

[Placeholder for University Name]

[Placeholder for Program]

Θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Μια Ολοκληρωμένη Ανάλυση Δικτύων Επικοινωνίας, Αυτόνομων Συστημάτων και Αναδυόμενων Τεχνολογιών

Διπλωματική Εργασία

[Placeholder for Author Name]

Επιβλέπων:

[Placeholder for Supervisor Name]

[Placeholder for University Name]

[Placeholder for Program]

Maritime Internet of Things: A Comprehensive Analysis of Communication Networks, Autonomous Systems, and Emerging Technologies

Master Thesis

[Placeholder for Author Name]

Supervisor:

[Placeholder for Supervisor Name]

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων και Λογοκλοπής

Με την παρούσα δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί προϊόν δικής μου αποκλειστικά πνευματικής προσπάθειας και δεν παραβιάζει τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας τρίτων μερών.
2. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν, συμπεριλαμβανομένων κειμένων, δεδομένων, εικόνων και διαγραμμάτων, έχουν αναγνωριστεί πλήρως και παρατίθενται με ακρίβεια στις βιβλιογραφικές αναφορές, σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.
3. Κανένα μέρος της εργασίας αυτής δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής ή αθέμιτης αντιγραφής από άλλες δημοσιευμένες ή μη πηγές.
4. Η εργασία δεν έχει υποβληθεί στο παρελθόν, εν όλω ή εν μέρει, για την απόκτηση οποιουδήποτε άλλου ακαδημαϊκού τίτλου σε άλλο ίδρυμα ή τμήμα.

Αποδέχομαι ότι οποιαδήποτε διαπίστωση παραβίασης των παραπάνω μπορεί να οδηγήσει στην ακύρωση της εργασίας και στην επιβολή των προβλεπόμενων κυρώσεων σύμφωνα με τον εσωτερικό κανονισμό του Πανεπιστημίου.

Ευχαριστίες

[Placeholder for Acknowledgements]

Περίληψη

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βιώνει έναν βαθύ ψηφιακό μετασχηματισμό, εξελισσόμενη από τις παραδοσιακές λειτουργίες προς το πρότυπο της «Ναυτιλίας 4.0». Κεντρικό ρόλο σε αυτή την εξέλιξη κατέχει το Θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Maritime Internet of Things - MiOT), ένα σύνθετο οικοσύστημα που ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες ανίχνευσης, επικοινωνίας και νοημοσύνης για την ενίσχυση της επιχειρησιακής αποδοτικότητας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας. Η παρούσα διατριβή παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του τοπίου του MiOT, εξερευνώντας συστηματικά την πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του—από τη φυσική αντίληψη υποβρύχιων και επιφανειακών περιβαλλόντων έως την εικονική νοημοσύνη υψηλού επιπέδου που καθοδηγείται από τα Ψηφιακά Δίδυμα και την Τεχνητή Νοημοσύνη.

Η έρευνα διερευνά το κρίσιμο επίπεδο συνδεσμότητας, αξιολογώντας την ενσωμάτωση των Δικτύων που Ορίζονται από Λογισμικό (SDN), των Μη Επίγειων Δικτύων (NTN) και τη μετάβαση προς το 6G για την υπέρβαση των μοναδικών προκλήσεων της θαλάσσιας γεωγραφικής απομόνωσης. Επιπλέον, εξετάζει τον ρόλο των αυτόνομων συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των Αυτόνομων Ναυτιλιακών Πλοίων Επιφανείας (MASS) και των Υποβρύχιων Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (UWSNs), στη μείωση του ανθρώπινου σφάλματος—της κύριας αιτίας ναυτικών ατυχημάτων. Η μελέτη πραγματεύεται επίσης την επιτακτική ανάγκη για «Εμπιστοσύνη» εντός του οικοσυστήματος MiOT, αναλύοντας στιβαρά πλαίσια κυβερνοασφάλειας και πρωτοβουλίες «πράσινου» IoT που στοχεύουν στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του κλάδου και στη διασφάλιση της ρυθμιστικής συμμόρφωσης με τα πρότυπα των IMO/ITU.

Συνθέτοντας τις εξελίξεις αιχμής στους τομείς των επικοινωνιών, της ανίχνευσης και της ανάλυσης δεδομένων, η διατριβή αυτή συνεισφέρει μια νέα ταξινόμηση και έναν στρατηγικό οδικό χάρτη για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των τεχνολογιών IoT σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν ότι η επιτυχής εφαρμογή του MiOT απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που εξισορροπεί την τεχνική καινοτομία με την αυστηρή τυποποίηση και την κυβερνοασφάλεια. Τελικά, η εργασία αυτή χρησιμεύει ως θεμελιώδης πόρος για ερευνητές και φορείς του κλάδου που πλοηγούνται στις πολυπλοκότητες του ψηφιακού ωκεανού, παρέχοντας γνώσεις για αναδυόμενες τάσεις όπως η νευρομορφική υπολογιστική και οι κβαντικές επικοινωνίες.

Λέξεις-Κλειδιά: Θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (MiOT), Αυτόνομα Πλοία, Κυβερνοασφάλεια, Δίκτυα 6G, Ψηφιακά Δίδυμα, Ναυτιλία 4.0, Βιωσιμότητα.

Abstract

The maritime industry is undergoing a profound digital transformation, evolving from traditional operations towards the «Maritime 4.0» paradigm. Central to this evolution is the Maritime Internet of Things (MIoT), a sophisticated ecosystem that integrates advanced sensing, communication, and intelligence technologies to enhance operational efficiency, safety, and sustainability. This thesis provides a comprehensive analysis of the MIoT landscape, systematically exploring its multi-layered architecture—from the physical perception of underwater and surface environments to the high-level virtual intelligence driven by Digital Twins and Artificial Intelligence.

The research investigates the critical connectivity layer, evaluating the integration of Software-Defined Networks (SDN), Non-Terrestrial Networks (NTN), and the transition towards 6G to overcome the unique challenges of maritime geographical isolation. Furthermore, it examines the role of autonomous systems, including Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs), in reducing human error—the primary cause of maritime accidents. The study also addresses the imperative of «Trust» within the MIoT ecosystem, analyzing robust cybersecurity frameworks and green IoT initiatives aimed at reducing the industry's carbon footprint and ensuring regulatory compliance with IMO/ITU standards.

By synthesizing state-of-the-art developments across communication, sensing, and data analytics, this thesis contributes a novel taxonomy and a strategic roadmap for the seamless integration of IoT technologies in maritime environments. The findings underscore that the successful implementation of MIoT requires a holistic approach that balances technical innovation with rigorous standardization and cybersecurity. Ultimately, this work serves as a foundational resource for researchers and industry stakeholders navigating the complexities of the digital ocean, providing insights into emerging trends such as neuromorphic computing and quantum communications that will define the future of maritime operations.

Keywords: Maritime Internet of Things (MIoT), Autonomous Ships, Cybersecurity, 6G Networks, Digital Twins, Maritime 4.0, Sustainability.

Περιεχόμενα

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων και Λογοκλοπής	i
Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Κατάλογος Συντομογραφιών	ix
1 Εισαγωγή και Επισκόπηση	1
1.1 Επισκόπηση	1
1.2 Ο Ψηφιακός Μετασχηματισμός της Ναυτιλίας	1
1.2.1 Ιστορική αναδρομή	1
1.2.2 Προκλήσεις στον χώρο της Ναυτιλίας	2
1.3 Η Επανάσταση του IoT στις Θαλάσσιες Βιομηχανίες	2
1.3.1 Internet of Things	2
1.3.2 Maritime Internet of Things (MIoT)	3
1.3.2.1 Μηχανισμοί λειτουργίας MIoT	4
1.4 Σκοπός και Αντικείμενο της Έρευνας	6
1.5 Μεθοδολογία Επισκόπησης	7
1.6 Δομή της Διατριβής	7
2 Δίκτυα Ναυτιλιακών Επικοινωνιών	8
2.1 Επισκόπηση	8
2.2 Δίκτυα που ορίζονται από λογισμικό (SDN) σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα	8
2.2.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	8
2.2.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	8
2.2.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	8
2.2.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	9
2.2.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	9
2.2.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	9
2.3 Ενσωμάτωση Μη Επίγειων Δικτύων (NTN) και 5G/6G στις Ναυτιλιακές Επικοινωνίες	9
2.3.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	9
2.3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	9
2.3.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	9
2.3.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	9
2.3.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	10
2.3.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	10
2.4 Ετερογενή Δίκτυα Επικοινωνιών	10
2.4.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	10
2.4.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	11
2.5 Ναυτιλιακά Δίκτυα Γνωστικού Ραδιοφώνου (Cognitive Radio)	11
2.5.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	11
2.6 Πρωτόκολλα Αποθήκευσης και Προώθησης (Store-and-Forward)	11
2.6.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	11
2.7 Ναυτιλιακή Υπολογιστική Άκρου (Edge) και Ομίχλης (Fog)	11
2.7.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	11
2.8 Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστερήσεις (DTN)	12
2.8.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	12
2.9 Συμπεράσματα	14
2.9.1 Κύρια Συμπεράσματα	14

3 Υποβρύχια και επιφανειακά συστήματα ανίχνευσης	15
3.1 Επισκόπηση	15
3.2 Υποβρύχια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (UWSN)	15
3.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	15
3.2.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	16
3.3 Συστήματα Ακουστικής Επικοινωνίας	16
3.4 Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (AUV)	17
3.5 Μη Επανδρωμένα Επιφανειακά Οχήματα (USV)	17
3.6 Συστήματα Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος	18
3.6.1 Ερευνητική Σημασία και Συνάφεια	18
3.7 Τεχνολογία Αισθητήρων Ανθεκτικών στη Βιορρύπανση	18
3.8 Συμπεράσματα	18

