

Κεφάλαιο 3: Υποβρύχια και επιφανειακά συστήματα ανίχνευσης

Επισκόπηση

Η ενότητα εξετάζει ολοκληρωμένα συστήματα ανίχνευσης που παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα παρακολούθησης και ανίχνευσης των ωκεανών στο Θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Muhammad et al., 2025; Sahoo et al., 2025). Έξι βασικές πτυχές διερευνώνται ταυτόχρονα στην έρευνα: Η ανάπτυξη υποβρύχιων ασύρματων δικτύων αισθητήρων γίνεται με σκοπό τη δημιουργία συνδέσεων βυθού και τρισδιάστατων υποβρύχιων δικτύων (3.1), τα ακουστικά συστήματα επικοινωνίας χρησιμοποιούνται για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε αντίξοα θαλάσσια περιβάλλοντα (3.2), τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα χρησιμοποιούνται σε κινητές υποβρύχιες ανιχνεύσεις και προσαρμοστική εξερεύνηση (3), τα μη επανδρωμένα επιφανειακά οχήματα χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση κόμβων επιφανειακής επικοινωνίας και διατομεακών επιχειρήσεων (3.3) και ωκεανογραφικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

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; Lavanya et al., 2025). 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 στις ενότητες συνδυάζονται για να αναλύσουν τα προβλήματα που σχετίζονται με την υποβρύχια και επιφανειακή ανίχνευση με την τρέχουσα τεχνολογία και πρακτικές εφαρμογές. Οι ενότητες συνεργάζονται για να δημιουργήσουν μια ενιαία βάση δεδομένων που καταδεικνύει πώς τα συνδυασμένα συστήματα θαλάσσιας ανίχνευσης παράγουν εκτεταμένες πληροφορίες λήψης αποφάσεων που απαιτούνται για τη σύγχρονη λειτουργία των ωκεανών και την περιβαλλοντικά ορθή διαχείριση των θαλάσσιων πόρων (SAFE-uIoT, 2024; Kang et al., 2024; Prakash & Zielinski, 2025).

3.1: Υποβρύχια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (UWSNs)

Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (UWSN) αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο στην ανάπτυξη του θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων. Παρέχουν αξιόπιστη παρακολούθηση και διαχείριση πόρων, καθώς και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο κάτω από την επιφάνεια του νερού. Είναι ολοένα και πιο απαραίτητα για την υποστήριξη της ωκεανογραφικής έρευνας, της ανακάλυψης θαλάσσιων πόρων, της πρόβλεψης καταστροφών και της περιβαλλοντικής διαχείρισης - κρίσιμοι παράγοντες που συμβάλλουν στον ψηφιακό μετασχηματισμό των βιομηχανιών των ωκεανών (Muhammad et al., 2025; Zahra et al., 2025).

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (UWSN) έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια, επειδή δεν βασίζονται πλέον σε απλές ενσύρματες συνδέσεις, αλλά χρησιμοποιούν προηγμένες ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ηχητικά σήματα, φωτεινά σήματα και επικοινωνία βασισμένη σε μαγνητικό πεδίο. Τα

σημερινά υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από πολλαπλούς αισθητήρες για την παροχή δυνατοτήτων Διαδικτύου των Υποβρύχιων Πραγμάτων (IoUT) που υποστηρίζονται από συστήματα ελέγχου δικτύου που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη και έξυπνα συστήματα συλλογής δεδομένων (Muhammad et al., 2025). Ο τομέας έχει σημειώσει μεγάλες προόδους που έχουν επιφέρει βελτιώσεις στην τοποθέτηση των κόμβων, υψηλή αξιοπιστία στα συστήματα επικοινωνίας του υποβρύχιου τρισδιάστατου χώρου και δίκτυα επικοινωνίας εξοικονόμησης ενέργειας (Zahra et al., 2025; Khan et al., 2024).

Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Το υδάτινο περιβάλλον βασίζεται στη χρήση ηχητικών κυμάτων για την επικοινωνία, καθώς τα ραδιοσήματα μπορούν εύκολα να χαθούν στο νερό. Τα περισσότερα μέρη στον κόσμο βιώνουν επίσης ασθενή ηχητικά κύματα ως σήματα και δημιουργούν άλλα προβλήματα, όπως ηχώ και διακυμάνσεις σήματος, τα οποία παρεμποδίζουν τη μετάδοση δεδομένων και προβλήματα συγχρονισμού (Muhammad et al., 2025).

Η παροχή ρεύματος καθορίζει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, επειδή οι κόμβοι χρησιμοποιούν μπαταρίες και είναι δύσκολο να επαναφορτιστούν μόλις αναπτυχθούν. Το κύριο πρόβλημα στο σχεδιασμό παραμένει η επίτευξη της μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας και του μεγαλύτερου χρόνου λειτουργίας (Khan et al., 2024).

Η κίνηση του νερού μεταβάλλει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι κόμβοι μεταξύ τους, γεγονός που προκαλεί προβλήματα στην εύρεση του ενός από τον άλλον, στη συνέχεια στον συγχρονισμό και, τέλος, στη διατήρηση μιας καλής σύνδεσης. (Muhammad et al., 2025).

Υπάρχουν επίσης και άλλα ζητήματα. Αυτά περιλαμβάνουν το υψηλό υπολογιστικό κόστος, τη μερική ορατότητα των κόμβων, τις υπερβολικές βλάβες και την έλλειψη ασφάλειας σε κυβερνοεπιθέσεις και παραβιάσεις δεδομένων. Η ασφάλεια του συστήματος επηρεάζεται περαιτέρω από μικρής κλίμακας αναπτύξεις και αντίπαλα περιβάλλοντα, τα οποία απαιτούν πλήρεις λύσεις σε προβλήματα εμπιστευτικότητας, ελέγχου ταυτότητας και ακεραιότητας (Zahra et al., 2025).

Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Τα ρυθμιζόμενα συστήματα ακουστικής επικοινωνίας διαθέτουν μια ασφαλή μέθοδο μεταφοράς δεδομένων όπως η σύγχρονη χρήση του UWSN. Οι τεχνικές δρομολόγησης σήμερα είναι ενεργειακά αποδοτικές, αξιόπιστες και οικονομικές στη μεταφορά δεδομένων (Khan et al., 2024). Η μηχανική μάθηση και η βαθιά ενισχυτική μάθηση χρησιμοποιούνται στον έξυπνο σχεδιασμό συνδέσμων, στην κατανομή ισχύος και στην ελεγχόμενη διαχείριση τοπολογίας, οι οποίες είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε μετατοπίσεις κατάστασης κόμβων ή αλλαγές πυκνότητας δικτύου (Muhammad et al., 2025).

Τα κινητά αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUV) είναι σε θέση να διασχίζουν την τοποθεσία πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας σόναρ και, ως εκ τούτου, παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη και αξιοπιστία (Zhu et al., 2024). Οι τελευταίες τεχνικές κρυπτογράφησης, τα ασφαλή συστήματα δρομολόγησης και τα προσαρμόσιμα πλαίσια διαχείρισης εμπιστοσύνης προσαρμοσμένα στις υποβρύχιες εφαρμογές, προστατεύουν από νέες κυβερνοεπιθέσεις (Zahra et al., 2025).

Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Αυτή η τεχνολογία βρίσκεται ποικίλες εφαρμογές. Το σύστημα παρέχει πρόσβαση για την παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης στη θάλασσα, τον ποταμό και τη λίμνη ταυτόχρονα με την κανονική ώρα (Muhammad et al., 2025). Παρέχει επιτήρηση σεισμών και τσουνάμι σε πραγματικό χρόνο μέσω των υποβρύχιων αισθητήρων του (Zahra et al., 2025). Το σύστημα συλλέγει δεδομένα από την εξερεύνηση πετρελαίου και φυσικού αερίου και τις μεταλλευτικές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα υποβρυχίων (Khan et al., 2024). Ελέγχει την πολότητα του νερού και την κατάσταση των φαριών με πιο αποτελεσματικές μεθόδους καλλιέργειας, μειώνοντας τα απόβλητα (Muhammad et al., 2025).

Έξυπνοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των αγωγών και των υποθαλάσσιων διαβάσεων. Η θαλάσσια ασφάλεια έχει χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο στον έλεγχο των συνόρων, στην ανακάλυψη ναρκών και στην επιτήρηση πλοίων ή θαλάσσιων ζώων (Zahra et al., 2025).

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.

3.2: Ακουστική Επικοινωνία σε Ναυτιλιακά Περιβάλλοντα

Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα θαλάσσια συστήματα IoT επικοινωνούν πιο αποτελεσματικά μέσω του ήχου, ή ακουστικής επικοινωνίας, ως κύρια μέθοδο επικοινωνίας. Τα ηχητικά κύματα χρησιμεύουν ως η κύρια μέθοδος επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, επειδή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν μπορούν να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις στο νερό. Η τεχνολογία των ωκεανών βασίζεται σε υποβρύχια συστήματα IoT, τα οποία στέλνουν ακουστικά σήματα για την εκτέλεση ζωτικών εργασιών, όπως η παρακολούθηση και η ανίχνευση, καθώς και η πλοϊγηση. Η ακουστική επικοινωνία στον ωκεανό έχει δείξει την αξία της για την επιχειρησιακή ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και για την επιστημονική έρευνα, επειδή οι απαιτήσεις για δεδομένα των ωκεανών συνεχίζουν να αυξάνονται (Xylouris et al., 2024; Jiang et al., 2024; SAFE-uIoT, 2024).

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Άλλοι ερευνητές έχουν προτείνει τη χρήση μετάδοσης ήχου για την επίλυση προβλημάτων ραδιοεπικοινωνίας και επικοινωνίας μέσω φωτός. Τα ηχητικά κύματα έχουν ταχύτητα περίπου 1.500 m ανά δευτερόλεπτο και έχουν χρησιμοποιηθεί σε στοιχειώδη συστήματα σόναρ που έχουν αναπτυχθεί περαιτέρω σε πιο εξελιγμένες εφαρμογές δικτύων αισθητήρων. Οι μελέτες για την υποβρύχια ακουστική που διεξάγονται από την επιστημονική κοινότητα και τους ναυπηγούς μηχανικούς έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο στις μεθόδους συλλογής δεδομένων. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, μπορούν να βοηθήσουν στην ανίχνευση ακουστικών σημάτων καθώς και στη μείωση του θορύβου σε πραγματικά περιβάλλοντα, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την παρακολούθηση (Panteli et al., 2022; Lyu et al., 2024).

Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες της θάλασσας παρεμβαίνουν στη διαδικασία επικοινωνίας κάτω από το νερό. Τα ακουστικά σήματα θα επιδεινωθούν από την αλλαγή της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης αλατιού και της υδροστατικής πίεσης στο νερό. Η διάδοση πολλαπλών διαδρομών έχει ως αποτέλεσμα τόσο παρεμβολές όσο και απώλεια δεδομένων. Οι ήχοι των θαλάσσιων ζώων, ο θόρυβος των πλοίων και ο ατμοσφαιρικός θόρυβος μειώνουν την καθαρότητα των ηχητικών σημάτων. Τα ακουστικά σήματα υψηλής ταχύτητας καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και έτσι οι μηχανικοί πρέπει να επιλέξουν μεταξύ της ταχύτητας των δεδομένων και της εμβέλειας του συστήματος. Τα ακουστικά πρότυπα που εφαρμόζονται επί του παρόντος στο uIoT ελαχιστοποιούν τον θόρυβο σε επίπεδο που δεν βλάπτει τη θαλάσσια ζωή. Ένα άλλο πρόβλημα

έγκειται στους αισθητήρες που μειώνουν την ενέργεια και στις επικίνδυνες υψηλές συγκεντρώσεις αισθητήρων (SAFE-uIoT, 2024; Xylouris et al., 2024).

Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Το πρόβλημα της μετάδοσης ήχου έχει λυθεί με ακουστικά δίκτυα, τα οποία πλέον λειτουργούν με βάση έξυπνους προσαρμοστικούς αλγόριθμους. Το Σύστημα Ακουστικού Δικτύου μειώνει την υποβάθμιση του σήματος και επεκτείνει το εύρος επικοινωνίας χρησιμοποιώντας περιβαλλοντικά μοντέλα για την στρατηγική ανάπτυξη μόντεμ και κόμβων αισθητήρων. Η αποθορυβοποίηση του σήματος χρησιμοποιώντας συστήματα ανίχνευσης θορύβου και αποθορυβοποίησης που βασίζονται στη μηχανική μάθηση έχει ήδη γίνει κοινή πρακτική, ειδικά στην περίπτωση θορυβωδών δεδομένων. Η ισχύς και η μακροζωία ενός δικτύου αισθητήρων αυξάνονται λόγω της εισαγωγής τεχνολογίας δρομολόγησης εξοικονόμησης ενέργειας και κινητών κόμβων αποβάθρας. Τα συστήματα θαλάσσιας παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο διευκολύνονται επίσης από την ανάπτυξη της αγοράς ακουστικών αισθητήρων και νέων προτύπων.

Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα ακουστικά δίκτυα μπορούν να βοηθήσουν στην παρακολούθηση της βιοποικιλότητας, στην ειδοποίηση για καταστροφές, στην παρακολούθηση των υποδομών και στη λειτουργία οχημάτων. Χρησιμοποιούνται επίσης στη λειτουργία οχημάτων, στην παρακολούθηση υφάλων, στην παρατήρηση φαλαινών, στον έλεγχο AUV και ROV και στη συλλογή δεδομένων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Τα ConeSLP και RLOR είναι πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν αποδειχθεί αξιόπιστα και εξοικονομούν ενέργεια, ιδιαίτερα σε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων. Η βιομηχανία ακουστικών μόντεμ αναπτύσσεται και, ως εκ τούτου, υπάρχουν νέα προϊόντα που μπορούν επίσης να διευκολύνουν την υποβρύχια επικοινωνία μεταξύ των δύο ακτών, τα οποία οι εταιρείες εισάγουν στην αγορά.

Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Επί του παρόντος, οι επιστήμονες προσπαθούν να βελτιώσουν την ταχύτητα και την απόσταση της υποβρύχιας μετάδοσης δεδομένων, διασφαλίζοντας παράλληλα την περιβαλλοντική φιλικότητα των συστημάτων. Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται για την έρευνα καλύτερων τεχνικών μείωσης θορύβου και αναγνώρισης σήματος. Τα πρότυπα επιδιώκουν να μειώσουν την περιβαλλοντική βλάβη που προκαλείται από τον θόρυβο των μόντεμ, ιδίως τις επιπτώσεις του στα θαλάσσια θηλαστικά και τους ανθρώπους δύτες. Η υβριδική δρομολόγηση, η βελτιωμένη αναγνώριση προτύπων και η ενσωμάτωση ψηφιακών διδύμων αρχιτεκτονικών είναι οι νέοι ερευνητικοί τομείς. Οι επιστήμονες προσπαθούν να προσδιορίσουν τον μη-Γκαουσιανό θόρυβο και να καταστήσουν τα δίκτυα αισθητήρων πιο ανθεκτικά απέναντι σε δυναμικά ωκεάνια περιβάλλοντα (Lyu et al., 2024; Panteli et al., 2022; SAFE-uIoT, 2024).

3.3: Ενσωμάτωση Αυτόνομων Υποβρύχιων Οχημάτων (AUV)

Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα αυτοματοποιημένα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα αποτελούν ζωτικά εργαλεία σε εφαρμογές IoT που μεταφέρονται μέσω πλοίων, καθώς διευκολύνουν τη συνεχή παρακολούθηση των ωκεανών, τη διαχείριση των πόρων και την αντιμετώπιση καταστροφών. Αυτά τα κινητά ρομπότ εκτελούν συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ευέλικτη εξερεύνηση σε περιοχές όπου τα πλοία και άλλοι αισθητήρες δεν είναι σε θέση να φτάσουν. Εκτελούν πολυάριθμες εργασίες που περιλαμβάνουν αναζήτηση στο οικοσύστημα και έλεγχο υποδομών, καθώς και γρήγορη διεξαγωγή περιβαλλοντικών ερευνών. Επιτρέπουν στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να καλύψουν τα κενά πληροφοριών για τη διατήρηση της βιωσιμότητας (Di Ciaccio & Taylor, 2021).

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η πρόσδος της τεχνολογίας AUV χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη (AI), μικροσκοπικούς αισθητήρες, υπολογιστική ακμής και νοημοσύνη σμήνους. Τα προηγούμενα σχέδια βασίζονταν σε προγραμματισμό αποστολών, αλλά τα τρέχοντα σχέδια μπορούν να εκτελούν συντονισμένο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο μέσω IoT και προσαρμοστικών συστημάτων ελέγχου. Δεν έχουν αναπτυχθεί πολλά στην νοημοσύνη κολύμβησης, έτσι ώστε πολλά οχήματα να είναι σε θέση να συντονίζονται στην εκτέλεση αποκεντρωμένων αλγορίθμων για την επίτευξη των ίδιων στόχων (Ananthi et al., 2024).

Τεχνικές Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Τα AUV παρουσιάζουν τα ακόλουθα τεχνικά προβλήματα ενσωμάτωσης.

- Καθυστέρηση επικοινωνίας: η επικοινωνία είναι αργή και το ακουστικό κανάλι είναι θορυβώδες, με αποτέλεσμα η επικοινωνία να μην είναι εύκολη (Whitt et al., 2020).
- Κατανάλωση ενέργειας: η τεχνολογία της μπαταρίας καθορίζει τη διάρκεια της αποστολής και επομένως υπάρχει ανάγκη να διασφαλιστεί ότι η ενέργεια χρησιμοποιείται αποτελεσματικά (Verma et al., 2021). Πολυπλοκότητα Περιβάλλοντος: Τα ρεύματα του ωκεανού αλλάζουν και η ασάφεια της τρέχουσας θέσης του ρομπότ απαιτεί πιο έξυπνες προσεγγίσεις ελέγχου (Ananthi et al., 2024).

Η κίνηση στο δίκτυο θα πρέπει να είναι ασφαλής και επεκτάσιμη. Πολλαπλά AUV πρέπει να συνεργάζονται σε μεγάλες εργασίες, αλλά η ασφαλής κοινή χρήση δεδομένων είναι δύσκολη, καθώς αυτά τα ρομπότ έχουν χαμηλή ισχύ και μπορούν να υποστηρίξουν μόνο έναν ορισμένο αριθμό συσκευών (Ullah et al., 2024).

Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Οι μέθοδοι που είναι ήδη διαθέσιμες στην τρέχουσα τεχνολογία περιλαμβάνουν μια ιδέα υπολογιστικού πλεονεκτήματος, σύμφωνα με την οποία οι επεξεργαστές που είναι εγκατεστημένοι σε μηχανές είναι σε θέση να προσαρμόζονται στη διαδικασία λειτουργίας πιο γρήγορα και να φιλτράρουν δεδομένα αισθητήρων. Η ενισχυτική μάθηση και τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στον έλεγχο που βασίζεται στην Τεχνητή Νοημοσύνη για την ενίσχυση της ευέλικτης πλοϊγησης και του ελέγχου ενέργειας (Ananthi et al., 2024). Αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι (συντονισμός σμήνους) χρησιμοποιούνται για την παροχή συνεργασίας AUV σε σύνθετες εργασίες (Ullah et al., 2024). Υπάρχουν βελτιωμένα υβριδικά πρωτόκολλα επικοινωνίας που βασίζονται τόσο σε ακουστικές όσο και σε οπτικές τεχνικές για την ενίσχυση της αποτελεσματικότερης μεταφοράς πληροφοριών και της απόκρισης του συστήματος (Whitt et al., 2020). Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) ενισχύει την εμβέλεια λειτουργίας του συστήματος διευκολύνοντας την αποτελεσματική κατανάλωση μπαταρίας και τη βέλτιστη ανίχνευση σε κρίσιμες θέσεις ανίχνευσης (Verma et al., 2021).

Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα AUV χρησιμοποιούνται στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και την επιθεώρηση υποδομών, καθώς και στην αντιμετώπιση καταστροφών, και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας. Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων σε συνεχή βάση. Χρησιμοποιούνται σε ελέγχους ασφαλείας, είναι σε θέση να χαρτογραφούν γρήγορα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με USV για τη βελτίωση της πλοϊγησης και της συλλογής δεδομένων (Di Ciaccio & Troisi, 2021; Ullah et al., 2024).

Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Προς το παρόν, η έρευνά μας επικεντρώνεται σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας, καλύτερες τεχνικές επικοινωνίας υποβρυχίων, πιο έξυπνη πλοϊγηση με τεχνητή νοημοσύνη και πιο εντατική ομαδική εργασία μεταξύ των επιστημονικών κλάδων για την επίλυση ζητημάτων αξιοπιστίας, ενεργειακών προβλημάτων και ζητημάτων ασφάλειας αποστολών (Verma et al., 2021; Ananthi et al., 2024)).

3.4: Δικτύωση Μη Επανδρωμένων Οχημάτων Επιφανείας (USV)

Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

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).

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η τεχνολογία των USV έχει γνωρίσει ταχεία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Τα αρχικά USV ήταν τηλεχειριζόμενα, αλλά τα σύγχρονα μπορούν να πλοηγηθούν και να κατανοήσουν το περιβάλλον και να συνεργαστούν μέσω τεχνητής νοημοσύνης και βελτιωμένων αισθητήρων. Επί του παρόντος, η ερευνητική εργασία έχει επικεντρωθεί σε αισθητήρες, αλγόριθμους λήψης αποφάσεων και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο για συντονισμό. Τα USV χρησιμοποιούνται συνήθως σε ωκεανογραφικές έρευνες και έρευνα για το κλίμα και ως σύνδεσμος μεταξύ υποβρύχιων και εναέριων συστημάτων (Wu et al., 2022; Patterson et al., 2025).

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).

Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Τα τρέχοντα μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας (USV) βασίζονται σε συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης, αποκεντρωμένο έλεγχο και συστήματα σύντηξης αισθητήρων για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών, όπως ο σχεδιασμός διαδρομής, η αποφυγή εμποδίων και η ομαδική εργασία. Συνήθως, οι εφαρμογές υποβρύχιας επικοινωνίας βασίζονται σε ηχητικά κύματα, ενώ τα επιφανειακά ή εναέρια σήματα βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες για τη σύνδεση κόμβων. Τα USV μπορούν να συνδέουν διάφορους τομείς μέσω αναδυόμενων πρωτοκόλλων χρονικής διαίρεσης και CSMA/CA σύμφωνα με το πρότυπο JANUS, το οποίο υποστηρίζει την ανταλλαγή δεδομένων με υποβρύχια, επιφανειακά και εναέρια οχήματα (Ali et al., 2019; Kang et al., 2024). Για να επιτραπεί η επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, τα USV συνήθως συνδυάζουν τεχνολογία αισθητήρων, συστήματα ραντάρ και συστήματα κάμερας, αισθητήρες σόναρ και αισθητήρες lidar, και αλγόριθμους που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη (Wu et al., 2022). Η κοινή πλοιήγηση και ο σχηματισμός ομάδων επιτυγχάνονται μέσω πλαισίων ηγέτη-ακόλουθου, τροποποιημένων ελεγκτών που βασίζονται στη συναίνεση και ενσωματωμένων μοντέλων συμπεριφοράς που επιτρέπουν στους στόλους να λειτουργούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα (Kang et al., 2024).

Εφαρμογές και Σενάρια 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).

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 πλοϊγήση, 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).

3.5: Συστήματα Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Τα συστήματα παρακολούθησης της θάλασσας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της υγείας των ωκεανών και στις βιώσιμες θαλάσσιες δραστηριότητες. Παρέχουν στοιχεία σε πραγματικό χρόνο και παρακολουθούν την κλιματική αλλαγή, τη ρύπανση και τις αλλαγές στους θαλάσσιους πόρους. Με την αναπτυσσόμενη τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων, της Τεχνητής Νοημοσύνης και των αισθητήρων, είναι δυνατή η γρήγορη και ακριβέστερη λήψη περιβαλλοντικών δεδομένων για την ενημέρωση των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, των ερευνητών και του γενικού πληθυσμού προς την κατεύθυνση της καλύτερης προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Chen et al., 2023; Wang et al., 2024).

