

[Placeholder for University Name]

[Placeholder for Program]

**Θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Μια Ολοκληρω-
μένη Ανάλυση Δικτύων Επικοινωνίας, Αυτόνομων Συστη-
μάτων και Αναδυόμενων Τεχνολογιών**

Διπλωματική Εργασία

[Placeholder for Author Name]

Επιβλέπων:

[Placeholder for Supervisor Name]

Δεκέμβριος 2025

[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]

Δεκέμβριος 2025

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 συνδεσιμότητας, 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.

Πίνακας Περιεχομένων

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων και Λογοκλοπής	i
Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Κατάλογος Συντομογραφιών	x
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	9
2.2.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	9
2.2.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	9
2.2.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	10
2.2.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	10
2.3 Ενσωμάτωση Μη Επίγειων Δικτύων (NTN) και 5G/6G στις Ναυτιλιακές Επικοινωνίες	11
2.3.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	11
2.3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	11
2.3.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	11
2.3.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	11
2.3.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	12
2.3.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	13
2.4 Ετερογενή Δίκτυα Επικοινωνιών	13
2.4.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	13
2.4.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	13
2.4.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	13
2.4.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	13
2.4.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	14
2.4.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	14
2.5 Ναυτιλιακά Δίκτυα Γνωστικού Ραδιοφώνου (Cognitive Radio)	14
2.5.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	14
2.5.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.5.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	15
2.5.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	15

2.5.5	Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	15
2.5.6	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	15
2.6	Πρωτόκολλα Αποθήκευσης και Προώθησης (Store-and-Forward)	16
2.6.1	Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	16
2.6.2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	16
2.6.3	Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	16
2.6.4	Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	16
2.6.5	Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	17
2.6.6	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	17
2.7	Ναυτιλιακή Υπολογιστική Άκρου (Edge) και Ομίχλης (Fog)	17
2.7.1	Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	17
2.7.2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	17
2.7.3	Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	18
2.7.4	Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	19
2.7.5	Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	19
2.7.6	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	19
2.8	Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστερήσεις (DTN)	19
2.8.1	Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας	19
2.8.2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	19
2.8.3	Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	22
2.8.4	Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	22
2.8.5	Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	22
2.8.6	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	22
2.9	Συμπεράσματα	22
2.9.1	Κύρια Συμπεράσματα	23
2.9.2	Περιορισμοί και Ερευνητικά Κενά	23
2.9.3	Ερευνητικές Συνεισφορές	23
3	Υποβρύχια και επιφανειακά συστήματα ανίχνευσης	25
3.1	Επισκόπηση	25
3.2	Υποβρύχια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (UWSN)	25
3.2.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	25
3.2.2	Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	26
3.2.3	Μέθοδοι Έρευνας και Τρέχουσες Τεχνολογίες	27
3.2.4	Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης	27
3.2.5	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	27
3.3	Συστήματα Ακουστικής Επικοινωνίας	28
3.3.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	28
3.3.2	Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	29
3.3.3	Υπάρχουσες τεχνολογίες και μεθοδολογικές προσεγγίσεις	29
3.3.4	Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης	30
3.3.5	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	30
3.4	Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (AUV)	30
3.4.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	31
3.4.2	Τεχνικές Προκλήσεις	31
3.4.3	Υπάρχουσες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	31
3.4.4	Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης	32
3.4.5	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	32

3.5 Μη Επανδρωμένα Επιφανειακά Οχήματα (USV)	32
3.5.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	32
3.5.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	32
3.5.3 Υπάρχουσες τεχνολογίες και μεθοδολογικές προσεγγίσεις	33
3.5.4 Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης	33
3.5.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά	33
3.6 Συστήματα Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος	33
3.6.1 Ερευνητική Σημασία και Συνάφεια	33
3.6.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	34
3.6.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	34
3.6.4 Υπάρχουσες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	34
3.6.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης	35
3.6.6 Κενά στην έρευνα και μελλοντικές κατευθύνσεις	35
3.7 Τεχνολογία Αισθητήρων Ανθεκτικών στη Βιορρύπανση	35
3.7.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	35
3.7.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί	36
3.7.3 Συμβατικές Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις	36
3.7.4 Αισθητήρες κατά της βιορρύπανση στον τομέα της μακροπρόθεσμης παρατήρησης των ωκεανών	36
3.7.5 Κενά στην Έρευνα στην Μελλοντική Κατεύθυνση της Έρευνας	37
3.8 Συμπεράσματα	37
3.8.1 Κύρια Συμπεράσματα	37
3.8.2 Περιορισμοί και Ερευνητικά Κενά	37
3.8.3 Ερευνητικές Συνεισφορές	38

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.	12
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.	18
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 ωκεανού.	26
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.	31

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης DTN για Ναυτιλιακά Δίκτυα	21
Πίνακας 2 Σύγκριση Τεχνολογιών Υποβρύχιας Επικοινωνίας	29

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 (MΠoT), 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 (Durlík 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 MΠoT 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, έως πιο πολυσχιδείς τομείς όπως αυτούς των ναυτικών επιχειρήσεων, των υποθαλάσσιων γεωτρήσεων, και του ναυτικού τουρισμού, τα δίκτυα της ναυτιλίας απλώνονται μακριά, με απόδειξη τον κυρίαρχο ρόλο της στην παγκοσμιοποίηση και την δημιουργία διαπολιτισμικών σχέσεων (Durlík 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 δισεκατομμυρίων τόνων (UNCTAD, 2022). Σε συνδυασμό με την ασύγκριτη αποδοτικότητα που προσφέρει η ναυτιλιακή βιομηχανία στο διεθνές οικονομικό δίκτυο και εμπόριο, τελικά η σύγχρονη έκφασή 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 αναβαθμι-

στεί 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 (Durlík 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 οικοσυστήματα και θέτοντας σε κίνδυνο την θαλάσσια ζωή, με την εκφόρτιση εμπορικού 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% έως 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, σύνθετο φαινόμενο μεταξύ των ναυτικών, το εργασιακό περιβάλλον των οποίων απαιτεί πολύωρη απασχόληση, κοινωνική απομόνωση και υψηλά 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 αδιαμφισβήτητης 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 προηγούμενων 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 καταναμεμημένων αισθητήρων, οι οποίοι είναι λογικά διασυνδεδεμένοι μέσω ασύρματων ζευξεων, 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 ελέγξιμο, 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 ατελείωτο 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 (MlOT)

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

Το MIoT συνεπώς, είναι ένα καταναμημένο 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 ανταλλάσσουν 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 σηματοδότες, 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 καταναμημένη, 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 ξεχωριστές 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 καταταμίζεται 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 διάφορων 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), σηματοδότες 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 πλοήγηση 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 ενδεχομένως 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 μονοπατιών, 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, καθισταναν αναγκαία την παρέμβαση εξελεγχόμενων 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 βελτιώνουν την αποδοτικότητα του καναλιού.

Η αποδοτικότητα της ισχύος παραμένει μια κρίσιμη πρόκληση, η οποία οδηγεί στην υιοθέτηση 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 ζώνης, και την καθυστέρηση απόκρισης, με την επιτόπια λήψη αποφάσεων. Οι λειτουργίες αυτές είναι αναγκαίες σε ναυτικά επιχειρήματα όπως η ανίχνευση απειλών ή η αυτόνομη πλοήγηση.

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 νέφος, 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 αναδιαθρόσιμους 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 (Durlík 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 απρόσκοπτη 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 πλοήγησης (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 αλγοριθμικές προϋποθέσεις για τον ασφαλή, πολυπρακτορικό 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 Εξάιρεσης: 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. Η μελέτη θέτει επίσης ερωτήματα σχετικά με την ενορχήστρωση και την ευρωστία του συστήματος και την πλήρη απόδοση του συστήματος (π.χ., Lin et al., 2010; Woźniak, 2018). Ο σχεδιασμός επιπέδου ελέγχου και η ενοποίηση υποδομής διαστήματος-εδάφους συζητούνται στις ενότητες 2.1-2.7, και οι ενότητες εξηγούν πώς να χρησιμοποιείται η διατεχνολογική παράδοση και διαχείριση φάσματος, η μεταφορά δεδομένων με ανοχή σφαλμάτων και η κατανεμημένη υπολογιστική, και η χρήση των δικτύων στα συστήματα ανίχνευσης και αυτονομίας, καθώς και στα συστήματα ασφαλείας που συζητούνται στα επόμενα κεφάλαια (π.χ., Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024).

Τα τμήματα αυτής της εργασίας είναι αλληλένδετα, καθώς συνδέουν τα ναυτιλιακά ζητήματα με πρόσφατες προσεγγίσεις και παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης, και παρέχουν μια ενοποιημένη βάση δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί στο συμπέρασμα του κεφαλαίου καθώς και στη διατριβή που θα ακολουθήσει (π.χ., Xylouris et al., 2024; Lin et al., 2010).

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 (Niknam 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 (Niknam 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 (Niknam et al., 2023). Η ικανότητα αυτής της δυνατότητας να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις είναι ύψιστης σημασίας για την περιβαλλοντική παρατήρηση και

την αποτελεσματικότητα της ναυτιλιακής λειτουργίας τόσο σε θαλάσσια περιβάλλοντα όσο και σε λιμενικές εγκαταστάσεις, όπου οι εφαρμογές απαιτούν διαφορετικά επίπεδα χρόνου απόκρισης και προσβασιμότητας υπηρεσιών, καθώς και αξιοπιστία επικοινωνίας (Xylouris et al., 2024).

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 καταναμεθί με ιεραρχικό τρόπο, και η δρομολόγηση, οι πολιτικές και η κατανομή πόρων (Niknam 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). Το SDN και τα Software-Defined Radios (SDR) ενσωματώθηκαν σε πρώιμη έρευνα για την ενίσχυση της χρήσης του φάσματος και την υποστήριξη της δυναμικής δρομολόγησης στην θαλάσσια κινητικότητα και τις συνθήκες καναλιών (Niknam et al., 2023). Η επόμενη έρευνα επικεντρώθηκε σε αρχιτεκτονικές SDN πολλαπλών ελεγκτών και καταναμεμμένες αρχιτεκτονικές για την επίλυση του προβλήματος της καθυστέρησης και της ανοχής διαμέρισης στις τεράστιες ωκεάνιες περιοχές (Niknam et al., 2023). Η εικονικοποίηση δικτύου που λειτουργεί στην κοινή υποδομή επιτρέπει την ύπαρξη ανεξάρτητων λογικών δικτύων (slices), όπως δεδομένα πλοήγησης, βιντεοεπιτήρηση και παρακολούθηση φορτίου, τα οποία παρέχουν διαφοροποιημένη απόδοση (Niknam et al., 2023). Οι δορυφορικές υπηρεσίες LEO που διαχειρίζονται από SDN έρχονται να καλύψουν απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές και παρέχουν παράδοση σύμφωνα με την πολιτική με ασύρματη και ασύρματη και επίγεια μετάδοση (Lin et al., 2010).

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. Η έλλειψη φάσματος και η αυστηρή διαχείρισή του από τις ναυτιλιακές ρυθμιστικές αρχές και τους παγκόσμιους φορείς όπως ο IMO και η ITU απαιτεί έξυπνη χρήση του φάσματος για τη διατήρηση του κατάλληλου εύρους ζώνης (Niknam et al., 2023). Οι κακές καιρικές συνθήκες μειώνουν την ισχύ της ραδιοσύνδεσης και εισάγουν ποικίλα κανάλια επικοινωνίας που απαιτούν έξυπνες μεθόδους επικοινωνίας και ισχυρή ρύθμιση συστήματος (Niknam et al., 2023). Η περιορισμένη παροχή ενέργειας στα ναυτιλιακά συστήματα, ιδίως σε αυτόνομα πλοία και συστήματα αισθητήρων, απαιτεί SDN χαμηλής ισχύος μαζί με λειτουργίες SDR. Η υπάρχουσα επιβολή του νόμου σχετικά με τις τροποποιήσεις υλικού δημιουργεί καθυστερήσεις στην εφαρμογή της τεχνολογίας, ενώ παράλληλα καθιστά πιο σημαντικές τις τροποποιήσεις συστημάτων που βασίζονται στο λογισμικό (Xylouris et al., 2024). Τα δίκτυα SDN αυξάνουν τους κινδύνους ασφαλείας επειδή το κεντρικό επίπεδο ελέγχου είναι ευάλωτο σε κυβερνοεπιθέσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε εκτεταμένη βλάβη δικτύου. Για τον σκοπό αυτό, τα ναυτιλιακά συστήματα SDN πρέπει να προστατεύονται από ισχυρά μέτρα ασφαλείας. (Ghafoor et al., 2020; Niknam et al., 2023).

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. Η συμβατότητα με την τεχνολογία SDR επιτρέπει την ευελιξία συχνότητας και τη διαμόρφωση, η οποία είναι σημαντική για το εξελισσόμενο περιβάλλον του ναυτιλιακού καναλιού (Niknami et al., 2023). Ο συνδυασμός των τεχνικών γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας με το SDN επιτρέπει τη δυναμική χρήση του φάσματος και τα συστήματα θα αποφεύγουν αυτόματα τις παρεμβολές και επομένως το φάσμα θα χρησιμοποιείται πιο αποτελεσματικά (Ghafoor et al., 2020). Το SDN υποστηρίζεται από την Υπολογιστική Ομίχλης και την Υπολογιστική Ακρών (Edge and Fog Computing) καθώς η υπολογιστική ισχύς μεταφέρεται πιο κοντά στις πηγές δεδομένων, για παράδειγμα πλοία ή πλατφόρμες, γεγονός που μειώνει την ανάγκη αποστολής δεδομένων πίσω σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και βελτιώνει τις αποκρίσεις σε εφαρμογές, οι οποίες είναι ευαίσθητες στο χρόνο (Xylouris et al., 2024). Ο συνδυασμός των δύο δικτύων παρέχει παρόμοια δυνατότητα μετάβασης μεταξύ των δορυφορικών και των επίγειων συνδέσεων, και αυτό μπορεί να διαχειρίζεται από έναν ελεγκτή SDN για να επιτευχθεί ισχυρή σύνδεση στο διαδίκτυο παντού (Niknami et al., 2023). Οι αλγόριθμοι Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και ML αρχίζουν να βελτιώνουν τους ελεγκτές SDN προκειμένου να εκτελούν προγνωστικό έλεγχο δικτύου, πρόβλεψη κυκλοφορίας και ανίχνευση ανωμαλιών, αλλά αυτές οι μέθοδοι θα πρέπει να τροποποιηθούν στο ναυτιλιακό επιχειρησιακό περιβάλλον (Niknami et al., 2023).