Κατάλογος Εικόνων

Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική Ενσωματωμένου Μη Επίγειου Δικτύου (NTN) πολλαπλών επιπέδων για ναυτιλιακό 6G. Το διάγραμμα απεικονίζει την κάθετη ιεραρχία που συνδέει δορυφόρους LEO (Διαστημικό Επίπεδο) και αναμεταδότες UAV (Εναέριο Επίπεδο) με αυτόνομα σκάφη επιφανείας (Ναυτιλιακό Επίπεδο) για την εξασφάλιση καθολικής κάλυψης.	10
Σχήμα 2 Πρακτική εφαρμογή κόμβων ναυτιλιακής υπολογιστικής άκρου (edge computing). Το NVIDIA Jetson Nano (αριστερά) χρησιμοποιείται ως Επιταχυντής AI Edge για εργασίες υψηλού εύρους ζώνης όπως η ανίχνευση αντικειμένων (YOLO), ενώ το Banana Pro (δεξιά) χρησιμεύει ως ισχυρή πύλη IoT (IoT Gateway) για συγκέντρωση αισθητήρων και τηλεμετρία.	12
Σχήμα 3 Αρχιτεκτονική Υποβρύχιου Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (UWSN) 3D. Το σύστημα ενσωματώνει στατικούς αισθητήρες βυθού, κόμβους ρυθμιζόμενου βάθους και κινητά UAV για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πλέγματος παρακολούθησης του ωκεανού.	16
Σχήμα 4 Αρθρωτή Αρχιτεκτονική Υλικού ενός Αυτόνομου Υποβρύχιου Οχήματος (AUV). Τα βασικά υποσυστήματα περιλαμβάνουν περιβαλλοντικούς αισθητήρες (CTD, Sonar) και μονάδες πλοιόγησης απαραίτητες για προσαρμοστική εξερεύνηση.	17

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης DTN για Ναυτιλιακά Δίκτυα	13
Πίνακας 2 Σύγκριση Τεχνολογιών Υποβρύχιας Επικοινωνίας	17

Κατάλογος Συντομογραφιών

Συντομογραφία	Περιγραφή
AIS	Automatic Identification System (Σύστημα Αυτόματης Αναγνώρισης)
AUV	Autonomous Underwater Vehicle (Αυτόνομο Υποβρύχιο Όχημα)
CAS	Collision Avoidance System (Σύστημα Αποφυγής Σύγκρουσης)
COLREG	International Regulations for Preventing Collisions at Sea
DLT	Distributed Ledger Technology (Τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού)
DP	Dynamic Positioning (Δυναμική Τοποθέτηση)
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System
IACS	International Association of Classification Societies
IMO	International Maritime Organization (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός)
IoT	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
ISO	International Organization for Standardization
MASS	Maritime Autonomous Surface Ships (Ναυτικά Αυτόνομα Επιφανειακά Πλοία)
MIoT	Maritime Internet of Things (Θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
NTN	Non-Terrestrial Networks (Μη Επίγεια Δίκτυα)
OT	Operational Technology (Επιχειρησιακή Τεχνολογία)
QKD	Quantum Key Distribution (Κβαντική Κατανομή Κλειδιού)
SDN	Software-Defined Networking (Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό)
UWSN	Underwater Wireless Sensor Networks (Υποβρύχια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων)
USV	Unmanned Surface Vehicle (Μη Επανδρωμένο Επιφανειακό Όχημα)
VSAT	Very Small Aperture Terminal

1 Εισαγωγή και Επισκόπηση

1.1 Επισκόπηση

Το παρόν κεφάλαιο εισάγει την έννοια του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων (MIoT), αναλύοντας τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ναυτιλίας και την ανάγκη για προηγμένες τεχνολογικές λύσεις. Στο πλαίσιο της Ναυτιλίας 4.0, η ενσωμάτωση του IoT αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων (Durlik et al, 2023; Kabanov et al, 2022).

Η εστίαση εκτείνεται σε πέντε πυλώνες: την ιστορική αναδρομή του κλάδου, τις τρέχουσες προκλήσεις, τη θεμελίωση του Internet of Things, την αρχιτεκτονική του MIoT και τη μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας διατριβής.

Ο στόχος είναι να συνθέσουμε πώς αυτές οι τεχνολογίες αντιμετωπίζουν συλλογικά τους ναυτιλιακούς περιορισμούς, όπως η γεωγραφική απομόνωση και οι σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, θέτοντας το θεμέλιο για την ανάλυση των δικτύων επικοινωνίας που ακολουθεί στο Κεφάλαιο 2.

1.2 Ο Ψηφιακός Μετασχηματισμός της Ναυτιλίας

1.2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ναυτιλιακή βιομηχανία, ούσα καίριας σημασίας για το διεθνές εμπόριο από τις απαρχές της, έχει εξελιχθεί ως καθοριστική δύναμη άρρηκτα συνδεδεμένη με την παγκόσμια οικονομία εδώ και αιώνες. Από τις υπερατλαντικές μεταφορές και τα λογιστικά, εως πιο πολυσχιδείς τομείς όπως αυτούς των ναυτικών επιχειρήσεων, των υποθαλάσσιων γεωτρήσεων, και του ναυτικού τουρισμού, τα δίχτυα της ναυτιλίας απλώνονται μακριά, με απόδειξη τον κυρίαρχο ρόλο της στην παγκοσμιοποίηση και την δημιουργία διαπολιτισμικών σχέσεων (Durlik et al, 2023).

Ιστορικά, ο τομέας της ναυτιλίας λειτουργεί ως ο κεντρικός άξονας του διεθνούς εμπορίου. Εδραιωμένη ως μια από τις πιο οικονομικά αποδοτικές βιομηχανίες, η κληρονομιά της συνεχίζεται έμπρακτα καθώς το 90% της διεθνούς εμπορικής δραστηριότητας πραγματοποιείται μέσω θαλάσσιων μεταφορών. Αυτό καθώς οι ναυτιλιακές μεταφορές διαθέτουν τη μοναδική ικανότητα να διαχειρίζονται τεράστιους όγκους φορτίου, διασχίζοντας οποιαδήποτε απόσταση (Katranas et al, 2020).

Μεταξύ των 1995 και 2020, η θαλάσσια οικονομία εκτοξεύτηκε με παραπάνω από τον διπλάσιο ρυθμό ταχύτητας σε σχέση με τη στάσιμη ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας. Με σχεδόν 600 εκατομμύριους ανθρώπους να εξαρτώνται από αυτή, η θαλάσσια οικονομία στηρίζει 100 εκατομμύριες δουλειές (Global Trade Update (June 2025): Sustainable ocean economy), ενώ το 2023 είχαν καταγραφεί 100.000 πλοία ως μέλη του παγκόσμιου εμπορικού στόλου, με συνολικό φορτίο των 2.2 δισεκατομμυριών τόνων (UNCTAD, 2022). Σε συνδυασμό με την ασύγκριτη αποδοτικότητα που προσφέρει η ναυτιλιακή βιομηχανία στο διεθνές οικονομικό δίκτυο και εμπόριο, τελικά η σύγχρονη έκφανσή της αποτελείται από ναυτιλιακές εταιρείες, ναυτική άμυνα, ναυτικό τουρισμό, λιμενικές δραστηριότητες και λειτουργίες, και πολλά ακόμη, η εκάστοτε πτυχή με τα δικά της δομικά στοιχεία και προσκόμματα (Ashraf et al, 2022).

Με κύριο έρεισμα την ασταμάτητη τεχνολογική πρόοδο, συνοδευόμενη από τους κατάλληλους κανονισμούς, προφυλάξεις κατά των περιβαλλοντολογικών κινδύνων και την επιτακτική ανάγκη για αύξηση της λειτουργικής αποδοτικότητας στον τομέα, τα τελευταία χρόνια στον χώρο της ναυτιλίας έχουν πραγματοποιηθεί αξιοσημείωτες αλλαγές (Dewan et al, 2023). Συγκεκριμένα, η

εξέχουσα συνιστώσα της ναυτιλιακής βιομηχανίας, δηλαδή αυτή των θαλάσσιων μεταφορών, έχει αναβαθμιστεί εξ' ολοκλήρου από τις ημέρες των απλών ιστιοφόρων στην νέα εποχή των αυτόνομων πλοίων. Ομοίως, τα λιμάνια που κάποτε αποτελούσαν απλούς κόμβους αναφοράς, έχουν πλέον μετεξελιχθεί σε σύνθετα κέντρα εφοδιασμού και διακίνησης προσφέροντας μεγάλο εύρος υπηρεσιών. Ακόμη, νεοφανείς τομείς όπως αυτοί της αιολικής ενέργειας και της ναυτικής βιοτεχνολογίας, συνεισφέρουν στον βιώσιμο και διαφοροποιημένο μετασχηματισμό της ναυτιλιακής βιομηχανίας (Mallam et al, 2019).

1.2.2 Προκλήσεις στον χώρο της Ναυτιλίας

Η ναυτιλιακή βιομηχανία, όπως οτιδήποτε ένδοξο, επίσης μαστίζεται από προβλήματα όπως η περιβαλλοντική μόλυνση, η έλλειψη χωρητικότητας, οι υλικοί περιορισμοί, οι εφοδιαστικές ανεπάρκειες και η ασφάλεια στη θάλασσα (Durlik et al, 2023).

