

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
στη ΝΑΥΤΙΛΙΑ**

**«Οι Καθαρισμοί της Γάστρας του Πλοίου:
Τεχνολογίες – Νομοθεσία – Επιπτώσεις στο
Περιβάλλον».**

Αναστασία Καρακωνσταντίνου

Διπλωματική Εργασία
που υποβλήθηκε στο Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών
του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
στην Ναυτιλία

Πειραιάς

Μαρτιος 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ

ΜΕΛΟΣ Β΄: ΜΑΡΙΑ ΠΟΥΛΙΑ ΜΠΟΪΛΕ

ΜΕΛΟΣ Γ΄: ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ

Περίληψη

Η βιολογική ρύπανση στα κύττα των πλοίων αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη ναυτιλία, επηρεάζοντας την αποδοτικότητα, την κατανάλωση καυσίμων και το περιβάλλον. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων καθαρισμού, εξετάζοντας τεχνικές, περιβαλλοντικές και κανονιστικές πτυχές. Ακόμη και ελαφριά ρύπανση μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντίσταση του πλοίου, ενώ η έντονη ρύπανση οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές και λειτουργικό κόστος. Αναλύονται διάφορες τεχνολογίες καθαρισμού, από παραδοσιακές μεθόδους έως σύγχρονα ρομποτικά συστήματα, τα οποία προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ωστόσο, παραμένουν ζητήματα όπως η απελευθέρωση ρύπων και η διάδοση χωροκατακτητικών ειδών. Το κανονιστικό πλαίσιο παρουσιάζει ανομοιογένεια σε διεθνές επίπεδο. Τέλος, επισημαίνεται η σημασία καινοτόμων λύσεων, όπως οι επικαλύψεις χωρίς βιοκτόνα και η χρήση τεχνητής νοημοσύνης, για μια πιο βιώσιμη ναυτιλία.

Λέξεις-κλειδιά:

Βιολογική ρύπανση, Καθαρισμός κύτους, Απόδοση πλοίου, Κατανάλωση καυσίμων, Εκπομπές, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, Ρομποτικά συστήματα καθαρισμού, Αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, Χωροκατακτητικά είδη, Ναυτιλιακοί κανονισμοί, Βιώσιμη ναυτιλία,

Abstract

Biofouling on ship hulls constitutes a significant challenge for the maritime industry, affecting operational efficiency, fuel consumption, and environmental performance. This study presents a concise literature review of hull cleaning methods, examining technical, environmental, and regulatory aspects. Even light fouling can substantially increase a vessel's resistance, while heavy fouling leads to higher emissions and operating costs. Various cleaning technologies are analyzed, ranging from traditional methods to modern robotic systems, which offer high efficiency and a reduced environmental footprint. However, challenges remain, including the release of pollutants and the spread of invasive species. The regulatory framework remains fragmented at the international level. Finally, the study highlights the importance of innovative solutions, such as biocide-free coatings and the use of artificial intelligence, in promoting more sustainable shipping. Future perspectives highlight the potential of biocide-free coatings, biomimetic adhesion systems, and AI-driven performance monitoring to integrate fouling management into broader decarbonization strategies. Yet research gaps persist regarding the long-term ecological impacts of paint-derived microplastics and the socio-economic accessibility of advanced technologies.

Overall, the thesis concludes that hull cleaning must be understood as a cornerstone of sustainable shipping. Effective solutions require the integration of technology, regulation, and environmental safeguards to align maritime operations with global climate and biodiversity goals.

Keywords:

Biofouling, Hull cleaning, Ship efficiency, Fuel consumption, Emissions, Environmental impact, Robotic cleaning systems, Antifouling coatings, Invasive species, Maritime regulations, Sustainable shipping,

Πίνακας Περιεχομένων

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ	1
Περίληψη.....	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή.....	8

2.	Η γάστρα του πλοίου.....	15
2.1	Μορφές γάστρας πλοίων	15
2.2	Επίδραση της ρύπανσης της γάστρας στην απόδοση του πλοίου	17
3.	Τεχνολογίες και μέθοδοι καθαρισμού	22
3.1	Χειροκίνητος καθαρισμός γάστρας.....	22
3.2	Μηχανοκίνητα συστήματα καθαρισμού με περιστροφική βούρτσα.....	23
3.3	Μέθοδος υποβρύχιου καθαρισμού χωρίς επαφή.....	24
4.	Τεχνολογίες προσκόλλησης σε υποβρύχια ρομπότ καθαρισμού.....	30
4.1	Μαγνητική προσκόλληση.....	30
4.2	Δύναμη αρνητικής πίεσης.....	32
4.3	Δύναμη ώθησης	33
4.4	Άλλες τεχνολογίες προσκόλλησης	33
5.	Σχετική Νομοθεσία.....	35
5.1	Εθνική νομοθεσία καθαρισμού πλοίου	35
5.2	Κατευθυντήριες γραμμές του IMO για τις πρακτικές καθαρισμού.....	46
5.3	Κανονισμοί για την ασφάλεια και την υγεία στο χώρο εργασίας.....	51
6.	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του καθαρισμού της γάστρας	54
6.1	Απελευθέρωση υπολειμμάτων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και βιοκτόνων	54
6.2	Εξάπλωση χωροκατακτητικών ειδών μέσω δραστηριοτήτων καθαρισμού	56
6.3	Κίνδυνοι ρύπανσης: βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά	57
6.4	Μελέτες περιπτώσεων και δεδομένα παρακολούθησης.....	59
7.	Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών καθαρισμού	62
7.1	Χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες.....	62
7.2	Μηχανοκίνητα συστήματα βουρτσών	64
7.3	Μέθοδοι καθαρισμού χωρίς επαφή	65
7.4	Τεχνολογίες πρόσφυσης στον ρομποτικό καθαρισμό.....	66
7.5	Συγκριτική αξιολόγηση	68

8. Μελλοντικές προοπτικές και ερευνητικά κενά	72
8.1 Προόδους στη ρομποτική καθαριότητα και προσκόλληση.....	72
8.2 Μη τοξικές στρατηγικές κατά της ρύπανσης	73
8.3 Μοντέλα παρακολούθησης και πρόβλεψης	73
8.4 Ρυθμιστικό πλαίσιο.....	74
8.5 Ερευνητικά κενά.....	74
9. Συμπέρασμα	76
Βιβλιογραφία.....	79

1. Εισαγωγή

Η νομοθεσία που διέπει την καθαριότητα των πλοίων, επιβάλλεται από διεθνείς ρυθμιστικούς φορείς όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ), η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (ΜΕΡC) και άλλες περιφερειακές αρχές. Η συμμόρφωση με αυτούς τους κανονισμούς είναι απαραίτητη για την αποφυγή κυρώσεων, την ασφάλεια του πληρώματος και την προστασία του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Η Σύμβαση Ναυτικής Εργασίας (ΜLС 2006) περιγράφει επίσης ειδικές διατάξεις σχετικά με την υγεία

και την υγιεινή των ναυτικών, υπογραμμίζοντας περαιτέρω τη σημασία της διατήρησης ενός καθαρού εργασιακού περιβάλλοντος στα πλοία (Wei et al., 2024).

Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των πρακτικών καθαρισμού στη ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί αυξανόμενη ανησυχία, ιδίως σε σχέση με τη διάθεση αποβλήτων, την απορροή χημικών ουσιών και την κατανάλωση ενέργειας. Οι παραδοσιακές μέθοδοι καθαρισμού συχνά περιλαμβάνουν τη χρήση σκληρών χημικών ουσιών που μπορούν να μολύνουν τις πηγές νερού και να διαταράξουν τη θαλάσσια ζωή. Η στροφή προς πράσινες λύσεις καθαρισμού αποσκοπεί στον μετριασμό αυτών των κινδύνων με την προώθηση της χρήσης βιώσιμων υλικών και την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων. Επιπλέον, διερευνώνται καινοτόμες τεχνολογίες, όπως οι επικαλύψεις με βάση τη νανοτεχνολογία και τα συστήματα απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία (UV), προκειμένου να μειωθεί η εξάρτηση από τα καθαριστικά μέσα με βάση τα χημικά, ενώ παράλληλα ενισχύεται η μακροζωία του εξοπλισμού εντός του πλοίου (Song & Cui, 2020).

Τεχνολογίες καθαρισμού

Η σύγχρονη τεχνολογία έχει εισαγάγει διάφορες προηγμένες μεθόδους καθαρισμού που καθιστούν τη διαδικασία καθαρισμού πιο αποτελεσματική, οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον. Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες είναι η χρήση ρομποτικών συστημάτων καθαρισμού που μπορούν να προγραμματιστούν για να καθαρίζουν αυτόνομα τις επιφάνειες του πηδαλίου και της προπέλας. Αυτά τα ρομπότ χρησιμοποιούν πίδακες νερού υψηλής πίεσης, τεχνικές καθαρισμού με υπερήχους και συστήματα ηλεκτρικής σκούπας για την απομάκρυνση σκόνης, επικαθίσεων αλάτων και γράσου με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση.

Μια άλλη καινοτομία στην τεχνολογία καθαρισμού πλοίων είναι η εφαρμογή επικαλύψεων με βάση τη νανοτεχνολογία. Αυτές οι επιστρώσεις δημιουργούν μια αυτοκαθαριζόμενη επιφάνεια που απωθεί τη βρωμιά, το νερό και το λάδι, μειώνοντας σημαντικά τη συχνότητα του χειροκίνητου καθαρισμού. Η χρήση της απολύμανσης με ηλεκτροστατικό ψεκασμό έχει επίσης κερδίσει έδαφος στις ναυτιλιακές εφαρμογές, παρέχοντας έναν εξαιρετικά αποτελεσματικό τρόπο απολύμανσης των επιφανειών χωρίς την ανάγκη υπερβολικής χρήσης χημικών (Song & Cui, 2020).

Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί συστήματα ατμοκαθαρισμού με αποδοτική χρήση νερού για την απολύμανση και τον καθαρισμό των επιφανειών των τιμονιών χωρίς τη δημιουργία επιβλαβών υγρών αποβλήτων. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν ατμό υψηλής

θερμοκρασίας για να διαλύσουν τη βρωμιά και να σκοτώσουν τα βακτήρια, καθιστώντας τα ιδανική λύση για τη διατήρηση των προτύπων υγιεινής στα πλοία (Song & Cui, 2020).

Νομοθεσία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία διέπεται από πολυάριθμους κανονισμούς που υπαγορεύουν τις κατάλληλες διαδικασίες καθαρισμού και την περιβαλλοντική συμμόρφωση. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) καθορίζει παγκόσμια πρότυπα για την πρόληψη της ρύπανσης, την ασφάλεια και την υγιεινή, απαιτώντας από τα πλοία να τηρούν αυστηρά πρωτόκολλα καθαριότητας. Η σύμβαση MARPOL, ειδικότερα, περιγράφει τους κανονισμούς σχετικά με τη διάθεση των αποβλήτων, τη χρήση χημικών και την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία.

Επιπλέον, η Σύμβαση Ναυτικής Εργασίας (MLC 2006) τονίζει τη σημασία της ασφάλειας και της ευημερίας του πληρώματος, επιβάλλοντας σε όλα τα πλοία να παρέχουν ένα καθαρό και κατοικήσιμο περιβάλλον για το προσωπικό τους. Οι επιθεωρήσεις του Κρατικού Ελέγχου Λιμένα (PSC) αξιολογούν τακτικά τα πλοία ως προς τη συμμόρφωσή τους με αυτούς τους κανονισμούς, διασφαλίζοντας ότι πληρούν τα απαιτούμενα πρότυπα καθαριότητας και ασφάλειας. Η μη συμμόρφωση με αυτούς τους κανονισμούς μπορεί να οδηγήσει σε υψηλά πρόστιμα, κράτηση ή ακόμη και ανάκληση των αδειών λειτουργίας (Song & Cui, 2020).

