



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΟΡΗΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΗ  
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΕΡΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μουμτζόγλου Νικόλαος**

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΟΡΗΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΗ  
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΕΡΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Μουμτζόγλου Νικόλαος**

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10<sup>η</sup> Ιουλίου 2024

.....

Ευάγγελος  
Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Ιωάννης  
Γκόνος,  
Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος,  
Πολιτόπουλος,  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024

.....

Νικόλαος Μουμτζόγλου

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

Copyright © Νικόλαος Μουμτζόγλου, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

Ο μη καταστροφικός έλεγχος υλικών αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στον τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας. Για αυτό το λόγο, η παρούσα εργασία αναλύει την ανάπτυξη και την εφαρμογή μιας φορητής διάταξης μη καταστροφικού ελέγχου για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε φερρομαγνητικά υλικά.

Αρχικά καλύφθηκαν οι απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις. Έπειτα, με το σχεδιασμό και την κατασκευή μιας συσκευής μαγνητικής μέτρησης και εξειδικευμένων αλγορίθμων, μελετήθηκαν οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου σε διάφορα υπό μέτρηση δείγματα χάλυβα. Κατά τη διάρκεια της έρευνας αυτής, εξετάστηκε η σύνδεση των φθωρών και των ατελειών του μετρούμενου υλικού με τη λαμβανόμενη μαγνητική μέτρηση, με απώτερο στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Μέσω της συλλογής και της ανάλυσης δεδομένων από τον αισθητήρα, κατανοήθηκε η συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικά δείγματα χάλυβα. Τέλος λήφθηκαν κάποια τελικά συμπεράσματα για όλη τη διάταξη καθώς και προτάθηκαν και μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας, συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης των αλγορίθμων και της εφαρμογής της διάταξης στη μέτρηση περισσότερων υλικών. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία αποτελεί μια σημαντική προσφορά στον τομέα της μη καταστροφικής ανάλυσης υλικών και της μελέτης των μαγνητικών ιδιοτήτων τους.

**Λέξεις-κλειδιά:** μη καταστροφικός έλεγχος υλικών, φερρομαγνητικά υλικά, μικροελεγκτής ESP32, ToF αισθητήρας, οπτικός αισθητήρας, φαινόμενο Hall



# Abstract

Non-destructive testing constitutes a significant tool in the field of science and technology. For this reason, this thesis analyzes the development and implementation of a portable non-destructive testing arrangement for measuring the magnetic field in ferromagnetic materials.

Initially, the necessary theoretical knowledge was covered. Then, designing and developing a device for magnetic measurements and using specialized algorithms, the variations of the magnetic field to different samples were studied. Throughout this research, the connection between material's defects and the collected magnetic measurements were examined, with the goal to improve the accuracy and reliability of the results. Through the collection and analysis of data from the sensors, the behavior of the magnetic field in different materials was understood.

The behavior of the magnetic field in different steel samples was understood, through the collection and analysis of sensor's data. Finally, some final conclusions were drawn regarding the entire arrangement, and potential future extensions of the work were proposed, including the improvement of algorithms and the application of this arrangement for measuring more materials. In this way, the work constitutes a significant contribution to the field of non-destructive material analysis and the study of their magnetic properties.

**Keywords:** Non-Destructive Testing, ferromagnetic materials, ESP32 microcontroller, ToF Sensor, Optical Sensor, Hall Effect





## Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024. Επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας ήταν ο καθηγητής κ. Ευάγγελος Χριστοφόρου, τον οποίο ευχαριστώ εγκάρδια. Εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την αποδοχή του αιτήματός μου να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές κ. Ι. Γκόνο και κ. Κ. Πολιτόπουλο για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή εξέταση της παρούσας διπλωματικής και για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους ως προς το περιεχόμενό της.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα Γεωργία Στάμου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε και για τις υποδείξεις της που με καθοδήγησαν κατά την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου, τους παιδικούς αλλά και όσους απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου για την στήριξη και τις χαρές που μου προσέφεραν τόσο εντός όσο και εκτός της σχολής.



# Περιεχόμενα

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	v
Abstract .....	vii
Πρόλογος – Ευχαριστίες.....	ix
Περιεχόμενα.....	xi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο Εργασίας .....	1
1.2 Κίνητρο και Στόχος.....	2
1.3 Δομή Εργασίας.....	2
2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....	5
2.1 Βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού και μαγνητικών υλικών .....	5
2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο .....	5
2.1.2 Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση, μαγνητική αντίσταση. ....	7
2.1.2 Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση, μαγνητική αντίσταση .....	7
2.1.3 Αυτεπαγωγή.....	9
2.1.4 Μαγνητικά υλικά .....	9
2.1.5 Σιδηρομαγνητικά υλικά .....	10
2.1.6 Μαγνητική υστέρηση .....	11
2.1.7 Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά.....	13

2.2 Μη καταστροφικός έλεγχος .....	14
2.2.1 Γενικά .....	14
2.2.2 Τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου μαγνητικών υλικών .....	15
2.2.3 Σχεδίαση Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων για Ανάλυση Υλικών .....	22
2.3 Αισθητήρες.....	22
2.3.1 Βασικές πληροφορίες.....	22
2.3.2 Ταξινόμηση αισθητήρων .....	24
2.3.3 Μαγνητικοί αισθητήρες .....	25
2.3.4 Αισθητήρες φαινομένου Hall .....	28
2.3.5 Αισθητήρες μέτρησης απόστασης.....	32
2.4 Μικροελεγκτές .....	33
2.4.1 Ορισμός.....	33
2.4.2 Τα στοιχεία του μικροελεγκτή .....	34
2.4.3 Μικροελεγκτής Esp32 .....	36
2.4.4 Επικοινωνία με το μικροελεγκτή .....	37
3. Πειραματικό Μέρος .....	43
3.1 Περιγραφή Διάταξης .....	43
3.2 Yoke με μόνιμο μαγνήτη.....	47
3.3 Αισθητήρας VL6180X.....	51
3.4 Αισθητήρας PMW3901.....	54
3.5 Σχεδιασμός της θήκης .....	57

4. Αποτελέσματα μετρήσεων .....	63
5. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις .....	73
Βιβλιογραφία .....	77
Παράρτημα .....	84



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο "Κατασκευή φορητής διάταξης μη καταστροφικού ελέγχου φερρομαγνητικών υλικών" έχει ως αντικείμενο το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας συσκευής ελέγχου της δομικής κατάστασης φερρομαγνητικών υλικών (π.χ. του χάλυβα), βασιζόμενη στη συμμετοχή τριών διαφορετικών αισθητήρων. Μέσω της συσκευής αυτής μπορεί να ανιχνευθεί, να αξιολογηθεί και να παρακολουθηθεί η κατάσταση αυτών των υλικών χωρίς διενέργεια καταστροφικών διαδικασιών.

Η παρούσα εργασία αναλύει το πεδίο των μη καταστροφικών ελέγχων (NDT), όπου η εφαρμογή διαφόρων μεθοδολογιών και τεχνικών επιτρέπει την αξιολόγηση και παρακολούθηση υλικών, ή και εξοπλισμού, χωρίς να τροποποιείται η ποιότητά τους. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι είναι κρίσιμες για τη συντήρηση και την αξιοπιστία των συστημάτων, αποτρέποντας ατυχήματα, θανάτους, και οικονομικές και περιβαλλοντικές ζημιές.

Η εργασία αναφέρεται ειδικά στη χρήση των αισθητήρων Time-of-flight, Optical Flow και Hall για τον έλεγχο φερρομαγνητικών υλικών. Κάθε αισθητήρας έχει τη δυνατότητα να παρέχει πληροφορίες που είναι ουσιώδεις για την ανίχνευση μικροσκοπικών ατελειών, την ανάλυση των υλικών και τον έλεγχο των γεωμετρικών μετατοπίσεων στο επίπεδο, προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στον έλεγχο και την επισκευή φερρομαγνητικών υλικών.

Οι πειραματικές διαδικασίες και οι μελέτες που προτείνονται σε αυτήν την εργασία θα προσφέρουν ένα νέο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση του μη καταστροφικού ελέγχου φερρομαγνητικών υλικών με βάση τη χρήση αυτών των προηγμένων αισθητήρων.

## 1.2 Κίνητρο και Στόχος

Το κίνητρο πίσω από τη διεξαγωγή αυτής της εργασίας ήταν η ανάγκη για την ανάπτυξη προηγμένων μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου για φερρομαγνητικά υλικά που θα προσέφεραν υψηλή ακρίβεια, αξιοπιστία και φορητότητα. Η ανάγκη για αυτές τις μεθόδους είναι ουσιώδης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου η ακριβής επιθεώρηση και αξιολόγηση φερρομαγνητικών υλικών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των εγκαταστάσεων και των δομών.

Ο βασικός στόχος αυτής της εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας προηγμένης διάταξης ελέγχου, βασιζόμενης σε τρεις αισθητήρες (Time-of-Flight, Optical Flow Sensor και Hall), που θα επέτρεπε τον μη καταστροφικό έλεγχο φερρομαγνητικών υλικών με υψηλή ακρίβεια, ταχύτητα και αξιοπιστία. Ο σκοπός ήταν να δημιουργηθεί μια διάταξη που θα επέτρεπε την εύκολη και αξιόπιστη εκτέλεση μη καταστροφικών ελέγχων σε φερρομαγνητικά υλικά, προσφέροντας παράλληλα τη δυνατότητα ταχείας και ακριβής αναγνώρισης ελαττωμάτων ή ατελειών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα των υλικών αυτών. Συνολικά, ο σκοπός ήταν η ανάπτυξη μιας πρακτικής και αποτελεσματικής διάταξης ελέγχου που θα μπορούσε να εφαρμοστεί με επιτυχία σε ποικίλες εφαρμογές και βιομηχανικά περιβάλλοντα.

## 1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τέσσερις κύριες ενότητες, οι οποίες καθοδηγούν την πορεία της έρευνας και την ανάπτυξη του θέματος. Αρχίζοντας με την εισαγωγή, παρουσιάζονται τα στοιχεία που ενέπνευσαν αυτήν την έρευνα, εστιάζοντας στην ανάγκη για εξέλιξη στον τομέα του μη καταστροφικού ελέγχου φερρομαγνητικών υλικών. Επιπλέον, αναλύονται οι στόχοι της εργασίας, επισημαίνοντας τα αναμενόμενα αποτελέσματα και την προσφορά στον επιστημονικό κλάδο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρέχεται μία λεπτομερής επισκόπηση των θεωρητικών γνώσεων που απαιτούνται για την κατανόηση του θέματος. Το συγκεκριμένο



κεφάλαιο περιλαμβάνει λεπτομερείς εξηγήσεις σχετικά με τον ηλεκτρομαγνητισμό, τους μαγνητικούς αισθητήρες, τα μαγνητικά υλικά και τους μικροελεγκτές, καθώς και τη θεωρητική πλευρά του μη καταστροφικού ελέγχου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται το πειραματικό μέρος της έρευνας. Αναλύονται οι επιλογές των εξαρτημάτων, εξετάζεται η εφαρμογή και η σύνδεση των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στη διπλωματική. Επιπλέον παρουσιάζεται και η θήκη που σχεδιάστηκε για την προστασία της διάταξης.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε διάφορα υλικά. Εκτελούνται μετρήσεις, αναλύονται τα αποτελέσματα και συζητείται η σημασία τους για το συνολικό έργο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και τον πειραματισμό. Επιπροσθέτως, προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις για πιθανές εξελίξεις στο πεδίο της έρευνας.

Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία της παρούσας διπλωματικής εργασίας που περιλαμβάνει αναφορές σε πολυάριθμες επιστημονικές πηγές, ερευνητικά άρθρα, βιβλία, και πληροφορίες από επίσημες ιστοσελίδες που χρησιμοποιήθηκαν για την υποστήριξη και την ανάπτυξη του παρόντος έργου. Ακόμη, παρατίθεται και ένα παράρτημα με τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για τον κατάλληλο προγραμματισμό των αισθητήρων, παρέχοντας έτσι μια πλήρη εικόνα της διαδικασίας και των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην έρευνα αυτή.



## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού και μαγνητικών υλικών

Το ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο, δημιουργείται σε παρόμοια φιλοσοφία με το κυκλωματικό πρότυπο. Το δεύτερο ως γνωστών περιλαμβάνει:

- Ένα σύνολο από έξι βασικά στοιχεία: τις πηγές τάσεως και ρεύματος, τον αντιστάτη (R), τον επαγωγέα (L) και τον πυκνωτή (C) καθώς και το μετασχηματιστή.
- Τις σχέσεις ορισμού των παραπάνω, από τις οποίες απορρέουν ο γεωμετρικός, ο ενεργειακός και ο κυκλωματικός τρόπος μετάφρασης τους.
- Δύο βασικά αξιώματα, νόμος ρευμάτων και τάσεων του Kirchhoff.

Τα βασικά μεγέθη του ηλεκτρομαγνητικού πρότυπου είναι επίσης έξι:

- Η πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου ( $\rho$ ) και η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος ( $J$ )
- Τα πεδιακά μεγέθη: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E), πυκνότητα ηλεκτρικής ροής ή διηλεκτρική μετατόπιση (D), ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) και μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής (B).
- Οι θεμελιώδεις νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού είναι ένα σύνολο έξι εξισώσεων: εξίσωση Maxwell-Faraday, Maxwell-Ampere, νόμος διατήρησης φορτίου, νόμος Gauss για ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, εξίσωση Lorentz.

#### 2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία βασίζεται στις τέσσερις εξισώσεις Maxwell στην εξίσωση της αρχής διατήρησης του φορτίου και στην εξίσωση Lorentz. Οι εξισώσεις αυτές (2.1-2.6) σε ολοκληρωτική μορφή είναι:

Ο νόμος του Faraday:

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{l} \quad (2.1)$$

Ο νόμος του Ampere:

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{J} d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} d\vec{S} \quad (2.2)$$

Ο νόμος του Gauss για την ηλεκτρική ροή:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV \quad (2.3)$$

Ο νόμος του Gauss για την μαγνητική ροή:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (2.4)$$

Η εξίσωση αρχής διατήρησης του φορτίου:

$$\oint_S \vec{J} d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV \quad (2.5)$$

Και τέλος η εξίσωση Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.6)$$

Ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί με δύο τρόπους. Ένας τρόπος είναι μέσω κινούμενων ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, όπως το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό και ταυτόχρονα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω του. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω των στοιχειωδών σωματιδίων, όπως τα ηλεκτρόνια, που έχουν ένα ενδογενές μαγνητικό πεδίο. Τα μαγνητικά πεδία από τα ηλεκτρόνια σε ορισμένα υλικά, όταν προστίθενται, δημιουργούν ένα συνολικό μαγνητικό πεδίο γύρω από το υλικό. Αυτός είναι ο λόγος που ένας μόνιμος μαγνήτης έχει ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο γύρω του [1].

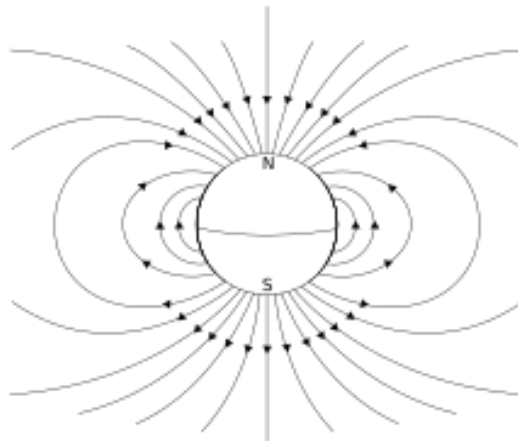
Η περιγραφή του μαγνητικού πεδίου μπορεί να γίνει μέσω της μαγνητικής πυκνότητας ροής (B), η οποία μετρείται σε Tesla (T) ή Weber ανά τετραγωνικό μέτρο (Wb/m<sup>2</sup>), ή από το μαγνητικό πεδίο H (A/m). Και τα δύο αυτά μεγέθη είναι διανυσματικά. Η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών, B και H, δίνεται από την εξίσωση :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

Όπου:  $\mu$  (Wb/mH) : μαγνητική διαπερατότητα.

### 2.1.2 Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση, μαγνητική αντίσταση.

Στην εικόνα (2.1.1) απεικονίζεται ως παράδειγμα ενός μαγνητικού πεδίου, το μαγνητικό πεδίο της Γης.



Εικόνα 2.1.1 Μορφή του μαγνητικού πεδίου Γης.

### 2.1.2 Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση, μαγνητική αντίσταση

Η μαγνητική διαπερατότητα καθορίζει την ικανότητα του υλικού να αντιδρά σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Κάθε υλικό έχει διαφορετική μαγνητική διαπερατότητα, η οποία μαρτυρά πόσο εύκολα ή δύσκολα επηρεάζεται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Για να μετρηθεί αυτή η διαφορά, ορίζεται η σχετική μαγνητική διαπερατότητα ως το λόγο της μαγνητικής διαπερατότητας ενός υλικού προς την μαγνητική διαπερατότητα του κενού [3]. Ο λόγος αυτός γράφεται στην εξίσωση (2.8):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.8)$$

Η αλλαγή στη μαγνητική επαγωγή ενός μαγνητικού πεδίου, όταν τοποθετείται ένα υλικό μέσα σε αυτό οφείλεται στα μαγνητικά δίπολα των ατόμων του υλικού. Σε απουσία εξωτερικού πεδίου, τα δίπολα είναι κατά βάση τυχαία προσανατολισμένα. Ωστόσο, όταν εκτίθενται σε μαγνητικό πεδίο, τα δίπολα στο υλικό ευθυγραμμίζονται

ανάλογα, παράγοντας ένα δεύτερο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αντίδραση ονομάζεται μαγνήτιση και η ένταση της μαγνήτισης ( $M$ ) έχει τις ίδιες μονάδες με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα παραπάνω συνδέονται από την κάτωθι εξίσωση:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu \vec{M} \quad (2.9)$$

Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η σχέση μεταξύ, τάσης  $V$ , ρεύματος  $I$  και αντίστασης  $R$  δίνεται από το νόμο του Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.10)$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε ένα μαγνητικό κύκλωμα υπάρχει παρόμοια δομή με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα, η τάση προκαλεί την ροή του ρεύματος, ενώ στο μαγνητικό κύκλωμα αυτή η ποσότητα ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη.

$$F = NI \quad (2.11)$$

Όπου:  $N$  είναι ο αριθμός σπειρών που διαθέτει το σωληνοειδές και  $I$ : το ρεύμα που το διαρρέει.

Βάση της (2.11) γίνεται αντιληπτό πως η δύναμη αυτή είναι ανάλογη του αριθμού σπειρών που διαθέτει το σωληνοειδές καθώς και του ρεύματος που το διαπερνά [2].

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα, η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $V$  προκαλεί ροή ρεύματος  $I$ , ενώ στα μαγνητικά κυκλώματα, η μαγνητική δύναμη προκαλεί μαγνητική ροή  $\Phi$ . Στην περίπτωση των μαγνητικών κυκλωμάτων, η αντίσταση αντιστοιχεί στη μαγνητική αντίσταση  $R$ , η οποία υπολογίζεται με μία συγκεκριμένη συνάρτηση:

$$R = \frac{F}{\Phi} = \frac{L}{\mu r \mu_0 A} \quad (2.12)$$

Όπου:  $\mu_0$ : ονομάζεται η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,

$\mu_r$ : η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που βρίσκεται μέσα στο σωληνοειδές,

$L$ : το μήκος της μαγνητικής διαδρομής,

$A$ : το εμβαδόν διατομής του πυρήνα του σωληνοειδούς.

### 2.1.3 Αυτεπαγωγή

Η αυτεπαγωγή είναι το φαινόμενο στο οποίο ένα σώμα που δημιουργεί μαγνητική επαγωγή είναι ταυτόχρονα το σώμα στο οποίο η επαγωγή επιδρά. Καθώς το ρεύμα στον σωληνοειδή αγωγό αυξάνεται, αυξάνεται και η επαγόμενη ροή του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η αύξηση της ροής δημιουργεί ηλεκτρική τάση εξ επαγωγής στο κύκλωμα, η οποία επιδρά αντίθετα στη μεταβολή της μαγνητικής ροής που την προκαλεί. Μια μερίδα της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου, αφαιρώντας ενέργεια από το ηλεκτρικό κύκλωμα. Αυτό το φαινόμενο λειτουργεί και αντίστροφα: όταν η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος μειώνεται, η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εμποδίζοντας τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος [3].

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (2.13)$$

Όπου:  $L$ : ονομάζεται ο συντελεστής αυτεπαγωγής του βρόχου,  
 $e_L$ : τάση αυτεπαγωγής.

Παρατηρώντας την εξίσωση (2.13) αντιλαμβανόμαστε ότι η ηλεκτρική τάση λόγω αυτεπαγωγής σε ένα σωληνοειδές εξαρτάται από τον συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου (μονάδες Henry ) και τη μεταβολή του ρεύματος. Για τον έλεγχο της αυτεπαγωγής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατασκευή πηνίων μικρό ή μεγάλο συντελεστή αυτεπαγωγής, ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού.

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής ποικίλει ανάλογα με τη γεωμετρία του πηνίου, όπως το σχήμα (σωληνοειδές, κωνικό, επίπεδο), το πάχος, το μήκος και τον αριθμό των τυλιγμάτων. Η εξατομίκευση της γεωμετρίας και των παραμέτρων του πηνίου επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή αυτό.

### 2.1.4 Μαγνητικά υλικά

Τα μαγνητικά υλικά ταξινομούνται βάσει της επιδεκτικότητάς τους στη μαγνήτιση [4]. Αυτά τα υλικά χωρίζονται στα επιμέρους: στα σιδηρομαγνητικά, στα παραμαγνητικά και στα διαμαγνητικά υλικά.

Η πιο σημαντική κατηγορία είναι τα σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic), με θετική επιδεκτικότητα πολύ μεγαλύτερη της μονάδας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και ορισμένες σπάνιες μεταλλικές γαίες με τα κράματά τους. Δεδομένου ότι η διπλωματική εργασία εστιάζεται στον έλεγχο σιδηρομαγνητικών υλικών θα γίνει μια περαιτέρω ανάλυση για τα τελευταία στη συνέχεια.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει υλικά που ονομάζονται παραμαγνητικά και η μαγνήτισή τους είναι ασθενής, αλλά προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το αλουμίνιο.

Τέλος, τα διαμαγνητικά υλικά, αντιδρούν αντίθετα στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο χαλκός, ο άργυρος, το βισμούθιο και το βηρύλλιο.

### 2.1.5 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Στα σιδηρομαγνητικά, υπάρχουν δίπολα τα οποία έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας των τροχιακών κινήσεων των ασύζευκτων ηλεκτρονίων. Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν βρίσκεται υπό την επίδραση κάποιου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου υπάρχουν μαγνητικές ροπές οι οποίες είναι ήδη προσανατολισμένες σε μικροσκοπική κλίμακα (μαγνητικές περιοχές Weiss) (magnetic domains), αλλά σε μεγαλύτερη κλίμακα οι μαγνητίσεις των μαγνητισμένων περιοχών είναι τυχαία προσανατολισμένες. Αυτά τα υλικά αποτελούν το αντικείμενο μελέτης στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ορισμένα από αυτά περιλαμβάνουν τον σίδηρο, κράματα σιδήρου με νικέλιο, κοβάλτιο, καθώς και άλλα μέταλλα.

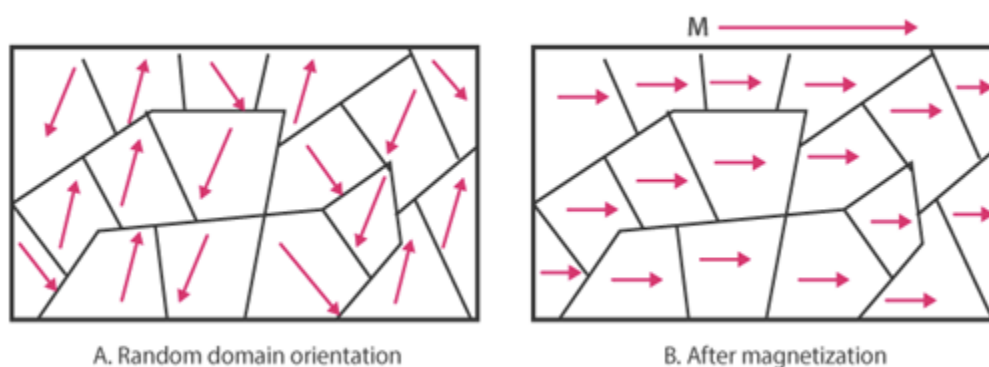
Η ιδιότητα που κάνει τους σιδηρομαγνήτες τόσο ξεχωριστούς και χρήσιμους στις τεχνολογικές εφαρμογές είναι ότι όταν βρεθούν σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έχουν τη δυνατότητα να αποκτήσουν μαγνήτιση και μαγνητική επαγωγή πολύ μεγαλύτερη από την τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. τους

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά επίσης, έχουν την ιδιότητα να διατηρούν μια μαγνητική κατάσταση σε κάποιο βαθμό ακόμα και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού



μαγνητικού πεδίου που τα επηρέασε. Αυτή η τάση να διατηρούν την "μνήμη" της προηγούμενης μαγνητικής επίδρασης ονομάζεται μαγνητική υστέρηση [5].

