. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή μεταξύ πολλών άλλων εφαρμογών, σε drones.



Σχήμα 4-4 Αισθητήρας HMC5883L magnetometer και διάγραμμα λειτουργίας

- **Ταχύτητα:** Προφανώς από τη στιγμή που μετράει μαγνητικό πεδίο, μέσω αισθητήρα Hall, μπορούμε να μετρήσουμε ταχύτητα των μοτέρ DC, πλυντηρίων, ταχύτητα τροχού αυτοκινήτων. Στην αυτοκινητοβιομηχανία οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν ανιχνεύοντας τη διέλευση ενός σιδηρομαγνητικού στόχου, όπως ένας οδοντωτός τροχός ή ένα δόντι γραναζιού, και εξάγοντας μια σειρά παλμών ανάλογων με την ταχύτητα με την οποία κινείται ο στόχος. Η έξοδος του αισθητήρα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί από τη μονάδα ελέγχου κινητήρα (ECU) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των τροχών του οχήματος, η οποία είναι σημαντική για διάφορες λειτουργίες ελέγχου, όπως ο έλεγχος πρόσφυσης, το ABS και ο έλεγχος ευστάθειας. Ένα κίτ, pcb και λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία για τα ενεργά συστήματα αναρτήσεων και abs, και έχει ενσωματωμένους αισθητήρες Hall είναι το Melexis MLX90393.



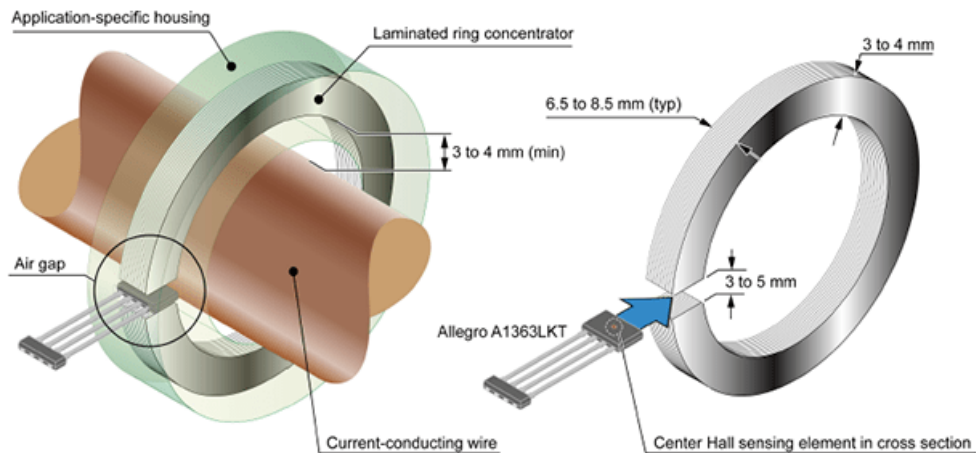
Σχήμα 4-5 : Μέτρηση ταχύτητας οδοντωτού τροχού και γραναζιού

**Ρεύμα:** Οι αισθητήρες Hall γραμμικής εξόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ρευμάτων εύρους από 250mA μέχρι χιλιάδες Ampere. Η απομονωμένη αναλογική τάση που παράγεται από τον αισθητήρα μπορεί να τροποποιηθεί προσθέτοντας ενισχυτές ή συγκριτές ώστε να επιτύχουμε ψηφιακή έξοδο, αλλαγή επιπέδου, θερμοκρασιακή απόσβεση, ρύθμιση κέρδους ή άλλες επιθυμητές παραμέτρους. Οι γραμμικοί αισθητήρες προσφέρουν υψηλή απόκριση συχνότητας (AC) και μετρήσεις σταθερών ρευμάτων (DC). Όταν ένας γραμμικός αισθητήρας τοποθετείται κοντά σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, η τάση εξόδου που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου που περιβάλλει τον αγωγό. Αυτού του τύπου η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα χρησιμοποιείται συνήθως για να μετρήσουμε σχετικά μεγάλα ρεύματα σε γραμμές υψηλής τάσης ή σε εξοπλισμό που βρίσκεται σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τελική επιλογή πρέπει να βασίζεται σε πραγματικές δοκιμές πάνω στην εφαρμογή. Οι τιμές που δίνονται για τον παραμένοντα μαγνητισμό από τους προμηθευτές των υλικών αναφέρονται συνήθως σε κλειστό μαγνητικό περιβάλλον. Οι αισθητήρες ρεύματος απαιτούν μεγάλα κενά αέρος, έτσι πρέπει οι προδιαγραφές της εφαρμογής να μετρηθούν. Παρόλα αυτά οι τιμές που δίνουν οι κατασκευαστές μας



παρέχουν κάποιες σχετικές ενδείξεις για τη συμπεριφορά του κάθε υλικού. Το σύρμα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να μπορεί να αντέχει στο μέγιστο ρεύμα μόνιμα. Όσο μεγαλύτερα όρια αντοχής έχει το καλώδιο, τόσο μικρότερη πτώση τάσης εμφανίζεται. Οι αισθητήρες ρεύματος που κάνουν χρήση δακτυλίων είναι χρήσιμοι σε συστήματα τα οποία απαιτούν ένα ευρύ δυναμικό φάσμα, καθόλου αντίσταση σειράς και γραμμική μέτρηση ρεύματος.



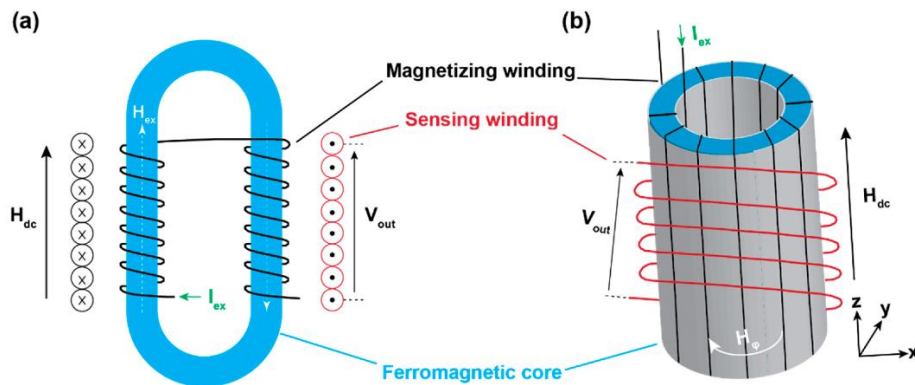
Σχήμα 4-6 : Αισθητήρας Hall σε τυπική διάταξη μέτρησης ρεύματος αγωγών

## 4.2. Αισθητήρας Fluxgate

Οι αισθητήρες fluxgate που είναι γνωστοί και με την ονομασία «μαγνητόμετρα κορεσμένου πυρήνα» αναπτύχθηκαν αρχικά την δεκαετία του 1930 για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης. Στη συνέχεια στα υποβρύχια προς εντοπισμό χαμηλά ιπτάμενων αεροσκαφών και πλέον χρησιμοποιείται σε διαστημικές αποστολές σε γήινη τροχιά και στη σελήνη.

Τα μαγνητόμετρα fluxgate είναι κατάλληλα για μέτρηση της απόλυτης τιμής της έντασης μαγνητικού πεδίου, καθώς και για τη μέτρηση της διαφοράς μεταξύ δύο σημείων εντός μαγνητικού πεδίου. Μπορούν να μετρήσουν εντάσεις ασθενούς μαγνητικού πεδίου της τάξης από  $10^{-1}$  έως  $1000$  nT με διακριτική ικανότητα που μπορεί να πλησιάσει τα  $100$  pT. Το εύρος λειτουργίας τους και η διακριτική τους ικανότητα καλύπτουν το κενό ανάμεσα στους φθηνούς αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, ή αισθητήρες Hall, και στα ακριβά μαγνητόμετρα που βασίζονται σε κβαντικά φαινόμενα όπως τα SQUIDS.

Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους οι αισθητήρες fluxgate χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, παράλληλου και ορθογώνιου τύπου:



Σχήμα 4-7 : Αισθητήρας Fluxgate παράλληλος(a) και ορθογώνιος (b)

Γενικά η βασική αρχή λειτουργίας αυτού του αισθητήρα στηρίζεται στην απλή διάταξη που περιλαμβάνει ένα σιδηρομαγνητικό πυρήνα με υψηλή μαγνήτιση κορεσμού και δύο τουλάχιστον πηνία. Το πηνίο λήψης μετρά συνεχές ή χαμηλής συχνότητας συνιστώσες του εξωτερικού πεδίου ενώ το πηνίο διέγερσης ή προμαγνήτισης χρησιμοποιείται για δημιουργία του πεδίου αναφοράς.

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

Στους ορθογώνιου τύπου Fluxgate αισθητήρες το πεδίο διέγερσης είναι κάθετο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου και από εκεί προκύπτει και η ονομασία τους. Αποτελούνται από κυλινδρικό πυρήνα μαλακού μαγνητικού υλικού με τοροειδές πηνίο διέγερσης τυλιγμένο γύρω του. Το ρεύμα διέγερσης ρέει μέσω αυτού του πηνίου προκαλώντας πεδίο  $H_{\phi}$ , το οποίο σε συνδυασμό με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H$ , φέρνει τον πυρήνα σε κορεσμό περιοδικά με αντίθετες πολώσεις. Η τάση εξόδου λαμβάνεται και εδώ μέσω πηνίου λήψης τυλιγμένου γύρω από τον πυρήνα. Σε περίπτωση απουσίας  $H_{\text{εξωτερικού}}$  το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι μηδενικό.

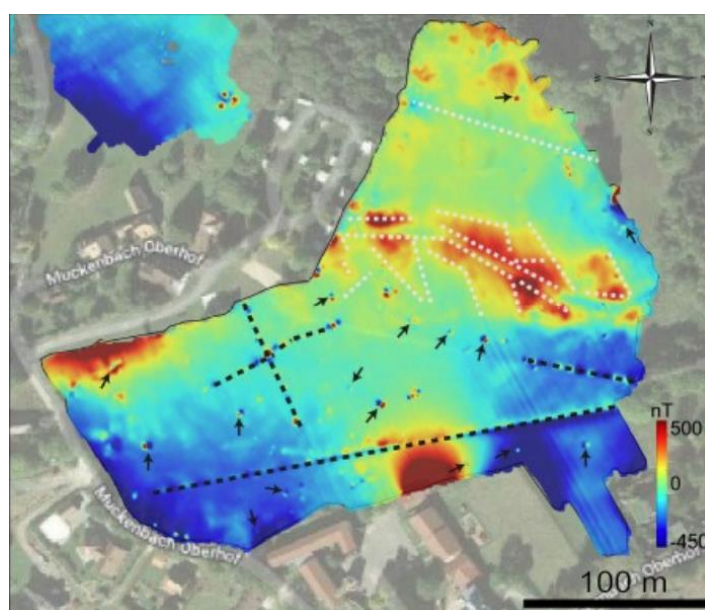
Παρακάτω παρατίθενται οι κύριοι τομείς που χρησιμοποιούνται οι Fluxgate αισθητήρες και κάποια παραδείγματα των εφαρμογών τους.

1. Αεροδιαστημική και συστήματα άμυνας: Το 1958 ο Sputnik-3 ήταν ο πρώτος δορυφόρος που έφερε αισθητήρα fluxgate. Ο ανιχνευτής του Άρη της ΕΣΣΔ, ο NASA Explorer 12, 14 και 18, Mariner 2 (Αφροδίτη), USSR Earth Orbit Electron 2 και Apollo 12, 14, 15, και 16 έχουν συμπεριληφθεί σε ορισμένους δορυφόρους με αισθητήρες Fluxgate [8, 9]. Επίσης, ο δορυφόρος Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) χρησιμοποιεί τριαξονικό Fluxgate μαγνητόμετρο (TFM).

2. Αυτοματισμοί και συστήματα ελέγχου: Χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν τη θέση του άξονα του μοτέρ για να εξασφαλίσουν τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να μετρήσουν την αξονική και περιστροφική θέση ενός επενεργητή. Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται για ανάλυση δονήσεων για εντοπισμός δονήσεων σε άξονες και μηχανήματα.

3. Ιατρικός εξοπλισμός: χρησιμοποιούνται κυρίως στους μαγνητικούς τομογράφους (MRI) . Επιπρόσθετα, η καρδιά έχει μαγνητικό πεδίο των 100 pT, έπειτα από πείραμα με αισθητήρα Fluxgate πυρήνα γεωμετρίας δακτυλίου από NiFe που πραγματοποιήθηκε το 1963, από τους Baule και McFee, δημιουργήθηκε ένας φορητός αισθητήρας fluxgate για την ανάλυση καρδιακών παθήσεων. Μια άλλη αξιοσημείωτη εφαρμογή των αισθητήρων fluxgate στην ιατρική αφορούσε την παρακολούθηση των σωματιδίων σκόνης που συλλέγονται από τα πνευμονικά φίλτρα [6].

4. Γεωφυσική: Χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς το 2020 στο Βόρεια Όρη Vosges, με το drone Matrice 210 RTK και το μαγνητόμετρο Bartington MAG03-MC, όπου χαρτογραφήθηκε και μετρήθηκε το μαγνητικό πεδίο για μεταλλεύματα [10].



**Σχήμα 4-8 : Απεικόνιση χάρτη από μαγνητόμετρο στα 100m, με λευκό απεικονίζονται τα κτίσματα και οι μαύρες γραμμές και βέλη υποδεικνύουν τις σωληνώσεις και τα θαμμένα μεταλλικά αντικείμενα**

Από την παραπάνω έρευνα μπορούμε να δούμε πως υπάρχει πληθώρα εφαρμογών π.χ. έχουν χρησιμοποιηθεί Fluxgate Υπάρχει πληθώρα εφαρμογών σε γεωφυσικό επίπεδο, π.χ. έχει χρησιμοποιηθεί και για στρατιωτικές επιχειρήσεις για την ανίχνευση ναρκών[11]

5. Power and energy: Fluxgate αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε σωληνώσεις πετρελαίων και αερίων για αλλοιώσεις και ελαττώματα στις σωληνώσεις. Φυσικά, χρησιμοποιούνται για μέτρηση συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος στον τομέα της ενέργειας και για τον εντοπισμό αλλοιώσεων σε μετασχηματιστές για τη διάγνωση βλαβών.

6. Αυτοκινητοβιομηχανία: Προφανώς χρησιμοποιούνται όπως και οι αισθητήρες Hall για το ABS στον εντοπισμό της ταχύτητας του τροχού καθώς και στα συστήματα διαχείρισης της μηχανής για τη μέτρηση της θέσης του εκκεντροφόρου άξονα. Όπως και για έλεγχο της ροπής, για overster και underster του οχήματος[13].

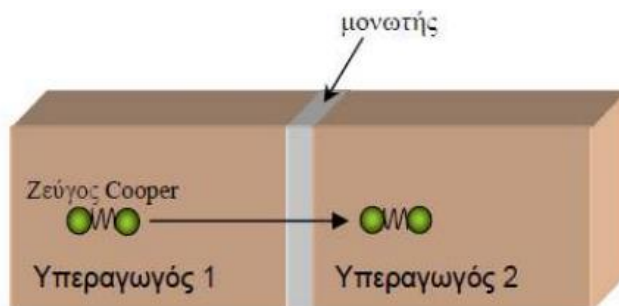
### 4.3. Αισθητήρας Squid

Ο αισθητήρας SQUID (αρχικά των λέξεων Superconducting Quantum Interference Device – συσκευή υπεραγώγιμης κβαντικής παρεμβολής) είναι ένα είδος μαγνητικού αισθητήρα μεγάλης ευαισθησίας ο οποίος είναι ικανός να ανιχνεύει εξαιρετικά μικρά μαγνητικά πεδία [Σχήμα 4-1]. Οι αισθητήρες SQUID αποτελούνται από υπεραγώγιμους βρόχους οι οποίοι περιέχουν γέφυρες Josephson .

