



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τίτλος

Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης και δίκτυο των πραγμάτων σε πλοία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Νικόλαος Μανωλιάς

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2026



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τίτλος

Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης και δίκτυο των πραγμάτων σε πλοία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μανωλιάς Νικόλαος Δημήτριος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Φεβρουαρίου 2026.

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

.....
Σπυρίδων Αγγελόπουλος
Διδάκτωρ Ηλ. Μηχανικός

.....
Κλειώ Βόσσου
Διδάκτωρ Μηχανικός

.....
Δημήτριος Νικόλαος Μανωλιάς

Διπλωματούχος Μηχανικός Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής Π.Α.Δ.Α.

Copyright © Δημήτριος Μανωλιάς, 2026.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και εφαρμογή αισθητήρων ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) σε συνδυασμό με τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) για την ενίσχυση της παρακολούθησης, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας στον ναυτιλιακό τομέα. Αρχικά, παρουσιάζονται οι θεωρητικές αρχές λειτουργίας των αισθητήρων AMR, οι οποίοι βασίζονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης υπό την επίδραση μαγνητικών πεδίων και διακρίνονται για την υψηλή ευαισθησία, τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και το μικρό τους μέγεθος.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η ενσωμάτωση των αισθητήρων AMR με την πλατφόρμα ESP32, η οποία αξιοποιείται για την επεξεργασία, τη διαχείριση και τη μετάδοση δεδομένων μέσω σύγχρονων δικτύων. Αναλύεται ο ρόλος του IoT στη ναυτιλία, με έμφαση στην προγνωστική συντήρηση, την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον μη καταστροφικό έλεγχο (NDT), οι οποίοι αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ασφαλή και βιώσιμη λειτουργία πλοίων και θαλάσσιων υποδομών.

Στο τεχνικό μέρος της εργασίας υλοποιείται ένα λειτουργικό σύστημα αισθητήρα AMR με δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών μαγνητικού πεδίου και πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα των αισθητήρων AMR να συμβάλουν στη συλλογή χρήσιμων μετρήσεων για εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου και έξυπνων ναυτιλιακών συστημάτων.

Συνολικά, η εργασία συνδέει τη θεωρητική ανάλυση με την πρακτική υλοποίηση, αναδεικνύοντας την αξία των αισθητήρων AMR στο πλαίσιο του IoT και θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων στον θαλάσσιο χώρο.

Abstract

This thesis investigates the integration of anisotropic magnetoresistance (AMR) sensors within Internet of Things (IoT) frameworks for maritime applications. The work begins with an examination of the operating principles, performance characteristics and advantages of AMR sensors, which exploit variations in electrical resistance under magnetic fields to achieve high-precision measurement. Their compact form factor, low energy consumption and robustness render them suitable for demanding marine environments.

A microcontroller platform based on the ESP32 is employed for data acquisition, processing and wireless communication, forming the technological basis of the proposed system. The experimental component includes the assembly, programming and laboratory evaluation of a complete sensing module, aiming to detect magnetic field variations associated with structural or operational conditions on ships.

The study further discusses the relevance of non-destructive testing (NDT) techniques in maritime applications, highlighting how sensor-based approaches enable condition assessment without impairing the integrity or availability of critical assets. Finally, the potential of IoT technologies for remote monitoring, data analysis and decision support is addressed in the context of enhanced safety, efficiency and maintenance planning in the maritime sector.

Overall, the thesis bridges theoretical analysis with practical implementation, presenting a contemporary example of sensor and IoT technologies applied to the marine domain.

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενό της αφορά τη μελέτη και την πειραματική αξιολόγηση αισθητήρων μαγνητοαντίστασης (AMR) σε συνδυασμό με τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) για ναυτιλιακές εφαρμογές. Η έρευνα αυτή στοχεύει στη συμβολή στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογικών λύσεων που μπορούν να βελτιώσουν την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των πλοίων, ενισχύοντας την ασφάλεια και τη συντήρησή τους.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Η ολοκλήρωση της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη συνεχή καθοδήγηση του Διδάκτορα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, Σπυρίδωνα Αγγελόπουλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφερε. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλα τα μέλη των διδακτορικών του εργαστηρίου για τη συνεργασία και τη στήριξή τους.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της εργασίας, καθώς και για τις επισημάνσεις και τα σχόλιά τους.

Θα ήθελα ακόμη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους φίλους και συναδέλφους μου για την αλληλοϋποστήριξη, τις ιδέες και τις συζητήσεις που με ενθάρρυναν κατά τη διάρκεια της συγγραφής.

Τέλος, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, η οποία με στήριξε αδιάκοπα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, προσφέροντάς μου δύναμη, κατανόηση και κίνητρο για να ολοκληρώσω αυτήν τη διαδρομή.

Αθήνα, Ιανουάριος 2026

Δημήτριος Νικόλαος Μανωλιάς

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	iii
Abstract	iv
Πρόλογος – Ευχαριστίες	v
Πίνακας περιεχομένων	vii
Ευρετήριο Εικόνων	ix
1 Θεωρητικό μέρος.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.1.1 Ο ρόλος των αισθητήρων AMR στις Ναυτιλιακές Εφαρμογές	1
1.1.2 Η εμφάνιση του IoT στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία.....	2
1.1.3 Σημασία των Μη Καταστροφικών Δοκιμών στις Ναυτιλιακές Επιχειρήσεις.....	2
1.1.4 Προκλήσεις και Περιορισμοί Υπαρχόντων Συστημάτων	3
1.1.5 Γεφύρωση του χάσματος με αισθητήρες AMR	3
1.1.6 Στόχοι και Πεδίο Έρευνας.....	4
1.1.7 Συμβολή στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία.....	4
1.1.8 Δομή της Μελέτης.....	4
1.2 Θεωρητική Ανάλυση Αισθητήρων Μαγνητοαντίστασης (AMR)	5
1.2.1 Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης	5
1.2.2 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά του AMR αισθητήρα	9
1.2.3 Εφαρμογές του AMR αισθητήρα στη ναυτιλία.....	13
1.3 Οι Υπόλοιποι Αισθητήρες στο Σύστημα	18
1.3.1 Αισθητήρες μέτρησης απόστασης.....	18
1.3.2 Οπτικοί αισθητήρες μέτρησης θέσης/μετατόπισης	20
1.3.3 Συνεργασία αισθητήρων στο πλαίσιο του ESP32	23
1.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	27
1.4.1 Η υπάρχουσα κατάσταση στην τεχνολογία αισθητήρων.....	27

1.4.2	Έρευνα αγοράς αισθητήρων.....	30
1.4.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υφιστάμενων λύσεων.....	32
1.5	Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος και οι Εφαρμογές του	35
1.5.1	Τι είναι ο μη καταστροφικός έλεγχος	35
1.5.2	Εφαρμογές NDT στη ναυτιλία.....	37
1.5.3	Πλεονεκτήματα του NDT σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους	40
1.6	Συσχέτιση με το Internet of Things (IoT) και τα Πλοία.....	42
1.6.1	Το IoT στη ναυτιλία	42
1.6.2	Ο ρόλος του AMR αισθητήρα στο IoT	46
1.6.3	Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές	48
2	Πειραματικό μέρος.....	51
2.1.	Ανάλυση και επιλογή αισθητήρων μαγνητικού πεδίου.....	52
2.2.	Συνδεσμολογία και υλοποίηση του συστήματος μέτρησης.....	55
2.3.	Προγραμματισμός αισθητήρων και συλλογή δεδομένων.....	62
2.4.	Σύνδεση αισθητήρων σε Πλακέτα (Perfboard).....	69
2.5.	Κατασκευή περιβλήματος με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή.....	71
2.6.	Πειραματική διαδικασία λήψης μετρήσεων.....	73
2.7	Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα.....	75
3	Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία.....	81
4	Βιβλιογραφία.....	83

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της ανισότροπης μαγνητικής αντίστασης (AMR) (Yang, & Zhang, 2021).	9
Εικόνα 2: Φαινόμενο AMR και μαγνήτιση σε αντιστάσεις Permalloy (Lenz & Edelstein, 2006).....	12
Εικόνα 3: Working Principle of an Ultrasonic Distance Sensor (Deepak, Bahubalendruni, & Biswal, 2016).....	20
Εικόνα 4: Τριγωνισμός λέιζερ για μέτρηση οπτικής μετατόπισης (Bestech Australia, 2025)	21
Εικόνα 5: Ενσωμάτωση αισθητήρα εφέ Hall με ESP32 και ένδειξη LED (DIYIOT, 2020).....	25
Εικόνα 6: Επισκόπηση διαφορετικών τύπων αισθητήρων (DZone, 2021)	29
Εικόνα 7: Οικοσύστημα IoT στην Ναυτιλία (Durlík et al., 2023)	45
Εικόνα 8: Συνδεσμολογία αισθητήρα GY-271.	57
Εικόνα 9: Συνδεσμολογία αισθητήρα GY-511	58
Εικόνα 10: Συνδεσμολογία αισθητήρα LIS3MDL	59
Εικόνα 11: Συνδεσμολογία αισθητήρα LSM303AGR	60
Εικόνα 12: Συνδεσμολογία αισθητήρα MMC5983MA.....	61
Εικόνα 13: Κόλληση των εξαρτημάτων στην πλακέτα.....	70
Εικόνα 14: Σχέδιο καπακιού για τρισδιάστατη εκτύπωση.....	72
Εικόνα 15: Σχέδιο περιβλήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση.....	72
Εικόνα 16: Εκτυπωμένα τα σχεδιασμένα αντικείμενα	73
Εικόνα 17: Μεταλλικό έλασμα με τοπική θερμική καταπόνηση	75
Εικόνα 18: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα GY-271	76
Εικόνα 19: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα GY-511	77

<i>Εικόνα 22: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα LIS3MDL.....</i>	<i>77</i>
<i>Εικόνα 21: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα LSM303AGR</i>	<i>78</i>
<i>Εικόνα 22: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα MMC5983MA</i>	<i>78</i>

1 Θεωρητικό μέρος

1.1 Εισαγωγή

Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει μεταμορφώσει διάφορους κλάδους, με τον ναυτιλιακό τομέα να μην αποτελεί εξαίρεση. Καθώς οι παγκόσμιες απαιτήσεις ναυτιλίας αυξάνονται, η υιοθέτηση έξυπνων τεχνολογιών καθίσταται επιτακτική για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ασφάλειας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Ένα από τα βασικά στοιχεία που καθοδηγούν αυτόν τον μετασχηματισμό είναι η ενσωμάτωση αισθητήρων σε θαλάσσια συστήματα, ιδιαίτερα ανισότροπων αισθητήρων μαγνητοαντίστασης (AMR). Αυτοί οι αισθητήρες, γνωστοί για την ευαισθησία και την ακρίβειά τους, παίζουν καθοριστικό ρόλο σε εφαρμογές όπως η πλοήγηση, οι ψηφιακές πυξίδες και οι μη καταστροφικές δοκιμές (NDT). Σε συνδυασμό με τις δυνατότητες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), οι αισθητήρες AMR παρουσιάζουν μια μεταμορφωτική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων στις θαλάσσιες επιχειρήσεις (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Hiekata et al., 2021).

1.1.1 Ο ρόλος των αισθητήρων AMR στις Ναυτιλιακές Εφαρμογές

Οι αισθητήρες AMR αξιοποιούν το φαινόμενο της ανισότροπης μαγνητοαντίστασης, όπου η ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού αλλάζει ως απόκριση σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την ακριβή ανίχνευση μαγνητικού πεδίου, καθιστώντας τους αισθητήρες AMR ιδανικούς για ναυτιλιακές εφαρμογές. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες όπως οι αισθητήρες φαινομένου Hall, οι αισθητήρες AMR προσφέρουν βελτιωμένη ευαισθησία, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και συμπαγή σχέδια, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας σε περιβάλλοντα περιορισμένου χώρου όπως τα πλοία (Ripka et al., 2014). Η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα πλοήγησης, συμπεριλαμβανομένων των ψηφιακών πυξίδων και συστημάτων

αυτόματου πιλότου, εξασφαλίζει ακριβή κατεύθυνση και τοποθέτηση, ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλές μαγνητικές παρεμβολές (Wu et al., 2021).

1.1.2 Η εμφάνιση του IoT στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία υιοθετεί ολοένα και περισσότερο τεχνολογίες IoT για τη βελτίωση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας. Το IoT επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, την ανάλυση και την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και συστημάτων, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, τα δίκτυα με δυνατότητα IoT μπορούν να παρακολουθούν τα μηχανήματα των πλοίων και τη δομική υγεία, ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας και το κόστος συντήρησης (Gerakoudi, Kokosalakis. & Stavroulakis, 2024). Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR σε πλαίσια IoT ενισχύει τη λειτουργικότητά τους, επιτρέποντας απρόσκοπτη επικοινωνία και προηγμένα αναλυτικά στοιχεία, τα οποία είναι απαραίτητα για την προγνωστική συντήρηση και την επίγνωση της κατάστασης στις θαλάσσιες επιχειρήσεις (Thombre et al., 2020).

1.1.3 Σημασία των Μη Καταστροφικών Δοκιμών στις Ναυτιλιακές Επιχειρήσεις

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) είναι μια κρίσιμη πτυχή των θαλάσσιων επιχειρήσεων, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την ασφάλεια των πλοίων χωρίς να διακυβεύεται η λειτουργικότητά τους. Τεχνικές όπως η δοκιμή δινορευμάτων και η παρακολούθηση ακουστικών εκπομπών βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε προηγμένους αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων AMR και γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) (Rifai et al., 2016). Αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν μετρήσεις υψηλής ανάλυσης δομικών ελαττωμάτων, διάβρωσης και κόπωσης, επιτρέποντας τον έγκαιρο εντοπισμό και την προληπτική συντήρηση. Η χρήση αισθητήρων AMR σε εφαρμογές NDT έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην

ενίσχυση της ακρίβειας της επιθεώρησης και στη μείωση των λειτουργικών κινδύνων (Hassani & Dackermann, 2023; Mukherjee et al., 2020).

1.1.4 Προκλήσεις και Περιορισμοί Υπαρχόντων Συστημάτων

Ενώ τα τρέχοντα συστήματα αισθητήρων προσφέρουν σημαντικές προόδους, δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανίχνευσης θέσης και δομικής παρακολούθησης συχνά στερούνται την ακρίβεια και την ευρωστία που απαιτείται σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Ζητήματα όπως η ευαισθησία σε μαγνητικές παρεμβολές, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και η περιορισμένη επεκτασιμότητα εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτησή τους. Επιπλέον, οι μοναδικές προκλήσεις της ναυτιλιακής βιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένων των σκληρών περιβαλλοντικών συνθηκών και της ανάγκης για συνεχή παρακολούθηση, απαιτούν την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων και αποτελεσματικών συστημάτων αισθητήρων (Eslamlou et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

1.1.5 Γεφύρωση του χάσματος με αισθητήρες AMR

Οι μοναδικές ιδιότητες των αισθητήρων AMR τους τοποθετούν ως μια ανώτερη εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Η ικανότητά τους να λειτουργούν σε δυναμικά μαγνητικά περιβάλλοντα, σε συνδυασμό με την υψηλή ευαισθησία και το συμπαγές μέγεθος, τα καθιστά ιδανικά για ναυτιλιακές εφαρμογές. Επιπλέον, η συμβατότητά τους με τα πλαίσια IoT ενισχύει τις δυνατότητές τους, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση και την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες AMR που είναι ενσωματωμένοι με συστήματα IoT μπορούν να παρέχουν συνεχή ανατροφοδότηση για τη ναυσιπλοΐα του πλοίου, την απόδοση των μηχανημάτων και τη δομική ακεραιότητα, ενισχύοντας μια προληπτική προσέγγιση στη συντήρηση και την ασφάλεια (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019; Kamolov & Park, 2019).

1.1.6 Στόχοι και Πεδίο Έρευνας

Αυτή η μελέτη στοχεύει να διερευνήσει το ρόλο των αισθητήρων AMR σε ναυτιλιακές εφαρμογές, με έμφαση στην ενσωμάτωσή τους σε συστήματα IoT και τη χρήση τους σε NDT. Το θεωρητικό πλαίσιο θα περιλαμβάνει μια εις βάθος ανάλυση της τεχνολογίας πίσω από τους αισθητήρες AMR, τη σύγκρισή τους με άλλους τύπους αισθητήρων και τις εφαρμογές τους στη ναυσιπλοΐα πλοίων και την παρακολούθηση της δομικής υγείας. Επιπλέον, η έρευνα θα διερευνήσει την ανάπτυξη του IoT σε θαλάσσια περιβάλλοντα, τονίζοντας τα οφέλη και τις προκλήσεις της ενοποίησης αισθητήρων. Εξετάζοντας αυτές τις πτυχές, η μελέτη επιδιώκει να παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του πώς οι αισθητήρες AMR και το IoT μπορούν να μεταμορφώσουν τη ναυτιλιακή βιομηχανία (Briguglio & Crupi, 2024; Min et al., 2021).

1.1.7 Συμβολή στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία

Τα ευρήματα αυτής της μελέτης θα συμβάλουν στις συνεχιζόμενες προσπάθειες εκσυγχρονισμού της ναυτιλιακής βιομηχανίας παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών αισθητήρων. Αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις που σχετίζονται με τα παραδοσιακά συστήματα και αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων AMR, αυτή η έρευνα θα ενημερώσει την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και αξιόπιστων λύσεων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του IoT με αισθητήρες AMR θα ανοίξει το δρόμο για καινοτόμες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση και τη συντήρηση πλοίων, ευθυγραμμισμένες με τους στόχους της βιομηχανίας για βιωσιμότητα και λειτουργική αριστεία (Taheri et al., 2022; Lauritzen et al., 2019).

1.1.8 Δομή της Μελέτης

Η μελέτη είναι δομημένη σε πολλές ενότητες, καθεμία από τις οποίες εξετάζει μια συγκεκριμένη πτυχή της έρευνας. Η πρώτη ενότητα παρέχει μια λεπτομερή θεωρητική ανάλυση των αισθητήρων AMR, συμπεριλαμβανομένων των αρχών λειτουργίας, των πλεονεκτημάτων και των εφαρμογών τους. Η δεύτερη ενότητα

εξετάζει τον ρόλο του IoT στις θαλάσσιες λειτουργίες, εστιάζοντας στην ενσωμάτωση αισθητήρων σε έξυπνα συστήματα. Η τρίτη ενότητα συζητά τις μεθόδους NDT, τονίζοντας τη χρήση αισθητήρων AMR για την παρακολούθηση της δομικής υγείας. Τέλος, η μελέτη ολοκληρώνεται με μια συγκριτική ανάλυση τεχνολογιών αισθητήρων και συστάσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη (Yang & Zhang, 2021; Zalewski, 2020).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR και τεχνολογιών IoT στη ναυτιλιακή βιομηχανία αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς την επίτευξη εξυπνότερων, ασφαλέστερων και πιο βιώσιμων λειτουργιών. Αυτή η μελέτη θα διερευνήσει τις δυνατότητες αυτών των τεχνολογιών, αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που παρουσιάζουν. Αξιοποιώντας τις μοναδικές ιδιότητες των αισθητήρων AMR και τη μετασχηματιστική δύναμη του IoT, η ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργική της αποτελεσματικότητα, να μειώσει τους κινδύνους και να συμβάλει στους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας (Huang et al., 2019; Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020).

1.2 Θεωρητική Ανάλυση Αισθητήρων Μαγνητοαντίστασης (AMR)

1.2.1 Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης

Το φαινόμενο της ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) είναι μια θεμελιώδης φυσική ιδιότητα που παρατηρείται σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπου η ηλεκτρική αντίσταση ποικίλλει με βάση τη σχετική γωνία μεταξύ του ηλεκτρικού ρεύματος και του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτή η μοναδική συμπεριφορά προκύπτει από τις κβαντομηχανικές αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας με τις μαγνητικές περιοχές μέσα στο υλικό. Η ευθυγράμμιση αυτών των περιοχών κάτω από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει τις διαδρομές σκέδασης των ηλεκτρονίων, οδηγώντας σε αλλαγές στην ειδική αντίσταση. Το μέγεθος αυτής της επίδρασης εξαρτάται από τις εγγενείς ιδιότητες του υλικού, την ένταση του πεδίου

και τον προσανατολισμό της ροής του ρεύματος (Ripka et al., 2014; Yang & Zhang, 2021).

Αρχικά ανακαλύφθηκε στο νικέλιο και τα κράματά του, το φαινόμενο AMR έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει αξιοποιηθεί σε τεχνολογικές εφαρμογές, ιδιαίτερα στην ανάπτυξη αισθητήρων. Υλικά όπως το permalloy, ένα κράμα νικελίου-σιδήρου, παρουσιάζουν έντονο αποτέλεσμα AMR και χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή αισθητήρων λεπτής μεμβράνης. Η ανισοτροπία στην αντίσταση προέρχεται από την εξαρτώμενη από το σπιν σκέδαση, όπου τα ηλεκτρόνια με διαφορετικούς προσανατολισμούς σπιν παρουσιάζουν διαφορετικούς βαθμούς αντίστασης ανάλογα με την ευθυγράμμιση τους με τις μαγνητικές περιοχές. Αυτή η ευαισθησία στα μαγνητικά πεδία καθιστά τα υλικά AMR ιδανικά για την ανίχνευση αλλαγών σε μαγνητικά περιβάλλοντα, μια ικανότητα που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπως η πλοήγηση, η δομική παρακολούθηση και τα συστήματα με δυνατότητα IoT (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019; Rifai et al., 2016).

Η μαθηματική μοντελοποίηση του AMR περιλαμβάνει τον τανυστή ειδικής αντίστασης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη γωνία θ μεταξύ του διανύσματος μαγνήτισης και της κατεύθυνσης του ρεύματος. Η αντίσταση R μπορεί να εκφραστεί ως $R=R_{\perp}+(R_{\parallel}-R_{\perp})\cos^2(\theta)$, όπου R_{\parallel} και R_{\perp} αντιπροσωπεύουν τις αντιστάσεις παράλληλες και κάθετες στο μαγνητικό πεδίο, αντίστοιχα. Αυτή η εξίσωση υπογραμμίζει την εξάρτηση της αντίστασης από τη γωνιακή ευθυγράμμιση, που αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία του αισθητήρα. Οι αισθητήρες AMR χρησιμοποιούν συνήθως μια διαμόρφωση γέφυρας Wheatstone, χρησιμοποιώντας αυτή τη γωνιακή ευαισθησία για να παράγουν διαφορικά σήματα ανάλογα με τις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου, εξασφαλίζοντας υψηλή ευαισθησία και σταθερότητα σε πρακτικές εφαρμογές (Wu et al., 2021; Taheri et al., 2022).

Στις ναυτιλιακές εφαρμογές, το φαινόμενο AMR προσφέρει απaráμιλλα πλεονεκτήματα για συστήματα πλοήγησης και δομική παρακολούθηση. Για παράδειγμα, οι ψηφιακές πυξίδες εξοπλισμένες με αισθητήρες AMR αξιοποιούν τη γωνιακή ευαισθησία τους για να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες κατεύθυνσης, αντισταθμίζοντας τις μαγνητικές παρεμβολές από εξαρτήματα του πλοίου και τις

περιβαλλοντικές παραμορφώσεις. Αυτή η ικανότητα είναι κρίσιμη για την αυτόνομη πλοήγηση σε δυναμικά θαλάσσια περιβάλλοντα. Επιπλέον, η χρήση αισθητήρων AMR σε μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) επιτρέπει την ανίχνευση δομικών ελαττωμάτων και υποβάθμισης υλικού μέσω διαταραχών του μαγνητικού πεδίου. Η υψηλή ανάλυση και η ευρωστία αυτών των αισθητήρων εξασφαλίζουν αξιόπιστη απόδοση σε σκληρές θαλάσσιες συνθήκες, καθιστώντας τους απαραίτητους για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της λειτουργικής αποτελεσματικότητας του σκάφους (Eslamlou et al., 2022; Briguglio & Crupi, 2024).

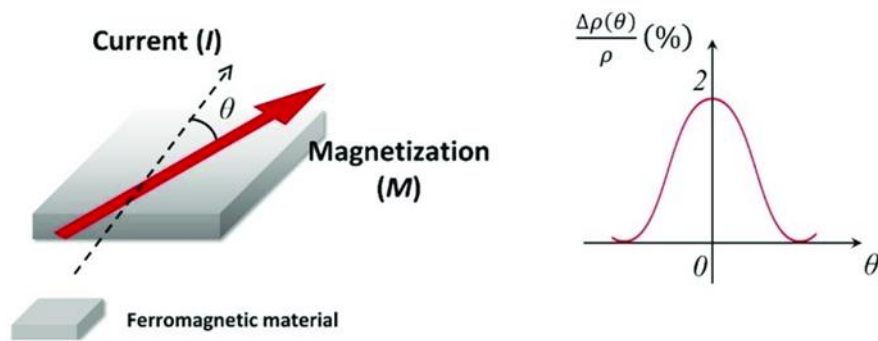
Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του φαινομένου AMR είναι η επεκτασιμότητα του, η οποία διευκολύνει τη σμίκρυνση των αισθητήρων χωρίς να διακυβεύεται η απόδοσή τους. Αυτή η επεκτασιμότητα επιτυγχάνεται μέσω προηγμένων τεχνικών κατασκευής, όπως η εναπόθεση λεπτής μεμβράνης και η ενσωμάτωση μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS). Αυτές οι διαδικασίες επιτρέπουν την ανάπτυξη συμπαγών και ενεργειακά αποδοτικών αισθητήρων AMR που μπορούν να ενσωματωθούν απρόσκοπτα σε πλαίσια IoT. Συνδέοντας αισθητήρες AMR σε δίκτυα IoT, οι ναυτιλιακές εταιρείες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου, επιτρέποντας την πρόβλεψη συντήρησης και βελτιωμένη επίγνωση της κατάστασης. Αυτή η ενσωμάτωση υπογραμμίζει το μετασχηματιστικό δυναμικό των αισθητήρων AMR στην ψηφιοποίηση των ναυτιλιακών επιχειρήσεων (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024; Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η εφαρμογή των αισθητήρων AMR δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Ο μαγνητικός θόρυβος, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και οι ατέλειες του υλικού μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή τους, απαιτώντας ακριβείς τεχνικές βαθμονόμησης και αντιστάθμισης. Οι πρόοδοι στην επιστήμη των υλικών, όπως η ανάπτυξη πολυστρωματικών δομών και νέων σιδηρομαγνητικών κραμάτων, στοχεύουν στον μετριασμό αυτών των περιορισμών και στη βελτίωση της αξιοπιστίας των αισθητήρων. Η έρευνα σε νέες μεθόδους βαθμονόμησης, συμπεριλαμβανομένης της χαρτογράφησης μαγνητικού πεδίου και των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, αντιμετωπίζει περαιτέρω αυτές τις προκλήσεις, διασφαλίζοντας σταθερή απόδοση σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι εξελίξεις είναι

καθοριστικές για την επέκταση της δυνατότητας εφαρμογής των αισθητήρων AMR πέρα από τους παραδοσιακούς τομείς και σε πολύπλοκα θαλάσσια περιβάλλοντα (Mukherjee et al., 2020; Min et al., 2021).

Η ιστορική εξέλιξη του φαινομένου AMR σε μια πρακτική τεχνολογία ανίχνευσης υπογραμμίζει την προσαρμοστικότητα και τη συνάφειά του στις σύγχρονες εφαρμογές. Ενώ αρχικά περιοριζόταν στη βασική ανίχνευση μαγνητικού πεδίου, η τελειοποίηση των υλικών AMR και η ενσωμάτωση προηγμένων ηλεκτρονικών έχουν επεκτείνει τη χρησιμότητά του σε διάφορες βιομηχανίες. Στον ναυτιλιακό τομέα, αυτή η πρόοδος μεταφράζεται σε βελτιωμένα συστήματα πλοήγησης, ισχυρές μεθόδους NDT και αποτελεσματικές εφαρμογές IoT, ευθυγραμμισμένες με τους στόχους της βιομηχανίας για βιωσιμότητα και λειτουργική αριστεία. Αυτή η προσαρμοστικότητα αποτελεί απόδειξη της διαρκούς σημασίας της κατανόησης και της αξιοποίησης του φαινομένου AMR (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Silva-Campillo et al., 2023).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του φαινομένου AMR και των τεχνολογιών IoT αποτελεί παράδειγμα της σύγκλισης της θεμελιώδους φυσικής και της σύγχρονης μηχανικής. Καθώς οι αισθητήρες AMR συνεχίζουν να εξελίσσονται, η ενσωμάτωσή τους με πλατφόρμες IoT υπόσχεται να φέρει επανάσταση στις θαλάσσιες λειτουργίες. Επιτρέποντας την αυτόνομη λήψη αποφάσεων και ενισχύοντας τις δυνατότητες παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, αυτοί οι αισθητήρες ανοίγουν το δρόμο για πιο έξυπνες, ασφαλέστερες και πιο βιώσιμες πρακτικές στον κλάδο. Αυτή η ολοκλήρωση όχι μόνο αντιμετωπίζει τις τρέχουσες προκλήσεις αλλά επίσης τοποθετεί τον ναυτιλιακό τομέα να κεφαλαιοποιήσει τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις, διασφαλίζοντας ανθεκτικότητα και προσαρμοστικότητα σε έναν ταχέως μεταβαλλόμενο κόσμο (Hassani & Dackermann, 2023; Thombre et al., 2020).



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της ανισότροπης μαγνητικής αντίστασης (AMR) (Yang, & Zhang, 2021).