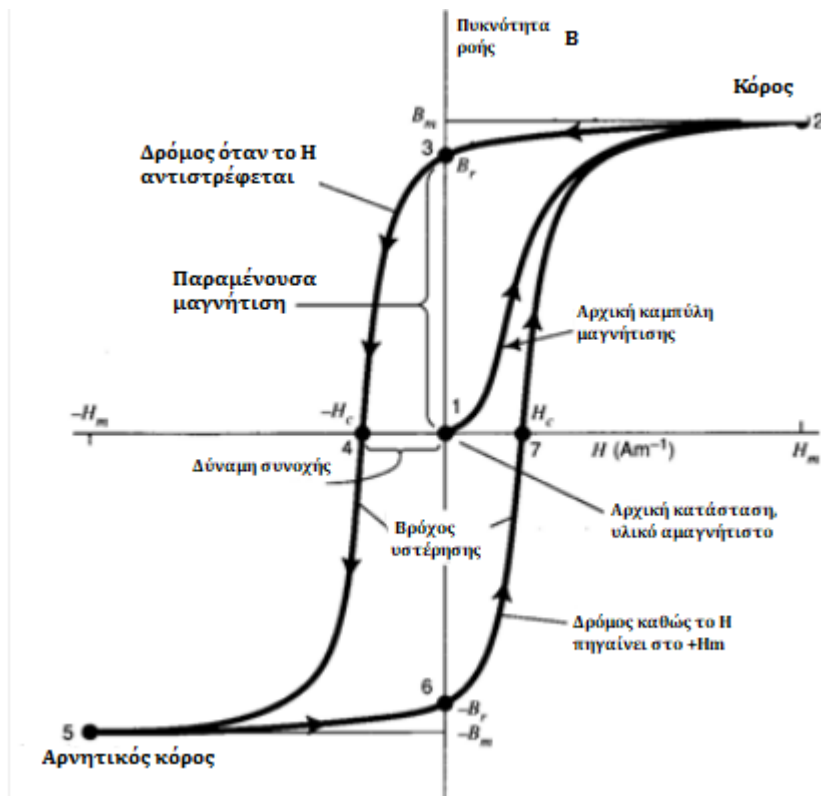
Οι ιδιότητες αυτών των υλικών επιτρέπουν την κατασκευή μαγνητών. Η δυνατότητά τους να διατηρούν τη μαγνητική τους φόρτιση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, προσδίδοντάς τους μια σειρά πολύτιμων εφαρμογών στην τεχνολογία και την καθημερινή ζωή.



Εικόνα 2.1.2 Προσανατολισμός μαγνητικών δίπολων σιδηρομαγνητικού υλικού: χωρίς επίδραση κάποιου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Α) και υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Β). [6]

### 2.1.6 Μαγνητική υστέρηση

Σε όλα τα μη μαγνητικά υλικά και στο κενό, η μαγνητική διαπερατότητα παραμένει σταθερή, οδηγώντας σε μια γραμμική σχέση μεταξύ της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αντίθετα, στα σιδηρομαγνητικά υλικά, η σχέση μεταξύ της πυκνότητας μαγνητικής ροής ( $B$ ) και της έντασης του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ), εμφανίζει έντονη μη γραμμικότητα. Αυτό οφείλεται σε δύο βασικά φαινόμενα: το φαινόμενο του κορεσμού, όπου η αύξηση της μαγνητικής πυκνότητας φθάνει σε μια μέγιστη τιμή, καθώς επίσης και στη μαγνητική υστέρηση, όπου το υλικό θυμάται την προηγούμενη μαγνητική του κατάσταση και δεν επιστρέφει στη μηδενική κατάσταση αφότου καταργηθεί το μαγνητικό πεδίο.



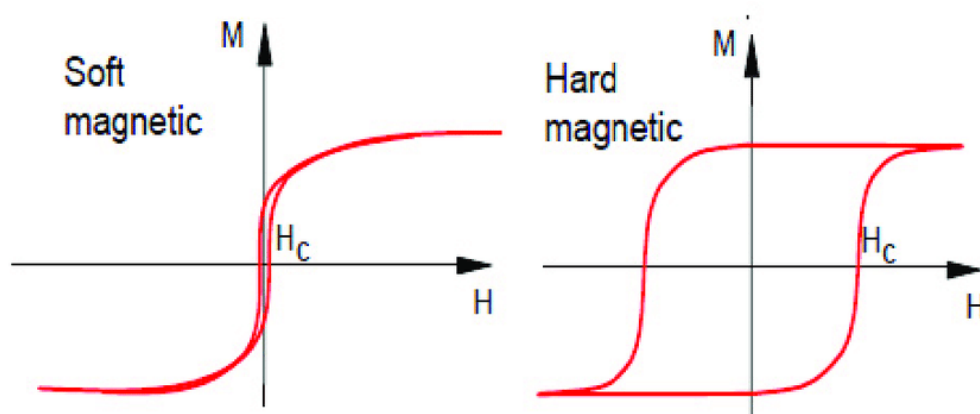
Εικόνα 2.1.3: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

Παρατηρώντας την εικόνα 2.3 εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Εάν ένα υλικό μαγνητιστεί αρχικά μέχρι τον κόρο (καμπύλη 1-2) και ακολούθως εξαλειφθεί το πεδίο που προκάλεσε τη μαγνήτιση, η μαγνητική επαγωγή δε μηδενίζεται, εντούτοις διατηρεί μια θετική τιμή (σημείο 3), ονόματι παραμένουσα μαγνήτιση. Άρα γίνεται αντιληπτό ότι παρά το μηδενισμό της μαγνητικής διέγερσης, στο υλικό θα μείνει κάποιος αριθμός μαγνητικών περιοχών με προσανατολισμό κατά τη διεύθυνση του πεδίου. Το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό και ως υστέρηση. Αντιστρέφοντας τη φορά του πεδίου (καμπύλη 3-4) στο σημείο 4 μηδενίζεται η μαγνήτιση. Η τιμή της μαγνητικής διέγερσης για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (δύναμη συνοχής στο σχήμα). Στη συνέχεια, αυξάνοντας τη μαγνητική διέγερση  $H$ , με την ίδια φορά (καμπύλη 4-5) το υλικό φτάνει σε κόρο (σημείο 5) με τις μαγνητικές ροπές προσανατολισμένες αντιστρόφως. Μετά, αυξάνοντας το πεδίο μέχρι να μηδενιστεί (καμπύλη 5-6) προκύπτει και πάλι παραμένουσα μαγνητική επαγωγή στο υλικό με αντίθετη κατεύθυνση (σημείο 6). Τέλος εφαρμόζοντας ξανά θετικό πεδίο συμπληρώνετε κλειστή καμπύλη. Αυτή η κλειστή καμπύλη είναι ο βρόχος υστέρησης. Το εμβαδόν του βρόχου αυτού, αποτελεί

μέτρο των απωλειών ενέργειας που λαμβάνουν χώρα σε ένα πλήρη κύκλο μαγνήτης και από μαγνήτης του υλικού.

### 2.1.7 Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά

Τα υλικά που εμφανίζουν πλατύ εμβαδόν βρόχου υστέρησης χαρακτηρίζονται ως σκληρά μαγνητικά υλικά (Εικόνα 2.4.α). Αυτά τα υλικά είναι ιδανικά για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, καθώς διαθέτουν μεγαλύτερη παραμένουσα μαγνήτιση και απαιτούν ταυτόχρονα υψηλότερη ένταση του μαγνητικού πεδίου για την πλήρη απομαγνήτισή τους. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το νεοδύμιο και το κράμα σιδήρου-βορίου, τα οποία χρησιμοποιούνται ως μαγνήτες. Αντίθετα, στα μαλακά μαγνητικά υλικά, ο βρόχος υστέρησης είναι στενότερος σε σύγκριση με τα σκληρά μαγνητικά υλικά και έχουν υψηλότερη μαγνητική διαπερατότητα (Εικόνα 2.4.β). Αυτά τα υλικά διαθέτουν μικρότερη παραμένουσα μαγνήτιση και μπορούν να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν πολύ πιο εύκολα. Δεδομένου πως με μια μικρή αλλαγή του εφαρμοζόμενου πεδίου μπορεί να μεταβληθεί κατά πολύ το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο (B), τέτοια υλικά αποδεικνύονται ιδανικά σε χρήσεις ως πυρήνες μαγνητικών αισθητήρων.



Εικόνα 2.1.4 Καμπύλες μαγνητικής υστέρησης: (α) Μαλακό μαγνητικό υλικό, (β) Σκληρό μαγνητικό υλικό. [7]

## 2.2 Μη καταστροφικός έλεγχος

### 2.2.1 Γενικά

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) (non destructive testing, NDT), είναι έλεγχοι οι οποίοι εφαρμόζονται στα υλικά με απώτερο σκοπό τη διαπίστωση της δομικής ακεραιότητας και γενικότερα της κατάστασης του υλικού, χωρίς να προκληθούν φθορές σε αυτό. Ο μη καταστροφικός έλεγχος υλικών δηλαδή, αποσκοπεί στον εντοπισμό πιθανών ατελειών και άλλων ανωμαλιών που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί σε αυτό, καθώς και στην αξιολόγηση των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του [8].

Σε αντίθεση με τους καταστροφικούς ελέγχους, οι οποίοι διενεργούνται σε ένα μικρό τμήμα του υλικού, οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) μπορούν να διενεργηθούν σε όλη την έκταση του υπό εξέταση υλικού. Ως επί το πλείστον, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι φορητές, με μικρές διαστάσεις και δυνατότητα επιτόπιας εξέτασης των υλικών. Επομένως, είναι δυνατή η άμεση μελέτη των υλικών στο πεδίο, δίχως να απαιτείται η μεταφορά τους σε κάποιο εργαστηριακό περιβάλλον.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι οπτικές ή ακουστικές επιθεωρήσεις από τον άνθρωπο μπορούν να είναι αρκετές για την γρήγορη εξέταση ενός δείγματος και τον εντοπισμό σοβαρών εξωτερικών ατελειών σε αυτό. Παρόλα αυτά, σε αρκετές άλλες περιπτώσεις αυτός ο έλεγχος δεν επαρκεί, καθώς χρειάζεται περαιτέρω έλεγχος εσωτερικών ατελειών του υλικού, για την διερεύνηση των οποίων είναι αναγκαία η χρήση κάποιας συσκευής ελέγχου. Λόγω της παραπάνω ανάγκης, έχουν δημιουργηθεί διάφορες μη-καταστρεπτικοί μέθοδοι εξέτασης των ιδιοτήτων του υλικού, που δε μπορούν να παρατηρηθούν από τον άνθρωπο.

Εξαιτίας της ευρείας χρήσης του χάλυβα σε πολλαπλά πεδία, τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Τέτοιες εφαρμογές είναι: οι μεταφορές (π.χ. σιδηροδρομικές γραμμές, πλοία), η ενέργεια (π.χ. σωλήνες μεταφοράς καυσίμων, μετασχηματιστές) και η βιομηχανία (μεταλλικές κατασκευές, γραμμές παραγωγής). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητος ο συχνός

έλεγχος της κατάστασης του χάλυβα, με σκοπό την εύρεση ατελειών, την πρόληψη και αντιμετώπιση τυχόν αστοχιών, καθώς και την πρόβλεψη του χρόνου ζωής του υλικού [9].

### 2.2.2 Τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου μαγνητικών υλικών

Ο ΜΚΕ χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους, κάθε μια από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας και επίσης μπορεί να διακρίνεται σε περισσότερες από μια τεχνικές. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπ' όψιν μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ.

Τα πιο βασικά μεγέθη που επηρεάζουν σε κύριο βαθμό την υγεία και τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι: Μαγνητικό πεδίο  $H$ , η μαγνητική επαγωγή  $B$  και η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ .

Υπάρχει πληθώρα διατάξεων και αισθητήρων για τη μέτρηση όλων των παραπάνω. Το πιο συχνό αισθητήρια στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα πηνία, διότι είναι ευαίσθητα στις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου και στις ιδιότητες των υλικών, κάνοντάς τα ιδανικά για την ανίχνευση ατελειών ή τη μέτρηση ιδιοτήτων [10]. Στη συνέχεια θα εξεταστούν κάποιοι τρόποι ελέγχου υλικών [11].

- **Μέτρηση μαγνητικής επαγωγής**

Η μέθοδος μέτρησης μαγνητικής επαγωγής συνίσταται στην εφαρμογή διαφόρων αισθητήρων, όπως οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και Hall, οι οποίοι τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Αυτοί οι αισθητήρες πραγματοποιούν εντοπισμένες μετρήσεις που σχετίζονται με την κατάσταση του υλικού σε συγκεκριμένες περιοχές.

Καθώς τα υλικά εμφανίζουν ανισοτροπία, οι μετρήσεις πρέπει να πραγματοποιούνται σε ποικίλους προσανατολισμούς. Η χρήση αισθητήρων που δίνουν τη δυνατότητα για μετρήσεις σε περισσότερες από μία διαστάσεις

μπορεί να διευκολύνει αυτήν τη διαδικασία. Επιπλέον, η σωστή τοποθέτηση των αισθητήρων και η γνώση του προσανατολισμού τους σχετικά με το δοκίμιο είναι κρίσιμης σημασίας για τη μέτρηση. Ο παράγοντας αβεβαιότητας μπορεί να αυξηθεί λόγω των μικρών διαστάσεων πολλών από αυτούς τους αισθητήρες.

Η τάση εξόδου  $V_{out}$  από ένα πηνίο μέτρησης μαγνητικής επαγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, από την παρακάτω σχέση (2.13):

$$V_{out} = -A \cdot N \cdot \frac{dB}{dt} \quad (2.13)$$

όπου:  $B$ : η μαγνητική επαγωγή

$A$ : το εμβαδόν διατομής

$N$ : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου.

Από τον άνωθεν τύπο (2.13) βγαίνει το συμπέρασμα πως δεν είναι εφικτός ο κατευθείαν υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής  $B$ , αλλά μπορεί να βρίσκεται μέσω ολοκλήρωσης και έτσι προκύπτει η σχέση (2.14) :

$$B = - \int \frac{V_{out}}{A \cdot N} dt \quad (2.14)$$

- **Μέτρηση με δινορρεύματα**

Η μέθοδος του Μη Καταστροφικού Ελέγχου με δινορρεύματα είναι μια τεχνική που βασίζεται στη χρήση δινορρευμάτων για τον έλεγχο υλικών. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τον έλεγχο υλικών που δεν είναι μαγνητικά, αρκεί να είναι ηλεκτρικά αγώγιμα. Μέσω ενός πηνίου που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο που διαδίδεται στο υλικό. Η παρουσία αγώγιμου υλικού προκαλεί την ανάπτυξη δινορρευμάτων σε κλειστούς βρόχους.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών που βρίσκονται στην επιφάνεια ή σε μικρό βάθος ως προς το εξεταζόμενο υλικό, χωρίς την ανάγκη άμεσης επαφής με το δοκίμιο. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της μαγνητικής διαπερατότητας και του πάχους των υλικών. Η ανάλυση του μαγνητικού πεδίου που μετράται

μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού και τυχόν ατέλειες του.

- **Μέτρηση μηχανικών τάσεων**

Μία σημαντική προσέγγιση στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο υλικών αποτελεί η παρακολούθηση των μηχανικών τάσεων που επιβαρύνουν το υλικό. Οι μηχανικές τάσεις επηρεάζουν σημαντικά τη δομή του υλικού και μπορούν να οδηγήσουν σε θραύση, ενισχύοντας την ανάγκη για τον ακριβή έλεγχο και τη διαχείρισή τους. Η ανίχνευση παραμενουσών τάσεων συνήθως εφαρμόζεται μέσω μηχανικών μεθόδων ή τεχνικών τοπικής θέρμανσης, καθώς και μέσω εργαστηριακών μεθόδων, όπως η περίθλαση ακτίνων Χ (XRD) και η περίθλαση νετρονίων (ND).

Για την εντοπισμό των παραμενουσών τάσεων σε χάλυβες, εφαρμόζονται οι μέθοδοι αναφοράς X-Ray Diffraction (XRD) και Neutron Diffraction (ND). Αυτές οι προσεγγίσεις απαιτούν εργαστηριακή προετοιμασία του δοκιμίου και η διεξαγωγή των μετρήσεων είναι χρονοβόρα.

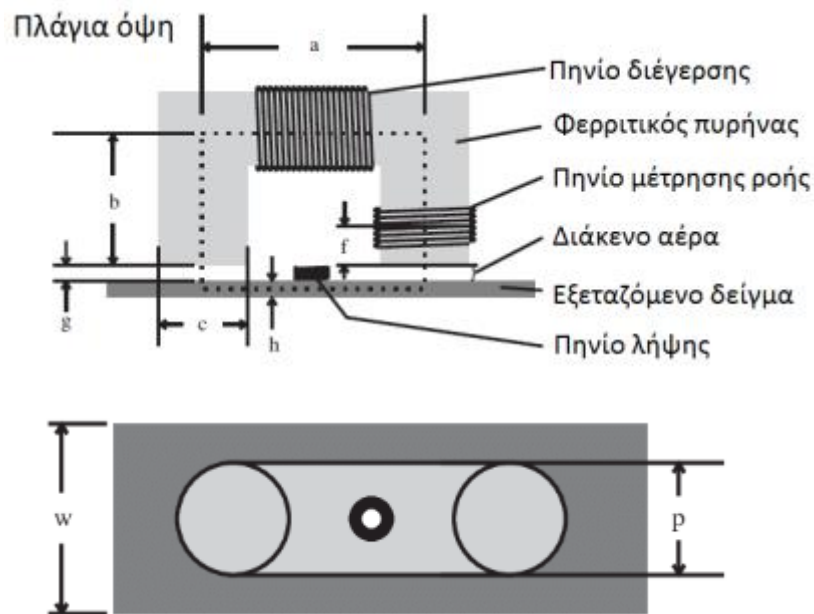
Για τον έλεγχο των μηχανικών τάσεων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, συνιστάται ο αισθητήρας πιεζοαντίστασης (strain gauge), ο οποίος παρακολουθεί την μηχανική συμπεριφορά μετρώντας την αντίσταση του αισθητήρα. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται σε δοκιμές που απαιτούν ακριβείς μετρήσεις, μελετώντας τον αριθμό και τη θέση των αισθητήρων για την εξασφάλιση σαφούς ανάγνωσης των τάσεων που ασκούνται στην υπό εξέταση δομή.

Άλλη σημαντική κατηγορία αισθητήρων είναι οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Bragg Grating - FBG), οι οποίοι λειτουργούν με μεταβολές στο μήκος της οπτικής ίνας λόγω του εφελκυσμού, προσφέροντας αξιόπιστη μέτρηση και σε πολύ διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

- **Μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας**

Η μέτρηση των μηχανικών τάσεων σε ένα υλικό μπορεί να συνδυαστεί με τη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας για να αντληθούν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του υλικού. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μια χρήσιμη ιδιότητα που μπορεί να παράσχει σημαντικές πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού.

Μια διάταξη μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας συνήθως περιλαμβάνει ένα πηνίο διέγερσης που τυλίγεται γύρω από έναν πυρήνα ηλεκτρικού χάλυβα σε σχήμα "Π" (yoke) και ένα πηνίο λήψης γύρω από αυτό. Η διάταξη αυτή του yoke τοποθετείται πάνω ή κοντά στο υπό εξέταση υλικό και έτσι σχηματίζεται μαγνητικό κύκλωμα μεταξύ του yoke και του υλικού αυτού. Τα παραγόμενα δινορρεύματα μπορούν να μειωθούν αν το yoke αποτελείται από πολλά φύλλα με μονωτικά στρώματα μεταξύ τους. Μια άλλη παραλλαγή αυτής της μεθόδου είναι η τύλιξη των πηνίων απευθείας γύρω από το εξεταζόμενο υλικό, αν και αυτό απαιτεί επέμβαση στο υλικό για την τοποθέτηση των πηνίων. Η μορφή του αναφερόμενου αισθητηρίου φαίνεται και στη συνέχεια (Εικόνα 2.5) :



Εικόνα 2.2.5 Διάταξη μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητα πλάγια όψη α), πάνω όψη β).

[12]

Η σχέση μεταξύ της μηχανικής τάσης και της μαγνητικής διαπερατότητας συνδέεται με το φαινόμενο Villari, το οποίο περιγράφει πως οι αλλαγές στις διαστάσεις ενός υλικού προκαλούν μεταβολές στη μαγνητική του διαπερατότητα  $\mu$ . Αυτή η σχέση περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο (2.15):

$$\mu = \frac{Js^2}{3 \mu_0 \lambda s \sigma} = \frac{Js^2}{3 \mu_0 \lambda s Y \varepsilon} \quad (2.15)$$



όπου:  $J_s$ : η μαγνητική πόλωση κορεσμού  
 $\lambda_s$ : ο συντελεστής μαγνητοσυστολής  
 $\sigma$ : το μέτρο της επιβαλλόμενης τάσης  
 $\mathcal{F}$ : το μέτρο ελαστικότητας  
 $\varepsilon$ : η ανηγμένη παραμόρφωση του υλικού.

Τελικώς, μελετώντας το σήμα που λαμβάνεται, είναι δυνατόν να αντληθούν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τη δομή του υλικού, μιας και οι ενδεχόμενες ατέλειές του προκαλούν αλλαγές στη μαγνητική ροή.

Αυτή η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει ατέλειες τόσο στην επιφάνεια του υλικού όσο και σε όσο βάθος επιτρέπει το επιφανειακό φαινόμενο. Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του δείγματος για την πραγματοποίηση της μέτρησης, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και με χαμηλό κόστος.

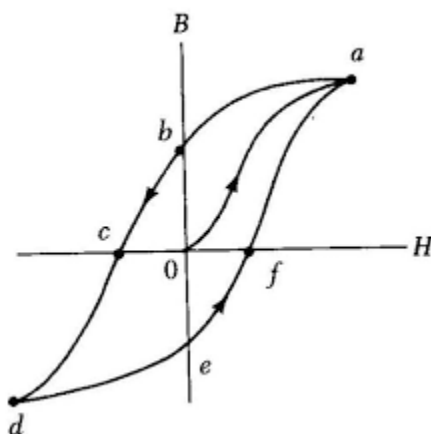
- **Μέτρηση βρόχου υστέρησης**

Η μέθοδος μέτρησης του βρόχου υστέρησης συνιστά έναν πολύ βασικό τρόπο για την ανάλυση των φερρομαγνητικών υλικών, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις μεταβολές που προκύπτουν σε αυτά. Η ενδεχόμενη ευαισθησία, ή μη, ενός υλικού στις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, το πεδίο που χρειάζεται για να φθάσει σε κορεσμό, η μαγνήτιση που εξακολουθεί να υφίσταται στο υλικό απουσία επιβολής πεδίου, το μαγνητικό πεδίο που είναι απαραίτητο για να απομαγνητιστεί το υλικό και η ενέργεια που καταναλώνεται για κάθε κύκλο του βρόχου είναι κάποια από τα βασικά στοιχεία που μπορούν να αναλυθούν μέσω αυτής της μεθόδου.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την καταγραφή του βρόχου υστέρησης περιλαμβάνει ένα yoke με πηνία διέγερσης και λήψης του σήματος. Η επιλογή της κατάλληλης συχνότητας διέγερσης είναι σημαντική για την πλήρη απεικόνιση του βρόχου και την αντιμετώπιση των δινορρευμάτων που προκαλούνται. Συνήθως χρησιμοποιούνται χαμηλές συχνότητες διέγερσης,

στο εύρος 100 mHz έως 10 Hz, ώστε να αντιμετωπιστούν και τα δινορρέυματα που προκύπτουν.

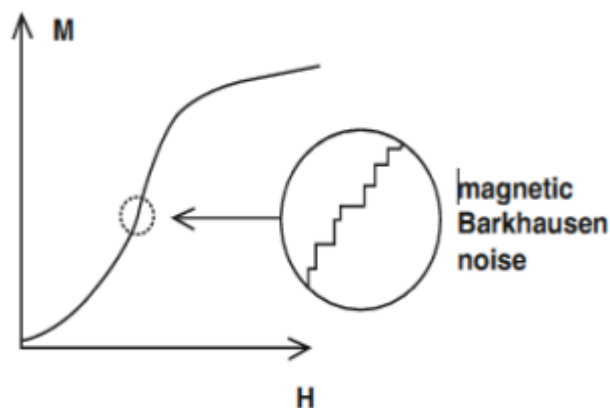
Για την απεικόνιση και την αποτύπωση του βρόχου υστέρησης, απαιτείται η ταυτόχρονη καταγραφή των τιμών του επιβαλλόμενου πεδίου  $H$  και της μαγνητικής επαγωγής  $B$ . Ολοκληρωτές χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των τιμών της μαγνητικής επαγωγής από τις μετρήσεις που προκύπτουν από το πηνίο λήψης.



Εικόνα 2.2.6 Βρόχος υστέρησης

- **Μέτρηση θορύβου Barkhausen**

Όταν μαγνητιστεί ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, μέσω ενός εναλλασσομένου μαγνητικού πεδίου, αντιλαμβανόμαστε μη αντιστρεπτές μεταβολές στην αρχική καμπύλη μαγνήτισης. Αυτές οι μεταβολές με τον μαγνητικό θόρυβο Barkhausen (Magnetic Barkhausen Noise – MBN) και αντιπροσωπεύουν το σιδηρομαγνητικό υλικό. Η μορφή του θορύβου αυτού φαίνεται και στην εικόνα 2.7:



Εικόνα 2.2.7 Θόρυβος Barkhausen [13]

Η μέθοδος μέτρησης θορύβου Barkhausen αναγνωρίζεται ως μια αποτελεσματική μέθοδος για την αξιολόγηση των φερρομαγνητικών υλικών. Ο θόρυβος Barkhausen που παράγεται κατά τη διαδικασία ενός μαγνήτισης αντιστοιχεί στην απότομη και ασυνεχή μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων μέσα στο φερρομαγνητικό υλικό. Αυτή η μετακίνηση εμφανίζει θόρυβο που καταγράφεται από τον αισθητήρα Barkhausen. Τα σήματα που καταγράφονται από αυτόν τον αισθητήρα παρέχουν πληροφορίες για τις ατέλειες και τις παραμορφώσεις που επηρεάζουν το υλικό.

Ο θόρυβος Barkhausen ανιχνεύει μεταβολές στη μαγνητική ροή και αντανακλά τις δομικές ατέλειες του υλικού. Μέσω μιας κατάλληλα βαθμονομημένης συσκευής Barkhausen, είναι δυνατή η ανάλυση του σήματος και η εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση του υλικού.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, όπως η μη καταστροφική φύση της και η ευκολία στην εκτέλεση, η μέθοδος θορύβου Barkhausen παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, απαιτεί πολύ καλή επαφή ανάμεσα στον αισθητήρα και το υλικό, λόγω της ανάγκης για ακρίβεια καταγραφής του σήματος. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής συχνότητας διέγερσης, οι ρυθμοί λήψης των μετρήσεων είναι επίσης χαμηλοί. Τέλος, η πιθανή παρουσία παρεμβολών στο σήμα που δεχόμαστε αποτελεί μια πρόκληση σε αυτό τον τύπο μέτρησης.