Η μόλυνση που προκαλείται από τα πλοία δεν περιορίζεται στη θάλασσα. Αν και οι πετρελαιοκηλίδες είναι συχνά επιζήμιες ως απόρροια ατυχημάτων, έχει αποδειχθεί πως ακόμα και η φυσιολογική λειτουργία των πλοίων επίσης δημιουργεί ατμοσφαιρική και άλλες μορφές ρύπανσης, επιβαρύνοντας τα θαλάσσια οικοσύστηματα και θέτοντας σε κίνδυνο την θαλάσσια ζωή, με την εκφόρτιση ερματικού ύδατος και τη διάθεση λοιπών λυμάτων. Επίσης, οι εκπομπές θείου, διοξειδίου του άνθρακα, και άλλων επιβλαβών χημικών στοιχείων επιταχύνουν την κλιματική αλλαγή και επιδεινώνουν την ανθρώπινη υγεία (Kirchner, 2022).

Ταυτόχρονα, με μεγάλη παράδοση στην ιστορία της ναυτιλίας, πρωτεύων κίνδυνο αποτελεί η πειρατεία, η οποία έχει εισέλθει στην «χρυσή εποχή» της από τα μέσα της δεκαετίας του 90, με τους πλέον συνδικαλισμένους πειρατές να εκτελούν απόπειρες ληστείας του φορτίου και βίαιες επιθέσεις κατά του πληρώματος, ζημιώνοντας την οικονομία των πληγέντων περιοχών και διακινδυνεύοντας τις ζωές των ναυτικών (Pászka, 2018).

Επίσης, αναφέρεται πως το 75% εως το 96% των ατυχημάτων στη θάλασσα μπορεί να αποδοθεί σε ανθρώπινο λάθος, είτε αυτό προέρχεται από την υπερβολική εξάρτηση του πληρώματος στα τεχνολογικά μέσα, την κούραση ή την έλλειψη οργάνωσης και επαγγελματικής συμπεριφοράς (Allianz, 2019). Το 15-20% αυτού οφείλεται στην κατανάλωση αλκοόλ, σύνηθες φαινόμενο μεταξύ των ναυτικών, το εργασιακό περιβάλλον των οποίων απαιτεί πολύωρη απασχόληση, κοινωνική απομόνωση και ψηλά επίπεδα άγχους, παράγοντες που τους καθιστούν επιρρεπείς στην εξάρτηση (Maternová et al, 2024).

Ωστόσο, καθώς οι αλλαγές πάντα ελλοχεύουν νέες προκλήσεις, η βιομηχανία της ναυτιλίας μπορεί να τις αντιμετωπίσει ενστερνίζοντας ολοένα και περισσότερο τα αγαθά της ψηφιακής εποχής. Συγκεκριμένα, η συνεχώς αυξανόμενη ενσωμάτωση της τεχνολογίας και των IoT εφαρμογών στον χώρο της ναυτιλίας, λειτουργεί μόνο προς επίρρωση της αδιαφοριστήτης κυριαρχίας του κλάδου.

1.3 Η Επανάσταση του IoT στις Θαλάσσιες Βιομηχανίες

1.3.1 Internet of Things

Με σημείο αναφοράς τα αντικείμενα και τις διεργασίες επικοινωνίας, ο πυρήνας του IoT έγκειται στην αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και πραγμάτων με γνώμονα την πληροφορία. Ο θεμελιώδης σκοπός του IoT είναι η σύνθεση ενός δικτύου “αντίληψης” παγκόσμιας εμβέλειας, με απόρροια την δυνατότητα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, την ακριβή διαχείριση και την επιστημονικά τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων. Έτσι, τα δομικά χαρακτηριστικά της IoT αρχιτεκτονικής συνοψίζονται στην ολοκληρωμένη αντίληψη μέσω της συλλογής πληροφορίας, το δίκτυο επικοινωνίας και την αυτοματοποιημένη ή αλλιώς ευφυή επεξεργασία.

Το IoT αξιοποιείται ευρέως, με εφαρμογές γενικής τεχνολογίας, αισθητήρων και τεχνολογίας αναγνώρισης, επικοινωνίας δικτύων, έξυπνης επεξεργασίας και μεταδόσεων καναλιών, αξιοποιώντας πολλαπλά μέσα όπως είναι οι τεχνικές ταυτοποίησης συχνοτήτων, οι αισθητήρες, η ασύρματη δικτυακή μετάδοση και η υψηλής αποδοτικότητας υπολογιστικότητα (Wang et al, 2015).

Όπως φυσικά αποδεικνύεται, η ανάπτυξη της αυτόματης πλοήγησης είναι αδύνατη δίχως την επικοινωνία, τον ευφυή έλεγχο και τη σημαντική συνιστώσα του IoT – το Internet. Αυτό καθώς, τα τελευταία χρόνια τα VTS και AIS συστήματα θαλάσσιων υπηρεσιών, η δικτυακή διασύνδεση των πλοίων, το τηλεμετρικό σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου σημαδούρων, όπως και το υδρολογικό και μετεωρολογικό σύστημα υπηρεσιών, όλα εξελίχθηκαν μέσω του IoT.

Το IoT οικοσύστημα, παρέχει μια πλατφόρμα για τη συνδεσιμότητα αλληλένδετων έξυπνων συσκευών με σκοπό την αυτοματοποίηση προηγουμένως χειροκίνητων διαδικασιών και τη μείωση του κόστους εργασίας. Η IoT τεχνολογία έχει επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε όλες τις βιομηχανίες, και φυσικά σε αυτή της ναυτιλίας, καθώς διάφορα αντικείμενα όπως λιμάνια, πλοία και πράκτορες, διασυνδέονται ώστε να συλλέξουν και να ανταλλάξουν πληροφορίες εντός του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Συνεπώς, οι καινοτόμες τεχνολογικές πτυχές του IoT, ενισχύουν την αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ της ερευνητικής κοινότητας και της ναυτιλιακής βιομηχανίας, με απώτερο στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των θαλάσσιων συστημάτων μεταφορών (Sheraz et al, 2023).

Το IoT ορίζεται διαφορετικά ως μια υποδομή παγκοσμίου δικτύου με δυναμικό χαρακτήρα, η οποία βασισμένη σε τυποποιημένα και διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας αποκτά αυτορυθμιζόμενες δυνατότητες. Δηλαδή, στην υποδομή αυτή τα υλικά και τα ψηφιακά στοιχεία αμφότερα, αποκτούν μοναδικές ταυτότητες, αλλά και φυσικά χαρακτηριστικά ταυτόχρονα με ψηφιακές προσωπικότητες, ώστε η ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο πληροφοριών να πραγματοποιηθεί απρόσκοπτα μέσω έξυπνων διεπαφών. Κύριο ρόλο στις IoT εφαρμογές διαδραματίζουν τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, γνωστά ως WSN, από τα οποία το IoT έχει πλέον εξελιχθεί σε όλες τις μορφές του που γνωρίζουμε και συνεχώς βελτιώνουμε σήμερα. Ένα WSN αποτελείται από πληθώρα κατανεμημένων αισθητήρων, οι οποίοι είναι λογικά διασυνδεδέμενοι μέσω ασύρματων ζεύξεων, και πραγματοποιούν την παρακολούθηση του περιβάλλοντος στο οποίο έχουν τοποθετηθεί. Ως υποσύνολο της IoT αρχιτεκτονικής, έχει παρατηρηθεί σημαντική άνοδος και στην χρήση των WSN συστημάτων τα τελευταία χρόνια, με εφαρμογές σε έξυπνες βιομηχανικές αυτοματοποιήσεις.

Το IoT συνήθως είναι γνωστικό, σκεπτόμενο, και ελέγχιμο, δηλαδή ένα IoT σύστημα έχει την δυνατότητα να αντιλαμβάνεται, να σκέφτεται και να εφαρμόζει κριτικό έλεγχο του περιβάλλοντος στο οποίο έχει τοποθετηθεί μέσω της συλλογής, μετέπειτα της επεξεργασίας, και τέλος της ανάλυσης των ληφθέντων δεδομένων. Ακολουθώντας λοιπόν τον παραπάνω συλλογισμό, το IoT σύστημα δύναται να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις, επηρεάζοντας άμεσα τη λειτουργία του περιβάλλοντος την κηδεμονία του οποίου έχει αναλάβει (Aslam et al, 2019).

Συλλήβδην, ένα IoT σύστημα ως η πιο εξελιγμένη τεχνολογία βελτιστοποίησης, κατέχοντας την πλήρη εποπτεία του ανατεθειμένου χώρου ελέγχου, δύναται να συντονίσει απρόσκοπτα τον ατελεύτητο όγκο ανταλλασσόμενων πληροφοριών μεταξύ των δομικών του στοιχείων, γεγονός που καθιστά την πλήρη αξιοποίηση του στη βιομηχανία της ναυτιλίας καίριας σημασίας.

1.3.2 Maritime Internet of Things (MIoT)

Με τη συμβολή της IoT Τεχνολογίας, γεννήθηκε ένα παγκόσμιο συνεργατικό δίκτυο γνωστό ως Maritime Internet of Things, ή αλλιώς MIoT, που εκσυγχρονίζει πλήρως τον χώρο της ναυτιλίας, με την εισαγωγή και την εφαρμογή όλων των νέων τεχνοτροπιών σε αυτόν, και εκμηδενίζει τις αποστάσεις μεταξύ οργανωσιακών, εθνικών, και παγκόσμιων συνόρων.