Αυτό το σχηματικό απεικονίζει το φαινόμενο AMR σε σιδηρομαγνητικά υλικά, δείχνοντας πώς η ηλεκτρική ειδική αντίσταση ποικίλλει ως συνάρτηση της γωνίας (θ) μεταξύ της μαγνήτισης (M) και του εφαρμοζόμενου ρεύματος (I). Το γράφημα στα δεξιά δείχνει ότι η ειδική αντίσταση κορυφώνεται στις 90° , καταδεικνύοντας τη γωνιακή εξάρτηση της μαγνητοαντίστασης σε αισθητήρες που βασίζονται σε AMR.

Συμπερασματικά, το φαινόμενο AMR αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο μιας τεχνολογίας μετασχηματιστικών αισθητήρων που συνδυάζει ακρίβεια, αποτελεσματικότητα και ευελιξία. Τα θεωρητικά του ερείσματα και οι πρακτικές του εφαρμογές υπογραμμίζουν τη σημασία του για την αντιμετώπιση των πολύπλευρων προκλήσεων των ναυτιλιακών επιχειρήσεων. Γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της θεμελιώδους φυσικής και της εφαρμοσμένης μηχανικής, το φαινόμενο AMR συνεχίζει να οδηγεί την καινοτομία και την πρόοδο, διαμορφώνοντας το μέλλον της πλοήγησης, της παρακολούθησης και της ψηφιακής συνδεσιμότητας στον ναυτιλιακό τομέα. Καθώς η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη βελτιώνουν τις δυνατότητές του, το φαινόμενο AMR παραμένει ένας κρίσιμος παράγοντας για την τεχνολογική πρόοδο σε ποικίλα και απαιτητικά περιβάλλοντα (Hiekata et al., 2021; Zalewski, 2020).

1.2.2 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά του AMR αισθητήρα

Τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) καθορίζουν την υπεροχή και την προσαρμοστικότητά τους σε μια σειρά εφαρμογών, ιδιαίτερα σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι αισθητήρες AMR βασίζονται στην αρχή της μαγνητικής ανισοτροπίας, επιτρέποντάς τους να ανιχνεύουν

διακυμάνσεις στα μαγνητικά πεδία με εξαιρετική ακρίβεια. Αυτή η ικανότητα είναι το αποτέλεσμα του μοναδικού σχεδιασμού και της σύνθεσης του υλικού τους, που συνήθως ενσωματώνει σιδηρομαγνητικά κράματα όπως το μόνιμο κράμα. Αυτά τα κράματα επιλέγονται για την υψηλή ευαισθησία τους στα μαγνητικά πεδία και τη σταθερότητά τους κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι τεχνικές εναπόθεσης λεπτής μεμβράνης που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αισθητήρων AMR ενισχύουν την απόδοσή τους, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα περιορισμένου χώρου και δυναμικά, όπως επί του σκάφους (Ripka et al., 2014; Yang & Zhang, 2021).

Ένα βασικό τεχνολογικό πλεονέκτημα των αισθητήρων AMR είναι η χαμηλή τους κατανάλωση ενέργειας, η οποία είναι κρίσιμη για εφαρμογές που απαιτούν παρατεταμένη λειτουργία σε απομακρυσμένες ρυθμίσεις ή ρυθμίσεις περιορισμένης ενέργειας. Η χαμηλή ζήτηση ισχύος πηγάζει από την παθητική τους φύση, όπου η μαγνητική απόκριση δεν απαιτεί ενεργή ηλεκτρική διέγερση. Αυτό το χαρακτηριστικό τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για ενσωμάτωση σε συστήματα με δυνατότητα IoT, όπου η ενεργειακή απόδοση είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι θαλάσσιες επιχειρήσεις, που συχνά χαρακτηρίζονται από μακρινά ταξίδια και περιορισμένη πρόσβαση σε ενεργειακούς πόρους, επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από την ανάπτυξη αισθητήρων AMR. Αυτοί οι αισθητήρες εξασφαλίζουν συνεχή παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων χωρίς σημαντική κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τους ιδανικούς για χρήση σε αυτόνομα συστήματα και εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (Rifai et al., 2016; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Οι αισθητήρες AMR παρουσιάζουν επίσης αξιοσημείωτη ευαισθησία, επιτρέποντας την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων στην περιοχή microtesla. Αυτό το υψηλό επίπεδο ευαισθησίας είναι απαραίτητο στα συστήματα θαλάσσιας πλοήγησης, όπου τα ακριβή δεδομένα κατεύθυνσης και θέσης είναι ζωτικής σημασίας. Ανιχνεύοντας λεπτές παραλλαγές στο μαγνητικό πεδίο της Γης, οι αισθητήρες AMR παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για ψηφιακές πυξίδες και εργαλεία πλοήγησης, ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλές μαγνητικές παρεμβολές, όπως κοντά σε μεγάλες μεταλλικές κατασκευές ή ηλεκτρικά συστήματα σε πλοία. Αυτή η ικανότητα διασφαλίζει την ακριβή πλοήγηση και ενισχύει την ασφάλεια, ειδικά σε δύσκολες

επιχειρησιακές συνθήκες όπως η κακή ορατότητα ή οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες (Wu et al., 2021; Briguglio & Crupi, 2024).

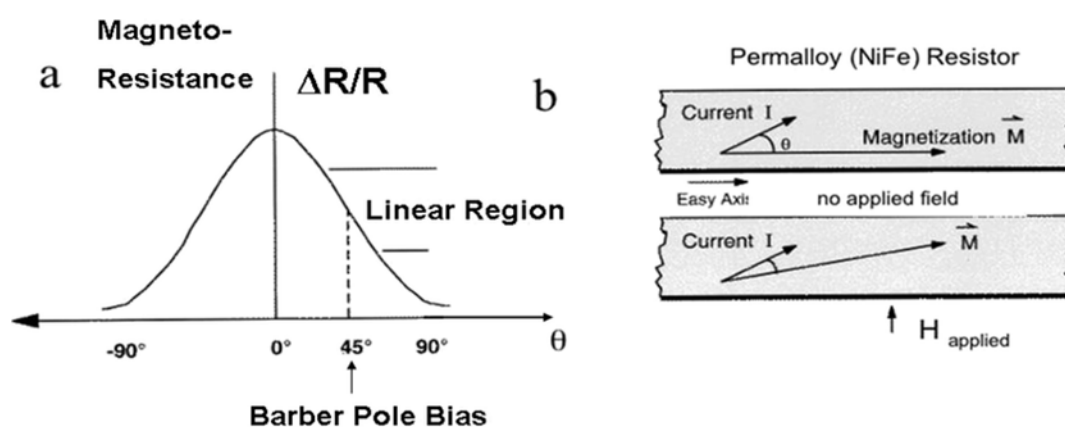
Η επεκτασιμότητα των αισθητήρων AMR ενισχύει περαιτέρω την τεχνολογική τους απήχηση. Ο συμπαγής σχεδιασμός και η συμβατότητά τους με τη μικροηλεκτρονική καθιστούν δυνατή την ενσωμάτωσή τους σε διάφορες πλατφόρμες, από φορητές συσκευές έως θαλάσσια συστήματα μεγάλης κλίμακας. Οι πρόοδοι στις τεχνικές μικροκατασκευής, όπως η φωτολιθογραφία και η χημική εναπόθεση ατμών, επέτρεψαν τη σμίκρυνση των αισθητήρων AMR χωρίς να διακυβεύεται η απόδοσή τους. Αυτή η επεκτασιμότητα είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική στα πλαίσια IoT, όπου οι συσκευές πρέπει να είναι συμπαγείς, ελαφριές και ικανές για ασύρματη επικοινωνία. Η ικανότητα των αισθητήρων AMR να ανταποκρίνονται σε αυτές τις απαιτήσεις τους τοποθετεί ως βασικά στοιχεία στον ψηφιακό μετασχηματισμό των ναυτιλιακών επιχειρήσεων (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024; Thombre et al., 2020).

Η ανθεκτικότητα είναι άλλο ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της τεχνολογίας αισθητήρων AMR, καθιστώντας αυτούς τους αισθητήρες κατάλληλους για τις σκληρές συνθήκες που συναντώνται σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Η έκθεση σε αλμυρό νερό, ακραίες θερμοκρασίες και μηχανικούς κραδασμούς απαιτεί στιβαρά σχέδια αισθητήρων που μπορούν να διατηρήσουν την απόδοση για εκτεταμένες περιόδους. Οι αισθητήρες AMR έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν αυτές τις προκλήσεις μέσω της χρήσης προστατευτικών επιστρώσεων και ελαστικών υλικών. Η ανθεκτικότητά τους εξασφαλίζει συνεπή λειτουργία και μειώνει την ανάγκη για συχνή συντήρηση ή αντικατάσταση, μεταφράζοντας σε εξοικονόμηση κόστους και λειτουργική αξιοπιστία για τους ναυτιλιακούς φορείς (Hassani & Dackermann, 2023; Silva-Campillo et al., 2023).

Εκτός από τις αυτόνομες δυνατότητές τους, οι αισθητήρες AMR ενσωματώνονται όλο και περισσότερο με προηγμένες τεχνολογίες όπως η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη. Αυτές οι ενσωματώσεις ενισχύουν τις αναλυτικές δυνατότητες των αισθητήρων, επιτρέποντάς τους να επεξεργάζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να εντοπίζουν μοτίβα ενδεικτικά πιθανών προβλημάτων. Για παράδειγμα, στα δομικά συστήματα παρακολούθησης της υγείας, οι αισθητήρες AMR μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο που σχετίζονται με την

καταπόνηση του υλικού ή τη διάβρωση. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν στη συνέχεια να αναλύσουν αυτές τις αλλαγές για να προβλέψουν βλάβες ή να προτείνουν ενέργειες συντήρησης, βελτιώνοντας τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος και μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας (Mukherjee et al., 2020; Taheri et al., 2022).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR σε πλαίσια IoT επεκτείνει τη λειτουργικότητα των συστημάτων στα οποία ενσωματώνονται, επιτρέποντας την απρόσκοπτη επικοινωνία και ανάλυση δεδομένων. Οι αισθητήρες AMR, μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών διεπαφών, μπορούν να συνδεθούν με μικροελεγκτές όπως ο ESP32, διευκολύνοντας τη μετάδοση των μετρήσεων μαγνητικού πεδίου σε κεντρικά συστήματα ή πλατφόρμες cloud. Αυτή η συνδεσιμότητα υποστηρίζει την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων για πλοήγηση, παρακολούθηση και προγνωστική συντήρηση. Για παράδειγμα, συστήματα IoT που συνδυάζουν αισθητήρες AMR με δέκτες GNSS (Global Navigation Satellite System) και άλλους αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν την πορεία και τον προσανατολισμό του πλοίου, τη δομική υγεία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των λειτουργικών παραμέτρων. Τέτοια συστήματα ενισχύουν τη λήψη αποφάσεων, βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και διασφαλίζουν τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφάλειας και περιβάλλοντος (Hiekata et al., 2021; Lauritzen et al., 2019).



Εικόνα 2: Φαινόμενο AMR και μαγνήτιση σε αντιστάσεις Permalloy (Lenz & Edelstein, 2006)

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματά τους, οι αισθητήρες AMR δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Ο μαγνητικός θόρυβος και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή τους, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση τεχνικών αντιστάθμισης. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την εφαρμογή βρόχων ανάδρασης και συστημάτων σταθεροποίησης θερμοκρασίας, τα οποία βοηθούν στη διατήρηση της ακρίβειας του αισθητήρα σε διάφορες συνθήκες. Επιπλέον, οι εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών, όπως η ανάπτυξη νέων σιδηρομαγνητικών κραμάτων και πολυστρωματικών δομών, στοχεύουν στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και στην περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης των αισθητήρων. Αυτές οι καινοτομίες διασφαλίζουν ότι οι αισθητήρες AMR παραμένουν αξιόπιστοι και αποτελεσματικοί, ακόμη και σε απαιτητικές ναυτιλιακές εφαρμογές (Min et al., 2021; Kamolov & Park, 2019).

Η τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων AMR υπογραμμίζει την προσαρμοστικότητα και τη συνάφειά τους σε διάφορες εφαρμογές. Ο μοναδικός συνδυασμός ευαισθησίας, ανθεκτικότητας και επεκτασιμότητας τα καθιστά απαραίτητα στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπου συμβάλλουν στη βελτιωμένη πλοήγηση, ασφάλεια και λειτουργική αποτελεσματικότητα. Καθώς ο ναυτιλιακός τομέας συνεχίζει να αγκαλιάζει τον ψηφιακό μετασχηματισμό, ο ρόλος των αισθητήρων AMR θα επεκταθεί, καθοδηγούμενος από τις συνεχείς εξελίξεις στις τεχνικές κατασκευής, τις τεχνολογίες ολοκλήρωσης και την επιστήμη των υλικών. Αυτοί οι αισθητήρες όχι μόνο θα αντιμετωπίσουν τις τρέχουσες προκλήσεις αλλά και θα ανοίξουν το δρόμο για καινοτόμες λύσεις που επαναπροσδιορίζουν τις θαλάσσιες δραστηριότητες τα επόμενα χρόνια (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Zalewski, 2020).

1.2.3 Εφαρμογές του AMR αισθητήρα στη ναυτιλία

Οι εφαρμογές των αισθητήρων ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ποικίλες και κρίσιμες, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις στη ναυσιπλοΐα, την ασφάλεια και τη λειτουργική απόδοση. Αυτοί οι αισθητήρες, γνωστοί για την υψηλή ευαισθησία τους στα μαγνητικά πεδία και την ανθεκτικότητά

τους σε σκληρά περιβάλλοντα, έχουν φέρει επανάσταση σε πολλές πτυχές των θαλάσσιων επιχειρήσεων. Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές είναι στα συστήματα πλοήγησης, όπου οι αισθητήρες AMR χρησιμεύουν ως ο ακρογωνιαίος λίθος των σύγχρονων ψηφιακών πυξίδων. Αυτές οι πυξίδες παρέχουν ακριβή κατευθυντικά δεδομένα ανιχνεύοντας ανεπαίσθητες αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο της Γης, ακόμη και σε περιβάλλοντα με σημαντικές μαγνητικές παρεμβολές από κατασκευές πλοίων ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η αξιοπιστία τους εξασφαλίζει ακριβή πλοήγηση, μειώνοντας τον κίνδυνο σφαλμάτων σε κρίσιμες λειτουργίες όπως η προσγείωση, ο σχεδιασμός διαδρομής και η αποφυγή σύγκρουσης, ιδιαίτερα σε αντίξοες καιρικές συνθήκες ή συνθήκες χαμηλής ορατότητας (Wu et al., 2021; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Πέρα από την πλοήγηση, οι αισθητήρες AMR διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην παρακολούθηση της δομικής υγείας, μια ουσιαστική πτυχή της ασφάλειας στη θάλασσα. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε μεθόδους μη καταστροφικών δοκιμών (NDT) για τον εντοπισμό ελαττωμάτων, διάβρωσης ή καταπόνησης στο κύτος των πλοίων και σε άλλα δομικά στοιχεία. Μετρώντας τις διακυμάνσεις στα μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, οι αισθητήρες AMR επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών αστοχιών. Αυτή η ικανότητα όχι μόνο ενισχύει την ασφάλεια των σκαφών αλλά και ελαχιστοποιεί το κόστος συντήρησης επιτρέποντας έγκαιρες επισκευές. Τα δομικά συστήματα παρακολούθησης εξοπλισμένα με αισθητήρες AMR είναι ιδιαίτερα πολύτιμα σε παλαιότερα πλοία, όπου η υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου εγκυμονεί σημαντικούς κινδύνους. Οι μετρήσεις υψηλής ανάλυσης παρέχουν στους ναυτιλιακούς φορείς αξιόπιστες πληροφορίες για την κατάσταση των περιουσιακών τους στοιχείων, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας και επεκτείνοντας τη λειτουργική διάρκεια ζωής των πλοίων (Eslamlou et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR σε πλαίσια IoT έχει επεκτείνει περαιτέρω τη χρησιμότητά τους στον ναυτιλιακό τομέα. Τα συστήματα με δυνατότητα IoT βασίζονται σε αυτούς τους αισθητήρες για τη συλλογή και μετάδοση δεδομένων σε

πραγματικό χρόνο σχετικά με διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, όπως η απόδοση του κινητήρα, η απόδοση καυσίμου και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, τα έξυπνα συστήματα πλοίων χρησιμοποιούν αισθητήρες AMR για την παρακολούθηση των κραδασμών του κινητήρα και την ανίχνευση ανωμαλιών που μπορεί να υποδηλώνουν επικείμενες βλάβες. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας προγνωστικές στρατηγικές συντήρησης που μειώνουν τον απρογραμματίσιμο χρόνο διακοπής λειτουργίας και βελτιστοποιούν τη λειτουργική απόδοση. Ομοίως, αυτοί οι αισθητήρες συμβάλλουν στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος ανιχνεύοντας μαγνητικές ανωμαλίες που προκαλούνται από υποβρύχια εμπόδια ή συντρίμια, ενισχύοντας την επίγνωση της κατάστασης και την ασφάλεια κατά την πλοήγηση (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024; Hiekata et al., 2021).

Στα αυτόνομα ναυτιλιακά συστήματα, οι αισθητήρες AMR είναι απαραίτητοι για την ακριβή πλοήγηση και έλεγχο. Τα μη επανδρωμένα επιφανειακά και υποβρύχια οχήματα (USV και AUV) που είναι εξοπλισμένα με αυτούς τους αισθητήρες επωφελούνται από ακριβή δεδομένα κατεύθυνσης και θέσης, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για εργασίες όπως η τοπογραφία, η χαρτογράφηση και η εξερεύνηση πόρων. Ο συμπαγής σχεδιασμός και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων AMR τους καθιστούν ιδανικούς για ενσωμάτωση σε αυτές τις αυτόνομες πλατφόρμες, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν αποτελεσματικά για εκτεταμένες περιόδους. Επιπλέον, η ευρωστία των αισθητήρων εξασφαλίζει σταθερή απόδοση σε δύσκολα υποβρύχια περιβάλλοντα, όπου οι διακυμάνσεις της πίεσης, της θερμοκρασίας και της αλατότητας μπορούν να επηρεάσουν άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης. Αυτή η αξιοπιστία ενισχύει την αποτελεσματικότητα των αυτόνομων συστημάτων σε ποικίλες εφαρμογές, από την επιστημονική έρευνα έως την υπεράκτια εξερεύνηση ενέργειας (Briguglio & Crupi, 2024; Mukherjee et al., 2020).

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των αισθητήρων AMR στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι στις ψηφιακές δίδυμες τεχνολογίες, όπου παρέχουν κρίσιμα δεδομένα για τη δημιουργία εικονικών μοντέλων πλοίων και των συστημάτων τους. Αυτά τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν στους χειριστές να προσομοιώνουν και να βελτιστοποιούν την απόδοση του σκάφους, να παρακολουθούν τη δομική υγεία και να προβλέπουν τις

ανάγκες συντήρησης. Οι αισθητήρες AMR συμβάλλουν σε αυτή τη διαδικασία συλλαμβάνοντας δεδομένα υψηλής πιστότητας σχετικά με τις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου, κάτι που είναι απαραίτητο για ακριβή μοντελοποίηση και ανάλυση. Η ενοποίηση των αισθητήρων AMR με την τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση ενισχύει περαιτέρω τις δυνατότητες των ψηφιακών διδύμων, επιτρέποντας πιο εξελιγμένες διαδικασίες διάγνωσης και λήψης αποφάσεων. Αυτή η τεχνολογική συνέργεια αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στις θαλάσσιες δραστηριότητες, ευθυγραμμιζόμενη με τους στόχους της βιομηχανίας για ψηφιακό μετασχηματισμό και βιωσιμότητα (Taheri et al., 2022; Thombre et al., 2020).

Οι περιβαλλοντικές εφαρμογές των αισθητήρων AMR στον θαλάσσιο τομέα είναι εξίσου αξιοσημείωτες. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την παρακολούθηση υποβρύχιων μαγνητικών ανωμαλιών, όπως αυτές που προκαλούνται από ναυάγια, αγωγούς ή πυρομαχικά που δεν έχουν εκραγεί. Η ευαισθησία και η ακρίβειά τους τα καθιστούν ανεκτίμητα για τη διασφάλιση της ασφάλειας των υποβρύχιων δραστηριοτήτων κατασκευής και συντήρησης. Επιπλέον, οι αισθητήρες AMR είναι καθοριστικοί στις προσπάθειες διατήρησης της θάλασσας, όπου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κίνησης θαλάσσιων ειδών με μαγνητική σήμανση. Παρέχοντας λεπτομερή δεδομένα για τη συμπεριφορά των ζώων και τα πρότυπα μετανάστευσης, αυτοί οι αισθητήρες συμβάλλουν στην ανάπτυξη στρατηγικών για τη βιώσιμη διαχείριση της αλιείας και την προστασία της βιοποικιλότητας (Min et al., 2021; Lauritzen et al., 2019).

Η ανάπτυξη αισθητήρων AMR υποστηρίζει επίσης την πρόοδο των έξυπνων θυρών, οι οποίες βασίζονται σε τεχνολογίες IoT για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των μαγνητικών σημάτων των σκαφών καθώς πλησιάζουν και ελλιμενίζονται, διασφαλίζοντας ακριβή ελλιμενισμό και μειώνοντας τον κίνδυνο ατυχημάτων. Επιπλέον, η ενσωμάτωσή τους με τις λιμενικές υποδομές επιτρέπει την παρακολούθηση του φορτίου και του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο, τον εξορθολογισμό των logistics και τη βελτίωση της λειτουργικής διαφάνειας. Η δυνατότητα σύνδεσης αισθητήρων AMR με συστήματα που βασίζονται σε σύννεφο διευκολύνει την ανταλλαγή δεδομένων και τη συνεργασία μεταξύ των

ενδιαφερομένων, ενισχύοντας ένα πιο αποτελεσματικό και βιώσιμο θαλάσσιο οικοσύστημα (Kamolov & Park, 2019; Zalewski, 2020).

Το μέλλον των εφαρμογών αισθητήρων AMR στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι πολλά υποσχόμενο, με συνεχή έρευνα και ανάπτυξη με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής τους και την επέκταση των δυνατοτήτων τους. Καινοτομίες στον σχεδιασμό αισθητήρων, όπως η ανάπτυξη διαμορφώσεων πολλαπλών αξόνων και υβριδικών συστημάτων, αναμένεται να βελτιώσουν την ακρίβεια και την ευελιξία αυτών των συσκευών. Επιπλέον, οι εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης νέων σιδηρομαγνητικών κραμάτων, θα ενισχύσουν περαιτέρω την ευαισθησία και την ανθεκτικότητα των αισθητήρων AMR. Αυτές οι εξελίξεις, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη υιοθέτηση του IoT και των αυτόνομων τεχνολογιών, τοποθετούν τους αισθητήρες AMR ως κρίσιμους παράγοντες για τον ψηφιακό και βιώσιμο μετασχηματισμό της ναυτιλιακής βιομηχανίας (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Hassani & Dackermann, 2023).

Συμπερασματικά, οι εφαρμογές των αισθητήρων AMR στον ναυτιλιακό τομέα καταδεικνύουν τις μετασχηματιστικές τους δυνατότητες για την αντιμετώπιση των λειτουργικών προκλήσεων και των προκλήσεων ασφάλειας του κλάδου. Η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα πλοήγησης, δομική παρακολούθηση της υγείας και πλατφόρμες με δυνατότητα IoT υπογραμμίζει την ευελιξία και την αποτελεσματικότητά τους. Καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία συνεχίζει να εξελίσσεται, ο ρόλος των αισθητήρων AMR αναμφίβολα θα επεκταθεί, καθοδηγούμενος από τις τεχνολογικές εξελίξεις και την επιδίωξη της καινοτομίας. Αυτοί οι αισθητήρες όχι μόνο ενισχύουν τις τρέχουσες λειτουργίες αλλά και ανοίγουν το δρόμο για ένα πιο έξυπνο, ασφαλέστερο και πιο βιώσιμο μέλλον στις θαλάσσιες δραστηριότητες (Rifai et al., 2016; Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020).

1.3 Οι Υπόλοιποι Αισθητήρες στο Σύστημα

1.3.1 Αισθητήρες μέτρησης απόστασης

Οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης αποτελούν κρίσιμο στοιχείο σε πλήθος βιομηχανικών και ναυτιλιακών εφαρμογών, ιδιαίτερα όταν απαιτείται ελεγχόμενη κίνηση, αποφυγή εμποδίων και ασφαλής εκτέλεση διαδικασιών. Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της χωρικής απόστασης μεταξύ μηχανισμών και επιφανειών ή μεταξύ κινούμενων αντικειμένων, συμβάλλοντας στην αποφυγή συγκρούσεων, στην υποβοήθηση ελιγμών και στον αυτοματισμό λειτουργιών. Στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπου οι λειτουργίες μπορούν να πραγματοποιούνται σε περιορισμένους ή ασταθείς χώρους, η ακριβής μέτρηση αποστάσεων βοηθά στη βελτίωση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και του ελέγχου της κατάστασης (Kamolov & Park, 2019; Silva-Campillo et al., 2023).

Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες μέτρησης απόστασης, καθεμία με τα δικά της χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. Οι αισθητήρες υπερήχων βασίζονται στη διάδοση ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας, μετρώντας τον χρόνο μεταξύ εκπομπής και λήψης της ηχώ. Αυτή η τεχνολογία δεν επηρεάζεται σημαντικά από συνθήκες χαμηλής ορατότητας, όπως ομίχλη ή καπνό, γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως η υποβοήθηση ελλιμενισμού, η αποφυγή εμποδίων από μικρά αυτόνομα σκάφη και ο εντοπισμός κοντινών δομών (Deepak, Bahubalendruni, & Biswal, 2016). Από την άλλη πλευρά, αισθητήρες laser (οπτικοί αισθητήρες ή LiDAR) βασίζονται σε παλμούς φωτός για τον υπολογισμό αποστάσεων και προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα, κάτι που τους καθιστά κατάλληλους για χαρτογράφηση, ευθυγράμμιση μηχανικών εξαρτημάτων και υποστήριξη αυτόνομων συστημάτων (Min et al., 2021).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων μέτρησης απόστασης σε συστήματα με δυνατότητες IoT έχει διευρύνει σημαντικά τις εφαρμογές τους στη ναυτιλία. Μέσω της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων, επιτρέπεται η συλλογή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και η παρακολούθηση πολλαπλών σημείων ταυτόχρονα, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πλοία ή εγκαταστάσεις όπου απαιτείται εποπτεία διαδικασιών. Σε συστήματα υποβοήθησης ελιγμών, οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης μπορούν να

συνεργαστούν με συστήματα πλοήγησης και αυτοματισμού ώστε να καταγράφουν την απόσταση από προβλήτες, τοιχία ή άλλα πλοία, βελτιώνοντας τον έλεγχο και μειώνοντας την πιθανότητα πρόσκρουσης (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020).

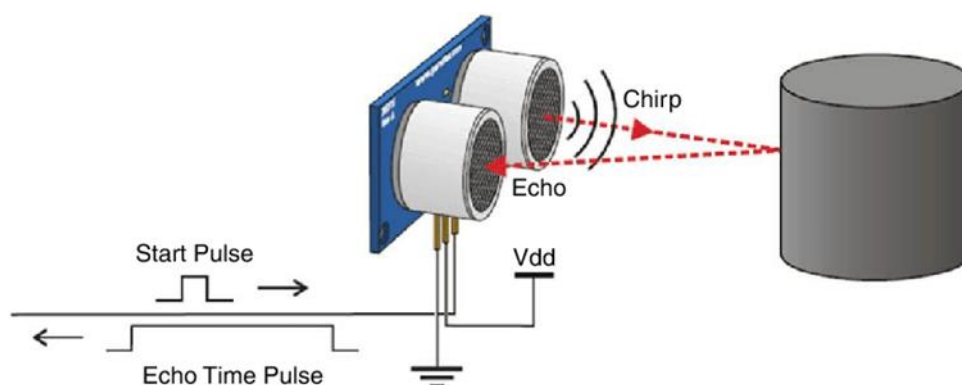
Ωστόσο, η απόδοσή τους μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Στην περίπτωση υπερήχων, η θερμοκρασία, η υγρασία και οι θόρυβοι στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Αντίστοιχα, οι οπτικοί αισθητήρες μπορούν να επηρεαστούν από υδρατμούς, θαλάσσια άλατα ή μικροσωματίδια που μειώνουν την καθαρότητα της δέσμης φωτός. Για αυτόν τον λόγο, η επιλογή τεχνολογίας γίνεται με βάση το περιβάλλον λειτουργίας και τη συγκεκριμένη εφαρμογή, εξασφαλίζοντας ισορροπία μεταξύ αξιοπιστίας και απόδοσης (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Σε αυτόνομα θαλάσσια συστήματα όπως τα USV (Unmanned Surface Vehicles) και AUV (Autonomous Underwater Vehicles), οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης αποτελούν σημαντικό τμήμα του εξοπλισμού αποφυγής εμποδίων και τοπικής χαρτογράφησης. Σε συνδυασμό με αλγορίθμους πλοήγησης και μηχανικής μάθησης, επιτρέπουν στα συστήματα αυτά να αναγνωρίζουν αντικείμενα στο περιβάλλον τους, να προσαρμόζουν την πορεία τους και να ολοκληρώνουν αποστολές με περιορισμένη ανθρώπινη παρέμβαση (Briguglio & Crupi, 2024).

Οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης χρησιμοποιούνται επίσης σε λιμενικές υποδομές και “έξυπνες” εγκαταστάσεις, όπου συμβάλλουν στη βελτίωση της επιχειρησιακής οργάνωσης. Παραδείγματα τέτοιων χρήσεων περιλαμβάνουν τον έλεγχο αποστάσεων μεταξύ εμπορευματοκιβωτίων, την ασφαλή καθοδήγηση γερανογέφυρων και την παρακολούθηση κινητών φορτίων. Η ικανότητά τους να συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο διευκολύνει τη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας και ενισχύει την αποτελεσματικότητα των λιμενικών λειτουργιών (Taheri et al., 2022; Hiekata et al., 2021).

Παρά τις προκλήσεις που υπάρχουν, η συνεχιζόμενη εξέλιξη των αισθητήρων απόστασης δείχνει θετικές προοπτικές για το μέλλον. Οι τάσεις επικεντρώνονται στην ανάπτυξη πιο συμπαγών και ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων, με βελτιωμένη ανθεκτικότητα σε δυσμενείς συνθήκες και δυνατότητα ενσωμάτωσης σε αυτόνομες πλατφόρμες. Σε συνδυασμό με την αυξανόμενη υιοθέτηση IoT στη ναυτιλία, οι

αισθητήρες αυτοί αναμένεται να αποτελέσουν ακόμη πιο σημαντικό στοιχείο των σύγχρονων θαλάσσιων εφαρμογών, υποστηρίζοντας ασφαλέστερες και αποτελεσματικότερες λειτουργίες (Thombre et al., 2020; Mukherjee et al., 2020).



Εικόνα 3: Working Principle of an Ultrasonic Distance Sensor (Deepak, Bahubalendruni, & Biswal, 2016)

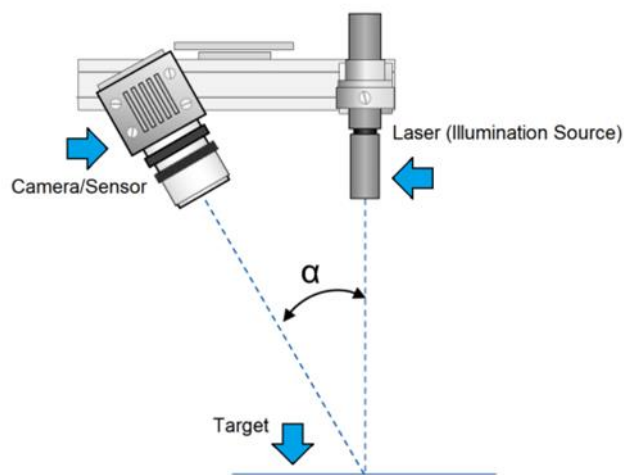
Η εικόνα 3 δείχνει πώς ένας αισθητήρας υπερήχων μετρά την απόσταση εκπέμποντας έναν ηχητικό παλμό (τσιρπ) που αντανακλάται από ένα αντικείμενο και επιστρέφει ως ηχώ. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ληφθέντος παλμού καθορίζει την απόσταση. Αυτή η αρχή χρησιμοποιείται ευρέως σε ναυτιλιακές εφαρμογές για την ανίχνευση και την πλοήγηση εμποδίων.

Οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης έχουν γίνει απαραίτητοι σε ναυτιλιακές εφαρμογές, επιτρέποντας ασφαλείς, αποτελεσματικές και ακριβείς λειτουργίες σε μια σειρά σεναρίων. Η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα IoT και αυτόνομες πλατφόρμες υπογραμμίζει την αυξανόμενη σημασία τους στη σύγχρονη ναυτιλιακή τεχνολογία. Αντιμετωπίζοντας τις υπάρχουσες προκλήσεις και αγκαλιάζοντας τις αναδυόμενες καινοτομίες, αυτοί οι αισθητήρες είναι έτοιμοι να διαδραματίσουν ακόμη μεγαλύτερο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

1.3.2 Οπτικοί αισθητήρες μέτρησης θέσης/μετατόπισης

Οι οπτικοί αισθητήρες θέσης και μετατόπισης είναι κρίσιμα στοιχεία σε διάφορες προηγμένες ναυτιλιακές εφαρμογές, ιδιαίτερα όπου η ακριβής μέτρηση και

παρακολούθηση είναι απαραίτητες. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν τεχνολογίες που βασίζονται στο φως, όπως λέιζερ ή φωτοανιχνευτές, για τον προσδιορισμό της θέσης ή της μετατόπισης των αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου η ακρίβεια μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ασφάλεια και τη λειτουργική απόδοση, οι οπτικοί αισθητήρες παρέχουν απaráμιλλη απόδοση σε εργασίες όπως η ναυσιπλοΐα πλοίων, ο ελλιμενισμός και η παρακολούθηση της δομικής υγείας. Η ικανότητά τους να παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο με ελάχιστες παρεμβολές από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το νερό ή τα μαγνητικά πεδία τα διακρίνει από άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης (Min et al., 2021; Kamolon & Park, 2019).



Εικόνα 4: Τριγωνισμός λέιζερ για μέτρηση οπτικής μετατόπισης (Bestech Australia, 2025)

Αυτό το διάγραμμα απεικονίζει την αρχή λειτουργίας του τριγωνισμού λέιζερ για τη μέτρηση μετατόπισης. Ένα λέιζερ εκπέμπει φως σε έναν στόχο και ένας αισθητήρας ανιχνεύει την ανακλώμενη δέσμη υπό γωνία (α). Αναλύοντας αυτή τη μετατόπιση, το σύστημα προσδιορίζει τη θέση του στόχου με υψηλή ακρίβεια, καθιστώντας τον πολύτιμο για τη δομική παρακολούθηση σε ναυτιλιακές εφαρμογές.

Η θεμελιώδης αρχή των οπτικών αισθητήρων περιλαμβάνει την ανίχνευση ακτίνων φωτός που ανακλώνται ή διαθλώνται από ένα αντικείμενο. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν αποστάσεις και αλλαγές θέσης με ακρίβεια σε επίπεδο μικρομέτρου, καθιστώντας τους απαραίτητους για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες μετατόπισης λέιζερ εκπέμπουν μια εστιασμένη δέσμη

λείζερ σε μια επιφάνεια στόχο, με το ανακλώμενο φως να συλλαμβάνεται από έναν φωτοανιχνευτή. Αναλύοντας τη φάση ή την ένταση του ανακλώμενου φωτός, το σύστημα μπορεί να υπολογίσει τη θέση ή τη μετατόπιση του αντικειμένου σε σχέση με τον αισθητήρα. Αυτή η ικανότητα είναι απαραίτητη σε ναυτιλιακές εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση των κινήσεων του πλοίου κατά τη διάρκεια της ελλιμενισμού, όπου ακόμη και μικρές ανακρίβειες μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικούς κινδύνους για την ασφάλεια (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019; Silva-Campillo et al., 2023).

Οι οπτικοί αισθητήρες ενσωματώνονται ολοένα και περισσότερο στα συστήματα IoT για να βελτιώσουν τις δυνατότητές τους και να επιτρέψουν προηγμένες λύσεις παρακολούθησης. Η συνδεσιμότητα IoT επιτρέπει σε αυτούς τους αισθητήρες να μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικά συστήματα, όπου μπορούν να αναλυθούν και να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, στα αυτοματοποιημένα συστήματα πλοήγησης, οι οπτικοί αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς την ευθυγράμμιση ενός σκάφους και να παρέχουν ανατροφοδότηση για να προσαρμόσουν δυναμικά την τροχιά του. Αυτή η ολοκλήρωση όχι μόνο βελτιώνει την ακρίβεια των θαλάσσιων επιχειρήσεων αλλά και μειώνει την εξάρτηση από την ανθρώπινη παρέμβαση, ανοίγοντας το δρόμο για αυτόνομα συστήματα (Gerakoudi, Kokosalakis & Stavroulakis, 2024; Aslam, Μιχαηλίδης, & Ηροδότου, 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι οπτικοί αισθητήρες αντιμετωπίζουν προκλήσεις στα θαλάσσια περιβάλλοντα. Παράγοντες όπως ο ψεκασμός νερού, η υγρασία και τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν τη μετάδοση και την ανάκλαση του φωτός, μειώνοντας ενδεχομένως την ακρίβεια. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, τα σχέδια αισθητήρων έχουν εξελιχθεί ώστε να περιλαμβάνουν στιβαρά προστατευτικά περιβλήματα, προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος και τεχνικές βαθμονόμησης που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των περιβαλλοντικών παρεμβολών. Για παράδειγμα, οι οπτικοί αισθητήρες με προσαρμοστική βαθμονόμηση μπορούν να προσαρμοστούν στις αλλαγές στο φως του περιβάλλοντος ή στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας, διατηρώντας την ακρίβειά τους υπό διαφορετικές συνθήκες (Ripka et al., 2014; Taheri et al., 2022).

Η υιοθέτηση οπτικών αισθητήρων στη δομική παρακολούθηση της υγείας έχει επίσης φέρει επανάσταση στον τρόπο επιθεώρησης και συντήρησης των θαλάσσιων υποδομών. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές αλλαγές στη μετατόπιση ή την παραμόρφωση, παρέχοντας έγκαιρες προειδοποιήσεις για δομικές αδυναμίες ή αστοχίες. Με την ενσωμάτωση οπτικών αισθητήρων σε πλαίσια μη καταστροφικών δοκιμών (NDT), οι ναυτιλιακές εταιρείες μπορούν να εξασφαλίσουν τη μακροζωία και την ασφάλεια των πλοίων και των υπεράκτιων κατασκευών χωρίς να διαταράξουν τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της καταπόνησης σε κρίσιμα εξαρτήματα, επιτρέποντας έγκαιρες επισκευές και μειώνοντας τον κίνδυνο καταστροφικών βλαβών (Eslamlou et al., 2022; Hassani & Dackermann, 2023).

Το μέλλον των οπτικών αισθητήρων στις ναυτιλιακές εφαρμογές είναι πολλά υποσχόμενο, καθοδηγούμενο από τις εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών, το σχεδιασμό αισθητήρων και την ενοποίηση του IoT. Οι αναδυόμενες τάσεις περιλαμβάνουν την ανάπτυξη πιο συμπαγών, ενεργειακά αποδοτικών και περιβαλλοντικά ανθεκτικών αισθητήρων ικανών να λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες. Καθώς αυτές οι τεχνολογίες συνεχίζουν να εξελίσσονται, οι οπτικοί αισθητήρες αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη διευκόλυνση ασφαλέστερων και αποτελεσματικότερων θαλάσσιων επιχειρήσεων, ιδιαίτερα καθώς η βιομηχανία κινείται προς μεγαλύτερη αυτοματοποίηση και ψηφιοποίηση. Αυτές οι εξελίξεις ευθυγραμμίζονται με ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας και λειτουργικής αριστείας, διασφαλίζοντας ότι οι οπτικοί αισθητήρες παραμένουν ακρογωνιαίος λίθος της σύγχρονης ναυτιλιακής τεχνολογίας (Briguglio & Crupi, 2024; Thombre et al., 2020).

1.3.3 Συνεργασία αισθητήρων στο πλαίσιο του ESP32

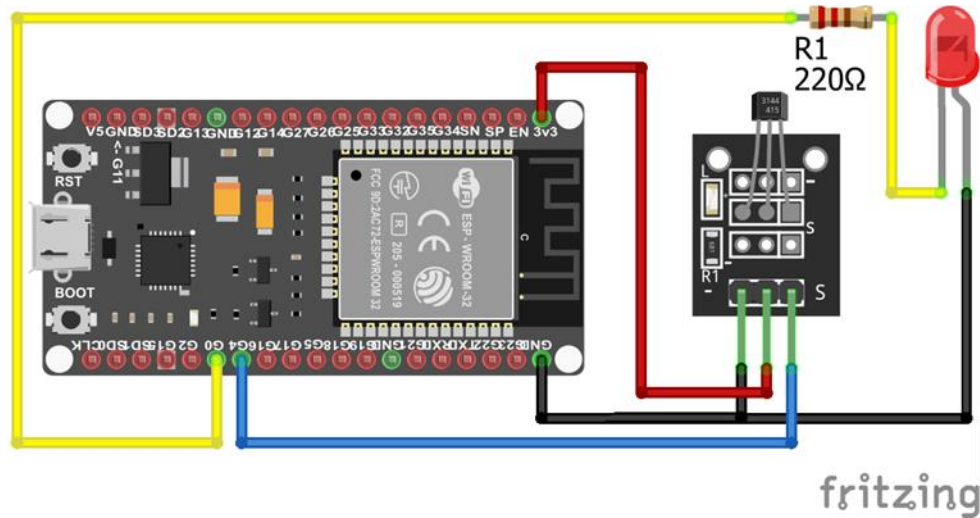
Η ενσωμάτωση αισθητήρων στο πλαίσιο μικροελεγκτή ESP32 έχει γίνει μια βασική πτυχή των σύγχρονων ναυτιλιακών εφαρμογών. Το ESP32, γνωστό για τις ευέλικτες δυνατότητες και την αποτελεσματική του απόδοση, χρησιμεύει ως κεντρικός κόμβος για τη σύνδεση και τη διαχείριση πολλαπλών αισθητήρων, επιτρέποντας σε

πολύπλοκα συστήματα να λειτουργούν απρόσκοπτα. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου τα ακριβή και σε πραγματικό χρόνο δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες είναι ζωτικής σημασίας, το ESP32 παρέχει την υπολογιστική ισχύ και τη συνδεσιμότητα που απαιτούνται για την αποτελεσματική επεξεργασία και μετάδοση αυτών των πληροφοριών. Η συμβατότητά του με ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένης της ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR), των υπερήχων και των οπτικών αισθητήρων, το καθιστά ακρογωνιαίο λίθο στο σχεδιασμό έξυπνων ναυτιλιακών συστημάτων (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024; Min et al., 2021).

Το ESP32 διευκολύνει την ταυτόχρονη λειτουργία διαφόρων αισθητήρων αξιοποιώντας τον επεξεργαστή διπλού πυρήνα και τις πολλαπλές διεπαφές εισόδου/εξόδου. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες που μετρούν παραμέτρους όπως η θέση, η μετατόπιση και η απόσταση, τα οποία είναι όλα κρίσιμα στη θαλάσσια πλοήγηση και την παρακολούθηση της δομικής υγείας. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες AMR μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες κατεύθυνσης, ενώ οι αισθητήρες υπερήχων μετρούν τις αποστάσεις για να αποτρέψουν τις συγκρούσεις κατά τη σύνδεση. Συντονίζοντας αυτούς τους αισθητήρες, το ESP32 διασφαλίζει ότι οι ροές δεδομένων συγχρονίζονται και επεξεργάζονται αποτελεσματικά, επιτρέποντας τη δυναμική λήψη αποφάσεων σε πολύπλοκα περιβάλλοντα (Ripka et al., 2014; Kamolov & Park, 2019).

Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του ESP32 σε δίκτυα αισθητήρων είναι οι ισχυρές δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας του, όπως Wi-Fi και Bluetooth. Αυτή η συνδεσιμότητα επιτρέπει στο ESP32 να μεταδίδει δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες σε κεντρικά συστήματα ή πλατφόρμες cloud σε πραγματικό χρόνο, αποτελώντας τη ραχοκοκαλιά των ναυτιλιακών εφαρμογών με δυνατότητα IoT. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση και προηγμένες αναλύσεις, ενισχύοντας τη λειτουργική αποτελεσματικότητα και μειώνοντας την εξάρτηση από την ανθρώπινη παρέμβαση. Για παράδειγμα, κατά τις επιθεωρήσεις πλοίων, δεδομένα από οπτικούς αισθητήρες και αισθητήρες μέτρησης απόστασης μπορούν να μεταδοθούν σε πλατφόρμες που βασίζονται σε σύννεφο για λεπτομερή

ανάλυση, διασφαλίζοντας ότι τα κρίσιμα ζητήματα εντοπίζονται έγκαιρα και με ακρίβεια (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Hiekata et al., 2021).



Εικόνα 5: Ενσωμάτωση αισθητήρα εφέ Hall με ESP32 και ένδειξη LED (DIYIOT, 2020)

Αυτό το διάγραμμα κυκλώματος απεικονίζει τη σύνδεση μεταξύ ενός μικροελεγκτή ESP32, ενός αισθητήρα εφέ Hall και ενός LED με αντίσταση 220Ω. Το ESP32 επεξεργάζεται τα δεδομένα του αισθητήρα και ελέγχει το LED με βάση τις ανιχνευόμενες αλλαγές μαγνητικού πεδίου. Τέτοιες διαμορφώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές IoT για αυτοματισμό, παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η συνεργασία των αισθητήρων στο πλαίσιο του ESP32 ενισχύεται περαιτέρω από τη συμβατότητά του με διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των SPI, I2C και UART. Αυτά τα πρωτόκολλα επιτρέπουν την απρόσκοπτη ενοποίηση και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών τύπων αισθητήρων, ανεξάρτητα από τις υποκείμενες τεχνολογίες τους. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη στις ναυτιλιακές εφαρμογές, όπου ποικίλοι αισθητήρες συχνά χρειάζεται να λειτουργούν από κοινού για να αντιμετωπίσουν πολύπλευρες προκλήσεις. Για παράδειγμα, το ESP32 μπορεί να διαχειρίζεται δεδομένα από οπτικούς αισθητήρες που παρακολουθούν τη μετατόπιση και αισθητήρες AMR που παρακολουθούν μαγνητικά πεδία, διασφαλίζοντας ότι όλες οι είσοδοι αναλύονται συνεκτικά για να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες (Taheri et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

Μία από τις σημαντικές προκλήσεις στα θαλάσσια περιβάλλοντα είναι η διασφάλιση ότι τα δεδομένα των αισθητήρων παραμένουν ακριβή και αξιόπιστα παρά τις σκληρές συνθήκες όπως οι κραδασμοί, η υγρασία και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Το ESP32 αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις μέσω των ενσωματωμένων χαρακτηριστικών του, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων αλγορίθμων φιλτραρίσματος και μηχανισμών διόρθωσης σφαλμάτων. Αυτές οι δυνατότητες ελαχιστοποιούν το θόρυβο και αντισταθμίζουν τις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα παραμένουν ισχυρά και αξιόπιστα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπως τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUV), όπου τα ακριβή δεδομένα αισθητήρων είναι ζωτικής σημασίας για την πλοήγηση και την επιτυχία της αποστολής (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019; Mukherjee et al., 2020).

Η ικανότητα του ESP32 να υποστηρίζει υπολογιστές αιχμής προσθέτει άλλο ένα επίπεδο πολυπλοκότητας στη συνεργασία αισθητήρων. Επεξεργάζοντας δεδομένα τοπικά αντί να βασίζεται αποκλειστικά σε συστήματα που βασίζονται σε cloud, το ESP32 μειώνει τον λανθάνοντα χρόνο και ενισχύει την απόκριση του συστήματος. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικό σε θαλάσσιες επιχειρήσεις ευαίσθητες στο χρόνο, όπως η αποφυγή σύγκρουσης και η απόκριση έκτακτης ανάγκης, όπου η λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο είναι πρωταρχικής σημασίας. Επιπλέον, οι δυνατότητες υπολογισμού αιχμής επιτρέπουν προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως η προγνωστική συντήρηση, όπου τα δεδομένα από τους αισθητήρες μπορούν να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο για τον εντοπισμό πιθανών ζητημάτων προτού κλιμακωθούν, βελτιώνοντας την ασφάλεια και μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Briguglio & Crupi, 2024).

Η ικανότητα του ESP32 να διευκολύνει την απρόσκοπτη συνεργασία μεταξύ των αισθητήρων το έχει καταστήσει απαραίτητο εργαλείο για την προώθηση των ναυτιλιακών τεχνολογιών. Επιτρέποντας την ενσωμάτωση διαφορετικών αισθητήρων και αξιοποιώντας τις δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας, επεξεργασίας δεδομένων και υπολογιστών αιχμής, το ESP32 έφερε επανάσταση στον τρόπο σχεδίασης και λειτουργίας των θαλάσσιων συστημάτων. Καθώς οι τεχνολογίες

αισθητήρων και τα πλαίσια IoT συνεχίζουν να εξελίσσονται, ο ρόλος του ESP32 στον συντονισμό των δικτύων αισθητήρων θα αυξηθεί, ενισχύοντας περαιτέρω την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των ναυτιλιακών επιχειρήσεων.

1.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.4.1 Η υπάρχουσα κατάσταση στην τεχνολογία αισθητήρων

Η τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας αισθητήρων έχει φτάσει σε αξιοσημείωτες προόδους, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ακρίβεια, αποτελεσματικότητα και συνδεσιμότητα σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των ναυτιλιακών εφαρμογών. Οι αισθητήρες σήμερα είναι πιο ακριβείς, στιβαροί και προσαρμόσιμοι από ποτέ, αντιμετωπίζοντας την πολυπλοκότητα των σύγχρονων λειτουργιών. Η ενσωμάτωσή τους με προηγμένα συστήματα όπως το Internet of Things (IoT) έχει φέρει επανάσταση στις παραδοσιακές εφαρμογές, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, την προγνωστική ανάλυση και τον αυτοματισμό. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη οδήγησε στην ευρεία υιοθέτηση αισθητήρων σε τομείς όπως η ναυσιπλοΐα, η παρακολούθηση της δομικής υγείας και οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις, ιδιαίτερα στη ναυτιλιακή βιομηχανία (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024 Silva-Campillo et al., 2023).

Οι αισθητήρες που βασίζονται σε μαγνητική αντίσταση, όπως οι αισθητήρες ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) και οι γιγαντιαίοι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (GMR), έχουν σημειώσει σημαντικές βελτιώσεις στην ευαισθησία και την αξιοπιστία. Οι αισθητήρες AMR, γνωστοί για το μικρό τους μέγεθος και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χρησιμοποιούνται ευρέως σε ναυτιλιακές εφαρμογές για πλοήγηση και ψηφιακές πυξίδες. Οι αισθητήρες GMR, που προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη ευαισθησία, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) για την ανίχνευση δομικών ελαττωμάτων και διάβρωσης στα πλοία. Η ενσωμάτωση αυτών των αισθητήρων με συστήματα IoT έχει βελτιώσει τις δυνατότητές τους, επιτρέποντας την απρόσκοπτη

μετάδοση και ανάλυση δεδομένων, η οποία είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας και ασφάλειας (Rifai et al., 2016; Ripka et al., 2014).

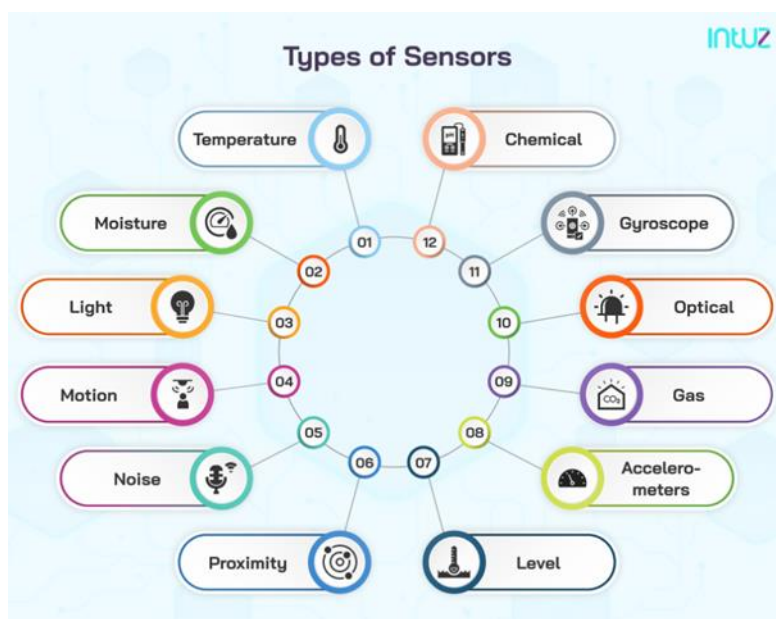
Οι αισθητήρες υπερήχων, βασικός παράγοντας στη μέτρηση απόστασης και την ανίχνευση εμποδίων, έχουν γίνει πιο εξελιγμένοι μέσω των εξελίξεων στις τεχνολογίες επεξεργασίας σήματος και μείωσης θορύβου. Αυτοί οι αισθητήρες είναι ζωτικής σημασίας σε θαλάσσια περιβάλλοντα για βοήθεια ελλιμενισμού και υποβρύχια πλοήγηση, παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες. Η ενσωμάτωσή τους με μικροελεγκτές όπως το ESP32 έχει βελτιστοποιήσει περαιτέρω την απόδοσή τους, επιτρέποντας επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και βελτιωμένες δυνατότητες λήψης αποφάσεων. Αυτή η εξέλιξη έχει αποδειχθεί ανεκτίμητη στα αυτόνομα θαλάσσια συστήματα, όπου η ακρίβεια και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες (Kamolun & Park, 2019; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Οι οπτικοί αισθητήρες έχουν επίσης υποστεί σημαντικές προόδους, ιδιαίτερα στους τομείς της μετατόπισης και της μέτρησης θέσης. Οι τεχνολογίες που βασίζονται σε λέιζερ έχουν βελτιωθεί για την επίτευξη ακρίβειας σε επίπεδο μικρομέτρου, καθιστώντας τις απαραίτητες για την παρακολούθηση της δομικής υγείας και τις θαλάσσιες εργασίες υψηλής ακρίβειας. Αυτοί οι αισθητήρες είναι πλέον εξοπλισμένοι με προσαρμοστικούς μηχανισμούς βαθμονόμησης για την εξουδετέρωση των περιβαλλοντικών παρεμβολών όπως ο ψεκασμός νερού και οι διαφορετικές συνθήκες φωτός. Η ενσωμάτωση οπτικών αισθητήρων σε πλαίσια IoT επέτρεψε την απομακρυσμένη παρακολούθηση και την προηγμένη ανάλυση δεδομένων, ενισχύοντας την εφαρμογή τους σε σύνθετες θαλάσσιες επιχειρήσεις (Min et al., 2021; Taheri et al., 2022).

Η αυξανόμενη εστίαση στη βιωσιμότητα έχει επίσης επηρεάσει την τεχνολογία αισθητήρων, οδηγώντας στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών σχεδίων και περιβαλλοντικά ανθεκτικών υλικών. Οι αισθητήρες σχεδιάζονται τώρα για να αντέχουν σε σκληρές θαλάσσιες συνθήκες όπως η έκθεση στο αλμυρό νερό, οι ακραίες θερμοκρασίες και η υψηλή υγρασία. Αυτές οι εξελίξεις διασφαλίζουν μακροπρόθεσμα αξιοπιστία και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις,

ευθυγραμμισμένες με την παγκόσμια ώθηση προς πιο πράσινες τεχνολογίες στις θαλάσσιες δραστηριότητες (Briguglio & Crupi, 2024; Thombre et al., 2020).

Παρά αυτές τις εξελίξεις, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις στην ευρεία υιοθέτηση και βελτιστοποίηση των τεχνολογιών αισθητήρων. Ζητήματα όπως το κόστος, η επεκτασιμότητα και η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών τύπων αισθητήρων εξακολουθούν να εμποδίζουν την πλήρη ενσωμάτωση σε πολύπλοκα συστήματα. Οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών μέσω καινοτόμων υλικών, βελτιωμένων σχεδίων και τυποποίησης των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) στα δίκτυα αισθητήρων είναι επίσης μια πολλά υποσχόμενη λεωφόρος, που επιτρέπει την πρόβλεψη ανάλυσης και τη βελτιωμένη λήψη αποφάσεων σε όλες τις θαλάσσιες επιχειρήσεις (Taheri et al., 2022; Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020).



Εικόνα 6: Επισκόπηση διαφορετικών τύπων αισθητήρων (DZone, 2021)

Αυτό το διάγραμμα κατηγοριοποιεί διάφορους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη τεχνολογία, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων θερμοκρασίας, κίνησης, οπτικών, χημικών και εγγύτητας. Κάθε τύπος εξυπηρετεί συγκεκριμένες εφαρμογές, από την παρακολούθηση του περιβάλλοντος έως τον βιομηχανικό αυτοματισμό. Η ποικιλομορφία των αισθητήρων υπογραμμίζει τον ρόλο τους στα συστήματα IoT, όπου η απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο βελτιώνει την

αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την απόκριση του συστήματος στις θαλάσσιες λειτουργίες.

Η τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας των αισθητήρων αντικατοπτρίζει ένα δυναμικό πεδίο έτοιμο για περαιτέρω καινοτομία. Καθώς οι αισθητήρες γίνονται πιο έξυπνοι, αποτελεσματικοί και διασυνδεδεμένοι, ο ρόλος τους στις ναυτιλιακές εφαρμογές θα διευρυνθεί, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ασφάλεια, βιωσιμότητα και λειτουργική αριστεία. Με συνεχείς προόδους, η τεχνολογία αισθητήρων πρόκειται να αντιμετωπίσει τις πολύπλοκες απαιτήσεις των σύγχρονων ναυτιλιακών συστημάτων, διασφαλίζοντας ένα πιο ανθεκτικό και προσαρμοστικό μέλλον για τη βιομηχανία.