Το έτος 1962 ο Brian Josephson προέβλεψε ότι σε δομές SIS οι κυματοσυναρτήσεις που περιγράφουν τα ζεύγη Cooper στους δύο υπεραγωγούς επικαλύπτονται μερικώς προξενώντας φαινόμενο σήραγγας, με τα ζεύγη να διέρχονται μέσα από το φράγμα δυναμικού προκαλώντας ένα ρεύμα που ρέει υπό μηδενική τάση. Το επιχείρημα αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Anderson και Rowell το 1963 .

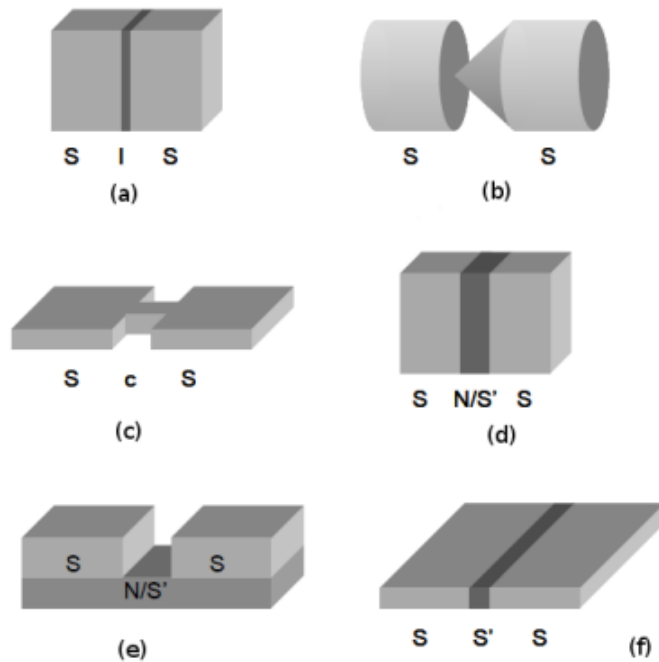
Πιο συγκεκριμένα, ο Josephson διατύπωσε την άποψη ότι όχι μόνο μοναχικά ηλεκτρόνια διαπερνούν τον μονωτή, χάρη στο φαινόμενο της σήραγγας , αλλά και τα ζεύγη Cooper μπορούν να διαπεράσουν την επαφή αυτή. Ο Josephson προχώρησε και είπε ότι τα ζεύγη Cooper θα περνούν μέσα από τη σήραγγα χωρίς να υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση και θα δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα χωρίς να υπάρχει εφαρμοζόμενη εξωτερική ηλεκτρική τάση (φαινόμενο Josephson συνεχούς) .

Προέβλεψε επίσης ότι αν εφαρμόσουμε στα άκρα της επαφής συνεχή τάση , τότε εναλλασσόμενο ρεύμα θα διαπεράσει την επαφή (φαινόμενο Josephson εναλλασσόμενου) με συχνότητα που εξαρτάται από την τάση[14].



Σχήμα 4-9 : Επαφή / Γέφυρα Josephson (Josephson Junction – JJ)

Προφανώς το φαινόμενο αυτό όπου, οι υπεραγωγοί είναι ασθενώς συζευγμένοι, μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους, στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζονται αρκετοί από αυτούς.

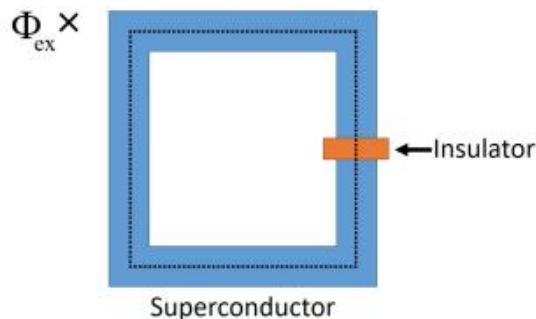


Σχήμα 4-10 : (a) Επαφή Φαινομένου σήραγγάς, (b) Επαφή σημείου, (c) γέφυρα Dayem , (d) Επαφή SNS sandwich, (e) γέφυρα μεταβλητού πάχους, (f) γέφυρα απόθεσης ιόντων [15]

Με βάση τα παραπάνω, οι αισθητήρες SQUID χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

#### 4.3.1. RF SQUID

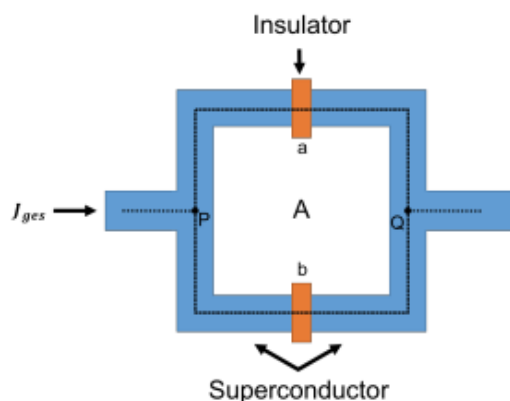
Ο RF (Radio Frequency) SQUID επινοήθηκε το 1965 από τους Robert Jaklevic, John J. Lambe, Arnold Silver και James Edward Zimmerman στη Ford [16]. Βασίζεται στο φαινόμενο AC Josephson και χρησιμοποιεί μόνο μία γέφυρα Josephson. Είναι λιγότερο ευαίσθητος σε σύγκριση με το DC SQUID αλλά είναι φθηνότερος και πιο εύκολος στην κατασκευή σε μικρότερες. Ο RF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 4-11 : Κλειστός Βρόχος Υπεραγωγού με ένα μία γέφυρα Josephson σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

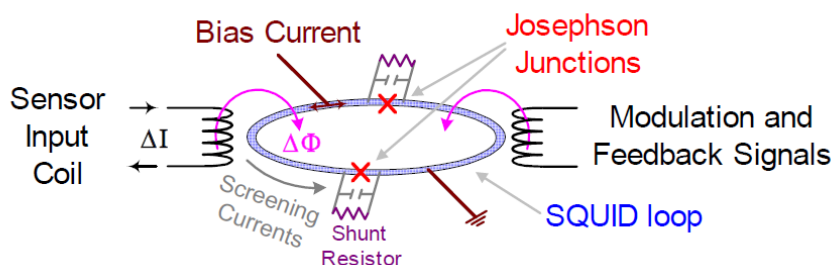
### 4.3.2. DC SQUID

Ο dc SQUID διαφέρει από τον rf SQUID ως προς τον τρόπο της πόλωσης των γεφυρών Josephson και στο γεγονός ότι αποτελούνται από 2 τουλάχιστον γέφυρες Josephson. Οι dc αισθητήρες είναι πιο δύσκολοι στη κατασκευή καθώς οι δύο γέφυρες πρέπει να είναι μεταξύ τους πανομοιότυπες. Ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει και αν δεν είναι αλλά αυτό θα υποβιβάσει αισθητά την απόδοση του αισθητήρα. Η ιδανική αντίσταση διακλάδωσης που πρέπει να έχουν θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Η χρήση κανονικών μεταλλικών αντιστάσεων όπως από Pd προτιμάται έναντι άμορφων υλικών ή υλικών με υπεραγώγιμες μεταπτώσεις που θα εμπόδιζαν τη λειτουργία του σε LTS (Low Temperature Superconductors) συσκευές κάτω από  $T_c$ , π.χ., 0,915 K στην περίπτωση ενός μολυβδαινίου αντίσταση διακλάδωσης.



Σχήμα 4-12 : Ο DC SQUID αποτελείμενος από 2 γέφυρες Josephson, a και b συνδεδεμένα παράλληλα

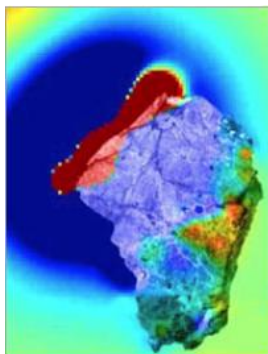
Οι αισθητήρες ανάλογα το είδος της εφαρμογής τους αποτελείται σαφώς από περαιτέρω μέρη ώστε να είναι μια ολοκληρωμένη διάταξη, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4-13. Τέλος, ένας μετέπειτα διαχωρισμός των αισθητήρων αυτών είναι με τη θερμοκρασία εφαρμογής τους και χωρίζονται σε LTS (Low Temperature Superconductors) και HTS (High Temperature Superconductors).



Σχήμα 4-13 : DC SQUID με 2 γέφυρες Josephson, ο πυκνωτής αντιπροσωπεύει την αυτό - χωρητικότητα της κάθε γέφυρας

Η ευαισθησία αυτών των αισθητήρων προσφέρει τη δυνατότητα να μετρήσουν πεδία τα οποία είναι ακόμα και της τάξης των  $5 \text{ aT}$  ( $5 \cdot 10^{-18} \text{T}$ ). Σαν αποτέλεσμα, μπορούν να βρουν εφαρμογή σε τομείς όπου τα μεγέθη υπό μέτρηση είναι εξαιρετικά ασθενή όπως:

Γεωφυσικές εφαρμογές: Μπορεί να εφαρμοστεί στη μαγνητογραφία πετρωμάτων. Η γνώση του προσανατολισμού του μαγνητικού πεδίου ενός δείγματος πετρώματος ή πυρήνα μπορεί να δώσει πληροφορίες για το πώς σχηματίστηκε ο βράχος. Αλλάζοντας το θερμικό ιστορικό του δείγματος, μπορεί να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας Curie και/ή Néel των συστατικών του πετρώματος. Ανυψώνοντας το εφαρμοζόμενο πεδίο πάνω από το πεδίο κορεσμού οποιονδήποτε σιδηρομαγνητικών συστατικών, μπορεί να είναι δυνατή η μελέτη παραμαγνητικών συστατικών. Κανονικά ένα μαγνητόμετρο βράχου 3 αξόνων χρησιμοποιείται για παλαιομαγνητικές μετρήσεις. Χρησιμοποιώντας ορθογώνια πηνία πεδίου ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) ή περιστρέφοντας το δείγμα σε ένα μόνο πηνίο, μπορεί να προσδιοριστεί η ανισοτροπία του δείγματος. Η συμπεριφορά που εξαρτάται από το χρόνο μπορεί επίσης να μελετηθεί μετά από γρήγορες αλλαγές της θερμοκρασίας. Με την περιστροφή των πετρωμάτων στους δύο άξονες, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό και ο μέγεθος του μαγνητισμού πετρωμάτων.

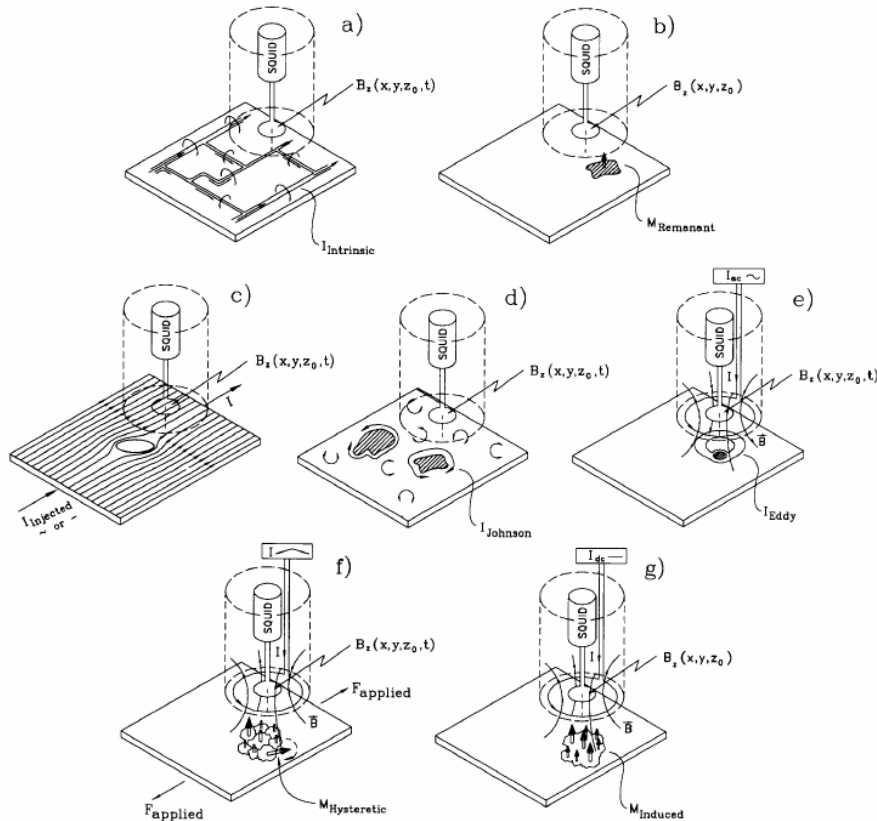


Σχήμα 4-14 : Μαγνητική μικροσκοπική απεικόνιση του Αρειανού μετεωρίτη ALH84001[18]

Επιπρόσθετα, οι αισθητήρες SQUID για μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον ηλιακό άνεμο, δημιουργούν ένα χρονοεξαρτώμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν βρόχο που κινείται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα, με το μαγνητόμετρο να ανιχνεύει το επαγόμενο πεδίο. Οι μετρήσεις μπορεί να είναι είτε στους τομείς χρόνου (π.χ. Transient ElectroMagnetics - TEM) είτε σε τομείς συχνότητας (π.χ. ελεγχόμενης πηγής AMT - CSAMT). Τέλος, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπεδάφους και για εντοπισμό μαγνητικών ανωμαλιών.

Μη Καταστροφικό Έλεγχος: Τεχνικές μαγνητικής ανίχνευσης (Εικόνα 43) όπως η δοκιμή δινορευμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια για την ανίχνευση ελαττωμάτων στις κατασκευές. Επειδή οι αισθητήρες SQUID έχουν αληθινή απόκριση συνεχούς ρεύματος και ανώτερη ευαισθησία, μπορούν να δουν «βαθύτερα» τις μεταλλικές κατασκευές. Η απόκριση dc σημαίνει επίσης ότι μπορούν να

ανιχνεύσουν υπολειπόμενη μαγνήτιση—χωρίς την ανάγκη για εξωτερικά εφαρμοσμένα μαγνητικά πεδία. Η επίπεδη απόκριση συχνότητας και η παραμόρφωση μηδενικής φάσης επιτρέπουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

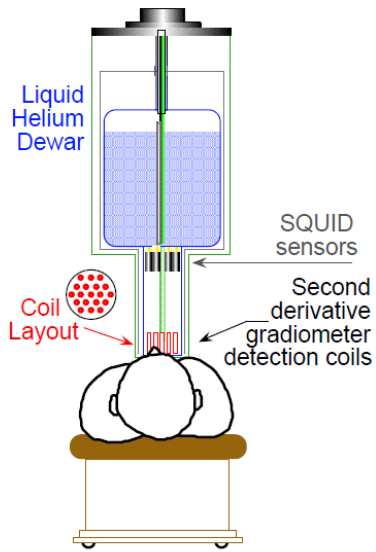


**Σχήμα 4-15 :** Διατάξεις μετρήσεων αισθητήρων SQUID: a) γενικά ρεύματα, b) Εναπομένον μαγνητισμό, c) Ελαττώματα υλικού από διαταραχές στα εφαρμοσμένα ρεύματα, d) Θορύβου Johnson ή διάβρωση σε αγωγούς, e) δινορρεύματα προκαλούμενα από μαγνητικό πεδίο ac, f) μαγνητική υστέρηση από εφαρμογές πίεσης ή εφαρμοσμένου πεδίου, g) εντοπισμός διαμαγνητικών ή/και παραμαγνητικών υλικών σε εφαρμοσμένο πεδίο [17]

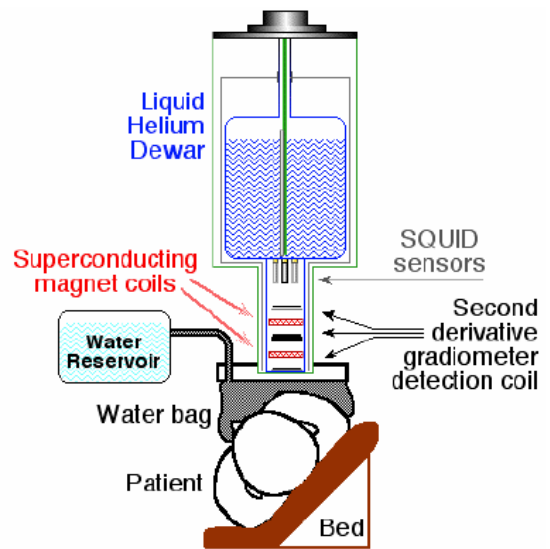
Οι αισθητήρες SQUID δεν περιορίζονται όμως στα παραπάνω καθώς λόγω της εξέλιξης τους και το πολύ μικρό μέγεθος που μπορούν να έχουν, χρησιμοποιούνται μέχρι και στα ηλεκτρονικά σήμερα για έλεγχο θορύβου και γενικά δυναμικής απόδοσης.