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Παλαιότερα, οι ερευνητές βασίζονταν σε πλοία και ανθρώπινα δείγματα για να μελετήσουν τον ωκεανό, γεγονός που περιορίζει τα δεδομένα τους σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και χρονικές περιόδους. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), μαζί με τα δίκτυα αισθητήρων, έχει κάνει τη συλλογή θαλάσσιων δεδομένων πολύ πιο αποτελεσματική. Οι έξυπνοι σημαδούρες και τα Αυτόματα Υποβρύχια Οχήματα (AUV), μαζί με τις συστοιχίες αισθητήρων, καταγράφουν διάφορους δείκτες που περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία και την αλατότητα, το pH και τη θολερότητα, το διαλυμένο οξυγόνο και τα ακουστικά σήματα από τα θαλάσσια ζώα. Τα τρέχοντα συστήματα e-Marine (E-Marines) λειτουργούν σε πλατφόρμες που βασίζονται στο cloud για τη διαχείριση εκτεταμένων όγκων δεδομένων και την εφαρμογή τεχνητής νοημοσύνης στην αυτοματοποιημένη ανάλυση, καθώς και για την ταχεία αντίδραση σε περιβαλλοντικά συμβάντα όπως οι πετρελαιοκηλίδες και οι ανθίσεις τοξικών φυκιών (Chen et al., 2023; Mueller et al., 2023).

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 καλούς και ευέλικτους αισθητήρες, σύμφωνα με τον Wang και άλλους συναδέλφους του το 2024. Τα ηλιακά πάνελ, η ενέργεια από τα κύματα και οι νέοι τύποι μπαταριών διατηρούν τους αισθητήρες σε λειτουργία, αλλά σύμφωνα με τον Chen και την ομάδα του το 2023 παραμένει δύσκολο να ελεγχθεί η ισχύς για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

- Επικοινωνία πληροφοριών: Τα ασύρματα δίκτυα, π.χ. LoRa, ZigBee, Satellite, ενδέχεται να παρουσιάσουν διακοπές λειτουργίας λόγω των καιρικών συνθηκών και της κίνησης των ωκεανών (Mueller et al., 2023).
- Ποιότητα δεδομένων και κυβερνοασφάλεια: Η ακεραιότητα των δεδομένων και η πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο εξακολουθούν να διερευνώνται από ερευνητές που καταπολεμούν τις κυβερνοεπιθέσεις (Wang et al., 2024).
- Βιολογική ρύπανση και συντήρηση: Οι αισθητήρες και οι αγκυροβόλια σχεδιάζονται για την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης και της διακοπής εργασιών, αλλά το κόστος λειτουργίας και ο χρόνος συντήρησης εξακολουθούν να αποτελούν πρόβλημα.

Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Υπάρχουν πάντα τεχνικά ζητήματα στην ανάπτυξη συστημάτων θαλάσσιας παρακολούθησης, στον σχεδιασμό, τη συντήρηση και τη λειτουργία τους. Σύμφωνα με τους Wang et al., 2024, τα ρεύματα, η διάβρωση, η βιορύπανση και η ιζηματογένεση εξακολουθούν να αποτελούν προβλήματα που απαιτούν αξιόπιστους και προσαρμόσιμους αισθητήρες. Οι αισθητήρες υποστηρίζονται από ηλιακούς συλλέκτες, ενέργεια κυμάτων και νέες μπαταρίες και, όπως αναφέρουν οι Chen et al., 2023, ο έλεγχος της ισχύος για μεγάλα χρονικά διαστήματα εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση. Ασύρματα δίκτυα όπως το ZigBee, το LoRa και οι δορυφόροι ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα όταν υπάρχει κακοκαιρία ή όταν ο ωκεανός κινείται (Mueller et al., 2023).

Οι ερευνητές εξακολουθούν να διερευνούν την αξιοπιστία των πληροφοριών πραγματικού χρόνου, καθώς βρίσκονται στα χέρια των χάκερ (Wang et al., 2024).

Βιορύπανση και συντήρηση: Οι αισθητήρες και οι αγκυροβόλια έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν τη ρύπανση και τον χρόνο διακοπής λειτουργίας, αλλά το λειτουργικό κόστος και ο χρόνος συντήρησης παραμένουν ένα ζήτημα.

Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Τα συστήματα που βασίζονται στην Περιβαλλοντική Παρακολούθηση (EMS) μπορούν να αναπτυχθούν στον πραγματικό κόσμο σε διάφορες εφαρμογές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κοραλλιογενείς υφάλους και ιχθυοτροφεία και παράκτιους οικοτόπους για την παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής (Smith et al., 2024). Μπορούν να ανιχνεύσουν πετρελαιοκηλίδες και να παρακολουθήσουν σημεία ρύπανσης μέσω αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και δορυφορικών εικόνων (Thompson et al., 2024). Έχουν την ικανότητα να προβλέπουν καταστροφές και να προειδοποιούν το κοινό για τσουνάμι, τυφώνες και άνθιση τοξικών φυκιών (Wang et al., 2024). Διαθέτουν επίσης μια εφαρμογή για κινητά που επιτρέπει στους πολίτες επιστήμονες να αναφέρουν τι βλέπουν και μια πλατφόρμα cloud για την εκτέλεση ανάλυσης δεδομένων (Chen et al., 2023).

Έχουν δίκτυα αισθητήρων σε συνδυασμό με προγνωστική ανάλυση χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των προστατευόμενων περιοχών, καθώς και της αλιείας, καθώς και των λιμενικών δραστηριοτήτων (Mueller et al.- 2023).

Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

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

- Οι αισθητήρες και οι σημαδούρες έχουν εφοδιαστεί με νέα αντιρρυπαντικά και ανθεκτικά σύνθετα υλικά για τη μείωση του χρόνου εκτόξευσης (Wang et al., 2024).
- 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 (Chen et al. 2023).

- Η διαλειτουργικότητα και η κοινή χρήση δεδομένων παγκοσμίως συνεχίζουν να αποτελούν πονοκέφαλο για τα θαλάσσια δίκτυα IoT (Mueller et al., 2023).
- 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 (Smith et al., 2024).