1.4.2 Έρευνα αγοράς αισθητήρων

Η αγορά των αισθητήρων γνώρισε αξιοσημείωτη ανάπτυξη, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για προηγμένες τεχνολογίες σε όλους τους κλάδους, συμπεριλαμβανομένου του ναυτιλιακού τομέα. Η διεξαγωγή μιας ανάλυσης αγοράς των αισθητήρων περιλαμβάνει την αξιολόγηση του κόστους, της απόδοσης και της διαθεσιμότητας διαφόρων επιλογών για τον προσδιορισμό των καταλληλότερων τεχνολογιών για συγκεκριμένες εφαρμογές. Στο ναυτιλιακό πλαίσιο, αισθητήρες όπως η ανισότροπη μαγνητοαντίσταση (AMR), οι υπερήχοι και οι οπτικοί αισθητήρες κυριαρχούν λόγω της υψηλής ακρίβειας και προσαρμοστικότητας τους σε δύσκολα περιβάλλοντα. Αυτοί οι αισθητήρες αντιμετωπίζουν τις κρίσιμες ανάγκες για πλοήγηση, δομική παρακολούθηση και αυτοματισμό στα ναυτιλιακά συστήματα (Gerakoudi, Kokosalakis & Stavroulakis, 2024; Silva-Campillo et al., 2023).

Οι αισθητήρες AMR ξεχωρίζουν στην αγορά για την ευαισθησία, τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και τον συμπαγή σχεδιασμό τους. Το κόστος αυτών των αισθητήρων είναι ανταγωνιστικό, ειδικά όταν εξετάζεται η ενσωμάτωσή τους σε πλαίσια IoT, γεγονός που ενισχύει τη χρησιμότητά τους σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Οι ηγέτες της αγοράς στην παραγωγή αισθητήρων AMR έχουν επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της απόδοσης διατηρώντας παράλληλα την προσιτή τιμή. Αυτοί οι αισθητήρες συχνά προτιμώνται για εργασίες που απαιτούν υψηλή ακρίβεια ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου, όπως σε ψηφιακές πυξίδες και μη καταστροφικές

δοκιμές (Rifai et al., 2016; Ripka et al., 2014). Ενώ η αρχική επένδυση για αυτούς τους αισθητήρες μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερη από άλλους μαγνητικούς αισθητήρες, η ανθεκτικότητά τους και το μειωμένο λειτουργικό κόστος τους καθιστούν μια οικονομικά αποδοτική λύση με την πάροδο του χρόνου.

Οι αισθητήρες υπερήχων είναι ευρέως διαθέσιμοι στην αγορά, με τις τιμές να ποικίλλουν ανάλογα με το εύρος, την ανάλυση και την περιβαλλοντική τους αντίσταση. Τα βασικά μοντέλα για εφαρμογές μικρής εμβέλειας είναι σχετικά φθηνά, ενώ οι αισθητήρες υψηλής ακρίβειας που έχουν σχεδιαστεί για υποβρύχια ή σκληρά περιβάλλοντα μπορεί να είναι σημαντικά πιο δαπανηροί. Οι κατασκευαστές έχουν επικεντρωθεί ολοένα και περισσότερο στην παραγωγή αισθητήρων υπερήχων με προηγμένες δυνατότητες επεξεργασίας σήματος και μείωσης θορύβου για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των ναυτιλιακών εφαρμογών, όπως ο ελλιμενισμός πλοίων και η αποφυγή σύγκρουσης. Αυτές οι βελτιώσεις έχουν συμβάλει στην ευρύτερη υιοθέτηση αισθητήρων υπερήχων, ειδικά όταν συνδυάζονται με μικροελεγκτές όπως ο ESP32, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω τη λειτουργικότητά τους σε συστήματα με δυνατότητα IoT (Kamolov & Park, 2019; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Οι οπτικοί αισθητήρες καταλαμβάνουν ένα premium τμήμα στην αγορά αισθητήρων λόγω της εξαιρετικής ακρίβειας και ευελιξίας τους. Οι αισθητήρες μετατόπισης που βασίζονται σε λέιζερ, για παράδειγμα, προσφέρουν ακρίβεια σε επίπεδο μικρομέτρου, αλλά έχουν υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων. Το κόστος δικαιολογείται από την ικανότητά τους να εκτελούν κρίσιμες εργασίες όπως η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και ο εντοπισμός μικρών αλλαγών θέσης. Η ζήτηση για οπτικούς αισθητήρες έχει επίσης αυξηθεί λόγω της ενσωμάτωσής τους σε συστήματα IoT, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση και την προηγμένη ανάλυση. Οι κορυφαίοι κατασκευαστές έχουν εισαγάγει χαρακτηριστικά προσαρμοστικής βαθμονόμησης στους αισθητήρες τους, διασφαλίζοντας αξιοπιστία σε δυναμικές θαλάσσιες συνθήκες και δικαιολογώντας την υψηλότερη αρχική επένδυση (Min et al., 2021; Taheri et al., 2022).

Ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών αισθητήρων έχει οδηγήσει σε σημαντικές προόδους στην απόδοση, διατηρώντας το κόστος σχετικά σταθερό. Οι

εταιρείες εστιάζουν όλο και περισσότερο σε υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα πολλών τύπων αισθητήρων, όπως AMR και οπτικούς αισθητήρες, για να δημιουργήσουν ισχυρά συστήματα για θαλάσσιες δραστηριότητες. Αυτά τα υβριδικά μοντέλα, αν και είναι πιο ακριβά, προσφέρουν απaráμιλλη ακρίβεια και αξιοπιστία, καθιστώντας τα μια προτιμώμενη επιλογή για εφαρμογές υψηλού κινδύνου όπως η υποβρύχια πλοήγηση και οι επιθεωρήσεις κύτους πλοίων (Briguglio & Crupi, 2024; Mukherjee et al., 2020).

Ένα από τα κρίσιμα ζητήματα στην ανάλυση αγοράς αισθητήρων είναι η ισορροπία μεταξύ κόστους και μακροζωίας. Οι αισθητήρες που έχουν σχεδιαστεί για θαλάσσια περιβάλλοντα πρέπει να αντέχουν σε ακραίες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε αλμυρό νερό, των κραδασμών και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Ως αποτέλεσμα, οι κατασκευαστές έχουν δώσει προτεραιότητα στην ανάπτυξη ανθεκτικών και ενεργειακά αποδοτικών αισθητήρων. Αυτή η εστίαση ευθυγραμμίζεται με την παγκόσμια ώθηση προς τη βιωσιμότητα, με αισθητήρες που όχι μόνο αποδίδουν αξιόπιστα αλλά και ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις να γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς στην αγορά (Thombre et al., 2020; Hiekata et al., 2021).

Οι τάσεις της αγοράς δείχνουν μια αυξανόμενη ζήτηση για αισθητήρες που ενσωματώνονται άψογα με πλατφόρμες IoT, επιτρέποντας την κοινή χρήση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και προηγμένες αναλύσεις. Αυτή η απαίτηση έχει ενθαρρύνει τους κατασκευαστές να επενδύσουν σε αισθητήρες με βελτιωμένα χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας και συμβατότητα με τυποποιημένα πρωτόκολλα. Καθώς η αγορά συνεχίζει να εξελίσσεται, οι οικονομικά αποδοτικές λύσεις με βελτιωμένη λειτουργικότητα αναμένεται να κυριαρχήσουν, καθιστώντας τις προηγμένες τεχνολογίες αισθητήρων προσιτές για ευρύτερες ναυτιλιακές εφαρμογές (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Taheri et al., 2022).

1.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υφιστάμενων λύσεων

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες αισθητήρων στον ναυτιλιακό τομέα έχουν φέρει σημαντικές προόδους, προσφέροντας μια σειρά λύσεων για την αντιμετώπιση των

προκλήσεων στη ναυσιπλοΐα, τη δομική παρακολούθηση και τον αυτοματισμό. Κάθε τύπος αισθητήρα έχει ξεχωριστά πλεονεκτήματα, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές, αλλά και περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την εφαρμογή συστημάτων. Η αξιολόγηση αυτών των πλεονεκτημάτων και αδυναμιών είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας σε πολύπλοκα περιβάλλοντα.

Οι αισθητήρες ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) χρησιμοποιούνται ευρέως σε ναυτιλιακές εφαρμογές λόγω της υψηλής ευαισθησίας, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μικρού μεγέθους τους. Η ικανότητά τους να μετρούν μαγνητικά πεδία με ακρίβεια τα καθιστά ιδανικά για συστήματα πλοήγησης και ψηφιακές πυξίδες. Επιπλέον, οι αισθητήρες AMR αποδίδουν καλά σε δυναμικά και θορυβώδη περιβάλλοντα, παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις σε περιβάλλοντα με μαγνητικές παρεμβολές, όταν συνδυάζονται με κατάλληλη βαθμονόμηση και φιλτράρισμα. Ωστόσο, η απόδοσή τους μπορεί να επηρεαστεί από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και τις διαβαθμίσεις του μαγνητικού πεδίου, που απαιτούν προσεκτική βαθμονόμηση για τη διατήρηση της ακρίβειας. Ενώ η ενσωμάτωσή τους στα πλαίσια IoT ενισχύει τη λειτουργικότητα, προσθέτει επίσης πολυπλοκότητα και πιθανές ευπάθειες στη μετάδοση δεδομένων (Ripka et al., 2014; Rifai et al., 2016; Wu et al., 2021).

Οι αισθητήρες υπερήχων είναι μια άλλη βασική τεχνολογία στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ιδιαίτερα για τη μέτρηση απόστασης και την αποφυγή σύγκρουσης. Η ικανότητά τους να λειτουργούν αποτελεσματικά σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας, όπως υποβρύχια ή ομιχλώδη περιβάλλοντα, αποτελεί βασικό πλεονέκτημα. Επιπλέον, οι αισθητήρες υπερήχων είναι οικονομικά αποδοτικοί και άμεσα διαθέσιμοι, καθιστώντας τους προσβάσιμους για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ωστόσο, είναι ευαίσθητα σε παρεμβολές από θόρυβο και αναταράξεις, που μπορεί να μειώσουν την ακρίβεια. Η εξάρτησή τους από τα ηχητικά κύματα περιορίζει επίσης το εύρος και την ανάλυσή τους σε σύγκριση με τους οπτικούς αισθητήρες, οι οποίοι προσφέρουν ανώτερη ακρίβεια (Kamolov & Park, 2019; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Οι οπτικοί αισθητήρες, ιδιαίτερα οι αισθητήρες μετατόπισης που βασίζονται σε λέιζερ, παρέχουν εξαιρετική ακρίβεια και ταχύτητα, καθιστώντας τους απαραίτητους για εργασίες υψηλής ακρίβειας όπως η παρακολούθηση της δομικής υγείας και η ευθυγράμμιση του πλοίου. Αυτοί οι αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύουν μικρές αλλαγές θέσης, επιτρέποντας την έγκαιρη αναγνώριση δομικών αδυναμιών ή παραμορφώσεων. Ωστόσο, το υψηλό κόστος και η ευαισθησία τους σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ο ψεκασμός νερού και οι ποικίλες συνθήκες φωτός μπορεί να περιορίσουν την εφαρμογή τους σε ορισμένα θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι πρόοδοι στα προστατευτικά περιβλήματα και η προσαρμοστική βαθμονόμηση έχουν μετριάσει ορισμένα από αυτά τα ζητήματα, αλλά η ανάπτυξή τους παραμένει πιο δύσκολη από άλλους τύπους αισθητήρων (Min et al., 2021; Silva-Campillo et al., 2023).

Παρά τα μεμονωμένα πλεονεκτήματά τους, κανένας τύπος αισθητήρα δεν μπορεί να αντιμετωπίσει όλες τις θαλάσσιες προκλήσεις. Υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν τεχνολογίες, όπως AMR και οπτικούς αισθητήρες, αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα κάθε τύπου ενώ αντισταθμίζουν τους περιορισμούς τους. Αυτά τα συστήματα προσφέρουν πλεονασμό και βελτιωμένη απόδοση, ειδικά σε κρίσιμες εφαρμογές όπως η υποβρύχια πλοήγηση και οι μη καταστροφικές δοκιμές. Ωστόσο, είναι συχνά πιο ακριβά και πολύπλοκα στην εφαρμογή τους, απαιτώντας προηγμένα συστήματα ολοκλήρωσης και διαχείρισης (Briguglio & Crupi, 2024; Mukherjee et al., 2020).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων με συστήματα IoT ενισχύει περαιτέρω τα πλεονεκτήματά τους επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την προηγμένη ανάλυση. Αυτή η συνδεσιμότητα επιτρέπει στους χειριστές να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις και να βελτιστοποιούν τις λειτουργίες. Ωστόσο, εισάγει επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια δεδομένων, τον λανθάνοντα χρόνο και τη διαλειτουργικότητα του συστήματος. Η διασφάλιση της αξιοπιστίας των δικτύων αισθητήρων με δυνατότητα IoT σε σκληρές θαλάσσιες συνθήκες παραμένει βασικός τομέας έρευνας και ανάπτυξης (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Hiekata et al., 2021).

Ενώ οι υπάρχουσες λύσεις προσφέρουν πολλά οφέλη, δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Η συνεχής καινοτομία είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της ευρωστίας, της

ακρίβειας και της ενσωμάτωσης των τεχνολογιών αισθητήρων. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων όχι μόνο θα βελτιώσει τις θαλάσσιες δραστηριότητες αλλά θα υποστηρίξει και ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας και ασφάλειας στον κλάδο. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, η εξισορρόπηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των συστημάτων αισθητήρων θα είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση των ναυτιλιακών εφαρμογών και την επίτευξη μακροπρόθεσμης επιχειρησιακής αριστείας (Taheri et al., 2022; Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020).

1.5 Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος και οι Εφαρμογές του

1.5.1 Τι είναι ο μη καταστροφικός έλεγχος

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) είναι μια ζωτικής σημασίας μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ακεραιότητας και της απόδοσης υλικών, εξαρτημάτων και συστημάτων χωρίς να προκαλείται ζημιά ή να αλλοιώνεται η λειτουργικότητά τους. Εφαρμόζεται ευρέως σε βιομηχανίες όπου η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες, όπως η ναυτιλία, η αεροδιαστημική και οι κατασκευές. Στις ναυτιλιακές εφαρμογές, το NDT διασφαλίζει τη δομική υγεία των πλοίων, των υπεράκτιων πλατφορμών και άλλων κρίσιμων υποδομών, επιτρέποντας τον έγκαιρο εντοπισμό σφαλμάτων και μειώνοντας τον κίνδυνο καταστροφικών αστοχιών. Ο πρωταρχικός στόχος του NDT είναι να εντοπίσει ελαττώματα, όπως ρωγμές, διάβρωση και παραμόρφωση, διατηρώντας παράλληλα το επιθεωρημένο εξάρτημα για συνεχή χρήση (Eslamlou et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

Το NDT περιλαμβάνει μια σειρά τεχνικών που βασίζονται σε διαφορετικές φυσικές αρχές για τον εντοπισμό και την ανάλυση ελαττωμάτων. Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι η δοκιμή υπερήχων, η οποία χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για τον εντοπισμό ελαττωμάτων μέσα σε ένα υλικό. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στον εντοπισμό εσωτερικών ρωγμών ή κενών, καθιστώντας την απαραίτητη για την παρακολούθηση του κύτους των πλοίων και άλλων βυθισμένων κατασκευών. Οι δοκιμές υπερήχων είναι μη επεμβατικές, εξαιρετικά ακριβείς και ικανές να παρέχουν αποτελέσματα σε

πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι παραμένει ο ακρογωνιαίος λίθος των πρακτικών NDT στη ναυτιλιακή βιομηχανία (Kamolov & Park, 2019; Hassani & Dackermann, 2023).

Οι τεχνικές που βασίζονται σε μαγνητική αντίσταση, όπως αυτές που χρησιμοποιούν αισθητήρες ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR), έχουν επίσης γίνει αναπόσπαστο μέρος του NDT. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αλλαγών στα μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από δομικές ανωμαλίες, όπως συγκεντρώσεις τάσεων ή ασυνέχειες υλικού. Η ακρίβεια των αισθητήρων AMR επιτρέπει τον εντοπισμό ελάχιστων ελαττωμάτων, επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση και μειώνοντας την πιθανότητα δομικών αστοχιών. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε περιβάλλοντα όπου η πρόσβαση σε εξαρτήματα είναι περιορισμένη, όπως υποθαλάσσιοι αγωγοί ή αμπάρια φορτίου (Rifai et al., 2016; Ripka et al., 2014).

Οι οπτικοί αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων που βασίζονται σε λέιζερ, παρέχουν μια άλλη προηγμένη προσέγγιση στο NDT. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν τη μετατόπιση και την παραμόρφωση με ακρίβεια σε επίπεδο μικρομέτρου, καθιστώντας τους ιδανικούς για την ανίχνευση λεπτών αλλαγών στη δομική ακεραιότητα. Οι οπτικές μέθοδοι είναι μη επεμβατικές και μπορούν να λειτουργήσουν σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα για δυναμικά περιβάλλοντα όπως οι θαλάσσιες επιχειρήσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωσή τους στα συστήματα IoT έχει επεκτείνει τις δυνατότητές τους, επιτρέποντας στρατηγικές συντήρησης από απόσταση και βασισμένες σε δεδομένα (Min et al., 2021, Taheri et al., 2022).

Η υιοθέτηση των μεθόδων NDT οφείλεται στα πολυάριθμα πλεονεκτήματά τους, όπως η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα. Εντοπίζοντας έγκαιρα πιθανά προβλήματα, το NDT ελαχιστοποιεί το χρόνο διακοπής λειτουργίας και μειώνει το κόστος που σχετίζεται με επισκευές ή αντικαταστάσεις. Επιπλέον, ενισχύει την ασφάλεια διασφαλίζοντας ότι τα κρίσιμα εξαρτήματα πληρούν τα απαιτούμενα πρότυπα προτού αναπτυχθούν ή συνεχίσουν να λειτουργούν. Στη ναυτιλιακή βιομηχανία, αυτή η προσέγγιση είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της συμμόρφωσης με τα ρυθμιστικά πρότυπα και

τη διαφύλαξη των ανθρώπινων ζώων (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019; Mukherjee et al., 2020).

Παρά τα οφέλη του, το NDT δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η έκθεση σε αλμυρό νερό, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και οι δονήσεις, μπορούν να επηρεάσουν κυρίως την ακρίβεια ορισμένων οπτικών ή ηλεκτρονικών μεθόδων. Η διασφάλιση της αξιοπιστίας των τεχνικών NDT σε σκληρά θαλάσσια περιβάλλοντα απαιτεί συχνά προηγμένο εξοπλισμό και διαδικασίες βαθμονόμησης. Επιπλέον, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων NDT απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία, δίνοντας έμφαση στην ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό για τη διεξαγωγή επιθεωρήσεων και την αποτελεσματική ανάλυση των δεδομένων (Briguglio & Crupi, 2024; Thombre et al., 2020).

Καθώς το NDT συνεχίζει να εξελίσσεται, οι καινοτομίες στην τεχνολογία αισθητήρων, την επεξεργασία δεδομένων και τον αυτοματισμό αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητά του. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) στα συστήματα NDT υπόσχεται να βελτιώσει τον εντοπισμό και την ταξινόμηση ελαττωμάτων, μειώνοντας το ανθρώπινο λάθος και επιταχύνοντας τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Αυτές οι εξελίξεις θα διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας, της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας των θαλάσσιων επιχειρήσεων, ενισχύοντας το NDT ως θεμελιώδη πρακτική στον κλάδο (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Hiekata et al., 2021).

1.5.2 Εφαρμογές NDT στη ναυτιλία

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) έχουν γίνει ένα απαραίτητο εργαλείο στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπου η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας, της ασφάλειας και της λειτουργικής αποτελεσματικότητας είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι μοναδικές προκλήσεις που τίθενται από τα θαλάσσια περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε θαλασσινό νερό, των ακραίων καιρικών συνθηκών και της μηχανικής καταπόνησης, απαιτούν αξιόπιστες μεθόδους για την αξιολόγηση της κατάστασης των πλοίων και των υπεράκτιων κατασκευών. Το NDT

επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση ελαττωμάτων, όπως ρωγμές, διάβρωση και υποβάθμιση του υλικού, χωρίς να προκαλεί ζημιές, καθιστώντας το ιδανική λύση για τη διασφάλιση μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας και ασφάλειας στις θαλάσσιες δραστηριότητες (Eslamlou et al., 2022, Silva-Campillo et al. , 2023).

Μία από τις κύριες εφαρμογές του NDT σε ναυτιλιακές ρυθμίσεις είναι η επιθεώρηση του κύτους των πλοίων και των υποβρύχιων κατασκευών. Τεχνικές όπως η δοκιμή υπερήχων χρησιμοποιούνται ευρέως για τον εντοπισμό εσωτερικών ελαττωμάτων, όπως κενά ή αραίωση που προκαλούνται από τη διάβρωση. Αυτές οι επιθεωρήσεις είναι κρίσιμες για την πρόληψη αστοχιών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δομικές καταρρεύσεις ή περιβαλλοντικούς κινδύνους. Οι αισθητήρες υπερήχων μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε βυθισμένες συνθήκες, παρέχοντας ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να εξασφαλίσουν έγκαιρες ενέργειες συντήρησης και επισκευής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πλοία που λειτουργούν σε δύσκολα περιβάλλοντα, όπως εξερεύνηση βαθέων υδάτων ή πολικές περιοχές (Kamolov & Park, 2019; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Οι μέθοδοι NDT που βασίζονται σε μαγνητική αντίσταση, οι αισθητήρες μόχλευσης όπως η ανισότροπη μαγνητοαντίσταση (AMR) και η γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση (GMR), έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές σε θαλάσσιες εφαρμογές. Αυτοί οι αισθητήρες ανιχνεύουν διακυμάνσεις στα μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από τάσεις ή ασυνέχειες υλικού, επιτρέποντας τον ακριβή εντοπισμό των ελαττωμάτων. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες AMR χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των αποσκευών φορτίου και των αγωγών, εντοπίζοντας περιοχές υψηλής πίεσης που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια. Η ευαισθησία και η ικανότητά τους να λειτουργούν σε σκληρές συνθήκες τα καθιστούν βασικό συστατικό των σύγχρονων συστημάτων ναυτιλιακής επιθεώρησης (Ripka et al., 2014; Rifai et al., 2016).

Μια άλλη κρίσιμη εφαρμογή του NDT στις ναυτιλιακές εργασίες είναι η αξιολόγηση των αρμών συγκόλλησης και των κρίσιμων δομικών συνδέσεων. Αυτές οι περιοχές είναι επιρρεπείς σε κόπωση και αστοχία λόγω των συνεχών μηχανικών δυνάμεων που υφίστανται κατά τη λειτουργία. Τεχνικές όπως η ραδιογραφική δοκιμή και η δοκιμή δινορευμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως για την αξιολόγηση της ποιότητας

της συγκόλλησης και την ανίχνευση ρωγμών ή πορώδους. Η μη επεμβατική φύση αυτών των μεθόδων διασφαλίζει ότι τα εξαρτήματα μπορούν να παραμείνουν λειτουργικά κατά τις επιθεωρήσεις, ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας και το κόστος διατηρώντας παράλληλα τα πρότυπα ασφαλείας (Hassani & Dackermann, 2023; Min et al., 2021).

Τα τελευταία χρόνια, οι οπτικοί αισθητήρες έχουν αναδειχθεί ως πολύτιμη προσθήκη στην εργαλειοθήκη NDT, ιδιαίτερα για την παρακολούθηση της μετατόπισης και της παραμόρφωσης στις κατασκευές πλοίων. Τα συστήματα που βασίζονται σε λέιζερ μπορούν να μετρήσουν τις αλλαγές σε επίπεδο μικρομέτρου στη δομική ευθυγράμμιση, παρέχοντας έγκαιρες προειδοποιήσεις για πιθανά προβλήματα. Αυτοί οι αισθητήρες συχνά ενσωματώνονται σε πλαίσια IoT, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση και στρατηγικές συντήρησης βάσει δεδομένων. Για παράδειγμα, οι οπτικοί αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε υπεράκτιες πλατφόρμες μπορούν να ανιχνεύσουν μετατοπίσεις που προκαλούνται από ωκεάνια ρεύματα ή μηχανική καταπόνηση, επιτρέποντας στους χειριστές να αντιμετωπίσουν προβλήματα πριν αυτά κλιμακωθούν (Taheri et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

Ο ρόλος του NDT στην αξιολόγηση των δεξαμενών έρματος και των συστημάτων καυσίμων είναι μια άλλη σημαντική εφαρμογή στον ναυτιλιακό τομέα. Η διάβρωση και η μόλυνση σε αυτά τα συστήματα ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για τη λειτουργική απόδοση και την περιβαλλοντική ασφάλεια. Οι τεχνικές NDT, όπως η δοκιμή κατευθυνόμενων κυμάτων, επιτρέπουν τον εντοπισμό αυτών των προβλημάτων χωρίς την ανάγκη αποσυναρμολόγησης. Διασφαλίζοντας την ακεραιότητα αυτών των συστημάτων, το NDT συμβάλλει στη μείωση του κινδύνου διαρροών και ρύπανσης, ευθυγραμμίζοντας με τους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας (Briguglio & Crupi, 2024; Thombre et al., 2020).

Η ενοποίηση του NDT με προηγμένες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (ML), ενισχύει περαιτέρω τις εφαρμογές του στις θαλάσσιες επιχειρήσεις. Τα αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να αναλύσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων επιθεώρησης, εντοπίζοντας μοτίβα και ανωμαλίες με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα από τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτή η καινοτομία είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε περίπλοκες επιθεωρήσεις, όπως αυτές που

διεξάγονται σε μεγάλα πλοία ή υπεράκτιες εξέδρες, όπου η ανθρώπινη εποπτεία από μόνη της μπορεί να είναι ανεπαρκής (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Hiekata et al., 2021). Οι ποικίλες εφαρμογές και οι συνεχείς εξελίξεις του NDT υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο του στη διασφάλιση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας των ναυτιλιακών συστημάτων.

1.5.3 Πλεονεκτήματα του NDT σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους δοκιμών, ιδιαίτερα σε βιομηχανίες όπου η δομική ακεραιότητα και η λειτουργικότητα των εξαρτημάτων είναι ζωτικής σημασίας. Στον ναυτιλιακό τομέα, η ικανότητα αξιολόγησης της κατάστασης των πλοίων, των υπεράκτιων κατασκευών και άλλων βασικών περιουσιακών στοιχείων χωρίς να προκαλείται ζημιά είναι μια μεταμορφωτική καινοτομία. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους που απαιτούν συχνά αποσυναρμολόγηση ή καταστροφική δειγματοληψία, το NDT διατηρεί τη λειτουργική ικανότητα του επιθεωρούμενου εξαρτήματος, μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτά τα οφέλη καθιστούν το NDT απαραίτητο εργαλείο για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας στις θαλάσσιες δραστηριότητες (Eslamlou et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του NDT είναι η ικανότητά του να παρέχει αξιολογήσεις σε πραγματικό χρόνο και υψηλής ακρίβειας. Τεχνικές όπως η δοκιμή υπερήχων και οι μέθοδοι που βασίζονται στη μαγνητοαντίσταση μπορούν να ανιχνεύσουν ελάχιστα ελαττώματα, όπως ρωγμές, διάβρωση και κόπωση υλικού, που μπορεί να παραλείπονται από τις παραδοσιακές οπτικές επιθεωρήσεις. Αυτή η ακρίβεια είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπου μη εντοπισμένα ελαττώματα μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές αστοχίες ή περιβαλλοντικούς κινδύνους. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες υπερήχων μπορούν να αναγνωρίσουν την αραίωση στο κύτος των πλοίων που προκαλείται από διάβρωση, επιτρέποντας έγκαιρες παρεμβάσεις που αποτρέπουν τη δομική κατάρρευση (Kamolov & Park, 2019; Ripka et al., 2014).

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της NDT είναι η μη επεμβατική φύση της. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συχνά περιλαμβάνουν αποσυναρμολόγηση εξαρτημάτων για επιθεώρηση, η οποία μπορεί να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Το NDT, από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την αξιολόγηση των περιουσιακών στοιχείων στην επιχειρησιακή τους κατάσταση. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για κρίσιμα συστήματα, όπως η πρόωση πλοίων ή η αποθήκευση καυσίμων, όπου η διακοπή των εργασιών για επιθεωρήσεις μπορεί να διαταράξει τα χρονοδιαγράμματα και να αυξήσει το κόστος. Διατηρώντας την ακεραιότητα του εξεταζόμενου εξαρτήματος, το NDT ελαχιστοποιεί τις διαταραχές παρέχοντας παράλληλα ολοκληρωμένες πληροφορίες για την κατάστασή του (Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019; Rifai et al., 2016).

Το NDT είναι επίσης πιο ευέλικτο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Το ευρύ φάσμα τεχνικών του, συμπεριλαμβανομένων των ακτινογραφικών, δινορευμάτων και οπτικών δοκιμών, του επιτρέπει να προσαρμόζεται σε διάφορες εφαρμογές και υλικά. Για παράδειγμα, οι οπτικοί αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν τη δομική παραμόρφωση με ακρίβεια σε επίπεδο μικρομέτρου, ενώ η δοκιμή δινορευμάτων υπερέρχει στην ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών σε αγωγίμα υλικά. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στο NDT να αντιμετωπίσει τις ποικίλες προκλήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος, από την παρακολούθηση βυθισμένων αγωγών έως την αξιολόγηση της δομικής υγείας των υπεράκτιων πλατφορμών (Min et al., 2021; Taheri et al., 2022).