**Βιομαγνητισμός και Ιατρικές Εφαρμογές:** Οι αισθητήρες SQUID είναι ευρέως διαδεδομένοι στον χώρο της ιατρικής. Χρησιμοποιούνται για Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα ,μαγνητική τομογραφία εγκεφάλου ανηλίκων αλλά και εμβρύων, μαγνητική τομογραφία καρδιάς, μαγνητογράφιση μυών και νεύρων, μετρήσεις διαταραχών στομαχιού και οργάνων, ανίχνευση μαγνητικών σωματιδίων ή σκόνης στους πνεύμονες. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από κάθε μία από τις εφαρμογές.

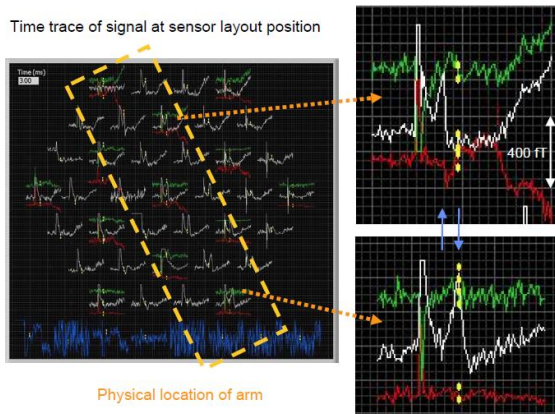




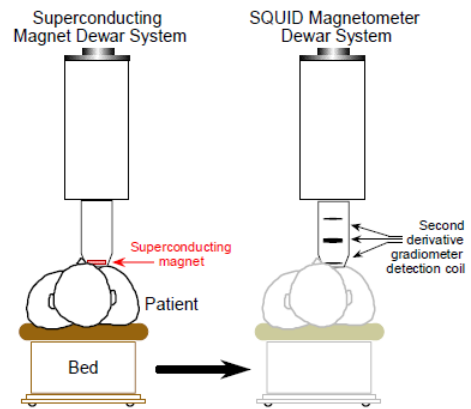
Σχήμα 4-16 : Απεικόνιση εξαρτημάτων Μαγνητικού τομογράφου Καρδιάς



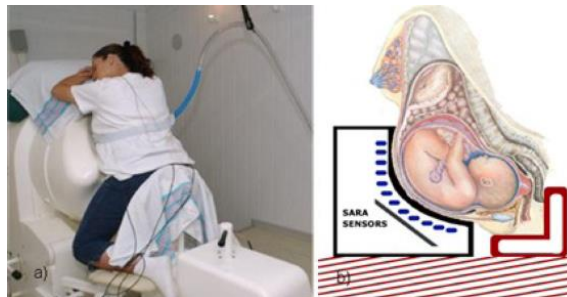
Σχήμα 4-17 : Απεικόνιση εξαρτημάτων Μαγνητικού τομογράφου οργάνου(Ferritometry- Μέτρηση αποθήκης σιδήρου στο συκώτι)



Σχήμα 4-18 : Απεικόνιση μετάδοσης ηλεκτρικού σήματος σε δύο μύες απόστασης 5cm



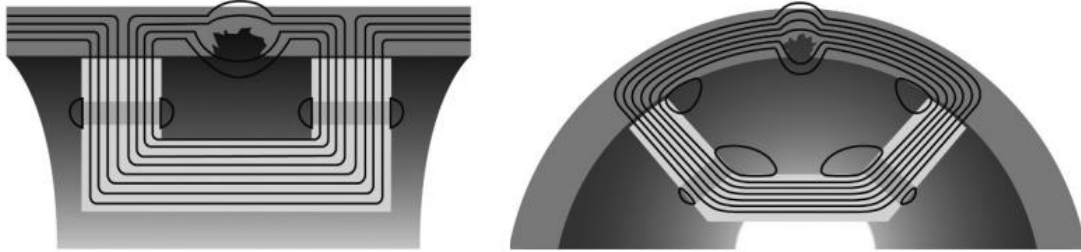
Σχήμα 4-19 : Απεικόνιση εξαρτημάτων Μαγνητικού τομογράφου πνεύμονα



Σχήμα 4-20 : Απεικόνιση Μαγνητικού τομογράφου για βρέφος

## 5. Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας

Σε αυτή το Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία μελετάται η βασική αρχή λειτουργίας, ο σχεδιασμός, και η κατασκευή ενός συγκεκριμένου τύπου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας[19].



Σχήμα 5-1 : Έλεγχος σωληνώσεων με την αρχή του αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας

Ο αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας βασίζεται στην αρχή της διαρροής μαγνητικής ροής (MFL – Magnetic Flux Leakage). Το σύστημα yoke μαζί με το τοίχωμα του σωλήνα αποτελούν μαγνητικό κύκλωμα με συγκεκριμένη κατανομή των μαγνητικών γραμμών στο υλικό του σωλήνα. Με βάση τα παραπάνω όταν τοποθετούμε τον μαγνητικό αισθητήρα βλέπουμε στα σημεία με βλάβη πώς υπάρχει σκέδαση των μαγνητικών γραμμών του μαγνητικού κυκλώματος που δημιουργεί ο αισθητήρας με τον σωλήνα.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η τομή και η όψη σωληνώσεως. Για μετρήσεις σε σωλήνες φυσικού αερίου χρησιμοποιείται ειδικό μηχάνημα (ILI – In line inspection) με σύστημα πολλαπλών αισθητήρων μαγνητικής διαπερατότητας το οποίο εξετάζει τον σωλήνα σε όλη τη περίμετρο του.

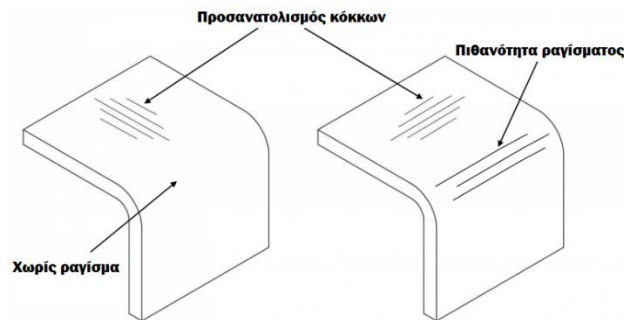


Σχήμα 5-2 : In Line inspection μηχάνημα για σωληνώσεις με περιμετρικούς αισθητήρες MFL

Καθώς ο αισθητήρας αυτός στηρίζει στη μαγνητική διαπερατότητα του συνολικού πεδίου, για την αποτελεσματικότητα του πεδίου χρησιμοποιείται ηλεκτρικός χάλυβας. Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι κράμα σιδήρου, που αντί για άνθρακα ως κύριο πρόσθετο, έχει πυρίτιο και ανήκει στους μαλακούς μαγνήτες. Το πυρίτιο αυξάνει την ηλεκτρική ειδική αντίσταση του σιδήρου κατά 5 φορές. Αυτή η αλλαγή μειώνει τα επαγόμενα ρεύματα και περιορίζει τον βρόχο υστέρησης του υλικού, μειώνοντας έτσι την απώλεια του πυρήνα.[20]. Ο ηλεκτρικός χάλυβας χωρίζεται σε 3 κατηγορίες:

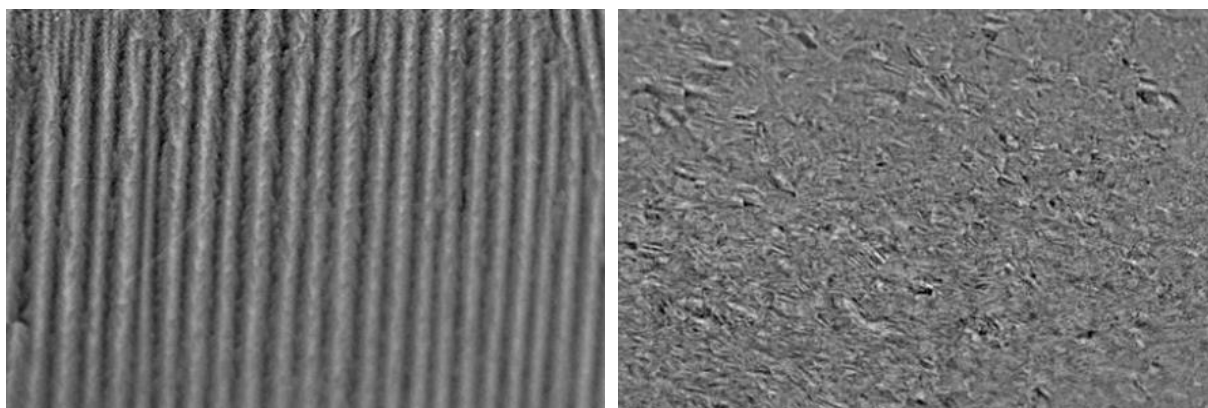
**Μη προσανατολισμένων κόκκων Χάλυβας ( Non grain oriented Steel):** Έχει συνήθως περιεκτικότητα σε πυρίτιο 2,0 με 3,5 % και έχει παρόμοιες μαγνητικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις, ιστροπική. Οι ψυχρής έλασης μη προσανατολισμένης κοκκομετρίας χάλυβες λέγονται εν συντομία CRNGO (Cold Rolled non grain oriented). Η κατηγορία αυτή καθώς έχει παρόμοιες μαγνητικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις χρησιμοποιείται για σε γεννήτριες και μικρά ηλεκτρικά μοτέρ.

**Προσανατολισμένων κόκκων Χάλυβας ( Grain oriented Steel):** Οι προσανατολισμένων κόκκων χάλυβες χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες στη βιομηχανία ηλεκτρικού εξοπλισμού και έχουν περιεκτικότητα από 2,9% έως 3,2% σε πυρίτιο. Κατά την παραγωγή του επεξεργάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο προσανατολισμός των κόκκων να βρίσκεται παράλληλα προς τη κατεύθυνση της έλασης, για την καλύτερη αντοχή των φύλλων, πιο ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την επεξεργασία του μετάλλου αλλά και την ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 5-3 : Προσανατολισμός κόκκων (Grain Oriented Steel)

Η επεξεργασία αυτή αυξάνει κατά 30% τη πυκνότητα της μαγνητικής ροής στη κατεύθυνση της έλασης και μειώνει τη μαγνήτιση κορεσμού κατά 5%. Η κατηγορία αυτή παράγεται κυρίως σε μορφή πηνίων και χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής και μέσης τάσης, κατά κόρον σε μετασχηματιστές, σε γεννήτριες υψηλών kVA και σε ηλεκτρικές μηχανές υψηλών αποδόσεων.



Σχήμα 5-4 : Προσανατολισμός κόκκων (CRGO - Αριστερά / CRNGO - Δεξιά)

**Άμορφα Μέταλλα:** Έχουν άμορφη στερεά δομή, σε αντίθεση με τα συνήθη κρυσταλλικά μέταλλα τα οποία στερεοποιούνται σε ομάδες κρυσταλλικών τάξεων. Ονομάζονται και υαλώδη μέταλλα ή μεταλλικά γυαλιά. Κατά την υγρή του μορφή το κράμα μετάλλων ψύχεται ταχύτητα, με ρυθμό τέτοιο ώστε να μην σχηματιστεί κρυσταλλική δομή. Για τη βοήθεια του σχηματισμού άμορφων μετάλλων, χρησιμοποιούνται πρόσθετα ( κυρίως Βόριο(B)) ώστε να αυξηθεί το ιξώδες του λιωμένου μετάλλου. Τα άμορφα μέταλλα λόγω της ταχείας ψύξης που χρειάζονται, δημιουργούνται σε πολύ λεπτά φύλλα των 50 μm, επιπρόσθετα το πλάτος τους δεν είναι περιορισμένο, συνήθως δεν υπερβαίνει τα 20 cm.

Εξαιρετικές επιδόσεις παρουσιάζουν τα άμορφα μέταλλα που έχουν κοβάλτιο: πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και υψηλή μαγνήτιση αντίσταση. Για υψηλές επιδόσεις μαγνήτισης και κορεσμού προστίθεται 20% κοβάλτιο σε κράματα σιδήρου. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά κυρίων άμορφων κραμάτων

Τα άμορφα μέταλλα έχουν κάνει την εμφάνιση τους στην παγκόσμια αγορά τη δεκαετία του 70 από την Allied Signals Inc. Metglas Products. Άμορφα μέταλλα της τωρινής αγοράς προσφέρονται από τις εταιρίες Metglas Inc., Hitachi Metals και Vaccumschmelze. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά εμπορικών μαλακών άμορφων μετάλλων [26].

Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά εμπορικών μαλακών άμορφων μετάλλων

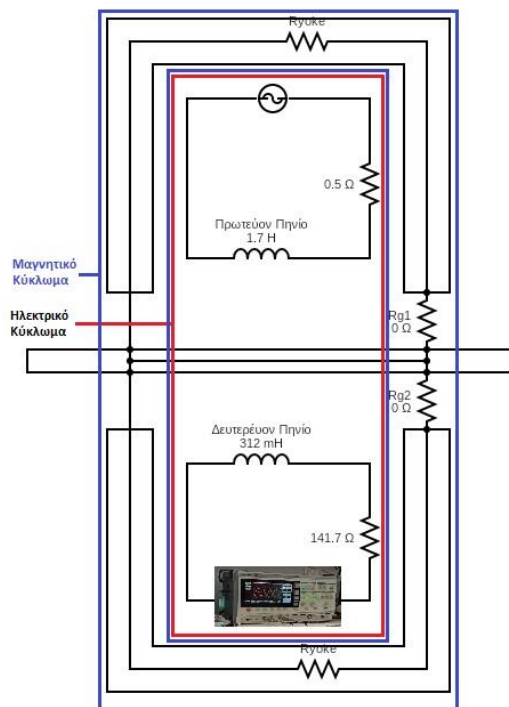
		$J_s(T)$	$\mu_{max} \times 1000$	$\lambda \times 10^{-6}$
<b>Metglas 2605 SA1</b>	$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1.56	600	27
<b>Metglas 2605 SC</b>	$Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$	1.61	300	30
<b>Metglas 2605 CO</b>	$Fe_{66}CO_{18}B_{15}Si_1$	1.8	400	35
<b>Metglas 2705 M</b>	$CO_{69}Fe_4Ni_1Mo_2Si_{12}B_{12}$	0.77	800	<0.5
<b>Metglas 2714 A</b>	$CO_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}Ni_{12}$	0.57	1000	<0.5
<b>Metglas 2826 MB</b>	$Fe_{40}Ni_{38}B_{18}Mo_{12}$	0.88	800	12
<b>Vitrovac 6025</b>	$CO_{66}Fe_4B_{12}Si_{16}Mo_2$	0.55	600	0.3
<b>Vitrovac 6030</b>	$CO_{70}(FeMo)_2Mn_5(SiB)$	0.8	300	0.3

## 5.1. Μοντελοποίηση Κυκλώματος

Για την μοντελοποίηση και τη κατασκευή του αισθητήρα η πρώτη απόφαση που χρειάστηκε να παρθεί ήταν αν θα χρησιμοποιηθούν δύο yoke (πυρήνες) . Το κύκλωμα μπορεί να κλείνει με τη χρήση ενός yoke,, είτε με δύο, και συνεπώς χαρακτηρίζεται αντίστοιχα μη συμμετρικό ή συμμετρικό. Η χρήση ενός μόνο yoke καθιστά τη διάταξη απλούστερη και επιτρέπει την ευκολότερη πρόσβαση στο δοκίμιο. Αποτρεπτική για την ευρεία εφαρμογή της στέκεται η πολύ χαμηλή ακρίβεια που τη χαρακτηρίζει. Έτσι, χρησιμοποιείται ορισμένες φορές μόνο, όπου η πρόσβαση στο δοκίμιο κρίνεται απαραίτητη και η ακρίβεια μετρήσεων δευτερεύουσας σημασίας [26].