### 2.2.3 Σχεδίαση Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων για Ανάλυση Υλικών

Η σχεδίαση και ανάπτυξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αποτελεί βασικό στάδιο στη διαδικασία μετρήσεων μέσω αισθητήρων. Αυτά τα κυκλώματα διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην παροχή ενέργειας στους αισθητήρες, στην αποκόμιση της εξόδου τους, και στην επεξεργασία του σήματος προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα του υλικού προς εξέταση.

Στις εργαστηριακές διατάξεις, τις περισσότερες φορές δίνεται βάση στη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια των μετρήσεων και όχι τόσο πολύ στη φορητότητα. Σε αυτή την περίπτωση, γίνεται χρήση εργαστηριακών οργάνων, με σκοπό την παραγωγή του σήματος που χρειάζεται η διέγερση και για τη λήψη της πληροφορίας.

Στο κομμάτι των φορητών διατάξεων μη καταστροφικού ελέγχου, έχουμε συσκευές με ικανοποιητική ακρίβεια και πολύ μικρότερες διαστάσεις. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα, είναι και το χαμηλό κόστος κατασκευής τέτοιων διατάξεων.

Η επεξεργασία των σημάτων αποτελεί βασικό στάδιο στην ανάλυση των πληροφοριών που ανακτώνται από τους αισθητήρες. Σε πολλές περιπτώσεις, η ενίσχυση των σημάτων είναι απαραίτητη, όπως και η περαιτέρω επεξεργασία τους για τη μετέπειτα ανάλυση. Η εφαρμογή διαφόρων τύπων ενισχυτών και η χρήση ηλεκτρονικών φίλτρων βελτιστοποιεί τα σήματα, εξαλείφοντας το θόρυβο και επιτρέποντας την ακριβέστερη ανάλυση τους.

Συνοψίζοντας, η σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για ανάλυση υλικών είναι ένα στρατηγικό βήμα που επιτρέπει την εξαγωγή αξιόπιστων και ακριβών μετρήσεων στο πλαίσιο του μη καταστροφικού ελέγχου.

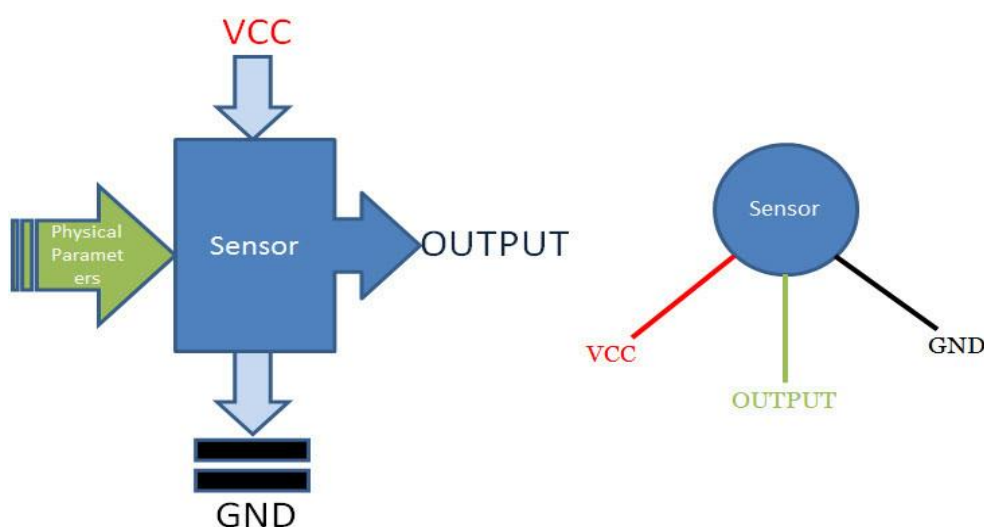
## 2.3 Αισθητήρες

### 2.3.1 Βασικές πληροφορίες

Οι αισθητήρες είναι συσκευές που μετατρέπουν φυσικά φαινόμενα, όπως φως, ήχο, θερμοκρασία, πίεση, ή άλλες μετρήσιμες ποσότητες, σε ηλεκτρικά σήματα που

μπορούν να επεξεργαστούν από ηλεκτρονικές συσκευές. Κατά τη λειτουργία τους, οι αισθητήρες ανιχνεύουν αλλαγές στο περιβάλλον και μετατρέπουν αυτές τις αλλαγές σε μορφή που μπορεί να κατανοηθεί ή να επεξεργαστεί από άλλες συσκευές. Για παράδειγμα, το υδραργυρικό θερμόμετρο μετατρέπει τη μετρούμενη θερμοκρασία σε διαστολή του υδραργύρου, η οποία μπορεί να αναγνωστεί μέσω ενός βαθμονομημένου σωλήνα [14].

Στην εικόνα (2.3.8) φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα:



Εικόνα 2.3.8 Βασικά στοιχεία ενός αισθητήρα [15]

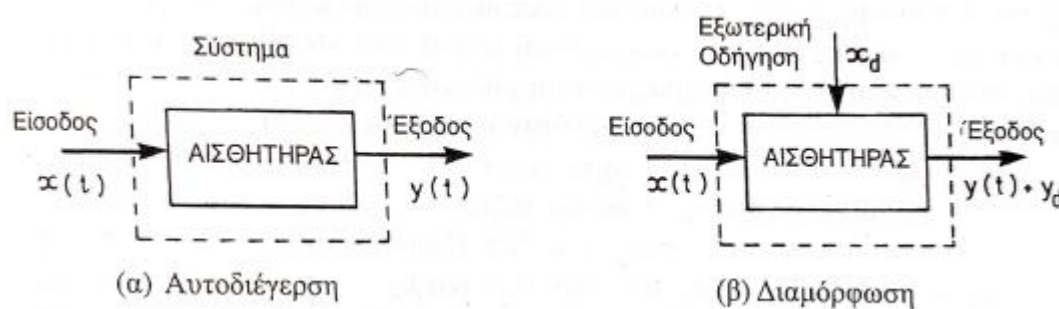
Κατά τη λειτουργία του αισθητήρα, η αντίδρασή του στο ερέθισμα ορίζεται ως απόκριση (response). Αυτό το ερέθισμα αποτελεί μία φυσική ποσότητα που ενεργοποιεί τον αισθητήρα. Κατά τη διαδικασία λειτουργίας, συμβαίνει η μεταφορά ενέργειας από το αντικείμενο μέτρησης ενός τη συσκευή, μετατρέποντας την αρχική ενέργεια σε διαφορετική μορφή. Η μεταφορά της ενέργειας είναι συνδεδεμένη με τη μεταφορά της πληροφορίας κατά την εκτέλεση της μέτρησης μέσω του αισθητήρα. Αντίστοιχα, η μετατροπή ενέργειας περιλαμβάνει τη μετατροπή του ερεθίσματος - όπως πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία και χημική σύσταση - σε μορφή ηλεκτρικού σήματος. Τα συστήματα που είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε μια διαφορετική ονομάζονται μετατροπείς ενέργειας (transducers).

Ένας αισθητήρας στην πιο απλοποιημένη του μορφή μπορεί να θεωρηθεί ως σύστημα με είσοδο  $x(t)$  και έξοδο  $y(t)$ . Στην παρακάτω εικόνα (2.3.9) παρουσιάζεται

το σχεδιάγραμμα ενός συστήματος με (α) έναν αυτοδιεγερόμενο αισθητήρα και (β) έναν διαμορφωμένο αισθητήρα. Σ' έναν αυτοδιεγερόμενο αισθητήρα η έξοδος προέρχεται αποκλειστικά από το σήμα εισόδου. Η γενική εξίσωση που περιγράφει ένα αυτοδιεγερόμενο σύστημα αισθητήρα είναι η:

$$y = F(x(t)) \quad (2.16)$$

όπου:  $F(x(t))$ : χαρακτηριστική σχέση που περιγράφει τη συμπεριφορά ενός αυτοδιεγερόμενου αισθητήρα [16].



Εικόνα 2.3.9 Βασική παρουσίαση αυτοδιεγερόμενων (α) και διαμορφωμένων συστημάτων αισθητήρων (β) [16]

### 2.3.2 Ταξινόμηση αισθητήρων

Για την ταξινόμηση των αισθητήρων, θα πρέπει ήδη να έχει αποφασιστεί αν θα ταξινομηθούν ως προς τη λειτουργία που επιτελούν (π.χ. αισθητήρες μέτρησης πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας κλπ.) ή τη φυσική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους (π.χ. μαγνητικά ή οπτικά φαινόμενα). Στις μέρες μας, το πιο σύνηθες είναι οι αισθητήρες να ταξινομούνται με βάση την κύρια μορφή ενέργειας που μεταφέρει το σήμα τους [17].

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας ταξινόμησης αισθητήρων (Πίνακας 1) με βάση τη μορφή σήματος:

Μορφή Σήματος	Μετρήσιμες ποσότητες
---------------	----------------------

Θερμική	Θερμοκρασία, θερμότητα, εντροπία κλπ.
Ακτινοβολία	Ακτίνες X & γ, υπεριώδεις, μικροκύματα κλπ.
Μηχανική	Μετατόπιση, ταχύτητα, δύναμη, πίεση κλπ.
Μαγνητική	Μαγνητικό πεδίο, μαγνητική ροή, μαγνήτιση κλπ.
Χημική	Υγρασία, pH, συγκέντρωση αερίων και ατμών κλπ.
Βιολογική	Σάκχαρα, πρωτεΐνες, αντιγόνα κλπ.
Ηλεκτρική	Φορτίο, ένταση, τάση, αγωγιμότητα, πόλωση κλπ.

Πίνακας 1: Ταξινόμηση αισθητήρων

### 2.3.3 Μαγνητικοί αισθητήρες

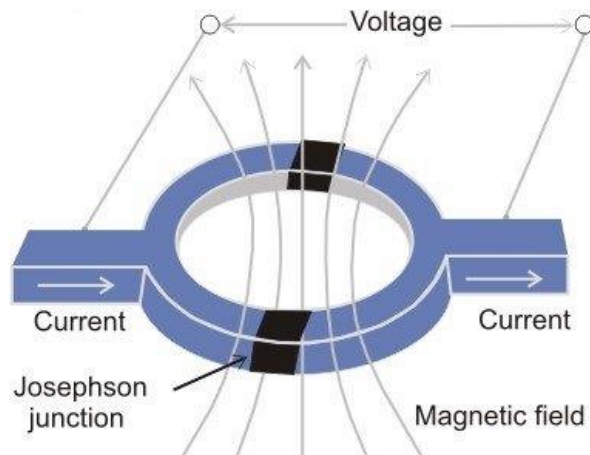
Οι μαγνητικοί αισθητήρες, είναι συσκευές οι οποίες εκμεταλλεύονται μαγνητικά φαινόμενα για την ανίχνευση διαφόρων μεγεθών. Αυτοί οι αισθητήρες συνήθως χρησιμοποιούν φερρομαγνητικά υλικά τα οποία αλλάζουν τις ιδιότητές τους υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου [18].

Τα κυριότερα μαγνητικά φαινόμενα στα οποία βασίζεται οι λειτουργία των μαγνητικών αισθητήρων είναι το φαινόμενο Hall, η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, η μαγνητοσυστολή, η μαγνητοεμπέδηση (magnetoimpedance – MI) και η μαγνητοαντίσταση (magnetoiresistance – MR).

Οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι προτιμώμενοι σε πολλές εφαρμογές συστημάτων ελέγχου για τη μέτρηση διάφορων δευτερευόντων μεγεθών όπως η στάθμη, η ροή, η πίεση και άλλα, λόγω της εύκολης εγκατάστασης, της αξιόπιστης λειτουργίας και της αποτελεσματικότητάς τους. Κάποιοι χαρακτηριστικοί τύποι μαγνητικών αισθητήρων είναι οι εξής:

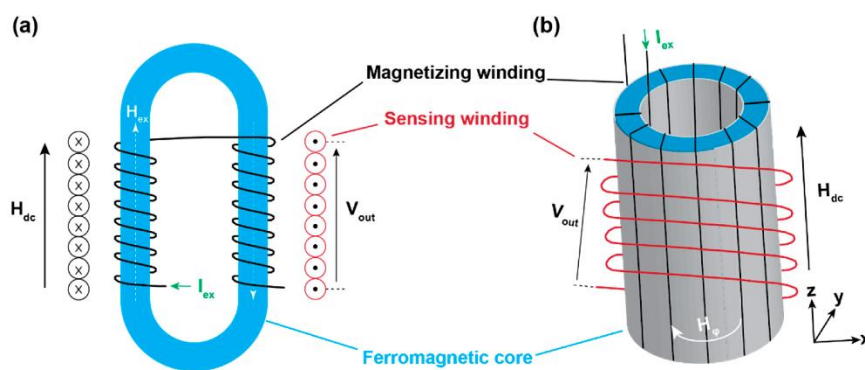
- Αισθητήρες SQUID: Η λειτουργία τους στηρίζεται στο κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson, κατά το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα

υπέρλεπτο μη υπεραγώγιμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγώγιμων υλικών. Παρουσιάζεται στην εικόνα (2.3.10).



Εικόνα 2.3.10 Αισθητήρας SQUID [19]

- Αισθητήρες Fluxgate: 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  $10^6$  nT. Δύο από τις τοπολογίες των μαγνητομέτρων fluxgate, παρουσιάζονται στην εικόνα (2.3.11).



Εικόνα 2.3.11 Τοπολογίες αισθητήρα Fluxgate [20]

- Αισθητήρες MDL: Βασίζονται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Lines – MDL). Σύμφωνα με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, η επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητικό υλικό οδηγεί στη μεταβολή του μήκους του [21]. Μια τυπική μορφή παρουσιάζεται στην εικόνα (2.3.12).



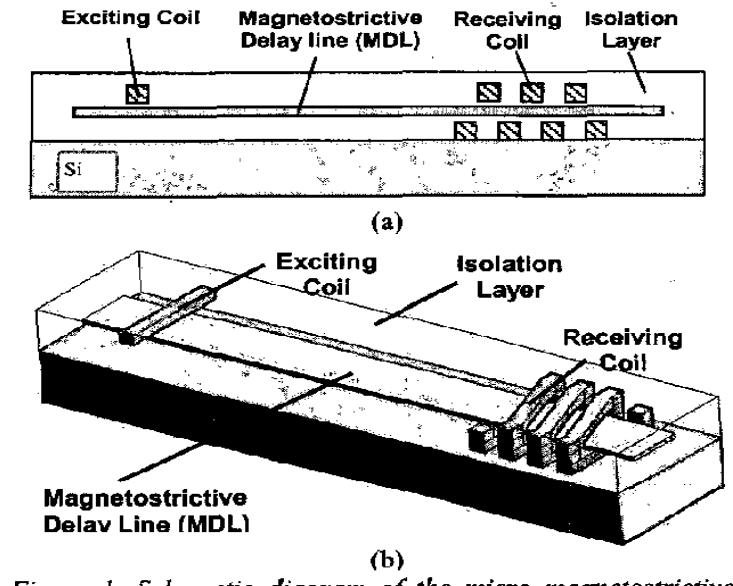
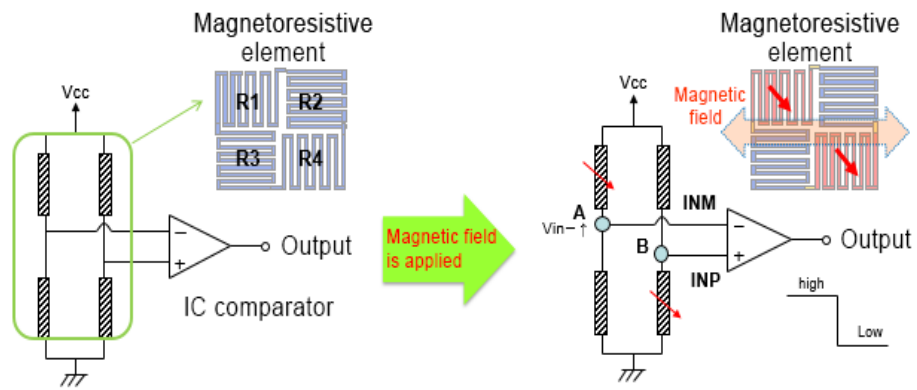


Figure 1. Schematic diagram of the micro-magnetostrictive

Εικόνα 2.3.12 Μορφή αισθητήρα MDL [22]

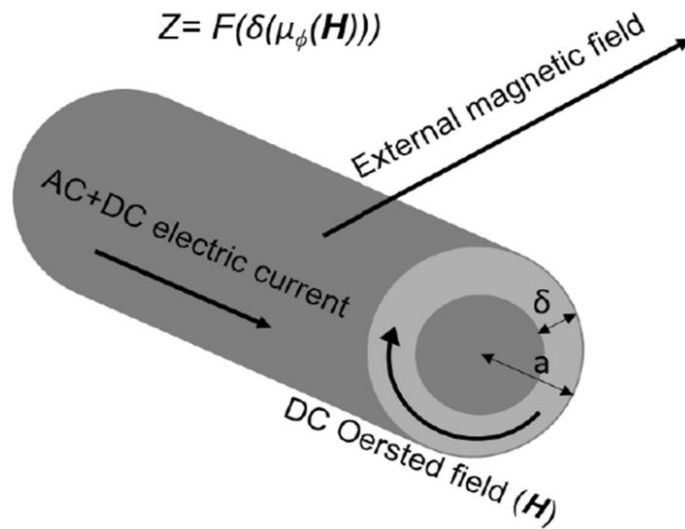
- Αισθητήρες AMR και GMR: Βασίζονται στην αλλαγή της αντίστασης που παρατηρείται όταν επιβάλλεται μαγνητικό πεδίο σε διάφορα υλικά. Αν και συνήθως αυτή η αλλαγή είναι εμφανής σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν ορισμένα υλικά, όπως τα φερρομαγνητικά, στα οποία παρατηρείται αυτή η αλλαγή σε θερμοκρασίες δωματίου. Η συνδεσμολογία τους σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα παρουσιάζεται στην εικόνα (2.3.13).



Εικόνα 2.3.13 Μορφή αισθητήρα AMR [23]

Αισθητήρες GMI: Βασίζονται στο γεγονός ότι όταν ένα μαλακός σιδηρομαγνητικός αγωγός υποβάλλεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), παρατηρείται μια μεγάλη μεταβολή στην AC εμπέδηση του αγωγού, και

μπορεί να επιτυγχάνεται κατόπιν εφαρμογής ένας μαγνητικού πεδίου. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση (GMI).



Εικόνα 2.3.14 Μορφή αισθητήρας GMI [24]

- Αισθητήρες Hall: Οι αισθητήρες Hall είναι δημοφιλής κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, λόγω της ευκολίας χρήσης, του μικρού μεγέθους και του χαμηλού κόστους τους. Στη συνέχεια θα γίνει εκτενής ανάλυση για τον συγκεκριμένο αισθητήρα. Η μορφή τέτοιων αισθητήρων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (2.3.15).



Εικόνα 2.3.15 Αισθητήρας Hall

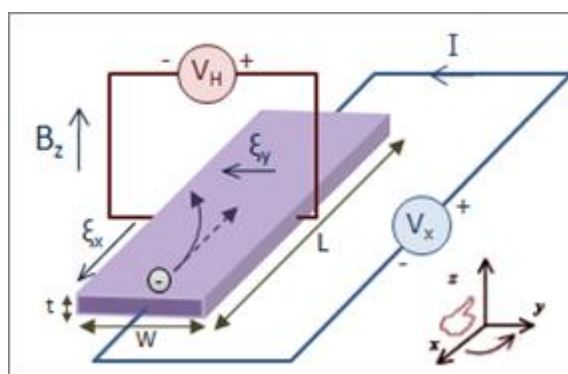
### 2.3.4 Αισθητήρες φαινομένου Hall

Το φαινόμενο Hall βασίζεται στην αλληλεπίδραση ηλεκτρικών φορτίων με ένα μαγνητικό πεδίο και τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά. Αυτό το φαινόμενο, έχει

εφαρμογές στη δημιουργία βιομηχανικών συσκευών που βασίζονται ή χρησιμοποιούνται για μέτρηση μαγνητικών πεδίων.

Το αισθητήριο ενός αισθητήρα Hall κατασκευάζεται από λεπτό αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό το οποίο διαρρέεται από ρεύμα. Όταν τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο ανταποκρίνεται σε αυτό και δημιουργεί μία τάση εξόδου που είναι κάθετη στα προηγούμενα μεγέθη. Αυτή η τάση, είναι αρκετά μικρή (της τάξεως των  $\mu\text{V}$ ) και χρειάζονται κατάλληλα ηλεκτρονικά, με σκοπό να γίνει ωφέλιμη.

Το φαινόμενο Hall προκαλείται από το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό. Αυτό το ρεύμα αντιστοιχεί στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων που υφίστανται μια δύναμη Lorentz, όταν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, το οποίο δεν είναι παράλληλο με την κατεύθυνση της κίνησής τους [25].



Εικόνα 2.3.16 Φαινόμενο Hall [26]

Στην εικόνα (2.3.16) φαίνεται η τάση εξόδου, που λέγεται τάση Hall ( $V_H$ ), η οποία παράγεται από το αισθητήριο Hall και εξαρτάται ευθέως από την ένταση του μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από το ημιαγώγιμο υλικό. Αν και η τάση αυτή μπορεί να είναι σχετικά μικρή ακόμη και υπό ισχυρά μαγνητικά πεδία, οι περισσότεροι αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Hall κατασκευάζονται με ενσωματωμένους ενισχυτές DC. Αυτό επιτρέπει στον αισθητήρα Hall να λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα τάσης τροφοδοσίας και σε διάφορες συνθήκες μαγνητικού πεδίου, ενισχύοντας την ευαισθησία του, την απόκρισή του και τη συνολική απόδοσή του.

Μόλις η δύναμη Lorentz  $F_L$  επιδρά σε ένα σωματίδιο με φορτίο  $q$  που κινείται με ταχύτητα  $v$ , υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου  $E$  και ενός μαγνητικού πεδίου  $B$ , τότε προκύπτει η παρακάτω εξίσωση (2.17):

$$F_L = q(E + v \times B) \quad (2.17)$$

Στην περίπτωση απουσίας μαγνητικού πεδίου, η ταχύτητα  $v_p$  και η πυκνότητα ρεύματος  $J$  των σωματιδίων δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (2.18) και (2.19):

$$v_p = m_p E \quad (2.18)$$

$$J = qm_p D_p E \quad (2.19)$$

όπου:  $m_p$ : η κινητικότητα των σωματιδίων

$D_p$ : η πυκνότητά τους.

Τη στιγμή που θα υπάρξει μαγνητικό πεδίο, τα σωματίδια σκεδάζονται κάθετα ως προς αυτό, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο  $E_H$  που επιδρά σε αυτά δίνεται από την (2.20):

$$E_H = -(v \times B) = -m_p (E \times B) \quad (2.20)$$

Στη συνέχεια η γωνία σκέδασης, γνωστή ως  $\tan\theta_H$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E|} \quad (2.21)$$

Άρα, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι το ηλεκτρικό πεδίο Hall  $E_H$  μπορεί να εκφραστεί ως:

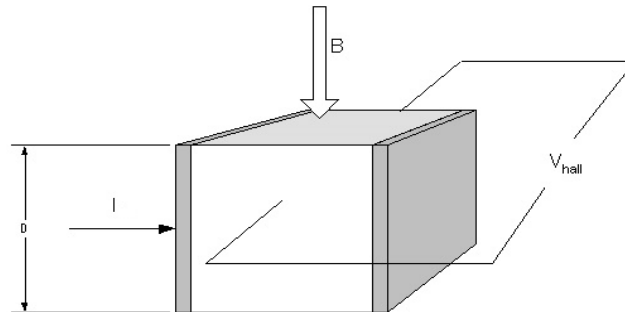
$$E_H = \frac{-1}{qD_p} (J \times B) = -R_H (J \times B) \quad (2.22)$$

Όπου:  $R_H$  : ο συντελεστής Hall.

Εν τέλει, η τάση Hall  $V_H$  σε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλάτους  $w$ , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (2.23):

$$V_H = m_p w E_x B_y = R_{HW} J B \quad (2.23)$$

Θεωρείται πως το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο έχει πάχος  $d$ . Σε αυτή την περίπτωση, η πυκνότητα ρεύματος  $J$  θα δίδεται από την εξίσωση (2.3.17) :



- B = magnetic field
- I = bias current
- D = thickness of Hall sensor
- $R_h$  = material constant (Hall Constant)

Εικόνα 2.3.17 Φαινόμενο Hall [27]

$$J = \frac{I}{wd} \quad (2.24)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας στον τύπο (2.23) την (2.24), προκύπτει η (2.25):

$$V_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (2.25)$$

Η ευαισθησία της αισθητήρα Hall εξαρτάται κυρίως από την επιλογή υλικών με υψηλή κινητικότητα φορέων. Συνυπολογίζοντας τις απώλειες ισχύος  $PR$ , που προκαλούνται από την αντίσταση του υλικού, η τάση εξόδου ενός αισθητήρα Hall  $V_H$  υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο (2.26):

$$V_H = \sqrt{\frac{m_p PR}{Dp d}} B \quad (2.26)$$

Τα πιο διαδεδομένα υλικά που υπάρχουν στους αισθητήρες Hall είναι τα: Si, GaAs, InAs, και InSb. Λόγω της μεγάλης διάδοσης του πυριτίου στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, βγαίνει το συμπέρασμα ότι το πυρίτιο είναι το συνηθέστερο υλικό για χρήση εν τέλει και στους αισθητήρες Hall. Ανάλογα του

τρόπου κατασκευής του αισθητήρα, είναι δυνατή η μέτρηση σε περισσότερες της μίας διαστάσεις.

Ο αισθητήρας Hall αποτελεί ένα κρίσιμο κομμάτι σε διατάξεις μη καταστροφικού ελέγχου, που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ανωμαλιών σε επιφάνειες φερρομαγνητικών υλικών. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανίχνευση των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από ανωμαλίες στις επιφάνειες αυτών των υλικών. Ο αισθητήρας Hall τοποθετείται κοντά στην επιφάνεια και ανιχνεύει τις μικρές αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο, προσφέροντας έτσι μια αξιόπιστη μέθοδο ανίχνευσης ανωμαλιών [28].