Εκτός από τα τεχνικά του οφέλη, το NDT είναι πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον από τις παραδοσιακές μεθόδους. Μειώνοντας την ανάγκη για καταστροφικές δειγματοληψίες και απορρίμματα υλικών, η NDT ευθυγραμμίζεται με τους στόχους της ναυτιλιακής βιομηχανίας για βιωσιμότητα και αποδοτικότητα των πόρων. Για παράδειγμα, η δοκιμή κατευθυνόμενων κυμάτων μπορεί να επιθεωρήσει μεγάλους αγωγούς χωρίς την ανάγκη κοπής τμημάτων, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες υλικών και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό το πλεονέκτημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο σημερινό ρυθμιστικό τοπίο, όπου η τήρηση των

περιβαλλοντικών προτύπων αποτελεί προτεραιότητα (Briguglio & Crupi, 2024; Thombre et al., 2020).

Η ενσωμάτωση του NDT με το IoT και η προηγμένη ανάλυση δεδομένων ενισχύει περαιτέρω τα πλεονεκτήματά του. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βασίζονται συχνά σε χειροκίνητες επιθεωρήσεις, οι οποίες μπορεί να είναι επιρρεπείς σε ανθρώπινο λάθος και μεταβλητότητα. Αντίθετα, τα συστήματα NDT εξοπλισμένα με αισθητήρες με δυνατότητα IoT και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης μπορούν να παρέχουν συνεπείς, αυτοματοποιημένες αξιολογήσεις. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την προγνωστική συντήρηση αναλύοντας μοτίβα και ανωμαλίες σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τον κίνδυνο απροσδόκητων αστοχιών και βελτιστοποιώντας τα χρονοδιαγράμματα συντήρησης (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Hiekata et al., 2021).

Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, το NDT προσφέρει απaráμιλλη αποτελεσματικότητα, ακρίβεια και προσαρμοστικότητα. Η ικανότητά του να εντοπίζει προβλήματα έγκαιρα, να διατηρεί την επιχειρησιακή ακεραιότητα και να ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις το καθιστά ανώτερη επιλογή για σύγχρονες θαλάσσιες δραστηριότητες. Καθώς ο κλάδος συνεχίζει να δίνει προτεραιότητα στην ασφάλεια, την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα, τα πλεονεκτήματα του NDT έναντι των παραδοσιακών μεθόδων θα παραμείνουν κρίσιμα για τη διαμόρφωση του μέλλοντος των ναυτιλιακών τεχνολογιών και πρακτικών.

1.6 Συσχέτιση με το Internet of Things (IoT) και τα Πλοία

1.6.1 Το IoT στη ναυτιλία

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) έχει αναδειχθεί ως μια τεχνολογία μετασχηματισμού στη ναυτιλιακή βιομηχανία, φέρνοντας επανάσταση στις λειτουργίες επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, την προηγμένη ανάλυση και την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ συστημάτων. Το IoT αναφέρεται στη διασύνδεση φυσικών συσκευών εξοπλισμένων με αισθητήρες,

επεξεργαστές και μονάδες επικοινωνίας που συνεργάζονται για να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες. Στον ναυτιλιακό τομέα, το IoT εφαρμόζεται σε μια σειρά λειτουργιών, από την πλοήγηση και τη διαχείριση στόλου έως την παρακολούθηση φορτίου και την προγνωστική συντήρηση. Η ενσωμάτωσή του ενισχύει την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα, αντιμετωπίζοντας την αυξανόμενη πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις των σύγχρονων ναυτιλιακών συστημάτων (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Silva-Campillo et al., 2023).

Τα συστήματα IoT στη ναυτιλία περιλαμβάνουν διασυνδεδεμένους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε όλα τα πλοία για την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η απόδοση του κινητήρα, η κατανάλωση καυσίμου, η ακεραιότητα του κύτους και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Με τη συνεχή συλλογή δεδομένων, αυτά τα συστήματα επιτρέπουν στους χειριστές να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις, μειώνοντας τους λειτουργικούς κινδύνους και το κόστος. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες που παρακολουθούν την απόδοση του κινητήρα μπορούν να ανιχνεύσουν ανεπάρκειες ή πιθανές βλάβες, επιτρέποντας την έγκαιρη συντήρηση και ελαχιστοποίηση του απρογραμματίστου χρόνου διακοπής λειτουργίας. Ομοίως, περιβαλλοντικοί αισθητήρες με δυνατότητα IoT μπορούν να παρακολουθούν τα καιρικά μοτίβα και τις συνθήκες της θάλασσας, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση της διαδρομής και τη βελτίωση της ασφάλειας κατά τη διάρκεια των ταξιδιών (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024; Min et al., 2021).

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του IoT στις θαλάσσιες δραστηριότητες είναι η προγνωστική συντήρηση. Οι παραδοσιακές πρακτικές συντήρησης βασίζονται συχνά σε σταθερά χρονοδιαγράμματα, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε περιττό κόστος ή απρόβλεπτες βλάβες. Το IoT μεταμορφώνει αυτήν την προσέγγιση επιτρέποντας τη συντήρηση βάσει συνθηκών. Οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε κρίσιμα εξαρτήματα παρακολουθούν συνεχώς την απόδοσή τους, εντοπίζοντας τη φθορά ή τις ανωμαλίες προτού κλιμακωθούν σε αστοχίες. Τα προγνωστικά αναλυτικά στοιχεία που υποστηρίζονται από αλγόριθμους μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα για την πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων, επιτρέποντας στους χειριστές να τα αντιμετωπίζουν προληπτικά. Αυτή

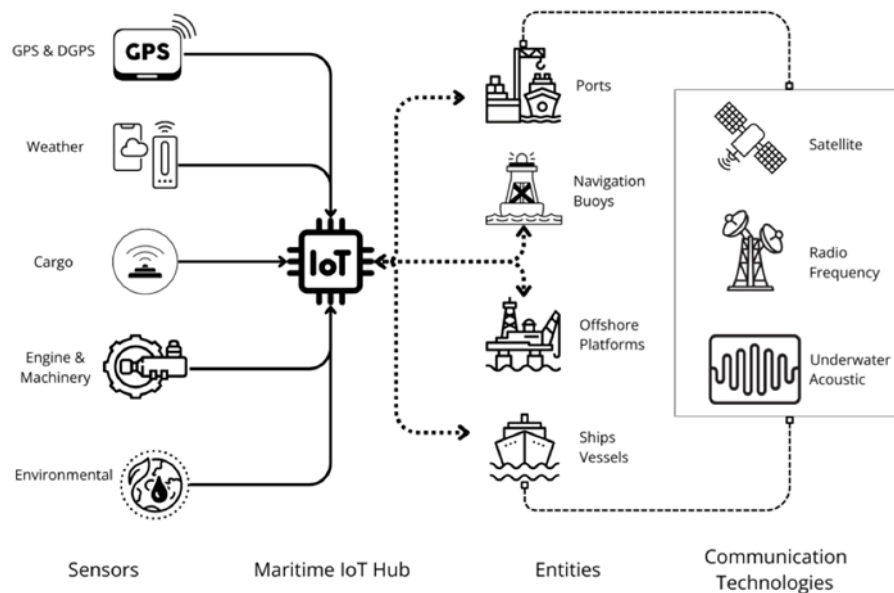
η προσέγγιση όχι μόνο μειώνει το κόστος αλλά επίσης ενισχύει την αξιοπιστία και τη μακροζωία των περιουσιακών στοιχείων (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Taheri et al., 2022).

Το IoT διαδραματίζει επίσης κεντρικό ρόλο στη βελτίωση της διαχείρισης φορτίου και της προβολής της αλυσίδας εφοδιασμού. Οι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι σε δοχεία παρακολουθούν μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση, διασφαλίζοντας ότι τα εμπορεύματα, ειδικά τα ευπαθή αντικείμενα, μεταφέρονται υπό βέλτιστες συνθήκες. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο που ενεργοποιείται από το IoT βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής παρέχοντας ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία και την κατάσταση του φορτίου. Αυτό το επίπεδο διαφάνειας επιτρέπει καλύτερο συντονισμό μεταξύ των ενδιαφερομένων και ελαχιστοποιεί τις καθυστερήσεις, συμβάλλοντας στη συνολική ικανοποίηση των πελατών (Briguglio & Crupi, 2024; Thombre et al., 2020).

Στο πλαίσιο της πλοήγησης, τα συστήματα IoT ενσωματώνουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές, όπως GPS, ραντάρ και αισθητήρες επί του σκάφους, για να παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα του περιβάλλοντος χώρου του σκάφους. Αυτό το διασυνδεδεμένο οικοσύστημα ενισχύει την επίγνωση της κατάστασης και υποστηρίζει την αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων, η οποία είναι κρίσιμη για την αποφυγή συγκρούσεων και τον σχεδιασμό διαδρομής. Σε αυτόνομα και ημιαυτόνομα πλοία, το IoT χρησιμεύει ως η ραχοκοκαλιά για συστήματα που επεξεργάζονται και ενεργούν με βάση αυτά τα δεδομένα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, οδηγώντας τη βιομηχανία προς μεγαλύτερη αυτοματοποίηση (Kamolov & Park, 2019; Ripka et al., 2014).

Παρά τα πλεονεκτήματά του, η εφαρμογή του IoT στη ναυτιλιακή βιομηχανία δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Η συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες περιοχές των ωκεανών παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο, καθώς βασίζεται σε δορυφορική επικοινωνία, η οποία μπορεί να είναι δαπανηρή και περιορισμένη σε εύρος ζώνης. Επιπλέον, η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο αποτελεί κρίσιμη ανησυχία, καθώς η αυξημένη συνδεσιμότητα των συστημάτων IoT δημιουργεί τρωτά σημεία που θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν κακόβουλοι παράγοντες. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί ισχυρά πρωτόκολλα κρυπτογράφησης, ασφαλείς πρακτικές

διαχείρισης δεδομένων και υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών επικοινωνίας όπως δορυφόροι 5G και χαμηλής τροχιάς (LEO) (Hiekata et al., 2021; Mukherjee et al., 2020).



Εικόνα 7: Οικοσύστημα IoT στην Ναυτιλία (Durlík et al., 2023)

Αυτό το διάγραμμα παρουσιάζει την ενσωμάτωση του IoT στις θαλάσσιες λειτουργίες, συνδέοντας διάφορους αισθητήρες (GPS, καιρικές συνθήκες, φορτίο, περιβαλλοντική παρακολούθηση και παρακολούθηση κινητήρα) σε οντότητες όπως λιμάνια, πλοία και υπεράκτιες πλατφόρμες. Το IoT επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω δορυφόρου, ραδιοσυχνοτήτων και υποβρύχιας ακουστικής επικοινωνίας, βελτιώνοντας την πλοήγηση, την προγνωστική συντήρηση και τη λειτουργική απόδοση στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Ο μετασχηματιστικός αντίκτυπος του IoT στις θαλάσσιες δραστηριότητες υπογραμμίζει τη σημασία του για την αντιμετώπιση των εξελισσόμενων αναγκών του κλάδου. Επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, την προγνωστική συντήρηση και τη βελτιωμένη λήψη αποφάσεων, το IoT όχι μόνο βελτιώνει τη λειτουργική απόδοση αλλά συμβάλλει επίσης στη βιωσιμότητα και την ασφάλεια. Καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχίζουν να επεκτείνουν τις δυνατότητες του IoT, ο ρόλος του στη διαμόρφωση του μέλλοντος των ναυτιλιακών επιχειρήσεων θα αυξηθεί, οδηγώντας τον κλάδο σε εξυπνότερα και πιο συνδεδεμένα συστήματα.

1.6.2 Ο ρόλος του AMR αισθητήρα στο IoT

Ο αισθητήρας ανισότροπης μαγνητοαντίστασης (AMR) διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), προσφέροντας ακρίβεια, αποτελεσματικότητα και ευελιξία σε διάφορες εφαρμογές, ιδιαίτερα στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Καθώς τα συστήματα IoT βασίζονται σε ακριβή συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για την απρόσκοπτη επικοινωνία και τη λήψη ενημερωμένων αποφάσεων, οι μοναδικές ιδιότητες των αισθητήρων AMR τα καθιστούν ιδανική επιλογή για την ενσωμάτωση των δυνατοτήτων ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου σε αυτά τα δίκτυα. Το συμπαγές μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η υψηλή ευαισθησία των αισθητήρων AMR τους επιτρέπουν να ανταποκρίνονται στις αυστηρές απαιτήσεις των πλασίων IoT, διασφαλίζοντας αξιόπιστη απόδοση σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα (Ripka et al., 2014; Rifai et al., 2016).

Στα συστήματα IoT, οι αισθητήρες AMR χρησιμεύουν ως κρίσιμοι κόμβοι για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων, μια ικανότητα αναπόσπαστη για την πλοήγηση, τον εντοπισμό θέσης και την δομική παρακολούθηση. Για παράδειγμα, στη θαλάσσια πλοήγηση, οι αισθητήρες AMR επιτρέπουν στις ψηφιακές πυξίδες να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες κατεύθυνσης ανιχνεύοντας ανεπαίσθητες διακυμάνσεις στο μαγνητικό πεδίο της Γης. Αυτή η ακρίβεια εξασφαλίζει αξιόπιστη λειτουργία ακόμη και σε περιβάλλοντα με σημαντικές μαγνητικές παρεμβολές, όπως κοντά σε βιομηχανικά λιμάνια ή πολυσύχναστες λωρίδες πλοίων. Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR σε δίκτυα IoT επιτρέπει τη μετάδοση αυτών των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικά συστήματα, επιτρέποντας δυναμικές προσαρμογές στις τροχιές των σκαφών και βελτιώνοντας την ασφάλεια πλοήγησης (Wu et al., 2021; Bevington, Gartman, & Chalupczak, 2019).

Πέρα από την πλοήγηση, οι αισθητήρες AMR διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση της δομικής υγείας εντός των πλασίων IoT. Ανιχνεύοντας αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο που προκαλούνται από συγκεντρώσεις τάσεων ή ελαττώματα υλικού, αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την κατάσταση του κύτους των πλοίων, των αγωγών και άλλων υποδομών. Όταν είναι ενσωματωμένοι

σε συστήματα με δυνατότητα IoT, οι αισθητήρες AMR μεταδίδουν συνεχείς ροές δεδομένων για ανάλυση σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας τις προγνωστικές στρατηγικές συντήρησης. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο απροσδόκητων αστοχιών και παρατείνει τη διάρκεια ζωής των ναυτιλιακών περιουσιακών στοιχείων, μειώνοντας σημαντικά το κόστος και ενισχύοντας τη λειτουργική αποτελεσματικότητα (Eslamlou et al., 2022; Silva-Campillo et al., 2023).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR με πλατφόρμες IoT ενισχύεται περαιτέρω από τη συμβατότητά τους με μικροελεγκτές όπως ο ESP32. Αυτός ο μικροελεγκτής παρέχει την επεξεργαστική ισχύ και τη συνδεσιμότητα που απαιτούνται για τη διαχείριση δεδομένων από πολλούς αισθητήρες ταυτόχρονα. Μέσω πρωτοκόλλων όπως το Wi-Fi και το Bluetooth, το ESP32 επιτρέπει στους αισθητήρες AMR να μεταδίδουν δεδομένα σε συστήματα που βασίζονται σε σύννεφο ή σε τοπικές υπολογιστικές μονάδες αιχμής για ανάλυση. Αυτή η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα ενισχύει την ανταπόκριση των δικτύων IoT, επιτρέποντας τη γρήγορη λήψη αποφάσεων σε κρίσιμες θαλάσσιες επιχειρήσεις, όπως η αποφυγή σύγκρουσης και η απόκριση έκτακτης ανάγκης (Gerakoudi, Kokosalakis, & Stavroulakis, 2024; Kamolov & Park, 2019).

Οι αισθητήρες AMR συμβάλλουν επίσης στη βιωσιμότητα στις εφαρμογές IoT. Η χαμηλή τους κατανάλωση ενέργειας ευθυγραμμίζεται με τους στόχους ενεργειακής απόδοσης των σύγχρονων δικτύων IoT, τα οποία δίνουν προτεραιότητα στον ελάχιστο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση. Επιπλέον, ο στιβαρός σχεδιασμός τους επιτρέπει να λειτουργούν αξιόπιστα σε σκληρές θαλάσσιες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης στο θαλασσινό νερό και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, ενισχύοντας περαιτέρω τον ρόλο τους ως αξιόπιστο συστατικό στα οικοσυστήματα IoT (Min et al., 2021; Briguglio & Crupi, 2024).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων AMR σε συστήματα IoT έχει οδηγήσει στην καινοτομία στην προγνωστική ανάλυση και τον αυτοματισμό. Αξιοποιώντας αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, οι πλατφόρμες IoT μπορούν να επεξεργάζονται δεδομένα από αισθητήρες AMR για να ανιχνεύσουν μοτίβα και να προβλέψουν μελλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, αυτά τα συστήματα μπορούν να εντοπίσουν πρώιμα

σημάδια φθοράς του εξοπλισμού ή δομικής καταπόνησης, επιτρέποντας προληπτικές παρεμβάσεις. Αυτή η ικανότητα ενισχύει την ασφάλεια, μειώνει το χρόνο διακοπής λειτουργίας και βελτιστοποιεί την κατανομή των πόρων, καθιστώντας τους αισθητήρες AMR ακρογωνιαίο λίθο των έξυπνων ναυτιλιακών τεχνολογιών (Tahegi et al., 2022; Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020).

Ο ρόλος των αισθητήρων AMR στο IoT είναι αναπόσπαστος για την προώθηση των θαλάσσιων επιχειρήσεων και όχι μόνο. Η ακρίβεια, η αποτελεσματικότητά τους και η προσαρμοστικότητά τους σε δύσκολες συνθήκες τα καθιστούν ένα ανεκτίμητο στοιχείο σε συνδεδεμένα συστήματα. Καθώς το IoT συνεχίζει να εξελίσσεται, οι δυνατότητες των αισθητήρων AMR θα επεκταθούν περαιτέρω, οδηγώντας την καινοτομία στη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων και διασφαλίζοντας τη συνεχή ανάπτυξη εξυπνότερων, πιο βιώσιμων τεχνολογικών οικοσυστημάτων.

1.6.3 Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές

Ο τομέας της τεχνολογίας αισθητήρων και η ενσωμάτωσή του με το IoT σε ναυτιλιακές εφαρμογές αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις, αλλά αυτές ανοίγουν επίσης δρόμους για μελλοντικές εξελίξεις και καινοτομίες. Μία από τις κύριες προκλήσεις έγκειται στο σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον, όπου οι αισθητήρες πρέπει να λειτουργούν αξιόπιστα παρά την έκθεση σε θαλασσινό νερό, την υγρασία, τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και τους μηχανικούς κραδασμούς. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση και τη μακροζωία του αισθητήρα, καθιστώντας τον στιβαρό σχεδιασμό και τα προηγμένα υλικά ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας και της ακρίβειας με την πάροδο του χρόνου. Ενώ οι εξελίξεις σε προστατευτικά περιβλήματα και ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά έχουν μετριάσει ορισμένες από αυτές τις προκλήσεις, απαιτείται περαιτέρω καινοτομία για τη δημιουργία αισθητήρων που μπορούν να λειτουργούν με συνέπεια κάτω από ακραίες συνθήκες (Ripka et al., 2014; Silva-Campillo et al., 2023).

Μια άλλη σημαντική πρόκληση είναι η επεκτασιμότητα και το κόστος της ανάπτυξης προηγμένων δικτύων αισθητήρων. Η υιοθέτηση τεχνολογιών όπως οι αισθητήρες AMR και τα συστήματα IoT συχνά απαιτεί ουσιαστική αρχική επένδυση, ιδιαίτερα για

θαλάσσιες επιχειρήσεις μεγάλης κλίμακας που περιλαμβάνουν πολλαπλά σκάφη ή εκτεταμένες υποδομές. Ενώ τα μακροπρόθεσμα οφέλη, όπως η προβλεπτική συντήρηση και η λειτουργική αποτελεσματικότητα, δικαιολογούν αυτά τα κόστη, η αρχική οικονομική επιβάρυνση μπορεί να είναι απαγορευτική. Η ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών διαδικασιών παραγωγής και υβριδικών συστημάτων αισθητήρων που συνδυάζουν πολλαπλές λειτουργίες σε μια ενιαία συσκευή θα μπορούσε να αντιμετωπίσει αυτές τις ανησυχίες, καθιστώντας τις προηγμένες τεχνολογίες πιο προσιτές σε ένα ευρύτερο φάσμα χειριστών (Rifai et al., 2016; Briguglio & Crupi, 2024).

Η διαλειτουργικότητα και η τυποποίηση αντιπροσωπεύουν πρόσθετα εμπόδια στην ενσωμάτωση αισθητήρων στα οικοσυστήματα IoT. Η ναυτιλιακή βιομηχανία περιλαμβάνει διάφορους ενδιαφερόμενους φορείς, ο καθένας από τους οποίους χρησιμοποιεί διαφορετικά συστήματα, πρωτόκολλα επικοινωνίας και τύπους αισθητήρων. Η διασφάλιση απρόσκοπτης ανταλλαγής δεδομένων και συμβατότητας μεταξύ αυτών των συστημάτων είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων των λειτουργιών με δυνατότητα IoT. Η τυποποίηση πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως το MQTT και το CoAP, και η υιοθέτηση ενοποιημένων μορφών δεδομένων θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη διαλειτουργικότητα, επιτρέποντας πιο συνεκτικά και αποτελεσματικά δίκτυα (Aslam, Michaelides, & Herodotou, 2020; Hiekata et al., 2021).

Η ασφάλεια των δεδομένων είναι άλλη μια πειστική ανησυχία, ιδιαίτερα με την αυξανόμενη εξάρτηση από συστήματα IoT σε κρίσιμες θαλάσσιες λειτουργίες. Η διασυνδεδεμένη φύση των δικτύων IoT δημιουργεί τρωτά σημεία που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από κυβερνοεπιθέσεις, δυνητικά θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια και τη λειτουργική ακεραιότητα. Η διασφάλιση ισχυρών μέτρων κυβερνοασφάλειας, όπως η κρυπτογράφηση, τα πρωτόκολλα ελέγχου ταυτότητας και η ανίχνευση απειλών σε πραγματικό χρόνο, είναι απαραίτητη για τη διαφύλαξη ευαίσθητων δεδομένων και τη διατήρηση της ανθεκτικότητας του συστήματος. Καθώς αυξάνεται η υιοθέτηση του IoT, οι επενδύσεις σε προσεγγίσεις ασφαλούς ανά σχεδιασμό θα είναι κρίσιμες για την προστασία των θαλάσσιων περιουσιακών στοιχείων (Jimenez, Bouhmala, & Gausdal, 2020; Mukherjee et al., 2020).

Παρά αυτές τις προκλήσεις, το μέλλον της τεχνολογίας αισθητήρων και του IoT στις ναυτιλιακές εφαρμογές είναι πολλά υποσχόμενο. Οι αναδυόμενες τάσεις περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) για προηγμένες αναλύσεις δεδομένων, επιτρέποντας την ανίχνευση ανωμαλιών σε πραγματικό χρόνο, την προγνωστική συντήρηση και την αυτόνομη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, η ανάπτυξη συμπαγών, ενεργειακά αποδοτικών και πολυλειτουργικών αισθητήρων θα ενισχύσει περαιτέρω την επεκτασιμότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών των συστημάτων. Τεχνολογίες όπως οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (LEO) και τα δίκτυα 5G αναμένεται να βελτιώσουν τη συνδεσιμότητα, αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς σε απομακρυσμένες περιοχές και επιτρέποντας την απρόσκοπτη παγκόσμια επικοινωνία (Taheri et al., 2022; Thombre et al., 2020).

Η βιωσιμότητα θα παίξει επίσης καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των τεχνολογιών αισθητήρων. Η ναυτιλιακή βιομηχανία επικεντρώνεται ολοένα και περισσότερο στη μείωση των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων και οι ενεργειακά αποδοτικοί αισθητήρες που ευθυγραμμίζονται με τις πράσινες πρωτοβουλίες αποκτούν εξέχουσα θέση. Καινοτομίες σε αισθητήρες που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αυτοί που χρησιμοποιούν ηλιακή ή κυματική ενέργεια, θα μπορούσαν να φέρουν επανάσταση στην ανάπτυξη του IoT σε θαλάσσια περιβάλλοντα, διασφαλίζοντας τόσο την αποτελεσματικότητα όσο και τη βιωσιμότητα (Briguglio & Crupi, 2024; Min et al., 2021).

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι τεχνολογίες αισθητήρων και το IoT στις ναυτιλιακές εφαρμογές οδηγούν στη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη. Αντιμετωπίζοντας ζητήματα ανθεκτικότητας, επεκτασιμότητας, διαλειτουργικότητας και ασφάλειας, η βιομηχανία μπορεί να ξεκλειδώσει πλήρως τις δυνατότητες αυτών των καινοτομιών. Το μέλλον έχει τεράστιες δυνατότητες για την προώθηση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων, τη δημιουργία εξυπνότερων, ασφαλέστερων και πιο βιώσιμων συστημάτων που επαναπροσδιορίζουν τις δυνατότητες και τον αντίκτυπο του κλάδου.

2 Πειραματικό μέρος

Ο σκοπός του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας ήταν η σε βάθος κατανόηση της λειτουργίας των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης τύπου AMR (Anisotropic Magnetoresistance), καθώς και η πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες ελεγχόμενων μετρήσεων μαγνητικού πεδίου. Στο αρχικό στάδιο της μελέτης, διατέθηκαν διάφοροι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, για τους οποίους πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική και τεχνική διερεύνηση με σκοπό την εξακρίβωση του τύπου τους και τον διαχωρισμό των αισθητήρων AMR από άλλες τεχνολογίες μαγνητοαντίστασης.

Στη συνέχεια, οι αισθητήρες που επιβεβαιώθηκε ότι βασίζονται στην τεχνολογία AMR συνδέθηκαν με μικροελεγκτή τύπου ESP32 πάνω σε breadboard, με τη χρήση κατάλληλων καλωδιώσεων. Ακολούθησε η ανάπτυξη και υλοποίηση του απαραίτητου προγραμματιστικού κώδικα, ώστε να είναι δυνατή η ανάγνωση και απεικόνιση των μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους τρεις άξονες (X, Y και Z), μέσω του Serial Monitor και του Serial Plotter του αναπτυξιακού περιβάλλοντος.

Αφού επιβεβαιώθηκε η ορθότητα των ηλεκτρικών συνδέσεων και του προγραμματισμού, καθώς και η λογική συνέπεια των μετρούμενων τιμών, οι αισθητήρες αποσυνδέθηκαν από το breadboard και τοποθετήθηκαν μόνιμα σε πλακέτα κυκλώματος μαζί με τον μικροελεγκτή ESP32. Η συναρμολόγηση πραγματοποιήθηκε με χρήση κολλητηρίου και κράματος συγκόλλησης, εξασφαλίζοντας τη μηχανική και ηλεκτρική σταθερότητα της διάταξης.

Στο επόμενο στάδιο, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε προστατευτικό περίβλημα με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D printer), προσαρμοσμένο στις διαστάσεις της τελικής διάταξης. Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων στο περίβλημα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, με σκοπό

τη συλλογή δεδομένων και τη δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης της απόδοσής τους.

Τέλος, τα καταγεγραμμένα δεδομένα των αξόνων καθώς και τα αντίστοιχα γραφήματα μεταφέρθηκαν σε περιβάλλον επεξεργασίας δεδομένων (Microsoft Excel), όπου πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή παρατηρήσεων και συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά και την καταλληλότητα των επιμέρους αισθητήρων για τις εξεταζόμενες εφαρμογές.

2.1. Αναγνώριση αισθητήρων Ανάλυση και επιλογή αισθητήρων μαγνητικού πεδίου AMR

Το πρώτο στάδιο του πειραματικού μέρους περιλάμβανε την ανάλυση των πέντε αισθητήρων μαγνητικού πεδίου που διατέθηκαν, με στόχο την αναγνώριση της τεχνολογίας στην οποία βασίζεται ο καθένας και τον προσδιορισμό του κατά πόσο ανήκει στην κατηγορία των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης τύπου AMR (Anisotropic Magnetoresistance). Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς στην αγορά διατίθενται αισθητήρες μαγνητικού πεδίου που βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες, όπως AMR, TMR ή Hall effect, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ευαισθησίας και ακρίβειας.

Αισθητήρας GY-271:

Ο πρώτος αισθητήρας που εξετάστηκε είναι ο GY-271, ένας τριαξονικός αισθητήρας μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων και εφαρμογές προσανατολισμού. Στις αρχικές εκδόσεις του, ο GY-271 ενσωμάτωνε το ολοκληρωμένο κύκλωμα HMC5883L της Honeywell, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR). Σε νεότερες εκδόσεις του ίδιου module, χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο QMC5883L, το οποίο είναι συμβατό σε επίπεδο λειτουργικότητας, αλλά δεν βασίζεται στην τεχνολογία AMR.

Ο αισθητήρας μετρά τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου στους τρεις άξονες (X, Y και Z) και μετατρέπει τις μετρήσεις σε ψηφιακά δεδομένα, επιτρέποντας τον υπολογισμό της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου. Μετά τη σύνδεσή του με μικροελεγκτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες βιβλιοθήκες για την

ανάγνωση των δεδομένων και την υλοποίηση εφαρμογών όπως ψηφιακές πυξίδες ή συστήματα προσανατολισμού. Στην ελληνική αγορά, το κόστος του αισθητήρα είναι σχετικά χαμηλό (περίπου 4,8 €), γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό για οικονομικές εφαρμογές.