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πρακτικών καθαρισμού

Η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει εδώ και καιρό έλεγχο για τον περιβαλλοντικό της αντίκτυπο, ιδίως όσον αφορά τη διάθεση αποβλήτων και τη χρήση επικίνδυνων χημικών ουσιών. Τα παραδοσιακά καθαριστικά περιέχουν φωσφορικά άλατα, πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και άλλες επιβλαβείς ουσίες που μπορεί να είναι επιβλαβείς για τη θαλάσσια ζωή. Όταν απορρίπτονται στον ωκεανό, τα χημικά αυτά συμβάλλουν στη ρύπανση των υδάτων, επηρεάζοντας τα θαλάσσια οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα.

Για να μετριάσουν αυτούς τους κινδύνους, πολλές ναυτιλιακές εταιρείες μεταβαίνουν σε βιοδιασπώμενα προϊόντα καθαρισμού που διασπώνται με φυσικό τρόπο χωρίς να βλάπτουν το υδάτινο περιβάλλον. Οι φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις καθαρισμού, όπως τα απολιπαντικά με βάση τα ένζυμα και οι επιφανειοδραστικές ουσίες φυτικής προέλευσης, προσφέρουν μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση στα συμβατικά χημικά καθαριστικά. Επιπλέον, ενισχύονται τα πρωτόκολλα διαχείρισης αποβλήτων, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα

υπολείμματα καθαρισμού απορρίπτονται ή ανακυκλώνονται σωστά, μειώνοντας το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εργασιών καθαρισμού (Song & Cui, 2020).

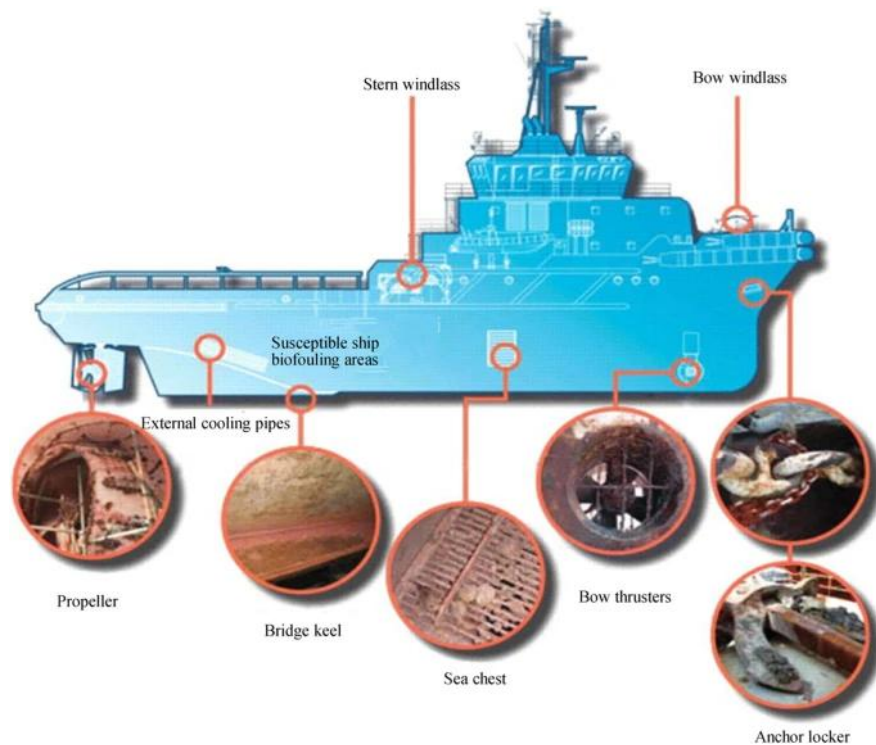
Μια άλλη σημαντική ανησυχία είναι η υπερβολική χρήση νερού στις εργασίες καθαρισμού. Οι παραδοσιακές μέθοδοι καθαρισμού μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική σπατάλη νερού, γεγονός που είναι ιδιαίτερα προβληματικό σε περιοχές που αντιμετωπίζουν έλλειψη γλυκού νερού. Οι τεχνολογίες καθαρισμού με αποδοτική χρήση του νερού, όπως η εκτόξευση με ξηρό πάγο και τα συστήματα καθαρισμού με μικροϊνες, συμβάλλουν στην εξοικονόμηση νερού, διατηρώντας παράλληλα υψηλά πρότυπα καθαριότητας. Αυτές οι μέθοδοι όχι μόνο μειώνουν την κατανάλωση νερού αλλά και εξαλείφουν την ανάγκη για χημικά απορρυπαντικά, ελαχιστοποιώντας περαιτέρω τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Tan et al., 2018).

Η διατήρηση ενός καθαρού και υγιεινού πλοίου είναι ζωτικής σημασίας για την επιχειρησιακή αποδοτικότητα, την ασφάλεια του πληρώματος και την περιβαλλοντική ευθύνη. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία καθαρισμού έχουν παράσχει πιο αποτελεσματικές και βιώσιμες μεθόδους για να διατηρείται η γάστρα, το πηδάλιο και η προπέλα σε βέλτιστη κατάσταση, μειώνοντας παράλληλα τις οικολογικές επιπτώσεις των παραδοσιακών πρακτικών καθαρισμού. Τα νομοθετικά πλαίσια που έχουν θεσπιστεί από τις διεθνείς ναυτιλιακές αρχές διασφαλίζουν ότι τα πλοία τηρούν αυστηρά πρότυπα καθαριότητας και περιβαλλοντικά πρότυπα, προστατεύοντας τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και τα θαλάσσια οικοσυστήματα (Song & Cui, 2020).

Καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία συνεχίζει να εξελίσσεται, η υιοθέτηση καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων καθαρισμού θα είναι υψίστης σημασίας για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας. Με την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών καθαρισμού, την τήρηση των κανονιστικών απαιτήσεων και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι φορείς εκμετάλλευσης της ναυτιλίας μπορούν να διασφαλίσουν τη μακροζωία και την αποδοτικότητα των πλοίων τους, συμβάλλοντας παράλληλα στις παγκόσμιες προσπάθειες διατήρησης.

Τα σκάφη ή οι κατασκευές που βρίσκονται εν μέρει κάτω από την επιφάνεια του θαλασσινού ή του γλυκού νερού υπόκεινται σε διάφορα επίπεδα ρύπανσης από θαλάσσιους (αλμυρό νερό) ή υδρόβιους (γλυκό νερό από λίμνες και ποτάμια) οργανισμούς, αντίστοιχα (Cioanta and McGhin 2017). Στη βάση του μηχανισμού ρύπανσης για τα σκάφη και τις κατασκευές που βρίσκονται σε θαλάσσιο ή γλυκό νερό βρίσκονται τα βιοϊμένια που

σχηματίζονται στις κατασκευές αυτές, τα οποία αποτελούν τη συγκολλητική ουσία μεταξύ των θαλάσσιων ή υδρόβιων οργανισμών και της πραγματικής κατασκευής (Hua et al. 2018). Τα βιοϋμένια σχηματίζονται και οι οργανισμοί ρύπανσης προσκολλώνται σε όλες τις υπόγειες δομές, όπως οι έλικες, τα πηδάλια, οι θύρες εισόδου και εξόδου, τα περιβλήματα σόναρ και τα προστατευτικά πλέγματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Όσο πιο ποικιλόμορφη ή περίπλοκη είναι μια δομή, τόσο πιο δύσκολη και δαπανηρή είναι η απομάκρυνση των βιοϋμενίων και των οργανισμών. Η απόδοση της γάστρας και της προπέλας μπορεί να επιδεινωθεί με την πάροδο του χρόνου λόγω της βιολογικής ρύπανσης και των μηχανικών βλαβών- έτσι, οι κακές συνθήκες της γάστρας μπορεί να μειώσουν την ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, τα βιοϋμένια στη γάστρα μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική του πλοίου αυξάνοντας την αντίσταση και την απαιτούμενη πρόωση. Εάν το πλοίο είναι αδρανές για μεγάλο χρονικό διάστημα ή έχει μικρή δραστηριότητα (για παράδειγμα, παραμονή στο λιμάνι), τότε η ανάπτυξη των θαλάσσιων βιολογικών ρύπων στη γάστρα θα επιταχυνθεί (Tribou & Swain 2010; Adland et al. 2018).



Γράφημα 1: Οι θαλάσσιοι ρυπογόνοι οργανισμοί προσκολλώνται σε όλες τις υποεπιφανειακές δομές του τυπικού πλοίου (Tribou & Swain 2010; Adland et al. 2018)

Η ρύπανση της γάστρας των πλοίων αποτελεί μείζον πρόβλημα που οδηγεί σε υψηλότερη κατανάλωση καυσίμων και, κατά συνέπεια, σε αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση (Cioanta and McGhin 2017; Hua et al. 2018). Η αντίσταση τριβής λόγω της συσσώρευσης βιοϋμενίων, θαλάσσιου χόρτου, αγκαθωτών και άλλων θαλάσσιων πλασμάτων στη γάστρα καθώς ένα σκάφος διέρχεται από το νερό θα αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου. Για παράδειγμα, μια αύξηση της αντίστασης κατά 30% που προκαλείται από τη μέτρια βιολογική μόλυνση της γάστρας ενός δεξαμενόπλοιου χωρητικότητας 100 000-DWT θα αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου του πλοίου έως και 12 τόνους/ημέρα, γεγονός που είναι ο λόγος για την αύξηση του κόστους λειτουργίας του πλοίου και των εκπομπών. Η ρύπανση της γάστρας των πλοίων μπορεί επίσης να προκαλέσει την εξάπλωση ξενικών ειδών που πολλαπλασιάζονται γρήγορα στα τοπικά ύδατα χωρίς φυσικούς εχθρούς (Chen et al., 2023).

Τυπικά, τα περισσότερα πλοία πραγματοποιούν μια ανανέωση της επίστρωσης ανά 3 έως 5 χρόνια (Hua et al. 2018). Επιπλέον, στο Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ, οι εργασίες καθαρισμού της προπέλας συνιστάται να εκτελούνται έξι φορές ετησίως, ενώ ο καθαρισμός της γάστρας τρεις φορές ετησίως (Cioanta and McGhin 2017). Σήμερα χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι για την απαλλαγή των σκαφών από τη βιολογική ρύπανση μέσω καθαρισμού και για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας της γάστρας. Συνοπτικά, οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της βιολογικής ρύπανσης είναι ο καθαρισμός σε δεξαμενή (drydock), η αντιρρυπαντική βαφή και ο περιοδικός υποβρύχιος καθαρισμός (Morrisey and Woods 2015).