Με τη χρήση δύο yoke αντικείμενων μεταξύ τους επιτυγχάνεται υψηλότερη ακρίβεια μετρήσεων αφού τα δινορρέυματα (eddy currents) που επάγονται σε κάθε μισό του yoke αλληλοεξουδετερώνονται. Η βελτίωση που επέρχεται με τη χρήση συμμετρικών yoke γίνεται ιδιαίτερα αισθητή στο φαινόμενο overhang, όπου το δοκίμιο είναι μακρύτερο από το yoke και κατά το οποίο τα δινορρέυματα είναι αυξημένα [26].

Παρακάτω παρουσιάζεται το ηλεκτρικό καθώς και το μαγνητικό κύκλωμα της διάταξης:



Σχήμα 5-5 : Ηλεκτρικό και Μαγνητικό κύκλωμα αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας με δύο yoke

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5-5, έχουμε τις αντιστάσεις  $R_{g1}$  και  $R_{g2}$  οι οποίες είναι οι μαγνητικές αντιστάσεις που δημιουργούνται λόγω του κενού μεταξύ δοκιμίου και Yoke. Οι αντιστάσεις αυτές είναι αμελητέες για το μαγνητικό μας κύκλωμα και θεωρούμε πως είναι μηδενικές.

Στη συνέχεια βλέπουμε πώς το κάθε Yoke παρουσιάζει αντίσταση. Η αντίσταση αυτή είναι κοινή και για τα δύο Yoke, καθώς είναι από το ίδιο υλικό και έχουν την ίδια γεωμετρία. Η εξίσωση που εκφράζει την μαγνητική αντίσταση του Yoke είναι:

$$R_{yoke} = \frac{l_{yoke}}{\mu_{yoke} * A_{yoke}} \quad (5.1)$$

Όπου:  $l$ : το μήκος της διαδρομής του μαγνητικού αγωγού

$A$ : η διατομή του μαγνητικού αγωγού

$\mu$ : η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού

Η μαγνητοεγερτική δύναμη ορίζεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος:

$$F = n_{in} * I_{in} \quad (5.2)$$

Όπου  $n$  είναι ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου διέγερσης (πηγή του μαγνητικού κυκλώματος) και  $I$  το ρεύμα που το διαρρέει. Η ισχύς του ρεύματος στο πηνίο καθορίζει την ενέργεια που χάνεται σαν θερμότητα στο σύστημα και είναι σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό ενός συστήματος. Λόγω της αντιστοιχίας της μαγνητοεγερτικής δύναμης με την ηλεκτρεγερτική συναντάται και με την ονομασία μαγνητικό δυναμικό. Ένας άλλος τύπος που δείχνει την  $F$  σαν συνάρτηση της ισχύος του μαγνητικού πεδίου είναι ο παρακάτω:

$$F = H * l_{in} \quad (5.3)$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (5.2) και (5.3) έχουμε:

$$H = \frac{n_{in} * I_{in}}{l_{in}} = \frac{n_{in}}{Z_{in} l_{in}} * V_{in} \quad (5.4)$$

Για το δεύτερο πηνίο ξέρουμε ότι ισχύει ο νόμος του Faraday, δηλαδή:

$$V_{out} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.5)$$

Αν  $S$  είναι το εμβαδόν του πυρήνα, αντικαθιστώντας από τη σχέση  $\Phi = B * S$ , έχουμε:

$$V_{out} = -S * \frac{dB}{dt} \quad (5.6)$$

Ολοκληρώνοντας χρονικά την παραπάνω σχέση ισχύει ότι:

$$\int V_{out} dt = -S * B \Rightarrow B = -\frac{1}{S} * \int V_{out} dt \quad (5.7)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα όπως προαναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο (συμβολίζεται με το  $\mu$ ) και καθορίζεται γενικά ως ο λόγος της πυκνότητας της μαγνητικής ροής  $B$  εντός ενός υλικού και του αποτελεσματικού μαγνητικού πεδίου  $H$  που αντιμετωπίζει, όπως φαίνεται πάλι στην εξίσωση:

$$B = \mu * H \Rightarrow \mu = \frac{B}{H} \quad (5.8)$$

Οπότε από τις σχέσεις (5.4) και (5.7) έχουμε για τη μαγνητική διαπερατότητα:

$$\mu = \frac{Z_{in} * l_1 * \int V_{out} dt}{S * n_{in} * V_{in}} \quad (5.9)$$

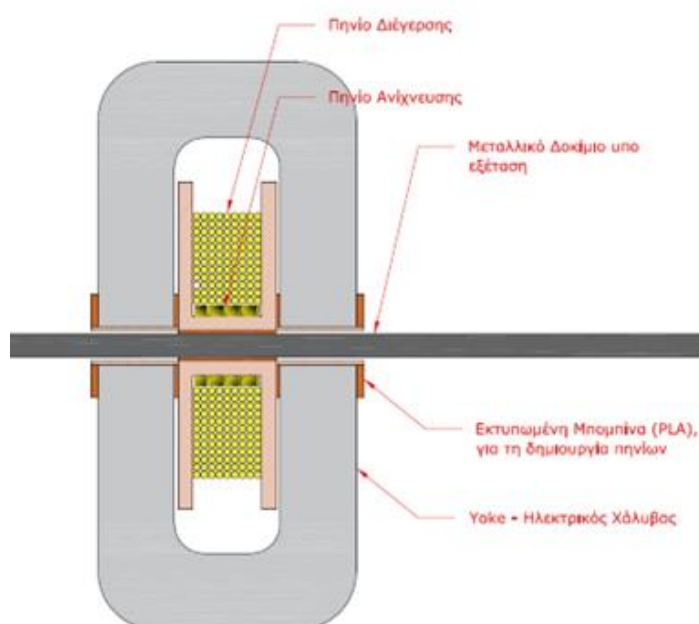
Το ενεργό μαγνητικό πεδίο  $H$  δημιουργείται από ένα δεδομένο μαγνητικό όγκο όπου είναι το εφαρμοσμένο πεδίο μείον τυχόν απομαγνητισμένα πεδία. Η μαγνητική διαπερατότητα των φερρομαγνητικών υλικών είναι μια συνάρτηση του  $H$  και τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από την μηδενική διαπερατότητα του χώρου. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της ποιότητας ενός μαγνητικού υλικού. Σε σύγκριση με ένα ατελές, ομοιογενώς μαγνητισμένο υλικό, η παρουσία ελαττωμάτων οδηγεί σε χαμηλότερη επαγωγή  $B$  και, ως εκ τούτου, χαμηλότερη διαπερατότητα  $\mu$  με δεδομένη τιμή αποτελεσματικού πεδίου.

## 5.2. Σχεδιασμός και Κατασκευή αισθητήρα

Η βασική αρχή λειτουργίας του αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας όπως είδαμε και παραπάνω βασίζεται στη δημιουργία ενός μαγνητικού κυκλώματος, το οποίο αποτελείται από τον αισθητήρα και το προς μέτρηση δοκίμιο. Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα βασίζεται στο σύστημα yoke μαζί με το όποιο μεταλλικό τοίχωμα χρησιμοποιήσουμε ως δοκίμιο, τα οποία μαζί αποτελούν μαγνητικό κύκλωμα με συγκεκριμένη κατανομή των μαγνητικών γραμμών. Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στη χρήση ενός πηνίου διέγερσης που είναι σταθερό σε δεδομένο όγκο. Το παλμικό ρεύμα μεταδίδεται μέσω του πηνίου διέγερσης και συνεπώς παράγεται παλμικό μαγνητικό πεδίο κατά μήκος. Για τη δημιουργία του κυκλώματος χρησιμοποιούνται:

- Ηλεκτρικός Χάλυβας, τύπου yoke
- Πηνίο Διέγερσης
- Πηνίο Ανίχνευσης
- Μετρούμενο Δοκίμιο

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δύο συζευγμένα πηνία ( πρωτεύον και δευτερεύον) που περιβάλλουν το υπό εξέταση δοκίμιο και ένα ζεύγος συμμετρικών ηλεκτρικών χαλύβων, τύπου yoke. Το πρώτο πηνίο, πηνίο Διέγερσης αποτελεί την μαγνητεγερτική δύναμη του κυκλώματος, ενώ το δεύτερο πηνίο, πηνίο Ανίχνευσης, λειτουργεί ως έξοδος του αισθητήρα. Στο Σχήμα 5-6 φαίνεται η διάταξη του αισθητήρα που κατασκευάστηκε.



Σχήμα 5-6 : Διάταξη αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας



### 5.2.1. Τρισδιάστατη εκτύπωση

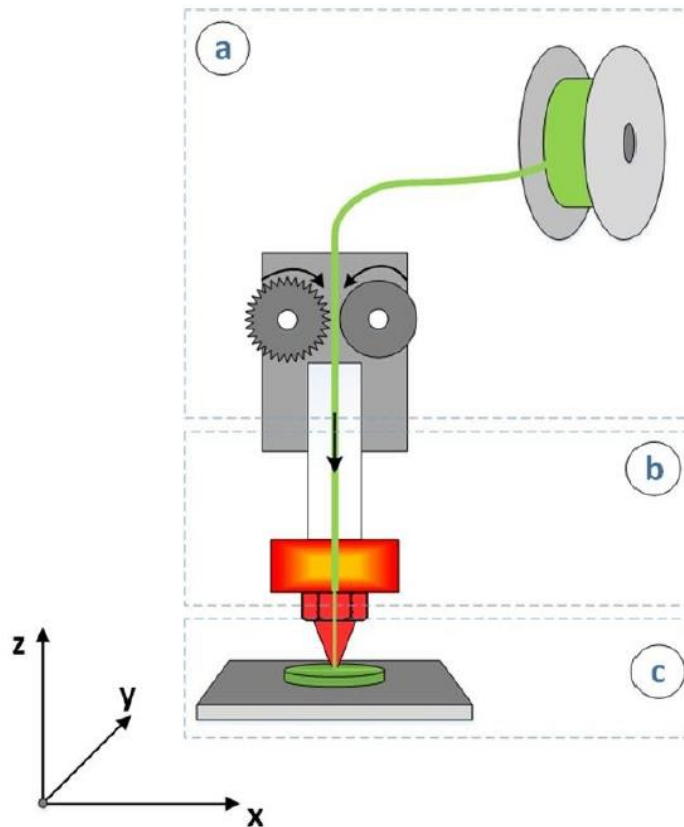
Για την δημιουργία του πηνίου εισόδου/εξόδου πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη εκτύπωση. Ο όρος τρισδιάστατη εκτύπωση αφορά ένα σύνολο τεχνολογιών κατεργασίας. Στον πίνακα αναφέρονται οι εφτά κατηγορίες κατεργασιών εκτύπωσης, σύμφωνα με το ISO/ASTM 52900 [24]:

**Πίνακας 5-2: Οι επτά κατηγορίες τρισδιάστατων εκτυπώσεων**

	Είδος τεχνολογίας	Σύντομη περιγραφή	Σχετιζόμενα είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης
1	Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion)	Εξώθηση τηγμένου υλικού προς τη κεφαλή εκτύπωσης	FDM
2	Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)	Φωτοπολυμερισμός ρητίνης μέσω δέσμης laser	SLA, DLP
3	Εκτόξευση Υλικού (Material Jetting)	Ελεγχόμενος ψεκασμός υλικού και σκλήρυνση μέσω ακτινοβολίας	PolyJet, Nanoparticles Jetting (NPJ), Drop-On Demand (DOD)
4	Εκτόξευση συνδετικών μεσών (Binder Jetting)	Ψεκασμός συνδετικού υγρού με σκοπό την ένωση υλικού σε σκόνη	BI
5	Κλίνη κόνεως σύντηξης (Powder Bed Fusion)	Χρησιμοποιείται δέσμη laser ή ηλεκτρονίων για την τήξη και την σύντηξη σκόνης υλικού	SLS, SLM, DMLS, EBM
6	Ελασματοποίηση σε φύλλα (Sheet Lamination)	Λεπτά φύλλα υλικού συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το αντικείμενο	LOM, SLCOM
7	Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)	Τροφοδοσία υλικού σε μία ενεργειακή πηγή για να σχηματιστεί ένα πυροσυσσωματωμένο στρώμα σε ένα υπόστρωμα	Laser-based, Electron beam-based, Plasma or Electric arc based

Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η πρώτη, Fused Deposition Modelling – FDM, η οποία είναι η πιο γνωστή και πιο προσιτή από όλες τις υπόλοιπες.

Η διαδικασία αποτελείται από 3 στάδια [13] όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-7. Στο πρώτο στάδιο, το νήμα, είτε μέσω σωλήνα PTFE (Bowden), είτε απευθείας (Direct) εισέρχεται στο εξάρτημα που ονομάζεται hotend. Στο τέλος του hotend υπάρχει η κεφαλή εκτύπωσης (nozzle), η οποία θερμαίνεται μέσω θερμίστορ NTC σε κατάλληλη θερμοκρασία, η οποία εξαρτάται από το υλικό. Το λιωμένο πλέον υλικό εναποτίθεται σε επίσης θερμαινόμενη επιφάνεια, την επιφάνεια εκτύπωσης (hotbed). Αυτές οι δύο θερμοκρασίες παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην επιτυχία της κατεργασίας, καθώς συμβάλλουν στη συγκόλληση των στρώσεων μεταξύ τους, αλλά και μεταξύ της πρώτης στρώσης και της επιφάνειας, ώστε να μη δημιουργηθούν φαινόμενα αποκόλλησης (warping) [25].