### 2.3.5 Αισθητήρες μέτρησης απόστασης

Οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης αποτελούν κρίσιμο εργαλείο στην παρούσα εργασία. Η ικανότητά τους να μετρούν αποστάσεις ανάμεσα σε αντικείμενα επιτρέπει την αντίληψη του περιβάλλοντος από τις διατάξεις και τις συσκευές που τους χρησιμοποιούν. Οι διάφοροι τύποι αισθητήρων μέτρησης απόστασης μας επιτρέπουν μια μεγάλη ευελιξία στον τρόπο χρήση τους καθώς και παρέχουν πιο εξειδικευμένες λύσεις για τις ανάγκες της σύγχρονης τεχνολογίας.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων μέτρησης απόστασης. Ένας δημοφιλής τύπος είναι οι αισθητήρες TOF (Time-of-Flight), οι οποίοι χρησιμοποιούν την αρχή του χρόνου πτήσης του φωτός για τη μέτρηση της απόστασης. Άλλη δημοφιλής κατηγορία, είναι οι αισθητήρες υπερήχων, οι οποίοι εκπέμπουν υπερήχους και μετρούν το χρόνο που απαιτείται για να αντανακλαστεί ο ήχος από ένα αντικείμενο, υπολογίζοντας έτσι την απόσταση. Άλλοι τύποι περιλαμβάνουν τους αισθητήρες επαγωγικής απόστασης και τους υπέρυθρους αισθητήρες, μεταξύ άλλων.

Οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης επιτρέπουν σε συστήματα να αντιληφθούν το περιβάλλον και να λαμβάνουν αποφάσεις με βάση την απόσταση από τα υπόλοιπα αντικείμενα. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια και η αξιοπιστία της μέτρησης απόστασης είναι κρίσιμες, όπως στην αυτόνομη οδήγηση,

την αποφυγή εμποδίων, την ρομποτική πλοήγηση και ο μη καταστροφικός έλεγχος.

## 2.4 Μικροελεγκτές

### 2.4.1 Ορισμός

Ο μικροελεγκτής είναι ένας τύπος επεξεργαστή, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα, λόγω των πολλών ενσωματωμένων υποσυστημάτων που διαθέτει. Η διάδοση των μικροελεγκτών στην αγορά είναι ευρεία λόγω του χαμηλού κόστους προμήθειάς τους καθώς και άλλων πλεονεκτημάτων που διαθέτουν. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των μικροελεγκτών σε σύγκριση με άλλους επεξεργαστές. Λόγω του μικρότερου αριθμού και μήκους εξωτερικών διασυνδέσεων, οι μικροελεγκτές εμφανίζουν χαμηλότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και υψηλή αντοχή σε παρεμβολές από εξωτερικές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, γεγονός που τους καθιστά προτιμητέους για τους χρήστες. Η χρήση πολύπλοκων ενσωματωμένων υποσυστημάτων, χαρίζει στους μικροελεγκτές μεγάλη αυτονομία, καθιστώντας τους ακόμα πιο ανταγωνιστικούς και επιτρέποντάς τους να λειτουργούν με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα [29].

Οι δύο πιο διαδεδομένοι μικροελεγκτές στον χώρο της ψηφιακής κατασκευής είναι το ESP32 και το Arduino. Και τα δύο συστήματα είναι εξαιρετικά δημοφιλή λόγω της ευρείας κοινότητας χρηστών και της πληθώρας πόρων και βιβλιοθηκών που παρέχουν.



Εικόνα 2.4.18 Μικροελεγκτές α) Arduino και β) ESP32

## 2.4.2 Τα στοιχεία του μικροελεγκτή

Τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας μικροελεγκτής, είναι τα εξής:

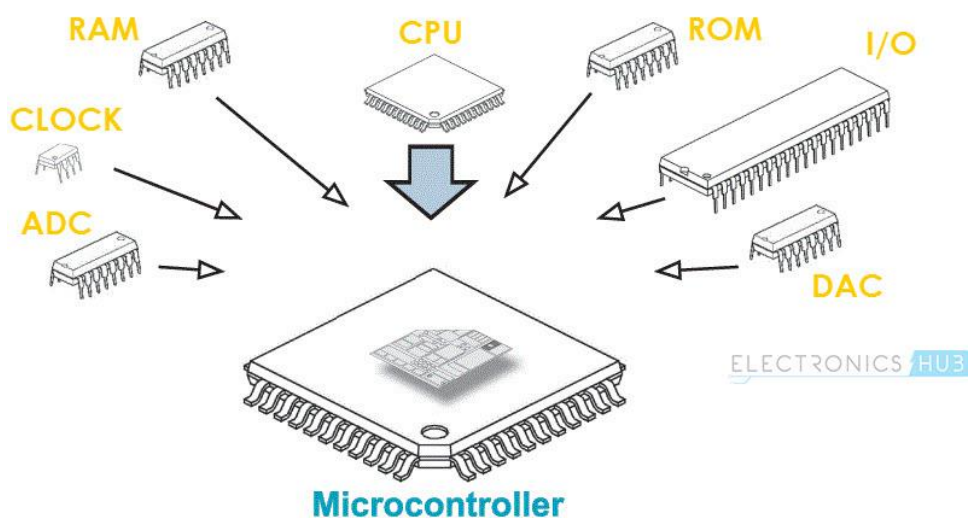
- Επεξεργαστής (CPU): Στην δομή μιας συσκευής, ο πρωταρχικός ρόλος ανήκει στον επεξεργαστή, ο οποίος θεωρείται ο "εγκέφαλος" της συσκευής. Αναλαμβάνει την επεξεργασία όλων των εντολών που καθοδηγούν τη λειτουργία του μικροελεγκτή, εκτελώντας παράλληλα αριθμητικές και λογικές λειτουργίες. Επιπλέον, διευθύνει τη μεταφορά δεδομένων σε άλλα στοιχεία του συστήματος.
- Μνήμη (Memory): Τα δεδομένα που δέχεται ο επεξεργαστής και χρησιμοποιεί για την εκτέλεση των προγραμματισμένων διεργασιών αποθηκεύονται στη μνήμη του μικροεπεξεργαστή. Η μνήμη αυτή περιλαμβάνει δύο τύπους:
  - Μνήμη Flash: Αυτή η μνήμη διατηρεί πληροφορίες μακροπρόθεσμα χωρίς την ανάγκη για συνεχή ενέργεια. Όλες οι αποθηκευμένες πληροφορίες σε αυτήν τη μνήμη διατηρούνται με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να απαιτείται πηγή ενέργειας.
  - Μνήμη RAM: Αυτή η μνήμη αποθηκεύει τα δεδομένα προσωρινά, δηλαδή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των εντολών. Για να διατηρηθούν τα δεδομένα σε αυτήν τη μνήμη, απαιτείται η σύνδεση της συσκευής σε πηγή ενέργειας.



- Διασυνδέσεις Εισόδου/Εξόδου (I/O): αποτελεί το τμήμα του υπολογιστικού συστήματος με το οποίο το σύστημα είναι σε θέση να ανταλλάξει δεδομένα με το περιβάλλον του, είτε με άλλους υπολογιστές είτε με τον άνθρωπο-χρήστη.

Για την δημιουργία όμως ενός πλήρους υπολογιστικού συστήματος και για την απρόσκοπτη λειτουργία του, απαιτείται η χρήση ενός εκτενούς αριθμού εξωτερικών υποσυστημάτων και περιφερειακών συσκευών. Κάποια από αυτά αναφέρονται ακολούθως και φαίνονται στην εικόνα (2.4.19):

- Μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (CPU)
- Μνήμες (π.χ. ROM, FLASH, EPROM)
- Μνήμη RAM.
- Τύποι μνήμης που μπορούν να διατηρούν τα δεδομένα (EEPROM, NVRAM)
- Κουμπί επανεκκίνησης (Reset)
- Interrupt Request Controller (IRC)
- Διάφορα κυκλώματα (watchdog circuit)
- Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)
- Μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC)
- Σειριακή θύρα
- Ρολόι (Real Time Clock, RTC).



Εικόνα 2.4.19 Βασικά στοιχεία μικροελεγκτή [30]

### 2.4.3 Μικροελεγκτής Esp32

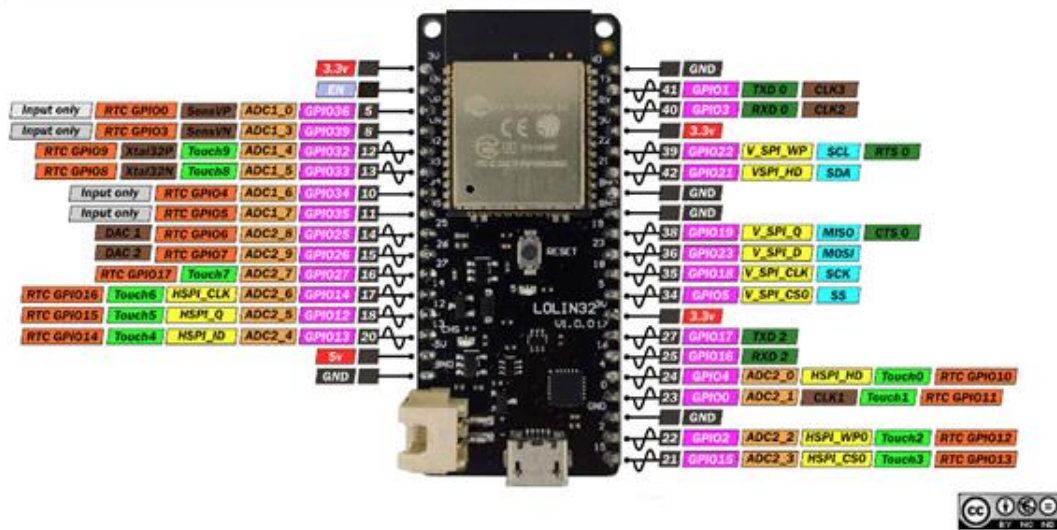
Στη συνέχεια, θα γίνει αναλυτικότερη προσέγγιση του ESP32, δεδομένου ότι τις ο μικροελεγκτής χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Ο ESP32 διαθέτει έναν επεξεργαστή διπλού πυρήνα 32-bit, ενσωματωμένο Wi-Fi και Bluetooth, επιτρέποντας εύκολη σύνδεση στο Διαδίκτυο και με άλλες συσκευές. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι η συμβατότητά του με πολλούς περιφερειακούς και αισθητήρες, παρέχοντας ενιαία ενσωμάτωση σε υψηλό επίπεδο. Με τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, είναι ιδανικός για μη καταστροφικούς ελέγχους. Γενικά, αποτελεί έναν ισχυρό και ευέλικτο μικροελεγκτή, καλύπτοντας ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Ο ESP32 διαθέτει ακόμα 48 υποδοχές (Pins), κάποιες από τις οποίες εκτελούν διάφορες λειτουργίες. Σε κάθε πλακέτα, υπάρχουν υποδοχείς (Pins) όπως το 3V3, GND, VIN, που τροφοδοτούν την πλακέτα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για άλλα περιφερειακά. Κάθε pin GPIO (Γενικής Χρήσης) έχει έναν αντιστοιχημένο αριθμό που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά.

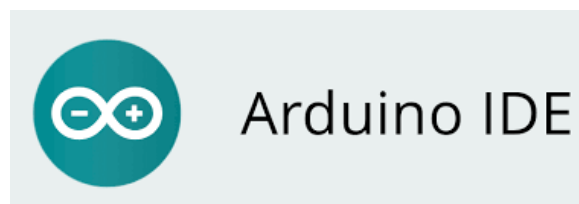
Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του ESP32 στην αγορά, καθένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο LOLIN32. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της ευρείας υποστήριξης και των αξιόπιστων επιδόσεων που προσφέρει, καθιστώντας τον ιδανικό για τους σκοπούς της εργασίας μας. Στη συνέχεια φαίνεται μια εικόνα με τις πληροφορίες για κάθε pin του μικροελεγκτή LOLIN32.

## ESP32 WeMos LOLIN32 PINOUT



Εικόνα 2.4.20 Τα pins του LOLIN32 [31]

Ο ESP32 μπορεί να υποστηρίξει όλα τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το UART, το I2C, το SPI. Επιπλέον, ο ESP32 υποστηρίζει προγραμματισμό σε διάφορες γλώσσες όπως οι C, C++ και Python. Στο πλαίσιο της εργασίας, ο προγραμματισμός του ESP32 έγινε χρησιμοποιώντας το περιβάλλον προγραμματισμού Arduino IDE. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την προγραμματιστική διαδικασία ήταν η C++. Αυτή η επιλογή έγινε λόγω της ευκολίας χρήσης του Arduino IDE και της ευρείας υποστήριξης που παρέχει για τον ESP32, επιτρέποντας τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++ για την υλοποίηση των αλγορίθμων και των λειτουργιών της συγκεκριμένης εφαρμογής στον ESP32.



Εικόνα 2.4.21 Το περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού IDE

### 2.4.4 Επικοινωνία με το μικροελεγκτή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα εξεταστούν οι τρόποι σειριακής επικοινωνίας του μικροεπεξεργαστή με τις περιφερειακές του συσκευές. Για την διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχουν επικρατήσει κυρίως τρία

πρωτόκολλα: το I2C, το SPI και το CAN. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκαν τα δύο πρώτα, όπου και θα αναλυθούν περαιτέρω στη συνέχεια.

#### 2.4.4.1 Πρωτόκολλο I2C

Το I2C πρωτόκολλο πρωτο-χρησιμοποιήθηκε από την εταιρεία Philips, ενώ στις μέρες μας πλέον έχει μετατραπεί σε ένα πλατιά διαδεδομένο πρωτόκολλο, υιοθετημένο από τις περισσότερες εταιρείες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το πρωτόκολλο I2C είναι ιδανικό για περιπτώσεις που χρειάζεται μία αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε μικρές αποστάσεις.

Το I2C υλοποιείται με την χρήση δύο καλωδίων διπλής κατεύθυνσης. Τα δύο καλώδια αυτά είναι το SDA, Serial Data, που χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων και το SCL, Serial Clock, για το ρολόι [32]. Συνήθεις τάσεις που χρησιμοποιούνται στο δίαυλο είναι τα +5V ή +3,3V.

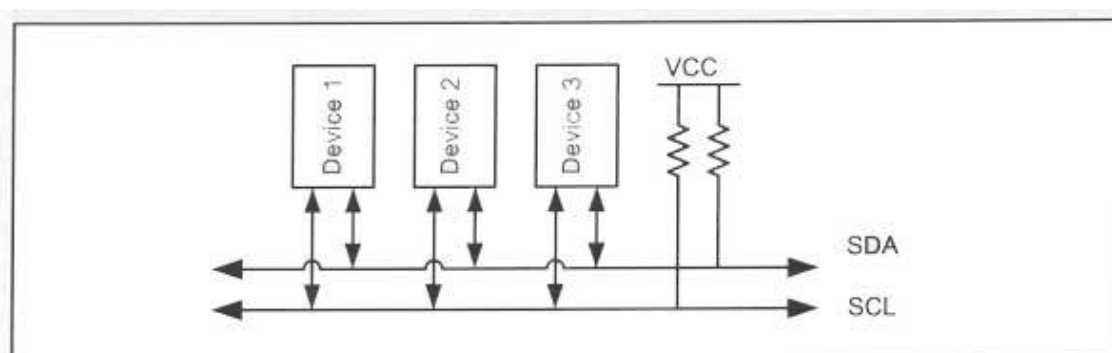


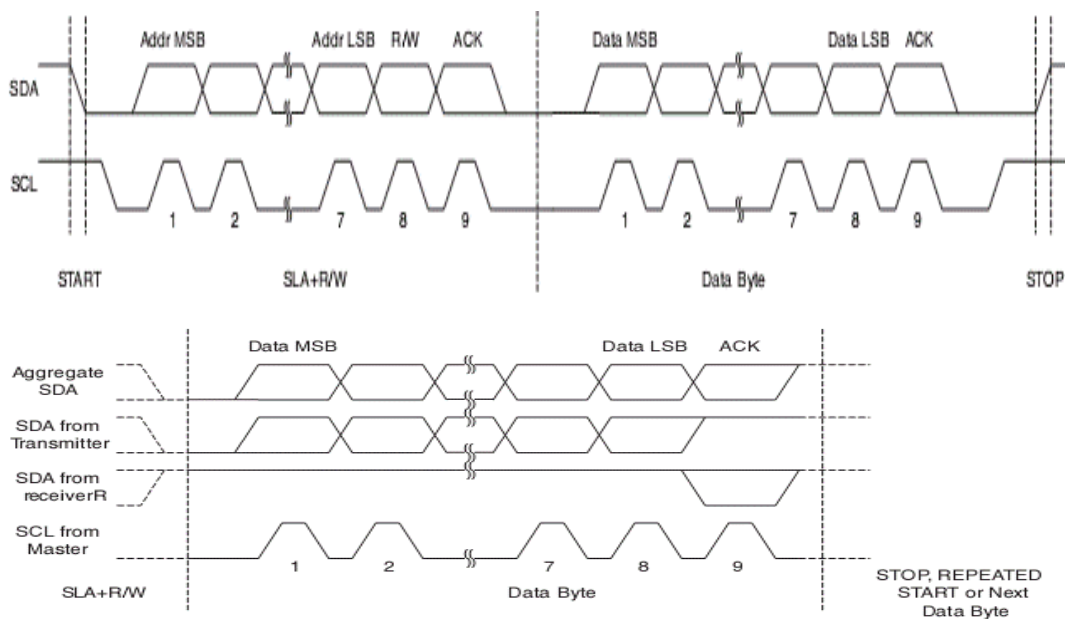
Figure 18-1. I2C Bus

Εικόνα 2.4.22 Πρωτόκολλο I2C [33]

Οι συσκευές που συνδέονται στο δίαυλο I2C μπορούν να χαρακτηριστούν ως κύριοι (master) ή ως σκλάβοι (slave). Οι masters έχουν την ευθύνη για τη διαχείριση του διαύλου, ενώ οι slaves αποκρίνονται στις αιτήσεις των masters. Όταν ένας master θέλει να στείλει δεδομένα σε κάποια συσκευή, αφού ελέγξει πρώτα ότι ο δίαυλος είναι ελεύθερος, ξεκινά την αποστολή, τοποθετώντας το SDA σε χαμηλή στάθμη και αποστέλλοντας παλμούς στο ρολόι SCL. Στη συνέχεια, στέλνει τη διεύθυνση του παραλήπτη, η οποία αποτελείται από 7 bits, ένα bit ελέγχου εγγραφής/ανάγνωσης (R/W) και ένα bit απόκρισης (ACK), δηλαδή σύνολο 8 bits.

Όταν γίνεται μεταφορά δεδομένων, η γραμμή SDA είναι σταθερή και δεν αλλάζει για όσο η γραμμή ρολογιού (SCL) είναι high. Τα bit αυτά, αρχειοθετούνται στη γραμμή SDA, αρχίζοντας πρώτα από το περισσότερο σημαντικό bit (MSB). Η γραμμή ρολογιού (SCL), πάει στην κατάσταση high και έπειτα στη low. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αφού κάθε 8 bit δεδομένων που στέλνονται, η συσκευή που τα δέχεται επιστρέφει πίσω ένα bit απόκρισης (ACK). Άρα στην πραγματικότητα χρειάζονται 9 παλμοί ρολογιού, για να μεταφερθούν τα 8 bit ενός byte δεδομένων. Στην περίπτωση που η συσκευή που δέχεται, επιστρέφει πίσω κάποιο low bit επιβεβαίωσης (ACK), γίνεται αντιληπτό ότι έχει λάβει τα δεδομένα και μπορεί να δεχθεί το επόμενο byte δεδομένων. Στην άλλη περίπτωση, αν επιστρέφει πίσω ένα high bit επιβεβαίωσης, αυτό δείχνει ότι η συσκευή που λαμβάνει, δεν μπορεί να λάβει περαιτέρω δεδομένα και η master συσκευή πρέπει να τερματίσει την αποστολή δεδομένων.

Στην εικόνα (2.4.23) φαίνεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου I2C.



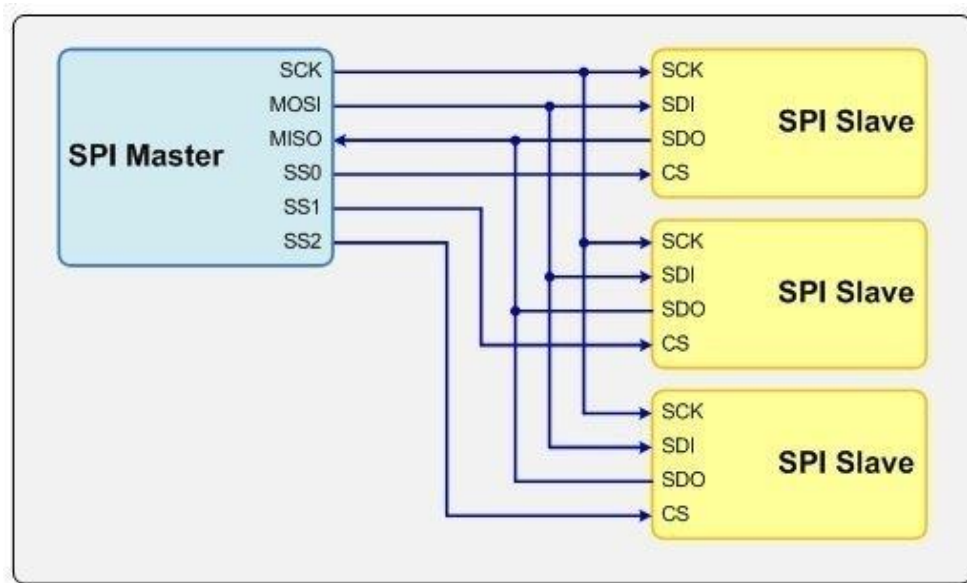
Εικόνα 2.4.23 Λειτουργία πρωτοκόλλου I2C

#### 2.4.4.2 Πρωτόκολλο SPI

Η διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διευκολύνεται από το πρωτόκολλο SPI (Serial Peripheral Interface), το οποίο προσφέρει μια αποτελεσματική λύση για τη διασύνδεση μεταξύ περιφερειακών μονάδων και μικροελεγκτών. Το SPI επιτρέπει την σειριακή και σύγχρονη ανταλλαγή δεδομένων

ανάμεσα στα ολοκληρωμένα, διασφαλίζοντας πλήρη διπλή κατεύθυνση επικοινωνίας. Αρχικά αναπτύχθηκε από την Motorola και αυτό το πρωτόκολλο λειτουργεί σε λειτουργία Master/Slave, όπου ο Master είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία και τη μετάδοση πλαισίων δεδομένων προς τις συνδεδεμένες συσκευές Slave. Μπορεί να συνδεθούν περισσότερες από μία συσκευές Slave σε έναν δίαυλο SPI, με τη χρήση των γραμμών Chip Select [34].

Στην εικόνα (2.4.24) φαίνεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου SPI έχοντας παραπάνω από ένα slave.



Εικόνα 2.4.24 Μορφή πρωτοκόλλου SPI με πολλούς slave [35]

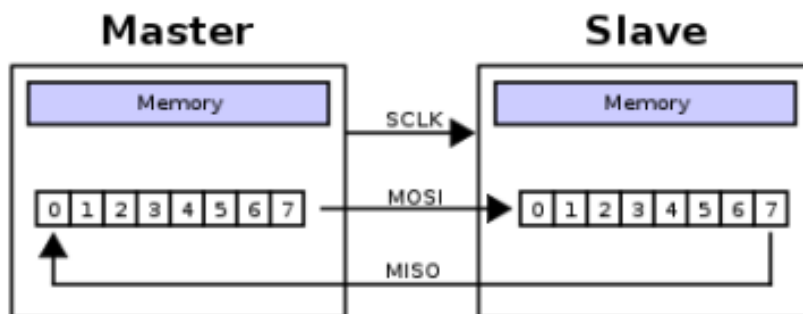
Χρησιμοποιείται κυρίως σε επίπεδο πλακέτας ή σε πολύ κοντινές αποστάσεις για την επικοινωνία μεταξύ μίας συσκευής master με πολλές συσκευές slave. Τέτοιες συσκευές slave μπορεί να είναι:

- Μνήμες Flash, SRAM, EEPROM
- Μετατροπείς DAC και ADC
- LCDs
- Διάφοροι αισθητήρες: θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, επιτάχυνσης

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας υπάρχει ένας Slave. Η συσκευή master ρυθμίζει τη συχνότητα του σειριακού ρολογιού, τυπικά μερικά MHz, ώστε να είναι

μικρότερη ή το πολύ ίση με τη μέγιστη συχνότητα που υποστηρίζει η συσκευή slave με την οποία πρόκειται να επικοινωνήσει. Στη συνέχεια επιλέγει την επιθυμητή συσκευή slave οδηγώντας τον ακροδέκτη SS της slave σε κατάσταση LOW [36]. Οι υπόλοιπες συσκευές slave που ίσως βρίσκονται στο δίαυλο και οι οποίες δεν έχουν επιλεγεί με τον ανωτέρω τρόπο, απορρίπτουν τα σήματα του ρολογιού και των δεδομένων. Όλες οι συσκευές που συνδέονται στο δίαυλο θα πρέπει να διαθέτουν εξόδους τριών καταστάσεων (tri-state outputs: κατάσταση LOW, κατάσταση HIGH και κατάσταση υψηλής εμπέδησης), έτσι ώστε όταν οι συσκευές είναι ανενεργές, οι ακροδέκτες τους να παραμένουν σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης και να μην επηρεάζουν τις αντίστοιχες γραμμές του διαύλου. Σε κάθε κύκλο του ρολογιού πραγματοποιείται μια πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία. Η συσκευή master μεταδίδει ένα bit πληροφορίας από τη γραμμή MOSI. Ύστερα, η slave λαμβάνει το bit από την ίδια γραμμή MOSI και μεταδίδει ένα bit προς τη master από τη γραμμή MISO. Τέλος, η master λαμβάνει το bit από την ίδια γραμμή MISO.