Οι Chambers κ.ά. (2006) επεσήμαναν ότι μια καλή μέθοδος απομάκρυνσης της βιολογικής ρύπανσης είναι η χρήση λειαντικών υψηλής πίεσης σε ξηρές αποβάθρες. Κατά τη μέθοδο καθαρισμού σε ξηρά δεξαμενή, οι πλοιοκτήτες αποδέχονται το αυξημένο κόστος πλεύσης και περιμένουν να γίνει πλήρης καθαρισμός και επαναβαφή της γάστρας του πλοίου στην αποβάθρα. Η μέθοδος απαιτεί την είσοδο του πλοίου στην αποβάθρα και την πλήρη έξοδό του από το νερό, και στη συνέχεια τον καθαρισμό της επιφάνειας του πλοίου μέσω υψηλής έντασης ανθρώπινου δυναμικού. Ο καθαρισμός σε ξηρά αποβάθρα έχει τις αδυναμίες των μακρών κύκλων λειτουργίας, της υψηλής έντασης εργασίας και του υψηλού κόστους καθαρισμού. Στη μέθοδο αντιρρυπαντικής βαφής, τα κύτη των πλοίων ψεκάζονται με μαλακό αντιρρυπαντικό χρώμα, το οποίο μπορεί να σκοτώσει αποτελεσματικά ή να επιβραδύνει την ανάπτυξη των οργανισμών απελευθερώνοντας σταδιακά βιοκτόνα. Το αντιρρυπαντικό αποτέλεσμα μειώνεται σημαντικά καθώς το χρώμα γερνάει. Επομένως, το αντιρρυπαντικό χρώμα πρέπει να εφαρμόζεται εκ νέου. Ωστόσο, πολλές δικαιοδοσίες έχουν θεωρήσει

παράνομο τον καθαρισμό της αποβάθρας λόγω των επικίνδυνων ουσιών των σωματιδίων του αντιρρυπαντικού χρώματος που μπορεί να εξαπλωθούν σε μολύνουν το νερό κατά τον καθαρισμό (Smith and Colvin 2014). Στη μέθοδο του περιοδικού υποβρύχιου καθαρισμού συνιστάται η χρήση σκληρών επιστρώσεων που μπορούν να διαρκέσουν τουλάχιστον 10 χρόνια και μπορεί ακόμη και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της γάστρας . Μακροπρόθεσμα, οι σκληρές επιστρώσεις που μπορούν να καθαρίζονται υποβρυχίως αποτελούν βέλτιστη λύση και είναι ουδέτερες για τον ωκεανό, διότι τα απόβλητα που παράγονται από τον καθαρισμό δεν μολύνουν το θαλάσσιο περιβάλλον (Morrisey and Woods 2015).

Ο Oliveira (2017) πρότεινε εργαλεία για τη βελτίωση των σημερινών πρακτικών που σχετίζονται με τη διαχείριση των επιδόσεων της γάστρας , με έμφαση στην αντοχή πρόσφυσης των θαλάσσιων οργανισμών στις διάφορες επιστρώσεις και στις εκτιμήσεις της ρύπανσης της γάστρας . Ο συγγραφέας χρησιμοποιεί τα ακατέργαστα δεδομένα που παρέχονται από τη ναυτιλιακή εταιρεία, τα οποία καλύπτουν μια περίοδο άνω των 3 ετών, για να αντλήσει το ποσοστό απώλειας ταχύτητας και την ταχύτητα του πλοίου. Οι Adland et al. (2018) πρότειναν μια νέα μέθοδο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των περιοδικών εργασιών καθαρισμού της γάστρας στην ενεργειακή απόδοση, συγκρίνοντας την κατανάλωση καυσίμου στο διάστημα μετά τον καθαρισμό του πλοίου. Ο καθαρισμός της γάστρας μπορεί να διαδραματίσει βασικό ρόλο στη βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων, μειώνοντας έτσι το κόστος πλεύσης και τις εκπομπές ρύπων (Cioanta, 2017).

2. Η γάστρα του πλοίου

2.1 Μορφές γάστρας πλοίων

Κάθε τύπος πλοίου παρουσιάζει ουσιώδεις διαφοροποιήσεις, οι οποίες απορρέουν άμεσα από τους εκάστοτε επιχειρησιακούς και λειτουργικούς του στόχους. Ενδεικτικά, ένα επιβατηγό πλοίο σχεδιάζεται με έμφαση στην άνεση, την ευστάθεια και την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων υπηρεσίας, ενώ αντίθετα ένα φορτηγό πλοίο ή ένα δεξαμενόπλοιο δίνει προτεραιότητα στη μέγιστη εκμετάλλευση του ωφέλιμου όγκου και βάρους φορτίου. Κατά συνέπεια, ο ναυπηγικός σχεδιασμός της γάστρας επηρεάζεται καθοριστικά από τον τύπο και την αποστολή του πλοίου, καθώς η μορφή της γάστρας σχετίζεται άμεσα με την υδροδυναμική αντίσταση, την ευστάθεια, την ενεργειακή απόδοση και τη συμπεριφορά του σκάφους στη θάλασσα.

Οι βασικές κατηγορίες μορφών γάστρας μπορούν να ταξινομηθούν ως ακολούθως:

Γάστρες εκτοπίσματος (Displacement hulls)

Οι γάστρες εκτοπίσματος αποτελούν την πλέον διαδεδομένη μορφή στη συμβατική εμπορική ναυτιλία. Κατά την πλεύση τους ακολουθούν τον θεμελιώδη νόμο του Αρχιμήδη,

σύμφωνα με τον οποίο κάθε πλοίο εκτοπίζει όγκο νερού ίσο με το βάρος του. Το εκτόπισμα παραμένει ουσιαστικά ανεξάρτητο της ταχύτητας πλεύσης, ενώ η αύξηση της ταχύτητας συνοδεύεται από έντονη αύξηση της κυματικής αντίστασης. Τυπικά παραδείγματα γασρών εκτοπίσματος αποτελούν τα ποντοπόρα δεξαμενόπλοια, τα φορτηγά πλοία, τα πλοία γενικού φορτίου, καθώς και τα περισσότερα ακτοπλοϊκά συμβατικής ταχύτητας. Η συγκεκριμένη μορφή γάστρας προσφέρει υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα σε χαμηλές και μέσες ταχύτητες, καθώς και αυξημένη μεταφορική ικανότητα (Song & Cui, 2020).

Γάστρες ημικτοπίσματος και ημιπλαναρίσματος (Semi-displacement / Semi-planing hulls)

Οι γάστρες ημικτοπίσματος και ημιπλαναρίσματος αποτελούν μεταβατική κατηγορία μεταξύ των γασρών εκτοπίσματος και πλαναρίσματος. Χαρακτηρίζονται συνήθως από στρογγυλεμένη ή τύπου “V” διατομή, η οποία καταλήγει σε σχετικά φαρδιά πρύμνη. Σε αυξημένες ταχύτητες, μέρος της άντωσης προέρχεται πλέον από υδροδυναμικά φαινόμενα και όχι αποκλειστικά από το εκτόπισμα. Με τη χρήση αυξημένης εγκατεστημένης ισχύος, το σκάφος μειώνει το αποτελεσματικό του εκτόπισμα και επιτυγχάνει χαμηλότερη συνολική αντίσταση σε σύγκριση με τις γάστρες εκτοπίσματος. Οι συγκεκριμένες μορφές συναντώνται συχνά σε ταχέα επιβατηγά, σκάφη ειδικών αποστολών και ορισμένα πολεμικά ή βοηθητικά πλοία.

Γάστρες πλαναρίσματος (Planing hulls)

Οι γάστρες πλαναρίσματος έχουν τη δυνατότητα, σε υψηλές ταχύτητες, να ανασηκώνουν σημαντικό τμήμα τους εκτός της επιφάνειας του νερού, με αποτέλεσμα η πλεύση να βασίζεται κυρίως σε υδροδυναμική άντωση. Η υγρή επιφάνεια της γάστρας μειώνεται αισθητά, περιορίζοντας τις τριβές και επιτρέποντας την επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν τα σύγχρονα μηχανοκίνητα σκάφη αναψυχής μικρού και μεσαίου μεγέθους, τα ταχύπλοια σκάφη αναψυχής και ορισμένα ταχέα στρατιωτικά ή επαγγελματικά σκάφη, με κυρίαρχες μορφές γάστρας τύπου “V” ή επίπεδης/στρογγυλεμένης διατομής (Ferreira et al., 2013).

Πολυκάρινες γάστρες (Multihull vessels)

Οι πολυκάρινες γάστρες περιλαμβάνουν σκάφη με δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες γάστρες. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα καταμαράν (δύο γάστρες) και τα τριμαράν (τρεις γάστρες). Παρότι τα σκάφη αυτά δεν πλανάρουν συνήθως, μπορούν να επιτυγχάνουν υψηλές ταχύτητες πλεύσης, λόγω της μειωμένης βρεχόμενης επιφάνειας κάθε επιμέρους γάστρας. Τα πολυκάρινα πλοία παρουσιάζουν εξαιρετικά αυξημένη εγκάρσια ευστάθεια,

απαιτούν μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με μονοκάρινα πλοία ίδιου μήκους και προσφέρουν αυξημένη ωφέλιμη επιφάνεια καταστρώματος. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται ευρέως σε ταχεία επιβατηγά, οχηματαγωγά, καθώς και σε σύγχρονες στρατιωτικές και ερευνητικές εφαρμογές (Oliveira, 2017).

Για λόγους πληρότητας, αξίζει να αναφερθούν και ειδικότερες μορφές γάστρας που απαντώνται σε εξειδικευμένες θαλάσσιες κατασκευές, όπως:

1. Γάστρες τύπου SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull), με ιδιαίτερα μειωμένη επιφάνεια ίσαλου για βελτιωμένη συμπεριφορά σε κυματισμό.
2. Γάστρες υδροπτερυγών (Hydrofoil vessels), όπου η άντωση επιτυγχάνεται μέσω πτερυγίων κάτω από την επιφάνεια του νερού.
3. Γάστρες με αερόστρωμα (Air cushion / SES), που συνδυάζουν χαρακτηριστικά πλοίων και αεροσκαφών για πολύ υψηλές ταχύτητες.

2.2 Επίδραση της ρύπανσης της γάστρας στην απόδοση του πλοίου

Η συσσώρευση βιολογικών οργανισμών στις βυθισμένες επιφάνειες των πλοίων μεταβάλλει άμεσα την υδροδυναμική απόδοση και έχει σημαντικές οικονομικές, λειτουργικές και οικολογικές συνέπειες. Αν και το φαινόμενο μπορεί αρχικά να εμφανίζεται ως ένα λεπτό βιοφίλμ ή στρώμα λάσπης, οι επιπτώσεις του στην αντίσταση, την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές αυξάνονται ραγδαία. Η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών και η ποσοτικοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη ρύπανση είναι επομένως θεμελιώδους σημασίας τόσο για τους πλοιοκτήτες όσο και για τις ρυθμιστικές αρχές, καθώς συνδέουν τις συνήθεις πρακτικές συντήρησης με τις παγκόσμιες προσπάθειες για την αντιμετώπιση της κλιματικής και τον περιορισμό της θαλάσσιας ρύπανσης (Floerl et al., 2010).