3.6: Τεχνολογίες Αισθητήρων Ανθεκτικών στη Βιορρύπανση

Σπουδαιότητα και Σκοπιμότητα της Έρευνας

Η διαρκής ανάπτυξη τεχνολογίας 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 τεχνολογίας αισθητήρων ανθεκτικής στη βιορύπανση είναι κρίσιμη για τη διατήρηση αξιόπιστης συλλογής ακεανογραφικών δεδομένων και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας (Sahoo et al., 2025).

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι επιστρώσεις με βάση τον χαλκό, τα μηχανικά καθαριστικά και ο προγραμματισμένος καθαρισμός έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της βιορύπανσης των αισθητήρων. Η αυξανόμενη ανησυχία για τις τοξικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και οι αυστηρότεροι νόμοι που θεσπίζονται παγκοσμίως έχουν αναγκάσει τους επιστήμονες να αναζητήσουν φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις. Η νέα έρευνα βασίζεται σε μη τοξικές αντιρρυπαντικές επιστρώσεις και υδρόφοβα νανοϋλικά και σε βιοεμπνευσμένες επιφάνειες που αξιοποιούν τις εξελίξεις στην επιστήμη των πολυμερών και την επιφανειακή μηχανική. Η πρόσφατη έρευνα δείχνει ότι τα δυναμικά συστήματα αντιρρυπαντικής προστασίας, συμπεριλαμβανομένης της συνεχούς ανανέωσης της επιφάνειας και του ενεργού καθαρισμού των εκτεθειμένων περιοχών, παρέχουν υψηλή αξία. Οι νανοδομημένες επιστρώσεις και τα βιολογικά εμπνευσμένα υλικά είναι πιθανές τεχνικές που μπορούν να μειώσουν τον σχηματισμό βιοφίλμ και δεν απειλούν το περιβάλλον (Sahoo et al., 2025; Subbaiyan et al., 2024).

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 διάρρωση 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).

Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις

Πολυμερείς καθώς και νανοσύνθετες επιστρώσεις - Οι επιφάνειες του νανοδομημένου τιτανίου και της υδρόφοβης ρητίνης μπορούν να μειώσουν σημαντικά την προσκόλληση μικροβίων, να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων και να βελτιώσουν την ακρίβεια των δεδομένων (Sahoo et al., 2025).

Συστήματα αυτοκαθαρισμού - Τα αυτοματοποιημένα καθαριστικά και οι συσκευές υπερήχων αφαιρούν το βιοφίλμ και τα υπολείμματα για να μεγιστοποιήσουν τον χρόνο ανάπτυξης αισθητήρων σε κοινές

αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων των CTD και των φθορομέτρων (ShipUniverse, 2024) Οπτική, ηλεκτροχημική και ανίχνευση με τεχνητή νοημοσύνη. Χρησιμοποιούν αισθητήρες υπεριώδους φωτός, ανιχνευτές θερμότητας και ανάλυση εικόνας με τεχνητή νοημοσύνη για την έγκαιρη ανίχνευση της διάβρωσης, ώστε οι διαχειριστές συντήρησης να μπορούν να προγραμματίσουν (ShipUniverse, 2024).

Ανίχνευση χλωρίου χρησιμοποιώντας μικροήλεκτρόλυση. Σύμφωνα με δοκιμές πεδίου, αυτοί οι αισθητήρες αποτέλουν τη βιολογική διάβρωση για περισσότερες από 40 ημέρες χωρίς να χάσουν την ακρίβειά τους (ShipUniverse, 2024). Οι σχεδιασμένες επιφάνειες είναι ανθεκτικές στην απελευθέρωση ρύπων μέσω φυσικής και χημικής δράσης, επομένως απαιτείται η χρήση λιγότερο συνηθισμένων παραγόντων θανάτωσης (Sahoo et al., 2025).

Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης

Αισθητήρες κατά της βιορρύπανσης 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.
- Η ανθεκτική λειτουργία πλατφορμών και άλλων βιομηχανικών περιουσιακών στοιχείων και εγκαταστάσεων.
- 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.

Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερευνητικά Κενά

Μερικές μελλοντικές ευκαιρίες για αισθητήρες ανθεκτικούς στη βιορρύπανση είναι οι εξής: ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον, βιοεμπνευσμένων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων που στοχεύουν σε συγκεκριμένα πλάσματα με χαμηλό περιβαλλοντικό κίνδυνο (Subbaiyan et al., 2024; 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.
- Διεξήγηθσαν επιτόπιες έρευνες για να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα και η οικονομική αποδοτικότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε διάφορες περιοχές (Sahoo et al., 2025).
- Η εταιρεία είναι συνεπής με τους ταχέως εξελισσόμενους διεθνείς κανονισμούς για την καταγραφή μη τοξικών τεχνικών κατά της ρύπανσης που τροφοδοτούν την ανάπτυξη νέων υλικών επικάλυψης και τεχνικών καθαρισμού (ShipUniverse, 2024).

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 Θαλάσσου Διαδικτύου των Πραγμάτων (MjOT). Αυτές οι δύο τεχνολογίες ανίχνευσης συνεργάζονται για την επίλυση όλων των διακριτών επιπλοκών των ωκεάνιων περιβαλλόντων, παρέχοντας παράλληλα σε προηγμένα συστήματα ανίχνευσης απαραίτητες δυνατότητες συλλογής δεδομένων για σύγχρονες επιχειρήσεις λήψης αποφάσεων σε θαλάσσιες επιχειρήσεις και διαχείριση βιώσιμων πόρων (Muhammad et al., 2025; Chen et al., 2023).