Το MiOT συνεπώς, είναι ένα κατανεμημένο σύμπλεγμα τεχνολογιών λογισμικού και υλικού, στο οποίο μεταφέρονται διαρκώς πληροφορίες μεταξύ πολλαπλών συσκευών και αντικειμένων. Οι συσκευές και τα αντικείμενα αυτά μπορούν να βρίσκονται και επί ξηράς και κάτω από τη θάλασσα, ενώ οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ τους είναι διαφόρων ειδών, από αποτελέσματα μετρήσεων μέχρι και οπτικό υλικό. Εγκαθιστώντας λοιπόν τον δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ γης και θάλασσας, η IoT τεχνολογία επεκτείνεται και οδηγεί σε μία MiOT πλατφόρμα διεπιστημονικής εμβέλειας, με τις πληροφορίες, τα δεδομένα και τις εντολές ελέγχου να ταξιδεύουν μεταξύ διεπαφών και (υπο)θαλάσσιων μηχανισμών όπως τα πλοία, τις σημαδούρες, τους αισθητήρες και άλλα (Kabanov et al, 2022).

1.3.2.1 Μηχανισμοί λειτουργίας MiOT

Ως απόρροια των παραπάνω, καθίσταται σαφές πως ένα MiOT δίκτυο πρέπει να προσφέρει και να διασφαλίζει την ενιαία και ομαλή συνδεσιμότητα παγκόσμιας εμβέλειας μεταξύ στόλου και ξηράς υπό οποιεσδήποτε συνθήκες, αγνοώντας τα εμπόδια που επιφέρουν οι ανοιχτοί ωκεανοί και οι απομακρυσμένες αρκτικές περιοχές. Φυσικά, η διεξαγωγή ναυτιλιακών επιχειρήσεων σε σχεδόν κάθε γωνιά της οικουμένης, συνεπάγεται την αντίστοιχη υψηλή κίνηση, η οποία αποδεικνύεται πως είναι άνισα κατανεμημένη, και εντείνεται κοντά στην ξηρά και στα λιμάνια, ενώ αντίθετα εξασθενεί επί διεθνών υδάτων. Το MiOT δίκτυο επικοινωνίας συνεπώς πρέπει να έχει δομή τέτοια ώστε να εξυπηρετείται η ανομοιόμορφη κίνηση που διέπει την ναυτιλία.

Η αρχιτεκτονική της Maritime Internet of Things (MiOT) τεχνολογίας αποτελεί τη συλλογή όλων των πτυχών ενός πολυδιάστατου τεχνολογικού πλαισίου που έχει σχεδιαστεί με σκοπό να πληρεί τις ζεχωριστές απαιτήσεις του ναυτιλιακού περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, το πλαίσιο αυτό καλείται να στηρίζει με άνεση την ταυτόχρονη ύπαρξη ετερογενών αισθητήρων, μηχανισμών επικοινωνίας, μονάδων επεξεργασίας και τέλος μια διαστρωματωμένη διεπαφή για τον χρήστη, εξασφαλίζοντας τη γενική αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Τελικά, προκειμένου οι παραπάνω λειτουργίες να συνλειτουργούν αρμονικά, η αρχιτεκτονική ενός MiOT συστήματος κατατμείται στα επίπεδα Αντίληψης (Perception), Δικτύου (Network), Επεξεργασίας Δεδομένων (Data Processing), και Εφαρμογών (Applications), το καθένα από τα οποία συνεισφέρει με διαφορετικές ενέργειες στη δομή του συνόλου.

Το επίπεδο Αντίληψης, αποτελεί τη βάση της MiOT αρχιτεκτονικής. Συνίσταται από διαφόρων ειδών υποθαλάσσιους αλλά και εξωτερικούς αισθητήρες. Καθώς εύκολα γίνεται αντιληπτό πως οι αισθητήρες αυτοί δρουν ως οι πρωταρχικές μονάδες συλλογής δεδομένων, συχνά περιλαμβάνουν και Αυτόνομα Υποθαλάσσια Οχήματα (AUVs), Οχήματα Απομακρυσμένης Πρόσβασης (ROVs), σημαδούρες και κεντρικούς κόμβους αναφοράς στρατηγικά τοποθετημένους κατά μήκος ναυτικών περιοχών που απαιτούν εκτενή κάλυψη, οι οποίοι καταγράφουν ζωτικής σημασίας περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, τα επίπεδα άλατος στο νερό, η πίεση, τα επίπεδα οξυγόνου και άλλα βιολογικά σήματα.

Η ενσωμάτωση και συνεργασία μεταξύ ποικιλόμορφων αισθητήριων τεχνολογιών στο επίπεδο Αντίληψης, είναι αυτές που επιτρέπουν τη συνεχή και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση του περιβάλλοντος κεντρικού ενδιαφέροντος, που με τη σειρά της θεμελιώνει τις σύνθετες MiOT εφαρμογές που αφορούν την περιβαλλοντική προστασία, την ασφαλή πλοιόγηση και την διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Αδύνατον να αγνοηθούν, οι σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργούν οι αισθητήρες, όπως η υψηλή πίεση και η διάβρωση που προκαλεί το αλατόνερο, έχουν οδηγήσει σε προηγμένες τεχνολογίες αισθητήρων με ενσωματωμένες οπτικές, ακουστικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους που διασφαλίζουν την ικανοποιητική ανάλυση δεδομένων κατά τη συλλογή τους, ανεξαρτήτως βάθους και άλλων παραμέτρων που ενδεχομένων να δυσκολεύουν την διαδικασία αυτή (Kabanov et al, 2022).

Χτισμένο από πάνω, το επίπεδο Δικτύου είναι υπεύθυνο για την διαχείριση των πολυσύνθετων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και των απαραίτητων τοπολογιών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από το επίπεδο Αντίληψης, από τα υποθαλάσσια περιβάλλοντα έως τα κεντρικά κέντρα επεξεργασίας. Προς αντιμετώπιση των δυσχερειών που είναι εγγενείς σε κάθε περιβάλλον πλησίον της θάλασσας, οι συνηθισμένες ασύρματες δικτυακές τοπολογίες, όπως το πλέγμα, ο αστέρας και τα υβριδικά μοντέλα, όλα πρέπει να δρουν δυναμικά και να ενεργοποιήσουν ευέλικτα και με σημαντική ανοχή στα λάθη δίκτυα. Συγκεκριμένα έχει διαπιστωθεί πως οι δομές πλέγματος πλεονεκτούν έναντι των υπολοίπων χάρη στην αποκεντρωμένη φύση τους, επιτρέποντας στους ενδιάμεσους κόμβους να δρομολογήσουν δυναμικά τα δεδομένα μέσω πολλαπλών μονοναπτιών, ενισχύοντας έτσι την ανοχή στα λάθη και την κλιμακωσιμότητα του δικτύου. Δηλαδή, η multi-hop προώθηση των δεδομένων καλύπτει μεγάλη έκταση με αξιοσημείωτη ανοχή στα λάθη, προσφέροντας εναλλακτικά μονοπάτια επικοινωνίας σε περίπτωση αποτυχίας ενδιάμεσων κόμβων. Οι τοπολογίες αστέρα και οι υβριδικές τοπολογίες επιστρατεύονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

Η επικοινωνία που πραγματοποιείται όπως ορίζει το επίπεδο Δικτύου, στα υποθαλάσσια περιβάλλοντα αξιοποιεί κυρίως τα ακουστικά κύματα για τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, με την επικουρία των ραδιοσημάτων ή των οπτικών σημάτων σε ρηχές και επιφανειακές περιοχές. Αναδυόμενες προκλήσεις όπως η καθυστέρηση, η εξασθένηση του σήματος, και το περιορισμένο εύρος ζώνης, καθιστούν αναγκαία την παρέμβαση εξελιγμένων μεθόδων πρόσβασης καναλιού, όπως η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου (TDMA), η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας (FDMA), και η Πολλαπλή Πρόσβαση με Ανίχνευση Φέρουσας (CSMA), που ελαχιστοποιούν τη σύγκρουση πακέτων και και βελτιώνουν την αποδοτικότητα του καναλιού.

Η αποδοτικότητα της ισχύος παραμένει μια κρίσιμη πρόκληση, η οποία οδηγεί στην νιοθέτηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης με κύριο γνώμονα την ενέργεια, και αλγορίθμων προγραμματισμού δικτύου που παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των κόμβων και διατηρούν την ακεραιότητα του δικτύου (Xu et al, 2019).

Το επίπεδο Επεξεργασίας Δεδομένων, είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των τεράστιων όγκων δεδομένων που παράγονται και κυκλοφορούν σε ένα MIoT εργασιακό πλαίσιο. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιείται μέσω μιας κατανεμημένης υπολογιστικής ιεραρχίας που συνδυάζει edge, fog και cloud υποεπίπεδα.

Το επίπεδο edge υπολογιστικής τοποθετείται κοντά στις πηγές δεδομένων και πραγματοποιεί άμεσα τη φίλτρανση και προεπεξεργασία των δεδομένων, ενώ επίσης παράγει τοπικά αναλυτικά στοιχεία που μειώνουν δραστικά το overhead των επικοινωνιών, την χρήση του εύρους ώνης, και την καθυστέρηση απόκρισης, με την επιτόπια λήψη αποφάσεων. Οι λειτουργίες αυτές είναι αναγκαίες σε ναυτικά επιχειρήματα όπως η ανίχνευση απειλών ή η αυτόνομη πλοιόγηση.