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). Η Maersk και άλλες ναυτιλιακές εταιρείες χρησιμοποιούν λύσεις ελέγχου δικτύου που βασίζονται σε SDN για την υποστήριξη αυτόνομων συνδέσεων πλοίων, οι οποίες εγγυώνται αξιόπιστη παροχή πληροφοριών κατάστασης πλοίου και οδηγιών ελέγχου (Xylouris et al., 2024). Τα μη επανδρωμένα εναέρια αναμεταδότες που λειτουργούν ως αερομεταφερόμενοι κόμβοι ελεγχόμενοι από SDN διευρύνουν την πρόσβαση στο δίκτυο σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές και βελτιώνουν τη συλλογή δεδομένων αισθητήρων και την κατανόηση της κατάστασης (Ghafoor et al., 2020). Τα συστήματα παρέχουν ανώτερη απόδοση συνδεσιμότητας με μειωμένο χρόνο καθυστέρησης και αυξημένους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα στατικής υποδομής. Η εφαρμογή SDN σε λιμάνια τους επιτρέπει να επωφελούνται από την τεχνολογία τεμαχισμού δικτύου, η οποία επιτρέπει σε πολλές εφαρμογές να εκτελούνται ταυτόχρονα με ξεχωριστές απαιτήσεις απόδοσης (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. Οι ερευνητές θα πρέπει να εξετάσουν πώς να χρησιμοποιήσουν το SDN για να συνδυάσουν δορυφορικά δίκτυα 5G και 6G και άλλες νεοσύστατες τεχνολογίες για την παροχή γρήγορων υπηρεσιών διαδικτύου σε πλοία σε όλο τον κόσμο (Niknami et al., 2023; Shang et al., 2025). Το τρέχον πρόβλημα είναι πώς να λειτουργήσουν τα πρωτόκολλα SDN σε παγκόσμιους στόλους και διάφορους εξοπλισμούς. Το φιλικό προς τη ναυτιλία υλικό SDR και τα στοιχεία SDN εξοικονόμησης ενέργειας θα καταστήσουν δυνατή την ανάπτυξη μικρότερων αυτόνομων πλοίων αλλού (Xylouris et al., 2024). Υπάρχει ανάγκη για πλαίσια κυβερνοασφάλειας που είναι συμβατά με την ευέλικτη αρχιτεκτονική SDN και μπορούν να χειριστούν απειλές που σχετίζονται με τη ναυτιλία, προκειμένου να προστατεύσουν τις βασικές θαλάσσιες υποδομές και να διασφαλίσουν ασφαλείς αυτόνομες λειτουργίες (Ghafoor et al., 2020).

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. Αυτή η αξιοπιστία είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τις εφαρμογές του Ναυτιλιακού Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), δηλαδή την αυτόνομη ναυτιλία, τα έξυπνα λιμάνια και την ασφάλεια στη θάλασσα (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024).

2.3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

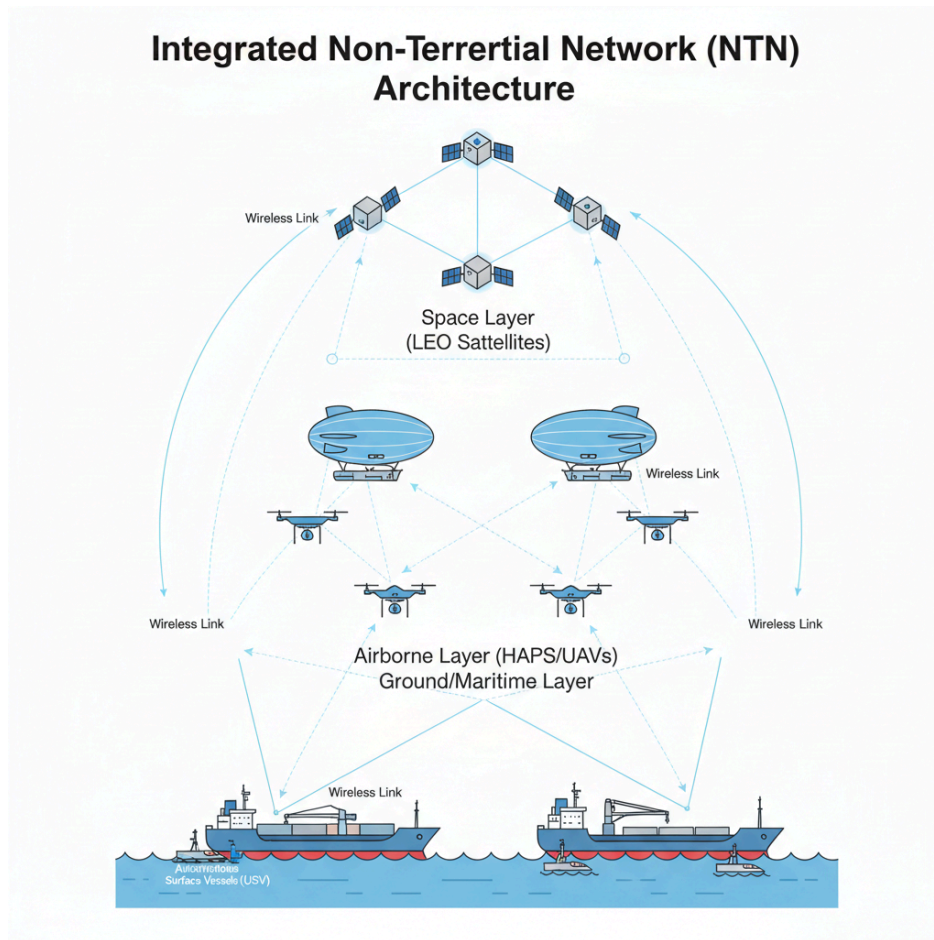
Οι γεωστατικοί δορυφόροι ήταν το κύριο μέσο θαλάσσιας επικοινωνίας στο παρελθόν. Καλύπτουν μια ευρεία περιοχή, αλλά είναι αργοί στην απόκριση και μπορούν να χειριστούν μόνο μια μικρή ποσότητα δεδομένων. Τα νέα μη επίγεια δίκτυα που αποτελούνται από δορυφόρους χαμηλής τροχιάς της Γης και πλατφόρμες που βασίζονται σε αεροσκάφη είναι ταχύτερα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τα τρέχοντα πλοία και τις μεγάλης κλίμακας λειτουργίες δεδομένων. Σύμφωνα με κριτικές, τα νέα δίκτυα χρησιμοποιούν υπολογιστική αιχμής και κατανεμημένα συστήματα για την ενίσχυση των συνδέσεων του Διαδικτύου των Πραγμάτων και των αναγκών σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024).

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. Η ενσωμάτωση των NTN με συστήματα 5G ή 6G δημιουργεί επίσης προβλήματα παρεμβολών από δορυφόρους και επίγειες ζεύξεις, η εναλλαγή σημάτων κίνησης πλοίων και ο σχεδιασμός διαδρομής των UAV για τη βελτιστοποίηση της κάλυψης και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η συνεργασία των συστημάτων στην ξηρά, στον αέρα και στη θάλασσα (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024; Lindenbergs et al., 2023).

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. Η επικοινωνία δεδομένων μπορεί επίσης να βελτιωθεί με UAV, επεκτείνοντας την κάλυψη σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες δορυφορικές ή επίγειες συνδέσεις, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πολυσύχναστα λιμάνια.



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.

Η τελευταία έκδοση της τεχνολογίας 5G and 6G προσφέρει στα πλοία εξατομικευμένα χαρακτηριστικά, όπως η τεμαχισμός δικτύου και η υποστήριξη Internet of Things (IoT) σε τεράστια κλίμακα. Σύμφωνα με τα ευρήματα της νέας έρευνας, ο συνδυασμός επίγειων ασύρματων δικτύων mesh and σύνδεσης NTN παρέχει στα πλοία και στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις μια αξιόπιστη, ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική επικοινωνία (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024; Lindenberg et al., 2023).

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. Οι δορυφορικές λύσεις LEO επιτρέπουν την απομακρυσμένη συντήρηση και την αυτοοδηγούμενη πλοήγηση και ιατρικές υπηρεσίες στη θάλασσα. Τα δίκτυα αναμετάδοσης UAV διατηρούν τις συνδέσεις των πλοίων στις περιοχές όπου τα κανονικά σήματα αποτυγχάνουν. Αυτές οι τεχνολογίες ενσωμάτωσης παρέχουν τη δυνατότητα συνεχούς βιντεοεπιτήρησης και αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, καθώς και διαχείρισης στόλου και παρακολούθησης εξοπλισμού σε πλοία και λιμάνια (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024; MOL, 2023).

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. Η Μηχανική Μάθηση θα χρησιμοποιηθεί για τον καλύτερο συντονισμό δορυφόρων, UAV και αισθητήρων πλοίων στα επόμενα συστήματα 6G. Άλλα σημαντικά καθήκοντα του μέλλοντος περιλαμβάνουν την εφαρμογή διεθνών προτύπων και τον σχεδιασμό δικτύων που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια (Giordani & Zorzi, 2020; Xylouris et al., 2024).

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. Παρέχουν ασφαλείς συνδέσεις σε κανονικές λειτουργίες, ασφάλεια και συλλογή ανθρώπινων και αυτοματοποιημένων δεδομένων. Η επικοινωνία πολλαπλών δικτύων, όπως δορυφόρος, ραδιοφωνικός, κινητός και άλλοι, καθιστά τη ναυτιλία πιο έξυπνη. Προσφέρει αυτοματοποιημένη λειτουργία στο λιμάνι, ένα χαρακτηριστικό που είναι απαραίτητο για τον μετασχηματισμό των θαλάσσιων βιομηχανιών σε σημαντικό αριθμό. (Xylouris et al., 2024; Hoeft et al., 2023).

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. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, τα υβριδικά δίκτυα μπορούν να παρέχουν συνδεσιμότητα σε πλοία μακριά από την ακτή και να διατηρούν τη μετάδοση δεδομένων υπό αντίξοες συνθήκες. Τα πλοία έχουν βοηθηθεί στην απρόσκοπτη σύνδεση και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από τεχνικές μηχανικής μάθησης, οι οποίες περιλαμβάνουν βαθιά μάθηση για την επιλογή της καλύτερης ασύρματης σύνδεσης. Οι πλατφόρμες του IoT για τη ναυτιλία εργάζονται επί του παρόντος για να διασφαλίσουν ότι οι διάφοροι αισθητήρες και συσκευές είναι εύκολα συμβατοί (Lin et al., 2010; Hoeft et al., 2023; Li et al., 2023).

2.4.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Ο συνδυασμός πολλαπλών τύπων δικτύων στη θάλασσα αποτελεί μεγάλη πρόκληση. Τα ασύρματα σήματα μπορεί να είναι ασθενή ή παραμορφωμένα ή να έχουν παρεμβολές λόγω νερού και καιρού. Τα δορυφορικά συστήματα έχουν μια τεράστια περιοχή λειτουργίας, αλλά είναι δαπανηρά και έχουν χαμηλή ταχύτητα. Τα χερσαία δίκτυα έχουν υψηλότερη ταχύτητα, αλλά είναι διαθέσιμα μόνο κοντά την ακτή. Τα πλοία πρέπει να διαθέτουν ισχυρά συστήματα όταν διέρχονται από δίκτυα για να διατηρούν την επικοινωνία. Οι διαφορές δικτύου θα μπορούσαν να δυσκολέψουν την ανταλλαγή δεδομένων για τις συσκευές, επειδή χρησιμοποιούν διαφορετικά πρότυπα ή δεν έχουν μπαταρία. Είναι επίσης δύσκολο να δοθεί προτεραιότητα στα σημαντικά μηνύματα και να διατηρηθούν όλα ασφαλή, επομένως απαιτούνται σοφές μέθοδοι κοινής χρήσης πόρων δικτύου και μετάφρασης δεδομένων.

2.4.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Τα δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών, το Wi-Fi και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (4G/5G), καθώς και τα δορυφορικά δίκτυα συνδυάζονται για τη δημιουργία συστημάτων θαλάσσιας επικοινωνίας. Τα συστήματα που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη παρέχουν τις κατάλληλες επιλογές σύνδεσης

και μοιράζονται την κίνηση σε διαφορετικά δίκτυα. Η ενέργεια μπορεί να μειωθεί και η κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ πολλών συσκευών μπορεί να σταθεροποιηθεί χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές. Με το σύστημα netBaltic, τα πλοία μπορούν να επικοινωνούν ασύρματα με την ακτή και με τα άλλα πλοία χωρίς τη χρήση του δορυφόρου, επιτρέποντας την σύνδεση περισσότερων πλοίων. Τα δεδομένα αισθητήρων, τα δεδομένα θέσης και τα δεδομένα εντολών μοιράζονται γρήγορα μεταξύ των USV και των υποβρύχιων ρομπότ μέσω συστημάτων που βασίζονται στο IoT (Hoeft et al., 2023; Li et al., 2023; Woźniak et al., 2018).

2.4.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα δίκτυα αποτελούν την εξαιρετική τεχνολογία που εφαρμόζεται για την αυτοματοποίηση των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων και την ασφάλειά τους στη θάλασσα. Η παρακολούθηση πλοίων σε πραγματικό χρόνο και η διαχείριση φορτίου είναι μερικές από τις σημαντικές εργασίες που εκτελούν αυτά τα δίκτυα στα έξυπνα λιμάνια και τις αλυσίδες εφοδιασμού. Τα ραδιοσήματα και τα δορυφορικά δίκτυα χρησιμοποιούνται από ρομποτικά πλοία και το υλικό τηλεχειρισμού για τη μετάδοση των θέσεων τους και την αποφυγή συγκρούσεων. Τα αυτόματα συστήματα συλλέγουν αυτές τις πληροφορίες για να προβλέπουν τις κινήσεις των πλοίων και να βελτιστοποιούν την ασφάλεια σε πολυσύχναστες ναυτιλιακές διαδρομές. Πολλαπλά πλοία συνδέονται μεταξύ τους μέσω δικτύων για τη μετάδοση των πληροφοριών σε μεγαλύτερη απόσταση και για την ενίσχυση της επικοινωνίας των στόλων (Li et al., 2023; Hoeft et al., 2023; Woźniak, 2018).

2.4.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Οι ερευνητές προσπαθούν να καταλάβουν πώς το 6G μπορεί να συνεργαστεί με την Τεχνητή Νοημοσύνη και τη Μηχανική Μάθηση (ML) και τη συνεργατική νοημοσύνη για να βελτιώσει και να ασφαλέσει τις συνδέσεις. Πρέπει να υπάρχει μια λύση για την επίλυση ζητημάτων όπως η δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ των δορυφορικών, ραδιοφωνικών και επίγειων δικτύων, η εξοικονόμηση ενέργειας και η πρόληψη των παρεμβολών σήματος σε περιοχές με συμφόρηση στο νερό. Πρέπει να υπάρχει μια κοινή μέθοδο και ένα βολικό σύστημα για την ένωση όλων των πλοίων και αισθητήρων. Τα δίκτυα θα απαιτούν πιο έξυπνο έλεγχο, ισχυρό εξοπλισμό και ανώτερη συνεργασία συσκευών για την αποτελεσματική επικοινωνία σε απομακρυσμένες και ταραγμένες ωκεάνιες περιοχές (Xylouris et al., 2024; Lin et al., 2010).