Η σχέση μεταξύ της κατάστασης της επιφάνειας και της υδροδυναμικής αντίστασης είναι καλά τεκμηριωμένη στη ναυπηγική. Ο Schultz (2007) απέδειξε ότι τόσο η τραχύτητα της επιφάνειας από τις επικαλύψεις όσο και η παρουσία οργανισμών ρύπανσης αυξάνουν το πάχος του στρώματος οριακής αναταραχής, το οποίο μεταβάλλει τα προφίλ ταχύτητας και ενισχύει την τριβή του δέρματος. Η παρουσία ακόμη και ενός ελαφρού στρώματος λάσπης, που αποτελείται από βακτηριακά φιλμ σε αρχικό στάδιο, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της τριβής κατά 10 έως 20 τοις εκατό σε σχέση με ένα καθαρό, λείο κύτος. Ο Townsin (2003) τόνισε περαιτέρω ότι η επίδραση της ρύπανσης στην αντίσταση είναι μη γραμμική: ενώ τα

αρχικά στρώματα προσθέτουν μέτρια αντίσταση, η προσκόλληση ασβεστοειδών οργανισμών, όπως οι πεταλίδες ή οι σωληνοειδείς σκώληκες, προκαλεί απότομες αυξήσεις στη συνολική αντίσταση. Αυτές οι μορφές σκληρών ακαθαρσιών όχι μόνο προεξέχουν στη ροή, αλλά δημιουργούν επίσης τοπικές αναταράξεις και διαχωρισμό της ροής, οδηγώντας σε αύξηση της αντίστασης κατά 30 έως 40 τοις εκατό ή και περισσότερο σε ακραίες περιπτώσεις. Το ακριβές μέγεθος της απώλειας αντίστασης εξαρτάται από την ταχύτητα του σκάφους, τη γεωμετρία της γάστρας και την κάλυψη της επιφάνειας, αλλά όλες οι μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι ακαθαρσίες της γάστρας υπονομεύουν σημαντικά την υδροδυναμική απόδοση για την οποία έχει σχεδιαστεί (Guo et al., 2022).

Η αυξημένη αντίσταση μεταφράζεται άμεσα σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος πρόωσης. Τα σύγχρονα πλοία σχεδιάζονται με συγκεκριμένες ταχύτητες λειτουργίας, οι οποίες επιτυγχάνονται με την εξισορρόπηση της αντίστασης της γάστρας και της διαθέσιμης ισχύος του άξονα. Όταν η αντίσταση αυξάνεται λόγω ρύπανσης, το σύστημα πρόωσης πρέπει να παράγει περισσότερη ώθηση για να διατηρήσει την ίδια ταχύτητα. Ο Schultz (2007) υπολόγισε ότι για τα πολεμικά πλοία, η μέτρια ρύπανση μπορεί να απαιτήσει 20 έως 30 τοις εκατό επιπλέον ισχύ άξονα, ενώ η σοβαρή ρύπανση μπορεί να απαιτήσει αυξήσεις που προσεγγίζουν το 50 τοις εκατό. Για τα εμπορικά πλοία που λειτουργούν με σταθερές ταχύτητες, το απαιτούμενο φορτίο του κινητήρα αυξάνεται αναλογικά με την αντίσταση, οδηγώντας σε πολύ υψηλότερη ζήτηση ενέργειας. Ο Candries (2001) υποστήριξε αυτά τα ευρήματα μέσω ελεγχόμενων πειραμάτων σε δεξαμενή ρυμούλκησης που ποσοτικοποίησαν τις τροποποιήσεις της τραχύτητας και του οριακού στρώματος που σχετίζονται με τη βιολογική ρύπανση, ενισχύοντας την άμεση σχέση μεταξύ της αύξησης της ρύπανσης, της πρόσθετης αντίστασης και της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης.

Αυτές οι αυξημένες απαιτήσεις ισχύος μεταφράζονται αναπόφευκτα σε υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου, η οποία είναι ο κυρίαρχος παράγοντας του λειτουργικού κόστους του πλοίου. Ο Townsin (2003) εκτίμησε ότι μια ελαφρώς ρυπασμένη γάστρα μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου κατά 10%, ενώ οι βαριά ρυπασμένες επιφάνειες μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 30 έως 40%. Ο Schultz (2007) παρείχε συμπληρωματικές εκτιμήσεις, σημειώνοντας ότι ένα μόνο στρώμα λάσπης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 18% για τα πολεμικά πλοία, με τους σκληρούς οργανισμούς ρύπανσης να προκαλούν αύξηση που υπερβαίνει το 40%. Για τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που καταναλώνουν εκατοντάδες τόνους καυσίμου ανά ταξίδι, τέτοιες αυξήσεις αντιπροσωπεύουν υψηλό λειτουργικό κόστος. Τα

πρότυπα ISO 19030 (2016α, 2016β) αναπτύχθηκαν ειδικά για να παρέχουν στους πλοιοκτήτες τυποποιημένες μεθόδους για την παρακολούθηση των απωλειών απόδοσης της γάστρας και της προπέλας, αναγνωρίζοντας ότι η βιολογική ρύπανση είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που συμβάλλουν στη μεταβλητότητα της κατανάλωσης καυσίμου. Αυτά τα πρότυπα υπογραμμίζουν ότι ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην κατάσταση της γάστρας του πλοίου επηρεάζουν σημαντικά τη μακροπρόθεσμη λειτουργική αποδοτικότητα και τον προϋπολογισμό καυσίμων (Guo et al., 2022).

Οι συνέπειες της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμων εκτείνονται πέρα από τις οικονομικές επιπτώσεις και φτάνουν στον τομέα των περιβαλλοντικών εκπομπών. Δεδομένου ότι τα περισσότερα ποντοπόρα πλοία βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα όπως βαρύ πετρέλαιο, ναυτικό ντίζελ ή υγροποιημένο φυσικό αέριο, η υψηλότερη ζήτηση ενέργειας μεταφράζεται άμεσα σε μεγαλύτερη παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου και ρύπων. Ο Schultz (2007) υπολόγισε ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του θείου και οξειδίων του αζώτου αυξάνονται αναλογικά με την πρόσθετη κατανάλωση καυσίμων. Για παράδειγμα, μια αύξηση κατά 20% της ισχύος λόγω ρύπανσης έχει ως αποτέλεσμα περίπου 20% αύξηση των εκπομπών CO₂ ανά ταξίδι. Σε κλίμακα στόλου, αυτό αντιπροσωπεύει εκατοντάδες εκατομμύρια τόνους επιπλέον αερίων του θερμοκηπίου κάθε χρόνο, που αποδίδονται αποκλειστικά στην παρουσία βιολογικής ρύπανσης της γάστρας. Αυτή η κατάσταση υπονομεύει τις διεθνείς στρατηγικές μετριασμού των κλιματικών αλλαγών, ιδίως τις φιλοδοξίες του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 2008 (Guo et al., 2022).

Πέρα από το διοξείδιο του άνθρακα, οι αέριοι ρύποι που συνδέονται με την αυξημένη χρήση καυσίμων επιδεινώνουν τα περιφερειακά και παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι υψηλότερες εκπομπές οξειδίου του αζώτου συμβάλλουν στο σχηματισμό όζοντος στο επίπεδο του εδάφους και στην οξίνιση, ενώ τα αυξημένα οξείδια του θείου επιβαρύνουν το φαινόμενο της όξινης βροχής και το σχηματισμό σωματιδίων.

Οι Candries (2001) και Townsin (2003) τόνισαν ότι το εξωτερικό περιβαλλοντικό κόστος που συνδέεται με τις εκπομπές που προκαλούνται από την ρύπανση συχνά υπερβαίνει το άμεσο λειτουργικό κόστος των καυσίμων. Έτσι, ο έλεγχος της ρύπανσης της γάστρας έχει σημασία όχι μόνο για τους πλοιοκτήτες αλλά και για την κοινωνία στο σύνολό της, καθώς

επιρεάζει την ποιότητα του αέρα, την ανθρώπινη υγεία και την ακεραιότητα του οικοσυστήματος.

Η επίδραση της ρύπανσης δεν είναι ομοιόμορφη σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Τα πλοία που λειτουργούν με χαμηλότερες ταχύτητες, όπως αυτά που εφαρμόζουν αργή πλεύση για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, είναι παραδόξως πιο ευάλωτα στις επιπτώσεις της ρύπανσης. Ο Schultz (2007) παρατήρησε ότι η σχετική αύξηση της αντίστασης λόγω της ρύπανσης είναι αναλογικά μεγαλύτερη σε χαμηλότερους αριθμούς Froude, πράγμα που σημαίνει ότι τα πλοία που πλέουν με αργή ταχύτητα ενδέχεται να χάσουν μεγάλο μέρος του οφέλους από την αποδοτικότητα που επιδιώκουν μέσω της μειωμένης ταχύτητας (Hua et al., 2018).

Ομοίως, τα σκάφη που λειτουργούν σε ζεστά, πλούσια σε θρεπτικά συστατικά νερά συσσωρεύουν ρύπανση πιο γρήγορα, απαιτώντας πιο συχνές κύκλους καθαρισμού για να αποφευχθεί η σοβαρή υποβάθμιση της απόδοσης. Αυτή η περιφερειακή μεταβλητότητα δημιουργεί ένα πολύπλοκο λειτουργικό τοπίο στο οποίο η βιολογική ρύπανση πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσαρμοστικό τρόπο. Μια άλλη διάσταση που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η έμμεση επίδραση της ρύπανσης στην αποδοτικότητα της προπέλας. Αν και η αντίσταση της γάστρας είναι η πιο άμεση επιβάρυνση, η τραχιά ροή στο δίσκος της προπέλας μειώνει την αποδοτικότητα της προπέλας και αυξάνει τον κίνδυνο σπηλαίωσης.

Το πρότυπο ISO 19030-3 (2016) περιλαμβάνει μεθόδους για την παρακολούθηση των συνδυασμένων απωλειών απόδοσης της γάστρας και της προπέλας, αναγνωρίζοντας ότι η ρύπανση επιρεάζει και τα δύο στοιχεία του συστήματος πρόωσης. Επομένως, οι πραγματικές απώλειες ισχύος λόγω ρύπανσης μπορεί να υπερβαίνουν τις εκτιμήσεις που βασίζονται αποκλειστικά στην αντίσταση της γάστρας, καθώς περιλαμβάνουν και απώλειες πρόωσης.

Η αυξανόμενη έμφαση στην παρακολούθηση της απόδοσης αντικατοπτρίζει μια μετατόπιση της βιομηχανίας από την αντιδραστική προς την προληπτική διαχείριση των επιπτώσεων της ρύπανσης. Τα πρότυπα ISO 19030 παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές για τη χρήση δεδομένων λειτουργίας των σκαφών, όπως η ταχύτητα στο νερό και η ισχύς του άξονα, για την εκτίμηση των αποκλίσεων από την βασική απόδοση. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν στους χειριστές να ποσοτικοποιήσουν τις απώλειες καυσίμου και να προγραμματίσουν παρεμβάσεις στον καθαρισμό με βάση τα δεδομένα και όχι σε σταθερά χρονικά διαστήματα (Hua et al., 2018).

Οι Schultz (2007) και Townsin (2003) τόνισαν ότι τέτοιες προληπτικές στρατηγικές είναι απαραίτητες για την αποφυγή παρατεταμένων περιόδων απώλειας αποδοτικότητας, οι οποίες όχι μόνο αυξάνουν το κόστος, αλλά και αυξάνουν δυσανάλογα τις εκπομπές.