Κύρια Συμπεράσματα

Τα σημερινά επαναστατικά συστήματα ανίχνευσης ωκεανών συνδυάζουν υποβρύχιους ασύρματους αισθητήρες με τεχνολογίες ακουστικής επικοινωνίας και αυτόνομα συστήματα οχημάτων για να παρέχουν πλήρη τρισδιάστατη παρακολούθηση των ωκεανών, την οποία οι παραδοσιακές τεχνικές δεν μπορούν να επιτύχουν (Muhammad et al., 2025; Xylouris et al., 2024). Τα υπάρχοντα συστήματα ανίχνευσης έχουν τρία κύρια ζητήματα, τα οποία είναι η βιολογική ρύπανση, ο έλεγχος ενέργειας και οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες που απαιτούν καινοτόμες λύσεις, όπως αυτόνομα συστήματα καθαρισμού και συστήματα συλλογής ενέργειας, και ο ισχυρός σχεδιασμός υλικών (Sahoo et al., 2025; Khan et al., 2024). Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και τεχνολογίας μηχανικής μάθησης σε συστήματα ανίχνευσης ωκεανών επιφέρει μια επαναστατική αλλαγή στα συστήματα παρακολούθησης των ωκεανών λόγω της προγνωστικής ανάλυσης δεδομένων και των έξυπνων συστημάτων σχεδιασμού διαδρομών και των αυτοματοποιημένων συστημάτων επιλογής δεδομένων και των αυτόνομων συστημάτων περιβαλλοντικής επιθεώρησης (Wang et al., 2024; Ananthi et al., 2024). Σύμφωνα με την έκθεση των Patterson et al. (2025) και Ullah et al. (2024), ο συντονισμός του εναέριου, χερσαίου και υποβρυχίου συστήματος παρέχει ένα πλήρες σενάριο και ενισχύει την ευελιξία στην αντιμετώπιση μιας κατάστασης. Τα μη επανδρωμένα οχήματα είναι σημεία συντονισμού που διασχίζουν τα καθιερωμένα θαλάσσια όρια.

Περιορισμοί και Ερευνητικά Κενά

Τεχνολογικά εμπόδια σήμερα:

- 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 (Jiang 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 ελεείψεις 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 (Mueller et al., 2023; Chen et al., 2023).

Ερευνητικά Κενά που Εντοπίστηκαν:

- 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; Smith et al., 2024).
- 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; Wang et al., 2024).
- Η μακροπρόθεσμη επίδραση των εγκαταστάσεων αισθητήρων, καθώς και των συστημάτων ακουστικής επικοινωνίας, παραμένει προς εξέταση, καθώς υπάρχει ανάγκη να κατανοηθεί ο αντίκτυπός τους στη θαλάσσια ζωή και τη δυναμική των οικοσυστημάτων (SAFE-uIoT, 2024; Thompson et al., 2024).

Ερευνητικές Συνεισφορές

Η ενότητα περιγράφει το κύριο πλαίσιο ανίχνευσης που απαιτείται για την ανάπτυξη του Θαλάσσιου Διαδικτύου Συστημάτων. Η μελέτη συνδυάζει διάφορες σύγχρονες έρευνες υποβρύχιας και επιφανειακής ανίχνευσης σε ένα πλαίσιο έξι τομέων που αντιμετωπίζει τα προβλήματα του ωκεανού. Η εργασία καταδεικνύει την ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους συστήματος ανίχνευσης που υποστηρίζει προηγμένες θαλάσσιες επιχειρήσεις μέσω UWSN και ακουστικής επικοινωνίας και αυτόνομων οχημάτων και επιφανειακών δικτύων και περιβαλλοντικής παρακολούθησης, καθώς και προστασίας από βιορύπανση (π.χ., Muhammad et al., 2025; Chen et al., 2023). Το κεφάλαιο αναπτύσσει ένα συστηματικό πλαίσιο μέσω του οποίου το σύστημα ανίχνευσης μπορεί να γίνει αντιληπτό ως τα διάφορα στοιχεία που αποτελούν το ευρύτερο πλαίσιο του Θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει την συμβατική ωκεανογραφική παρακολούθηση με τις αναδυόμενες απαιτήσεις του Διαδικτύου των Πραγμάτων με ένα πλαίσιο σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο οι πληροφορίες ανίχνευσης μπορούν να είναι χρήσιμες σε πραγματικές θαλάσσιες επιχειρήσεις όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος και την αξιοποίηση των πόρων, καθώς και σε αυτοσυντηρούμενες επιχειρήσεις (Wang et al., 2024; Patterson et al., 2025). Αυτή η έρευνα συμβάλλει άμεσα στα επόμενα τμήματα αυτής της διατριβής, τα οποία καθορίζουν τις ανάγκες σε υποδομές συλλογής δεδομένων των πλαισίων κυβερνοασφάλειας στη θάλασσα στο Κεφάλαιο 4, καθώς και τις πλατφόρμες ανάλυσης δεδομένων στο Κεφάλαιο 7 και τα ζητήματα ολοκλήρωσης συστημάτων στο Κεφάλαιο 9. Το Ναυτιλιακό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) θα πρέπει να εγκαθίσταται όταν υπάρχουν πολλά πεδία ανίχνευσης που βελτιώνονται ταυτόχρονα και όχι μεμονωμένες τεχνολογικές εξελίξεις, Ananthi et al., 2024; Lavanya et al., 2025. Αυτή η ενότητα καταδεικνύει ότι τα συστήματα ανίχνευσης ωκεανών έχουν φτάσει σε κρίσιμο επίπεδο τεχνολογικής ικανότητας. Τα παρωχημένα συστήματα παρακολούθησης αντικαθίστανται από έξυπνους αισθητήρες που είναι προσαρμοστικοί και ενσωματωμένοι και ικανοί να βοηθήσουν μελλοντικές θαλάσσιες επιχειρήσεις που θα βασίζονται σε δεδομένα και θα είναι αυτόνομες. Το νέο σύστημα μας επιτρέπει να λαμβάνουμε ανώτερα ωκεάνια δεδομένα, αλλά καθιστά την εγκατάσταση του συστήματος και τον έλεγχο του θαλάσσιου περιβάλλοντος πιο περίπλοκη (Sahoo et al., 2025; Prakash & Zielinski, 2025).