Αισθητήρας GY-511:

Ο δεύτερος αισθητήρας που εξετάστηκε είναι ο GY-511, μια μονάδα που συνδυάζει τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο και τριαξονικό μαγνητόμετρο, βασισμένη στο ολοκληρωμένο κύκλωμα LSM303DLHC της STMicroelectronics. Το μαγνητόμετρο του LSM303DLHC βασίζεται στην τεχνολογία ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) και διαθέτει ενσωματωμένο μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC), επιτρέποντας την παροχή ψηφιακών μετρήσεων υψηλής ανάλυσης.

Ο αισθητήρας επικοινωνεί μέσω του πρωτοκόλλου I²C, γεγονός που διευκολύνει την ενσωμάτωσή του σε συστήματα με μικροελεγκτές. Επιπλέον, παρέχει δυνατότητες όπως ανίχνευση κίνησης και μέτρηση θερμοκρασίας, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν σε σύνθετες εφαρμογές. Για την ανάγνωση των δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιβλιοθήκες όπως η LSM303, ενώ στην ελληνική αγορά ο αισθητήρας κοστολογείται περίπου στα 5,9 €.

Αισθητήρας LIS3MDL:

Ο αισθητήρας LIS3MDL είναι ένας τριαξονικός αισθητήρας μαγνητικού πεδίου υψηλής απόδοσης, επίσης κατασκευασμένος από την STMicroelectronics. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους αισθητήρες, ο LIS3MDL βασίζεται στην τεχνολογία TMR (Tunnel Magnetoresistance), η οποία προσφέρει αυξημένη ευαισθησία και ακρίβεια σε σύγκριση με την τεχνολογία AMR, με πιθανό κόστος τη μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος και το υψηλότερο κόστος.

Παρά το γεγονός ότι δεν αποτελεί αισθητήρα AMR, συμπεριλήφθηκε στη μελέτη με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσής του σε σχέση με τους υπόλοιπους αισθητήρες. Ο LIS3MDL υποστηρίζει πολλαπλά πρωτόκολλα επικοινωνίας και προσφέρει δυνατότητα επιλογής διαφορετικών κλιμάκων μέτρησης, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτο. Για την αξιοποίησή του μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιβλιοθήκες όπως η Adafruit LIS3MDL για την ανάγνωση των δεδομένων του αισθητήρα και την ανάπτυξη εφαρμογών όπως ψηφιακές πυξίδες ή συστήματα ανίχνευσης μαγνητικών πεδίων. Στην ελληνική αγορά, η τιμή του αισθητήρα ανέρχεται περίπου στα 9,45 €.

Αισθητήρας LSM303AGR:

Ο LSM303AGR είναι ένας υπερ-συμπαγής αισθητήρας που συνδυάζει τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο και τριαξονικό μαγνητόμετρο, κατασκευασμένος από την STMicroelectronics. Το μαγνητόμετρο του αισθητήρα βασίζεται στην τεχνολογία ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) και παρέχει ψηφιακές μετρήσεις μέσω του πρωτοκόλλου I²C, με υψηλή ανάλυση χάρη στον ενσωματωμένο μετατροπέα ADC.

Μετά τη σύνδεσή του με μικροελεγκτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιβλιοθήκες όπως η Adafruit LSM303AGR για την ανάγνωση των δεδομένων και την ανάπτυξη εφαρμογών προσανατολισμού ή ανίχνευσης κίνησης. Σε σύγκριση με τους προηγούμενους αισθητήρες, ο LSM303AGR παρουσιάζει υψηλότερο κόστος (περίπου 11,88 € στην ελληνική αγορά), το οποίο δικαιολογείται από τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης και σταθερότητας.

Αισθητήρας MMC5983MA:

Ο τελευταίος αισθητήρας που εξετάστηκε είναι ο MMC5983MA, ένας τριαξονικός αισθητήρας μαγνητικού πεδίου υψηλής απόδοσης που κατασκευάζεται από τη MEMSIC Inc. Ο αισθητήρας βασίζεται σε τεχνολογία μαγνητοαντίστασης και διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα απομαγνήτισης (degaussing), το οποίο συμβάλλει στη μείωση της υπολειπόμενης μαγνήτισης και στη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων.

Η επικοινωνία του αισθητήρα με τον μικροελεγκτή πραγματοποιείται μέσω ψηφιακών πρωτοκόλλων, ενώ για την ανάγνωση των δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιβλιοθήκες όπως η SparkFun MMC5983MA Magnetometer. Ο MMC5983MA είναι ο πιο ακριβός αισθητήρας από αυτούς που εξετάστηκαν, με κόστος περίπου 15,44 € στη διεθνή αγορά, ωστόσο προσφέρει αυξημένη σταθερότητα και χαμηλό επίπεδο θορύβου.

Συνοψίζοντας, οι αισθητήρες που αναλύθηκαν καλύπτουν διαφορετικές τεχνολογίες και χαρακτηριστικά, παρουσιάζοντας μικρές αλλά ουσιαστικές διαφοροποιήσεις ως προς την ευαισθησία, την ακρίβεια και τη σταθερότητα των μετρήσεων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποτέλεσαν τη βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση που ακολούθησε στα επόμενα στάδια της πειραματικής διαδικασίας.

2.2. Συνδεσμολογία και υλοποίηση του συστήματος μέτρησης

Μετά την αναγνώριση της τεχνολογίας και των βασικών χαρακτηριστικών των αισθητήρων μαγνητικού πεδίου, ακολούθησε το στάδιο της πειραματικής υλοποίησης και της συνδεσμολογίας τους. Για τον σκοπό αυτό, οι αισθητήρες συνδέθηκαν αρχικά σε breadboard, ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη τροποποίηση των καλωδιώσεων και η δοκιμή διαφορετικών διατάξεων χωρίς τη χρήση συγκόλλησης. Η επιλογή του breadboard επέτρεψε την ευελιξία κατά την ανάπτυξη του συστήματος και διευκόλυνε τον έλεγχο της ορθότητας των συνδέσεων πριν την τελική συναρμολόγηση.

Ως κεντρική μονάδα ελέγχου και επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής τύπου ESP32, ο οποίος, όπως αναλύθηκε στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, προσφέρει αυξημένη υπολογιστική ισχύ, ενσωματωμένες δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας (Wi-Fi και Bluetooth) και υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως το I²C, που είναι απαραίτητο για τη διασύνδεση με τους αισθητήρες μαγνητικού πεδίου.

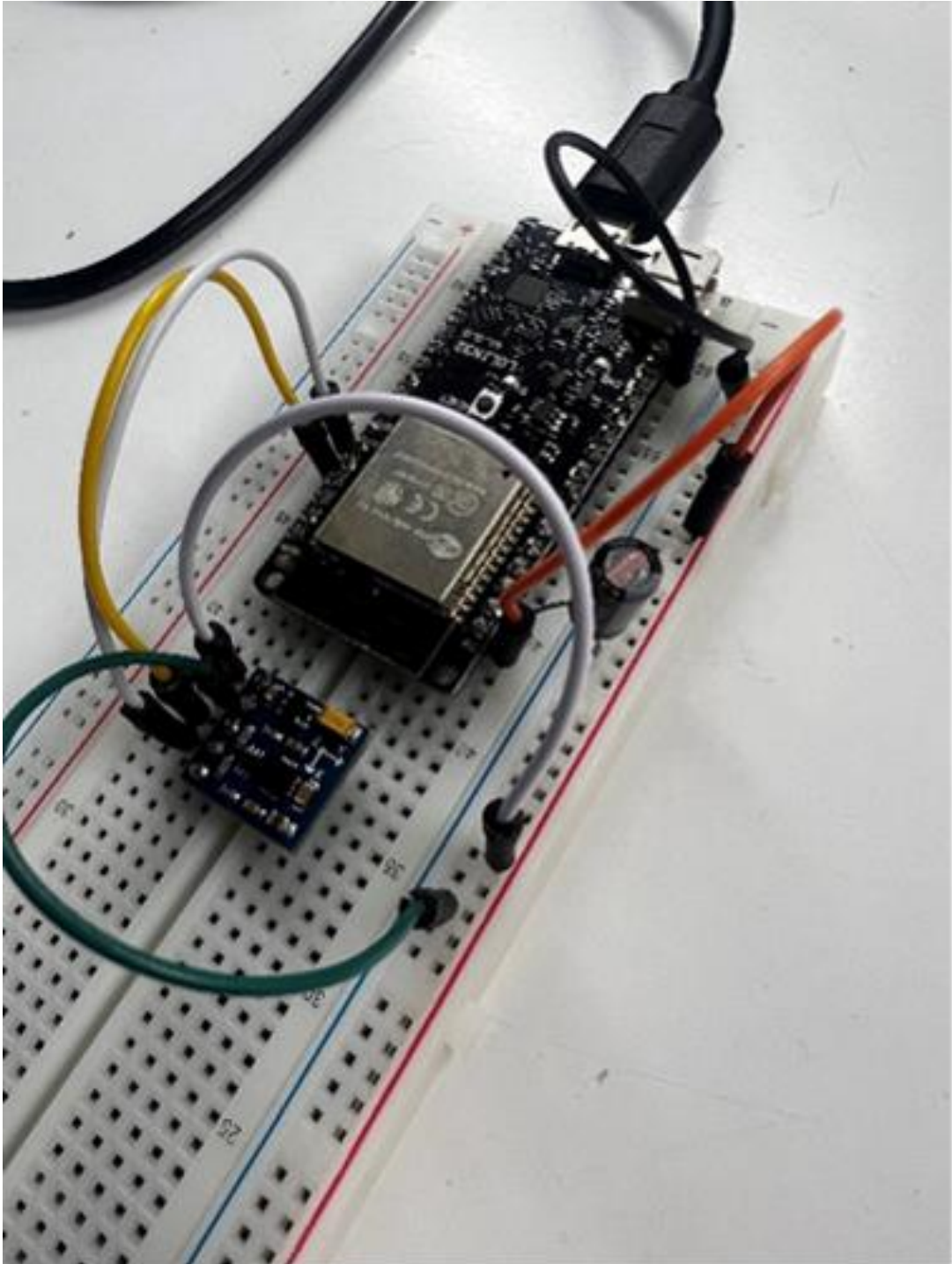
Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη σταθερότητα της τροφοδοσίας του ESP32, καθώς είναι γνωστό ότι ο μικροελεγκτής μπορεί να παρουσιάσει στιγμιαίες αιχμές κατανάλωσης ρεύματος, κυρίως κατά την ενεργοποίηση των ασύρματων διεπαφών. Σε περιπτώσεις μη επαρκούς ή ασταθούς τροφοδοσίας, τέτοιες αιχμές ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη συμπεριφορά ή επανεκκινήσεις του συστήματος.

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας κατά τη λειτουργία και τη φόρτωση του προγραμματιστικού κώδικα, τοποθετήθηκε κεραμικός πυκνωτής χωρητικότητας 10 nF μεταξύ των ακροδεκτών EN και GND του ESP32. Η διάταξη αυτή συμβάλλει στη σταθεροποίηση της γραμμής ενεργοποίησης του μικροελεγκτή και διευκολύνει την είσοδό του στη λειτουργία προγραμματισμού, μειώνοντας την πιθανότητα ανεπιθύμητων επανεκκινήσεων.

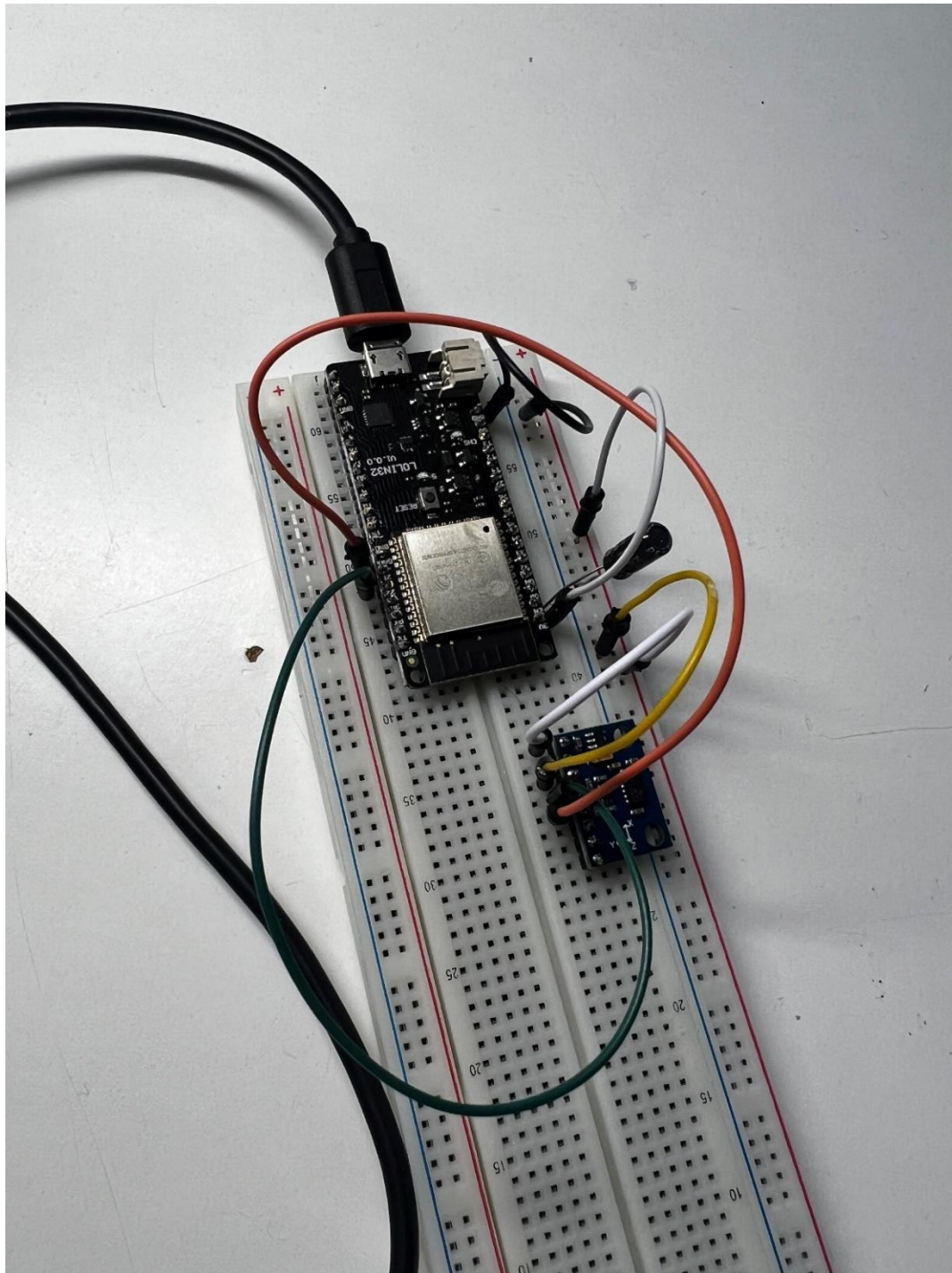
Στη συνέχεια, κάθε αισθητήρας συνδέθηκε ξεχωριστά με τον ESP32 σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή του, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο επικοινωνίας I²C και κοινή τροφοδοσία. Οι αντίστοιχες συνδεσμολογίες παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες, όπου αποτυπώνεται αναλυτικά η διάταξη για κάθε αισθητήρα.

Και για του πέντε αισθητήρες χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω διάταξη συνδεσμολογίας:

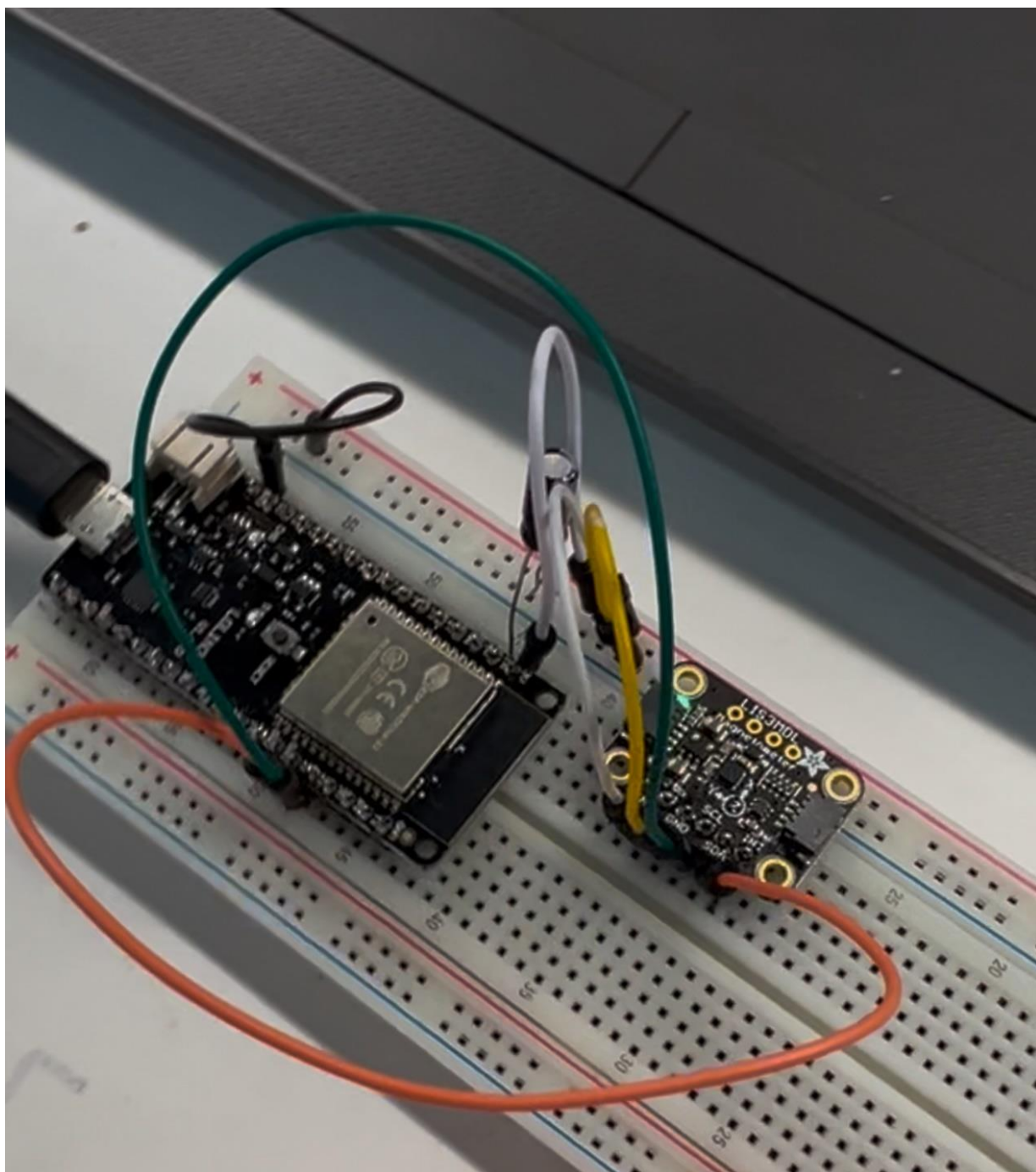
Sensors:	ESP32:
VCC	3.3V
GND	GND
SCL	GPIO22
SDA	GPIO21



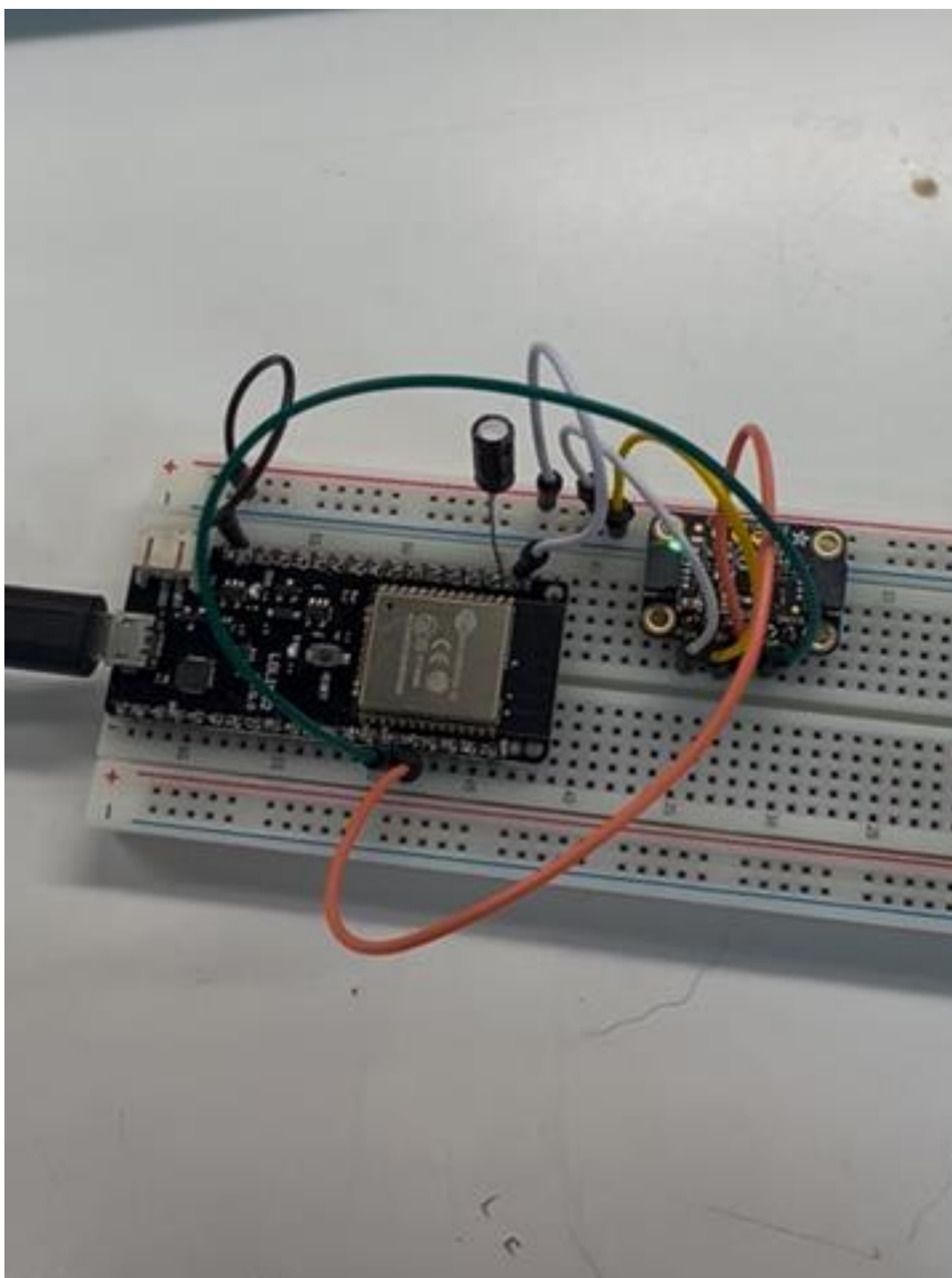
Εικόνα 8: Συνδεσμολογία αισθητήρα GY-271



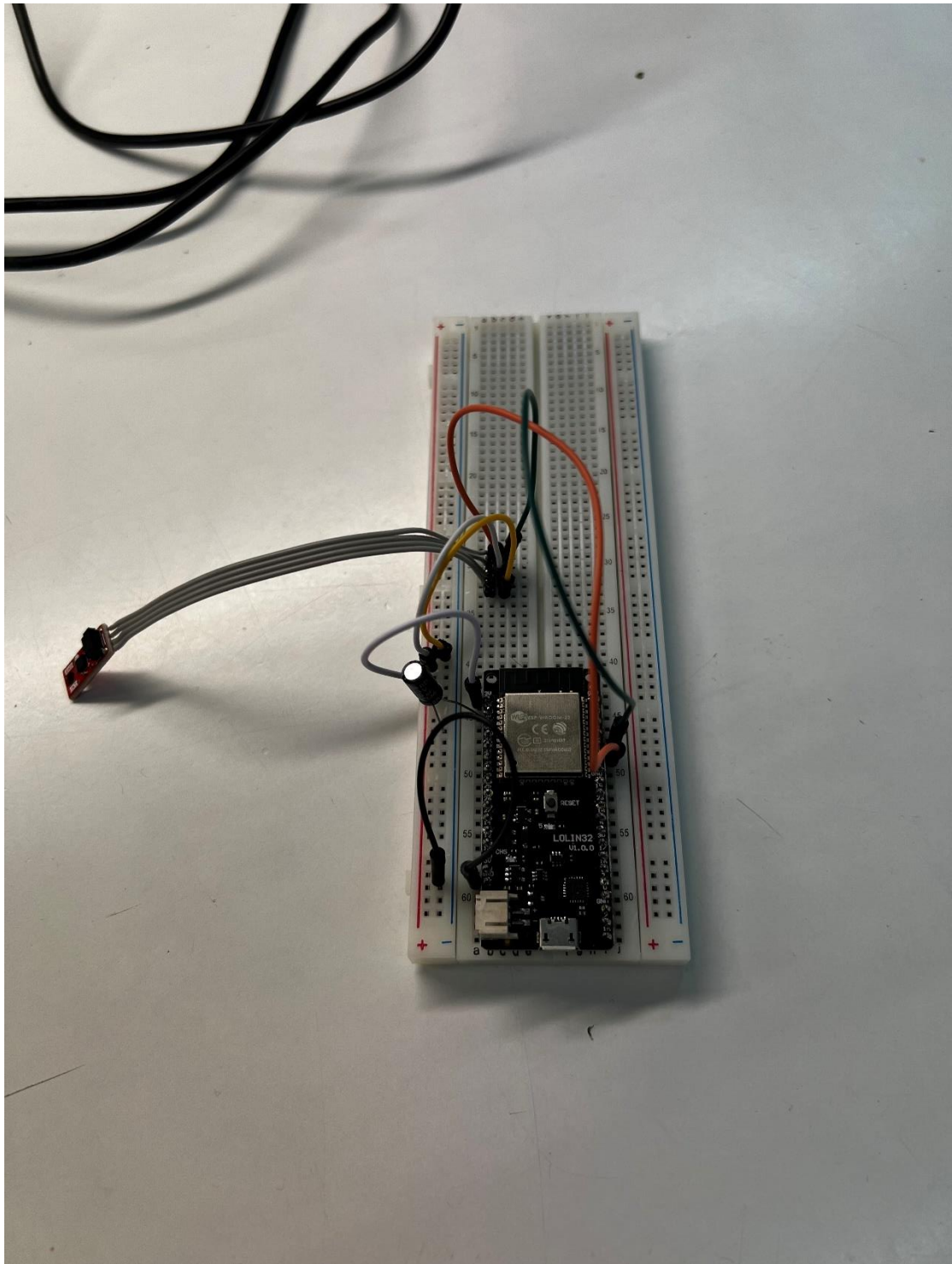
Εικόνα 9: Συνδεσμολογία αισθητήρα GY-511



Εικόνα 10: Συνδεσμολογία αισθητήρα LIS3MDL



Εικόνα 11: Συνδεσμολογία αισθητήρα LSM303AGR



Εικόνα 12: Συνδεσμολογία αισθητήρα MMC5983MA

2.3. Προγραμματισμός αισθητήρων και συλλογή δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση της συνδεσμολογίας, ακολούθησε ο προγραμματισμός και ο λειτουργικός έλεγχος κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Για λόγους αποδοτικής και συστηματικής διαδικασίας, μετά από κάθε νέα σύνδεση αισθητήρα στο breadboard πραγματοποιούνταν άμεσα ο προγραμματισμός του και η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του, πριν προχωρήσει η ίδια διαδικασία στον επόμενο αισθητήρα. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την ταχεία απομόνωση πιθανών σφαλμάτων συνδεσμολογίας ή ρυθμίσεων, μειώνοντας τον χρόνο διάγνωσης προβλημάτων.

Η ανάπτυξη και φόρτωση του κώδικα πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Arduino IDE, το οποίο υποστηρίζει τον ESP32 μέσω κατάλληλων πρόσθετων πακέτων (board support packages). Πριν την εκτέλεση της διαδικασίας προγραμματισμού, πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες ρυθμίσεις στο Arduino IDE, ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία του υπολογιστή με τον μικροελεγκτή μέσω καλωδίου USB. Συγκεκριμένα, από το μενού Tools επιλέχθηκαν:

α) η κατάλληλη πλατφόρμα/πλακέτα (Board), σύμφωνα με το μοντέλο ESP32 που χρησιμοποιήθηκε, και

β) η αντίστοιχη θύρα επικοινωνίας (Port), η οποία αποδίδεται αυτόματα από το λειτουργικό σύστημα κατά τη σύνδεση της συσκευής.

Στο πλαίσιο της παρούσας υλοποίησης επιλέχθηκε η πλακέτα WEMOS LOLIN32, ενώ η θύρα επικοινωνίας αντιστοιχούσε στη διαθέσιμη σειριακή θύρα του συστήματος (π.χ. COM5) κατά τη στιγμή της σύνδεσης. Επισημαίνεται ότι η ονομασία της θύρας ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με τον υπολογιστή και το λειτουργικό σύστημα, καθώς αποδίδεται δυναμικά.

Για την ανάγνωση των δεδομένων των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες βιβλιοθήκες λογισμικού (libraries), καθώς κάθε αισθητήρας διαφέρει ως προς το ολοκληρωμένο κύκλωμα, τις διαθέσιμες συναρτήσεις και τις παραμέτρους αρχικοποίησης. Στόχος του προγραμματισμού ήταν η λήψη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο για τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (άξονες X, Y και Z)

και η απεικόνισή τους τόσο αριθμητικά μέσω του Serial Monitor, όσο και γραφικά μέσω του Serial Plotter του Arduino IDE, επιτρέποντας άμεσο έλεγχο της συμπεριφοράς του σήματος.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι βασικές γραμμές κώδικα και οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε αισθητήρα, καθώς και οι παράμετροι που σχετίζονται με την ορθή επικοινωνία και την αξιόπιστη καταγραφή των μετρήσεων.