Οι fog κόμβοι παρέχουν τους ενδιάμεσους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται για τη συνάθροιση των δεδομένων από τους διάφορους edge κόμβους, εφαρμόζοντας στο σύνολο των δεδομένων πιο σύνθετες αναλύσεις και αναλαμβάνοντας τη φυσιολογική ροή των δεδομένων προς το cloud.

Οι πόροι που διαθέτει η υπολογιστική νέφους, προσφέρουν στο MIoT σύστημα εκτενή αποθηκευτική δυνατότητα και εργαλεία απεικόνισης, ενώ επίσης υποστηρίζουν προηγμένες αναλύσεις των δεδομένων, χρηματοοικονομική ανάλυση τάσεων και ανάλυση του κινδύνου.

Μια αξιοσημείωτη αναβάθμιση στην επεξεργαστική αρχιτεκτονική των MIoT συστημάτων είναι η χρήση των μετασχηματιστικών IoT πλατφορμών. Οι πλατφόρμες αυτές, κάνουν συνδυαστική χρήση υβριδικού υλικού που αποτελείται από ASIC επεξεργαστές, με δυναμικά αναρδιαθρώσιμους

FPGA επιταχυντές που προσαρμόζουν τις διαμορφώσεις του υλικού κατ’ απαίτηση. Η ικανότητα αναδιαμόρφωσης διέπεται από προγνωστικά μοντέλα που αξιολογούν τις λειτουργικές απαιτήσεις, και επιτρέπει τη βελτιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας και την αυξημένη υπολογιστική ευελιξία. Συνεπώς, οι edge συσκευές που είναι εξοπλισμένες με τέτοια τεχνολογία, μπορούν να διαχειριστούν απαιτητικό φόρτο εργασίας τεχνητής νοημοσύνης και επεξεργασίας σήματος, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από τις υποδομές cloud και ενισχύοντας την ανταπόκριση του συστήματος (Durlik et al, 2023).

Αυτά τα λειτουργικά στοιχεία ενσωματώνουν τα επίπεδα middleware και εφαρμογών, με σκοπό την παροχή υπηρεσιών με επίκεντρο τον χρήστη. Το middleware είναι υπεύθυνο για την ομαλή και απρόσκοπη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών, τη συγκέντρωση δεδομένων, τα πρωτόκολλα ασφαλείας και τη διαχείριση της ποιότητας των υπηρεσιών. Έτσι, το επίπεδο Εφαρμογών παρέχει διεπαφές στους ναυτιλιακούς φορείς για πρόσβαση σε επεξεργασμένες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των πινάκων ελέγχου περιβαλλοντικής παρακολούθησης, των αυτοματοποιημένων συστημάτων συναγερμού για την ανίχνευση μη φυσιολογικών συμβάντων και των εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση πόρων και την ασφάλεια της πλοϊγησης (Kabanov et al, 2022).

1.4 Σκοπός και Αντικείμενο της Έρευνας

Ο κύριος στόχος αυτής της διατριβής είναι η παροχή μιας ολοκληρωμένης επισκόπησης της τρέχουσας κατάστασης (state-of-the-art) στον τομέα του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων (MIoT). Η έρευνα επικεντρώνεται στην ενοποίηση αποσπασματικών γνώσεων σε μια ενιαία ταξινόμηση, καλύπτοντας τα δίκτυα επικοινωνίας, τα συστήματα ανίχνευσης, την αυτονομία, την κυβερνοασφάλεια και τις αναδυόμενες τεχνολογίες.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, η διατριβή πραγματεύεται τα ακόλουθα κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα:

1. EE1: Πώς μπορούν οι ποικίλες επικοινωνιακές απαιτήσεις του MiOT – από τις δορυφορικές ζεύξεις υψηλού εύρους ζώνης έως τα υποβρύχια ακουστικά κανάλια χαμηλής ισχύος – να ενσωματωθούν σε μια ανθεκτική, ετερογενή αρχιτεκτονική δικτύου οριζόμενη από λογισμικό;
2. EE2: Ποιος είναι ο ρόλος των αυτόνομων επιφανειακών και υποβρύχιων οχημάτων (MASS/AUVs) στην ενίσχυση της ναυτιλιακής επίγνωσης κατάστασης και ποιες είναι οι αλγορίθμικές προϋποθέσεις για τον ασφαλή, πολυυπρακτορικό συντονισμό τους;
3. EE3: Πώς οι τεχνολογίες Ψηφιακού Διδύμου γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των φυσικών ναυτιλιακών στοιχείων και της εικονικής προσομοίωσης, και ποιες είναι οι επιπτώσεις στην προγνωστική συντήρηση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των πλοίων;
4. EE4: Με ποιους τρόπους μπορούν η Τεχνητή Νοημοσύνη και η Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων να εφαρμοστούν στη ναυτιλιακή εφοδιαστική και την ανίχνευση ανωμαλιών για τη βελτίωση της επιχειρησιακής διαφάνειας και ασφάλειας;
5. EE5: Ποιες είναι οι θεμελιώδεις κυβερνοαπειλές που αντιμετωπίζει η συγκλίνουσα ναυτιλιακή υποδομή IT/OT και πώς μια προσέγγιση «ασφάλειας εκ σχεδιασμού» (security-by-design) με χρήση Μηδενικής Εμπιστοσύνης και Blockchain μπορεί να αντιμετωπίσει αυτές τις ευπάθειες;
6. EE6: Πώς συμβάλλει το MiOT στις πρωτοβουλίες «Πράσινης Ναυτιλίας», ειδικότερα στην παρακολούθηση των εκπομπών, την ανίχνευση της ρύπανσης και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω έξυπνης ανίχνευσης;
7. EE7: Ποια είναι τα εμπόδια στην παγκόσμια τυποποίηση και τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα στον ναυτιλιακό τομέα και πώς μπορούν τα παλαιά (legacy) συστήματα να εναρμονιστούν με τα αναδυόμενα πλαίσια MiOT;

Ειδικότερα, η εργασία στοχεύει:

- Στην ανάλυση των τεχνολογικών πυλώνων που υποστηρίζουν το MIoT.
- Στον εντοπισμό των κρίσιμων προκλήσεων και των ερευνητικών κενών.
- Στην ανάδειξη βιώσιμων και ασφαλών πρακτικών για τη ναυτιλία 4.0 και 5.0.

1.5 Μεθοδολογία Επισκόπησης

Η παρούσα εργασία ακολουθεί τη μεθοδολογία της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

- Στρατηγική Αναζήτησης: Χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων όπως IEEE Xplore, Scopus, Google Scholar και ScienceDirect.
- Λέξεις-Κλειδιά: MIoT, Maritime IoT, Maritime Communication Networks, Underwater Sensor Networks, Maritime Cybersecurity, Autonomous Ships.
- Κριτήρια Ένταξης: Μελέτες που δημοσιεύθηκαν κυρίως μεταξύ 2020 και 2025, γραμμένες στην αγγλική γλώσσα, με έμφαση σε τεχνικές και επιχειρησιακές πτυχές του MIoT.
- Κριτήρια Εξαίρεσης: Άρθρα που δεν παρουσιάζουν επαρκή τεχνική τεκμηρίωση ή αφορούν παρωχημένες τεχνολογίες.

1.6 Δομή της Διατριβής

Η διατριβή διαρθρώνεται σε τέσσερα κύρια μέρη και έντεκα κεφάλαια:

- Μέρος I: Το Επίπεδο Συνδεσιμότητας (The «Pipes»), το οποίο περιλαμβάνει το Κεφάλαιο 2 (Δίκτυα Επικοινωνιών).
- Μέρος II: Το Επίπεδο Αντίληψης και Φυσικής Υπόστασης (The «Things»), με τα Κεφάλαια 3 (Συστήματα Ανίχνευσης) και 4 (Αυτόνομα Συστήματα).
- Μέρος III: Το Επίπεδο Νοημοσύνης και Εικονικοποίησης (The «Brain»), που καλύπτει τα Κεφάλαια 5 (Ψηφιακά Δίδυμα) και 6 (Ανάλυση Δεδομένων και Τεχνητή Νοημοσύνη).
- Μέρος IV: Το Επίπεδο Εμπιστοσύνης, Δεοντολογίας και Πολιτικής (The «Guardrails»), με τα Κεφάλαια 7 (Κυβερνοασφάλεια), 8 (Βιωσιμότητα) και 9 (Τυποποίηση).
- Η εργασία ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 10 για τις αναδυόμενες τεχνολογίες και το Κεφάλαιο 11 για τα τελικά συμπεράσματα.

2 Δίκτυα Ναυτιλιακών Επικοινωνιών

2.1 Επισκόπηση

Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με την υποδομή επικοινωνίας του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων. Το κεφάλαιο εξετάζει τον σχεδιασμό συστημάτων και τα λειτουργικά συστήματα (βάσει των Lin et al., 2010; Xylouris et al., 2024) που υποστηρίζουν αποτελεσματική και επεκτεινόμενη επικοινωνία μεταξύ πλοίων και παράκτιων βάσεων, καθώς και εναέριων συστημάτων και δορυφόρων σε ωκεάνιες περιοχές.

Οι επτά τομείς προσοχής περιλαμβάνουν τα Δίκτυα που Ορίζονται από Λογισμικό (SDN) για προγραμματισμό, τα Μη Επίγεια Δίκτυα (NTN) με 5G/6G για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης, τα Ετερογενή Δίκτυα Επικοινωνίας, τα Ναυτιλιακά Γνωστικά Ραδιοδίκτυα, τα πρωτόκολλα Αποθήκευσης και Προώθησης, την Ναυτιλιακή Υπολογιστική Ακρών και Ομίχλης και τα Δίκτυα Ανεκτικής Καθυστέρησης (DTN) για την υποστήριξη συνδέσεων υψηλής καθυστέρησης (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024; Lin et al., 2010).