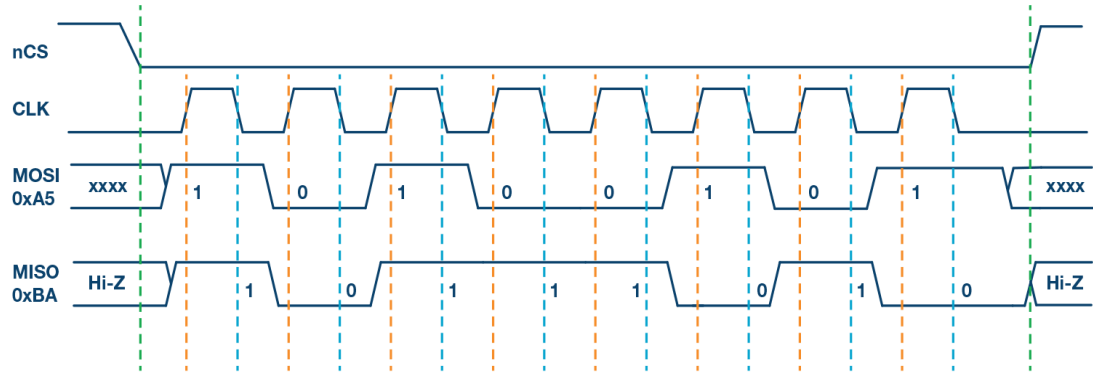
Στην παρακάτω εικόνα (2.4.25) φαίνεται η επικοινωνία με ένα Slave.



Εικόνα 2.4.25 Διαδικασία επικοινωνίας Master-Slave [37]

Για την ανταλλαγή δεδομένων χρησιμοποιούνται ένας καταχωρητής ολίσθησης στη master συσκευή και ένας καταχωρητής ολίσθησης (shift register) στην συσκευή slave, οι οποίοι έχουν ίδιο μέγεθος λέξης, συνήθως 8 bit. Κατά τη μετάδοση, το πιο σημαντικό ψηφίο (MSB) συνήθως ολισθαίνει στην έξοδο κάθε καταχωρητή, ενώ στην είσοδο εισέρχεται ένα νέο, λιγότερο σημαντικό ψηφίο (LSB). Για παράδειγμα, το MSB του καταχωρητή στην κύρια συσκευή ολισθαίνει στο LSB του καταχωρητή στην συσκευή slave και αντίστροφα. Οι δύο καταχωρητές μοιάζουν να είναι συνδεδεμένοι σε μια νοητή τοπολογία δακτυλίου. Με αυτό τον τρόπο, οι δύο καταχωρητές

ανταλλάσσουν τα δεδομένα τους και πραγματοποιούνται τόσο κύκλοι ρολογιού όσοι απαιτούνται για την ολοκλήρωση της ανταλλαγής όλων των δεδομένων, με τη master συσκευή να διακόπτει την επικοινωνία με την slave όταν αυτή ολοκληρωθεί.



Εικόνα 2.4.26 Λειτουργία πρωτοκόλλου SPI [38]



## 3. Πειραματικό Μέρος

Στο πειραματικό κεφάλαιο, θα εξερευνηθεί λεπτομερώς η διαδικασία και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Αρχικά, θα παρουσιαστεί η κατασκευή της διάταξής μας, συμπεριλαμβανομένων και των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν. Θα δειχθεί επίσης, ο σχεδιασμός της θήκης του αισθητήρα, παρουσιάζοντας συγχρόνως τα ειδικά χαρακτηριστικά της.

Επιπλέον, θα παρουσιαστούν οι παράμετροι του πειράματος, όπως και οι συνθήκες μέτρησης και οι ανεξάρτητες μεταβλητές (όπως η φωτεινότητα). Ακόμα, θα οριστούν οι διαστάσεις όλων των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, της πλακέτας ολόκληρης καθώς και της θήκης που κατασκευάστηκε.

### 3.1 Περιγραφή Διάταξης

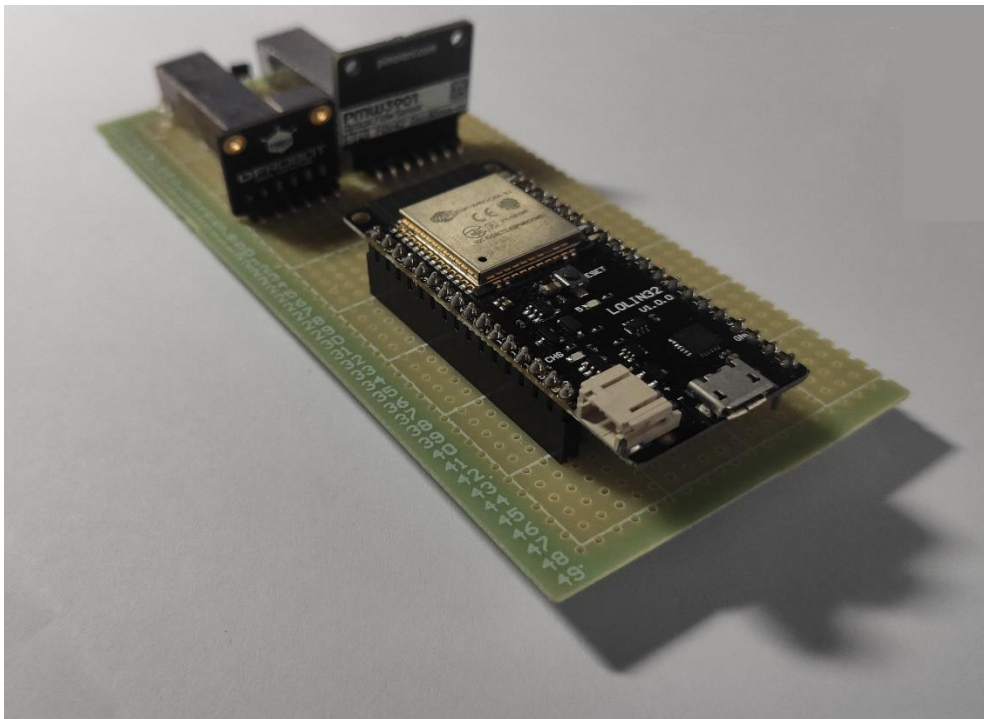
Η διάταξη της εργασίας μας αποτελείται από ένα σύνολο υψηλής τεχνολογίας εξαρτημάτων που συνεργάζονται για την πραγματοποίηση μετρήσεων ακριβείας. Καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων μας παίζει ο μικροελεγκτής ESP32 (πλακέτα LOLIN32), ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο και τον συντονισμό των λειτουργιών της διάταξης.

Ο σκοπός της διάταξης, είναι η δημιουργία μιας συσκευής που θα δίνει τη δυνατότητα για μια εύκολη και αξιόπιστη εκτέλεση μη καταστροφικών ελέγχων σε φερρομαγνητικά υλικά, προσφέροντας ταυτόχρονα την ευκαιρία για γρήγορη αναγνώριση ατελειών που ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα των υλικών αυτών.

Ουσιαστικά η κατασκευή που δημιουργήθηκε είναι μια συσκευή μη καταστροφικού ελέγχου, χαμηλού κόστους, με απώτερο σκοπό την επιτήρηση της υγείας φερρομαγνητικών υλικών. Παράδειγμα τέτοιων υλικών είναι ο χάλυβας, που μπορεί να ελεγχθεί μέσω ενός μαγνητικού αισθητήρα Hall. Με αυτό τον τρόπο, παίρνοντας μετρήσεις σχετικά με τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού υπό εξέταση καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της δομικής κατάστασής του. Η παραπάνω συσκευή είναι φορητή προκειμένου να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε μετρήσεις σε πραγματικές

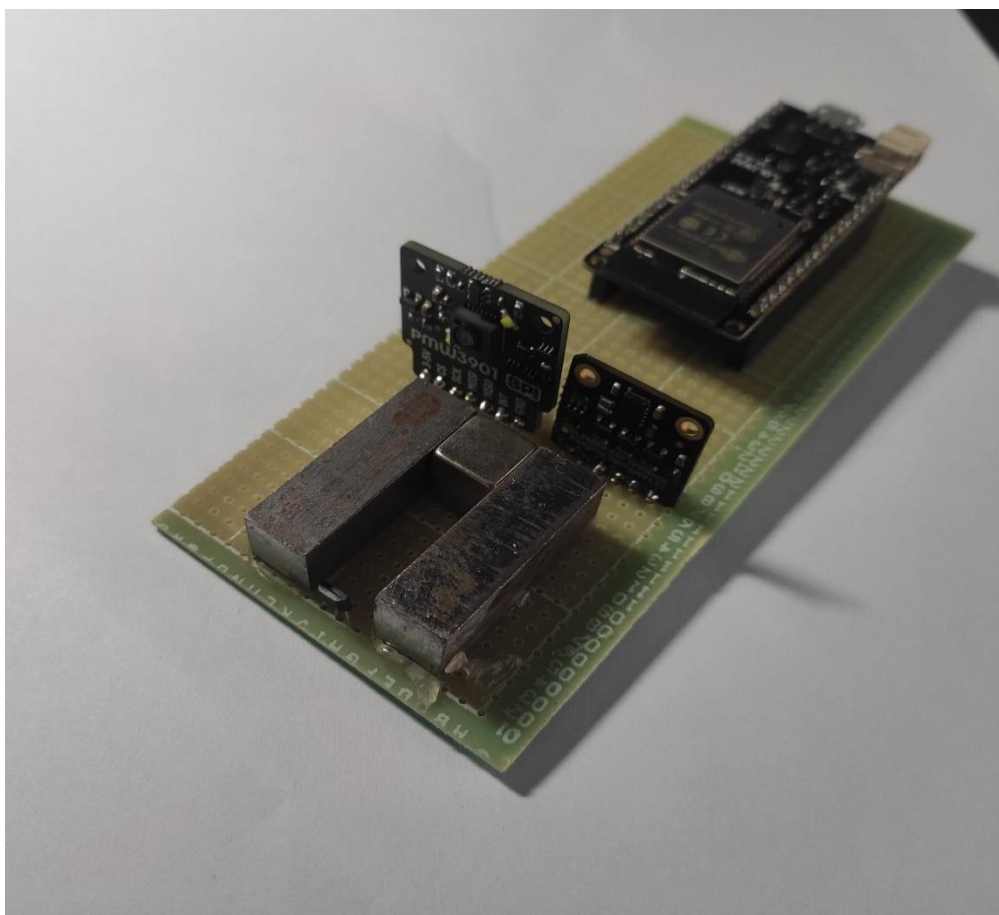
εξωτερικές συνθήκες και όχι αποκλειστικά σε χώρους εργαστηρίου. Η επίβλεψη του εκάστοτε εξεταζόμενου υλικού μπορεί να γίνει σαρώνοντάς το με τη συσκευή που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επομένως, για μεγαλύτερη ακρίβεια των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε και ένας αισθητήρας μετατόπισης (Optical Flow Sensor) στους άξονες x και y, προκειμένου να συσχετίζεται η μαγνητική μέτρηση και η ενδεχόμενη ατέλεια με την ακριβή θέση της.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι εικόνες (3.1.1 & 3.1.2) της προαναφερθείσας διάταξης.



*Εικόνα 3.1.1 Η διάταξη του μη καταστροφικού ελέγχου*

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, πως ο υπολογισμός της ακριβούς θέσης και ο ακριβής υπολογισμός της μετατόπισης του δείγματος στους άξονες x και y είναι ζωτικής σημασίας, ακόμη και για πολύ μικρές μετατοπίσεις, για τη σωστή αξιολόγηση και ερμηνεία των μετρήσεων. Επιπροσθέτως, η ακρίβεια στη θέση είναι απαραίτητη για τη σωστή σύνδεση των μετρήσεων με την πραγματική γεωμετρία του αντικειμένου και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, η ακριβής θέση και ο ακριβής υπολογισμός της μετατόπισης είναι κρίσιμοι παράγοντες για την αξιοπιστία και την επιτυχία των μετρήσεων που διεξήχθησαν και για αυτό επιλέχθηκε ένας αισθητήρας με μεγάλη ακρίβεια (PMW3901), ο οποίος θα παρουσιαστεί παρακάτω.

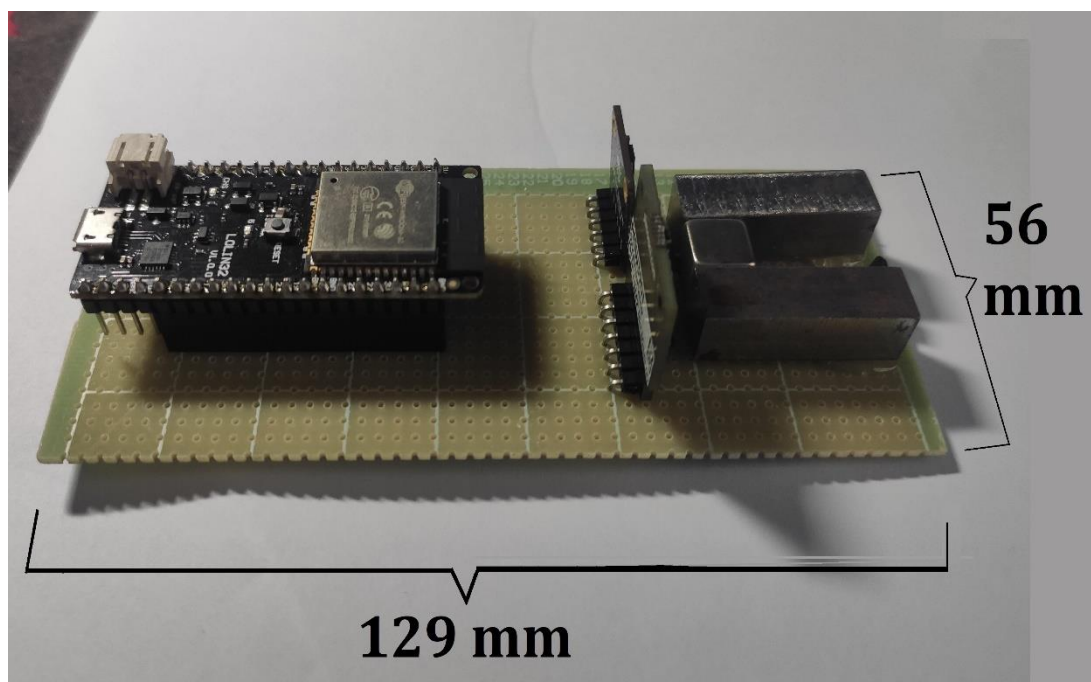


Εικόνα 3.1.2 Η διάταξη του μη καταστροφικού ελέγχου

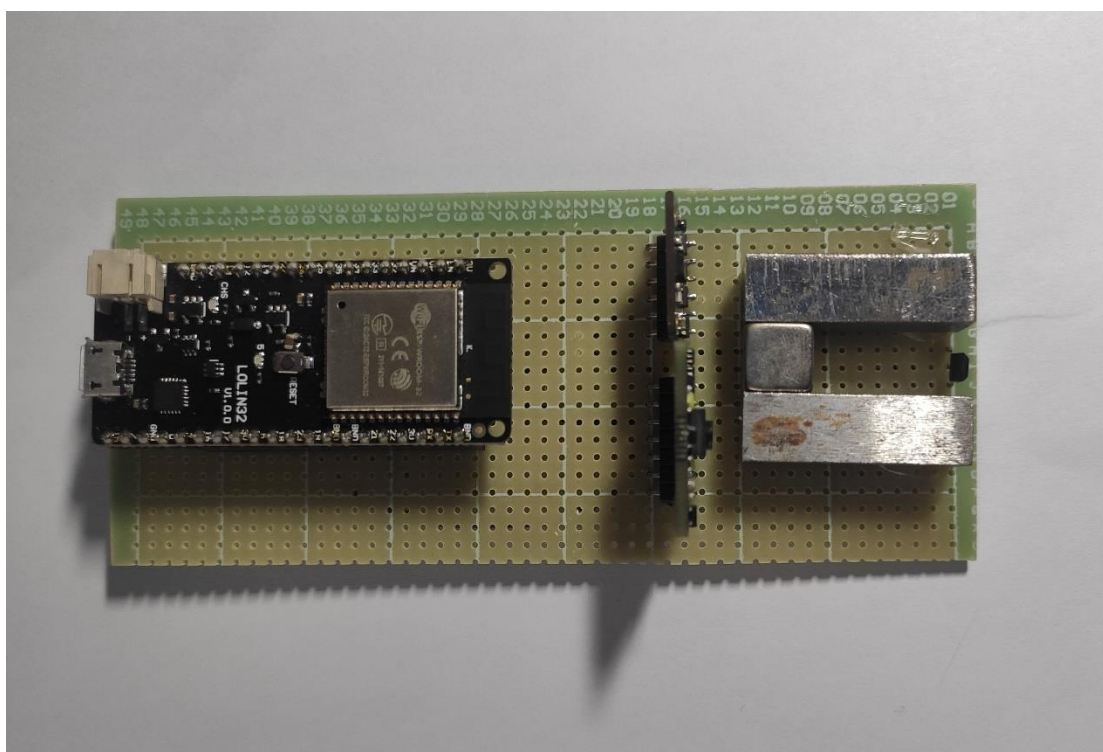
Στο πλαίσιο των αισθητήρων, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας Time-of-Flight, και συγκεκριμένα ο αισθητήρας VL6180X, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μέτρηση αποστάσεων με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας PMW3901, ο οποίος είναι Optical Flow Sensor που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της κίνησης με ακρίβεια, ενώ χρησιμοποιήθηκε και ο αισθητήρας Hall SS49 που παρέχει πληροφορίες σχετικά με το μαγνητικό πεδίο.

Η σύνθεση αυτών των στοιχείων επιτρέπει τη συλλογή σύνθετων δεδομένων, ενώ ο μικροελεγκτής επιτρέπει τον έλεγχο και τον συντονισμό της επικοινωνίας μεταξύ τους. Η ευφυΐα και η ποικιλομορφία αυτών των στοιχείων καθιστούν τη διάταξή μας ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των μαγνητικών φαινομένων και των αλληλεπιδράσεων στο πείραμα.

Στις εικόνες (3.1.3) και (3.1.4) φαίνεται η πλάγια όψη της κατασκευής καθώς και η κάτοψή της. Επιπλέον ορίζονται και οι διαστάσεις της συνολικής διάταξης.



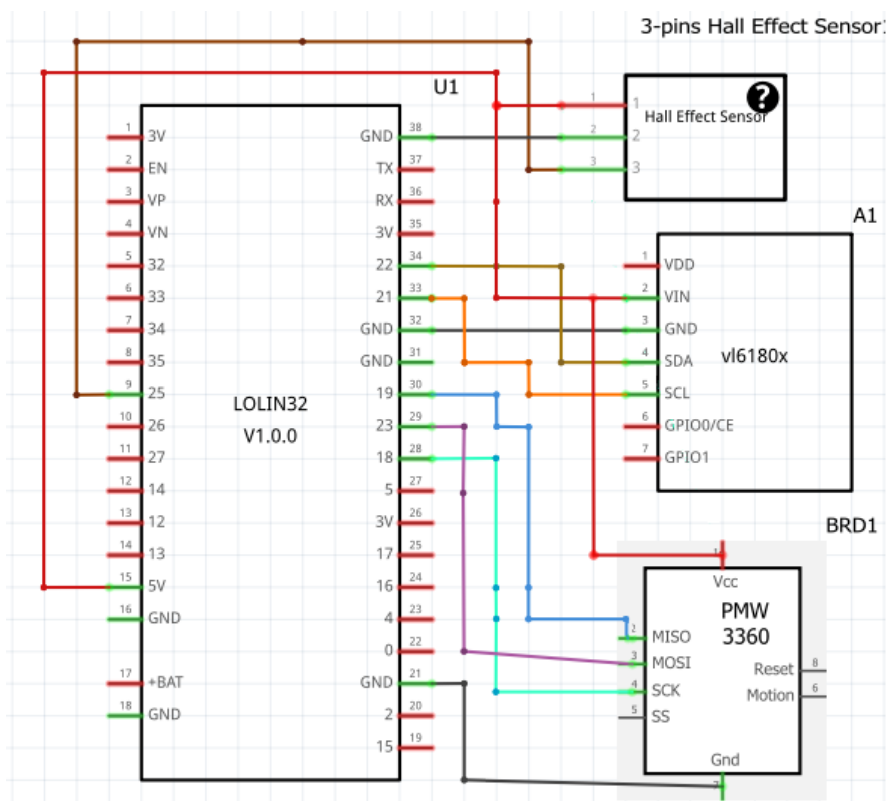
Εικόνα 3.1.3 Πλάγια όψη και διαστάσεις πλακέτας



Εικόνα 3.1.4 Κάτωψη πλακέτας

Ακολούθως, στην εικόνα (3.1.5) μέσω του λογισμικού Fritzing παρουσιάζονται οι συνδέσεις του μικροελεγκτή με τους αισθητήρες καθώς και το σχηματικό των συνδέσεων του συνολικού κυκλώματος.

Αρχικά με κόκκινα καλώδια είναι οι συνδέσεις της τροφοδοσίας και με μαύρα καλώδια οι γειώσεις. Τώρα, συγκεκριμένα στον αισθητήρα VL6180X (αριστερά), το κίτρινο και το πορτοκαλί διεκπεραιώνουν την επικοινωνία του πρωτοκόλλου I2C, αντίστοιχα το πρώτο αντιστοιχεί στο SDA και το δεύτερο στο SCL. Από την άλλη μεριά, για τον αισθητήρα PMW3901 (δεξιά) αντιστοιχεί το μπλε καλώδιο για το SCK, το μωβ και το ροζ χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία του πρωτοκόλλου SPI, το πρώτο αντιστοιχεί στο MOSI και το δεύτερο στο MISO.

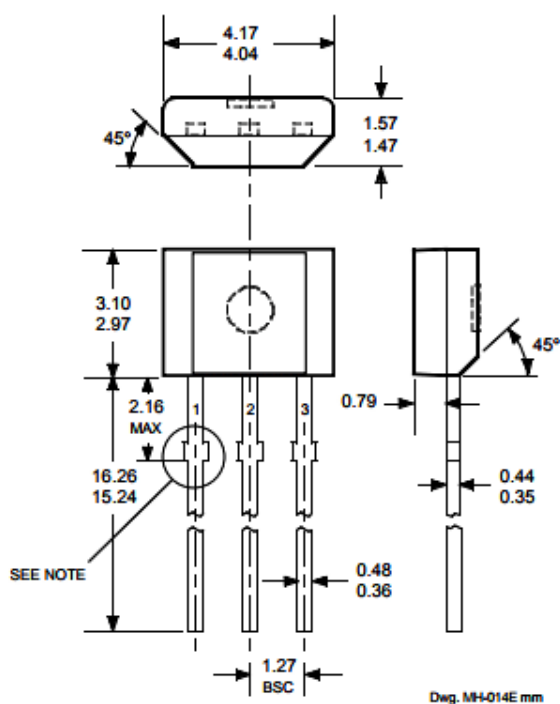


Εικόνα 3.1.5 Συνδέσεις της διάταξης

### 3.2 Υοκε με μόνιμο μαγνήτη

Αρχικά η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, γίνεται όπως είναι γνωστό μέσω του αισθητήρα Hall, ο οποίος χρησιμεύει για να βρεθούν οι τυχόν ατέλειες σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, αναπτύσσοντας μία νέα διάταξη. Η επιλογή του μαγνητικού αισθητήρα Hall για τη δημιουργία της συσκευής βασίστηκε στην αξιοπιστία και την απλότητα λειτουργίας του. Ο αισθητήρας Hall παρέχει μια καλή λύση για την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων χωρίς την ανάγκη για επαφή με το υλικό που εξετάζεται, παρά μόνο να τοποθετείται σε πολύ κοντινή απόσταση από αυτό κάτι που

τον καθιστά ιδανικό για συσκευές μη καταστροφικού ελέγχου. Η απλότητα και η μικρές διαστάσεις του αισθητήρα Hall επιτρέπουν την εύκολη ενσωμάτωσή του σε διάφορες εφαρμογές ελέγχου, ενώ η χαμηλή του κατανάλωση ενέργειας τον καθιστά κατάλληλο για φορητές συσκευές. Με τη χρήση αυτού του αισθητήρα, δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν έλεγχοι σε διάφορα υλικά χωρίς την ανάγκη για σύνθετες ή δαπανηρές συσκευές, ενισχύοντας έτσι την ευκολία και την πρακτικότητα της διαδικασίας ελέγχου. Στην εικόνα (3.7) παρουσιάζονται και οι διαστάσεις ενός τέτοιου αισθητήρα.

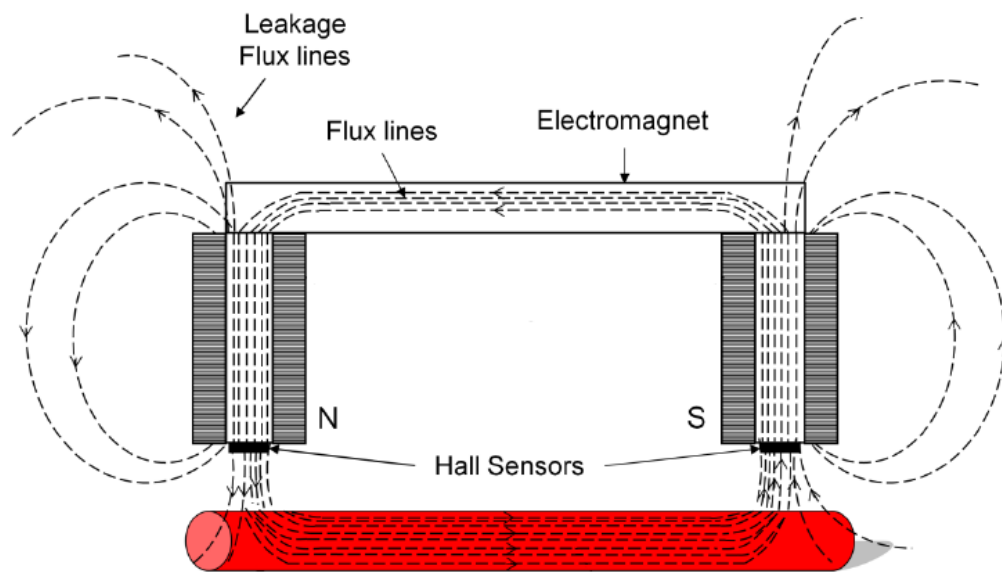


Εικόνα 3.2.5 Διαστάσεις του αισθητήρα Hall [39]

Ειδικότερα, η διάταξη που κατασκευάστηκε για τον Hall, αποτελείται από έναν ραβδόμορφο μόνιμο μαγνήτη, δύο ράβδους μαλακού σιδήρου και έναν αισθητήρα Hall. Οι δύο ράβδοι σιδήρου τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα προς τον μόνιμο μαγνήτη. Οπότε, η διάταξη θα έχει σχήμα «Π». Με την παραπάνω τεχνική, γίνεται εφικτό να αποφευχθεί η χρήση πηνίων για τη μαγνήτιση του εξεταζόμενου υλικού και για τη λήψη του παραγόμενου σήματος.