Τα συσσωρευμένα στοιχεία αποδεικνύουν ότι οι απώλειες ισχύος λόγω ρύπανσης είναι σημαντικές και αναπόφευκτες χωρίς αποτελεσματική διαχείριση. Ακόμη και τα προηγμένα επιχρίσματα κατά της ρύπανσης δεν μπορούν να αποτρέψουν επ' αόριστον τον σχηματισμό βιοφίλμ, και ως εκ τούτου όλα τα πλοία αντιμετωπίζουν κάποιο βαθμό απώλειας απόδοσης μεταξύ των επισκέψεων σε ξηρά δεξαμενή. Ο Townsin (2003) υποστήριξε ότι η μόνη ορθολογική προσέγγιση είναι να αντιμετωπίζεται ο έλεγχος της ρύπανσης ως αναπόσπαστο μέρος της διαχείρισης της ενέργειας και της μείωσης των εκπομπών, και όχι ως δευτερεύουσα εργασία συντήρησης. Αυτή η προοπτική έχει έκτοτε κωδικοποιηθεί σε σχέδια διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης που ενθαρρύνει ο ΔΝΟ, όπου η κατάσταση της γάστρας συνδέεται ρητά με δείκτες έντασης άνθρακα κατά τη λειτουργία.

Συμπερασματικά, η ρύπανση της γάστρας ασκεί βαθιά επίδραση στην αντίσταση του πλοίου, την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές. Το σύνολο των εμπειρικών και θεωρητικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν από τους Schultz (2007), Townsin (2003), Candries (2001) και τα επακόλουθα πρότυπα ISO παρέχουν μια συνεκτική εικόνα: η ρύπανση μετατρέπει τις λείες υδροδυναμικές επιφάνειες σε ακανόνιστα εμπόδια που δημιουργούν στροβιλισμούς, προκαλώντας απώλειες που μπορούν να φτάσουν το 40 % ή και περισσότερο σε σοβαρές περιπτώσεις. Αυτές οι επιπτώσεις επιβαρύνουν σημαντικά τους πλοιοκτήτες και υπονομεύουν τους διεθνείς στόχους για το κλίμα, προσθέτοντας εκατοντάδες εκατομμύρια τόνους περιττών εκπομπών κάθε χρόνο. Η διαχείριση της ρύπανσης της γάστρας δεν είναι επομένως απλώς ένα τεχνικό ζήτημα συντήρησης των πλοίων, αλλά ένας ακρογωνιαίος λίθος της βιώσιμης θαλάσσιας μεταφοράς. Η συνεχής ανάπτυξη προτύπων παρακολούθησης και η ενσωμάτωση της διαχείρισης της ρύπανσης σε κανονιστικά πλαίσια είναι ουσιαστικά βήματα προς την άμβλυνση των επιπτώσεών της τόσο στην οικονομία της ναυτιλίας όσο και στο παγκόσμιο περιβάλλον.

3. Τεχνολογίες και μέθοδοι καθαρισμού

Οι αρχικές εργασίες καθαρισμού εκτελούνται από τεχνίτες για την απομάκρυνση της βιολογικής ρύπανσης με το χέρι. Οι Floerl et al. (2010) παρουσίασαν ότι το χειροκίνητο τρίψιμο ή σκούπισμα χρησιμοποιείται ευρέως στον καθαρισμό σκαφών αναψυχής.

Έχουν κατασκευαστεί διάφορα νέα εργαλεία καθαρισμού που αυξάνουν την αποτελεσματικότητα των εργασιών καθαρισμού και μειώνουν σημαντικά την ένταση της εργασίας των εργασιών. Οι μέθοδοι και τα εργαλεία καθαρισμού μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Χειροκίνητος καθαρισμός γάστρας
2. Μηχανοκίνητα συστήματα καθαρισμού με περιστροφική βούρτσα
3. Τεχνολογία καθαρισμού χωρίς επαφή (Hua et al., 2018).

3.1 Χειροκίνητος καθαρισμός γάστρας

Ο χειρωνακτικός καθαρισμός των επιφανειών βιολογικής ρύπανσης πραγματοποιείται συνήθως σε μικρά πλοία, π.χ. σκάφη αναψυχής και μικρά αλιευτικά σκάφη. Ανάλογα με την ποσότητα και τα χαρακτηριστικά της βιολογικής ρύπανσης (π.χ. γλίτσα, βιοφίλμ, θαλάσσιο χόρτο και οργανισμοί που προσκολλώνται) και με τον τύπο της αντιρρυπαντικής επίστρωσης που εφαρμόζεται, χρησιμοποιούνται πανιά, βούρτσες ή

συσκευές απόξεσης για την απομάκρυνση των οργανισμών βιολογικής ρύπανσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Γράφημα 2: Χειροκίνητα εργαλεία και μέθοδοι καθαρισμού της γάστρας (Floerl et al., 2010)).

Όταν ένας δύτης πραγματοποιεί χειροκίνητο καθαρισμό, η απομάκρυνση όλων των θαλάσσιων οργανισμών στη γάστρα είναι αδύνατη. Πραγματοποιήθηκε έρευνα σχετικά με τον βαθμό υπολειπόμενης βιολογικής ρύπανσης στο πηδάλιο, την προπέλα, τον πρυμναίο σωλήνα και τα υποστρώματα του σκάφους πριν και μετά τον χειροκίνητο καθαρισμό. Ένας επαγγελματίας δύτης που στάλθηκε από την εταιρεία καθαρισμού καθάρισε τη βιολογική ρύπανση με τη χρήση χειροκίνητης βούρτσας, αλλά περίπου το 40% των ειδών παρέμεινε στην υπό εξέταση περιοχή ακόμη και μετά την εργασία καθαρισμού (Hua et al. 2018).

3.2 Μηχανοκίνητα συστήματα καθαρισμού με περιστροφική βούρτσα

Οι μέθοδοι υποβρύχιου καθαρισμού έχουν σταδιακά εξελιχθεί από τη χειροκίνητη λειτουργία σε μηχανολογικό εξοπλισμό, ιδίως για μεγάλα σκάφη. Έχουν αναπτυχθεί φορητοί καθαριστές, μεγάλος εξοπλισμός καθαρισμού και συστήματα ρομπότ καθαρισμού. Οι συσκευές με μεγάλες βούρτσες μπορούν συνήθως να χρησιμοποιηθούν όταν καθαρίζονται γρήγορα επίπεδες ή ελαφρώς καμπύλες περιοχές της γάστρας, ενώ οι μικρές βούρτσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για καλύτερα αποτελέσματα όταν καθαρίζεται η προπέλα (Hua et al. 2018). Μια απλή βούρτσα ή πολλαπλές βούρτσες που τροφοδοτούνται από υδραυλικούς κινητήρες θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε μεγάλες συσκευές περιστροφικών βουρτσών.

Μη ηλεκτροκίνητη βούρτσα καθαρισμού

Οι βούρτσες χρησιμοποιούνται συνεχώς για την απομάκρυνση των επικαθίσεων από την επιφάνεια των πλοίων. Γενικά, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι βουρτσών ανάλογα με τον τύπο της βιολογικής ρύπανσης που πρέπει να αφαιρεθεί και τη βαφή των πλοίων. Οι νάιλον βούρτσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν καθαρίζεται ένα ορισμένο πάχος λάσπης και θαλάσσιου χόρτου στη γάστρα, ενώ οι ατσάλινες βούρτσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν καθαρίζονται οι αχιβάδες, το βαρύ χόρτο και τα μύδια ζέβρας. Η κατάλληλη βούρτσα καθαρισμού πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με το υλικό κατασκευής της γάστρας. Για παράδειγμα, οι νάιλον ή μη μεταλλικές βούρτσες χρησιμοποιούνται σε πλοία κατασκευασμένα από υαλονήματα, ξύλο, αλουμίνιο και χάλυβα, ενώ οι μεταλλικές βούρτσες χρησιμοποιούνται σε πλοία κατασκευασμένα από αλουμίνιο ή χάλυβα. Πολλές εταιρείες έχουν εργαστεί σε συσκευές υποβρύχιου καθαρισμού της γάστρας που χρησιμοποιούνται ευρέως, συμπεριλαμβανομένων των Armada Systems, Inc.(www.armadahull.com), Subsea Industries(www.subind.net) και Phosmarine Brush Kartetc(www.brush-kart.com).

Μηχανοκίνητες περιστρεφόμενες συσκευές

Οι χειροκίνητες συσκευές περιστρεφόμενης βούρτσας μπορούν να χωριστούν σε συσκευές με μία κεφαλή βούρτσας, με διπλή κεφαλή βούρτσας και με πολλαπλές κεφαλές βούρτσας. Η τροφοδοτούμενη περιστρεφόμενη συσκευή παράγει τη δύναμη προσρόφησης κατά την περιστροφή των μονάδων βούρτσας, η οποία την κάνει να έλκεται από το κύτος. Ο δύτες μπορεί να ρυθμίσει την κατεύθυνση καθαρισμού της συσκευής και την ταχύτητα περιστροφής της βούρτσας ανάλογα με την περιοχή καθαρισμού (Albitar et al. 2016). Εκτός από τις υδραυλικές βούρτσες, στα υποβρύχια ρομπότ χρησιμοποιούνται συσκευές με ηλεκτρική τροφοδοσία. Εταιρείες όπως η Armada Systems, Inc. και η Subsea Industry που επικεντρώνονται στην ανάπτυξη εξοπλισμού καθαρισμού της θάλασσας έχουν κατασκευάσει πολλές ηλεκτροκίνητες περιστρεφόμενες συσκευές που χρησιμοποιούν διαφορετικές βούρτσες για την απομάκρυνση των θαλάσσιων οργανισμών που είναι προσκολλημένοι στο υποβρύχιο κύτος για να προσαρμόζονται σε διαφορετικά κύτη και επιστρώματα (IMO, 2023).

3.3 Μέθοδος υποβρύχιου καθαρισμού χωρίς επαφή

Ο καθαρισμός ή η περιποίηση ενός θαλάσσιου ή υδρόβιου σκάφους ή μιας πλωτής κατασκευής, όπως τα πλοία και οι πλατφόρμες πετρελαίου, περιλαμβάνει γενικά μεθόδους που χρησιμοποιούν βούρτσες, ξύστρες και άλλα λειαντικά μέσα για τον καθαρισμό (Cioanta

and McGhin 2017). Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να είναι επιζήμιες για τις συγκολλήσεις, τα πριτσίνια και τις προεξοχές των σκαφών ή των υποβρύχιων κατασκευών, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη μηχανική τους ακεραιότητα. Οι σημερινές μέθοδοι καθαρισμού ή περιποίησης δεν επαρκούν για να είναι διεξοδικές, αφήνοντας πίσω βιοϋμένια, τα οποία αντιπροσωπεύουν το υπόστρωμα και περιέχουν τα θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούν οι διάφοροι θαλάσσιοι οργανισμοί για την ανάπτυξη και την αγκύλωση (Cioanta and McGhin 2017). Στην παρούσα ενότητα, εξετάζουμε κυρίως τις μεθόδους και συσκευές καθαρισμού χωρίς επαφή, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου πίδακα νερού υψηλής πίεσης, της μεθόδου πίδακα νερού σπηλαίωσης και της μεθόδου καθαρισμού με υπερήχους. Όταν αυτές οι τεχνικές καθαρισμού χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της βιολογικής ρύπανσης από το κύτος, η ζημιά στην επίστρωση μπορεί να μειωθεί καλύτερα σε σύγκριση με τις περιστρεφόμενες βούρτσες (Morrisey and Woods 2015).

Καθαρισμός με πίδακες νερού υψηλής πίεσης

Η μέθοδος καθαρισμού με νερό υψηλής πίεσης βασίζεται στη δική της δύναμη κρούσης για την απομάκρυνση της βιολογικής ρύπανσης από το κύτος. Μια υψηλή πίεση λειτουργίας αντιστοιχεί σε καλό αποτέλεσμα καθαρισμού (Albitar et al. 2016). Ορισμένοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει την τεχνολογία νερού υψηλής πίεσης στον υποβρύχιο καθαρισμό της γάστρας (Hua et al. 2018; Yan et al. 2019).