Στόχος είναι να καταδειχθεί πώς αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται για την αντιμετώπιση των περιορισμών της αποστολής, συμπεριλαμβανομένης της αναξιόπιστης σύνδεσης, του παρατεταμένου χρόνου απόκρισης και των δύσκολων συνθηκών λειτουργίας.

2.2 Δίκτυα που ορίζονται από λογισμικό (SDN) σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα

2.2.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βιώνει έναν σημαντικό ψηφιακό μετασχηματισμό λόγω της αυξημένης χρήσης συνδεδεμένων συσκευών και της αυξανόμενης ζήτησης για έξυπνα συστήματα IoT στη Ναυτιλία για τη διαχείριση πλοίων και λιμένων, καθώς και λειτουργιών υπεράκτιων πλατφορμών (Niknami et al., 2023). Τα ναυτιλιακά δίκτυα λειτουργούν με σταθερά συστήματα υλικού που χρησιμοποιούν άκαμπτες μεθόδους ελέγχου για να δημιουργήσουν λειτουργικούς περιορισμούς κατά τη διάρκεια μεταβαλλόμενων θαλάσσιων συνθηκών και περιορισμένης διαθεσιμότητας ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, καθώς και κυμαινόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών (Niknami et al., 2023). Το SDN παρέχει διαχείριση πόρων δικτύου μέσω προγραμματιζόμενων συστημάτων ελέγχου που επιτρέπουν την προσαρμογή δικτύου βάσει πολιτικής για τη σύνδεση διαφορετικών ναυτιλιακών καναλιών επικοινωνίας για καλύτερη απόδοση επικοινωνίας και σταθερότητα συστήματος και ταχύτερους χρόνους απόκρισης (Niknami et al., 2023).

2.2.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το SDN αποσυνδέει το επίπεδο εντολών από το επίπεδο δεδομένων και η εντολή μπορεί είτε να είναι συγκεντρωτική είτε να κατανεμηθεί με ιεραρχικό τρόπο, και η δρομολόγηση, οι πολιτικές και η κατανομή πόρων (Niknami et al., 2023) μπορούν να ελέγχονται από τους προγραμματιζόμενους ελεγκτές. Στις ναυτιλιακές εφαρμογές, αυτό συνδυάζει ποικίλους τομείς, δηλαδή το δορυφορικό και επίγειο ραδιόφωνο, και το αναμετάδοση UAV σε ένα ενιαίο πακέτο ελέγχου, το οποίο επιβάλλει την ποιότητα υπηρεσίας και την αξιοπιστία έναντι των αλλαγών στην τοπολογία και των προσωρινών συνδέσεων (Xylouris et al., 2024).

2.2.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Το θαλάσσιο περιβάλλον εισάγει ιδιαίτερες παραμέτρους που εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία των συστημάτων SDN. Οι μεγάλες περιοχές οδηγούν σε μεγάλες καθυστερήσεις και δημιουργούν επίσης ακανόνιστα σημεία σύνδεσης με πλοία εν κινήσει, γεγονός που περιπλέκει την έγκαιρη

λήψη αποφάσεων για την κυκλοφορία SDN (Xylouris et al., 2024). Η συνεχής αλλαγή στη δομή του δικτύου λόγω κινούμενων αντικειμένων απαιτεί γρήγορες προσαρμογές του συστήματος.

2.2.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Συστήματα SDN πολλαπλών ελεγκτών εγκαθίστανται πλέον σε πλοία και σταθμούς ξηράς για την ενίσχυση της χρονικής καθυστέρησης και την παροχή ανοχής σφαλμάτων σε συστήματα ναυτιλιακών επικοινωνιών (Xylouris et al., 2024). Αυτοί οι ελεγκτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της εικονικοποίησης δικτύου, της δυναμικής δρομολόγησης της κίνησης και της ιεράρχησης QoS σε πραγματικό χρόνο.

2.2.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα συστήματα θαλάσσιας δικτύωσης που βασίζονται σε SDN έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα πραγματικού κόσμου. Τα έργα Smart Port βασίζονται στο SDN για την έξυπνη κατανομή του φορτίου δικτύου μεταξύ διαφορετικών χρηστών λιμένων, γεγονός που ενισχύει την αποτελεσματικότητα στις λειτουργίες φορτίου, τον έλεγχο της κυκλοφορίας των πλοίων και την παρακολούθηση του περιβάλλοντος (Niknami et al., 2023).

2.2.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Δεν υπάρχει επαρκής διερεύνηση σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των ναυτιλιακών δικτύων που αντιμετωπίζουν απώλεια σήματος. Οι ερευνητές πρέπει να αναπτύξουν συσκευές με τεχνητή νοημοσύνη που μπορούν να ανιχνεύουν δυσλειτουργίες και να τις διορθώνουν αυτόνομα.

2.3 Ενσωμάτωση Μη Επίγειων Δικτύων (NTN) και 5G/6G στις Ναυτιλιακές Επικοινωνίες

2.3.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα Μη Επίγεια Δίκτυα (NTN), δηλαδή οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (LEO) και τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), μετασχηματίζουν τις επικοινωνίες στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Συνδυάζονται με την τεχνολογία 5G και 6G για να παρέχουν αξιόπιστη κάλυψη απομακρυσμένων ωκεάνιων επιχειρήσεων.

2.3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Οι γεωστατικοί δορυφόροι ήταν το κύριο μέσο θαλάσσιας επικοινωνίας στο παρελθόν. Τα νέα μη επίγεια δίκτυα που αποτελούνται από δορυφόρους χαμηλής τροχιάς της Γης και πλατφόρμες που βασίζονται σε αεροσκάφη είναι ταχύτερα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τα τρέχοντα πλοία και τις μεγάλης κλίμακας λειτουργίες δεδομένων.

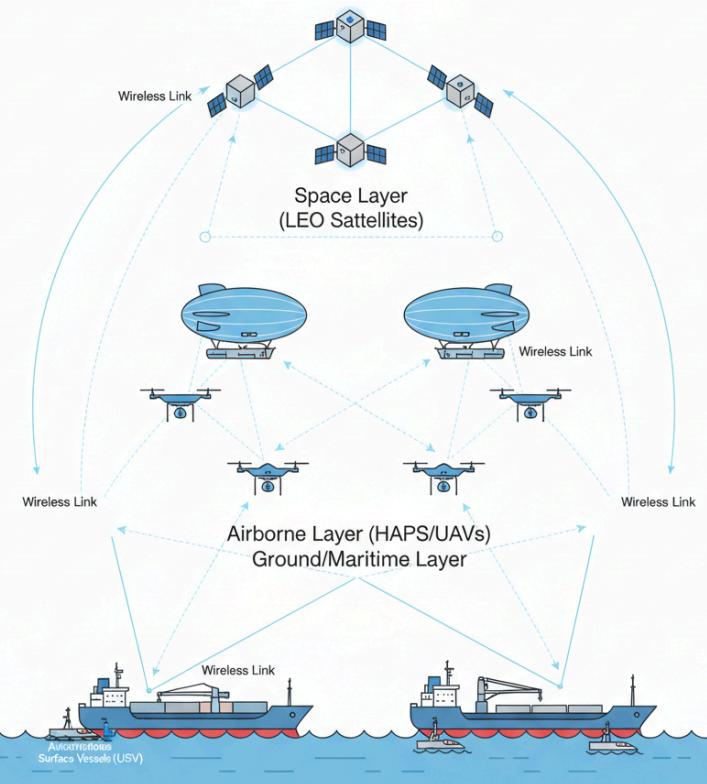
2.3.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Τα NTN σε θαλάσσια περιβάλλοντα αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις, όπως ο απρόβλεπτος καιρός, η απώλεια σήματος λόγω απόστασης, τα μεταβαλλόμενα ραδιοσήματα και η μικρή διάρκεια ζωής της μπαταρίας των UAV και των κινητών πλατφορμών.

2.3.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Προς το παρόν, τα ναυτιλιακά δίκτυα αποκτούν ασφαλέστερες και ταχύτερες υπηρεσίες σύνδεσης δεδομένων με τους δορυφόρους Starlink, OneWeb LEO και άλλες παρόμοιες υπηρεσίες.

Integrated Non-Terrestrial Network (NTN) Architecture



Σχήμα 1: Αρχιτεκτονική Ενσωματωμένου Μη Επίγειου Δικτύου (NTN) πολλαπλών επιπέδων για ναυτιλιακό 6G. Το διάγραμμα απεικονίζει την κάθετη ιεραρχία που συνδέει δορυφόρους LEO (Διαστημικό Επίπεδο) και αναμεταδότες UAV (Εναέριο Επίπεδο) με αυτόνομα σκάφη επιφανείας (Ναυτιλιακό Επίπεδο) για την εξασφάλιση καθολικής κάλυψης.

2.3.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Η ενσωμάτωση μεταξύ του δικτύου 5G/6G και του NTN είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που οδηγεί σε πολλαπλές καινοτομίες στον ναυτιλιακό τομέα. Τα έξυπνα λιμάνια διαθέτουν συνδεδεμένες συσκευές για τον έλεγχο του φορτίου και την παρακολούθηση της κατάστασης του νερού.