GY-271:

```
#include <QMC5883LCompass.h>
#include <Wire.h>

QMC5883LCompass compass;

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Εκκίνηση του Serial Monitor
  compass.init();    // Αρχικοποίηση του αισθητήρα
}

void loop() {
  int x, y, z;

  // Ανάγνωση των τιμών του αισθητήρα
  compass.read();

  // Απόκτηση των τιμών από τους άξονες
  x = compass.getX();
  y = compass.getY();
  z = compass.getZ();

  // Αποστολή των τιμών στον Serial Monitor και στο Serial Plotter
  //Serial.print("x:");
  Serial.print(x);
  Serial.print(",");

  //Serial.print(",y:");
  Serial.print(y);
  Serial.print(",");

  // Serial.print(",z:");
  Serial.println(z);

  delay(250); // Καθυστερήση 250 ms για να μην γεμίζει γρήγορα το Serial Monitor
}
```

GY-511:

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_LSM303_Mag_Unified.h>

// Δημιουργία του αντικειμένου για το μαγνητόμετρο
Adafruit_LSM303_Mag_Unified mag = Adafruit_LSM303_Mag_Unified(12345);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial); // Αναμονή για το Serial Monitor

  // Έναρξη του μαγνητόμετρου
  if (!mag.begin()) {
    Serial.println("Δεν βρέθηκε μαγνητόμετρο LSM303!");
    while (1);
  }
}

void loop() {
  sensors_event_t event;

  // Ανάγνωση δεδομένων από το μαγνητόμετρο
  mag.getEvent(&event);

  // Εκτύπωση δεδομένων μαγνητικού πεδίου (μικροΤέσλα)
  Serial.print(event.magnetic.x); Serial.print(","); // Τιμή X
  Serial.print(event.magnetic.y); Serial.print(","); // Τιμή Y
  Serial.println(event.magnetic.z);                 // Τιμή Z

  delay(100); // Μικρότερη καθυστέρηση για ομαλή εμφάνιση στο Serial Plotter
}
```

LIS3MDL :

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_LIS3MDL.h>

Adafruit_LIS3MDL lis3mdl;

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Σωστή ταχύτητα για τον Plotter
  Serial.println("Starting...");

  // Έναρξη του αισθητήρα
  if (!lis3mdl.begin_I2C()) {
    Serial.println("Failed to find LIS3MDL chip");
    while (1);
  }

  Serial.println("LIS3MDL found!");

  // Ρυθμίσεις αισθητήρα
  lis3mdl.setPerformanceMode(LIS3MDL_LOWPOWERMODE);
  lis3mdl.setRange(LIS3MDL_RANGE_4_GAUSS);
  lis3mdl.setOperationMode(LIS3MDL_CONTINUOUSMODE);
}

void loop() {
  sensors_event_t event;

  // Ανάγνωση δεδομένων από τον αισθητήρα
  if (lis3mdl.getEvent(&event)) {
    // Εκτύπωση δεδομένων στον Plotter
    Serial.print(event.magnetic.x);
    Serial.print(",");
    Serial.print(event.magnetic.y);
    Serial.print(",");
    Serial.println(event.magnetic.z);
  } else {
    // Αν αποτύχει, εκτύπωσε μηδενικά
    Serial.println("0 0 0");
  }

  delay(100); // Καθυστέρηση για καλύτερη εμφάνιση
}
```

LSM303AGR:

```
#include <Adafruit_LIS2MDL.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>

/* Assign a unique ID to this sensor at the same time */
Adafruit_LIS2MDL lis2mdl = Adafruit_LIS2MDL(12345);

void setup(void) {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial)
    delay(10); // wait for Serial Monitor to open

  Serial.println("LIS2MDL Magnetometer Test");
  Serial.println();

  /* Enable auto-gain */
  lis2mdl.enableAutoRange(true);

  /* Initialise the sensor */
  if (!lis2mdl.begin()) { // I2C mode
    Serial.println("Oops, no LIS2MDL detected ... Check your wiring!");
    while (1) delay(10);
  }

  /* Display some basic information on this sensor */
  lis2mdl.printSensorDetails();
}

void loop(void) {
  /* Get a new sensor event */
  sensors_event_t event;
  lis2mdl.getEvent(&event);

  /* Display the results (magnetic vector values in micro-Tesla (uT)) */
  Serial.print(event.magnetic.x);
  Serial.print(",");
  Serial.print(event.magnetic.y);
  Serial.print(",");
  Serial.println(event.magnetic.z);

  /* Delay before the next sample */
  delay(100);
}
```

MMC5983MA:

```
#include <Wire.h>
#include <SparkFun_MMC5983MA_Arduino_Library.h>

SFE_MMC5983MA myMag;
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);
  Serial.println("MMC5983MA Example - Reading X, Y, Z");

  Wire.begin();

  if (!myMag.begin())
  {
    Serial.println("MMC5983MA did not respond - check your wiring.");
    while (1);
  }

  myMag.softReset(); // Reset του αισθητήρα

  Serial.println("Sensor connected. Reading values...");
  Serial.println("X (μT)\tY (μT)\tZ (μT)");
}
void loop()
{
  uint32_t rawX, rawY, rawZ;

  // Ενεργοποίηση Set/Reset Manual μέσω του καταχωρητή
  Wire.beginTransmission(0x30); // Διεύθυνση I2C του αισθητήρα
  Wire.write(0x1B); // Επιλογή του καταχωρητή Control
  Wire.write(0x80); // Set/Reset Enable
  Wire.endTransmission();

  delay(10); // Μικρή καθυστέρηση για σταθεροποίηση

  if (myMag.getMeasurementXYZ(&rawX, &rawY, &rawZ)) {
    // Σωστή μετατροπή των raw δεδομένων σε μικροτέσλα (μT)
    double scaledX = ((double)rawX / 262144.0) * 100.0;
    double scaledY = ((double)rawY / 262144.0) * 100.0;
    double scaledZ = ((double)rawZ / 262144.0) * 100.0;

    Serial.print(scaledX, 2); Serial.print(",");
    Serial.print(scaledY, 2); Serial.print(",");
    Serial.println(scaledZ, 2);
  } else {
    Serial.println("Failed to read sensor data.");
  }
  delay(250); // Μεγαλύτερος χρόνος μεταξύ των μετρήσεων
}
```

2.4. Σύνδεση αισθητήρων σε πλακέτα (Perfboard)

Μετά την επιτυχή δοκιμή των αισθητήρων στο breadboard και την ολοκλήρωση του προγραμματισμού τους, το επόμενο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μόνιμη συναρμολόγηση του συστήματος σε πλακέτα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε διάτρητη πλακέτα τύπου Perfboard, η οποία αποτελεί μια πρακτική λύση για πρωτότυπες υλοποιήσεις, καθώς επιτρέπει τη συγκόλληση εξαρτημάτων χωρίς την ανάγκη σχεδιασμού και κατασκευής πλήρους τυπωμένου κυκλώματος (PCB).

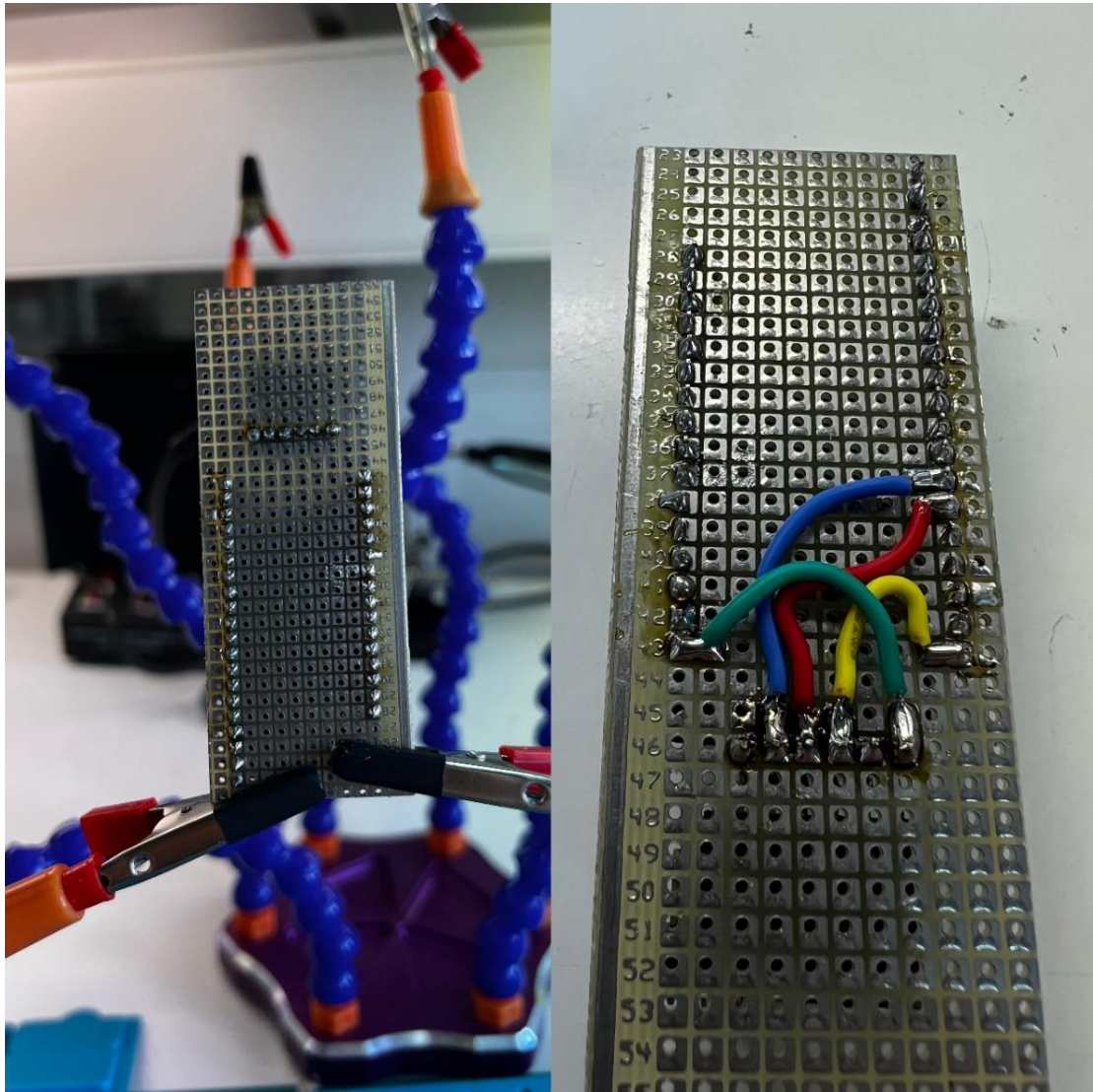
Η πλακέτα κόπηκε σε κατάλληλο μέγεθος, ώστε να εξυπηρετεί την τοποθέτηση όλων των απαιτούμενων εξαρτημάτων, διατηρώντας παράλληλα συμπαγείς διαστάσεις που να επιτρέπουν την τοποθέτησή της στο προστατευτικό περίβλημα που σχεδιάστηκε σε επόμενο στάδιο. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε η μηχανική συμβατότητα της πλακέτας με την τελική κατασκευή.

Η διαδικασία υλοποίησης περιλάμβανε την τοποθέτηση των εξαρτημάτων στην εμπρόσθια πλευρά της πλακέτας και τη συγκόλλησή τους στην οπίσθια πλευρά με τη χρήση κολλητηρίου και κράματος συγκόλλησης (καλάι). Αρχικά τοποθετήθηκε και συγκολλήθηκε ο μικροελεγκτής ESP32, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος, και στη συνέχεια συνδέθηκαν οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, ένας κάθε φορά, ώστε να πραγματοποιούνται οι απαιτούμενες μετρήσεις.

Οι ακροδέκτες που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση των αισθητήρων ήταν οι γραμμές τροφοδοσίας (VCC, GND) και οι γραμμές επικοινωνίας του πρωτοκόλλου I²C (SCL, SDA). Παρότι οι λειτουργίες των ακροδεκτών είναι κοινές για όλους τους αισθητήρες, η φυσική διάταξη και η σειρά των ακροδεκτών διαφέρει μεταξύ των διαφορετικών modules. Για τον λόγο αυτό, μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης ενός αισθητήρα, απαιτούνταν η αποσύνδεση και επανατοποθέτηση των καλωδιώσεων, ώστε να αντιστοιχούν σωστά στους ακροδέκτες του επόμενου αισθητήρα.

Η αποσύνδεση και επανασύνδεση των καλωδίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση σταθμού αποκόλλησης, γεγονός που επέτρεψε την ασφαλή αφαίρεση του κράματος συγκόλλησης χωρίς φθορά της πλακέτας ή των εξαρτημάτων. Για λόγους πρακτικής

ευκολίας και μείωσης των απαιτούμενων επεμβάσεων στη συνδεσμολογία, οι πρώτοι αισθητήρες που δοκιμάστηκαν ήταν οι GY-511, LIS3MDL και LSM303AGR, καθώς παρουσίαζαν ίδια σειρά ακροδεκτών (VCC, GND, SCL, SDA). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με τους αισθητήρες GY-271 και MMC5983MA, για τους οποίους απαιτήθηκαν τροποποιήσεις στη συνδεσμολογία λόγω διαφορετικής διάταξης των ακροδεκτών.



Εικόνα 13: Κόλληση των εξαρτημάτων στην πλακέτα

2.5. Κατασκευή περιβλήματος με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή

Στο επόμενο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε προστατευτικό περίβλημα για την τοποθέτηση της πλακέτας που δημιουργήθηκε. Ο σκοπός του περιβλήματος ήταν αφενός η μηχανική προστασία και η ασφαλής συγκράτηση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και αφετέρου η βελτίωση της εργονομίας και της επαναληψιμότητας της πειραματικής διαδικασίας. Παράλληλα, η ύπαρξη περιβλήματος συμβάλλει στη μείωση του κινδύνου μηχανικών φθορών ή τυχαίων επαφών με τα ηλεκτρονικά μέρη.

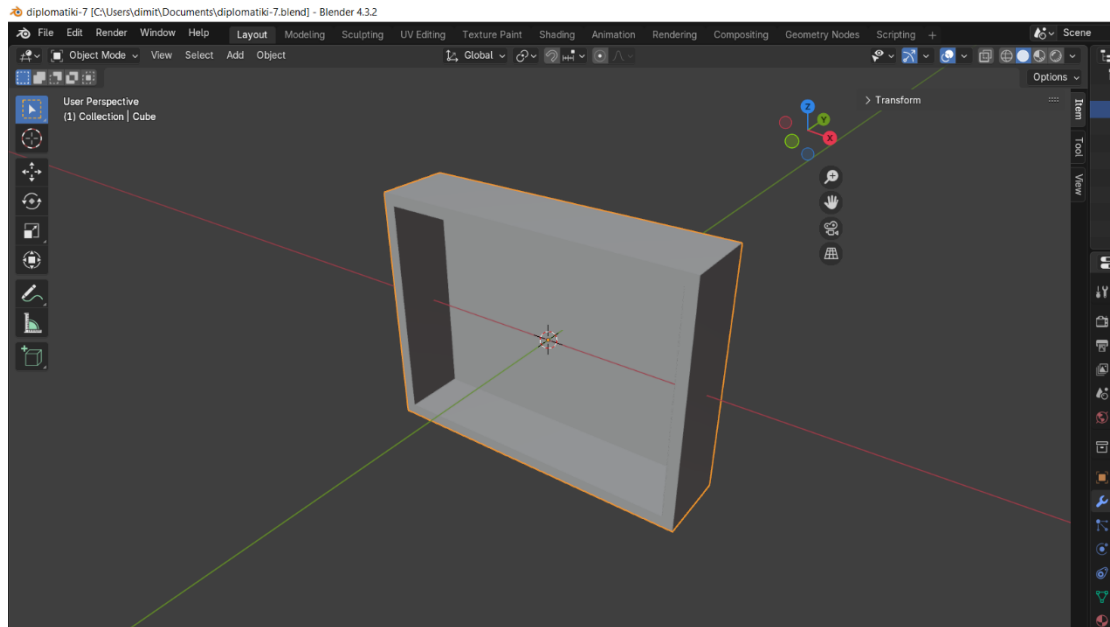
Ο σχεδιασμός του περιβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Blender, το οποίο επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση τρισδιάστατων αντικειμένων. Η κατασκευή αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα: το κύριο σώμα του κουτιού και ένα αποσπώμενο καπάκι, ώστε να είναι δυνατή η εύκολη πρόσβαση στην πλακέτα και στον μικροελεγκτή ESP32 όταν απαιτείται.

Οι εξωτερικές διαστάσεις του κύριου σώματος του περιβλήματος είναι 39 mm × 86 mm × 29 mm, ενώ οι αντίστοιχες εξωτερικές διαστάσεις του καπακιού είναι 42,3 mm × 10 mm × 32,3 mm. Και τα δύο τμήματα σχεδιάστηκαν με πάχος τοιχώματος 3 mm, το οποίο επιλέχθηκε ως συμβιβασμός μεταξύ μηχανικής αντοχής και ελαχιστοποίησης της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων και της επιφάνειας ή του αντικειμένου στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η επίδραση της απόστασης στη μετρούμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου, βελτιώνοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

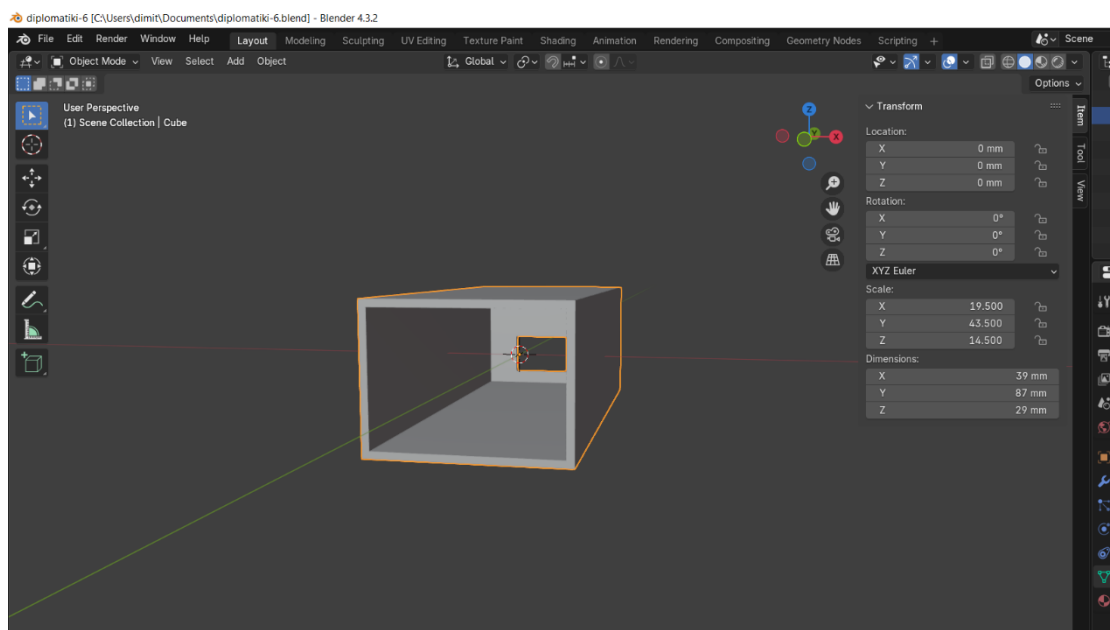
Επιπλέον, στο κάτω μέρος του περιβλήματος δημιουργήθηκε άνοιγμα για τη διέλευση του καλωδίου USB που συνδέει τον μικροελεγκτή ESP32 με τον φορητό υπολογιστή. Το άνοιγμα έχει διαστάσεις 15 mm × 10 mm και τοποθετήθηκε περίπου στο κέντρο της πλευράς, ώστε να διευκολύνεται η σύνδεση χωρίς να επηρεάζεται η σταθερότητα της διάταξης.

Με την ολοκλήρωση της σχεδίασης, τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα εξήχθησαν σε μορφή αρχείων STL και αποστάλθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου για την κατασκευή τους. Το υλικό εκτύπωσης (PLA) επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι μη

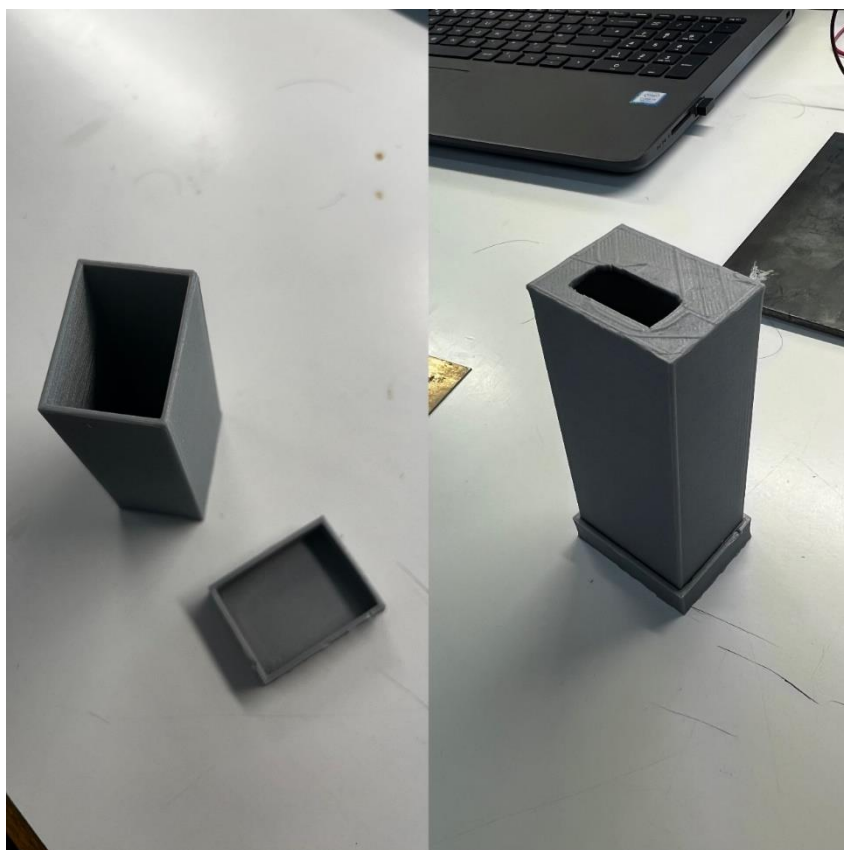
μαγνητικό, ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου από το ίδιο το περίβλημα.



Εικόνα 14: Σχέδιο καπακιού για τρισδιάστατη εκτύπωση



Εικόνα 15: Σχέδιο περιβλήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση



Εικόνα 16: Εκτυπωμένα τα σχεδιασμένα αντικείμενα

2.6. Πειραματική διαδικασία λήψης μετρήσεων

Μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης και της τοποθέτησης των αισθητήρων στο προστατευτικό περίβλημα, ακολούθησε το τελικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, το οποίο περιλάμβανε τη λήψη μετρήσεων μαγνητικού πεδίου με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης των αισθητήρων. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μεταλλικού ελάσματος, στο οποίο δημιουργήθηκε τοπική θερμική καταπόνηση, ώστε να προκύψουν περιοχές με διαφορετικά θερμικά και δομικά χαρακτηριστικά.

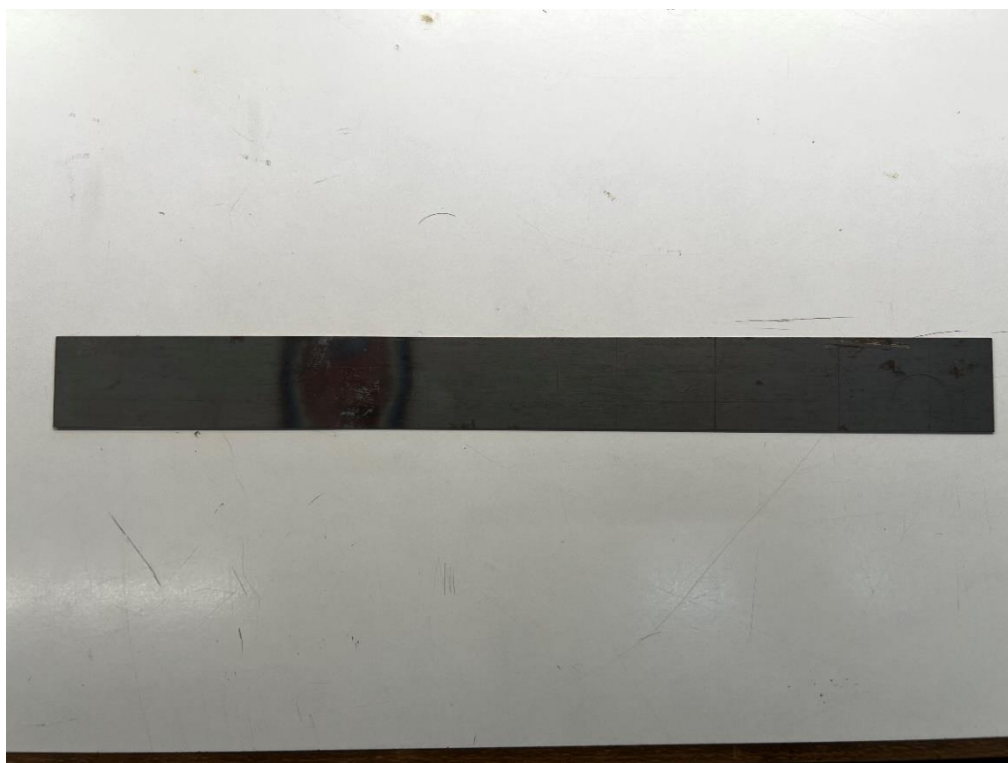
Η θερμική καταπόνηση του μεταλλικού δοκιμίου πραγματοποιήθηκε μέσω συσκευής επαγωγικής θέρμανσης, δημιουργώντας μια σαφώς ορατή ζώνη θερμικής επίδρασης. Η τοπική θέρμανση οδήγησε σε χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια του μετάλλου, οι οποίες σχετίζονται με την οξείδωση και τη διαφορετική θερμοκρασιακή καταπόνηση της επιφάνειας. Οι χρωματικές αυτές διαφοροποιήσεις χρησιμοποιήθηκαν ως οπτικός δείκτης της έκτασης της θερμικής επίδρασης και όχι ως άμεσος δείκτης μαγνητικών ιδιοτήτων.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, το περίβλημα που περιείχε τον μικροελεγκτή και τον εκάστοτε αισθητήρα μετακινήθηκε παράλληλα και με σταθερό τρόπο πάνω από την επιφάνεια του μεταλλικού ελάσματος. Με τον τρόπο αυτό, οι αισθητήρες κατέγραψαν τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου καθώς διέσχιζαν διαδοχικά περιοχές χωρίς θερμική επίδραση, περιοχές θερμικής καταπόνησης και την περιοχή εντονότερης θέρμανσης.

Στην περιοχή που δεν είχε υποστεί θερμική καταπόνηση, αναμενόταν σχετικά σταθερή συμπεριφορά του μαγνητικού σήματος, καθώς οι δομικές και μαγνητικές ιδιότητες του υλικού παρέμεναν αμετάβλητες. Κατά τη μετάβαση σε περιοχές που είχαν υποστεί θερμική επίδραση, οι τοπικές αλλαγές στη μικροδομή του μετάλλου, οι εσωτερικές τάσεις και η ανομοιογένεια της μαγνήτισης ενδέχεται να προκαλέσουν διαφοροποιήσεις στο καταγεγραμμένο μαγνητικό πεδίο. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποτυπώνονται ως μεταβολές ή κλιμακώσεις στο σήμα που καταγράφουν οι αισθητήρες.

Στην περιοχή της εντονότερης θερμικής καταπόνησης, παρατηρείται συνήθως πιο έντονη μεταβολή του μαγνητικού σήματος, χωρίς ωστόσο να προϋποτίθεται πλήρης απώλεια των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού. Η απόκριση των αισθητήρων σε αυτή τη ζώνη εξαρτάται από το είδος του μετάλλου, το επίπεδο θέρμανσης και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε αισθητήρα.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα, τα δεδομένα καταγράφηκαν και μεταφέρθηκαν σε περιβάλλον επεξεργασίας δεδομένων (Microsoft Excel), όπου πραγματοποιήθηκε η γραφική απεικόνιση των μετρήσεων και η περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 17: Μεταλλικό έλασμα με τοπική θερμική καταπόνηση

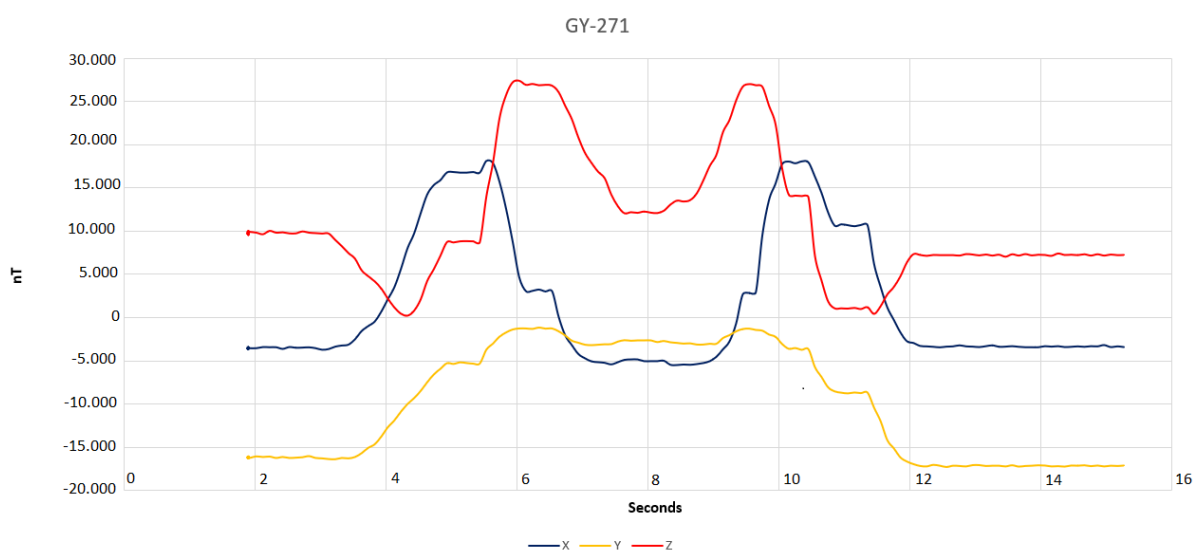
2.7. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικούς αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες προσομοίωσης μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Destructive Testing – NDT). Οι μετρήσεις αφορούν τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στους τρεις άξονες (X, Y και Z), καθώς ο αισθητήρας μετακινείται παράλληλα πάνω από το μεταλλικό έλασμα με σταθερή ταχύτητα.