Εάν χρησιμοποιείται η κατάλληλη πίεση νερού για την ασφαλή απομάκρυνση του στρώματος γλίτσας, τότε η επίδραση στην επίστρωση της γάστρας είναι ελάχιστη (Floerl et al. 2010).

Το HullWiper (HullWiper, <https://www.hullwiper.co/>), που φαίνεται στην εικόνα 6α, καθαρίζει το κύτος και ταυτόχρονα συλλέγει τα βιολογικά ρύπους που απομακρύνονται από το πλοίο αντί να τα απορρίπτει απευθείας στο νερό- το τελευταίο προκαλεί τον κίνδυνο εξάπλωσης των ειδών. Το HullWiper λαμβάνει το νερό ως μέσο για τον καθαρισμό της γάστρας και ψεκάζει νερό υψηλής πίεσης έως 50-450 bar στη γάστρα, καθαρίζοντας έως 1500m²/h, για την απομάκρυνση των βιολογικών ρύπων. Το όχημα Magnetic Hull Crawler (Cybernetix, www.cybernetix.fr), που φαίνεται στην εικόνα 6β, είναι ένα τηλεχειριζόμενο σύστημα που προορίζεται για την επιθεώρηση, τον καθαρισμό και τη συντήρηση πλοίων, υπεράκτιων πλωτών μονάδων και υπεράκτιων βιομηχανιών πετρελαίου και φυσικού αερίου και χρησιμοποιείται για περισσότερα από 10 χρόνια. Το Magnetic Hull Crawler χρησιμοποιεί πίδακες υψηλής πίεσης έως και 1000 bar, με διαθέσιμα διαφορετικά ανοίγματα πίδακα και

γωνίες προσβολής. Το υποβρύχιο πλάτος καθαρισμού του συστήματος είναι 500 mm και η απόδοση καθαρισμού μπορεί να φτάσει τα 100-200m²/h. Οι Hua et al. (2018) σχεδίασαν ένα σύστημα υδροβολής που λειτουργεί εν πλω με τη χρήση πίδακα καθαρισμού νερού υψηλής πίεσης για την αντιμετώπιση της βιολογικής ρύπανσης των πλοίων.

Σπηλαιώδεις πίδακες καθαρισμού νερού

Η τεχνολογία πίδακα νερού σπηλαίωσης είναι μια βελτιωμένη έκδοση της τεχνολογίας καθαρισμού νερού υψηλής πίεσης που χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένα ακροφύσια, τα οποία μετατρέπουν το νερό υψηλής πίεσης σε νερό σπηλαίωσης (Yan et al. 2019; Floerl et al. 2010). Ο πίδακας σπηλαίωσης εισάγει σπηλαίωση στο καθαρό νερό υψηλής πίεσης, το οποίο είναι ιδιαίτερα επιθετικό και ενισχύει τον καθαρισμό της γάστρας. Ο αριθμός των φυσαλίδων στο νερό σπηλαίωσης μπορεί να αυξηθεί με τη βελτίωση του σχεδιασμού του ακροφυσίου. Οι φυσαλίδες διαρρηγνύονται καθώς πλησιάζουν το κύτος, με αποτέλεσμα πολύ υψηλές τοπικές τάσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη ισχύ καθαρισμού. Αυτό το χαρακτηριστικό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους συμβατικούς πίδακες νερού υψηλής πίεσης που λειτουργούν με την ίδια πίεση αντλίας. Πολλές εταιρείες έχουν αναπτύξει ακροφύσια πίδακα και συσκευές/συστήματα καθαρισμού που βασίζονται στην τεχνολογία πίδακα νερού σπηλαίωσης για να καταστεί δυνατή η αποτελεσματικότητα του υποβρύχιου καθαρισμού. Παίρνοντας ως παράδειγμα την Cavi-Jet International, εξετάσαμε τα τυπικά προϊόντα της για τον πίδακα νερού με σπηλαίωση (Kim et al., 2024).

Η Cavi-Jet International προσφέρει μια ποικιλία συστημάτων καθαρισμού της γάστρας, από φορητό εξοπλισμό έως οχήματα που λειτουργούν με δύτες. Τα πιστόλια Cavi-Jet χρησιμοποιούνται από δύτες για τον καθαρισμό πολύπλοκων επιφανειών διαφορετικών σχημάτων και περιοχών στις οποίες είναι δύσκολο να φτάσει ο μεγάλος εξοπλισμός καθαρισμού. Το πιστόλι Cavi-Jet με νερό και αμμοβολή είναι ειδικά σχεδιασμένο για την αφαίρεση σκληρών θαλάσσιων ρύπων στη γάστρα. Αυτά τα πιστόλια Cavi-Jet μπορούν να επεξεργαστούν έως και 50-100m² σκληρών φυκιών, οστρακοειδών και βρωμιάς από κοχύλια ή 100-250 m² μαλακών βρωμιάς από αχιβάδες και κοχύλια ανά ώρα, με ισχύ αντλίας 25-35 MPa. Τα ακροφύσια Cavi-Jet, χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό της επίπεδης και ελαφρώς καμπυλωτής επιφάνειας του σκάφους και είναι εξοπλισμένα με σύστημα αναρρόφησης για προσκόλληση στη γάστρα που καθαρίζεται. Τα ρομπότ Cavi-Jet, θα μπορούσαν να χειρίζονται εξ αποστάσεως για τον καθαρισμό ελαφρώς καμπυλόγραμμων επιφανειών της γάστρας με υψηλή ταχύτητα (Kim et al., 2024).

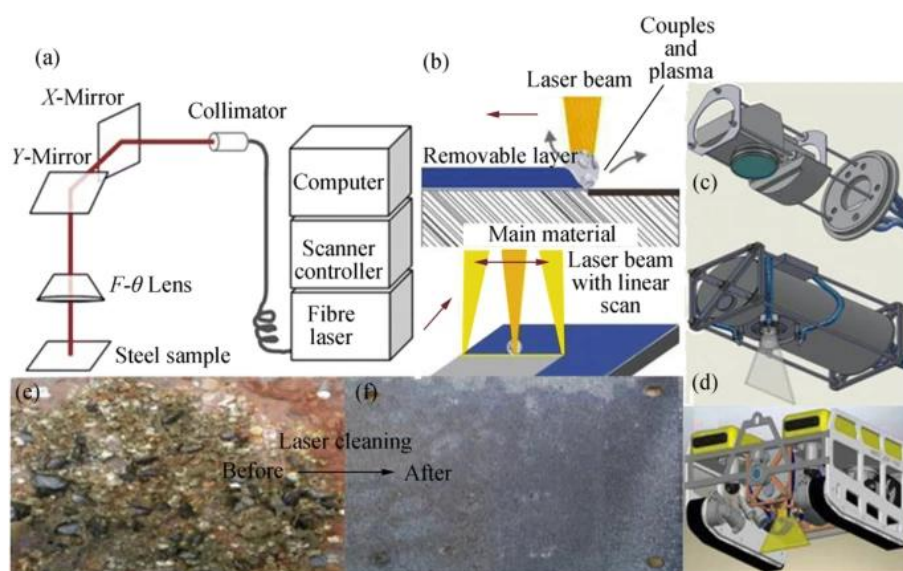
Τεχνολογία καθαρισμού με υπερήχους

Τις τελευταίες δεκαετίες, η τεχνολογία καθαρισμού με υπερήχους έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές καθαρισμού, π.χ. σε ιατρικό εξοπλισμό, κοσμήματα, σκάφη και θαλάσσιες κατασκευές (Albitar et al. 2016; Yan et al. 2019). Η εφαρμογή της τεχνολογίας καθαρισμού με υπερήχους στον υποβρύχιο καθαρισμό πλοίων κατέστη δυνατή λόγω της ταχείας ανάπτυξης των ψηφιακών ηλεκτρονικών και της τεχνολογίας των μετατροπέων τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η μέθοδος βασίζεται στην ταυτόχρονη παραγωγή ενεργειακών παλμών υπερήχων σε ένα πλήθος περιοχών συχνοτήτων. Η ενέργεια αυτή παράγει ένα μοτίβο εναλλασσόμενων θετικών και αρνητικών πιέσεων. Αυτό το εναλλασσόμενο μοτίβο παράγει στη συνέχεια μικροσκοπικές φυσαλίδες κατά τη διάρκεια της αρνητικής πίεσης και εμφυσά τις φυσαλίδες κατά τη διάρκεια της θετικής πίεσης. Η καταστροφική ενέργεια της εμφύσησης όχι μόνο παρέχει αποτέλεσμα καθαρισμού στη γάστρα αλλά θα μπορούσε επίσης να εξαλείψει σε κάποιο βαθμό τα θαλάσσια πλάσματα που απομακρύνονται από το κύτος (Yan et al. 2019).

Οι Mazue κ.ά. (2011) σχεδίασαν ένα σύστημα καθαρισμού που αποτελείται από τρεις μετατροπείς που λειτουργούν σε χαμηλή συχνότητα και μια συσκευή αναρρόφησης και δοκίμασαν το σύστημα σε ένα σκάφος 15 μέτρων. Οι Cioanta και McGhin (2017) πρότειναν μια συσκευή καθαρισμού για το κύτος και τις υποβρύχιες κατασκευές ενός πλοίου. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί ακουστικά κρουστικά κύματα πίεσης που μπορούν να παρέχουν υψηλές συμπιεστικές πιέσεις (άνω των 100 MPa) ακολουθούμενες από μεγάλες και μακράς διάρκειας εφελκυστικές/αρνητικές πιέσεις (άνω των 10 MPa), οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες σπηλαιώδεις φυσαλίδες κατά την κατάρρευσή τους και πολύ ισχυρούς πίδακες νερού με ταχύτητες άνω των 100 m/s. Αυτά τα δύο συνεργατικά αποτελέσματα φάσης των κρουστικών κυμάτων ακουστικής πίεσης μπορούν να λειτουργήσουν συνδυαστικά για τον καθαρισμό της γάστρας ενός πλοίου ή οποιασδήποτε υποβρύχιας δομής που υπόκειται σε σχηματισμό θαλάσσιου ή υδρόβιου βιοφίλμ και στη συνέχεια σε θαλάσσια ή υδρόβια ρύπανση. Οι Courson και Shelburne (2001) πρότειναν μια φορητή συσκευή που χειρίζεται δύτης για τον καθαρισμό υποβρύχιων επιφανειών, η οποία περιλαμβάνει μια πηγή ενέργειας υπερήχων στο περίβλημα με ένα εύκαμπτο τμήμα γύρω από το άνοιγμα που μπορεί να εμπλακεί γύρω από το ρυπασμένο κύτος. Οι Yan et al. (2019) σχεδίασαν ένα υποβρύχιο ρομπότ καθαρισμού που χρησιμοποιεί την τεχνολογία καθαρισμού με σπηλαιώση.

Τεχνολογία καθαρισμού με λέιζερ

Η τεχνολογία λέιζερ και η τεχνολογία εφαρμογής της έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο τα τελευταία 30 χρόνια. Η τεχνολογία καθαρισμού με λέιζερ, η οποία χρησιμοποιεί την ακτινοβολία λέιζερ που σαρώνει το επεξεργασμένο κύτος, έχει τα πλεονεκτήματα της ταχύτερης ικανότητας επιφανειακού καθαρισμού, της ακριβούς ικανότητας επιλεκτικής επεξεργασίας και του καλύτερου ελέγχου της διαδικασίας καθαρισμού μέσω ανατροφοδότησης έναντι του καθαρισμού με περιστροφική βούρτσα και του καθαρισμού με νερό υψηλής πίεσης (Fowler 1987; Kostenko et al. 2019). Η αμμοβολή ή ο καθαρισμός με λέιζερ, όπως φαίνεται στο σχήμα, θα μπορούσε να εισαχθεί εμπορικά σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένου του υποβρύχιου καθαρισμού πλοίων.