Σχήμα 5-7 : Στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου FDM

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία είναι το Simplify3D και παρακάτω αναφέρονται αναφορικά οι κύριες ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση των δοκιμίων:

Υλικό εκτύπωσης : PLA

Διάμετρος ακροφύσιου: 0.4 mm

Πλάτος εξώθησης (Extrusion width): 0.28mm

Ύψος εξώθησης (Layer Height) : 0.22 mm

Αριθμός άνω/κάτω στρώσεων( Top/Bottom Solid Layers): 3

Αριθμός εξωτερικών περιγραμμάτων (Outline/Perimeter Shells):4

Τύπος Πλήρωσης (Infill Pattern): rectangular

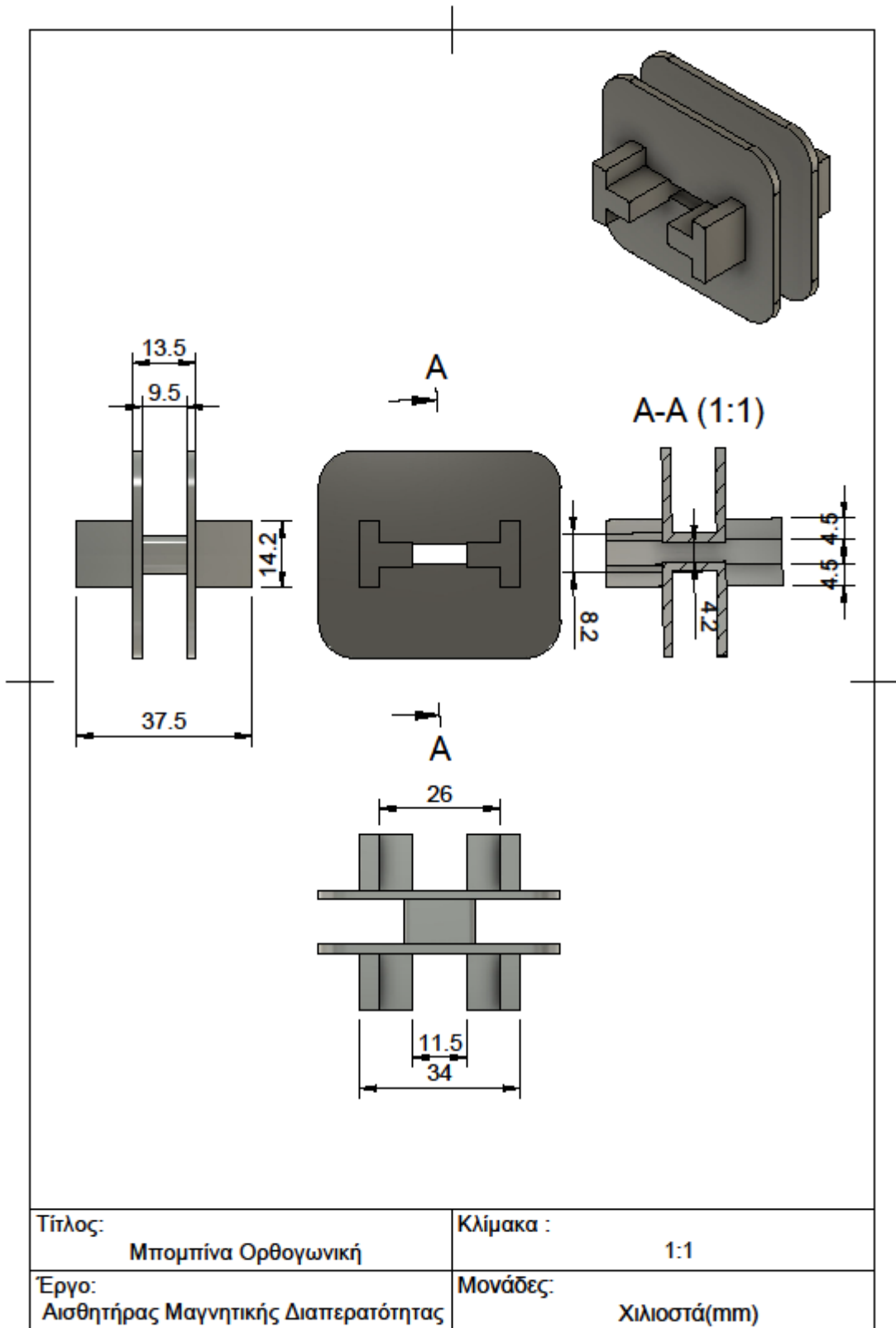
Ποσοστό Πλήρωσης (Infill):28%

Θερμοκρασία Κεφαλής: 210 °C

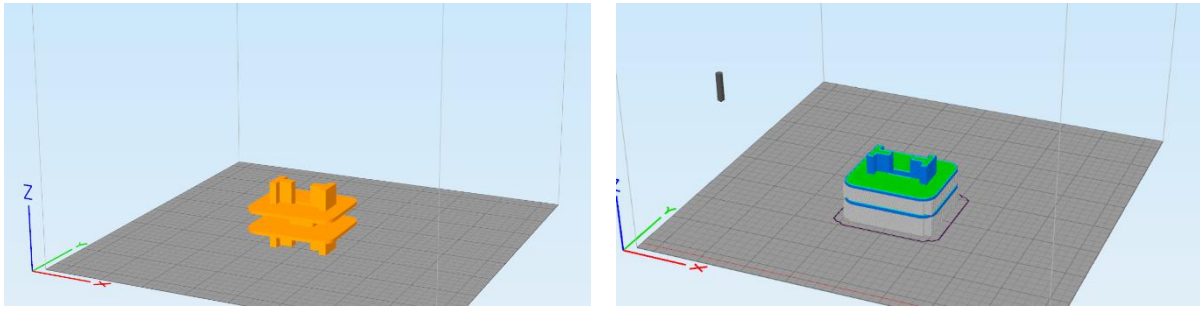
Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης: 60 °C

Ταχύτητα Ανεμιστήρα (Fan Speed): 1 layer – 20% , 2 layer 40%, 3 layer 60%, 4-last layer 80%

Οι διαστάσεις της μπομπίνας φαίνονται στο Σχήμα 5-8 και στο Σχήμα φαίνεται ο προσανατολισμός που εκτυπώθηκε η μπομπίνα καθώς και τα support που έγιναν κατά την εκτύπωση.



Σχήμα 5-8 : Διαστάσεις Μπομπίνας (Οψη, Κάτοψη, Πλάγιες Όψεις & Πρόψη)

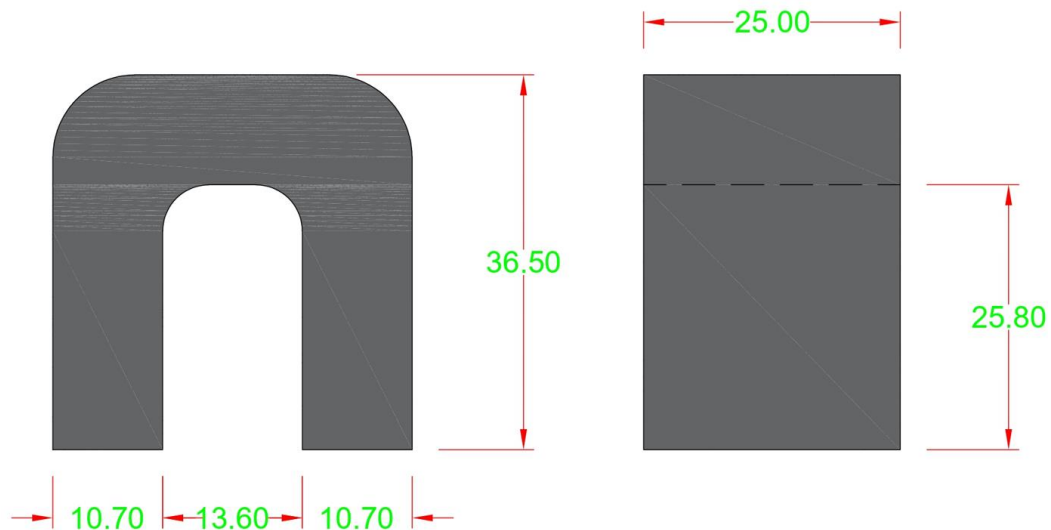


Σχήμα 5-9 : Απεικόνιση προσανατολισμού δοκιμίου(αριστερά), απεικόνιση Gcode με supports( δεξιά)

Έχοντας πλέον εκτυπώσει τη μορφή, κατασκευάσαμε το πηνίο διέγερσης -λήψης. Το πηνίο διέγερσης κατασκευάστηκε από χάλκινο σύρμα  $\varnothing 1\text{mm}$  με επίστρωση σμάλτου για μόνωση και αποτελείται από 90 περιστροφές. Το πηνίο λήψης αποτελείται από 1000 περιστροφές, χάλκινου σύρματος  $\varnothing 0.1\text{mm}$  με επίστρωση σμάλτου.

### 5.2.2. Ηλεκτρικός Χάλυβας - Πυρήνας (Yoke)

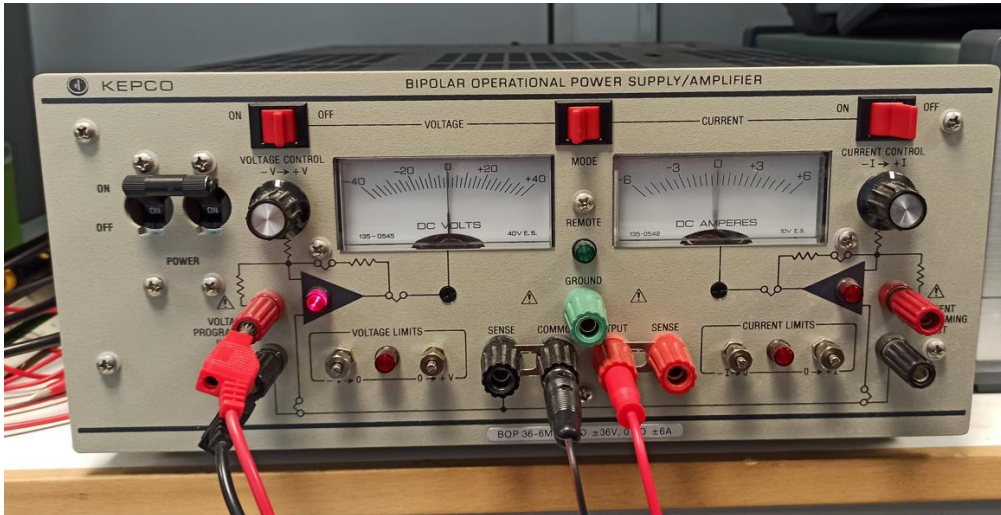
Στο Σχήμα 5-11 φαίνονται οι διαστάσεις του Yoke , τα οποία τοποθετήθηκε το ένα στο πάνω μέρος της μορφή και το δεύτερο στο κάτω μέρος της. Η συνολική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 5-6.



Σχήμα 5-10 : Διαστάσεις πυρήνα ηλεκτρικού χάλυβα (Yoke)

### 5.2.3. Εργαστηριακός Εξοπλισμός

Η διάταξη αποτελείται από ένα τροφοδοτικό, το οποίο λαμβάνει AC ρεύμα 220V και έχει τη δυνατότητα να δώσει στην έξοδο DC ρεύμα, τάσης -36 έως +36 V, και έντασης έως 6 A.



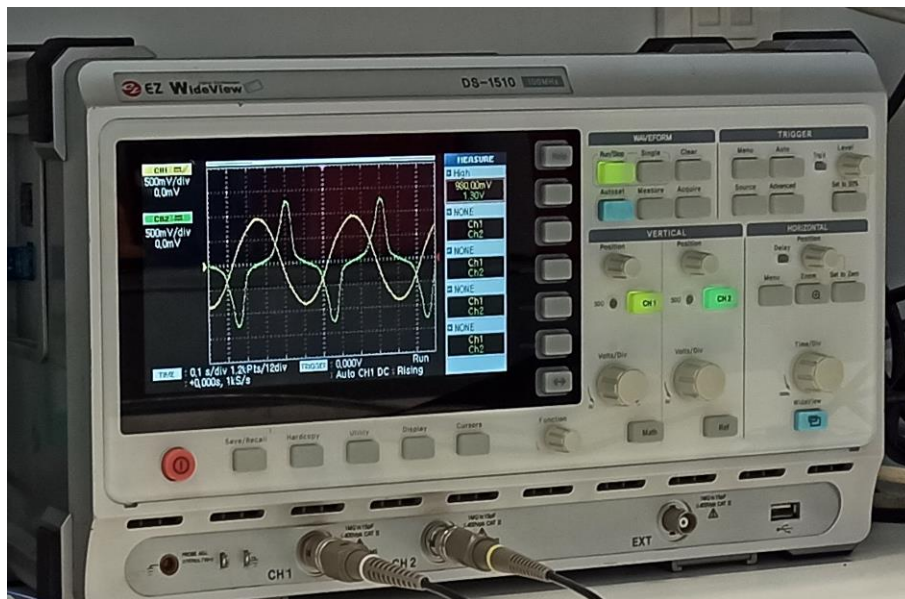
Σχήμα 5-11 : Τροφοδοτικό/Ενισχυτής KEPCO

Από τη γεννήτρια κυματομορφής βάζουμε τη συχνότητα και την τάση που θέλουμε να έχουμε στο πηνίο εισόδου, μέσω του ενισχυτή, στην περίπτωση μας η τάση ημιτονοειδούς μορφής.



Σχήμα 5-12 : Γεννήτρια κυματομορφής LXI Agilent 33220A

Ο παλμογράφος διαβάζει την τάση στο πηνίο διέγερσης και την τάση εξόδου από το πηνίο λήψης, δηλαδή το σήμα αισθητήρα



Σχήμα 5-13 : Παλμογράφος EZ Wideview DS-1510

## 6. Πειραματική Μελέτη και Αποτελέσματα

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια χάλυβα ψυχρής έλασης που παραχωρήθηκαν από το εργαστήριο του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Τα δοκίμια ήταν ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 10 x 3,2 mm ( ΠxΥ). Για τη διεξαγωγή του πειράματος και την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του αισθητήρα ως προς τα δοκίμια, χωρίσαμε το κάθε δοκίμιο σε τέσσερα τμήματα. Στο πρώτο τμήμα του δοκιμίου δημιουργήσαμε 2 οπές, η μία διαμπερής και η άλλη μέχρι περίπου τη μέση του δοκιμίου καθ' ύψος. Στο δεύτερο τμήμα κόψαμε το δοκίμιο κατά πλάτος με τροχό. Στο τρίτο τμήμα δημιουργήσαμε διαμήκης χαραξίς με τον τροχό στο δοκίμιο και τέλος το τέταρτο τμήμα το αφήσαμε άθικτο, ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε με τις μετρήσεις των υπόλοιπων τριών.



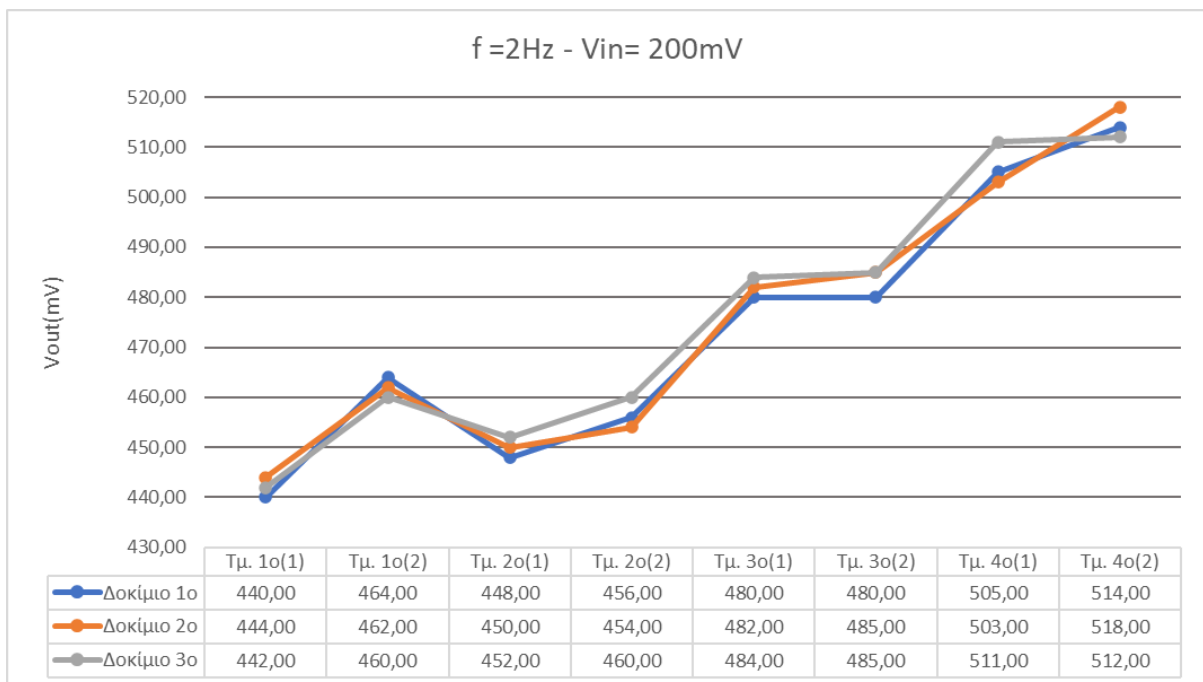
Σχήμα 6-1 : Απεικόνιση κατεργασίας που πραγματοποιήθηκε σε κάθε τμήμα των δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η σύνδεση του αισθητήρα με τον εργαστηριακό εξοπλισμό και από την παλμογεννήτρια λαμβάναμε το σήμα του αισθητήρα, τάση εξόδου πηνίου λήψης καθώς και την τάση του πηνίου εισόδου. Μετά από την αρχική σύνδεση του αισθητήρα με τον εργαστηριακό εξοπλισμό πραγματοποιούσαμε κάθε φορά τα πειράματα στην επιθυμητή συχνότητα και ένταση τάσης κυματομορφής που επιθυμούσαμε. Για κάθε κομμάτι του κάθε δοκιμίου πήραμε από δύο μετρήσεις με τον αισθητήρα. Για τις μετρήσεις το κάθε δοκίμιο εισέρχονταν στην οπή του αισθητήρα και το μετακινούσαμε στην επιθυμητή τοποθεσία της μέτρησης, για να μην υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις χρησιμοποιούσαμε στηρίγματα αριστερά και δεξιά ώστε να είναι όσο πιο ισοκατανομημένο γίνεται το μαγνητικό πεδίο, το κενό που είχε το δοκίμιο δηλαδή, το δοκίμιο από τον αισθητήρα. Φάνηκε από τις πρώτες μετρήσεις ότι παράγοντες όπως μη ισχυρά μαγνητικά πεδία από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές σε απόσταση μεγαλύτερη των 15 εκατοστών από την περιοχή της μέτρησης δεν επηρέασαν ορατά την πειραματική διαδικασία, και κατά προέκταση ενώ δόθηκε προσοχή στην πιθανή παρεμβολή τους, δεν κρίθηκε απαραίτητη η τήρηση κάποιου αυστηρού πρωτοκόλλου.