2.3.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Συνιστάται οι μελλοντικοί ερευνητές να συνεχίσουν να μελετούν την ενσωμάτωση χερσαίων και διαστημικών δικτύων, τη διαχείριση της κίνησης δεδομένων από την Τεχνητή Νοημοσύνη και την βελτιωμένη κίνηση των ταχέως κινούμενων σκαφών.

2.4 Ετερογενή Δίκτυα Επικοινωνιών

2.4.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Η επικοινωνία πραγμάτων (IoT) σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα απαιτεί Ετερογενή Δίκτυα Επικοινωνίας. Επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ πλοίων, λιμένων και άλλων θαλάσσιων συστημάτων μέσω μιας ποικιλίας τεχνολογιών επικοινωνίας.

2.4.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Οι θαλάσσιες επικοινωνίες έχουν εξελιχθεί από τη χρήση διαφορετικών ραδιοφωνικών και δορυφορικών συστημάτων σε ολοκληρωμένα δίκτυα που συνδυάζουν διαστημικούς, εναέριους και χερσαίους πόρους.

2.5 Ναυτιλιακά Δίκτυα Γνωστικού Ραδιοφώνου (Cognitive Radio)

2.5.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Είναι υποχρεωτικό να υπάρχει αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος στα σύγχρονα συστήματα θαλάσσιας επικοινωνίας. Η κίνηση ασύρματου δικτύου στη θάλασσα προκαλεί υπερφόρτωση του δικτύου από τις συμβατικές τεχνικές κατανομής φάσματος.

2.6 Πρωτόκολλα Αποθήκευσης και Προώθησης (Store-and-Forward)

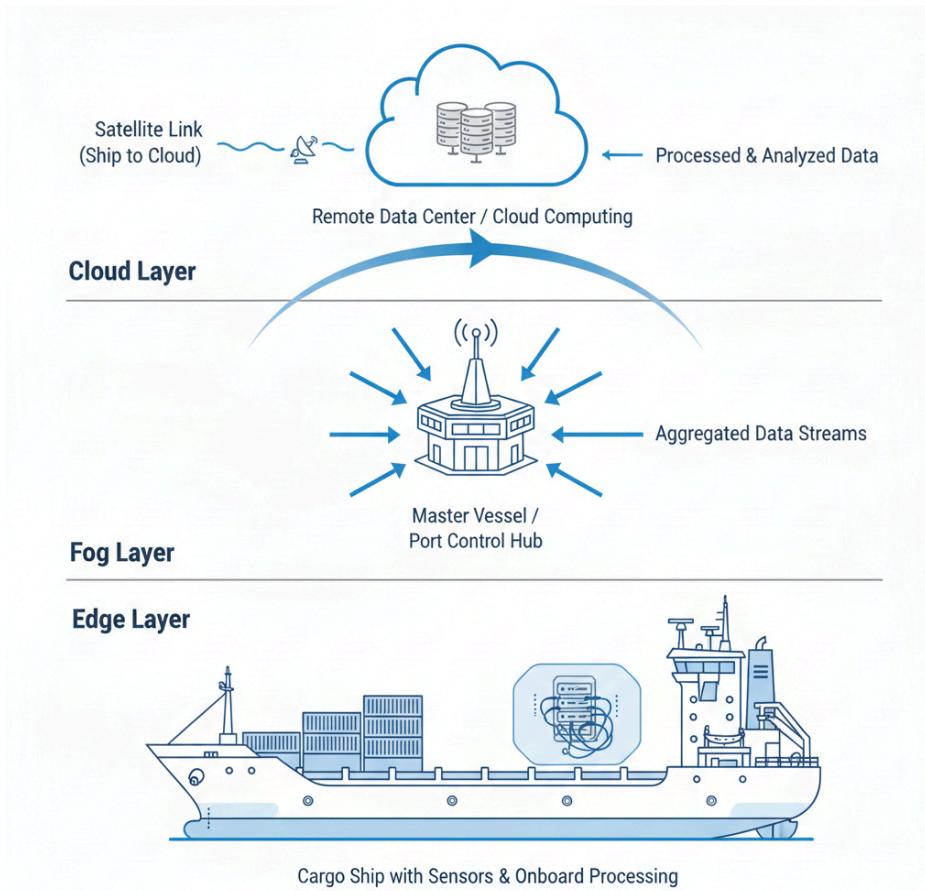
2.6.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Οι μέθοδοι αποθήκευσης και προώθησης (S&F) είναι ζωτικής σημασίας για τα ναυτιλιακά συστήματα IoT, καθώς επιτρέπουν τη συνεχή επικοινωνία σε απομακρυσμένα νερά όπου η συνεχής επικοινωνία ενδέχεται να μην είναι εφικτή.

2.7 Ναυτιλιακή Υπολογιστική Άκρου (Edge) και Ομίχλης (Fog)

2.7.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα συστήματα ναυτιλιακού Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) απαιτούν ολοένα και πιο κοντινή υπολογιστική ισχύ από τα πλοία και τους αισθητήρες. Τα συστήματα Edge και Fog Computing λειτουργούν σε απομακρυσμένα θαλάσσια περιβάλλοντα ή περιβάλλοντα με χαμηλό εύρος ζώνης.



Σχήμα 2: Πρακτική εφαρμογή κόμβων ναυτιλιακής υπολογιστικής άκρου (edge computing). Το NVIDIA Jetson Nano (αριστερά) χρησιμοποιείται ως Επιταχυντής AI Edge για εργασίες υψηλού εύρους ζώνης όπως η ανίχνευση αντικειμένων (YOLO), ενώ το Banana Pro (δεξιά) χρησιμεύει ως ισχυρή πύλη IoT (IoT Gateway) για συγκέντρωση αισθητήρων και τηλεμετρία.

2.8 Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστερήσεις (DTN)

2.8.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα Δίκτυα Ανεκτικής Καθυστέρησης (DTN) είναι απαραίτητα σε θαλάσσια περιβάλλοντα, καθώς παρέχουν έναν αξιόπιστο τρόπο παροχής δεδομένων σε περιόδους αργής ή διακοπτόμενης επικοινωνίας.

Πίνακας 1: Σύγκριση Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης DTN για Ναυτιλιακά Δίκτυα

Feature	Epidemic Routing	PRoPHETv2	MaxProp
Στρατηγική Δρομολόγησης	Βασισμένη σε πλημμύρα: Αντιγράφει μηνύματα σε κάθε κόμβο που συναντά.	Πιθανοτική: Χρησιμοποιεί ιστορικό επαφών για πρόβλεψη πιθανότητας παράδοσης.	Βασισμένη σε προτεραιότητα: Χρησιμοποιεί ουρές κατάταξης βάσει πιθανότητας παράδοσης και επιβεβαιώσεων.
Ποσοστό Παράδοσης	Υψηλό: Μέγιστη πιθανότητα παράδοσης σε αραιά δίκτυα λόγω μαζικού πλεονασμού.	Μεσαίο-Υψηλό: Καλή παράδοση όταν η κίνηση κόμβων ακολουθεί προβλέψιμα πρότυπα.	Υψηλό: Βελτιωμένο έναντι του PRoPHETv2 σε σύνθετα σενάρια λόγω εκτίμησης καθολικής γνώσης.
Επιβάρυνση / Χρήση Ενδιάμυ. Μνήμης	Πολύ Υψηλή: Καταναλώνει ταχέως χώρο μνήμης και εύρος ζώνης επιρρεπές σε συμφόρηση.	Χαμηλή: Μειώνει τον πλεονασμό προωθώντας μόνο σε κόμβους με υψηλότερη πιθανότητα παράδοσης.	Μεσαία: Διαγράφει αποτελεσματικά τα παραδοθέντα μηνύματα αλλά απαιτεί αποθήκευση για υπολογισμούς προτεραιότητας.
Υπολογιστικό Κόστος	Χαμηλό: Απλή λογική «αντιγραφή-σε-όλους» που απαιτεί ελάχιστη επεξεργαστική ισχύ.	Μεσαίο: Απαιτεί υπολογισμό μεταβατικών πιθανοτήτων ($P_{\{(a,b)\}}$).	Υψηλό: Απαιτεί σύνθετο υπολογισμό κόστους διαδρομών Dijkstra και επιβεβαιώσεων.
Βέλτιστη Ναυτιλιακή Εφαρμογή	Σήματα έκτακτης ανάγκης όπου η παράδοση είναι κρίσιμη και η ισχύς/εύρος ζώνης είναι δευτερεύοντα.	Πορθμεία ή επιβατηγά πλοία με τακτικά, προβλέψιμα δρομολόγια και προγράμματα.	Ναυτικές ομάδες εργασίας ή στόλοι με συντονισμένα αλλά δυναμικά πρότυπα κίνησης.

2.9 Συμπεράσματα

Η ενότητα εξετάζει πώς τα δίκτυα θαλάσσιων επικοινωνιών έχουν μετατραπεί σε ψηφιακά συστήματα που υποστηρίζουν το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (MIoT).

2.9.1 Κύρια Συμπεράσματα

- Τα συστήματα ναυτιλιακών επικοινωνιών μεταβάλλονται από βασικά, μονοτεχνολογικά συστήματα σε προηγμένα, ενοποιημένα, αυτοματοποιημένα πλαίσια.
- Το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων λειτουργεί μέσω επτά βασικών στοιχείων.
- Οι σύγχρονες ναυτιλιακές επιχειρήσεις χρειάζονται έξυπνα και ευέλικτα συστήματα.
- Το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων χρειάζεται τις ζωτικές του βάσεις στο Edge Computing.