Γράφημα 3: Τεχνολογία και συσκευές καθαρισμού με λέιζερ (Kostenko et al. 2019).

Ο Fowler (1987) σχεδίασε ένα σύστημα καθαρισμού με λέιζερ για την αποτελεσματική απομάκρυνση των θαλάσσιων πλασμάτων από το κύτος. Αυτό το οπτικό σύστημα καθαρισμού περιλαμβάνει μια στροβοσκόπια υψηλής ενέργειας που έχει χωρητικότητα 10 kJ, η οποία συνδέεται με τον πυκνωτή που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη φόρτιση του πυκνωτή χρησιμοποιείται ένα σύστημα τροφοδοσίας. Αυτός ο πυκνωτής υψηλής ισχύος χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της στροβοσκοπικής λυχνίας, η οποία παράγει ακτίνες λέιζερ υψηλής ισχύος για τη σάρωση της επεξεργασμένης επιφάνειας.

Άλλες τεχνολογίες καθαρισμού

Η θέρμανση χρησιμοποιείται ευρέως για τη θανάτωση των περισσότερων θαλάσσιων οργανισμών. Οι μέθοδοι θέρμανσης χρησιμοποιούνται ευρέως για την εξάλειψη των θαλάσσιων οργανισμών στα συστήματα ψύξης των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και των θαλάσσιων πλασμάτων που εισέρχονται στις δεξαμενές έρματος του πλοίου (Floerl et al. 2010). Η μέθοδος θέρμανσης έχει καλή επίδραση στη θανάτωση των θαλάσσιων οργανισμών όταν το σκάφος έχει ελαφριά και μέτρια βιολογική ρύπανση (Albitar et al. 2016). Η τεχνολογία της υπεριώδους ακτινοβολίας χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την αποστείρωση του νερού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θανάτωση θαλάσσιων πλασμάτων στο πρώιμο στάδιο ανάπτυξης κατά το οποίο προσκολλώνται στη γάστρα. Η τεχνολογία περιβλήματος μπορεί να σκοτώσει αποτελεσματικά όλα τα βιολογικά ρύπανση στη γάστρα. Τυλίγοντας πλήρως το σκάφος για ένα χρονικό διάστημα, η μέθοδος αυτή στερεί από τους οργανισμούς τους πόρους που χρειάζονται για να επιβιώσουν, όπως το οξυγόνο, η θερμοκρασία και η τροφή (Floerl et al. 2010; Albitar et al. 2016).

4. Τεχνολογίες προσκόλλησης σε υποβρύχια ρομπότ καθαρισμού

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες συσκευές καθαρισμού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από φορητές συσκευές καθαρισμού, ημιαυτόματο εξοπλισμό καθαρισμού και συστήματα ρομπότ καθαρισμού. Όταν οι δύτες καθαρίζουν το σκάφος μέσα στο νερό, υπάρχουν μειονεκτήματα, όπως η υψηλή ένταση εργασίας, η χαμηλή απόδοση, ο περιορισμένος χρόνος εργασίας και η αυξημένη επικινδυνότητα για εργατικά ατυχήματα. Ως εκ τούτου, τα υποβρύχια ρομπότ καθαρισμού της γάστρας έχουν γίνει η καλύτερη λύση για την αντικατάσταση των δυτών για τον καθαρισμό της γάστρας (Lee et al. 2012). Για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του υποβρύχιου καθαρισμού πλοίων, το ρομπότ πρέπει να περπατάει αρκετά κοντά στη γάστρα χωρίς να την καταστρέφει. Το ρομπότ απαιτεί έξι βαθμούς ελευθερίας (DOF) κίνησης και ακρίβεια θέσης εκατοστών (Lee et al. 2012). Η πιο σημαντική λειτουργική απαίτηση του υποβρύχιου ρομπότ καθαρισμού είναι η διατήρηση της συνεχούς ικανότητας προσρόφησης λόγω της απότομης και ακανόνιστης επιφάνειας του πλοίου, καθώς και της επιρροής του ρεύματος, του κύματος και του ανέμου (Kim et al., 2024).

4.1 Μαγνητική προσκόλληση

Η μαγνητική δύναμη χρησιμοποιείται ευρέως στα υποβρύχια συστήματα καθαρισμού για τη συγκράτηση του ρομπότ στο πλοίο. Η αρχή της πρόσφυσης είναι η χρήση της αμοιβαίας έλξης μεταξύ του μαγνήτη και του σιδηρομαγνητικού υλικού, όπως το κύτος του πλοίου και η θαλάσσια δομή, για την εφαρμογή άμεσης πίεσης μεταξύ του ρομπότ και της επιφάνειας του πλοίου. Επομένως, πρέπει να εξασφαλίζεται αρκετή μαγνητική δύναμη και δύναμη τριβής για την εξισορρόπηση των εξωτερικών δυνάμεων που εφαρμόζονται στο ρομπότ. Επί του παρόντος, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι προσρόφησης περιλαμβάνουν κυρίως τη μόνιμη μαγνητική και την ηλεκτρομαγνητική προσρόφηση και οι μορφές μηχανικής δομής είναι ο τύπος ερπυστριοφόρου και τροχού.

Τεχνολογία μόνιμης-μαγνητικής προσκόλλησης

Με την εμφάνιση νέων υλικών μόνιμου μαγνήτη, μπορούν να παραχθούν πολύ ισχυρές μαγνητικές δυνάμεις με τη χρήση μόνιμων μαγνητών με πολύ μικρό μέγεθος και μάζα. Ως εκ τούτου, οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν ενσωματωθεί σε σχέδια τροχών ή ερπυστριών και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ρομπότ αναρρίχησης και υποβρύχια ρομπότ καθαρισμού.

Με βάση τις δύο πρώτες εκδόσεις, το ρομπότ M2000 έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την ευελιξία και τη συνολική παραγωγικότητα. Το ρομπότ χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες για να προσκολλάται στο πλοίο και χρησιμοποιεί πίδακες νερού υψηλής πίεσης για την απομάκρυνση της διάβρωσης από το κύτος και την ανακύκλωση του νερού και των αποβλήτων. Το ρομπότ M2000 μπορεί να λειτουργήσει σε στενές περιοχές και γύρω από εμπόδια και μπορεί να διασχίσει εμπόδια στη γάστρα και να κινηθεί με ταχύτητα περίπου 0,6 m/s (Ross et al. 2003). Οι Yi κ.ά. (2009) σχεδίασαν ένα ρομπότ αναρρίχησης σε τοίχο που ονομάζεται WCRSRR για την αφαίρεση σκουριάς από το κύτος του πλοίου. Αυτό το ρομπότ χρησιμοποιεί πίδακες νερού υπερυψηλής πίεσης ως συσκευή καθαρισμού. Οι κύριες παράμετροι του ρομπότ είναι οι εξής: το βάρος είναι περίπου 90 kg, το μέγεθος είναι περίπου 735 mm × 752 mm × 280 mm, η ταχύτητα προώθησης είναι 0,05 m/s και το πλάτος καθαρισμού είναι 250 mm. Το ρομπότ ARMUS πρώτης γενιάς είναι ένα σύστημα με τροχιά τριών αξόνων που προσκολλάται στη γάστρα με τη βοήθεια μαγνητών νεοδυμίου. Η δύναμη έλξης που παρέχουν οι ερπύστριες του ρομπότ στην επιφάνεια είναι 336 kg, η οποία είναι αρκετή για να κρατήσει το ρομπότ στερεωμένο στην επιφάνεια της γάστρας ακόμη και όταν το πλοίο βρίσκεται σε κίνηση. Το ρομπότ ARMUS δεύτερης γενιάς έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να παραμείνει υποβρύχιο για απεριόριστο χρονικό διάστημα και να εργάζεται και στις δύο πλευρές (εξωτερικές και εσωτερικές όπως οι φορτοεκφορτωτές) της γάστρας του πλοίου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου προσρόφησης με μόνιμο μαγνήτη είναι ότι η συντήρηση της μαγνητικής δύναμης δεν απαιτεί συντήρηση εξωτερικής ενέργειας, πράγμα που σημαίνει ότι η ικανότητα προσρόφησης του συστήματος δεν αυξάνει την ικανότητα του συστήματος ενέργειας. Ταυτόχρονα, όταν η μαγνητική δύναμη έλξης γίνεται ασθενής καθώς αυξάνεται το πάχος του μολυσμένου στρώματος, η αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης με την κατανάλωση της παροχής ενέργειας είναι αδύνατη (Kim et al., 2024).

Τεχνολογία ηλεκτρομαγνητικής προσκόλλησης

Η χρήση μόνιμων μαγνητών καθιστά το ρομπότ πιο αξιόπιστα προσκολλημένο στη γάστρα, αλλά το μειονέκτημά της είναι ότι ο έλεγχος της μετάβασης μεταξύ προσκόλλησης και απελευθέρωσης είναι δύσκολος επειδή η μαγνητική δύναμη είναι πάντα παρούσα. Οι ηλεκτρομαγνήτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των μόνιμων μαγνητών για την κατασκευή των τροχών και των τροχιών του ρομπότ. Όταν η ερπύστρια είναι σε επαφή με το κύτος, ο ηλεκτρομαγνήτης μπορεί να ελεγχθεί για να ενισχύσει τη μαγνητική δύναμη, και όταν η ερπύστρια διαχωρίζεται από το κύτος, ο ηλεκτρομαγνήτης μπορεί να ελεγχθεί για να

αποδυναμώνει τη μαγνητική δύναμη. Αυτή η διαδικασία θα αυξήσει την ευελιξία του ρομπότ, αν και τα ρομπότ που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνήτες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από εκείνα που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες (Yan et al. 2019).

Το HISMAR, είναι ένα πολυλειτουργικό ρομποτικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση και τη συντήρηση της γάστρας στην αποβάθρα, ώστε να διασφαλίζεται η ελάχιστη δυνατή αντίσταση του σκάφους και να βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα της πρόωσης. Το ρομποτικό σύστημα χρησιμοποιεί ένα νέο σύστημα πλοήγησης που χρησιμοποιεί οπτική απεικόνιση, μαγνητικούς αισθητήρες και τα εγγενή δομικά χαρακτηριστικά της γάστρας για την κατασκευή ενός τοπικού χάρτη στη γάστρα για την υποβοήθηση της πλοήγησης του ρομπότ (Balashov et al. 2011). Οι Zeng και Cai (2012) σχεδίασαν ένα υποβρύχιο ρομπότ καθαρισμού που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό μόνιμου μαγνήτη και ηλεκτρομαγνήτη ως συσκευή προσρόφησης. Οι Smith και Colvin (2014) σχεδίασαν μια συσκευή μαγνητικής στερέωσης για να στερεώσουν το ρομπότ καθαρισμού στη γάστρα του σκάφους με μεγαλύτερη ασφάλεια από ό,τι με τη μαγνητική τροχιά. Στη συσκευή στερέωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι μαγνητών, όπως ηλεκτρομαγνήτες που μπορούν να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν ή μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι μπορούν να ενεργοποιηθούν με μετακίνηση ή περιστροφή των μαγνητών (Song & Cui, 2020).