Η παλμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ημιτονοειδούς σήματος συνοτήτων 0.5, 2, 5 και 10 Hertz και συνδέθηκε με τον ενισχυτή σήματος για την παραγωγή σήματος το οποίο στην είσοδο

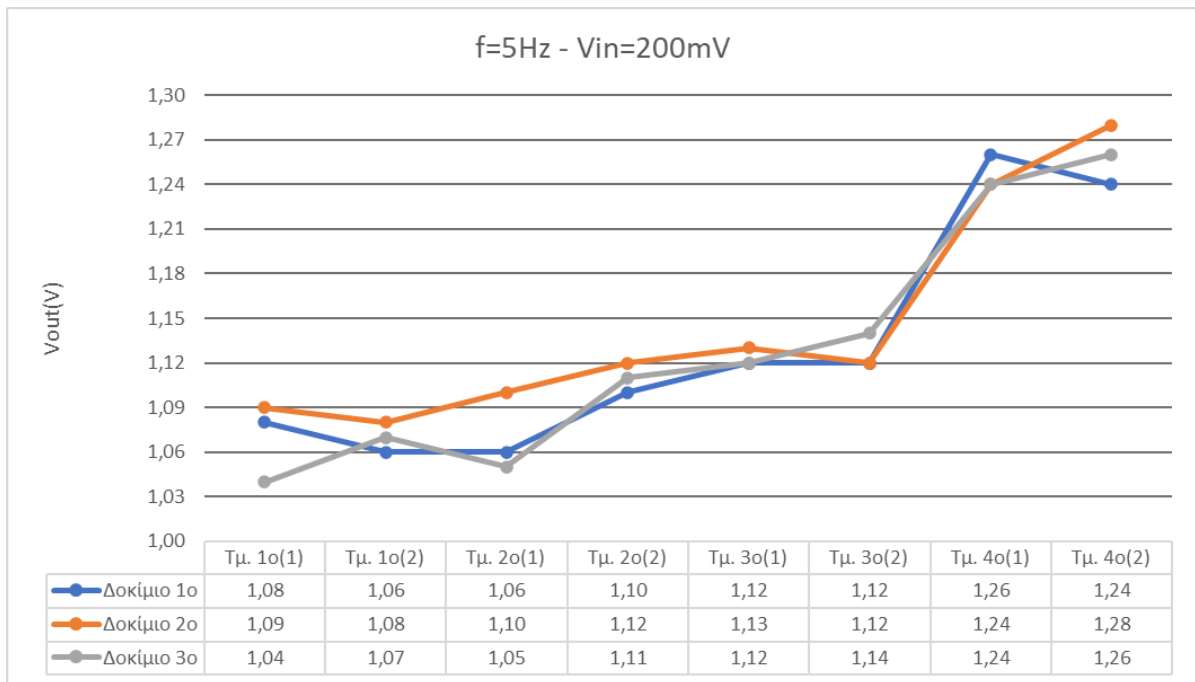
της διάταξης έπαιρνε τιμές  $V_{in} = 200 \text{ mV}$ ,  $500 \text{ mV}$ ,  $800 \text{ mV}$ . Σκοπός ήταν η χρήση όλων των δυνατοτήτων του ενισχυτή, όμως η διάταξη στις υψηλές τάσεις θερμαινόταν σημαντικά καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολες τις μετρήσεις, απαιτώντας σημαντικά χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικές μετρήσεις και θα μπορούσε και να καταστρέψει τη γεωμετρία της μπομπίνας, και κατ' επέκταση και του αισθητήρα. Σε αυτό το σημείο κρίθηκε σκόπιμο να μην χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες τιμές ρεύματος καθώς η θερμοκρασία των πηνίων θα αλλοίωνε με τρόπο μη επαναλήψιμο τις μετρήσεις. Η μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση υπέστη από το πηνίο εισόδου καθώς στην τιμή των  $800 \text{ mV}$  και συχνότητας  $10 \text{ Hz}$ . Σε υψηλότερες τιμές τάσης παρατηρήθηκαν περιστασιακά outliers οπότε και σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες αποφασίσαμε το όριο να είναι τα  $800 \text{ mV}$ . Τέλος, οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν κάλυψαν ένα ευρύ φάσμα ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα από τις μετρήσεις, μεγαλύτερες συχνότητες θα επέφεραν μεγάλες ταλαντώσεις που μπορεί να επηρέαζαν και τις μετρήσεις.

Όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν 2 μετρήσεις σε κάθε τμήμα των δοκιμίων, παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές για  $V_{in} = 200\text{mV}$ , και για τα τρία δοκίμια, σε συχνότητα  $2\text{Hz}$ ,  $5\text{Hz}$  και  $10\text{Hz}$ :

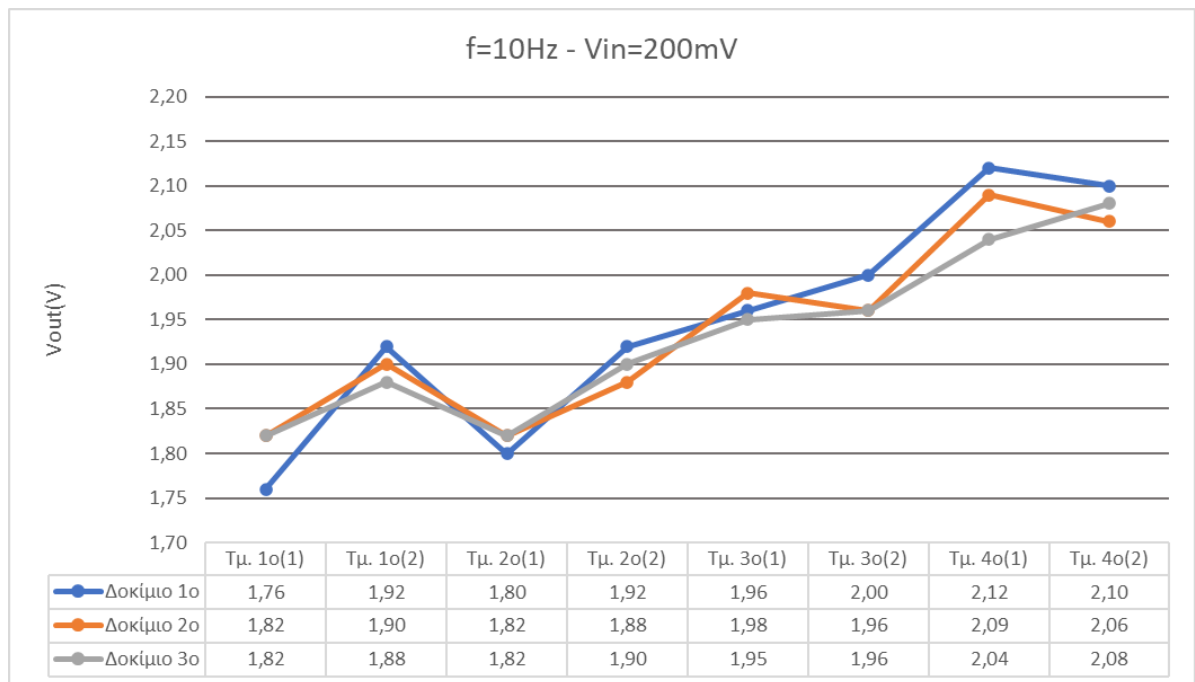


Σχήμα 6-2 : Σήμα αισθητήρα για  $V_{in}=200\text{mV}$  , σε συχνότητα  $2 \text{ Hz}$



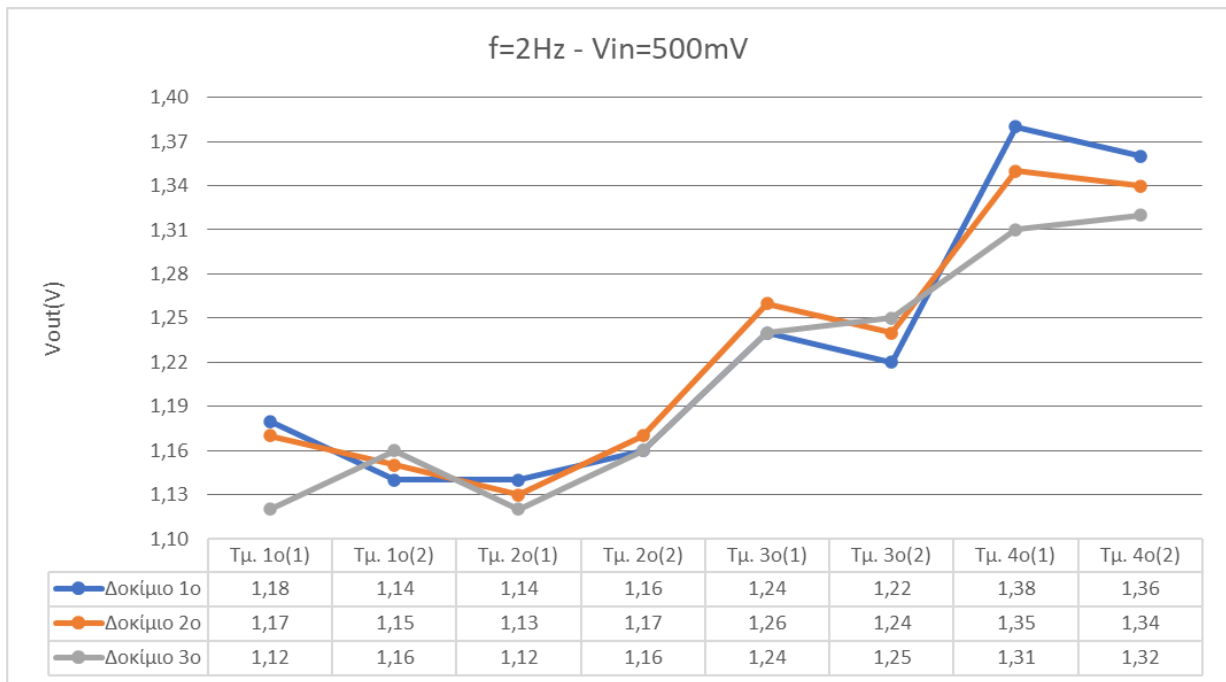


Σχήμα 6-3 : Σήμα αισθητήρα για Vin=200mV , σε συχνότητα 5 Hz

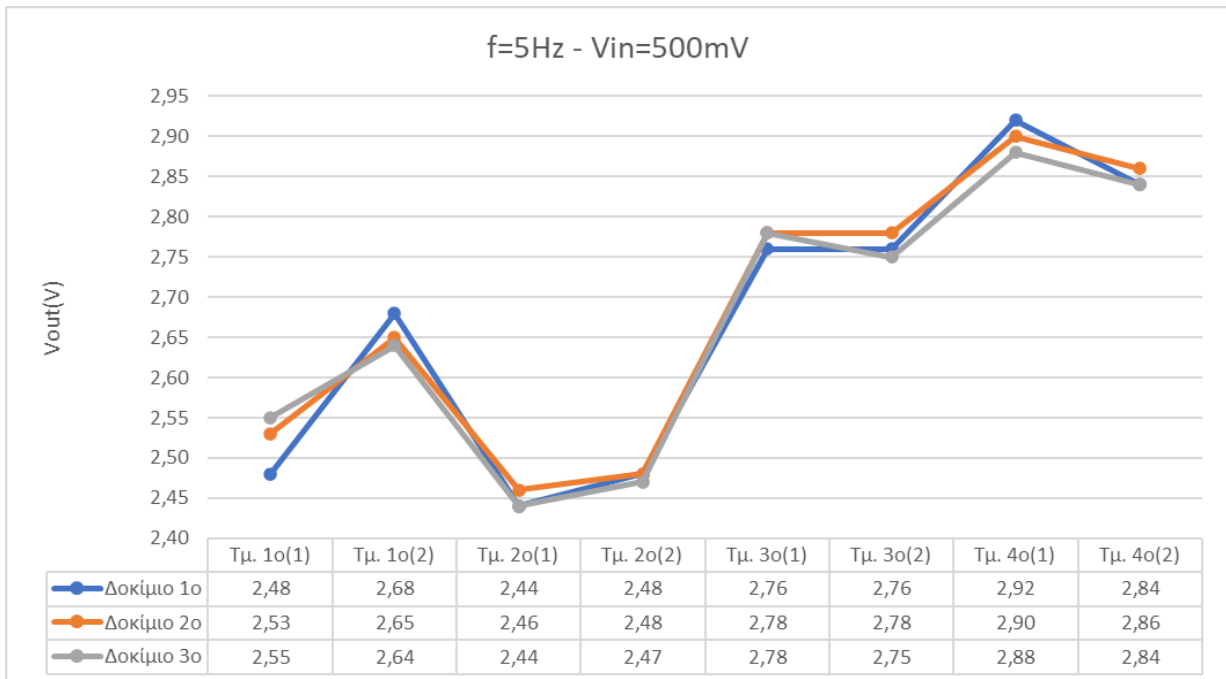


Σχήμα 6-4 : Σήμα αισθητήρα για Vin=200mV , σε συχνότητα 10 Hz

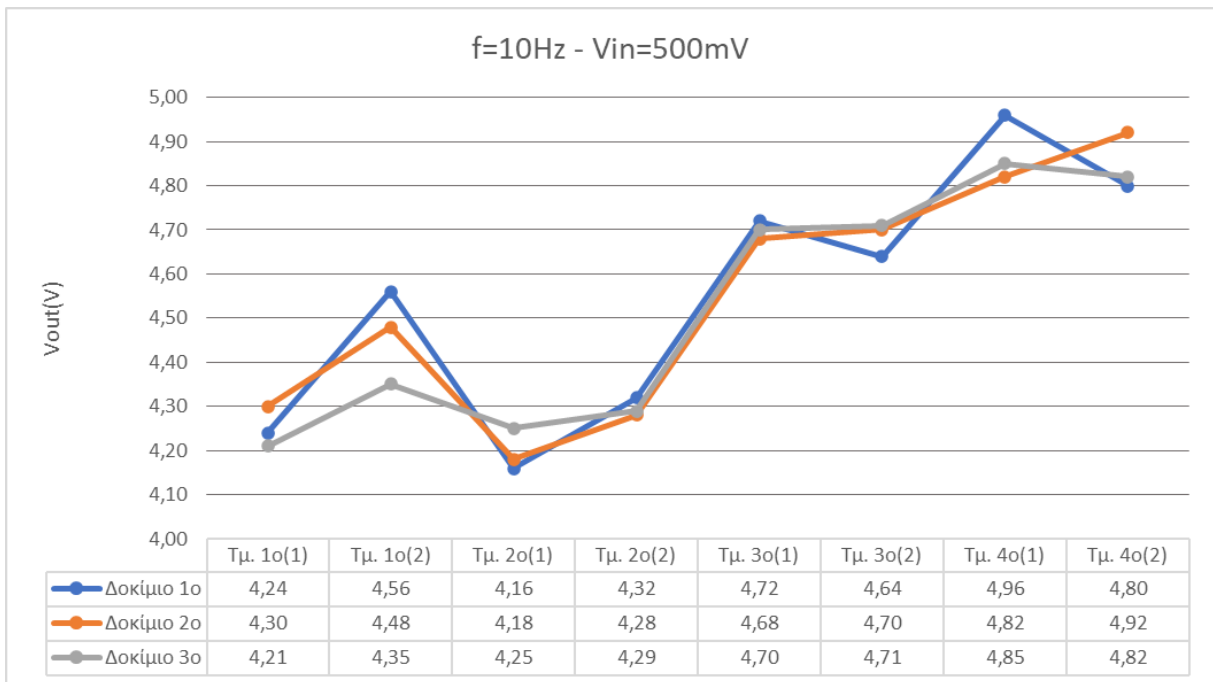
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τάση εισόδου Vin= 500 mV παρομοίως στις συχνότητες 2Hz, 5Hz, και 10 Hz:



Σχήμα 6-5 : Σήμα αισθητήρα για Vin=500mV , σε συχνότητα 2 Hz

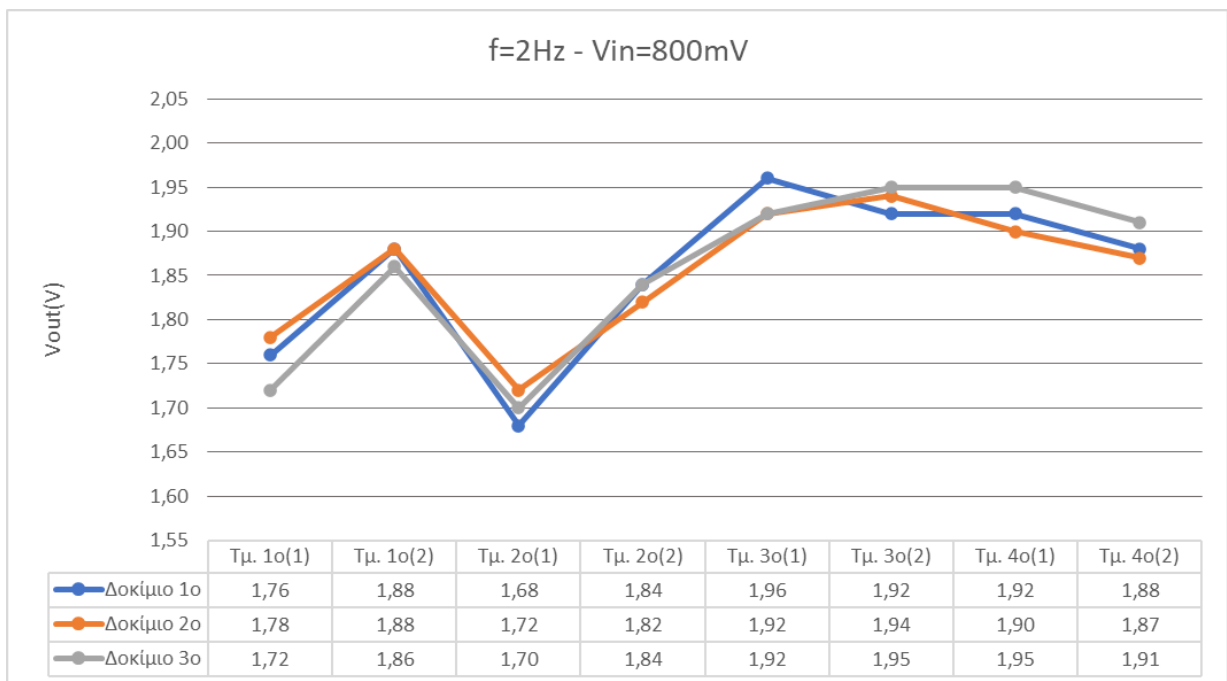


Σχήμα 6-6 : Σήμα αισθητήρα για Vin=500mV , σε συχνότητα 5 Hz

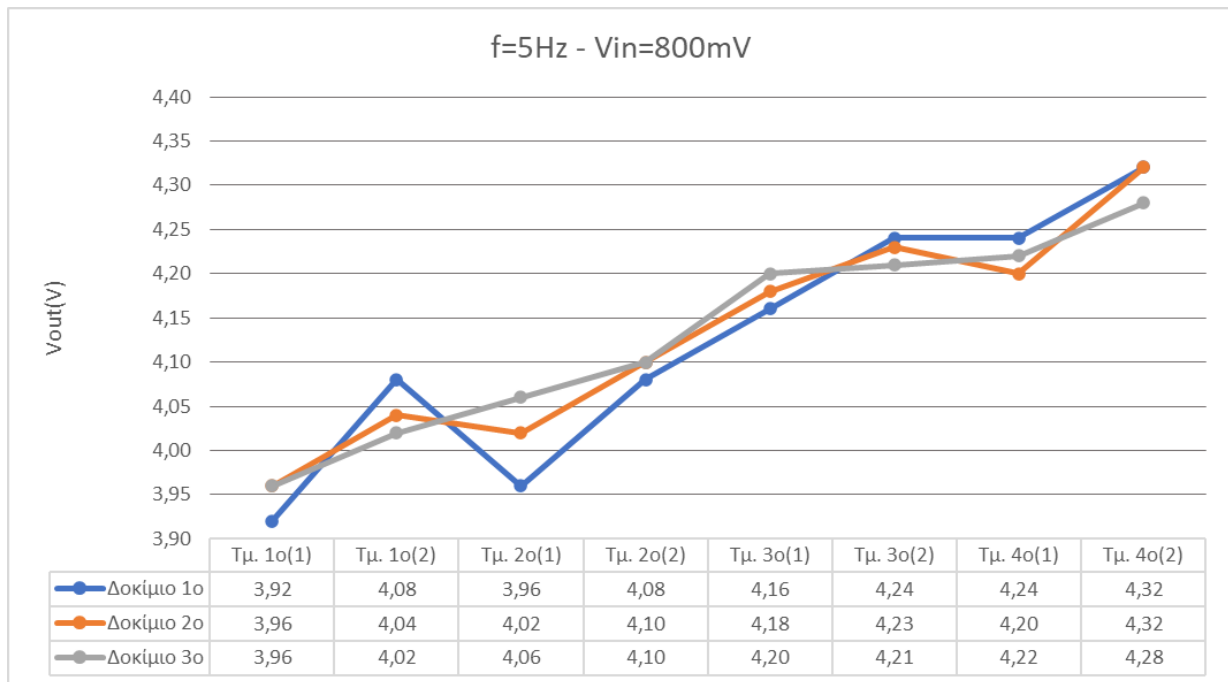


**Σχήμα 6-7 : Σήμα αισθητήρα για Vin=500mV , σε συχνότητα 10 Hz**

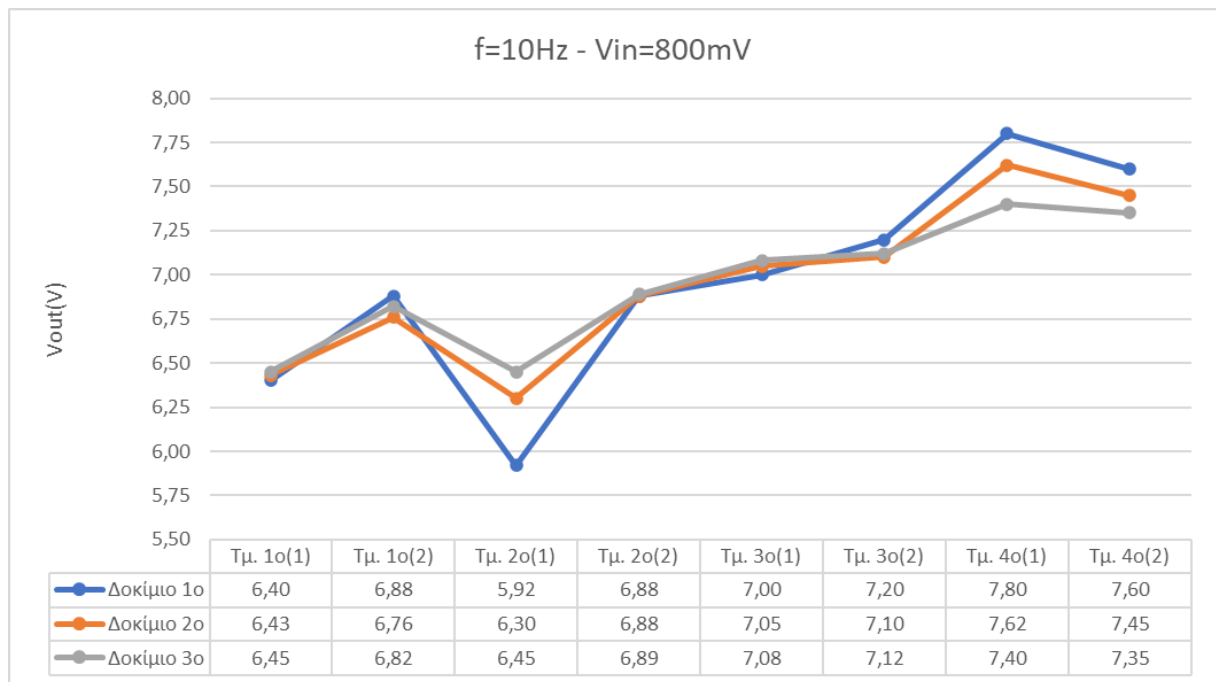
Τέλος, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τάση εισόδου Vin= 800 mV παρομοίως στις ίδιες συχνότητες:



**Σχήμα 6-8 : Σήμα αισθητήρα για Vin=800mV , σε συχνότητα 2 Hz**

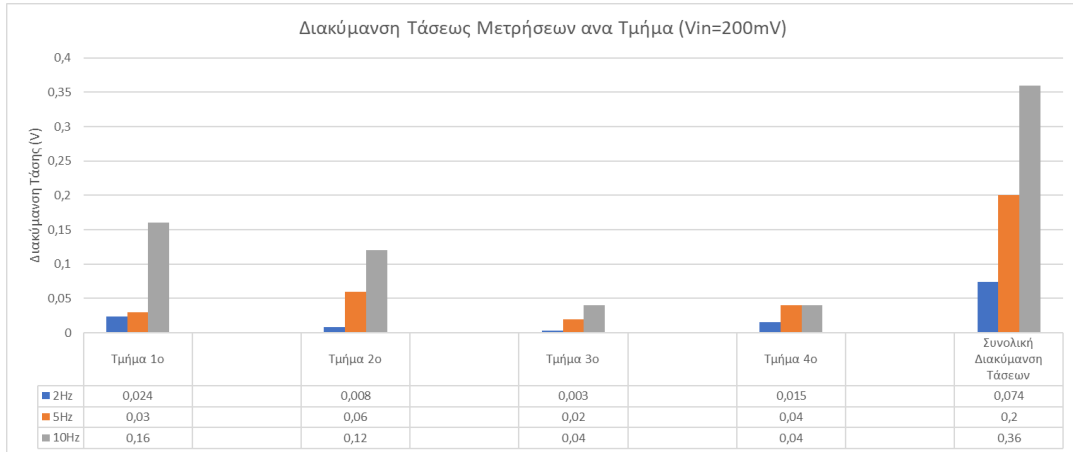


**Σχήμα 6-9 : Σήμα αισθητήρα για Vin=800mV , σε συχνότητα 5 Hz**

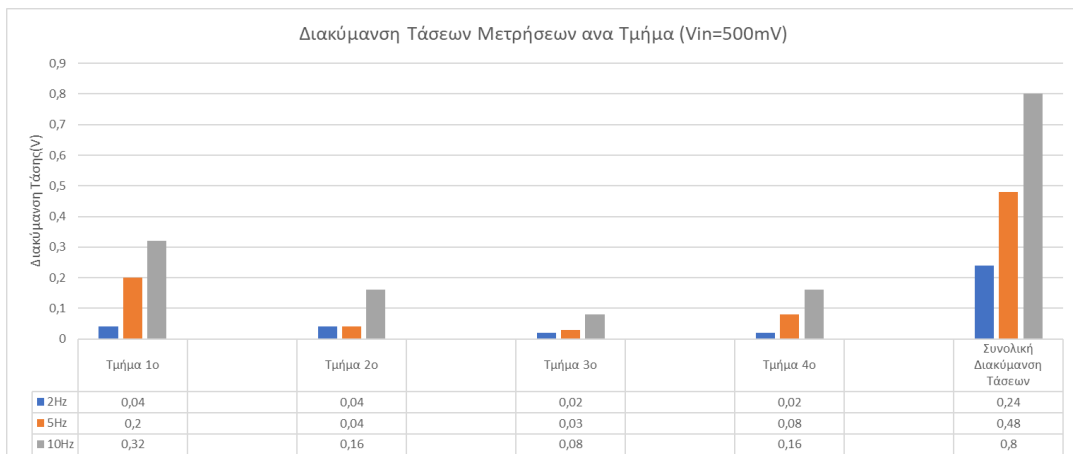


**Σχήμα 6-10 : Σήμα αισθητήρα για Vin=800mV , σε συχνότητα 10 Hz**

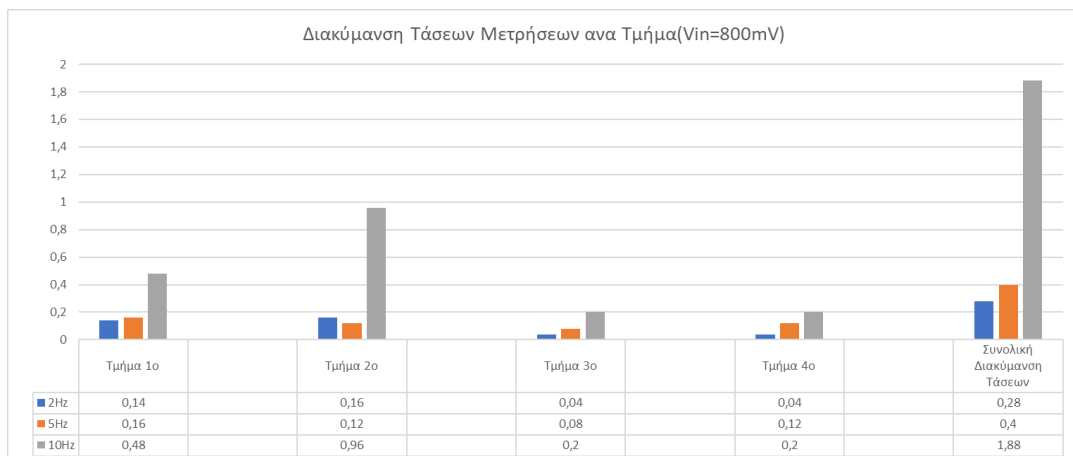
Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω γραφημάτων θα παρουσιαστούν οι διακυμάνσεις των τιμών ανά συχνότητα, με σταθερή τάση κάθε φορά.