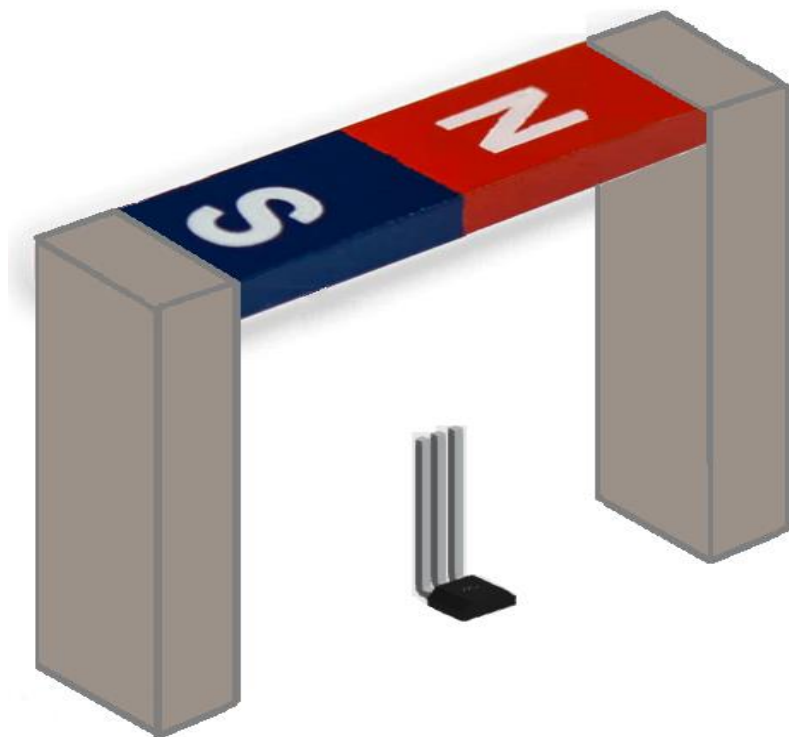
Ο λόγος που χρησιμοποιείται το γοκε, και δεν τοποθετείται ένας αισθητήρας Hall, είναι διότι είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η όσο γίνεται μεγαλύτερη συγκέντρωση των μαγνητικών γραμμών γύρω από το εξεταζόμενο υλικό. Ειδικότερα όταν

τοποθετείται στο σύνολο της η συσκευή, μαζί και το γοκε, πάνω από το δείγμα, τότε το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει. Έτσι, οι μαγνητικές γραμμές που δημιουργούνται από το μόνιμο μαγνήτη διέρχονται μέσα από τις δύο ράβδους. Η λειτουργία που περιγράφηκε φαίνεται και στην εικόνα (3.2.8). Με αυτόν τον τρόπο, η συνδυασμένη χρήση του γοκε και του αισθητήρα Hall επιτυγχάνει ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στην ανίχνευση μαγνητικών πεδίων και την αξιολόγηση του εξεταζόμενου υλικού [40].

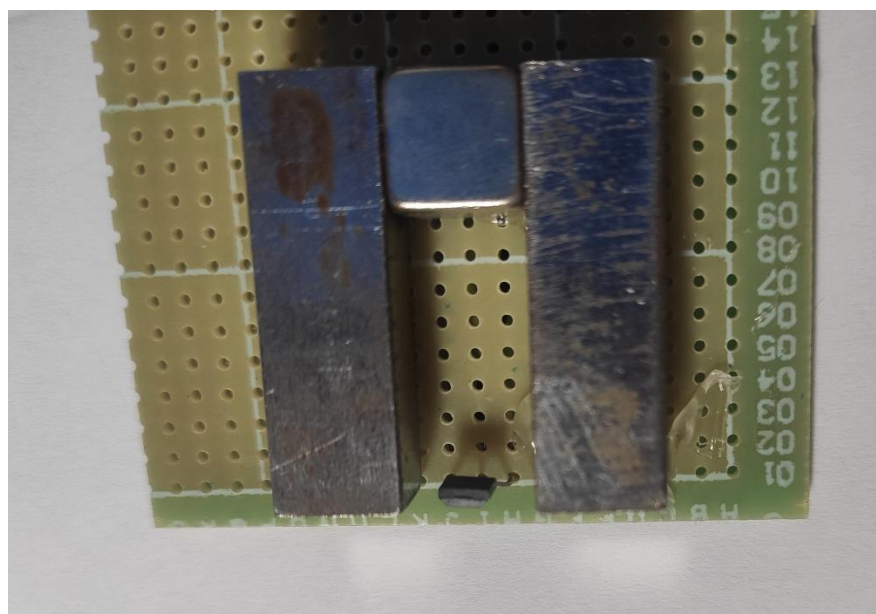


Εικόνα 3.2. 6 Μαγνητικές γραμμές μέσω του γοκε και του δείγματος [41]

Στην εικόνα (3.2.9) φαίνεται ένα σχέδιο της μορφής του γοκε σχήματος «Π» με ένα αισθητήρα Hall. Στην εικόνα (3.2.10) παρουσιάζεται και η πραγματική του μορφή.



Εικόνα 3.2.7 Σχέδιο της προτεινόμενης διάταξης.



Εικόνα 3.2.8 Πραγματική μορφή



### 3.3 Αισθητήρας VL6180X

Ο αισθητήρας VL6180X που χρησιμοποιείται στη διάταξη ανήκει στην κατηγορία αισθητήρων απόστασης και προσφέρει σημαντική λύση για τις μετρήσεις μας. Η χρήση αυτού του αισθητήρα χρησιμεύει στην εργασία, διότι μπορεί να υπολογίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια την απόσταση των εξεταζόμενων υλικών από τους αισθητήρες [42]. Η μορφή ενός τέτοιου αισθητήρα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (3.3.11).

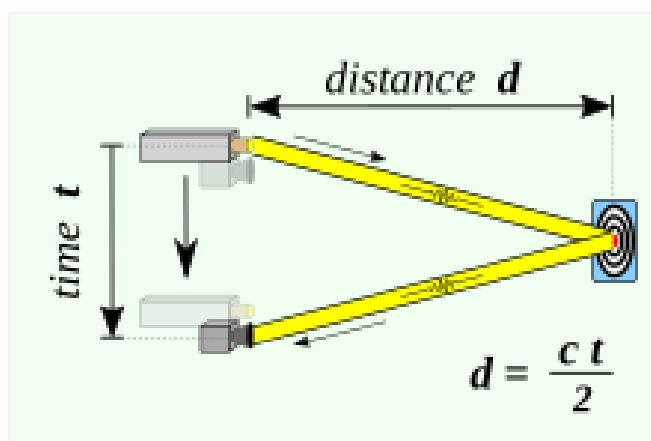


Εικόνα 3.3.9 Αισθητήρας VL6180X

Ο VL6180X που χρησιμοποιήθηκε, ανήκει στην κατηγορία αισθητήρων απόστασης, γνωστοί και ως αισθητήρες ToF (Time-of-Flight). Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν την τεχνολογία Time-of-Flight για να μετρήσουν το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επιστροφή ενός φωτεινού σήματος από τον στόχο. Αυτό επιτρέπει στον αισθητήρα να υπολογίζει την ακριβή απόσταση ανεξάρτητα από το υλικό του στόχου.

Οι μετρήσεις απόστασης που παρέχονται από τον αισθητήρα VL6180X επιτρέπουν να αξιολογηθούν, πρώτα η απόσταση των δειγμάτων από τους αισθητήρες καθώς και σε δευτερεύοντα ρόλο η μορφή της επιφάνειας των δειγμάτων αυτών. Πρόσθετα από τον κύριο ρόλο του στη μέτρηση της απόστασης, ο αισθητήρας VL6180X διαθέτει και τη δυνατότητα να υπολογίζει τη φωτεινότητα. Αυτό επιτρέπει την παράλληλη αξιολόγηση του περιβάλλοντος φωτισμού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η δυνατότητα αυτή είναι χρήσιμη για την ανίχνευση πιθανών επιπτώσεων του φωτισμού στα αποτελέσματα των μετρήσεων και τη διόρθωση τυχόν αστάθειών που μπορεί να προκύψουν από αυτές τις επιπτώσεις.

Η λειτουργία του αισθητήρα παρουσιάζεται και στην εικόνα (3.3.12).



Εικόνα 3.3. 10 Λειτουργία ενός ToF αισθητήρα [43]

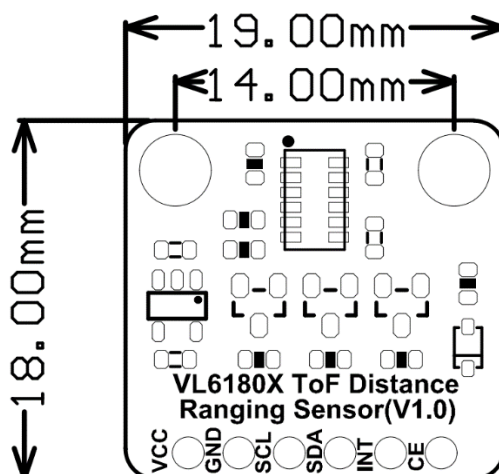
Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι ο VL6180X πρόκειται για έναν αισθητήρα που συνδυάζει τη δυνατότητα εύρεσης απόστασης και τη μέτρηση του επιπέδου φωτεινότητας του περιβάλλοντος σε ένα μόνο πακέτο.

Οι αισθητήρες Time-of-Flight (ToF) προσφέρουν αρκετά θετικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, η απλότητά τους είναι εμφανής. Σε αντίθεση με τα συστήματα στερεοσκοπικής όρασης ή τριγωνισμού, ολόκληρο το σύστημα είναι πολύ απλό: υπάρχουν δύο φακοί, ο ένας είναι για τον υπολογισμό της απόστασης και ακριβώς δίπλα του ο άλλος φακός για τον υπολογισμό της φωτεινότητας. Επιπλέον, σε αντίθεση με τα συστήματα σάρωσης με λέιζερ, δεν απαιτούνται μηχανικά κινούμενα μέρη [44].

Ένα άλλο θετικό χαρακτηριστικό είναι ο αποδοτικός αλγόριθμος για την εξαγωγή πληροφοριών απόστασης από τα σήματα εξόδου του αισθητήρα ToF. Μετά την εξαγωγή των δεδομένων απόστασης, η ανίχνευση αντικειμένων, για παράδειγμα, είναι επίσης μια απλή διαδικασία εκτέλεσης. Η ακρίβεια εκτιμάται συνήθως στο 1% της μετρημένης απόστασης.

Τέλος, η ταχύτητα αποτελεί ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα. Ο αισθητήρας VL6180X λειτουργεί με εντυπωσιακή ταχύτητα, καθώς είναι σε θέση να πραγματοποιεί μέχρι και 160 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο. Αυτός ο υψηλός ρυθμός μετρήσεων επιτρέπει στον αισθητήρα να αντιδράει γρήγορα σε αλλαγές, όσον αφορά

την απόσταση των δειγμάτων από τους αισθητήρες καθώς και την φωτεινότητα του περιβάλλοντος. Έτσι μπορεί και παρέχει συνεχή και ακριβή μέτρηση απόστασης με εξαιρετική απόδοση. Οι διαστάσεις του αισθητήρα παρουσιάζονται στην εικόνα (3.3.13) που ακολουθεί.



Εικόνα 3.3.11 Διαστάσεις ενός αισθητήρα VL6180X [45]

Ο αισθητήρας είναι μικρός και εύκολος στη χρήση σε οποιαδήποτε φορητή διάταξη απαιτηθεί ή σε ρομποτικές εφαρμογές. Χρειάζεται μικρή τάση της τάξεως των 2,8 V περίπου. Επιπροσθέτως, είναι δυνατόν να το χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε τροφοδοτικό (3-5V) ή μικροελεγκτή.

Στη συνέχεια (Πίνακας 2) θα περιγραφούν τα pins του αισθητήρα:

	Επιγραφή	Περιγραφή
1	VCC	Τάση τροφοδοσίας
2	GND	Γείωση
3	SCL	I2C clock line
4	SDA	I2C data line
5	INT	Interrupt
6	CE	Pin ενεργοποίησης

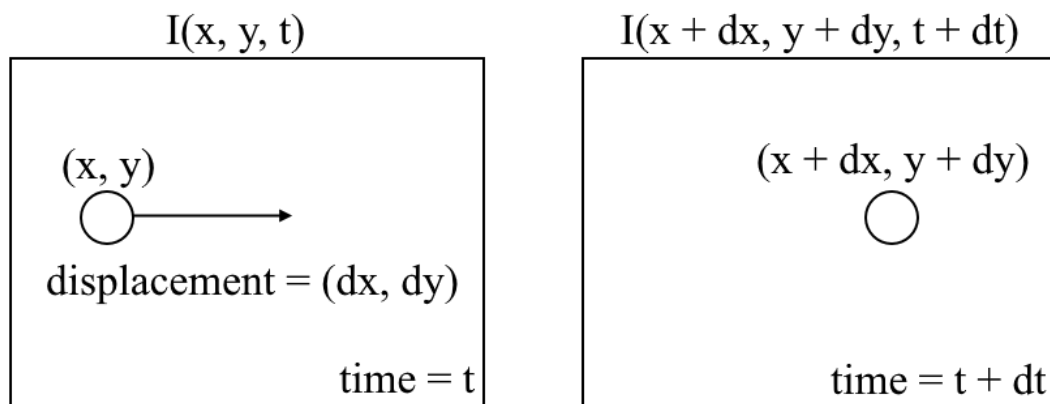
Η επικοινωνία με τον αισθητήρα γίνεται μέσω I2C πρωτοκόλλου με μερικές απλές εντολές.

### 3.4 Αισθητήρας PMW3901

Ο αισθητήρας PMW3901 βασίζεται στην αρχή της οπτικής ροής (optical flow) για την εκτίμηση της μετατόπισης του αντικειμένου.

Ως οπτική ροή ορίζεται η φαινομενική μετατόπιση που αντιλαμβάνεται κάποιος παρατηρητής σε ένα καρέ, η οποία οφείλεται στην σχετική κίνηση του παρατηρητή και των αντικειμένων που συνθέτουν την σκηνή.

Οι αισθητήρες οπτικής ροής λειτουργούν δειγματοληπτώντας εικόνες από μια ψηφιακή κάμερα σε κάποιο καθορισμένο ρυθμό καρέ και ανιχνεύοντας την κίνηση μέσω αλλαγών στα pixels. Οι αισθητήρες οπτικής ροής υπάρχουν εδώ και καιρό και αποτελούν τη βάση ενός οπτικού ποντικιού [46].



Εικόνα 3.4.12 Αρχή λειτουργίας ενός Optical flow sensor [47]

Όπως παρουσιάζεται και στην παραπάνω εικόνα (3.4.14), η οποία αποτελείται από πολλά pixels, όπου για κάθε pixel ορίζονται δύο διαστάσεις στον χώρο (x,y). Ταυτόχρονα αυτές οι μεταβλητές, εξαρτώνται και από το χρόνο (t). Έτσι, μπορεί να οριστεί μια συνάρτηση για την αρχική εικόνα ως:  $I(x, y, t)$ . Στη συνέχεια, μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα (dt) έχει υπάρξει και μια μετατόπιση του pixel, κατά (dx, dy). Επομένως και η συνάρτηση που αναφέρθηκε προηγουμένως θα είναι της μορφής  $I(x + dx, y + dy, t + dt)$ .

Μέσω της σειράς Taylor και διαιρώντας με dt, υπολογίζεται η εξίσωση οπτικής ροής:

$$\frac{\theta I}{\theta x} u + \frac{\theta I}{\theta y} v + \frac{\theta I}{\theta t} = 0 \quad (3.1)$$

όπου  $u=dx/dt$  και  $v=dy/dt$ , και  $dl/dx$ ,  $dl/dy$ , και  $dl/dt$ .

Η εξίσωση (3.1) δε μπορεί να λυθεί άμεσα ως προς u και v, καθώς υπάρχουν δύο άγνωστες μεταβλητές. Αυτό το πρόβλημα, επιλύεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο που ονομάζεται Lucas-Kanade, η οποία βασίζεται σε υποθέσεις γύρω από τη μετακίνηση των περιεχομένων της εικόνας σε μικρά βήματα.

Η τεχνική Lucas-Kanade είναι πιθανότερα η πιο διαδεδομένη διαφορική τεχνική και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της οπτικής ροής σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές. Η τεχνική χωρίζει το πλαίσιο σε επικαλυπτόμενα μπλοκ και για κάθε ένα από τα μπλοκ εκτιμά την οπτική ροή λύνοντας κάποιες εξισώσεις [48]. Για να λειτουργεί σωστά αυτή η τεχνική πρέπει να καλύπτονται και κάποιες προϋποθέσεις όπως: Η οπτική ροή σε μία περιοχή είναι σταθερή και ομοιόμορφη, κάθε μπλοκ περιέχει κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις, Οι κινήσεις των σωμάτων της σκηνής να είναι αρκετά μικρές ώστε οι δύο πρώτοι όροι του αναπτύγματος Taylor να αποτελούν μία καλή προσέγγιση κ.α. Η τελική εξίσωση που λύνεται είναι η παρακάτω:

$$M\vec{u} = \vec{b} \quad (3.2)$$

$$\text{Όπου: } \vec{b} = - \begin{pmatrix} \sum_{i,j} g(x_i, y_1) \frac{\theta I}{\theta t} * \frac{\theta I}{\theta x} \\ \sum_{i,j} g(x_i, y_i) \frac{\theta I}{\theta t} * \frac{\theta I}{\theta y} \end{pmatrix}$$

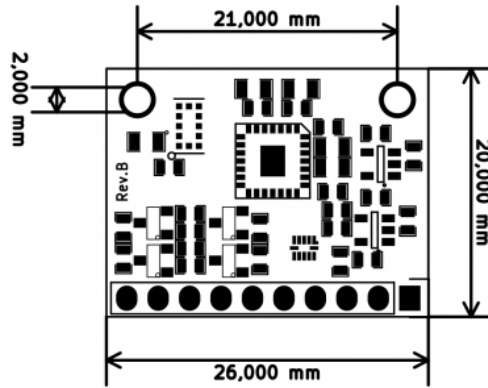
Οι αισθητήρες αυτοί, όπως ο αισθητήρας PMW3901, δεν χρησιμοποιεί λέιζερ για την ανίχνευση των μεταβολών, σαν τον αισθητήρα VL6180X. Αντίθετα, παρακολουθεί τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά των pixels του αντικειμένου που κινείται. Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό του πόσο γρήγορα κινείται και προς ποια κατεύθυνση. Η εικόνα ενός τέτοιου αισθητήρα φαίνεται στην (3.4.15).



Εικόνα 3.4.13 Αισθητήρας PMW3901

Ο αισθητήρας PMW3901 αποτελεί κρίσιμο στοιχείο όλες διάταξης μη καταστροφικού ελέγχου. Με τη δυνατότητα παρακολούθησης μεταβολών σε άξονες x και y, ο PMW3901 επιτρέπει την ακριβή και αξιόπιστη παρακολούθηση της θέσης της διάταξης καθώς αυτή κινείται επί του δείγματος. Η ακριβής μέτρηση της μετατόπισης σε συνδυασμό με τη σταθερότητα του αισθητήρα παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα, επιτρέποντας ακριβείς παρακολούθηση και έλεγχο των διακυμάνσεων στη θέση της διάταξης κατά την κίνησή της. Ο PMW3901, ως ένας οπτικός αισθητήρας, χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές που απαιτούν ανίχνευση κίνησης. Ο αισθητήρας αυτός βρίσκεται σε διάφορες συσκευές, όπως στα ποντίκια των υπολογιστών, σε διάφορες ρομποτικές κατασκευές (π.χ. drones) κ.α. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές για την παρακολούθηση κίνησης σε μηχανήματα ή διεργασίες παραγωγής.

Ακολούθως παρουσιάζονται στην εικόνα (3.16) οι διαστάσεις του αισθητήρα.



Εικόνα 3.4.14 Διαστάσεις αισθητήρα PMW3901 [49]

Στη συνέχεια (Πίνακας 3) θα περιγραφούν τα pins του αισθητήρα:

	Επιγραφή	Περιγραφή
1	VCC	Τάση τροφοδοσίας
2	GND	Γείωση
3	SCK (Serial Clock)	Ρολόι σειριακής επικοινωνίας
4	SS (Slave Select)	Επιλογή της ενεργού συσκευής slave
5	INT	Interrupt
6	MOSI (Master Out Slave In)	Master Output Slave Input
7	MISO (Master In Slave Out)	Master Input Slave Output

Πίνακας 3: PMW3901 pins

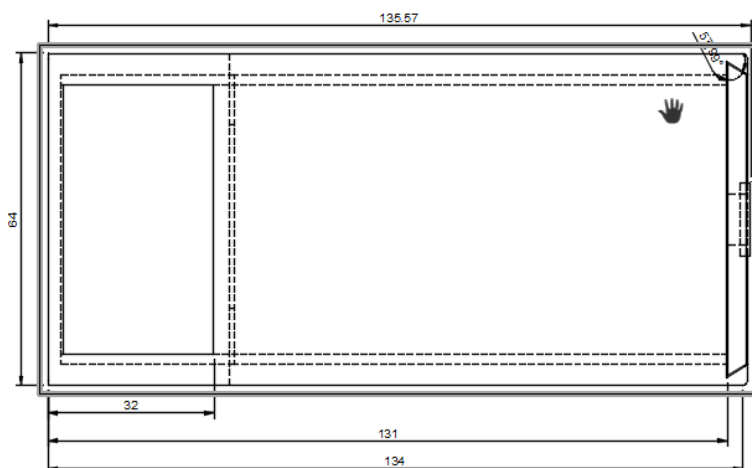
### 3.5 Σχεδιασμός της θήκης

Η κατασκευή της θήκης για τη διάταξη, αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία ολοκλήρωσης του συστήματός. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Autodesk Fusion 360, έγινε εφικτό να δημιουργηθεί μια ειδική θήκη που είναι ιδανικά προσαρμοσμένη στις ανάγκες και τις διαστάσεις της διάταξής μας. Αυτή η θήκη παρέχει την απαραίτητη

προστασία και στήριξη για τα εξαρτήματα του συστήματός μας, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει εύκολη πρόσβαση για τυχόν συντηρήσεις ή επισκευές.

Το Autodesk Fusion 360 είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό 3D CAD που διαθέτει ένα σύνολο εργαλείων για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων και επιτρέπει στους χρήστες να περάσουν εύκολα και γρήγορα από την ιδέα στην κατασκευή. Παρέχει εργαλεία παραμετρικής σχεδίασης, τεχνικής ανάλυσης και προσομοίωσης που βοηθούν τους σχεδιαστές διασφαλίσουν την απόδοση και ποιότητα των σχεδίων τους.

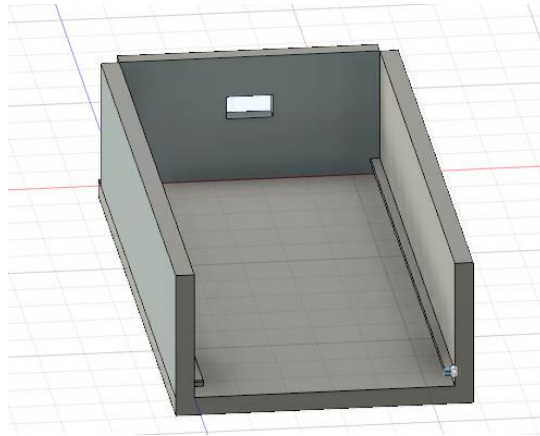
Αφότου μετρήθηκε το μήκος, το πλάτος και το ύψος της κατασκευής, σχεδιάστηκε ένα μοντέλο της θήκης. Όλες οι διαστάσεις του μοντέλου καθορίστηκαν από το μηδέν, καθώς το σχέδιο είναι πρωτότυπο και δεν υπάρχουν κατασκευαστικά σχέδια. Παρακάτω στην εικόνα (3.5.17) φαίνεται το μηχανολογικό σχέδιο της θήκης.



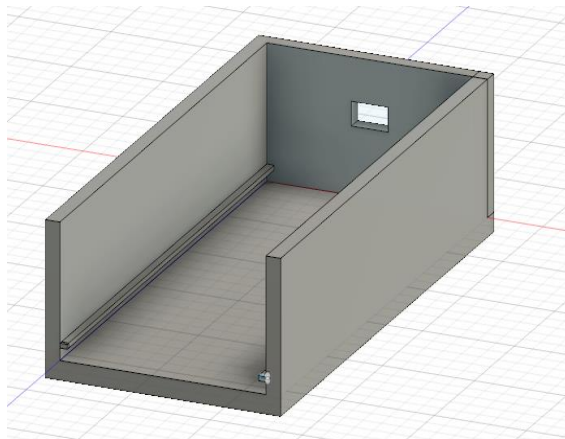
Εικόνα 3.5.15 Μηχανολογικό σχέδιο θήκης

Στη συνέχεια, έχοντας ως πρότυπο το παραπάνω σχέδιο δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού που προ-αναφέρθηκε (Fusion 360), η τελική μορφή της θήκης. Αρχικά η σχεδίαση ξεκίνησε με τη βάση της θήκης και τα δύο πλαϊνά τοιχώματα της θήκης. Παρουσιάζονται δύο φωτογραφίες από την πορεία κατασκευής της θήκης.