3 Υποβρύχια και επιφανειακά συστήματα ανίχνευσης

3.1 Επισκόπηση

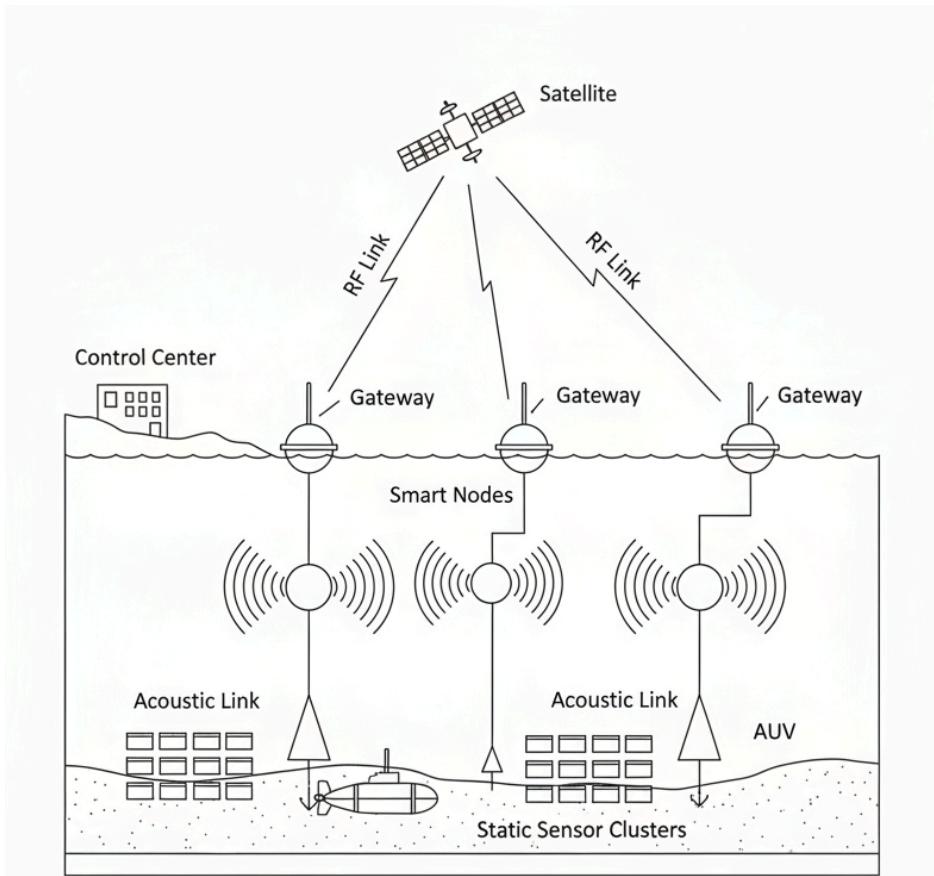
Αυτή η ενότητα αναλύει ολοκληρωμένα συστήματα ανίχνευσης που προσφέρουν αξιόπιστη παρακολούθηση των ωκεανών και συλλογή δεδομένων για εφαρμογές του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων (Muhammad et al., 2025; Sahoo et al., 2025). Η μελέτη καλύπτει έξι κύρια θέματα: τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα συστήματα ακουστικής επικοινωνίας, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα, τα μη επανδρωμένα επιφανειακά οχήματα, τη συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τη χρήση αισθητήρων ανθεκτικών στη βιορρύπανση.

3.2 Υποβρύχια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (UWSN)

Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (UWSN) αποτελούν απαραίτητο δομικό στοιχείο για την ανάπτυξη θαλάσσιων συστημάτων IoT, παρέχοντας αξιόπιστη παρακολούθηση, διαχείριση πόρων και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

3.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τα τελευταία χρόνια έχουν μετατρέψει τα UWSN από βασικούς ενσύρματους κόμβους σε προηγμένα ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούν ακουστικές, οπτικές και μαγνητοεπαγωγικές μεθόδους επικοινωνίας.



Σχήμα 3: Αρχιτεκτονική Υποβρύχιου Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (UWSN) 3D. Το σύστημα ενσωματώνει στατικούς αισθητήρες βυθού, κόμβους ρυθμιζόμενου βάθους και κινητά AUV για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πλέγματος παρακολούθησης του οceans.

3.2.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Στο υδάτινο περιβάλλον, η επικοινωνία βασίζεται κατά κύριο λόγο στα ακουστικά κύματα, δεδομένου ότι τα ραδιοσήματα εξασθενούν ταχύτατα μέσα στο νερό.

3.3 Συστήματα Ακουστικής Επικοινωνίας

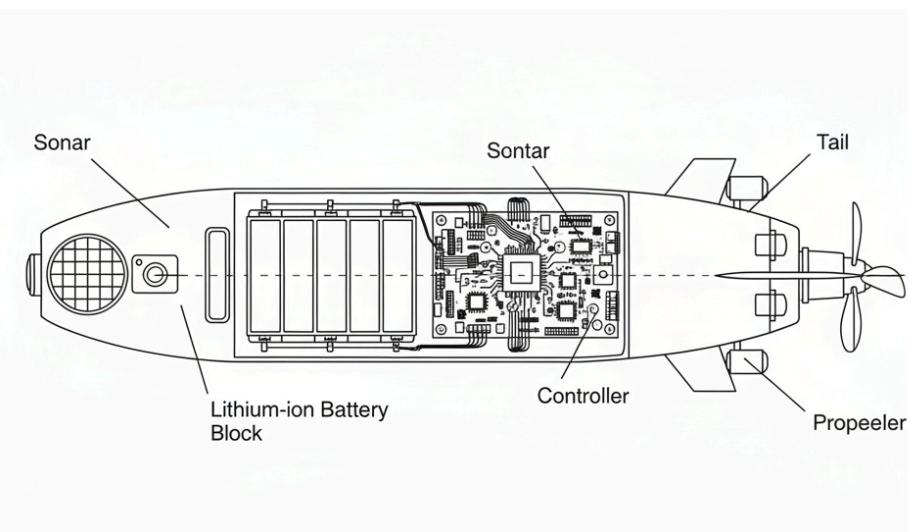
Η ακουστική επικοινωνία αποτελεί την πλέον αποτελεσματική μέθοδο επικοινωνίας στα θαλάσσια συστήματα IoT.

Πίνακας 2: Σύγκριση Τεχνολογιών Υποβρύχιας Επικοινωνίας

Feature	Ακουστική Επικοινωνία	Οπτική Επικοινωνία	Ηλεκτρομαγνητική (RF) Επικοινωνία
Κύριο Μέσο	Κύματα Πίεσης (Ηχος)	Κύματα Φωτός (Λέιζερ Κυανού-Πράσινου)	Ραδιοκύματα
Τυπική Εμβέλεια	Μεγάλη (km έως 100+ km)	Μικρή (< 100 m)	Πολύ Μικρή (< 10 m σε θαλασσινό νερό)
Ρυθμός Δεδομένων	Χαμηλός (kbps)	Υψηλός (Mbps έως Gbps)	Υψηλός (Mbps) σε μικρή εμβέλεια
Ταχύτητα Διάδοσης	1,500 m/s	2.25×10^8 m/s	2.25×10^8 m/s
Βασικές Προκλήσεις	Πολυδιαδρομική Διάδοση, Διασπορά Doppler, Χαμηλό Εύρος Ζώνης	Θολερότητα, Σκέδαση, Απαίτηση Οπτικής Επαφής (LOS)	Υψηλή Εξασθένηση, Απώλειες Αγωγμότητας
Ενεργειακή Απόδοση	Χαμηλή (Υψηλή ισχύς ανά bit)	Υψηλή (Χαμηλή ισχύς ανά bit)	Μέτρια

3.4 Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (AUV)

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUV) είναι ζωτικής σημασίας στα συστήματα IoT για τη ναυτιλία, για την υποστήριξη της τρέχουσας παρατήρησης των οικεανών, της διαχείρισης των πόρων και της αντίδρασης σε καταστροφές.



Σχήμα 4: Αρθρωτή Αρχιτεκτονική Υλικού ενός Αυτόνομου Υποβρύχιου Οχήματος (AUV). Τα βασικά υποσυστήματα περιλαμβάνουν περιβαλλοντικούς αισθητήρες (CTD, Sonar) και μονάδες πλοήγησης απαραίτητες για προσαρμοστική εξερεύνηση.

3.5 Μη Επανδρωμένα Επιφανειακά Οχήματα (USV)

Τα μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας (USV) είναι τα κύρια ναυτιλιακά συστήματα IoT για τη συλλογή δεδομένων, την αναμετάδοση πληροφοριών και τη συνεργασία με άλλα αυτόνομα οχήματα.

3.6 Συστήματα Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

3.6.1 Ερευνητική Σημασία και Συνάφεια

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των συνθηκών του θαλάσσιου περιβάλλοντος είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της υγείας των ωκεανών και των βιώσιμων δραστηριοτήτων στη θάλασσα.

3.7 Τεχνολογία Αισθητήρων Ανθεκτικών στη Βιορρύπανση

Η διαρκής ανάπτυξη τεχνολογία αισθητήρων είναι θεμελιώδης για τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων για το θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και τα αυτόνομα συστήματα.

3.8 Συμπεράσματα

Αυτό το κεφάλαιο συζήτησε όλες τις τεχνολογίες ανίχνευσης υπογείων και επιφανειακών δεδομένων που χρησιμοποιούνται σήμερα και δημιουργούν το αρχικό επίπεδο συλλογής δεδομένων για τα συστήματα του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων (MiOT).