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, επιβράδυνση της επικοινωνίας και μείωση της αξιοπιστίας των λειτουργιών λόγω του αυξανόμενου αριθμού σκαφών, αισθητήρων και άλλων ασύρματων συσκευών. Ο συντονισμός των πλοίων, η μεταφορά δεδομένων IoT στη θάλασσα και η ασφαλής πλοήγηση υποστηρίζονται από τα Γνωσιακά Ραδιοδίκτυα, καθώς παρέχουν έξυπνες προσεγγίσεις χρήσης φάσματος που είναι πιο προσαρμόσιμες και ασφαλείς (Ghafoor & Koo, 2020; και Zheng et al., 2023).

2.5.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η τεχνολογία Cognitive Radio (CR) επιτρέπει στις συσκευές να ανιχνεύουν ελεύθερα κανάλια επικοινωνίας και να τα χρησιμοποιούν χωρίς να παρεμβαίνουν σε εξουσιοδοτημένους χρήστες. Αυτές είναι οι προηγούμενες μελέτες που προσπάθησαν να προσαρμόσουν τέτοιες προσεγγίσεις σε θαλάσσια σκάφη και υπεράκτιες πλατφόρμες στη θάλασσα. Κύριος στόχος τους ήταν να αντιμετωπίσουν το

πρόβλημα του περιορισμένου φάσματος, της διακύμανσης της κατάστασης της θάλασσας και της κινητικότητας των πλοίων. Η συνεργατική ανίχνευση φάσματος και η κεντρική διαχείριση φάσματος έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας της ανίχνευσης στα πλοία υπό κινητικότητα και μεταβαλλόμενα ραδιοσήματα που προκαλούνται από το κύμα της θάλασσας και τον καιρό (Ghafoor & Koo, 2020; Zheng et al., 2023).

2.5.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Οι θάλασσες είναι επιρρεπείς σε θόρυβο όταν λειτουργούν με Γνωστικά Ραδιοδίκτυα. Τα ραδιοσήματα διαταράσσονται από την κίνηση του νερού, γεγονός που οδηγεί σε κακές συνδέσεις και σφάλματα στην ανίχνευση καναλιών. Τα σκάφη έχουν μικρή ισχύ για να λειτουργήσουν με πολύπλοκες επικοινωνίες και οι δορυφορικές συνδέσεις προσθέτουν καθυστέρηση. Δεν υπάρχει μόνιμη υποδομή στην ανοιχτή θάλασσα, επομένως οι κινητές πλατφόρμες πρέπει να μεταδίδουν πληροφορίες φάσματος όταν βρίσκονται σε κίνηση. Οι κανόνες ορίζουν ότι τα γνωστικά ραδιοδίκτυα δεν πρέπει να διαταράσσουν τα συστήματα επικοινωνίας έκτακτης ανάγκης. Αυτό καθιστά ακόμη πιο δύσκολο τον σχεδιασμό και τη λειτουργία (Ghafoor & Koo, 2020; Zheng et al., 2023).

2.5.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Οι υπάρχουσες τεχνικές σάρωσης φάσματος, όπως η σάρωση με βάση την ενέργεια, μπορούν να εφαρμοστούν από τα Ναυτιλιακά Γνωστικά Ραδιοδίκτυα για τον εντοπισμό αχρησιμοποίητων καναλιών. Η πρακτική της κοινής σάρωσης είναι δημοφιλής και βοηθά στην ενίσχυση της ακρίβειας των αποφάσεων των πλοίων που ανταλλάσσουν δεδομένα με ένα κεντρικό κέντρο διαχείρισης ή μεταξύ τους. Ο συνδυασμός Δικτύωσης που Ορίζεται από Λογισμικό και Γνωστικής Ραδιοφωνίας παρέχει κεντρικό αλλά δυναμικό έλεγχο των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από τα πλοία και άλλους χρήστες. (Ghafoor & Koo, 2010; Zheng et al., 2023). Τα συστήματα μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες της στιγμής και να βελτιώσουν τη μετάδοση δεδομένων σε δύσκολες συνθήκες.

2.5.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ πλοίων, η περιβαλλοντική επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο και η αυτοματοποιημένη υποστήριξη πλοίων είναι μερικά από αυτά τα δίκτυα. Το Cognitive Radio, χρησιμοποιώντας κεντρική διαχείριση, χρησιμοποιείται σε ορισμένα λιμάνια και ερευνητικές αποστολές για τη λειτουργία διαφορετικών τύπων εξοπλισμού και λειτουργιών. Έχει διαπιστωθεί ότι τέτοια συστήματα μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση δεδομένων, να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές και να ενισχύσουν την αξιοπιστία της θαλάσσιας επικοινωνίας (Ghafoor & Koo, 2020; Zheng et al., 2023).

2.5.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Περαιτέρω μελέτες ενδιαφέρονται για τον τρόπο βελτίωσης της ανίχνευσης φάσματος όταν τα κύματα αλλάζουν, για τη χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης για τον έλεγχο της χρήσης ραδιοσυχνοτήτων και της κατανάλωσης ενέργειας, και για τον συνδυασμό νέων ασύρματων τεχνολογιών όπως το 6G. Τα δίκτυα μετάδοσης, τα οποία επιτρέπουν στα σκάφη και τα ρομπότ να λαμβάνουν εντολές τοπικά, μπορούν να ενισχύσουν την αξιοπιστία του συστήματος. Είναι επίσης επιθυμητό να υπάρχει ενισχυμένη διεθνής συνεργασία και κανονισμοί, ώστε αυτά τα συστήματα να λειτουργούν αρμονικά και με ασφάλεια παγκοσμίως (Ghafoor & Koo, 2020; Zheng et al., 2023).

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. Στη θάλασσα, πλατφόρμες όπως πλοία ή σηματοδότες δεν είναι πάντα συνδεδεμένες λόγω μειωμένης δορυφορικής κάλυψης ή μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών. Για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αξιόπιστη εκτέλεση των ναυτιλιακών επιχειρήσεων (Monzon Baeza et al., 2024), τα πρωτόκολλα S&F διατηρούν δεδομένα σε δορυφόρους ή συσκευές πύλης μέχρι να είναι διαθέσιμη μια σύνδεση.

2.6.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τέτοιες τεχνικές αποθήκευσης και προώθησης (S&F) είναι πιο χρήσιμες στις μέρες μας λόγω της παρουσίας δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO) και δικτύων μη επίγειων δικτύων (NTN) και θαλάσσιων δικτύων κινητής τηλεφωνίας όπως το NB-IoT και το LTE-M. Σύμφωνα με μια μελέτη, η S&F μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επέκταση της κάλυψης των δικτύων IoT σε περιοχές του ωκεανού όπου τα επίγεια δίκτυα δεν μπορούν να φτάσουν εύκολα, με μειωμένο κόστος (Monzon Baeza et al., 2024). Οι νέες προσθήκες είναι πρωτόκολλα δικτύου ανεκτικών καθυστερήσεων (DTN) που μπορούν να συνδέσουν κινούμενες πλατφόρμες ακόμη και όταν υπάρχουν προσωρινά κενά στη σύνδεση. Η τεχνολογία S&F επιτρέπει στα συστήματα επικοινωνίας του Ναυτιλιακού IoT να μετακινούνται από επίγειες υποδομές σε ισχυρά και οικονομικά αποδοτικά συστήματα (Monzon Baeza et al., 2024).

2.6.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Τα πρωτόκολλα αποθήκευσης και προώθησης (S&F) είναι λειτουργικά, αλλά αντιμετωπίζουν τεχνικά ζητήματα. Η δρομολόγηση δεδομένων σε δορυφορικά δίκτυα S&F είναι δύσκολη λόγω της κίνησης των δορυφόρων, των προσωρινών συνδέσεων και των καθυστερήσεων σε άκαιρο χρόνο, οι οποίες προκαλούν απρόβλεπτες καθυστερήσεις και υπερφόρτωση δεδομένων σε ενδιάμεσους κόμβους. Αυτό απαιτεί ένα καλά σχεδιασμένο πρόγραμμα παράδοσης δεδομένων και διαχείρισης buffer (Monzon Baeza et al., 2024). Τα συστήματα S&F εγγράφονται επίσης στο δίκτυο και ελέγχονται μεταξύ πολλαπλών δορυφορικών περασμάτων. Η ασφάλεια δεν μπορεί ποτέ να τεθεί σε κίνδυνο, καθώς οι περίοδοι μη μετάδοσης ενδέχεται να εκθέσουν εμπιστευτικά δεδομένα. Οι ακεραιότητες των συστημάτων S&F πρέπει να διασφαλίζουν την αυθεντικότητα και την αυθεντικότητα των δεδομένων μέσω της ταυτόχρονης επαλήθευσης ταυτότητας διαφόρων τμημάτων δικτύου (ISTS Consortium, 2024).

2.6.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Προς το παρόν, οι λειτουργίες Επιστήμης και Επικοινωνιών (S&F) χρησιμοποιούνται από πλατφόρμες Ναυτιλιακού Διαδικτύου (IoT) σε εγκαταστάσεις δορυφόρων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και την ελαχιστοποίηση της απώλειας δεδομένων. Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των δεδομένων ελλείψει συνδέσεων, οι λειτουργίες δικτύου κατανέμονται κυρίως μεταξύ δορυφόρων και επίγειων τμημάτων (Monzon Baeza et al., 2024). Οι λύσεις περιλαμβάνουν τυποποιημένες διεπαφές και πρωτόκολλα που εκθέτουν τις δυνατότητες Επιστήμης και Επικοινωνιών (S&F) του δικτύου και των χρηστών, προσφέρουν ελέγχους για την ιεράρχηση της παράδοσης και τη δυναμική διαχείριση των ποσοστώσεων δεδομένων. Οι ναυτιλιακές εφαρμογές NB-IoT διαθέτουν πλέον δυνατότητα Επιστήμης και Επικοινωνιών (S&F) με παρακολούθηση πλοίων και εμπορευματοκιβωτίων σε μεγάλες διαβάσεις στον ωκεανό (Noto et al., 2023).

2.6.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Η αποθήκευση και προώθηση είναι πιο αποτελεσματική σε λειτουργίες του Ναυτιλιακού Διαδικτύου των Πραγμάτων που δεν είναι άμεσες, π.χ. στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, τη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων και την εφοδιαστική, όταν η επικοινωνία πρέπει να είναι αξιόπιστη, αλλά η παράδοση είναι πιο σημαντική από την άμεση επικοινωνία (Monzon Baeza et al., 2024). Η τεχνολογία S&F χρησιμοποιείται από φορτηγά πλοία για τον συγχρονισμό βάσεων δεδομένων και τη μετάδοση δεδομένων πίσω στο cloud όταν αποκαθίσταται μια σύνδεση. Τα ρυθμιστικά συστήματα και τα συστήματα ασφαλείας χρησιμοποιούν επίσης την S&F για την παράδοση μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια διακοπών δικτύου. Κατά τη δοκιμή με ναυτιλιακά συστήματα 5GT, παρατηρείται ότι τα δίκτυα που βασίζονται στην S&F μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή υψηλών φορτίων κυκλοφορίας με χαμηλή απώλεια πακέτων και έτσι να βοηθήσουν στην ευρύτερη υιοθέτησή τους (Noto et al., 2023).

2.6.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Η δρομολόγηση των δορυφορικών και χερσαίων δικτύων πρέπει επίσης να επιταχυνθεί. Η παράδοση των δορυφόρων πρέπει επίσης να βελτιωθεί. Η διαδικασία εναλλαγής μεταξύ δορυφορικών και χερσαίων δικτύων πρέπει επίσης να αυτοματοποιηθεί (Monzon Baeza et al., 2024). Επιπλέον, η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα πρέπει να μελετηθούν, καθώς τα δορυφορικά και χερσαία δίκτυα χρησιμοποιούνται από ολοένα και περισσότερους ανθρώπους. Τα δορυφορικά και χερσαία δίκτυα εξετάζονται για τη σύνδεση με τα θαλάσσια δίκτυα 5G και τα επόμενα 6G. Άλλα ερωτήματα περιλαμβάνουν την παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών και την ανάπτυξη δικτύων που είναι ευέλικτα στις εξελισσόμενες επιχειρηματικές απαιτήσεις (Monzon Baeza et al., 2024).

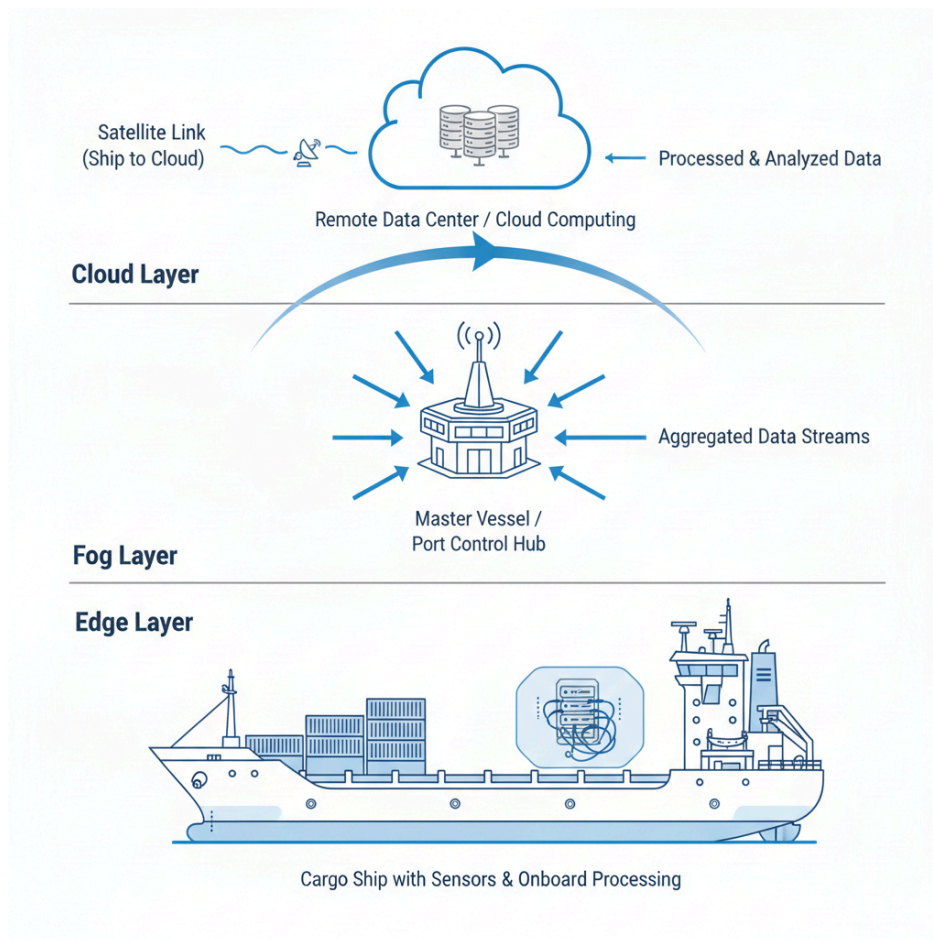
2.7 Ναυτιλιακή Υπολογιστική Άκρου (Edge) και Ομίχλης (Fog)

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 για να επιτρέπουν αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή ενεργειακή απόδοση σε πλοία και πλατφόρμες. Αυτά τα παραδείγματα κατανεμημένης πληροφορικής δεν βοηθούν μόνο την έξυπνη ναυτιλιακή βιομηχανία, τις λιμενικές λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο, καθώς και τις αυτόματες λύσεις θαλάσσιας ασφάλειας να αναπτυχθούν (Chen et al., 2025; Sanikommu et al., 2025).