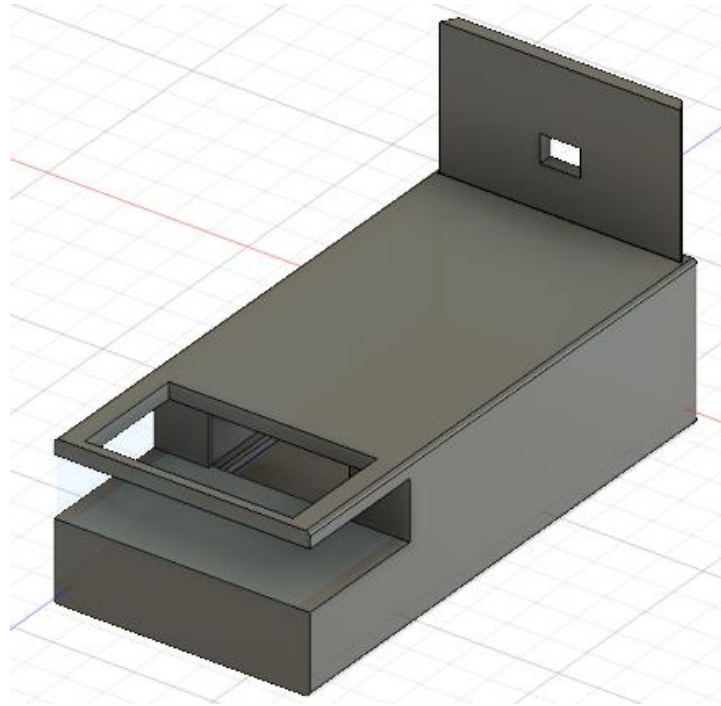
*Εικόνα 3.5.16 Αριστερή όψη της θήκης*



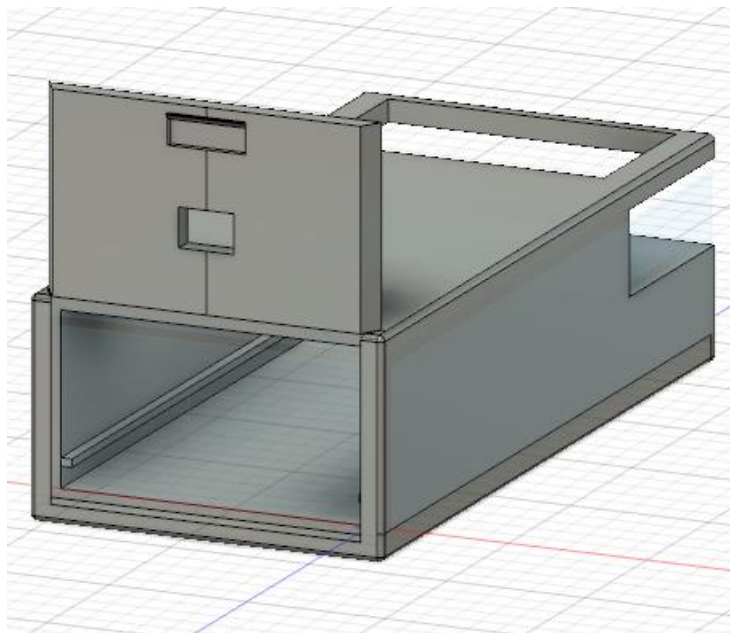
*Εικόνα 3.5.17 Δεξιά όψη της θήκης*

Βλέποντας τις εικόνες (3.5.18-3.5.19) διαπιστώνεται ότι στο οπίσθιο μέρος της θήκης υπάρχει ένα κενό, το οποίο εξυπηρετεί στη σύνδεση του καλωδίου USB με το μικροελεγκτή ESP32 (LOLIN32). Παράλληλα, παρατηρώντας περαιτέρω φαίνονται και δύο βοηθητικές ράγες που εξυπηρετούν στη σταθερότητα της διάταξης όταν αυτή βρίσκεται εντός της θήκης.

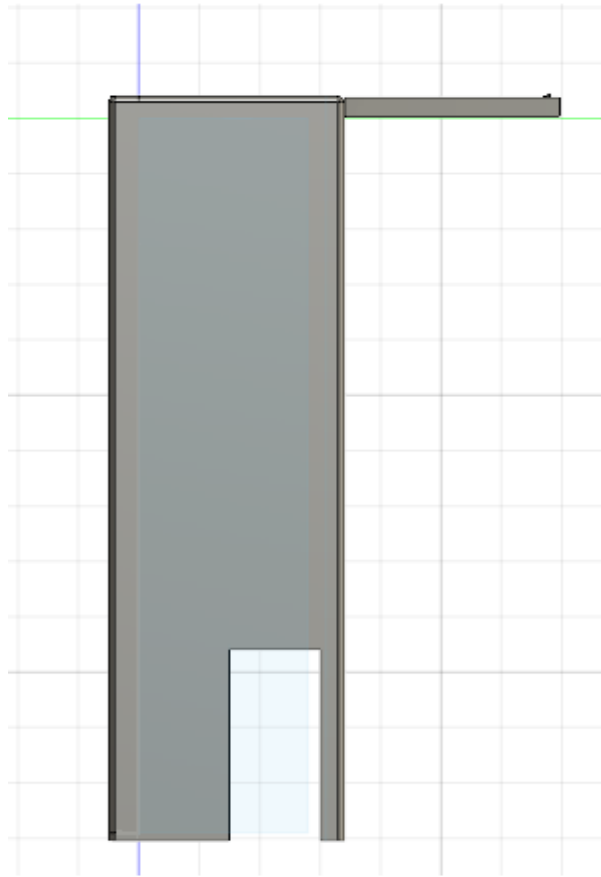
Η τελική μορφή του σχεδίου στο λογισμικό Fusion 360 παρουσιάζεται στις κάτωθι εικόνες (3.5.20-3.5.22):



*Εικόνα 3.5.18 Τελική μορφή (κάτω μέρος)*



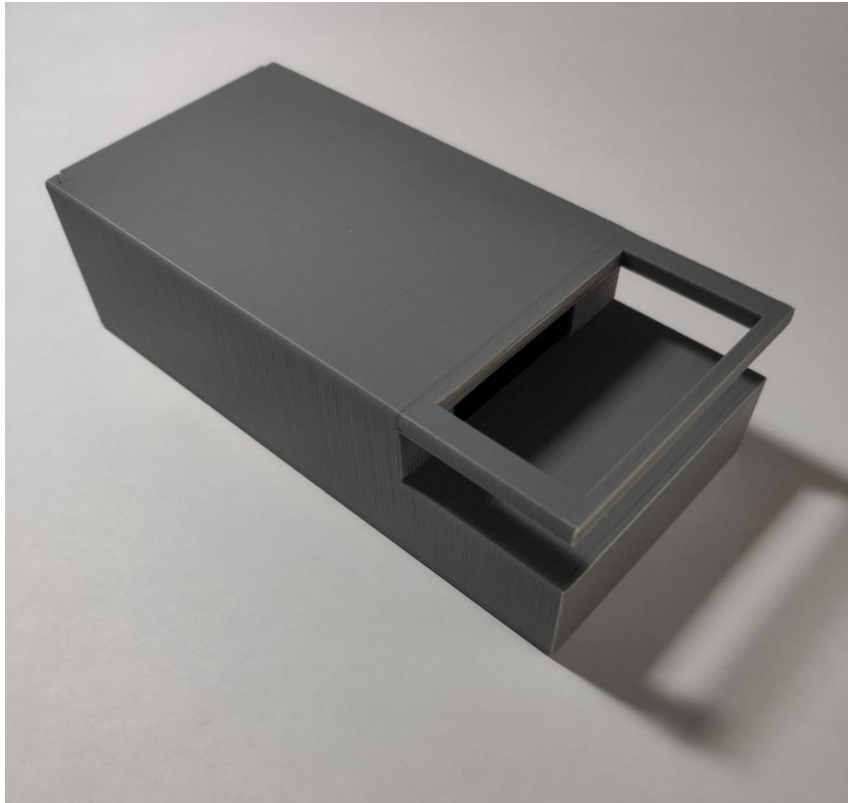
*Εικόνα 3.5.19 Τελική μορφή (άνω μέρος)*



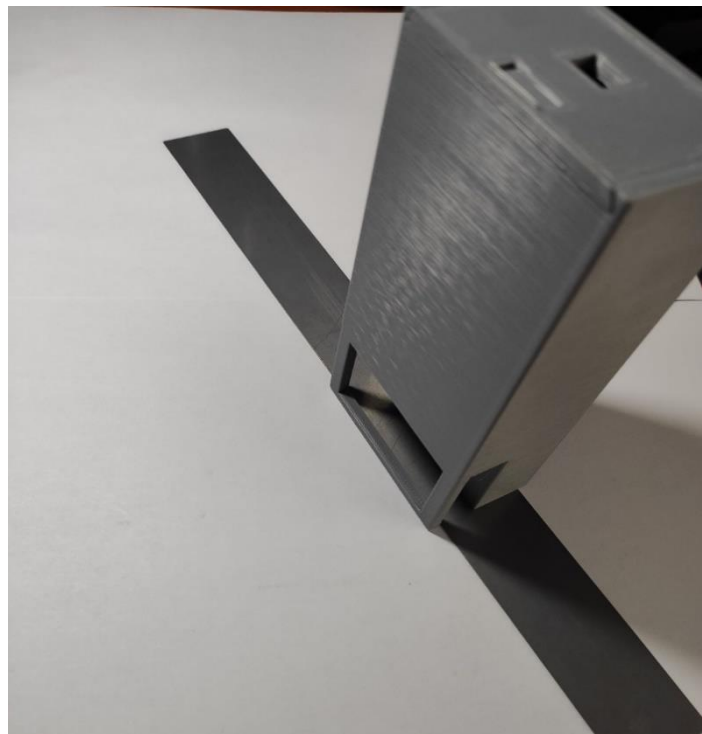
*Εικόνα 3.5.20 Τελική μορφή (πλάγια όψη)*

Από της παραπάνω εικόνες, αρχικά παρατηρείται το κενό που έχει οριστεί για να τοποθετούνται τα δοκίμια που είναι υπό εξέταση. Επιπλέον, στο κάτω μέρος της θήκης έχει δημιουργηθεί ένα κενό ώστε να φωτίζεται κατάλληλα το δείγμα, κάτι που βοηθά στη λειτουργία των αισθητήρων της, και ειδικά στη λειτουργία του PMW3901 που διαθέτει κάμερα για τον υπολογισμό της θέσης.

Παρακάτω φαίνονται και φωτογραφίες της θήκης στον πραγματικό κόσμο, αφού εκτυπώθηκε μέσω ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Το υλικό της θήκης είναι πλαστικό (PLA). Στις δύο εικόνες (3.5.23-3.5.24) αποτυπώνονται η πραγματική μορφή της θήκης, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο τοποθετείται η κατασκευή στα εξεταζόμενα δείγματα.



*Εικόνα 3.5.21 Πραγματική μορφή θήκης*



*Εικόνα 3.5.22 Τρόπος διεξαγωγής μετρήσεων*

## 4. Αποτελέσματα μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή, θα εξεταστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα δείγματα, εστιάζοντας αρχικά στον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε, συγκεκριμένα στα φίλτρα και τους συντελεστές προσαρμογής που εφαρμόστηκαν σε αυτόν. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα δείγματα και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν για το μαγνητικό πεδίο και τις άλλες παραμέτρους που υπολογίστηκαν. Κατόπιν, θα γίνουν παρατηρήσεις και αναλύσεις πάνω σε αυτές τις γραφικές, εξετάζοντας τυχόν ατέλειες, ανωμαλίες ή άλλες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα δεδομένα.

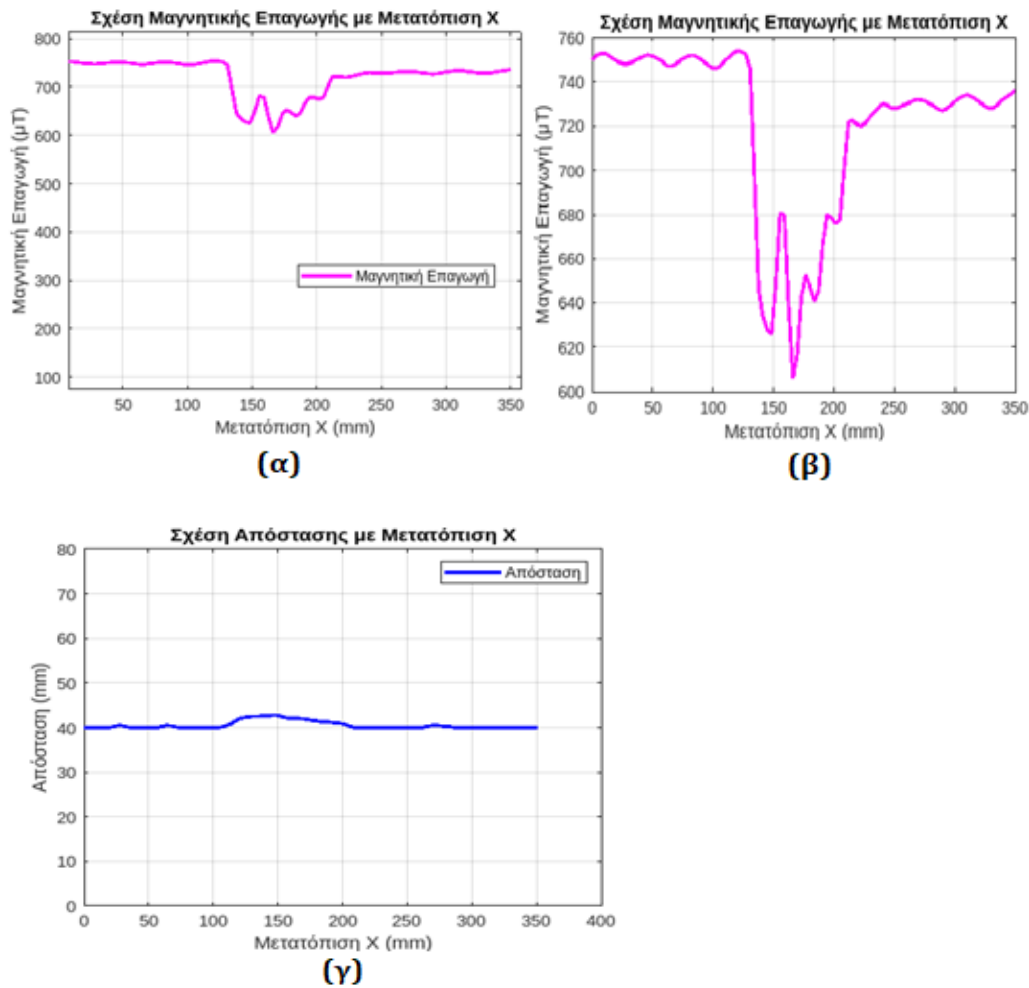
Στο κομμάτι του κώδικα, χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο κινούμενου μέσου όρου για την εξομάλυνση των μετρήσεων από τον αισθητήρα VL6180X. Αυτό το φίλτρο, επιτρέπει την απομάκρυνση των ακραίων τιμών και των διακυμάνσεων που μπορεί να προκαλέσει ο αισθητήρας, παρέχοντας έτσι ένα πιο σταθερό και αξιόπιστο αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια ακριβής μέτρηση της απόστασης και εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των δεδομένων που λαμβάνουμε.

Επιπλέον, προστέθηκαν και δύο μεταβλητές προσαρμογής για τον αισθητήρα PMW3901. Αυτές, επιτρέπουν να προσαρμόζονται οι μετρήσεις στο είδος του υλικού που εξετάζεται. Ανάλογα με το αν το υλικό είναι γυαλιστερό ή ματ, υπάρχει δυνατότητα να ρυθμιστούν οι παράμετροι για να ληφθούν υπόψη οι τυχόν ανακλάσεις του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, είμαστε σε θέση να προτιμήσουμε το σύστημά μας σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων μας.

Στις πρώτες εικόνες που ακολουθούν, θα υπάρχουν φωτογραφίες των δειγμάτων και αμέσως μετά θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε ένα από αυτά. Για όλα τα υλικά πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων, μια από αριστερά προς τα δεξιά και αντίστροφα, για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία της διάταξης. Τέλος, θα γίνονται παρατηρήσεις για τα αποτελέσματα. Οι τελικές γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται προέκυψαν μέσω του υπολογιστικού προγράμματος MATLAB.



*Εικόνα 4.1.1 Πρώτο εξεταζόμενο δείγμα*



Εικόνα 4.1.2: Η μετρούμενη μαγνητική επαγωγή του δείγματος συναρτήσει της μετατόπισης  $x$  (α), η μαγνητική επαγωγή σε μεγέθυνση γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης (β), η απόσταση των αισθητήρων από το δείγμα κατά τη σάρωσή του (γ).

Στο συγκεκριμένο δείγμα, οι μετρήσεις έγιναν κατά μήκος του υλικού. Πρόκειται για συγκολλημένο δείγμα, με τη συγκόλληση να εντοπίζεται και από τον VL6180X (Εικόνα 4.1.2 (γ) μπλε γραμμή), λόγω των αυξομειώσεων. Στην ίδια εικόνα, η περιοχή της συγκόλλησης εντοπίζεται και από το μαγνητικό πεδίο, το οποίο εμφανίζει πτώση, πράγμα το οποίο φαίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στη Εικόνα 4.1.2 (β). Αυτό συμβαίνει διότι η συγκόλληση προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού επομένως και της μαγνητικής επαγωγής.

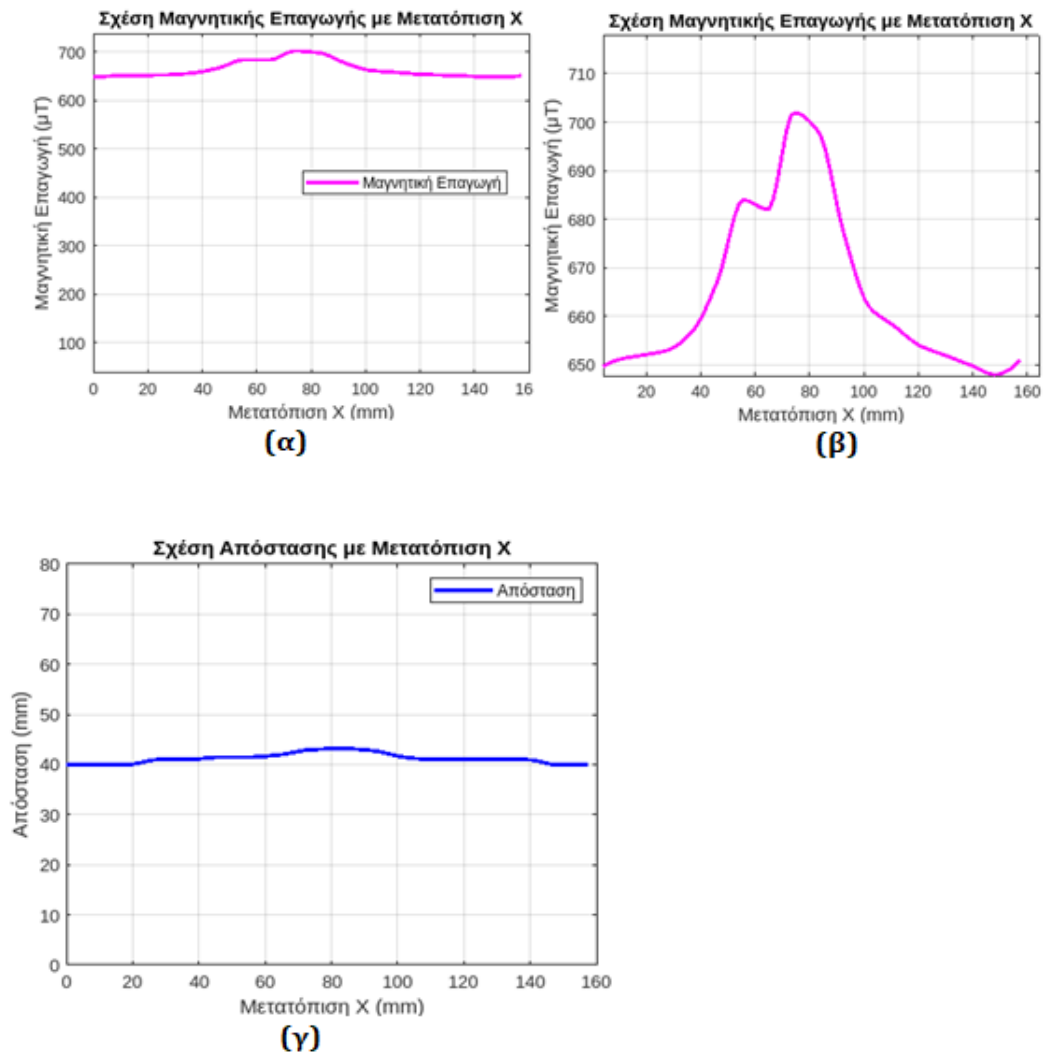
Στα σημεία του υλικού που δεν έχουν συγκόλληση, η μαγνητική επαγωγή είναι ουσιαστικά ομοιόμορφη και σταθερή.



*Εικόνα 4.1.3 Δεύτερο εξεταζόμενο δείγμα*

Το δεύτερο δείγμα φαίνεται στην Εικόνα 4.1.3, το οποίο εμφανίζει καμπυλότητα και έχει υποστεί συγκόλληση στο μέσον αυτού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σάρωση του δείγματος αυτού με τον αισθητήρα μετακινώντας τον από αριστερά προς τα δεξιά κατά μήκος του υλικού. Αντίστοιχα αποτελέσματα είχαμε και για την αντίθετη φορά.





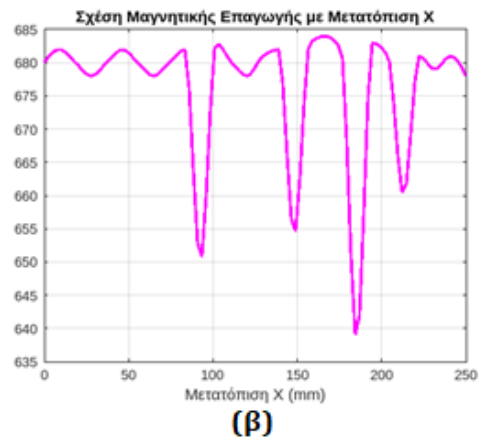
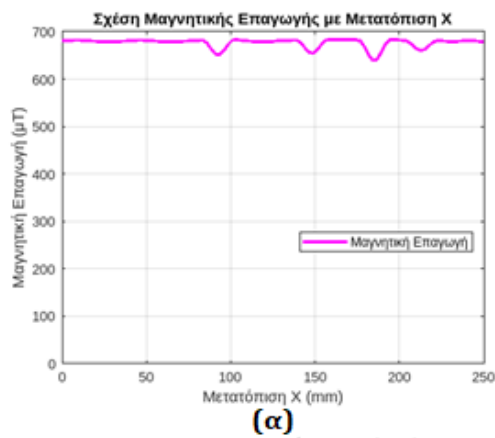
Εικόνα 4.1.4 Η μετρούμενη μαγνητική επαγωγή του δείγματος συναρτήσει της μετατόπισης  $x$  (α), η μαγνητική επαγωγή σε μεγέθυνση γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης (β), η απόσταση των αισθητήρων από το δείγμα κατά τη σάρωσή του (γ).

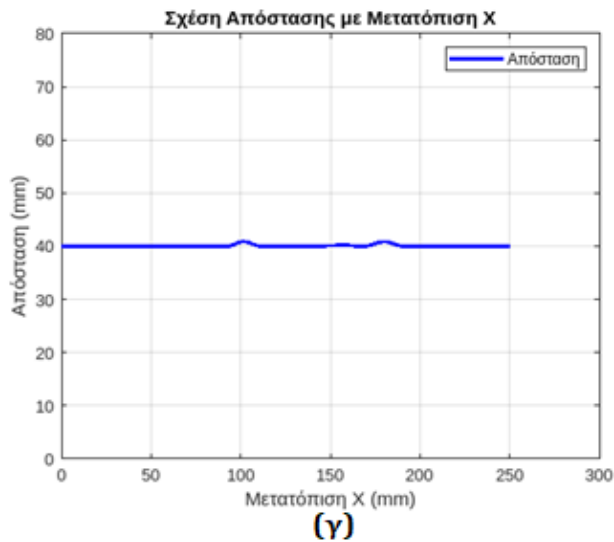
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, γίνεται αντιληπτό, από τη μέτρηση του αισθητήρα VL6180X πως η επιφάνεια του δείγματος δεν είναι επίπεδη. Στο κομμάτι της μαγνητικής επαγωγής, διαπιστώνεται μια αύξηση του μετρούμενου μεγέθους στο κέντρο του υλικού. Αυτό συμβαίνει διότι στο κέντρο του υλικού έχει επισυμβεί συγκόλληση, γεγονός που έχει επηρεάσει τις μαγνητικές γραμμές του υλικού στο σημείο αυτό.



Εικόνα 4.1.5 Δείγμα Ηλεκτρικού χάλυβα  $300 \times 30 \times 0.6 \text{ mm}^3$  (τρίτο δείγμα)

Το παραπάνω δείγμα (Εικόνα 4.1.5) είναι ένα φύλλο ηλεκτρικού χάλυβα με ορατά σημεία οξείδωσης.