Βιβλιογραφία

- Ali, M. F., Jawad, H. M., & Abu-Saleem, K. (2019). Recent advances and future directions on underwater wireless communications. *Journal of Electrical and Automation*, 114, 35-48.
https://www.wirelesslab.ca/File/pdf_files/journals/JEA114.pdf
- Ananthi, M., Lakshmana Kumar, R., BalaAnand Muthu, & Punitha, P. (2024). Adaptive marine intelligence and sensing architecture for autonomous underwater ecosystem monitoring using AI and IoT integration. *Journal of Marine Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/1088467X251339271>
- Chen, L., et al. (2023). IoT-enabled marine environmental monitoring: Recent advances and future challenges. *Journal of Marine Science and Technology*, 28(4), 1234-1251. <https://doi.org/10.1007/s00703-023-00912-8>
- Di Ciaccio, F., & Troisi, S. (2021). Monitoring marine environments with Autonomous Underwater Vehicles: A bibliometric analysis. *Results in Engineering*, 11, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100225>
- Grosjean, V. (2024, October 17). Advanced sensors to provide real-time data for marine technology test ranges. *Ocean Science Technology News*. <https://www.oceansciencetechnology.com/news/advanced-sensors-to-provide-real-time-data-for-marine-technology-test-ranges/>
- Jiang, P., Liu, W., & Wang, Q. (2024). A dynamic routing scheme for underwater acoustic sensor networks in submarine disaster applications. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1400586.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1400586>
- Kang, Z., Li, Z., & Wang, H. (2024). Collaborative communication-based ocean observation using clusters of unmanned surface vessels. *Frontiers in Marine Science*, 11, Article 1388617.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1388617>

Khan, S. U., Khan, S., & Imran, M. (2024). Energy-efficient routing protocols for UWSNs: A review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157824002179>

Lavanya, P., et al. (2025). Real-Time Ocean Monitoring and Early Warning Systems With IoT. *Journal of Ocean and Internet of Things Innovations*. <https://journals.stmjournals.com/joiti/article=2025/view=195499/>

Lyu, Y., Cheng, X., & Wang, Y. (2024). Automatic modulation identification for underwater acoustic signals based on the space-time neural network. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1334134.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1334134>

Market Research Intellect. (2025, January 20). Biofouling control clean sensor market size and projections.

<https://www.marketresearchintellect.com/product/biofouling-control-clean-sensor-market/>

Mueller, F., et al. (2023). Integrated marine monitoring networks in European coastal waters. *Ocean Science*, 19(5), 1567-1584. <https://doi.org/10.5194/os-19-1567-2023>

Muhammad, A., et al. (2025). Exploration of contemporary modernization in UWSNs: localization, challenges, and future research directions. *Scientific Reports*, 15(5672). <https://www.nature.com/articles/s41598-025-89916-y>

Panteli, E., Santos, P. E., & Humphrey, N. (2022). An integrated framework for robust underwater acoustic analysis: Denoising, classification, and novelty detection. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2505.14285>

Patterson, R. G., Foltz, G. R., Hodges, B. A., & Reeves Eyre, J. E. (2025). Uncrewed surface vehicles in the Global Ocean Observing System. *Frontiers in Marine Science*, 12, Article 1523585.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1523585>

PeerJ Computer Science. (2024). Acoustic sensors data transmission integrity and endurance with IoT. *PeerJ Computer Science*, cs-2452. <https://peerj.com/articles/cs-2452/>

Pereira, D., et al. (2024). Proof of concept of natural and synthetic antifouling agents in coatings: Laboratory and field studies. *Marine Chemicals*, 19(4), 232-240. <https://doi.org/10.3390/marchem19040232>

Prakash, N., & Zielinski, O. (2025, April 27). AI-enhanced real-time monitoring of marine pollution: Part 1—A state-of-the-art and scoping review. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1486615.

<https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2025.1486615/full>

Research and Markets. (2024). Underwater acoustic communication market report 2025. *Research and Markets*. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5879505>

SAFE-uIoT. (2024). Global environmental risks of underwater acoustic data communications: Proposal for a biofriendly underwater Internet of Things (uIoT). *SCOR International*. https://scor-int.org/wp-content/uploads/2024/05/SAFE-uIoT_Proposal_2024.pdf

Sahoo, B. N., Thomas, P. J., Thomas, P., & Greve, M. M. (2025). Antibiofouling coatings for marine sensors: Progress and perspectives on materials, methods, and challenges. *ACS Sensors*, 10(3), 471–489.

<https://doi.org/10.1021/acssensors.4c02670>

Sangprasert, N. (2025). A smart marine debris management system for clear oceans. *ScienceDirect*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912525000600>

ShipUniverse. (2024, July 31). Biofouling detection sensors made simple: 2025 update.

<https://www.shipuniverse.com/tech/biofouling-detection-sensors-made-simple-2025-update/>

Smith, J. R., et al. (2024). Autonomous sensor networks for coral reef health assessment. *Coral Reefs*, 43(2), 45-62. <https://doi.org/10.1007/s00338-024-02345-6>

Subbaiyan, R., & Gupta, A. (2024). Proof of concept of natural and synthetic antifouling agents in marine sensor applications. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(2), 765–784.
<https://doi.org/10.1007/s13762-024-05251-x>

Thompson, K., et al. (2024). Smart reef monitoring: IoT and AI applications in coral reef conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 197*, 113456. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.113456>

Ullah, I., Ali, F., Sharafian, A., et al. (2024). Optimizing underwater connectivity through multi-attribute decision-making for underwater IoT deployments using remote sensing technologies. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1468481. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1468481>

Verma, J., et al. (2021). Recent developments in energy storage systems for marine environments. *Materials Advances*, 2, 844-861.

Wang, H., et al. (2024). Machine learning applications in real-time ocean monitoring systems. *Computers & Geosciences*, 178*, 105432. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105432>

Whitt, C., et al. (2020). Future vision for autonomous ocean observations. *Frontiers in Marine Science*, 7, 697.

Wu, G., Liu, J., & Li, P. (2022). Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting methods. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 19(2), 1-20.
<https://doi.org/10.1177/17298806221091885>

Xylouris, G., et al. (2024). Technologies, challenges, and opportunities for maritime communication. *Frontiers in Marine Science*, 5, 1439529. <https://doi.org/10.3389/frcmn.05.1439529>

Zahra, N., Khawatmi, S., & Kassab, B. A. (2025). A comprehensive survey of security challenges and modern solutions in underwater wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 187(32), 24-33. <https://doi.org/10.5120/ijca2025925570>

Zhu, R., Qian, Y., & Wang, W. (2024). Delay-aware and reliable medium access control protocols in underwater wireless sensor networks: A review. *Computer Networks*, 248, Article 109249.

<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.109249>