2.7.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα, το Edge Computing επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων κοντά στην πηγή τους, η οποία μπορεί να βρίσκεται είτε σε ένα πλοίο είτε εντός τοπικής ναυτιλιακής υποδομής. Το σύστημα Fog Computing επιτρέπει σε πολλές τοπικές συσκευές να συνεργάζονται μέσω κατανεμημένης επεξεργασίας και προσωρινής αποθήκευσης πληροφοριών.



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.

Συστήματα διαχείρισης δεδομένων που βασίζονται σε πλοία χρησιμοποιούν Τεχνητή Νοημοσύνη Edge και σύντηξη αισθητήρων για την επεξεργασία τηλεμετρίας και τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα, ενώ παράλληλα υποστηρίζουν γρήγορη λήψη αποφάσεων σε δύσκολες θαλάσσιες συνθήκες, σύμφωνα με τους Chen et al. (2025). Ο τομέας έχει αποκτήσει βελτιωμένα συστήματα επιτήρησης και παρακολούθησης του περιβάλλοντος μέσω ανίχνευσης πλοίων και λιμένων σε πραγματικό χρόνο, βασισμένα σε προηγμένα μοντέλα Βαθιάς Μάθησης που εκτελούνται σε συσκευές edge, σύμφωνα με τους Sanikommu et al. (2025).

2.7.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Τα συστήματα Edge and Fog Computing αντιμετωπίζουν πολλά αποκλειστικά εμπόδια στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα πλοία αντιμετωπίζουν συνεχή κενά συνδεσιμότητας, κυμαινόμενες συνθήκες δικτύου και σοβαρούς περιορισμούς πόρων σε ισχύ και υλικό. Η παραδοσιακή προσέγγιση της χρήσης επεξεργασίας που βασίζεται στο cloud δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θάλασσα επειδή προκαλεί μεγάλες καθυστερήσεις και οι συνδέσεις δικτύου δεν είναι σταθερές. (Sanikommu et al., 2025). Οι συσκευές Edge πρέπει να χειρίζονται πολλαπλά συστήματα υλικού, να συγχρονίζουν αποτελεσματικά τα δεδομένα και να προστατεύουν από επιθέσεις τόσο online όσο και offline (Sanikommu et al., 2025). Τα συστήματα Fog πρέπει να διαχειρίζονται τα κινούμενα πλοία και τις μεταβαλλόμενες δομές δικτύου και τις νομικές απαιτήσεις, καθώς και να προστατεύουν ευαίσθητα επιχειρηματικά και περιβαλλοντικά δεδομένα (Xylouris et al., 2024).

2.7.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Τα σύγχρονα ναυτιλιακά δίκτυα υιοθετούν καταναεμημένες αρχιτεκτονικές υπολογισμού που συνδυάζουν κόμβους edge εγκατεστημένους σε πλοία με διακομιστές fog που βρίσκονται είτε σε λιμενικές εγκαταστάσεις είτε εντός ναυτιλιακών στόλων. Ο ιεραρχικός συνδυασμός του cloud, της fog και της edge computing οδηγεί σε αποτελεσματική ανάλυση χαμηλής καθυστέρησης βασισμένη στην Τεχνητή Νοημοσύνη, η οποία είναι απαραίτητη σε τομείς όπως η ανίχνευση συγκρούσεων και η παρακολούθηση πλοίων και ο έλεγχος εκπομπών (Chen et al., 2025; Ghoshal et al., 2024; Farooq et al., 2022). Ο έλεγχος πόρων, οι τεχνικές εκφόρτωσης και η Ομοσπονδιακή Μάθηση επιτρέπουν σε πολλά πλοία και μη επανδρωμένα συστήματα να χρησιμοποιούν με ασφάλεια μοντέλα χωρίς να χρειάζεται να καταχωρούν όλα τα δεδομένα, γεγονός που μειώνει τις απαιτήσεις μετάδοσης και την καθυστέρηση, και ταυτόχρονα ενισχύει τη συμμόρφωση και τη βελτιστοποίηση ενέργειας στη θάλασσα (Sanikommu et al., 2025; Xylouris et al., 2024).

2.7.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα συστήματα Maritime Edge και Fog Computing χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της απόδοσης των πλοίων σε πραγματικό χρόνο, την αναγνώριση πλοίων από απομακρυσμένες εικόνες, την ανίχνευση περιβαλλοντικής ρύπανσης και την επιχειρησιακή ασφάλεια (Chen et al., 2025; Sanikommu et al., 2025). Οι συσκευές Edge επί του πλοίου επεξεργάζονται δεδομένα αισθητήρων σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου, την καταπόνηση του κύτους και τα ναυτικά σήματα τοπικά, επιτρέποντας την έγκαιρη πληροφόρηση για τα πληρώματα των πλοίων και τις ομάδες της ξηράς. Τα συστήματα ανίχνευσης πλοίων και λιμένων που βασίζονται σε μοντέλα Deep Learning είναι πολύ ακριβή και κλιμακώσιμα, παρέχοντας ένα αποτελεσματικό σύστημα θαλάσσιας επιτήρησης σε περιβάλλον περιορισμένων πόρων (Sanikommu et al., 2025).

2.7.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Οι ερευνητές έχουν διεξαγή έρευνα σχετικά με τη βελτίωση των πλαισίων ναυτιλιακής πληροφορικής. Αυτά τα πλαίσια βοηθούν στην κίνηση αντικειμένων, την εκμάθηση μηχανών και τις συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων με λιγότερη ισχύ στον ωκεανό (Xylouris, 2024; Ghoshal, 2024). Άλλες καλές ενδείξεις είναι τα συστήματα ομίχλης πολλαπλών περιοχών που εφαρμόζονται σε ολόκληρο τον ωκεανό, συνδέοντας την Τεχνητή Νοημοσύνη στα άκρα με αυτοματοποιημένα σκάφη και την άμεση ανάλυση του καιρού και των κανονισμών. Άλλα ζητήματα αφορούν την ασφάλεια, την κοινή χρήση δεδομένων και την παροχή πόρων Τεχνητής Νοημοσύνης σε πραγματικές ωκεάνιες επιχειρήσεις (Sanikommu, 2025; Farooq, 2022).

2.8 Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστερήσεις (DTN)

2.8.1 Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα Δίκτυα Ανεκτικής Καθυστερήσης (DTN) είναι απαραίτητα σε θαλάσσια περιβάλλοντα, καθώς παρέχουν έναν αξιόπιστο τρόπο παροχής δεδομένων σε περιόδους αργής ή διακοπόμενης επικοινωνίας. Υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις στον ωκεανό, κακές καιρικές συνθήκες και έλλειψη υποδομής επικοινωνίας, επομένως τα DTN είναι σημαντικά για να βοηθήσουν τα πλοία να κινούνται, σε συστήματα ασφαλείας και δίκτυα αισθητήρων, αντιμετωπίζοντας σύνθετα προβλήματα επικοινωνίας. (Lin et al., 2010; Koukis et al., 2024).

2.8.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η τεχνολογία DTN σχεδιάστηκε αρχικά για χρήση σε βαθιά πεδία του διαστήματος και σε απομονωμένα επίγεια δίκτυα, αλλά σήμερα είναι επίσης ζωτικής σημασίας στον τομέα των θαλάσσιων και υποβρύχιων επικοινωνιών. Στην περίπτωση των DTN, η παράδοση πακέτων πραγματοποιείται

χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση αποθήκευσης και προώθησης, όπου οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για την προσωρινή αποθήκευση (buffer) πακέτων μέχρι τη λήψη μιας χρησιμοποιήσιμης σύνδεσης επικοινωνίας. Τα τυπικά πρωτόκολλα δρομολόγησης DTN, δηλαδή τα Epidemic, MaxProp, PRoPHETv2, και οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε προβλέψεις, ελέγχονται για την αποτελεσματικότητά τους στην επικοινωνία δεδομένων από πλοίο σε πλοίο και από πλοίο σε ακτή σε μεγάλες αποστάσεις και σε αναξιόπιστες συνδέσεις (Lin et al., 2010; Koukis et al., 2024; Pohlchuck et al., 2024).

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 Ενδιάμ. 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 ελάχιστο ελάχιστο επεξεργαστική όπουσχή. παράδοση είναι κρίσιμη και η ισχύς/εύρος ζώνης είναι δευτερεύοντα.	Μεσαίο: Απαιτεί υπολογισμό μεταβατικών πιθανοτήτων Πορθμεία ή $(P_{ij}^{(k)})$ επιβατηγά πλοία με τακτικά, προβλέψιμα δρομολόγια και προγράμματα.	Υψηλό: Απαιτεί σύνθετο υπολογισμό κόστους διαδρομών Dijkstra και Ναυτικές, επιβεβαιωμένες εργασίες ή στόλοι με συντονισμένα αλγόριθμικά πρότυπα κίνησης.

2.8.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Το μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν αυτά τα DTN στη θάλασσα είναι οι βραχύβιες συνδέσεις και η χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης. Η θαλασσοταραχή έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια πακέτων, τον κατακερματισμό και τη συμφόρηση. Δεδομένου ότι υπάρχουν όρια στην ισχύ των πλοίων και των αισθητήρων, η δρομολόγηση DTN θα πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτική. Η αξιόπιστη μετάδοση μηνυμάτων και η επανασυναρμολόγηση κατακερματισμένων δεδομένων είναι η μεγάλη πρόκληση σε αυτό το περιβάλλον, η οποία πρέπει να λυθεί με καλύτερη διαχείριση buffer και προσαρμοστικούς αλγόριθμους (Lin et al., 2010; Pohlchuck et al., 2024; Falidouri, 2025).

2.8.4 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Η τεχνολογία που είναι διαθέσιμη στην τρέχουσα αγορά συνδυάζει εργαλεία προγνωστικής ανάλυσης δρομολόγησης, συστήματα επικοινωνίας δορυφόρου-εδάφους και συστήματα αντιστάθμισης καθυστέρησης που βασίζονται στη Μηχανική Μάθηση. Για την εξοικονόμηση ενέργειας, οι συσκευές IoT χαμηλής ισχύος φορτίζουν ευκαιριακά και χρησιμοποιούνται προγνωστικοί παράγοντες που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα για την υποστήριξη της λύσης. Τα σύγχρονα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν στρατηγικές εμπνευσμένες από τη συμπεριφορά και βιολογικά μοντέλα για να διατηρήσουν τη συνέχεια της επικοινωνίας σε περιόδους διακοπών υπηρεσίας και περιορισμένων πόρων σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Koukis et al., 2024; Falidouri, 2025; Lin et al., 2010).

2.8.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα ναυτιλιακά DTN χρησιμοποιούνται εκτενώς στην επικοινωνία μεταξύ πλοίων και πλοίων-ξηράς, σε υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων, στην παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και φορτίου, καθώς και σε επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης. Αυτά τα δίκτυα συνεχίζουν να λειτουργούν για την πλοήγηση, την παρακολούθηση καιρού, τον συντονισμό της εφοδιαστικής και την ανίχνευση ρύπανσης. Σε περίπτωση κανονικής βλάβης του δικτύου, τα DTN μπορούν να παρέχουν μια ισχυρή εφεδρική λύση για την αποστολή δεδομένων σε απομακρυσμένες ωκεάνιες περιοχές (Pohlchuck et al., 2024; DTN, 2022; Lin et al., 2010).

2.8.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Μελλοντικές ερευνητικές εργασίες θα επικεντρωθούν στη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης δεσμών, στη συγχώνευση πλαισίων DTN με τα ναυτιλιακά Ψηφιακά Δίδυμα, στην κλιμάκωση μεγεθών μπλοκ δεδομένων και στις αυτόνομες λειτουργίες που λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια. Υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη τυποποίησης των πρωτοκόλλων DTN στη ναυτιλιακή συνδεσιμότητα επόμενης γενιάς (Lin et al., 2010; Koukis et al., 2024; Falidouri, 2025).

2.9 Συμπεράσματα

Η ενότητα εξετάζει πώς τα δίκτυα θαλάσσιων επικοινωνιών έχουν μετατραπεί σε ψηφιακά συστήματα που υποστηρίζουν το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (MIoT). Δείχνει πώς η τεχνητή νοημοσύνη (AI) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλοία, ώστε να αποτρέπονται ατυχήματα και να παρακολουθούνται άλλες κρίσιμες λειτουργίες στη θάλασσα. Το κεφάλαιο αναφέρει ότι τα δορυφορικά καθώς και τα επίγεια συστήματα επικοινωνιών δεν αποτελούν μειονεκτήματα, καθώς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση του Ναυτιλιακού Διαδικτύου των Πραγμάτων. Το κεφάλαιο εντοπίζει τα νέα ζητήματα που προκύπτουν στο μέλλον, εντοπίζοντας τα ελαττώματα των συστημάτων επικοινωνιών και προτείνοντας τροποποιήσεις. Η κυκλοφορία του σχεδιασμού του δικτύου επικοινωνιών του Ναυτιλιακού Διαδικτύου των Πραγμάτων είναι σημαντική, καθώς θα βοηθήσει στον μετασχηματισμό της ναυτιλιακής βιομηχανίας σε ένα μηχανογραφημένο σύστημα.

2.9.1 Κύρια Συμπεράσματα

- Τα συστήματα ναυτιλιακών επικοινωνιών μεταβάλλονται από βασικά, μονοτεχνολογικά συστήματα σε προηγμένα, ενοποιημένα, αυτοματοποιημένα πλαίσια που αντιμετωπίζουν διάφορες δυσκολίες στην επικοινωνία με τους ωκεανούς, όπως σποραδικές συνδέσεις, αργές μεταφορές δεδομένων και δύσκολο περιβάλλον.
- Το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων λειτουργεί μέσω επτά βασικών στοιχείων που περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση SDN και NTN και πολλαπλές τεχνολογίες δικτύου, καθώς και πρωτόκολλα Cognitive Radio και Store-and-Forward, καθώς και Edge/Fog Computing και DTN, για να προσφέρουν πλήρη επικοινωνία με τους ωκεανούς αντί για ξεχωριστές τεχνολογικές λειτουργίες.
- Οι σύγχρονες ναυτιλιακές επιχειρήσεις χρειάζονται έξυπνα και ευέλικτα συστήματα, καθώς η διαχείριση νευρωνικών δικτύων σημαίων, η διαχείριση φάσματος αισθητήρων και η ευέλικτη εύρεση διαδρομής έχουν καταστεί απαραίτητες λειτουργίες.
- Το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων χρειάζεται τις ζωτικές του βάσεις στο Edge Computing μαζί με διασκορπισμένο πνευματικό δυναμικό που υποστηρίζει την άμεση επεξεργασία δεδομένων, τους μειωμένους χρόνους απόκρισης και την καλύτερη χρήση ενέργειας σε πλοία και πλατφόρμες.