Σχήμα 6-11 : Μέγιστη Διακύμανση Τάσεων/Τμήμα όλων των μετρήσεων για Vin=200mV



Σχήμα 6-12 : Μέγιστη Διακύμανση Τάσεων/Τμήμα όλων των μετρήσεων για Vin=500mV



Σχήμα 6-13 : Μέγιστη Διακύμανση Τάσεων/Τμήμα όλων των μετρήσεων για Vin=800mV

Στα παραπάνω σχήματα των Διακυμάνσεων βλέπουμε τη μέγιστη διακύμανση ανά τμήμα που εμφανίστηκε κατά τις μετρήσεις και στους τελευταίους πυλώνες βλέπουμε τη μέγιστη διακύμανση συνολικά όλων των τμημάτων των μετρήσεων.

Αρχικά παρατηρούμε σε ποιο καθαρό βαθμό στη συχνότητα των 10 Hz ότι τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις τις εμφανίζουν το πρώτο και δεύτερο τμήμα. Αυτό μας δείχνει πως ο αισθητήρας όχι μόνο μπορεί να εντοπίσει τις οπές ή τις σχισμές στο δοκίμιο αλλά μπορεί να αναγνωρίσει και το μέγεθος αυτών. Στα τμήματα 1 και 2 βλέπουμε αισθητές διαφορές στις μετρήσεις που παρατηρήθηκαν στην διαμπερή οπή των δοκιμίων και στην οπή που ήταν μέχρι τη μέση καθ' ύψος του δοκίμιο. Παρομοίως και για το δεύτερο τμήμα. Επιπρόσθετα, αυτό που παρατηρούμε είναι πως στο τρίτο τμήμα όπου έχουμε χαράζει το δοκίμιο οι μεταβολές των μετρήσεων δεν είναι μεγάλες και σε συνδυασμό με τα διαγράμματα  $V_{in}/V_{out}$  παρατηρούμε πως η πτώση τάσης είναι αισθητή συγκριτικά με το υγιές τμήμα του δοκιμίου. Συμπληρωματικά να αναφέρουμε πως το τρίτο τμήμα παρουσιάζει αισθητή μείωση στο σήμα του αισθητήρα στις χαμηλές συχνότητες και τάσεις συγκριτικά με το υγιές τμήμα του δοκιμίου. Φαίνεται πως όσο αυξάνεται η συχνότητα και η τάση ο εντοπισμός της κατεργασίας αυτής δεν είναι αισθητή από τον αισθητήρα. Επιπλέον, βλέπουμε μικρές διακυμάνσεις των μετρήσεων στο υγιές τμήμα του δοκιμίου και αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο αισθητήρας μπορεί πολύ πιθανόν να αναγνωρίσει και εναπομένουσες τάσεις σε αυτό το πάχος δοκιμίων. Καθώς, όμως τα δοκίμια δεν ήταν ίσια και παρουσίαζαν εναπομένουσες τάσεις καθ' όλο το μήκος τους δεν μπορούσαμε να επικεντρωθούμε στον εντοπισμό και τη μέτρηση των τάσεων αυτών, διότι δεν υπήρχε σημείο αναφοράς. Τέλος, η συνολική διακύμανση καθώς και τα διαγράμματα  $V_{in}/V_{out}$  μας δείχνουν πως τα τμήματα 1 και 2 είναι αντιληπτά από τον αισθητήρα με τις μετρήσεις να εμφανίζουν εμφανείς διαφορές συγκριτικά με το υγιές τμήμα του δοκιμίου και στο τμήμα 3<sup>ο</sup> του αισθητήρα πρέπει να δοθεί έμφαση στη βαθμονόμηση και την απόκλιση δοκιμίων χωρίς εναπομένουσες τάσεις ώστε να μπορεί να μελετηθεί περαιτέρω η επίδραση σε μικρές μεταβολές της γεωμετρίας από ατέλειες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρήσεων κάθε τμήματος:

**Πίνακας 6-1: Μέση Τιμή Μετρήσεων (V) – Vin=200mV**

<b>Vin =200mV</b>				
<b>Συχνότητα</b>	<b>Τμήμα 1ο</b>	<b>Τμήμα 2ο</b>	<b>Τμήμα 3ο</b>	<b>Τμήμα 4ο</b>
<b>2 Hz</b>	0,452	0,453	0,483	0,510
<b>5 Hz</b>	1,07	1,09	1,13	1,25
<b>10 Hz</b>	1,85	1,86	1,97	2,08

**Πίνακας 6-2: Μέση Τιμή Μετρήσεων (V) – Vin=500mV**

<b>Vin =500mV</b>				
<b>Συχνότητα</b>	<b>Τμήμα 1ο</b>	<b>Τμήμα 2ο</b>	<b>Τμήμα 3ο</b>	<b>Τμήμα 4ο</b>
<b>2 Hz</b>	1,15	1,15	1,24	1,34
<b>5 Hz</b>	2,59	2,47	2,78	2,88
<b>10 Hz</b>	4,36	4,25	4,69	4,86

**Πίνακας 6-3: Μέση Τιμή Μετρήσεων (V) – Vin=800mV**

<b>Vin =500mV</b>				
<b>Συχνότητα</b>	<b>Τμήμα 1ο</b>	<b>Τμήμα 2ο</b>	<b>Τμήμα 3ο</b>	<b>Τμήμα 4ο</b>
<b>2 Hz</b>	1,81	1,77	1,91	1,91
<b>5 Hz</b>	4,00	4,05	4,20	4,26
<b>10 Hz</b>	6,62	6,55	7,22	7,54

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αποκλίσεις των παραπάνω μετρήσεων από το τέταρτο τμήμα , δηλαδή το υγιές κομμάτι των δοκιμίων.

**Πίνακας 6-4: Απόκλιση Μέσων Τιμών τμημάτων από το υγιές τμήμα των δοκιμίων – Vin=200mV**

<b>Vin =200mV</b>			
<b>Συχνότητα</b>	<b>Τμήμα 1ο</b>	<b>Τμήμα 2ο</b>	<b>Τμήμα 3ο</b>
<b>2 Hz</b>	11%	11%	5%
<b>5 Hz</b>	15%	13%	10%
<b>10 Hz</b>	11%	11%	5%

**Πίνακας 6-5: Απόκλιση Μέσων Τιμών τμημάτων από το υγιές τμήμα των δοκιμίων – Vin=500mV**

<b>Vin =500mV</b>			
<b>Συχνότητα</b>	<b>Τμήμα 1ο</b>	<b>Τμήμα 2ο</b>	<b>Τμήμα 3ο</b>
<b>2 Hz</b>	14%	15%	8%
<b>5 Hz</b>	10%	14%	3%
<b>10 Hz</b>	10%	13%	3%

**Πίνακας 6-6: Απόκλιση Μέσων Τιμών τμημάτων από το υγιές τμήμα των δοκιμίων – Vin=800mV**

<b>Συχνότητα</b>	<b>Τμήμα 1ο</b>	<b>Τμήμα 2ο</b>	<b>Τμήμα 3ο</b>
<b>2 Hz</b>	5%	7%	0%
<b>5 Hz</b>	6%	5%	1%
<b>10 Hz</b>	12%	13%	4%

Παρατηρούμε και από τις μέσες τιμές των μετρήσεων κάθε τμήματος και τις αποκλίσεις τους από το τέταρτο τμήμα ότι οι διαφορές στις μετρήσεις για το πρώτο και δεύτερο τμήμα κυμαίνονται από 10% έως 15% για το πρώτο τμήμα στα 200mV και 500mV και από 11 έως 15% στο δεύτερο τμήμα για στα 200 και 500mV. Παρατηρούμε επίσης πως και στα 800mV έχουμε ποσοστιαίες διαφορές μικρότερες τάξεις πλὴν των 10Hz όπου η διάταξη λειτουργούσε σαν ηλεκτρομαγνήτης ταλαντεύοντας το δοκίμιο και καθιστώντας της μετρήσεις ίσως όχι τόσο αξιόπιστες. Επιπλέον, βλέπουμε πως υπάρχουν ποσοστιαίες διαφορές και για το τμήμα τρίτο στα 200 και 500 mV .



## 7. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, έπειτα από τις μετρήσεις που πάρθηκαν και τη μελέτη αυτών, καταλήξαμε στα εξής:

- Να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε δοκίμια χωρίς εναπομένουσες τάσεις, πάχους 2 και 3 mm, ώστε να προσδιοριστούν οι αποκλίσεις των μετρήσεων και του αισθητήρα.
- Ο αισθητήρας φάνηκε πως μπορεί να εντοπίσει, προφανώς τις κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν πάνω σε κάθε τμήμα του δοκιμίου αλλά και απ' ότι φάνηκε και τις εναπομένουσες τάσεις στο υγιές τμήμα των δοκιμίων, καθώς είδαμε απόκλιση των τιμών
- Οι μελλοντικές μετρήσεις να πραγματοποιηθούν σε φάσμα μετρήσεων μικρότερο των 10 Hz καθώς σε υψηλά ρεύματα και συχνότητες το πηνίο λειτουργεί σαν ηλεκτρομαγνήτης και επηρεάζονται οι μετρήσεις καθώς έχουμε ταλαντώσεις.
- Εύρος τιμών, όχι πολύ μεγάλων διαφορών, παρατηρήθηκε σε κάθε μέτρηση ανάλογα με το που βρίσκονταν η μετρούμενη κατεργασία εντός του αισθητήρα.

Τέλος, η λειτουργία του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να μελετηθεί όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο μέσω των εξισώσεων του κεφαλαίου που προσδιορίζουν τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα. Στη παρούσα εργασία η μπομπίνα σχεδιάστηκε για να τυλιχθούν και τα δύο πηνία εντός της και ως πυρήνας των πηνίων έχουμε το δοκίμιο το οποίο δεν παρουσιάζει σταθερή ωμική αντίσταση. Στο μέλλον προτείνεται να σχεδιαστούν μπομπίνες οι οποίες θα έχουν ως πυρήνα το yoke ώστε να μπορεί να μετρηθεί μέσω διάταξης η ωμική αντίσταση των πηνίων. Κατά συνέπεια θα μπορεί να μελετηθεί και η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το λόγο  $V_{in}/V_{out}$  το οποίο θα μας βοηθήσει να εξάγουμε περαιτέρω συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των δοκιμίων αλλά και των μετρήσεων

## 8. Βιβλιογραφία

1. Θ.Δ.Τσιμπούκης, «Εισαγωγή στη βασική θεωρία του Ηλεκτρομαγνητικού πεδίου - Τόμος ΙΙ», Εκδόσεις Studio Press, 2000
2. Peter Bradford, The aggregation of iron oxide nanoparticles in magnetic fields, Thesis, December 2012 - DOI: 10.13140/RG.2.2.32237.90082
3. <https://doi.org/10.3390/met808059>
4. Θεόδωρος Ματίκας, Δημήτριος Αγγέλης,, «Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι», Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγράμματα και Βοηθήματα, Copyright © ΣΕΑΒ, 2015, ISBN: 978-960-603-120-5
5. Dirk Ettelt, Conception and fabrication of a strain-gage magnetometer – Universite de Grenoble, 2012, France NNT : 2012GRENT020
6. P. RipkaCzech, Biomedical Applications of Fluxgate Sensors, Progress in Electromagnetic Research Symposium 2004, Pisa, Italy, March 28, Technical University Faculty of Electrical Engineering, Dept. of Measurement Technicka 2, 181 00 Praha 6, Czech Republic
7. [codrey.com/electronic-circuits/ss49e-hall-effect-sensor-a-random-hack/](http://codrey.com/electronic-circuits/ss49e-hall-effect-sensor-a-random-hack/)
8. Marshall J.Styczinski, Steven D.Vance, Erika M.Harnett, Corey J.Cochrane, A perturbation method for evaluating the magnetic field induced from an arbitrary, asymmetric ocean world analytically, Icarus Volume 376, April 2022
9. T. S. Horbury, H. O'Brien, I. Carrasco Blazquez, M. Bendyk, P. Brown, R. Hudson, V. Evans, T. M. Oddy, C. M. Carr, T. J. Beek, E. Cupido, S. Bhattacharya, J.-A. Dominguez, L. Matthews, V. R. Myklebust, B. Whiteside, S. D. Bale, W. Baumjohann, D. Burgess, V. Carbone, P. Cargill, J. Eastwood, G. Erdös, L. Fletcher, R. Forsyth, J. Giacalone, K.-H. Glassmeier, M. L. Goldstein, T. Hoeksema, M. Lockwood, et al., Astron. Astrophys. 2020, 642, A9.
10. Pauline Le Maire, Lionel Bertrand, Marc Munsch, Marc Diraison, Yves Géraud, «Aerial magnetic mapping with an unmanned aerial vehicle and a fluxgate magnetometer: a new method for rapid mapping and upscaling from the field to regional scale», Université de Strasbourg/EOST, CNRS, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, 10 June 2020, Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, F-54000
11. M. D. Prouty, R. Johnson, I. Hrvoic, and A. K. Vershovskiy, Optical Magnetometry, pp. 319 - 336 - Geophysical applications, Publisher: Cambridge University Press – 2013
12. Peng H, Gong JM, Song Q, Xiang XS, Shua, Development and application of trenchless magnetic detector for oil and gas pipeline defect, Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering Volume 21Issue 12021 pp 163–174 <https://doi.org/10.3233/JCM-204459>

13. Oskar Persson , Gustav Persson , Torque Sensor for Automotive Applications, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University
14. Μπαλταδούρος Σεραφίμ , Μαθηματική Προτυποποίηση Διατάξεων Josephson, Σχολή Θετικών επιστημών και τεχνολογίας, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Μάιος 2014
15. Ιωάννης Νικολάου Μάργαρης, Σιδηρομαγνητικές επαφές Josephson με ανομοιογενή μαγνήτιση, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστημίου Κρήτης Ηράκλειο, Ελλάδα, 2013
16. J. Clarke and A. I. Braginski (Eds.) (2004). The SQUID handbook. Vol. 1. Wiley-Vch.
17. R. L. Fagaly, Squid Instruments and Applications, Tristan Technologies - San Diego, CA 92121 USA
18. Benjamin P. Weiss, Joseph I.Kirschvink, Franz J.Baudenbacher, Hojatollah Vali, Nick T. Peters, Francis A. Macdonald, John P. Wikswo, A Low Temperature Transfer of ALH84001 from Mars to Earth, Science, 290, 791-795 (2000)
19. S. Brockhaus, D. Storey, In-line inspection (ILI) methods for detecting corrosion in underground pipelines, Underground Pipeline Corrosion, 2014
20. Tong, Colin (2018). Introduction to Materials for Advanced Energy Systems. Springer. pp. 400–. ISBN 978-3-319-98002-7.
21. Polyxeni Vourna , Aphrodite Ktena , Panagiotis Tsarabaris and Evangelos Hristoforou - Magnetic Residual Stress Monitoring Technique for Ferromagnetic Steels - Metals 2018, 8(8), 592
22. P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, “Residual stress. Part 1 – Measurement techniques”, Materials, Science and Technology, 17, 4, pp. 355-365, 2001.
23. Fangjie Mo, Guangai Sun , Jian Li, Changsheng Zhang , Hong Wang , Ying Chen, Zhao Liu, Zukun Yang, Hongjia Li, Zhaolong Yang, Beibei Pang, Yalin Huang , Yi Tian 1, Jian Gong, Bo Chen and Shuming Peng - Recent Progress of Residual Stress Distribution and Structural Evolution in Materials and Components by Neutron Diffraction Measurement at RSND – Quantum Beam Sci. 2018, 2(3) - July 2018
24. “ISO - ISO/ASTM 52900:2015 - Additive manufacturing — General principles —Terminology.” <https://www.iso.org/standard/69669.html> (accessed Apr. 07, 2022).
25. 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.
26. S. Tumanski , Handbook of Magnetic Measurements - Chapter: Magnetic Materials, June 2011