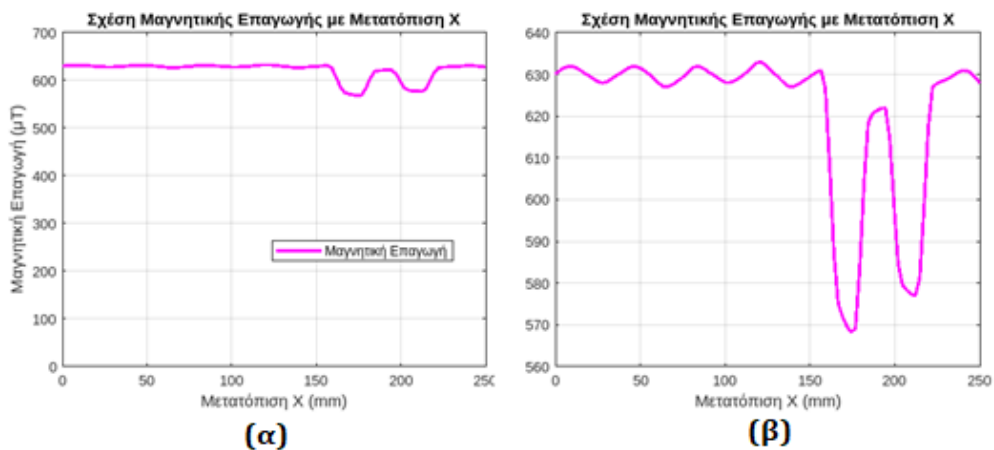


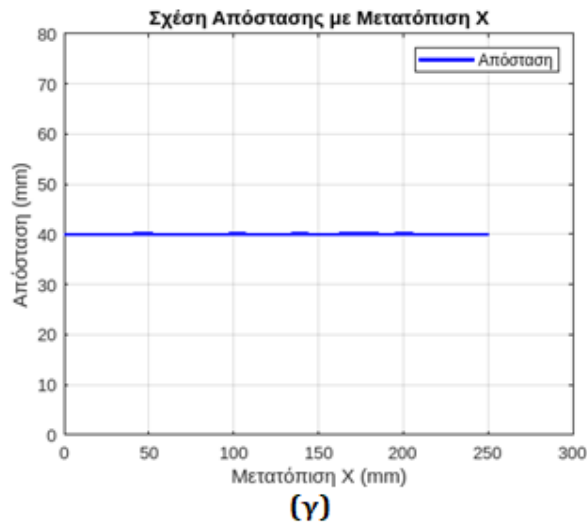
Εικόνα 4.1.6 Η μετρούμενη μαγνητική επαγωγή του δείγματος συναρτήσει της μετατόπισης  $x$  (α), η μαγνητική επαγωγή σε μεγέθυνση γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης (β), η απόσταση των αισθητήρων από το δείγμα κατά τη σάρωσή του (γ). Αποτελέσματα μετρήσεων για το δεύτερο δοκίμιο

Τα σημεία οξείδωσης εντοπίστηκαν από τον αισθητήρα Hall ως διακυμάνσεις στο μαγνητικό πεδίο. Είναι γεγονός πως η παρουσία οξειδώσεων μπορεί να προκαλέσει τοπικές αλλαγές στη μαγνητική επαγωγή, ανάλογα με την έκταση της οξείδωσης. Επομένως μέσω του αισθητήρα Hall γίνονται αντιληπτές οι μεταβολές που προκύπτουν τοπικά στην επαγωγή και την οξείδωση του υλικού.



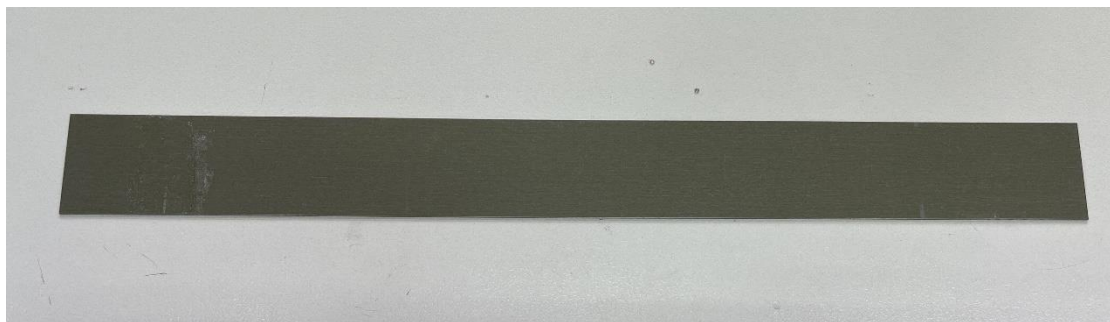
Εικόνα 4.1.7 Δείγμα Ηλεκτρικού χάλυβα  $300 \times 30 \times 0.6 \text{ mm}^3$ , το οποίο έχει υποστεί τοπική θέρμανση και απότομη ψύξη δημιουργώντας μία τεχνητή ατέλεια (τέταρτο δείγμα)



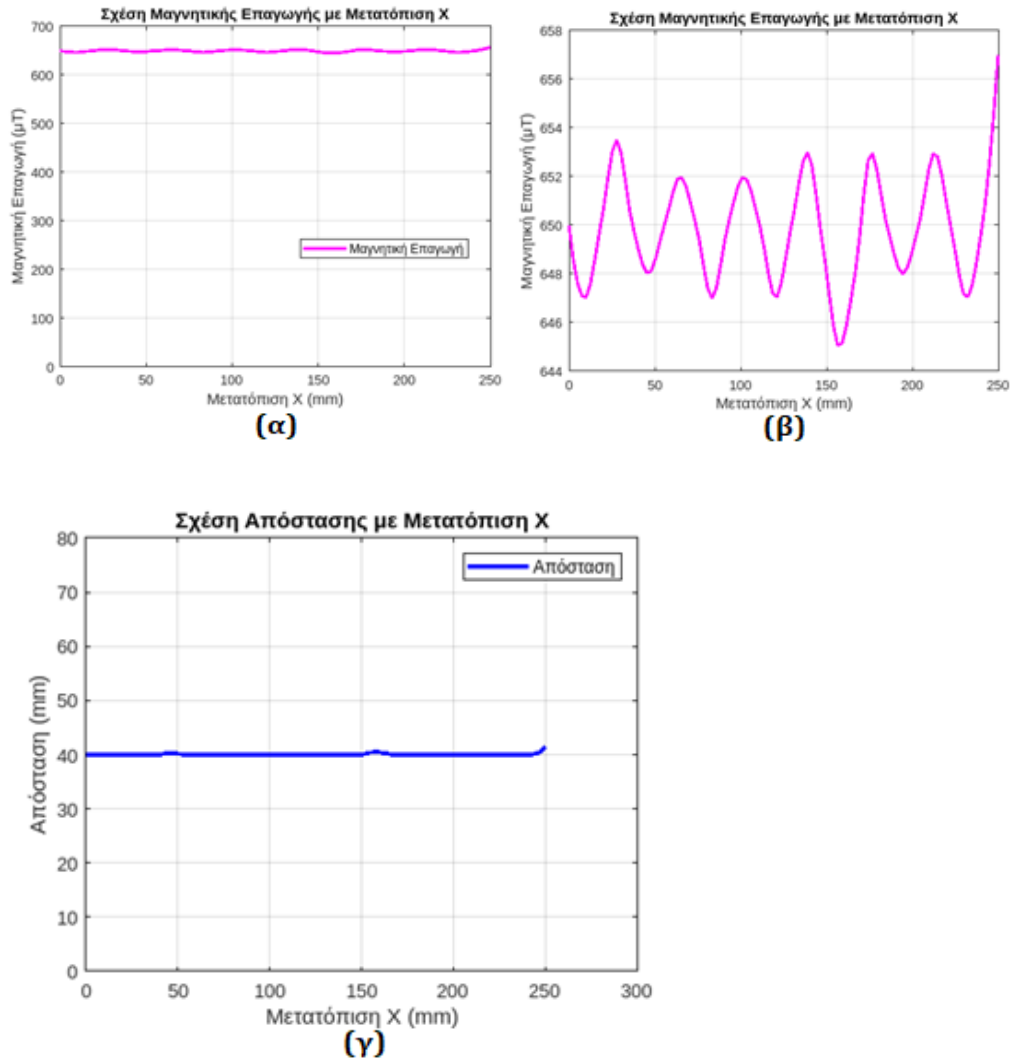


Εικόνα 4.1.8 Η μετρούμενη μαγνητική επαγωγή του δείγματος συναρτήσει της μετατόπισης  $x$  ( $\alpha$ ), η μαγνητική επαγωγή σε μεγέθυνση γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης ( $\beta$ ), η απόσταση των αισθητήρων από το δείγμα κατά τη σάρωσή του ( $\gamma$ ).

Στο συγκεκριμένο δείγμα (Εικόνα 4.1.7-4.1.8) προκύπτουν κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις. Πρώτον, το υλικό αυτό έχει υποστεί θέρμανση και ταχεία ψύξη σε δύο σημεία, με αποτέλεσμα το υλικό να σκεβρώσει τοπικά. Επομένως εκεί, ο VL6180X αντιλαμβάνεται σωστά τη μεταβολή στην επιφάνεια του υλικού. Ομοίως, το σήμα του αισθητήρα Hall εμφανίζει δύο διαδοχικές διακυμάνσεις στα σημεία αυτά. Η θέρμανση και η ταχεία ψύξη έχουν προκαλέσει αλλαγές στη μικροδομή του υλικού, για αυτό το λόγο παρατηρούνται τοπικές διακυμάνσεις στη μαγνητική επαγωγή στα σημεία αυτά.



Εικόνα 4.1.9 Δείγμα Ηλεκτρικού χάλυβα  $300 \times 30 \times 0.6 \text{ mm}^3$  (έκτο δείγμα)



Εικόνα 4.1.10 Η μετρούμενη μαγνητική επαγωγή του δείγματος συναρτήσει της μετατόπισης  $x$  (α), η μαγνητική επαγωγή σε μεγέθυνση γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης (β), η απόσταση των αισθητήρων από το δείγμα κατά τη σάρωσή του (γ).

Στο τελευταίο δείγμα (Εικόνα 4.1.9), το οποίο δεν έχει κάποια εμφανή ατέλεια, δεν εντοπίζονται διακυμάνσεις κατά τη μέτρηση της απόστασης του αισθητήρα από το υλικό. Αντίστοιχα, στο μαγνητικό πεδίο εμφανίζονται αμελητέες διακυμάνσεις, δεδομένου πως η μαγνητική επαγωγή του υλικού είναι σχετικά ομοιόμορφη κατά μήκος του.

Όπως σημειώθηκε και άνωθεν, η μείωση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να οφείλεται σε ατέλειες ή φθορές του υλικού, λόγω οξείδωσης ή μηχανικών τάσεων. Αυτές οδηγούν σε αλλαγές των μαγνητικών του ιδιοτήτων, οι οποίες γίνονται αντιληπτές μέσω των μετρήσεων των μαγνητικών αισθητήρων.

Εν κατακλείδι, μέσω της συσκευής αυτής και των μετρήσεων που έγιναν, μπορεί να εντοπιστεί η ακριβής θέση πιθανών δομικών ή γεωμετρικών ατελειών σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, μετρώντας τη μαγνητική επαγωγή και τη διακύμανσή του στα διάφορα σημεία του.

## 5. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στη συνολική αξιολόγηση της εργασίας. Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση του συστήματος, αναδεικνύοντας τα κυρία χαρακτηριστικά καθώς και τις προκλήσεις που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα εξετάσουμε τις πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις του συστήματος.

Αναπτύχθηκε λοιπόν, μια φορητή συσκευή μη καταστροφικού ελέγχου συγκεκριμένα για τα φερρομαγνητικά υλικά, η οποία επιτρέπει την αξιολόγηση και την παρακολούθηση της υγείας αυτών των υλικών, δίχως να προκαλείται κάποια φθορά στα εξεταζόμενα δείγματα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, έδειξαν πως η διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου στο εργαστήριο, λειτούργησε σωστά, αφού έγιναν αντιληπτά όλα τα ελαττώματα των εξεταζόμενων υλικών.

Συγκεκριμένα, ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν την επιτυχή υλοποίηση του συστήματος περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Λειτουργικότητα Συστήματος:** Το σύστημα που αναπτύχθηκε εκτελεί τις λειτουργίες του με επιτυχία, παρέχοντας τις απαιτούμενες μετρήσεις. Μέσω της διάταξης Yoke και του αισθητήρα Hall, εντοπίζονται οι όποιες μεταβολές του μαγνητικού πεδίου. Ταυτόχρονα, με τον αισθητήρα VL6180X ανακαλύπτονται οι τυχόν ανωμαλίες στην επιφάνεια του υλικού και ελέγχεται συνεχώς η απόσταση του αισθητήρα από το δοκίμιο.
- **Ακρίβεια και Αξιοπιστία:** Οι μετρήσεις που λάβαμε είναι ακριβείς και αξιόπιστες, επιτρέποντας να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα και να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα. Ειδικότερα μέσω του PMW3901, γίνεται δυνατός ο ακριβής εντοπισμός της θέσης της διάταξης πάνω στο εξεταζόμενο υλικό.

- Ευελιξία: Η σχεδίαση του συστήματος είναι ευέλικτη, φορητή και μπορεί να προσαρμοστεί ή να επεκταθεί για να ανταποκριθεί σε μελλοντικές ανάγκες ή απαιτήσεις.

Γενικότερα στην πορεία της εργασίας παρουσιάστηκαν κάποια προβλήματα. Αντιμετωπίστηκαν προκλήσεις στην ανάπτυξη του λογισμικού και την ενσωμάτωση των διαφόρων αισθητήρων και περιφερειακών συσκευών, καθώς απαιτούνταν σωστή διαχείριση των δεδομένων και ευέλικτη προγραμματιστική προσέγγιση. Επιπροσθέτως, κάποια ζητήματα προέκυψαν κατά τη διαδικασία κατασκευής της θήκης, καθώς απαιτούνταν ακριβής σχεδιασμός για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με τα υπόλοιπα μέλη του συστήματος καθώς και για να μην επηρεάζει τις μετρήσεις.

Ένα από τα βασικά προβλήματα όμως που αντιμετωπίστηκαν στην εργασία, ήταν η ανάκλαση του φωτός στις γυαλιστερές επιφάνειες. Η ανάκλαση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μη ακριβείς μετρήσεις και ενδεχομένως σε απώλεια δεδομένων. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, ενσωματώθηκαν στον κώδικα της συσκευής παράμετροι που επιτρέπουν στον χρήστη να ορίσει τις μεταβλητές ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας που σαρώνει, είτε είναι γυαλιστερή είτε ματ. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και να παρέχει πιο ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις, ανεξαρτήτως του τύπου της επιφάνειας που εξετάζεται. Όλα αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς, καθώς καταπολεμήθηκαν από τις καλύτερες δυνατές λύσεις για τη διεκπεραίωσή τους.

Μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας εργασίας μπορούν να περιλαμβάνουν την περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων καθώς και στην επέκταση της χρήσης της διάταξης σε διαφορετικά υλικά. Ακόμα μία βελτίωση της διάταξης, είναι η ενεργειακή αυτονομία της, μέσω κάποιων συστημάτων συγκομιδής ενέργειας (energy harvesting). Με αυτήν την τεχνική, μας δίνεται η ευκαιρία για τη δημιουργία μιας συσκευής με αισθητήρες που έχουν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία της υπό εξέταση περιοχής και να λαμβάνουν μετρήσεις με τον επιθυμητό ρυθμό δειγματοληψίας, δίχως να είναι απαραίτητη η ανθρώπινη



παρέμβαση για τον συνεχή έλεγχο των αισθητήρων, την απόκτηση των μετρήσεων ή την παροχή τροφοδοσίας σε αυτούς.

Προς αυτό το σκεπτικό, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε έναν ακόμα αισθητήρα, ο οποίος θα μπορεί να αντιλαμβάνεται αν το υλικό είναι γυαλιστερό ή όχι, ώστε αυτόματα να ρυθμίζει τις τιμές των συντελεστών προσαρμογής. Τέλος, η ανάπτυξη ενός χρήσιμου και φιλικού προς τον χρήστη διαχειριστικού περιβάλλοντος θα μπορούσε να βελτιώσει και να διευκολύνει την εμπειρία του χρήστη.

Συνοψίζοντας, η εργασία απέδειξε ότι η χρήση αισθητήρων όπως ο PMW3901, ο VL6180X και ο Hall σε συνδυασμό με μικροελεγκτές, όπως ο ESP32, μπορεί να οδηγήσει σε αξιόπιστες λύσεις για μη καταστροφικούς ελέγχους και εφαρμογές παρακολούθησης υγείας υλικών. Παράλληλα, η ανάπτυξη ενός τέτοιου φορητού συστήματος, που επιτρέπει τη μέτρηση και τον έλεγχο των υλικών σε πραγματικό χρόνο και σε ποικίλες συνθήκες, αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο.



## Βιβλιογραφία

- [1] R. T. H. a. G. M. Islas, "The induced magnetic field.", *Accounts of Chemical Research* 45.2, 2021.
- [2] C. Kittel, "Theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic", *Physical Review* 70.5-6, 1992.
- [3] Δ. Χασάπης, "Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και αυτεπαγωγή.", Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015.
- [4] B. D. a. C. D. G. Cullity, "Introduction to magnetic materials", John Wiley & Sons, 2011.
- [5] A. Goldman, "Handbook of modern ferromagnetic materials. Vol. 505. Springer Science & Business Media" Vol. 505, Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] J. Harada, «Plastic/ferroelectric molecular crystals: Ferroelectric performance in bulk polycrystalline forms,» *APL materials*, 2021.
- [7] Muljadi, «Preparation and Characterization of 5 wt.% Epoxy Resin Bonded Magnet for Micro Generator Application,» *Energy Procedia* 68, 2015.
- [8] P. Cawley, «"Non-destructive testing—current capabilities and future directions." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*,» *Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 215.4, 2001.

- [9] J. P. D. C. Jiles, "Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels," , Journal of Physics D: Applied Physics, 1998.
- [10] J. Blitz, Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing, Springer Science & Business Media, 2012.
- [11] Σ. Αγγελόπουλος., ««Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων και διατάξεων χαρακτηρισμού των, με χρήση μαγνητικών φαινομένων»,» 2018.
- [12] T. W. Krause, «A typical U-core surface magnetic Barkhausen noise probe.,» Measurement Science and Technology, 2007.
- [13] D. C. Jiles και W. Kiarie, «An Integrated Model of Magnetic Hysteresis, the Magnetomechanical Effect, and the Barkhausen Effect,» *IEEE Transactions on Magnetics* 57.2, 2020.
- [14] A. a. C. D. N. D'Amico, «"A contribution on some basic definitions of sensors properties.",» *IEEE Sensors Journal* 1.3, 2001.
- [15] T. Kucic, «Simple working principles of electrical sensor systems on vessels,» 2016.
- [16] J. W. Garden, ««Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές»,» Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [17] J. a. A. R. Vetelino, «"Introduction to sensors.",» *CRC press*, 2017.
- [18] A. K. S. G. E. Hristoforou, «"Magnetic Sensors: Taxonomy, Applications, and New Trends",» *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019.

- [19] A. a. C. G. Vettoliere, Highly Sensitive Tunable Magnetometer Based on Superconducting Quantum Interference Device, *Sensors* 23.7, 2023.
- [20] X. L. H. Z. Songrui Wei, «Recent Progress of Fluxgate Magnetic Sensors: Basic Research and Application,» *Sensors* 21.4, 2020.
- [21] E. Hristoforou, «"Non-destructive evaluation distribution sensors based on magnetostrictive delay lines.",» *Sensors and Actuators A: Physical* 92, 2001.
- [22] Y. Z. H. K. a. K. S. Xin Gao, «Effective suppression of beam divergence for a high-power laser diode bar by an external-cavity technique,» *Optics letters* 29.4, 2004.
- [23] B. Cao, «Fundamentals of magnetic sensors: principles of operation for AMR sensors,» *Sensors and Actuators A: Physical* 312, 2018.
- [24] L. Jamilpanah, «Proposing magnetoimpedance effect for neuromorphic computing,» *Scientific Reports* 13.1, 2023.
- [25] E. Ramsden, "Hall-effect sensors: theory and application.", Elsevier, 2011.
- [26] «Hall Effect measurement setup for Electrons,» Wikipedia, 2015.
- [27] R.-N. Yang, «Adaptive Blind Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems Based on PARAFAC,» *Wireless Communications and Mobile Computing* 2020.1, 2020.
- [28] K. S. C. T. D. & H. E. Kosmas, «"Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors.",» *Journal of materials processing technology* 161.1-2, 2005.

- [29] G. a. B. W. Gridling, "Introduction to microcontrollers.", Vienna University of Technology Institute of Computer Engineering Embedded Computing Systems Group, 2007.
- [30] Avaq, «7 Different Types of Integrated Circuit,» 2023. [Ηλεκτρονικό].
- [31] R. MISCHIANTI, «ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs,» Renzo Mischianti, 2021.
- [32] J. Mankar, «"Review of I2C protocol.",» International Journal of Research in Advent Technology 2.1, 2014.
- [33] A. Matrosoy, «Breaking Through Another Side: Bypassing Firmware Security Boundaries,» Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Attacks and Solutions in Hardware Security Workshop, 2019.
- [34] A. K. Oudjida, «FPGA implementation of i2C & SPI protocols: A comparative study,» 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems-(ICECS 2009)., 2009.
- [35] «Spi protocol in AD9361 and ADRV9002,» Typhoon HIL, 2023. [Ηλεκτρονικό].
- [36] F. Leens, «"An introduction to I 2 C and SPI protocols.",» IEEE Instrumentation & Measurement Magazine 12.1, 2009.
- [37] «SPI 8-bit circular transfer,» Wikipedia, 2007.
- [38] Matthew, «Teensy and SSI (Synchronous Serial Interface) encoder,» 2019. [Ηλεκτρονικό].

- [39] «A3144 Hall effect Sensor,» Components101, 2018. [Ηλεκτρονικό].
- [40] D. K. a. V. D. Nims, "Magnetic sensor for nondestructive evaluation of deteriorated prestressing strand.", University of Toledo, 2021.
- [41] D. Nims, «Flux lines through the steel specimen for a yoke shaped electromagnet.,» *Magnetic Sensor for Nondestructive Evaluation of Deteriorated Prestressing Strand – Phase II Co-PI*, 2019.
- [42] K. a. Y. A. P. K. Vamsi Bhargav, «"Distance Estimation of Two Distance Sensors.",» Institute of Technology Karlskrona, Sweden, 2022.
- [43] «Basic time-of-flight principles used in laser range finding.,» Lumispot, 2023.
- [44] M. a. A. K. Keller, «"Real-time simulation of time-of-flight sensors.",» Institute for Vision and Graphics, University of Siegen, 2009.
- [45] «Proximity and ambient light sensing (ALS) module,» STMicroelectronics, 2018.
- [46] S. S. a. J. L. B. Beauchemin, "The computation of optical flow.".
- [47] Wikipedia, «Optical flow,» 2012.
- [48] N. a. R. B. Sharmin, «"Optimal filter estimation for Lucas-Kanade optical flow.",» Sensors 12.9, 2012.
- [49] «Datasheet Flow breakout board,» *Datasheet Flow breakout board* , 2020.

[50] Ι. Ρ. Ι. Τσαλαμέγκας, «Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, Τόμος Α». Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.

[51] Α. Κ. Ρ. Ε. Τ. α. Ε. Η. Ρ. Vourna, «“A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels,”»,» NDT & E International 71, 2015.





## Παράρτημα

```
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_VL6180X.h"
#include "Bitcraze_PMW3901.h"

Adafruit_VL6180X vl = Adafruit_VL6180X();
Bitcraze_PMW3901 flow(5);

// VL6180X
const int numReadings = 5;
int readings[numReadings];
int currentIndex = 0;
float smoothedAverage = 0.0;
const float smoothingFactor = 0.2;

// PMW3901
float initialX = 0.0;
float initialY = 0.0;
float calibrationX = 0.08; //Αρχικός συντελεστής προσαρμογής X
float calibrationY = 0.08; //Αρχικός συντελεστής προσαρμογής Y
float maxAllowableDisplacement = 200.0;
bool calibrationChanged = false;

// Hall
const byte Hall_pin = A0;
const int Hall_offset = -125;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Αισθητήρας VL6180X
  if (!vl.begin()) {
    Serial.println("Failed to find VL6180X sensor");
    while (1) {
      delay(10);
    }
  }
  Serial.println("VL6180X sensor found!");

  // Αισθητήρας PMW3901
  if (!flow.begin()) {
    Serial.println("Failed to initialize PMW3901 sensor");
    while (1) { }
  }
  Serial.println("PMW3901 sensor initialized!");
}

void changeCalibration() {
  if (Serial.available() > 0) {
    char userValue = Serial.read();

    if (userValue == '0') {
      calibrationX = 0.07; // Αλλαγή συντελεστών προσαρμογής
                           // για μη γυαλιστερές επιφάνειες
      calibrationY = 0.07;
      calibrationChanged = false;
    } else if (userValue == '1') {
      calibrationX = 0.09; // Αλλαγή συντελεστών προσαρμογής
                           // για γυαλιστερές επιφάνειες
      calibrationY = 0.09;
    }
  }
}
```

```

        calibrationChanged = false;
    }
}

void Loop() {
    // Hall
    // Μέτρηση της τιμής από τον αισθητήρα και βαθμονόμηση
    int Hall_value = analogRead(Hall_pin) - Hall_offset;
    // Μετατροπή της βαθμονομημένης τιμής σε τάση
    float Hall_voltageValue = Hall_value * 3300.0 / 4096.0;
    Serial.print("Hall voltage: ");
    Serial.println(Hall_voltageValue);

    // VL6180X
    float lux = vl.readLux(VL6180X_ALS_GAIN_5);

    uint8_t range = vl.readRange();
    uint8_t status = vl.readRangeStatus();

    if (status == VL6180X_ERROR_NONE) {
        Serial.print("Range: ");
        Serial.println(range);

        readings[currentIndex] = range;
        currentIndex = (currentIndex + 1) % numReadings;

        int total = 0;
        for (int i = 0; i < numReadings; i++) {
            total += readings[i];
        }
        float average = total / numReadings;

        // Υπολογισμός κινούμενου μέσου όρου
        smoothedAverage = smoothingFactor * average + (1 -
        smoothingFactor) * smoothedAverage;

        Serial.print("Smoothed Average Range: ");
        Serial.println(smoothedAverage);
    } else {
        Serial.println("Error reading range");
    }

    // PMW3901
    int16_t deltaX, deltaY;
    flow.readMotionCount(&deltaX, &deltaY);

    float displacementX = deltaX * calibrationX; // προσαρμογή
    της μετατόπισης με βάση τον συντελεστή προσαρμογής
    float displacementY = deltaY * calibrationY;

    if (abs(displacementX) < maxAllowableDisplacement &&
    abs(displacementY) < maxAllowableDisplacement) {
        initialX += displacementX;
        initialY += displacementY;
    }

    Serial.print("X (mm): ");
    Serial.print(initialX, 2);
    Serial.print(", Y (mm): ");
    Serial.print(initialY, 2);
    Serial.print(", CalibrationX: ");
    Serial.println(calibrationX, 2);
}

```

```
changeCalibration(); // Έλεγχος για τους συντελεστές  
delay(500);          προσαρμογής  
}
```