2.9.2 Περιορισμοί και Ερευνητικά Κενά

Τρέχοντες Τεχνικοί Περιορισμοί

Τα μη επανδρωμένα πλοία και οι αισθητήρες στη θάλασσα δεν είναι εξοπλισμένοι με επαρκή ισχύ, επομένως, δεν μπορούν να αναπτυχθούν προηγμένα συστήματα επικοινωνία και υπολογιστών. Οι αναποτελεσματικοί διεθνείς ναυτιλιακοί νόμοι από πολλαπλές αρχές καθιστούν τα συστήματα μεταξύ πλοίων και τα συστήματα αυτά προβληματικά και η εγκατάστασή τους απαιτεί περισσότερο χρόνο. Δεν υπάρχει ομοιότητα στην ενσωμάτωση του IoT στη θάλασσα μεταξύ πλοίων και διεθνών αρχών.

Ερευνητικά Κενά που Εντοπίστηκαν

- Οι λύσεις που βασίζονται στο Touchstone, δηλαδή οι προτεινόμενες λύσεις μπορούν να εκτελεστούν σε δοκιμαστικές πλατφόρμες, αλλά η συμβατική δοκιμή τους σε μεγάλη ωκεάνια κλίμακα εξακολουθεί να είναι ανεπαρκής, εξ ου και το ερώτημα σχετικά με την επεκτασιμότητά τους.
- Υπάρχει έλλειψη αποτελεσματικών πλαισίων SDN για τη ναυτιλία με εξειδικευμένες δυνατότητες κυβερνοάμυνας των θαλάσσιων δικτύων IoT.
- Η έρευνα πρώτης γενιάς για το 6G στη ναυτιλία βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της σύλληψης και όχι της εφαρμογής, και η πλειονότητα των μελετών είναι φουτουριστικές στην ανάλυση και τον ορισμό περιπτώσεων χρήσης αντί να επικεντρώνονται στην εκτέλεση.

Εμπόδια Υλοποίησης

Ακριβά έξοδα εγκατάστασης των δορυφορικών και εναέριων συστημάτων επικοινωνιών, ιδίως μεταξύ μικρών ναυτιλιακών φορέων. Πολυπλοκότητα σύνδεσης παλαιών ναυτιλιακών συστημάτων με νέα συστήματα του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Μικρός αριθμός ειδικευμένων εργαζομένων για τη λειτουργία και την εργασία με προηγμένα συστήματα ναυτιλιακών επικοινωνιών.

2.9.3 Ερευνητικές Συνεισφορές

Το κεφάλαιο καθορίζει το πλαίσιο δικτύωσης που απαιτείται για το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) μέσω του πλαισίου επτά πυλώνων του, το οποίο συνθέτει την υπάρχουσα έρευνα για τις θαλάσσιες επικοινωνίες. Η ανάλυση δείχνει ότι η ενορχήστρωση SDN και η ενσωμάτωση NTN, τα ετερογενή δίκτυα και τα πρωτόκολλα γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας και αποθήκευσης και προώθησης, καθώς και η υπολογιστική άκρη και ομίχλη και το DTN επιλύουν συλλογικά προβλήματα θαλάσσιας συνδεσιμότητας. Το κεφάλαιο οργανώνει τα συστήματα ναυτιλιακών επικοινωνιών

σε ολοκληρωμένα οικοσυστήματα αντί να τα αντιμετωπίζει ως ξεχωριστές τεχνολογίες. Η ολιστική προσέγγιση ενοποιεί τα παραδοσιακά συστήματα ναυτιλιακών επικοινωνιών με τις νέες απαιτήσεις του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), παρέχοντας ένα πλαίσιο που συνδέει τα σχέδια δικτύων με τις επιχειρησιακές ναυτιλιακές δραστηριότητες. Η ανάλυση υποστηρίζει τα ακόλουθα κεφάλαια διατριβής δημιουργώντας το πλαίσιο επικοινωνίας που απαιτείται για την κατασκευή υλικού στο Κεφάλαιο 3 και την επεξεργασία δεδομένων στο Κεφάλαιο 6 και την ενσωμάτωση συστημάτων στο Κεφάλαιο 9. Τα στοιχεία δείχνουν ότι το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) πρέπει να αναπτύξει διάφορους τεχνολογικούς τομείς ταυτόχρονα αντί να αναβαθμίζει μεμονωμένα στοιχεία ξεχωριστά. Η ενότητα καταδεικνύει ότι τα δίκτυα ναυτιλιακών επικοινωνιών βιώνουν μια σημαντική καμπή και οι παραδοσιακές προσεγγίσεις αντικαθίστανται από έξυπνα, προσαρμόσιμα και ολοκληρωμένα συστήματα ικανά να υποστηρίξουν αυτόνομες και βασισμένες σε δεδομένα ναυτιλιακές επιχειρήσεις στο μέλλον.

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 - ταυτόχρονα - Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνδέσεων βυθού και τρισδιάστατων υποβρύχιων δικτύων (3.1), τα συστήματα ακουστικής επικοινωνίας χρησιμοποιούνται για αξιόπιστη υποβρύχια μεταφορά δεδομένων σε αντίξοες θαλάσσιες συνθήκες (3.2), τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα ενσωματώνονται σε κινητή υποβρύχια ανίχνευση και προσαρμοστική εξερεύνηση (3.3), τα μη επανδρωμένα επιφανειακά οχήματα δικτυώνονται σε κόμβους επιφανειακής επικοινωνίας και διατομεακό συντονισμό (3.4) και συλλέγονται ωκεανογραφικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιείται αισθητήρας ανθεκτικός στη βιορρύπανση.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να καταδείξει την αποτελεσματικότητα της παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος μέσω διαφορετικών τεχνολογιών ανίχνευσης. Επίσης, θέτει ερευνητικά ερωτήματα που επικεντρώνονται στην αξιοπιστία των δικτύων, την αποδοτικότητα της χρήσης ενέργειας, τη συμβατότητα των συστημάτων και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της ανάπτυξης (Zahra et al. 2025; Ananthi et al. 2024; Mariani et al., 2021). Οι ενότητες 3.1 έως 3.6 ξεκινούν με απλές υποβρύχιες συνδέσεις και συστήματα ηχητικής επικοινωνίας, οι οποίες αναπτύσσονται περαιτέρω στον αυτοματοποιημένο συντονισμό οχημάτων και στα επιφανειακά δίκτυα και, τέλος, σε εξελιγμένα συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης και βιώσιμες μακροπρόθεσμες λύσεις. Αυτές οι ενότητες θέτουν τις βάσεις πάνω στις οποίες τα μοντέλα κυβερνοασφάλειας και οι αναλυτικές πλατφόρμες που συζητούνται στα επόμενα κεφάλαια θα έχουν μια ισχυρή βάση πάνω στην οποία θα βασιστούν (Muhammad et al., 2025; Patterson et al., 2025; Sahoo et al., 2025).

Οι ενότητες του παρόντος κεφαλαίου συνδυάζονται για να εξετάσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με την υποβρύχια και επιφανειακή ανίχνευση υπό το πρίσμα της σύγχρονης τεχνολογίας και των πρακτικών εφαρμογών. Μέσω αυτής της ολοκληρωμένης ανάλυσης, διαμορφώνεται μια ενιαία γνωσιακή βάση που καταδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο τα συνδυασμένα συστήματα θαλάσσιας ανίχνευσης παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων στις σύγχρονες ωκεάνιες επιχειρήσεις και την περιβαλλοντικά υπεύθυνη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων (SCOR, 2024; Kang et al., 2024; Prakash & Zielinski, 2025).

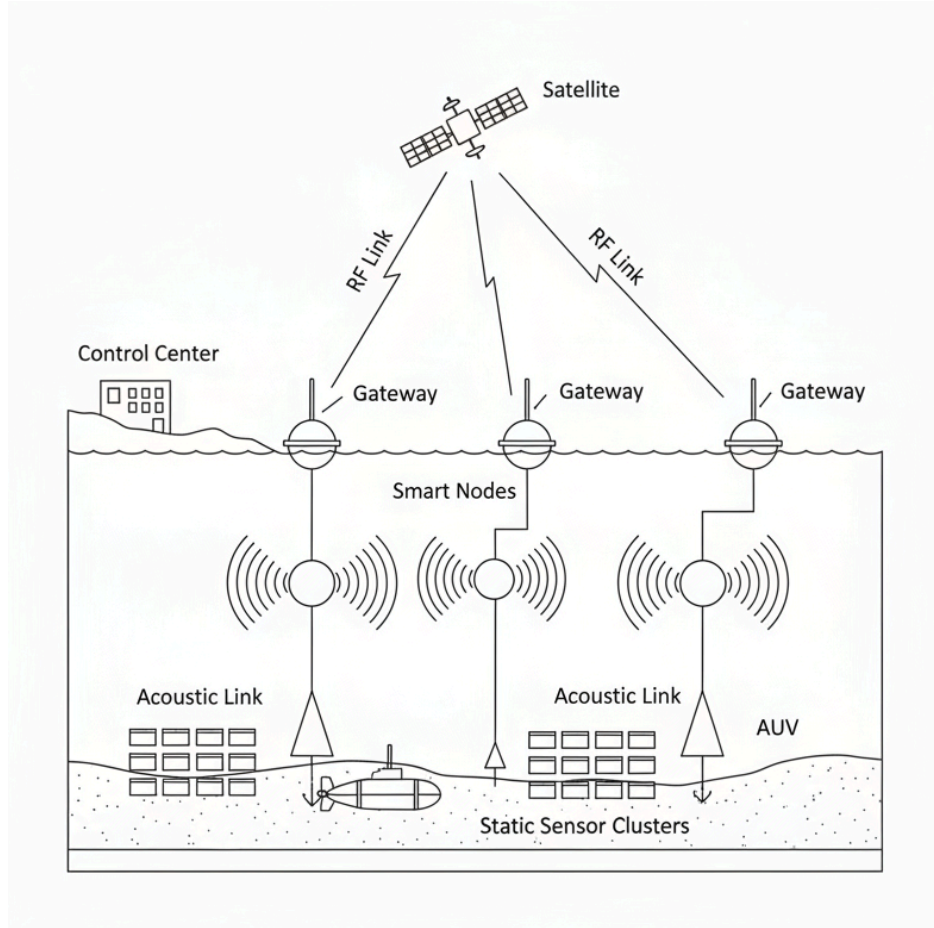
3.2 Υποβρύχια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (UWSN)

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. Είναι όλο και πιο απαραίτητα για να βοηθήσουν στην ωκεανογραφική έρευνα, την ανακάλυψη θαλάσσιων πόρων, την πρόβλεψη καταστροφών και τη διαχείριση του περιβάλλοντος - κρίσιμους παράγοντες που συμβάλλουν στον ψηφιακό μετασχηματισμό των ωκεάνιων βιομηχανιών (Muhammad et al., 2025; Zahra et al., 2025).

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. Τα τρέχοντα UWSN χρησιμοποιούν πολλαπλούς αισθητήρες που επιτρέπουν τις λειτουργίες του Διαδικτύου των Υποβρύχιων Πραγμάτων (IoUT) μέσω συστημάτων ελέγχου δικτύου που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη και έξυπνων διαδικασιών συλλογής δεδομένων (Muhammad et al., 2025). Οι κύριες εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν τον έλεγχο των θέσεων των κόμβων, αξιόπιστα τρισδιάστατα συστήματα υποβρύχιας επικοινωνίας και μεθόδους δικτύωσης εξοικονόμησης ενέργειας (Zahra et al., 2025; Khan et al., 2024).



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 ωκεανού.

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. Ωστόσο, τα ακουστικά κύματα παρουσιάζουν εγγενείς περιορισμούς, όπως η χαμηλή ένταση σήματος σε πολλά περιβάλλοντα, καθώς και φαινόμενα πολλαπλών ανακλάσεων (ηχώ), διακυμάνσεις ισχύος σήματος και δυσκολίες συγχρονισμού, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων (Muhammad et al., 2025). Η διάρκεια ζωής του δικτύου περιορίζεται σημαντικά από τους ενεργειακούς πόρους, καθώς οι κόμβοι λειτουργούν με μπαταρίες που δύσκολα επαναφορτίζονται μετά την εγκατάστασή τους. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός συστημάτων με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και μέγιστη λειτουργική διάρκεια παραμένει κεντρική πρόκληση (Khan et al., 2024). Επιπλέον, η κίνηση του νερού προκαλεί συνεχείς αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, δημιουργώντας προκλήσεις στον εντοπισμό κόμβων, τον συγχρονισμό και τη διατήρηση σταθερών συνδέσεων (Muhammad et al., 2025).

Επιπρόσθετες προκλήσεις περιλαμβάνουν το υψηλό υπολογιστικό κόστος, την περιορισμένη ορατότητα μεταξύ κόμβων, τις συχνές βλάβες εξοπλισμού και τα ζητήματα ασφαλείας, όπως οι κυβερνοεπιθέσεις και οι παραβιάσεις δεδομένων. Οι απειλές αυτές ενισχύονται στις απομακρυσμένες υποβρύχιες εγκαταστάσεις και σε εχθρικά περιβάλλοντα λειτουργίας, καθιστώντας απαραίτητη την υιοθέτηση ολοκληρωμένων λύσεων εμπιστευτικότητας, ελέγχου ταυτότητας και ακεραιότητας δεδομένων (Zahra et al., 2025).

3.2.3 Μέθοδοι Έρευνας και Τρέχουσες Τεχνολογίες

Η σύγχρονη χρήση του UWSN περιλαμβάνει ρυθμιζόμενες μεθόδους επικοινωνίας ήχου για την ασφαλή μεταφορά δεδομένων. Οι τρέχουσες μέθοδοι βασίζονται σε μια οικονομικά αποδοτική δρομολόγηση που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας παράλληλα ένα αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας δεδομένων (Khan et al., 2024). Η μηχανική μάθηση και η βαθιά ενισχυτική μάθηση χρησιμοποιούνται στον έξυπνο σχεδιασμό συνδέσμων, την κατανομή ισχύος και την ελεγχόμενη διαχείριση τοπολογίας, οι οποίες είναι σε θέση να ανταποκριθούν στην μετατόπιση της κατάστασης του κόμβου ή στην μεταβολή της πυκνότητας του δικτύου (Muhammad et al., 2025).