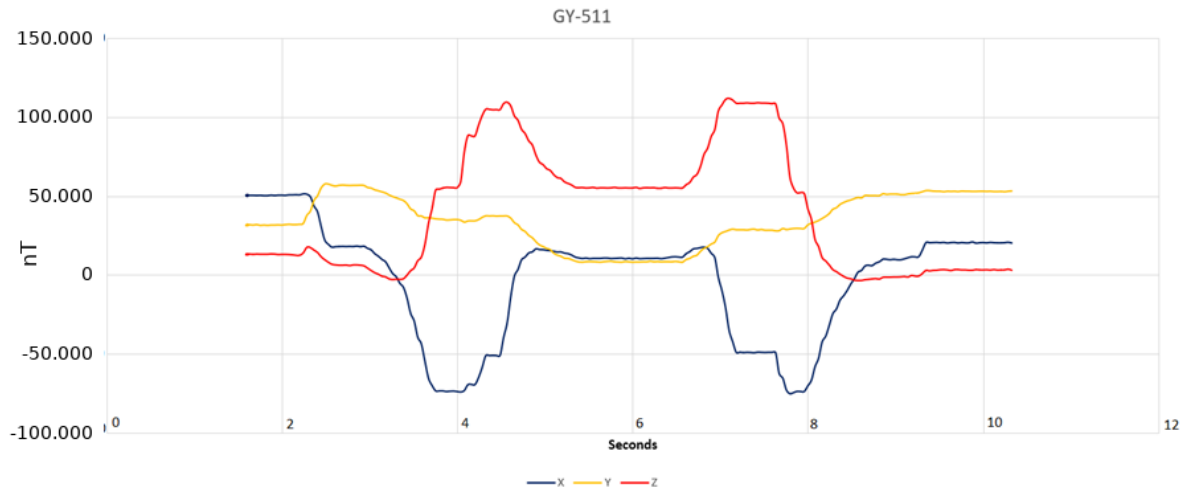
Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον άξονα Z, ο οποίος αντιστοιχεί στη διεύθυνση μετακίνησης του αισθητήρα κατά μήκος του δοκιμίου. Στον άξονα αυτό παρατηρούνται οι εντονότερες μεταβολές του μαγνητικού σήματος, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η πειραματική διάταξη είναι κατάλληλη για την ανίχνευση τοπικών μαγνητικών διαταραχών που σχετίζονται με μεταβολές της κατάστασης του υλικού.

Οι αισθητήρες καταγράφουν το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο σημείο μέτρησης, το οποίο επηρεάζεται τόσο από το γήινο μαγνητικό πεδίο όσο και από τοπικές διαταραχές που οφείλονται στη γειννίαση με μεταλλικές μάζες, στη μαγνήτιση του δοκιμίου, στη θερμική καταπόνηση και σε χαρακτηριστικά offsets των ίδιων των αισθητήρων. Το γήινο μαγνητικό πεδίο βρίσκεται τυπικά στην περιοχή των 50.000 nT, επομένως η καταγραφή υψηλότερων ή διαφοροποιημένων τιμών σε θερμικά καταπονημένες ή φερρομαγνητικές επιφάνειες θεωρείται αναμενόμενη λόγω της υπέρθεσης των τοπικών συνιστωσών στο γήινο υπόβαθρο. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της απόκρισης των αισθητήρων εστιάζει κυρίως στη μεταβολή του σήματος και όχι στην απόλυτη τιμή του μετρούμενου πεδίου.

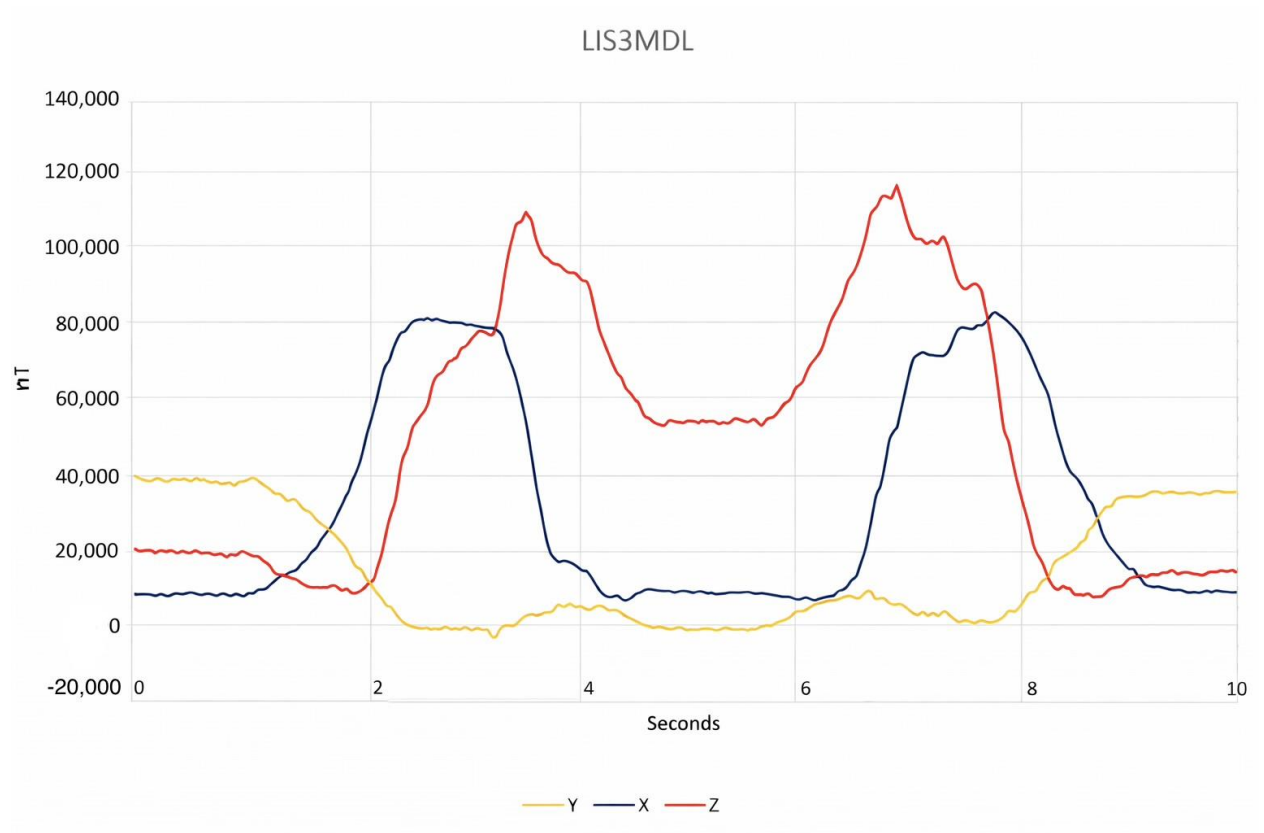
Από την ανάλυση των γραφημάτων προκύπτει ότι όλοι οι αισθητήρες είναι σε θέση να καταγράψουν τη μετάβαση από περιοχές χωρίς θερμική καταπόνηση σε περιοχές με τοπική θέρμανση, γεγονός που αποτυπώνεται με τη μορφή χαρακτηριστικών μεταβολών ή κορυφών στο μαγνητικό σήμα, κυρίως στον άξονα Z. Ωστόσο, παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το εύρος της μεταβολής, τη σταθερότητα της βασικής γραμμής (baseline) και το επίπεδο θορύβου μεταξύ των αισθητήρων.



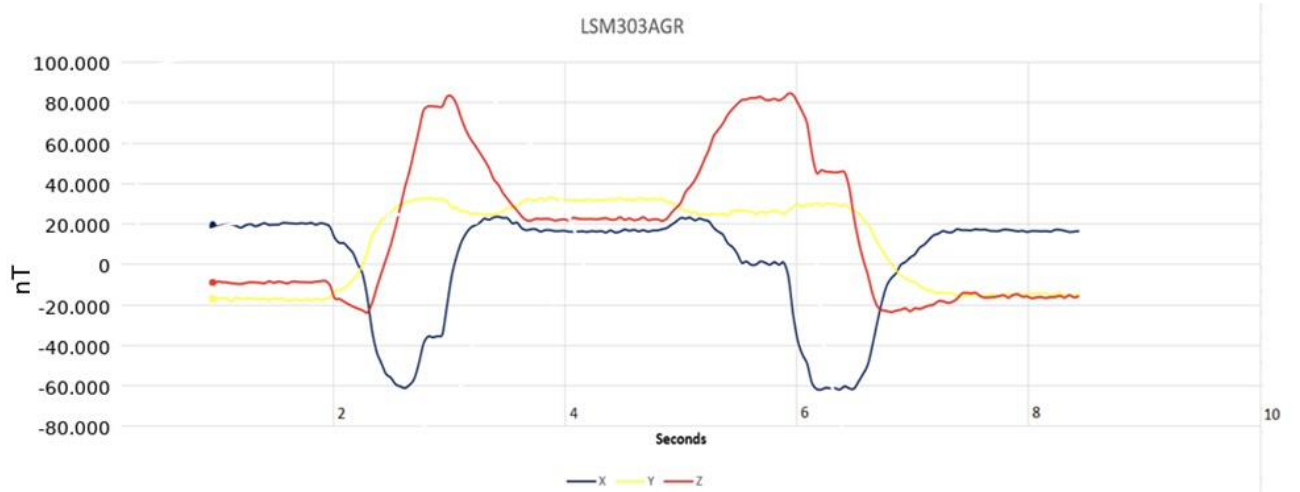
Εικόνα 18: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα GY-271



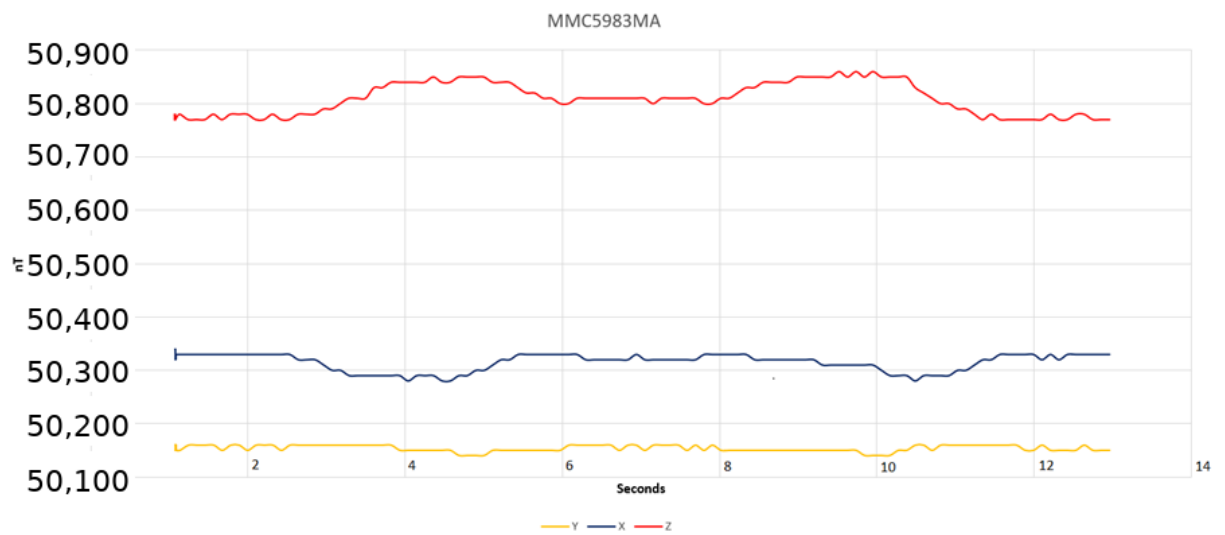
Εικόνα 19: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα GY-511



Εικόνα 20: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα LIS3MDL



Εικόνα 21: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα LSM303AGR



Εικόνα 22: Καταγραφή μετρήσεων μαγνητικού πεδίου στους άξονες X, Y και Z από τον αισθητήρα MMC5983MA

Για μια ποσοτική σύγκριση των αισθητήρων, υπολογίστηκε η ποσοστιαία μεταβολή της μαγνητικής τιμής στον άξονα Z σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Ποσοστιαία Μεταβολή} = (| \text{Μέγιστη τιμή} - \text{Αρχική τιμή} | / | \text{Αρχική τιμή} |) \times 100\%$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα σύγκρισης.

Αισθητήρας	Αρχική Τιμή (nT)	Μέγιστη Τιμή (nT)	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	Παρατηρήσεις
GY-271	10.000	27.500	175 %	Υψηλές απόλυτες τιμές, αλλά μέτρια σχετική μεταβολή
GY-511	15.000	110.000	633.3 %	Πολύ καλή ευαισθησία και σαφής κορυφή στον άξονα Z
LIS3MDL	20.000	115.000	475 %	Σταθερή και αξιόπιστη απόκριση, καλή ισορροπία
LSM303AGR	-10.000	85.000	950 %	Η μεγαλύτερη σχετική μεταβολή, υψηλή ευαισθησία
MMC5983MA	50.770	50.860	0.18 %	Εξαιρετικά σταθερός, πολύ χαμηλός θόρυβος

Από τον συγκριτικό πίνακα προκύπτει ότι ο LSM303AGR εμφάνισε τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή (950%), γεγονός που υποδηλώνει υψηλή ευαισθησία στις τοπικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου στο δοκίμιο. Ακολουθεί ο GY-511 με 633,3%, παρουσιάζοντας επίσης ισχυρή απόκριση και σαφή διαφοροποίηση του σήματος στον άξονα Z. Ο LIS3MDL παρουσίασε σταθερή και αξιόπιστη απόκριση (475%), προσφέροντας ένα ισορροπημένο προφίλ μεταξύ ευαισθησίας και σταθερότητας.

Ο GY-271 κατέγραψε υψηλές απόλυτες τιμές πεδίου, ωστόσο η ποσοστιαία μεταβολή του (175%) ήταν η μικρότερη μεταξύ των αισθητήρων με έντονη απόκριση. Αυτό

δείχνει ότι, παρότι αποδίδει ικανοποιητικά σε περιβάλλοντα με ήδη αυξημένο πεδίο, δεν είναι ο πλέον κατάλληλος όταν ζητείται μέγιστη ευαισθησία σε μεταβολές.

Τέλος, ο MMC5983MA εμφάνισε εξαιρετικά σταθερό σήμα με πολύ μικρή ποσοστιαία μεταβολή (0,18%). Η συμπεριφορά αυτή δείχνει πολύ χαμηλό θόρυβο και υψηλή σταθερότητα, χαρακτηριστικά ιδιαίτερα χρήσιμα για μετρήσεις αναφοράς/υποβάθρου (baseline), αλλά όχι για έντονη ανίχνευση τοπικών μεταβολών στο συγκεκριμένο πειραματικό σενάριο.

Συνολικά, τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η διάταξη μπορεί να αναδείξει μεταβολές του μαγνητικού πεδίου πάνω από θερμικά καταπονημένο μεταλλικό δοκίμιο, και ότι οι αισθητήρες διαφοροποιούνται ουσιαστικά ως προς την ευαισθησία και τη σταθερότητα. Με βάση τα παραπάνω, οι LSM303AGR και GY-511 αναδεικνύονται ως οι πλέον κατάλληλοι όταν προτεραιότητα είναι η μέγιστη ανίχνευση μεταβολών, ενώ ο MMC5983MA είναι κατάλληλος όταν προτεραιότητα είναι η σταθερότητα και η χρήση ως αναφορά.

3 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στη μελέτη και πειραματική αξιολόγηση αισθητήρων μαγνητικού πεδίου τεχνολογίας μαγνητοαντίστασης (AMR), σε συνδυασμό με τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), με εφαρμογή σε σενάρια ναυτιλιακού ενδιαφέροντος. Το θεωρητικό μέρος ανέλυσε τη φυσική αρχή λειτουργίας των αισθητήρων AMR, τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά τους και τις σύγχρονες εφαρμογές τους, ενώ το πειραματικό μέρος επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός πρωτότυπου συστήματος μέτρησης μαγνητικού πεδίου βασισμένου σε πολλαπλούς αισθητήρες. Έτσι, προκύπτει ότι οι αισθητήρες AMR αποδείχθηκαν εξαιρετικά ευαίσθητοι στις μεταβολές των μαγνητικών πεδίων, καθιστώντας τους κατάλληλους για κρίσιμες ναυτιλιακές εφαρμογές, όπως η πλοήγηση και η δομική παρακολούθηση των πλοίων.

Η πειραματική διαδικασία κατέδειξε ότι οι αισθητήρες παρουσιάζουν διαφοροποιημένη συμπεριφορά ως προς την ευαισθησία, τη σταθερότητα και το επίπεδο θορύβου. Συγκεκριμένα, αισθητήρες όπως οι LSM303AGR και GY-511 εμφάνισαν έντονη απόκριση στις τοπικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές ανίχνευσης μαγνητικών ανωμαλιών. Αντίθετα, αισθητήρες όπως ο MMC5983MA παρουσίασαν ιδιαίτερα σταθερό σήμα με πολύ μικρή μεταβολή, στοιχείο που υποδηλώνει υψηλή καταλληλότητα για χρήση ως αισθητήρες αναφοράς ή για τον καθορισμό του μαγνητικού υποβάθρου.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η προσέγγιση της αξιολόγησης μέσω της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, και όχι μέσω της απόλυτης τιμής του, είναι περισσότερο κατάλληλη για εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Destructive Testing – NDT). Οι μετρήσεις επιβεβαίωσαν ότι η προτεινόμενη πειραματική διάταξη είναι ικανή να αναδείξει μεταβολές που σχετίζονται με τοπικές θερμικές ή δομικές αλλαγές σε μεταλλικά δοκίμια, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο υποσχόμενη για εφαρμογές δομικής παρακολούθησης στη ναυτιλία.

Η ενσωμάτωση των αισθητήρων στο περιβάλλον IoT μέσω της πλατφόρμας ESP32 επέτρεψε τη συλλογή και μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης μαγνητικών μεγεθών. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης, καθώς μπορεί να υποστηρίξει την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών και να συμβάλει στη μείωση του κόστους συντήρησης και στην αύξηση της λειτουργικής ασφάλειας των πλοίων.

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η μελέτη ανέδειξε και περιορισμούς. Οι αισθητήρες AMR επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως θερμοκρασιακές μεταβολές, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και offsets που σχετίζονται με τη θέση και τον προσανατολισμό τους. Ως εκ τούτου, η αξιόπιστη εφαρμογή τους σε πραγματικές ναυτιλιακές συνθήκες απαιτεί κατάλληλη βαθμονόμηση, αντιστάθμιση εξωτερικών επιδράσεων και προσεκτικό σχεδιασμό της διάταξης μέτρησης.

Ως μελλοντική εργασία, προτείνεται η ανάπτυξη βελτιωμένων αλγορίθμων επεξεργασίας των μετρήσεων, με στόχο τη μείωση του θορύβου και την αυτόματη αναγνώριση μαγνητικών ανωμαλιών. Η αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να επιτρέψει την εξαγωγή προγνωστικών μοντέλων, τα οποία θα εντοπίζουν πρόδρομες ενδείξεις δομικών προβλημάτων πριν αυτά καταστούν κρίσιμα. Επιπλέον, η συνδυαστική χρήση αισθητήρων AMR με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων, όπως θερμικούς ή υπερήχων, θα μπορούσε να οδηγήσει στη δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων δομικής επιτήρησης πλοίων.

Επιπρόσθετα, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή πειραμάτων σε πραγματικές ναυτιλιακές συνθήκες, προκειμένου να αξιολογηθεί η μακροχρόνια σταθερότητα και αξιοπιστία των αισθητήρων σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία, αλατότητα και μηχανικές καταπονήσεις. Η ενσωμάτωση των δεδομένων σε πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους (cloud) θα μπορούσε να επιτρέψει την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων και τη συνεργατική αξιολόγηση πληροφοριών από πολλαπλά πλοία.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, σε συνδυασμό με τεχνολογίες IoT, μπορούν να αποτελέσουν ένα ισχυρό εργαλείο για εφαρμογές δομικής παρακολούθησης και μη καταστροφικού ελέγχου στη ναυτιλία. Με την περαιτέρω τεχνολογική τους εξέλιξη και τη συνδυαστική χρήση με σύγχρονες μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων, μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μετάβαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας βελτιώνοντας την ασφάλεια, μειώνοντας τα κόστη συντήρησης και συμβάλλοντας στη βιωσιμότητα του κλάδου.

4 Βιβλιογραφία

Aslam, S., Michaelides, M.P. and Herodotou, H., 2020. Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges. *IEEE Internet of Things journal*, 7(10), pp.9714-9727.

Bevington, P., Gartman, R. and Chalupczak, W., 2019. Imaging of material defects with a radio-frequency atomic magnetometer. *Review of Scientific Instruments*, 90(1).

Briguglio, G. and Crupi, V., 2024. Review on Sensors for Sustainable and Safe Maritime Mobility. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), p.353.

Eslamlou, A.D., Ghaderiaram, A., Fotouhi, M. and Schlangen, E., 2022, June. A Review on Non-destructive Evaluation of Civil Structures Using Magnetic Sensors. In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (pp. 647-656). Cham: Springer International Publishing.

Gerakoudi, K., Kokosalakis, G. and Stavroulakis, P.J., 2024. A machine learning approach towards reviewing the role of 'Internet of Things' in the shipping industry. *Journal of Shipping and Trade*, 9(1), p.19.

Hassani, S. and Dackermann, U., 2023. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), p.2204.

Hiekata, K., Wanaka, S., Mitsuyuki, T., Ueno, R., Wada, R. and Moser, B., 2021. Systems analysis for deployment of internet of things (IoT) in the maritime industry. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, pp.459-469.

Huang, A., Huang, M., Shao, Z., Zhang, X., Wu, D. and Cao, C., 2019, May. A practical marine wireless sensor network monitoring system based on LoRa and MQTT. In *2019 IEEE 2nd international conference on electronics technology (ICET)* (pp. 330-334). IEEE.

Jimenez, V.J., Bouhmala, N. and Gausdal, A.H., 2020. Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), pp.358-386.

Kamolov, A. and Park, S., 2019. An iot-based ship berthing method using a set of ultrasonic sensors. *Sensors*, 19(23), p.5181.

Kot, P., Muradov, M., Gkantou, M., Kamaris, G.S., Hashim, K. and Yeboah, D., 2021. Recent advancements in non-destructive testing techniques for structural health monitoring. *Applied Sciences*, 11(6), p.2750.

Lauritzen, P.N., Reichard, J., Ahmed, S. and Safa, M., 2019. Review of non-destructive testing methods for physical condition monitoring in the port industry. *Journal of Construction Engineering*, 2(2), pp.103-111.

Lee, H.J. and Park, D.J., 2022. Analysis of thermal characteristics of MEMS sensors for measuring the rolling period of maritime autonomous surface ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), p.859.

Min, R., Liu, Z., Pereira, L., Yang, C., Sui, Q. and Marques, C., 2021. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology*, 140, p.107082.

Mukherjee, I., Patil, J., Banerjee, S. and Tallur, S., 2020. Phase sensitive detection of extent of corrosion in steel reinforcing bars using eddy currents. *arXiv preprint arXiv:2001.03756*.

Rifai, D., Abdalla, A.N., Ali, K. and Razali, R., 2016. Giant magnetoresistance sensors: A review on structures and non-destructive eddy current testing applications. *Sensors*, 16(3), p.298.

Ripka, P., Vyhnanek, J., Janosek, M. and Vcelak, J., 2014. AMR proximity sensor with inherent demodulation. *IEEE Sensors Journal*, 14(9), pp.3119-3123.

Silva-Campillo, A., Pérez-Arribas, F. and Suárez-Bermejo, J.C., 2023. Health-Monitoring Systems for Marine Structures: A Review. *Sensors*, 23(4), p.2099.

Taheri, H., Gonzalez Bocanegra, M. and Taheri, M., 2022. Artificial intelligence, machine learning and smart technologies for nondestructive evaluation. *Sensors*, 22(11), p.4055.

Thombre, S., Zhao, Z., Ramm-Schmidt, H., García, J.M.V., Malkamäki, T., Nikolskiy, S., Hammarberg, T., Nuortie, H., Bhuiyan, M.Z.H., Särkkä, S. and Lehtola, V.V., 2020. Sensors and AI techniques for situational awareness in autonomous ships: A review. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 23(1), pp.64-83.

Wu, Y., Zhao, W., Zhang, R. and Jiang, F., 2021. AMR-Net: Arbitrary-oriented ship detection using attention module, multi-scale feature fusion and rotation pseudo-label. *IEEE Access*, 9, pp.68208-68222.

Yang, S. and Zhang, J., 2021. Current progress of magnetoresistance sensors. *Chemosensors*, 9(8), p.211.

Zaki, A., Chai, H.K., Aggelis, D.G. and Alver, N., 2015. Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique. *Sensors*, 15(8), pp.19069-19101.

Zalewski, P., 2020. Integrity concept for maritime autonomous surface ships' position sensors. *Sensors*, 20(7), p.2075.

Adafruit, 2024. Triple-Axis Magnetometer QMC5883L. Available at: <<https://www.adafruit.com/product/4479>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Amazon, 2024. HiLetgo GY-271 QMC5883L Compass Magnetometer. Available at: <<https://www.amazon.com/HiLetgo-GY-271-QMC5883L-Compass-Magnetometer/dp/B008V9S64E>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Grobotronics, 2024. Triple-Axis Magnetometer QMC5883L. Available at: <<https://grobotronics.com/triple-axis-magnetometer-qmc5883l.html>> [Accessed 13 Feb. 2025].

HandsOn Tech, 2024. GY-271 HMC5883L Datasheet. Available at: <<https://handsontec.com/dataspecs/sensor/GY-271%20HMC5883L.pdf>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Memsic, 2024. MMC5983MA Datasheet. Available at: <<https://www.memsic.com/Public/Uploads/uploadfile/files/20220119/MMC5983MADatasheetRevA.pdf>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Mouser Electronics, 2024. Adafruit 4479 Triple-Axis Magnetometer. Available at: <<https://gr.mouser.com/ProductDetail/Adafruit/4479?qs=CUBnOrq4ZJxLqbe7QDjUXQ%3D%3D>> [Accessed 13 Feb. 2025].

NCBI, 2019. Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges. Available at: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6514736/>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Pololu, 2024. LSM303DLHC 3D Accelerometer and Magnetometer Module. Available at: <<https://www.pololu.com/product/2124>> [Accessed 13 Feb. 2025].

SparkFun, 2024. Qwiic Micro Magnetometer MMC5983MA. Available at: <<https://www.sparkfun.com/sparkfun-micro-magnetometer-mmc5983ma-qwiic.html>> [Accessed 13 Feb. 2025].

SparkFun, 2024. Qwiic Micro Magnetometer Hookup Guide. Available at: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/qwiic-micro-magnetometer---mmc5983ma-hookup-guide/all>> [Accessed 13 Feb. 2025].

STMicroelectronics, 2024. LSM303AGR Datasheet. Available at: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303agr.pdf>> [Accessed 13 Feb. 2025].

STMicroelectronics, 2024. LSM303DLHC MEMS Sensor. Available at: <<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm303dlhc.html>> [Accessed 13 Feb. 2025].

STMicroelectronics, 2024. LIS3MDL MEMS Sensor. Available at: <<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3mdl.html>> [Accessed 13 Feb. 2025].

STMicroelectronics, 2024. LSM303AGR MEMS Sensor. Available at: <<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm303agr.html>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Tennessee Research and Creative Exchange, 2024. Graduate Thesis on Magnetometer Applications. Available at: <https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=11441&context=utk_gradtheses> [Accessed 13 Feb. 2025].

Mouser Electronics, 2024. Adafruit 4413 Magnetometer Sensor. Available at: <<https://gr.mouser.com/ProductDetail/Adafruit/4413?qs=xZ%2FP%252Ba9zWqBJWw%2FMMSRIFg%3D%3D>> [Accessed 13 Feb. 2025].

Adafruit, 2024. Triple-Axis Magnetometer 4413. Available at: <<https://www.adafruit.com/product/4413>> [Accessed 13 Feb. 2025].