- Κινητικότητα βυθομέτρου και εφαρμογή κινητών αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων (AUV) για την επίτευξη καλύτερης κάλυψης και ευρωστίας (Zhu et al., 2024).
- Κρυπτογραφία τελευταίας τεχνολογίας, πρωτόκολλα ασφαλούς δρομολόγησης και ευέλικτα μοντέλα διαχείρισης εμπιστοσύνης σχεδιασμένα για το υποβρύχιο περιβάλλον, προστατεύοντας από τις αναδυόμενες κυβερνοαπειλές (Zahra et al., 2025).

3.2.4 Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης

Τα UWSN χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά στις ακόλουθες εφαρμογές:

- Παρακολούθηση θαλάσσιου περιβάλλοντος: Επιτρέπει τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση και ανίχνευση ρύπανσης στη θάλασσα, τις λίμνες και τα ποτάμια (Muhammad et al., 2025).
- Πρόληψη κινδύνων: Επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο τσουνάμι και σεισμών χρησιμοποιώντας υποθαλάσσιους αισθητήρες (Zahra et al., 2025).
- Εξερεύνηση πόρων: Βοήθεια στην υποβρύχια εξόρυξη, αναζήτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου με τη συλλογή δεδομένων συνεχώς (Khan et al., 2024).
- Ιχθυοκαλλιέργεια: Παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και της υγείας των ψαριών για τη βελτίωση της παραγωγής και τη μείωση της σπατάλης πόρων (Muhammad et al., 2025).
- Παρακολούθηση αγωγών και υποβρύχιων καλωδίων με έξυπνους αισθητήρες.
- Η θαλάσσια ασφάλεια εφαρμόζεται στον έλεγχο των συνόρων, στην ανίχνευση ναρκών και στην επιτήρηση πλοίων ή θαλάσσιων ζώων (Zahra et al., 2025).

3.2.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Πιθανές κατευθύνσεις μελέτης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Οι επιστήμονες καλούνται να αναπτύξουν υποβρύχιο εξοπλισμό που καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια και είναι σε θέση να συλλέγει ενέργεια από μόνος του, συνεχίζοντας έτσι να λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Οι επιστήμονες θα βελτιώσουν επίσης την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης των υποβρύχιων κόμβων και του συντονισμού τους σε τρισδιάστατα ταχέως μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, όπως οι κινητοί κόμβοι.
- Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη, πρέπει να αναπτυχθούν ασφαλή, ευέλικτα πρωτόκολλα, τα οποία είναι ικανά να αντιμετωπίζουν νέες επιθέσεις και επιχειρήσεις σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από τροποποιήσεις των κόμβων και διακυμάνσεις του περιβάλλοντος.

- Το σύστημα περιλαμβάνει εξελιγμένη Τεχνητή Νοημοσύνη, πολυεπίπεδα μέτρα ασφαλείας και τυποποιημένη υποδομή για τη διευκόλυνση των πραγματικών δοκιμών και της ανάπτυξης σε μεγάλη κλίμακα (Khan et al., 2024).

3.3 Συστήματα Ακουστικής Επικοινωνίας

Η ακουστική επικοινωνία αποτελεί την πλέον αποτελεσματική μέθοδο επικοινωνίας στα θαλάσσια συστήματα IoT. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν ταχύτατα στο νερό, τα ηχητικά κύματα αποτελούν το κύριο μέσο υποβρύχιας μετάδοσης δεδομένων. Τα ακουστικά σήματα υποστηρίζουν θεμελιώδεις θαλάσσιες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων της ανίχνευσης, της πλοήγησης, της παρακολούθησης και της ανάπτυξης τεχνολογιών νέας γενιάς για τους ωκεανούς. Η χρήση ακουστικής επικοινωνίας στον ωκεανό έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα επωφελής για την ασφάλεια των λειτουργιών, την προστασία του περιβάλλοντος και την επιστημονική έρευνα, καθώς η ζήτηση για δεδομένα ωκεανών συνεχίζει να αυξάνεται (Xylouris et al., 2024; SCOR, 2024).

3.3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η ακουστική μετάδοση αναπτύχθηκε για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της επικοινωνίας μέσω ραδιοκυμάτων και φωτός στο υποβρύχιο περιβάλλον. Τα ηχητικά κύματα κινούνται με περίπου 1.500 μέτρα ανά δευτερόλεπτο και έχουν χρησιμοποιηθεί σε βασικά συστήματα σόναρ, τα οποία έχουν εξελιχθεί σε προηγμένες εφαρμογές δικτύων αισθητήρων. Η συνεργασία μεταξύ της ερευνητικής κοινότητας και των ναυτικών μηχανικών στον τομέα της υποβρύχιας ακουστικής οδήγησε σε σημαντικές εξελίξεις στις αξιόπιστες τεχνικές συλλογής δεδομένων. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι οι τεχνικές μηχανικής μάθησης μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης ακουστικών σημάτων και της μείωσης του θορύβου σε πραγματικά περιβάλλοντα, βελτιώνοντας έτσι την παρακολούθηση (Panteli et al., 2025; Lyu et al., 2024).

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 (Υψηλή Λανθάνουσα Καθυστέρηση)	2.25×10^8 m/s (Χαμηλή Λανθάνουσα Καθυστέρηση)	2.25×10^8 m/s (Χαμηλή Λανθάνουσα Καθυστέρηση)
Βασικές Προκλήσεις	Πολυδιαδρομική Διάδοση, Διασπορά Doppler, Χαμηλό Εύρος Ζώνης	Θολερότητα, Σκέδαση, Απαιτήση Οπτικής Επαφής (LOS)	Υψηλή Εξασθένηση, Απώλειες Αγωγιμότητας
Ενεργειακή Απόδοση	Χαμηλή (Υψηλή ισχύς ανά bit)	Υψηλή (Χαμηλή ισχύς ανά bit)	Μέτρια

3.3.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Η υποβρύχια επικοινωνία επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Τα ακουστικά σήματα επηρεάζονται αρνητικά από τη διακύμανση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της πίεσης του νερού. Οι παρεμβολές και η απώλεια δεδομένων οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση. Η καθαρότητα του σήματος μειώνεται περαιτέρω λόγω του θαλάσσιου θορύβου που παράγεται από τα ζώα, τα πλοία και τον καιρό. Τα ταχύτερα ακουστικά σήματα διαχέουν περισσότερη ενέργεια, επομένως οι μηχανικοί χρειάζονται μια αντιστάθμιση μεταξύ του ρυθμού δεδομένων και της εμβέλειας. Τα πιο πρόσφατα ακουστικά πρότυπα για το uIoT στοχεύουν στη μείωση του θορύβου που επηρεάζει αρνητικά τη θαλάσσια ζωή. Τέλος, οι αισθητήρες υψηλής πυκνότητας με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους αποτελούν επιπλέον ζήτημα προς αντιμετώπιση (SCOR, 2024; Xylouris et al., 2024).

3.3.3 Υπάρχουσες τεχνολογίες και μεθοδολογικές προσεγγίσεις

Οι προκλήσεις μετάδοσης ήχου έχουν αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά από συστήματα ακουστικών δικτύων, τα οποία πλέον χρησιμοποιούν προσαρμοστικούς αλγόριθμους ως βασικές λειτουργικές μεθόδους. Το σύστημα μειώνει την υποβάθμιση του σήματος και επεκτείνει την εμβέλεια επικοινωνίας μέσω στρατηγικής τοποθέτησης μόντεμ και κόμβων αισθητήρων που βασίζονται σε περιβαλλοντικά μοντέλα. Οι Lyu et al. (2024) και άλλες πηγές δείχνουν ότι τα συστήματα ανίχνευσης και αφαίρεσης θορύβου με βάση τη μηχανική μάθηση έχουν γίνει τυπικές πρακτικές στην ανίχνευση σήματος, ειδικά όταν πρόκειται για δεδομένα με θόρυβο. Σύμφωνα με τους Xylouris et al. (2024) και Ali et al. (2024), η ανθεκτικότητα και η λειτουργική διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων ενισχύονται μέσω της ενσωμάτωσης ενεργειακά αποδοτικών μεθόδων δρομολόγησης και κινητών κόμβων sink. Ο τομέας των λειτουργιών αισθητήρων έχει βιώσει μια αναπτυσσόμενη αγορά ακουστικών αισθητήρων σε

συνδυασμό με αναδυόμενα πρότυπα που διευκολύνουν τα συστήματα θαλάσσιας παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (Research and Markets 2024; SCOR, 2024).

3.3.4 Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης

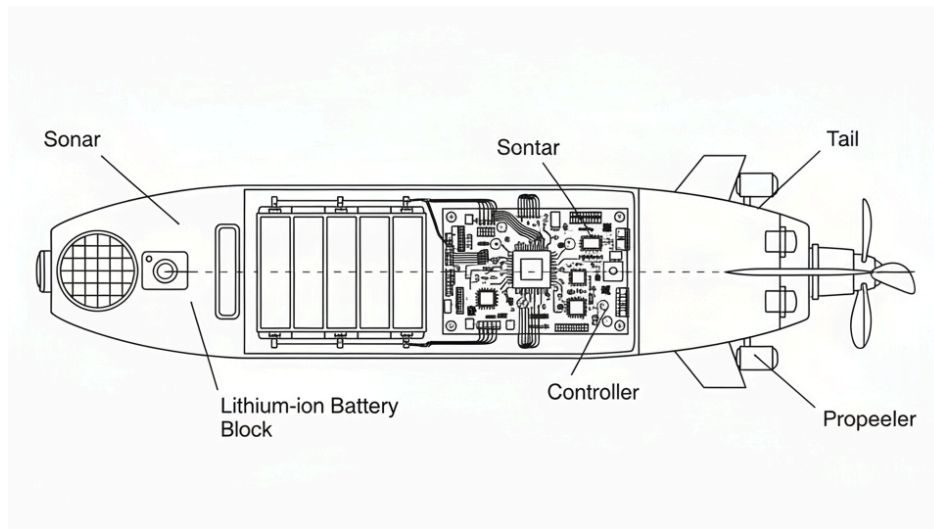
Τα ακουστικά δίκτυα χρησιμεύουν για την παρακολούθηση της βιοποικιλότητας και την παροχή ειδοποιήσεων για καταστροφές και την επιτήρηση των υποδομών, καθώς και της λειτουργίας των οχημάτων. Τα ακουστικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία οχημάτων, την παρακολούθηση υφάλων, την παρακολούθηση φαλαινών και τον έλεγχο των AUV και ROV, καθώς και για τη συλλογή δεδομένων σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα ConeSLP και RLOR είναι δύο από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αποδεικνύονται ισχυρότερα σε αξιοπιστία και ενεργειακή απόδοση, ειδικά με δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας. Υπάρχει μια άνηση στη βιομηχανία ακουστικών μόντεμ και οι επιχειρήσεις λανσάρουν νέα προϊόντα υποβρύχιας επικοινωνίας με επικοινωνία στην ακτή.

3.3.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Αυτή τη στιγμή, οι επιστήμονες προσπαθούν να αυξήσουν τον ρυθμό και την εμβέλεια των υποβρύχιων δεδομένων και να διασφαλίσουν ότι τα συστήματα είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Καλύτερη μείωση θορύβου και αναγνώριση σήματος ερευνώνται χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση. Τα πρότυπα στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ζημίας από τον θόρυβο του μόντεμ, δηλαδή των επιπτώσεων στα θαλάσσια θηλαστικά και τους δύτες. Νέοι τομείς έρευνας περιλαμβάνουν την υβριδική δρομολόγηση, την βελτιωμένη αναγνώριση προτύπων και τον συνδυασμό ψηφιακών διδύμων αρχιτεκτονικών. Οι ερευνητές επιχειρούν να μελετήσουν τον μη Γκαουσιανό θόρυβο και να βελτιώσουν την ανθεκτικότητα των δικτύων αισθητήρων υπό τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του ωκεανού (Lyu et al., 2024; Panteli et al., 2025; SCOR, 2024).

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 ωκεανών, της διαχείρισης των πόρων και της αντίδρασης σε καταστροφές. Αυτά τα κινητά ρομπότ συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και εξερευνούν με ευέλικτο τρόπο, όπου τα τυπικά πλοία και οι αισθητήρες δεν μπορούν να φτάσουν. Εκτελούν καθήκοντα όπως η εξερεύνηση οικοσυστημάτων, η επιτήρηση υποδομών και οι γρήγορες περιβαλλοντικές έρευνες που επιτρέπουν στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να συμπληρώνουν κενά πληροφοριών για τη διατήρηση της βιωσιμότητας (Di Ciaccio & Taylor, 2021).



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.

3.4.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η τεχνολογία AUV αναπτύσσεται πλέον χάρη στην τεχνητή νοημοσύνη (AI), τους μικρούς αισθητήρες, την υπολογιστική ακμή και την ευφυΐα σμήνους. Τα προηγούμενα μοντέλα βασίζονταν σε προγραμματισμένες αποστολές, αλλά οι σύγχρονες πλατφόρμες είναι ικανές για συντονισμένο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο από το IoT και τα προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου. Η νοημοσύνη κολύμβησης έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε ένας αριθμός οχημάτων να μπορεί να συνεργάζεται στη διαχείριση αποκεντρωμένων αλγορίθμων προκειμένου να επιτευχθούν κοινοί στόχοι (Ananthi et al., 2024).

3.4.2 Τεχνικές Προκλήσεις

Η ενσωμάτωση των AUV συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις:

- **Περιορισμοί επικοινωνίας:** Τα ακουστικά κανάλια χαρακτηρίζονται από χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και ευαισθησία στον θόρυβο, δυσχεραίνοντας την αξιόπιστη επικοινωνία (Whitt et al., 2020).
- **Ενεργειακή διαχείριση:** Οι περιορισμοί της τεχνολογίας μπαταριών θέτουν όρια στη διάρκεια των αποστολών, καθιστώντας απαραίτητη την αποδοτική διαχείριση ενέργειας (Verma et al., 2021).
- **Περιβαλλοντική πολυπλοκότητα:** Οι διακυμάνσεις των ωκεάνιων ρευμάτων και η αβεβαιότητα θέσης απαιτούν εύρωστα και έξυπνα συστήματα ελέγχου (Ananthi et al., 2024).
- **Ασφάλεια και κλιμακωσιμότητα δικτύου:** Οι σύνθετες αποστολές απαιτούν συνεργασία πολλών AUV με ασφαλή ανταλλαγή πληροφοριών, γεγονός που δυσχεραίνεται από τους περιορισμούς ισχύος και φορτίου των οχημάτων (Ullah et al., 2024).

3.4.3 Υπάρχουσες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Η υπολογιστική ακμή (edge computing) επιτρέπει στους ενσωματωμένους επεξεργαστές να προσαρμόζουν ταχύτερα τη λειτουργία και να φιλτράρουν τα δεδομένα αισθητήρων τοπικά. Ο έλεγχος που βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιεί ενισχυτική μάθηση και βαθιά νευρωνικά δίκτυα για την προώθηση ευέλικτης πλοήγησης και ελέγχου ενέργειας (Ananthi et al., 2024). Η συνεργασία των AUV παρέχεται από αποκεντρωμένους αλγόριθμους (συντονισμός σμήνους) σε περίπλοκες εργασίες (Ullah et al., 2024). Τα υβριδικά πρωτόκολλα επικοινωνίας που βασίζονται σε

ακουστικές και οπτικές τεχνικές έχουν βελτιωθεί για να επιτρέπουν πιο αποτελεσματική ανταλλαγή πληροφοριών και απόκριση συστήματος (Whitt et al., 2020).

- Στρατηγικές που λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια: Η τεχνητή νοημοσύνη ενισχύει την εμβέλεια λειτουργίας με βέλτιστη χρήση της μπαταρίας και έμφαση στην ανίχνευση σε ζωτικές τοποθεσίες (Verma et al., 2021).

3.4.4 Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης

Τα AUV εφαρμόζονται στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και την επιθεώρηση υποδομών και στην αντιμετώπιση καταστροφών, και συνεργάζονται με μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας. Χρησιμοποιούνται για τη συνεχή παρακολούθηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Βοηθούν σε ελέγχους ασφαλείας, μπορούν να χαρτογραφούν γρήγορα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και συνεργάζονται με USV για καλύτερη πλοήγηση και συλλογή δεδομένων (Di Ciaccio & Troisi, 2021; Ullah et al., 2024).

3.4.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Αυτή τη στιγμή διερευνάστε λύσεις υβριδικής ενέργειας, ανώτερη υποβρύχια επικοινωνία, πιο έξυπνη πλοήγηση με τεχνητή νοημοσύνη και στενότερη ομαδική εργασία σε διάφορους κλάδους για την επίλυση ζητημάτων αξιοπιστίας, ενέργειας και ασφάλειας της αποστολής (Verma et al., 2021; Ananthi et al., 2024).

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. Η δικτύωση των USV συμβάλλει στην ενίσχυση της παρακολούθησης των ωκεανών, στην ενίσχυση της ασφάλειας και στην ενίσχυση της ομαδικής εργασίας στην έρευνα, τη βιομηχανία και την ασφάλεια (Patterson et al., 2025).

3.5.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τα USV έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Τα σύγχρονα USV μπορούν να πλοηγηθούν, να κατανοήσουν το περιβάλλον τους και να συνεργαστούν με βάση την τεχνητή νοημοσύνη και τους προηγμένους αισθητήρες, ενώ τα πρώτα ήταν ως επί το πλείστον τηλεχειριζόμενα. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς τομείς: αισθητήρες, αλγόριθμους λήψης αποφάσεων και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο για συντονισμό. Οι ωκεανογραφικές έρευνες διεξάγονται συνήθως με τη χρήση USV, χρησιμοποιούνται επίσης στην έρευνα του κλίματος και για να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ υποβρύχιων και εναέριων συστημάτων (Wu et al., 2022; Patterson et al., 2025).

3.5.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Η δικτύωση των USV αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Το ωκεάνιο περιβάλλον αλλάζει συνεχώς, γεγονός που επηρεάζει τους αισθητήρες και τα ασύρματα σήματα. Η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων μπορεί να είναι αργή ή αναξιόπιστη, ειδικά όταν γίνεται προσπάθεια σύνδεσης επιφανειακών, υποβρύχιων και εναέριων συστημάτων. Είναι επίσης απαραίτητο για τα USV να αποφεύγουν τις συγκρούσεις και να συνεργάζονται καλά χρησιμοποιώντας κανόνες όπως ο COLREGS (Διεθνής Κανονισμός για την Αποφυγή Συγκρούσεων στη Θάλασσα), αλλά τα τρέχοντα πρωτόκολλα μερικές φορές δεν διαθέτουν συγκεκριμένα πρότυπα για τον συντονισμό των ομάδων (Wu et al., 2022; Kang et al., 2024).

3.5.3 Υπάρχουσες τεχνολογίες και μεθοδολογικές προσεγγίσεις

Τα τρέχοντα δίκτυα των USV βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη και τον αποκεντρωμένο έλεγχο και τη σύντηξη αισθητήρων για την εκτέλεση μιας σειράς εργασιών, όπως ο σχεδιασμός διαδρομής και η αποφυγή εμποδίων, καθώς και η ομαδική εργασία. Η υποβρύχια επικοινωνία συνήθως βασίζεται σε ηχητικά κύματα, ενώ τα σήματα στην επιφάνεια ή στον αέρα βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες για τη σύνδεση κόμβων. Τα USV είναι σε θέση να συνδέουν διαφορετικούς τομείς με αναδυόμενα πρωτόκολλα που βασίζονται στην χρονική διαίρεση και την CSMA/CA σύμφωνα με το πρότυπο JANUS, το οποίο επιτρέπει την κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ υποβρύχιων, επιφανειακών και εναέριων οχημάτων (Mohsan et al., 2023; Kang et al., 2024). Για την επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, τα USV συνήθως ενσωματώνουν πολλαπλούς αισθητήρες, όπως ραντάρ και κάμερες, σόναρ και lidar, με τεχνικές που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη (Wu et al., 2022). Τα πλαίσια leader-follower επιτρέπουν την κοινή πλοήγηση και τον σχηματισμό ομάδων, ενώ οι ελεγκτές που βασίζονται στη συναίνεση και τα ενσωματωμένα μοντέλα συμπεριφοράς επιτρέπουν στους στόλους να λειτουργούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα (Kang et al., 2024).

3.5.4 Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης

Τα αυτόνομα οχήματα χρησιμοποιούνται για την απόκτηση πληροφοριών για τους ωκεανούς, με σκοπό την αξιοποίηση της επιστήμης των ωκεανών και την παρακολούθηση των κλιματικών αλλαγών, καθώς και της ρύπανσης.

- Πολλαπλά USV, όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, μπορούν να καλύψουν την τεράστια περιοχή, να περικυκλώσουν αντικείμενα και να εκτελέσουν επιχειρήσεις διάσωσης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.
- Τα USV χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση υποβρύχιων δικτύων με εναέριους και απομακρυσμένους σταθμούς, καθιστώντας έτσι τα δεδομένα προσβάσιμα σε επιστήμονες και χειριστές.
- Τα ανθεκτικά USV μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ταραγμένα νερά και δύσκολες καιρικές συνθήκες (Patterson et al., 2025).

3.5.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Τα δίκτυα USV στο μέλλον απαιτούν αποτελεσματικά μοντέλα κίνησης, έξυπνη τεχνητή νοημοσύνη για την ανάλυση δεδομένων και βελτιωμένα εργαλεία λήψης αποφάσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό οποιεσδήποτε συνθήκες στον ωκεανό. Απαιτούνται τυποποιημένα πρωτόκολλα ομάδας, βελτιωμένη διαλειτουργικότητα και βελτιωμένη κυβερνοασφάλεια. Οι ερευνητές πρέπει να ενσωματώσουν την πλοήγηση, την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο και την επικοινωνία σε απλά και εξαιρετικά αξιόπιστα συστήματα του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων σε μεγάλη κλίμακα (Wu et al., 2022; Patterson et al., 2025).

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. Μπορούν να μετρούν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο συνεχώς, γεγονός που μπορεί να δώσει έγκαιρη προειδοποίηση σχετικά με την κλιματική αλλαγή, τη ρύπανση μιας περιοχής και τις αλλαγές στους πόρους στη θάλασσα. Οι εξελίξεις στους τομείς του IoT, της τεχνητής νοημοσύνης και της τεχνολογίας αισθητήρων έχουν βελτιώσει την ταχύτητα και την ακρίβεια των συστημάτων στην παροχή περιβαλλοντικών δεδομένων, τα οποία βοηθούν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, τους ερευνητές και το ευρύ κοινό στη βελτιωμένη προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Xu et al., 2019; Zhang et al., 2025).

3.6.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο παρελθόν, οι επιστήμονες χρησιμοποιούσαν πλοία και ανθρώπινα δείγματα για να αναλύσουν τον ωκεανό, κάτι που περιόριζε τη γεωγραφική περιοχή και το χρονικό πλαίσιο των δεδομένων τους. Η ενσωμάτωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και των δικτύων αισθητήρων έχει βελτιώσει σημαντικά τη συλλογή θαλάσσιων δεδομένων. Οι παράμετροι μετρώνται από έξυπνους σηματοδότες, Αυτόματα Υποβρύχια Οχήματα (AUV) και συστοιχίες αισθητήρων, οι οποίες περιλαμβάνουν δείκτες όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα, το pH, η θολότητα, το διαλυμένο οξυγόνο και τα ηχητικά σήματα των θαλάσσιων ζώων. Τα τρέχοντα συστήματα ηλεκτρονικής ναυτιλίας (E-Marines) χρησιμοποιούσαν πλατφόρμες που βασίζονται στο cloud για να χειρίζονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων και να αναπτύσσουν τεχνητή νοημοσύνη στην αυτόματη ανάλυση, καθώς και για να παρέχουν γρήγορη απόκριση σε περιβαλλοντικά ζητήματα όπως οι πετρελαιοκηλίδες και οι επιβλαβείς ανθίσσεις φυκιών (Xu et al., 2019; Tett et al., 2020).

3.6.3 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Η ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος αντιμετωπίζει συνήθως διάφορες τεχνικές προκλήσεις τόσο στον σχεδιασμό και τη συντήρηση όσο και στη λειτουργία. Τα ρεύματα και η διάβρωση, καθώς και η βιο-ρύπανση και η ιζηματογένεση συνεχίζουν να δημιουργούν προβλήματα που απαιτούν ανθεκτικούς και ευέλικτους αισθητήρες (Wang et al., 2024). Τα ηλιακά πάνελ, η ενέργεια από τα κύματα και οι νέοι τύποι μπαταριών διατηρούν τους αισθητήρες σε λειτουργία, ωστόσο η διαχείριση ισχύος για μεγάλα χρονικά διαστήματα παραμένει πρόκληση (Xu et al., 2019).

- Επικοινωνία πληροφοριών: Τα ασύρματα δίκτυα, π.χ. LoRa, ZigBee, Satellite, ενδέχεται να παρουσιάσουν διακοπές λειτουργίας λόγω των καιρικών συνθηκών και της κίνησης των ωκεανών (Tett et al., 2020).
- Ποιότητα δεδομένων και κυβερνοασφάλεια: Η ακεραιότητα των δεδομένων και η πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο εξακολουθούν να διερευνώνται από ερευνητές που καταπολεμούν τις κυβερνοεπιθέσεις (Zhang et al., 2025).
- Βιολογική ρύπανση και συντήρηση: Οι αισθητήρες και οι αγκυροβόλια σχεδιάζονται για την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης και της διακοπή εργασιών, αλλά το κόστος λειτουργίας και ο χρόνος συντήρησης εξακολουθούν να αποτελούν πρόβλημα.

3.6.4 Υπάρχουσες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Τα υπάρχοντα δίκτυα παρατήρησης των ωκεανών διαθέτουν αισθητήρες πραγματικού χρόνου εγκατεστημένους σε ένα συγκεκριμένο μοτίβο συστοιχιών και αυτόνομες λειτουργίες πλατφορμών.

- Πλωτήρες αισθητήρων με αισθητήρες CTD, φθοριόμετρα, υδρόφωνα, αισθητήρες θολότητας και ανιχνευτές ακουστικών ρευμάτων Doppler χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ποιότητας του νερού και της συμπεριφοράς της θαλάσσιας ζωής (Xu et al., 2019).
- Τα δεδομένα για τους ρύπους, τους κοραλλιογενείς υφάλους και τα ιχθυαποθέματα συλλέγονται με τη χρήση υποβρύχιων drones που διαθέτουν χημικούς και βιολογικούς αισθητήρες (Apprill et al., 2023).

Το σύστημα διαθέτει αναλυτικά στοιχεία βασισμένα στην Τεχνητή Νοημοσύνη που προβλέπουν τις περιπτώσεις ρύπανσης και παρακολουθούν την υγεία του οικοσυστήματος, και τα συστήματα είναι ικανά να ανιχνεύουν πλαστικά υπολείμματα με βάση την όραση υπολογιστή και να προβλέπουν τις επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων (Zhang et al., 2025). Ορισμένες από τις μελέτες περιπτώσεων, όπως το Δίκτυο Ποιότητας Νερού του Μεγάλου Κοραλλιογενούς Υφάλου και τα έργα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (SMARTPOL και CLARION), χρησιμοποιούν δίκτυα πολλαπλών αισθητήρων, πληροφορίες τηλεπισκόπησης και Τεχνητή Νοημοσύνη σε συνδυασμό για την παρακο-

λούθηση ρύπων και αλλαγών στο οικοσύστημα σε πραγματικό χρόνο (Victor et al., 2024; Tett et al., 2020).

3.6.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα συστήματα παρακολούθησης περιβάλλοντος (EMS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον πραγματικό κόσμο με διάφορους τρόπους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κοραλλιογενείς υφάλους και ιχθυοτροφεία και παράκτιους οικοτόπους για την παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής (Apprill et al., 2023). Είναι σε θέση να εντοπίζουν πετρελαιοκηλίδες και να παρακολουθούν σημεία ρύπανσης μέσω αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και δορυφορικών εικόνων (Victor et al., 2024). Έχουν την ικανότητα να προβλέπουν καταστροφές και να προειδοποιούν το κοινό για τσουνάμι, τυφώνες και άνθιση τοξικών φυκιών (Zhang et al., 2025). Διαθέτουν επίσης μια εφαρμογή για κινητά που επιτρέπει στους πολίτες επιστήμονες να αναφέρουν τι βλέπουν και μια πλατφόρμα cloud για την εκτέλεση της ανάλυσης των δεδομένων (Xu et al., 2019).

- Επίβλεψη προστατευόμενων περιοχών, αλιείας και λιμενικών δραστηριοτήτων χρησιμοποιώντας έξυπνα δίκτυα αισθητήρων μαζί με προγνωστική ανάλυση (Tett et al., 2020).

3.6.6 Κενά στην έρευνα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Τώρα οι επιστήμονες επεκτείνονται σε μεγαλύτερα δίκτυα αισθητήρων, καλύτερα υλικά και πιο ενοποιημένα δεδομένα.

- Οι αισθητήρες και οι σηματοδότες έχουν εφοδιαστεί με νέα αντιρρυπαντικά και ανθεκτικά σύνθετα υλικά για τη μείωση του χρόνου εκτόξευσης (Zhang et al., 2025).
- Στο μέλλον, οι επιστήμονες θα προσπαθήσουν να ενσωματώσουν μοντέλα βαθιάς μάθησης, διάφορους τύπους αισθητήρων σε συνδυασμό και εργαλεία πρόβλεψης σχετικά με τη ρύπανση και τους κλιματικούς κινδύνους (Xu et al., 2019).
- Η διαλειτουργικότητα και η κοινή χρήση δεδομένων παγκοσμίως συνεχίζουν να αποτελούν πονοκέφαλο για τα θαλάσσια δίκτυα IoT (Tett et al., 2020).
- Η προστασία των δικτύων θαλάσσιων αισθητήρων αποτελεί έναν αναδυόμενο τομέα διεπιστημονικής έρευνας (Thompson et al., 2024).
- Η αποτελεσματικότητα της επιστήμης της αλιείας ενισχύεται μέσω της αυξημένης συλλογής δεδομένων από την κοινότητα και της διαχείρισης βάσει στοιχείων (Apprill et al., 2023).

3.7 Τεχνολογία Αισθητήρων Ανθεκτικών στη Βιορύπανση

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. Η βιορύπανση - ο αποικισμός από βακτήρια, φύκια και θυλακόπια - απειλεί τους αισθητήρες υποβαθμίζοντας την απόδοση, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής και αυξάνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης. Η ανάπτυξη τεχνολογία αισθητήρων ανθεκτικής στη βιορύπανση είναι κρίσιμη για τη διατήρηση αξιόπιστης συλλογής ωκεανογραφικών δεδομένων και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας (Sahoo et al., 2025).

3.7.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Παραδοσιακές μέθοδοι που περιλαμβάνουν επιστρώσεις με βάση τον χαλκό και μηχανικούς καθαριστές, καθώς και προγραμματισμένο καθαρισμό, έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της βιορύπανσης των αισθητήρων τις τελευταίες δεκαετίες. Η αυξανόμενη ανησυχία για τις τοξικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθώς και οι αυστηρότεροι κανονισμοί που θεσπίζονται παγκοσμίως, έχουν αναγκάσει τους επιστήμονες να αναζητήσουν φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις. Η νέα έρευνα βασίζεται σε μη τοξικές αντιρρυπαντικές επιστρώσεις και υδρόφοβα νανοϋλικά, καθώς

και σε επιφάνειες εμπνευσμένες από τη βιολογία που χρησιμοποιούν τις εξελίξεις στην επιστήμη των πολυμερών και την επιφανειακή μηχανική. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι τα δυναμικά συστήματα αντιρρυπαντικής προστασίας, όπως η συνεχής ανανέωση των επιφανειών και ο ενεργός καθαρισμός των εκτεθειμένων περιοχών, έχουν υψηλή αξία. Οι νανοδομημένες επιστρώσεις και τα υλικά εμπνευσμένα από τη βιολογία έχουν πιθανές τεχνικές που μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τον σχηματισμό βιοφίλμ και δεν αποτελούν απειλή για το περιβάλλον (Sahoo et al., 2025; Pereira et al., 2024).

3.7.2 Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Το παραθαλάσσιο περιβάλλον παρουσιάζει συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις για την αντιρρυπαντική προστασία των αισθητήρων. Οι αισθητήρες εκτίθενται σε ακανόνιστες συνθήκες θερμοκρασίας, σημαντική συγκέντρωση αλατιού και έντονη θαλάσσια ζωή, καθώς και σε ταραγμένη κίνηση του νερού. Πολλές από τις τυπικές τεχνικές αντιρρυπαντικής προστασίας είτε φθείρονται γρήγορα είτε μπορεί να οδηγήσουν σε ρύπανση των υδάτων. Οι αισθητήρες χρειάζονται ανθεκτικές προστατευτικές επιστρώσεις που δεν είναι τοξικές και αυτοκαθαριζόμενες ή αναγεννώμενες για να παραμείνουν λειτουργικές για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι αισθητήρες μπορούν να καθαριστούν μηχανικά, αλλά αυτό θα αυξήσει την πολυπλοκότητα του συστήματος και την κατανάλωση ενέργειας. Η διάβρωση των ανιχνευτών μετάλλων, οι οργανισμοί ανθεκτικοί στο βιοφίλμ και ο οπτικός ιστός απεικόνισης των αισθητήρων είναι άλλα σημαντικά τεχνικά προβλήματα (Sahoo et al., 2025; Pereira et al., 2024).

3.7.3 Συμβατικές Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

- Πολυμερείς και Νανοσύνθετες Επικαλύψεις: Οι επιφάνειες από νανοδομημένο τιτάνιο και υδρόφοβες ρητίνες είναι σε θέση να ελαχιστοποιήσουν σημαντικά την προσκόλληση μικροβίων, να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων και να ενισχύσουν την ακρίβεια των δεδομένων (Sahoo et al., 2025).
- Αυτοκαθαριζόμενα Συστήματα: Το βιοφίλμ και τα υπολείμματα αφαιρούνται από αυτοματοποιημένα καθαριστικά και συσκευές υπερήχων που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ανάπτυξης των αισθητήρων των κοινών αισθητήρων που περιλαμβάνουν CTD και φθορόμετρα (ShipUniverse, 2024).
- Οπτική, ηλεκτροχημική και ανίχνευση με βάση την τεχνητή νοημοσύνη: Οι αισθητήρες υπεριώδους φθορισμού, ροής θερμότητας και η ανάλυση εικόνας με βάση την τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιούνται για την έγκαιρη ανίχνευση ρύπανσης, γεγονός που βοηθά στον ακριβή σχεδιασμό της συντήρησης (ShipUniverse, 2024).
- Ανιχνευτές χλωρίου μικροηλεκτρονικής: Αυτοί οι αισθητήρες έχουν δοκιμαστεί στο πεδίο και είναι αποτελεσματικοί στην προστασία από τη βιολογική ρύπανση για πάνω από 40 ημέρες χωρίς σημαντική απόκλιση σήματος (ShipUniverse, 2024).

3.7.4 Αισθητήρες κατά της βιορρύπανση στον τομέα της μακροπρόθεσμης παρατήρησης των ωκεανών

- Παρατήρηση σε πραγματικό χρόνο βιομηχανικών περιουσιακών στοιχείων: Τα προγράμματα ανίχνευσης νερού, κλίματος και ρύπανσης που βρίσκονται στη θάλασσα για μεγάλο χρονικό διάστημα διεξάγονται από ερευνητικούς οργανισμούς και σκάφη.
- Υλικό απελευθέρωσης & Δυναμικό υλικό: Οι επιφάνειες που έχουν σχεδιαστεί για την απελευθέρωση ρύπων αντιστέκονται μέσω της φυσικής και της χημείας, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να εφαρμοστεί μικρότερη ποσότητα παραδοσιακών προσθέτων θανάτωσης (Sahoo et al., 2025).
- Μπορούν επίσης να υπάρχουν μη επανδρωμένα επιφανειακά και υποβρύχια οχήματα που μπορούν να λειτουργούν αυτόματα και δεν χρειάζεται να συντηρούνται τακτικά όταν τα μέτρα κατά της ρύπανσης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά (Sahoo et al., 2025; ShipUniverse, 2024).

- Τήρηση των περιβαλλοντικών νόμων των θαλασσών (ShipUniverse, 2024), καθώς τα έξυπνα λιμάνια και οι ελεγχόμενες ναυτιλιακές βιομηχανίες απαιτούν υψηλή ακεραιότητα δεδομένων και αξιόπιστη απόδοση.

3.7.5 Κενά στην Έρευνα στην Μελλοντική Κατεύθυνση της Έρευνας

- Ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον, βιοεμπνευσμένων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων που στοχεύουν σε συγκεκριμένα πλάσματα με χαμηλό περιβαλλοντικό κίνδυνο (Pereira et al., 2024).
- Η ενσωμάτωση πολυτροπικών αισθητήρων, έξυπνων αλγορίθμων καθαρισμού και προγνωστικής συντήρησης που χρησιμοποιούν Τεχνητή Νοημοσύνη και μηχανική μάθηση (ShipUniverse, 2024).
- Νανοδομημένες και έξυπνες επιστρώσεις που επεκτείνουν την έρευνα για την περαιτέρω παράταση της αξιόπιστης διάρκειας ζωής και απόδοσης των μη τοξικών αισθητήρων.
- Διεξήχθησαν επιτόπιες έρευνες για να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα και η οικονομική αποδοτικότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε διάφορες περιοχές (Sahoo et al., 2025).

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). Αυτές οι δύο τεχνολογίες ανίχνευσης συνεργάζονται για την επίλυση όλων των διακριτών επιπλοκών των ωκεάνιων περιβαλλόντων, παρέχοντας παράλληλα σε προηγμένα συστήμα ανίχνευσης απαραίτητες δυνατότητες συλλογής δεδομένων για σύγχρονες επιχειρήσεις λήψης αποφάσεων σε θαλάσσιες επιχειρήσεις και διαχείριση βιώσιμων πόρων (Muhammad et al., 2025; Xu et al., 2019).

3.8.1 Κύρια Συμπεράσματα

- Τα τρέχοντα μετασχηματιστικά συστήματα ανίχνευσης ωκεανών συγκλίνουν υποβρύχιους ασύρματους αισθητήρες με τεχνολογία ακουστικής επικοινωνίας και αυτοδύναμα συστήματα οχημάτων για να παρέχουν πλήρη τρισδιάστατη παρακολούθηση των ωκεανών που οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν μπορούν να επιτύχουν (Muhammad et al., 2025; Xylouris et al., 2024).
- Οι τρέχουσες τεχνολογίες ανίχνευσης αντιμετωπίζουν τρεις σημαντικές δυσκολίες που περιλαμβάνουν τη βιορύπανση και τη διαχείριση ενέργειας, καθώς και σοβαρές περιβαλλοντικές συνθήκες που απαιτούν δημιουργικές προσεγγίσεις, όπως η αυτοδύναμη τεχνολογία καθαρισμού και η τεχνολογία συλλογής ενέργειας, καθώς και ο σχεδιασμός ανθεκτικών υλικών (Sahoo et al., 2025; Khan et al., 2024).
- Η συμπερίληψη της τεχνητής νοημοσύνης μαζί με την τεχνολογία μηχανικής μάθησης στα συστήματα θαλάσσιας ανίχνευσης οδηγεί σε μια μετασχηματιστική αλλαγή στις δυνατότητες παρακολούθησης των ωκεανών λόγω της προγνωστικής ανάλυσης δεδομένων και των έξυπνων συστημάτων σχεδιασμού διαδρομών, της έξυπνης επιλογής δεδομένων και της αυτοματοποιημένης τεχνολογίας περιβαλλοντικής επιθεώρησης (Zhang et al., 2025; Ananthi et al., 2024).
- Ο διατομεακός συντονισμός μεταξύ των επίγειων, υποβρύχιων και εναέριων συστημάτων δημιουργεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του σεναρίου και αυξάνει την επιχειρησιακή ευελιξία, με τα μη επανδρωμένα οχήματα να λειτουργούν ως κρίσιμοι κόμβοι για τον συντονισμό μεταξύ των παραδοσιακών ορίων του θαλάσσιου τομέα (Patterson et al., 2025; Ullah et al., 2024).

3.8.2 Περιορισμοί και Ερευνητικά Κενά

- Οι περιορισμοί εύρους ζώνης και καθυστέρησης επικοινωνίας στα υποβρύχια περιβάλλοντα εξακολουθούν να περιορίζουν τη μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ειδικά τα δεδομένα αισθητήρων υψηλής ανάλυσης και το βίντεο που απαιτούνται σε λεπτομερή περιβαλλοντική έρευνα (Xylouris et al., 2024; Whitt et al., 2020).

- Η περίοδος λειτουργίας των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων και των δικτύων αισθητήρων εξ αποστάσεως περιορίζεται από την κατάσταση της τεχνολογίας των μπαταριών, η οποία εισάγει επίσης βασικούς περιορισμούς στις μακροπρόθεσμες αποστολές παρακολούθησης και την χωρική κάλυψη (Verma et al., 2021; Khan et al., 2024).
- Οι ελλείψεις τυποποίησης στα πρωτόκολλα επικοινωνίας αισθητήρων και στις μορφές δεδομένων εμποδίζουν τη συμβατότητα διαφορετικών συστημάτων ανίχνευσης και κατασκευαστών, δημιουργώντας έτσι προβλήματα ενσωμάτωσης σε ολοκληρωμένα δίκτυα θαλάσσιας ανίχνευσης (Tett et al., 2020; Xu et al., 2019).
- Δεν υπάρχουν πολλές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, καθώς οι τεχνολογίες ανίχνευσης έχουν δοκιμαστεί σε εργαστηριακά περιβάλλοντα ή μικρές εφαρμογές, αντί για ολόκληρα ωκεάνια λειτουργικά σενάρια που απαιτούν τη συμμετοχή πολλαπλών ομάδων και πόρων (Muhammad et al., 2025; Apprill et al., 2023).
- Τα ολοκληρωμένα πλαίσια κυβερνοασφάλειας που έχουν σχεδιαστεί για την υποστήριξη κατανεμημένων δικτύων αισθητήρων βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης, ιδίως σε σχέση με τους στόλους αυτόνομων οχημάτων και τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων που αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες (Zahra et al., 2025; Zhang et al., 2025).

3.8.3 Ερευνητικές Συνεισφορές

Το κεφάλαιο παρέχει τη θεμελιώδη βάση ανίχνευσης που είναι απαραίτητη για τη δημιουργία του Θαλάσσιου Διαδικτύου Συστημάτων. Η εργασία ενσωματώνει διάφορες σύγχρονες έρευνες ανίχνευσης κάτω από το νερό και πάνω από την επιφάνεια σε ένα συνεκτικό πλαίσιο έξι τομέων, το οποίο αντιμετωπίζει τα ζητήματα που αντιμετωπίζουν τα ωκεάνια περιβάλλοντα. Η εργασία καταδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο πολλαπλές τεχνολογίες μπορούν να λειτουργήσουν ως μέρος ενός πλήρους συστήματος ανίχνευσης για την υποστήριξη προηγμένων αποστολών στη θάλασσα, οι οποίες περιλαμβάνουν UWSN και ακουστική επικοινωνία και αυτόνομα οχήματα, επιφανειακά δίκτυα, περιβαλλοντική παρακολούθηση και αντοχή στη βιορύπανση (π.χ., Muhammad et al., 2025; Xu et al., 2019).

Αυτή η ανάλυση υποστηρίζει άμεσα τα επόμενα τμήματα της διατριβής, καθορίζοντας τις απαιτήσεις υποδομής συλλογής δεδομένων για τα πλαίσια κυβερνοασφάλειας στη θάλασσα (Κεφάλαιο 7), τις πλατφόρμες ανάλυσης δεδομένων (Κεφάλαιο 6) και τις προκλήσεις ολοκλήρωσης συστημάτων (Κεφάλαιο 9). Τα στοιχεία δείχνουν ότι το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) πρέπει να εγκατασταθεί όταν πολλά πεδία ανίχνευσης βελτιώνονται ταυτόχρονα και όχι μόνο μεμονωμένες βελτιώσεις τεχνολογίας (π.χ., Ananthi et al., 2024; Mariani et al., 2021).