4.2 Δύναμη αρνητικής πίεσης

Μια συνήθης μέθοδος για να εξασφαλιστεί ότι ένα ρομπότ είναι αξιόπιστα συνδεδεμένο με την επιφάνεια ενός κύτους είναι η χρήση αρνητικής πίεσης. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε ρομπότ που σκαρφαλώνουν σε τοίχους για τον καθαρισμό, τη συντήρηση και την επιθεώρηση στις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Με την εφαρμογή της τεχνολογίας κινηματικής ρευστών, δημιουργείται μια ορισμένη περιοχή αρνητικής πίεσης μεταξύ της συσκευής προσρόφησης του ρομπότ και της επιφάνειας εργασίας και η απαιτούμενη δύναμη προσκόλλησης δημιουργείται από τη διαφορά πίεσης.

Οι συρόμενοι θάλαμοι κενού είναι μια άλλη μέθοδος δημιουργίας αρνητικής πίεσης. Το υποβρύχιο ρομπότ καθαρισμού της γάστρας HullBUG, που σχεδιάστηκε από τη SeaRobotics, είναι ένα ερπυστριόφορο UUV που στοχεύει στην προληπτική περιποίηση της γάστρας μεγάλων σκαφών και άλλων υποβρύχιων επιφανειών. Το Hullbot είναι ένα ρομπότ που χρησιμοποιείται κυρίως για τον καθαρισμό σκαφών αναψυχής (Souto et al. 2015). Το

KeelCrab Sail One, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για τον καθαρισμό σκαφών αναψυχής αλλά και για επιθεωρήσεις της γάστρας (Souto et al. 2015).

4.3 Δύναμη ώθησης

Πολλά υποβρύχια ρομπότ που χρησιμοποιούν την τεχνολογία πρόσφυσης δύναμης ώθησης έχουν αναπτυχθεί για διάφορες εφαρμογές, όπως η επιθεώρηση της επιφάνειας δεξαμενών αποθήκευσης ή πλοίων (Osaka and Norita 2014). Σε σύγκριση με την τεχνολογία προσρόφησης κενού, η προσρόφηση ώθησης βελτιώνεται σημαντικά και δεν εμφανίζεται πρόβλημα διαρροής πίεσης. Σε αντίθεση με την τεχνολογία μαγνητικής προσρόφησης, τα ρομπότ που έχουν σχεδιαστεί με την τεχνολογία προσρόφησης ώσης μπορούν να εφαρμοστούν σχεδόν σε όλα τα υλικά του κελύφους των πλοίων (Ferreira et al. 2013).

Οι Ferreira et al. (2013) ανέπτυξαν ένα υποβρύχιο ρομπότ στο Ομοσπονδιακό Πανεπιστήμιο ABC, το οποίο χρησιμοποιείται για την έρευνα της γάστρας και των θαλάσσιων κατασκευών. Το ρομπότ χρησιμοποιεί έξι προωθητήρες για να επιτύχει ελεύθερη κολύμβηση 6-DOF στο νερό και χρησιμοποιεί δύο τροφοδοτούμενες ερπύστριες για να το κάνει να σέρνεται στην επιφάνεια του πλοίου. Στη λειτουργία ερπυστριοφόρου, τέσσερις προωθητήρες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πρόωσης και εξασφαλίζουν την αξιόπιστη απορρόφηση του ρομπότ στη γάστρα του πλοίου. Η Teledyne SeaBotix, Inc. κατασκεύασε ένα ROV επιθεώρησης της γάστρας (vLBC ROV) για την επιθεώρηση της γάστρας των πλοίων και των θαλάσσιων κατασκευών. Το vLBC ROV χρησιμοποιεί τη μοναδική και κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας γεννήτρια Vortex VRAM για να παράγει μια δύναμη πρόσφυσης περίπου 274 N για να προσκολληθεί στη γάστρα. Η ομάδα ACE ανέπτυξε το ROVIN-BAT, το οποίο μπορεί να κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του πλοίου και να χρησιμοποιεί νερό υψηλής πίεσης για τον καθαρισμό της γάστρας (Souto et al. 2015; Albitar et al. 2016).

4.4 Άλλες τεχνολογίες προσκόλλησης

Οι Souto et al. (2013) σχεδίασαν ένα νέο υποβρύχιο ρομπότ καθαρισμού της γάστρας. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον τακτικό καθαρισμό της γάστρας για την αποφυγή της υπερβολικής ανάπτυξης θαλάσσιων οργανισμών που μειώνουν την απόδοση του πλοίου. Αυτό το ρομπότ, το οποίο έχει μήκος 1690 mm, πλάτος 554 mm και ύψος 340 mm, είναι ένα υποκινητικό και παραμορφώσιμο ρομπότ που λύνει το πρόβλημα της κίνησης σε διαφορετικές επιφάνειες της γάστρας (Souto et al. 2013, 2015). Οι Albitar et al. (2016)

σχεδίασαν ένα ρομπότ που σέρνεται, το οποίο αποτελείται κυρίως από έναν μηχανισμό κίνησης, βεντούζες και συσκευές καθαρισμού (Albitar et al. 2013, 2014, 2016). Το NESSIE είναι ένα υποβρύχιο ρομπότ καθαρισμού της γάστρας που χρησιμοποιεί δύο κυκλικές περιστρεφόμενες βούρτσες (Albitar et al. 2016).

Την τελευταία δεκαετία, οι σχεδιαστές ρομπότ έχουν αντλήσει μεγάλη έμπνευση από τα ζώα που αναρριχώνται (Tan et al. 2018). Οι Murphy et al. (2006) σχεδίασαν ένα μικρό ρομπότ αναρρίχησης σε τοίχο με την ονομασία Waalbot, του οποίου τα πόδια είναι κατασκευασμένα από αυτοκόλλητα ελαστομερή υλικά, επιτρέποντάς του να κινείται σε μια λεία επιφάνεια. Δύο περιστρεφόμενα πόδια επιτρέπουν στο Waalbot να σέρνεται με ταχύτητα 60 mm/s σε έναν κατακόρυφο τοίχο και να κάνει στροφές με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Το Geckobot ζυγίζει 100 g και μπορεί να συρθεί κατά μήκος μιας γυάλινης επιφάνειας με κλίση 85° (Unver et al. 2006). Οι Asbeck κ.ά. (2006) σχεδίασαν ένα ρομπότ που περπατάει σε μήκος έξι ποδιών και ονομάζεται RiSE.

5. Σχετική Νομοθεσία

5.1 Εθνική νομοθεσία καθαρισμού πλοίου

Κανονισμός 8

Μέτρα για τον έλεγχο

(1) Η Κυβέρνηση κάθε Μέρους της Συμβάσεως θα διορίζει ή θα εξουσιοδοτεί επιθεωρητές προς τον σκοπό της εφαρμογής του παρόντος Κανονισμού. Ουσίες Κατηγορίας Α σε όλες τις περιοχές.

(2) (α) Εάν μία δεξαμενή έχει μερικώς εκφορτωθεί ή έχει εκφορτωθεί αλλά δεν έχει καθαρισθεί, ανάλογη εγγραφή θα γίνει στο Βιβλίο Φορτίου.

(β) Μέχρις ότου καθαρισθεί αυτή η δεξαμενή κάθε ακόλουθη επιχείρηση αντλήσεως ή μεταφοράς που εκτελείται και αφορά αυτήν την δεξαμενή θα εγγράφεται στο Βιβλίο Φορτίου.

(3) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να πλυθεί.

(α) τα απόβλητα από την διαδικασία πλύσεως της δεξαμενής θα απορριφθούν από το πλοίο σε εγκατάσταση υποδοχής τουλάχιστον μέχρις ότου η συγκέντρωση της ουσίας στην απόρριψη, όπως δείχνει η ανάλυση των δειγμάτων των αποβλήτων που πήρε ο επιθεωρητής, έχει κατέλθει στο επίπεδο συγκεντρώσεως των καταλοίπων, που καθορίζεται για την ουσία αυτή στο Προσάρτημα II του παρόντος Παραρτήματος. Όταν έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη συγκέντρωση καταλοίπων θα συνεχισθεί η απόρριψη των αποπλυμάτων στην εγκατάσταση υποδοχής μέχρι που ν' αδειάσει η δεξαμενή. Ανάλογες εγγραφές αυτών των εργασιών θα γίνουν στο Βιβλίο Φορτίου και θα πιστοποιηθούν υπό του επιθεωρητού και

(β) μετά την διάλυση των καταλοίπων που απομένουν στην δεξαμενή με ύδωρ ποσότητας τουλάχιστον ίσης προς το 5 τοις εκατό της χωρητικότητας της δεξαμενής, αυτό το μίγμα μπορεί να απορριφθεί στην θάλασσα σύμφωνα με τις διατάξεις των υποπαραγράφων (1) (α), (β) και (γ) ή 7 (α), (β) και (γ) οποιαδήποτε έχει εφαρμογή του Κανονισμού 5 του παρόντος Παραρτήματος. Ανάλογες εγγραφές αυτών των εργασιών θα γίνουν στο Βιβλίο Φορτίου (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(4) Εάν η Κυβέρνηση Μέρους που παραλαμβάνει συμφωνεί ότι δεν είναι πρακτικώς δυνατόν να μετρηθεί η συγκέντρωση της ουσίας στα απόβλητα, χωρίς να προκαλέσει

υπερβολική καθυστέρηση στο πλοίο, το Μέρος εκείνο μπορεί να δεχθεί μία εναλλακτική μέθοδο που είναι ισοδύναμη με την υποπαράγραφο (3) (α) υπό τον όρο ότι:

(α) έχει εγκριθεί από την Αρχή και ικανοποιεί εκείνο το Μέρος μία μέθοδος προκαθαρισμού γι' αυτή την δεξαμενή και την ουσία, βασισμένη στα πρότυπα που έχει αναπτύξει ο Οργανισμός, εις ό,τι αφορά το ότι αυτός ο καθαρισμός θα πληροί τις απαιτήσεις της παραγράφου (1) ή (7), οποιαδήποτε έχει εφαρμογή του Κανονισμού 5 του παρόντος Παραρτήματος, εν σχέσει με την επίτευξη των συγκεντρώσεων των καταλοίπων που έχουν περιγραφεί

(β) ένας επιθεωρητής αρμοδίως εξουσιοδοτημένος από εκείνο το Μέρος πιστοποιεί στο Βιβλίο Φορτίου ότι:

(ι) η δεξαμενή, οι αντλίες της και το σύστημα σωληνώσεως έχουν αδειάσει και ότι η ποσότητα φορτίου που απομένει στην δεξαμενή είναι ίση ή μακρότερη από την ποσότητα, στην οποία έχει βασισθεί η εγκεκριμένη μέθοδος προπλύσεως της δεξαμενής που αναφέρεται στην υποπαράγραφο (ι) της παρούσης παραγράφου

(ιι) η πρόπλυση έχει γίνει σύμφωνα με την διαδικασία προπλύσεως την εγκεκριμένη από την Αρχή γι' αυτή την δεξαμενή και αυτήν την ουσία και

(ιιι) τ' αποπλύματα της δεξαμενής τα εναπομένοντα απ' αυτήν την πρόπλυση έχουν απορριφθεί σε εγκατάσταση υποδοχής και η δεξαμενή είναι άδεια

(γ) Η απόρριψη στην θάλασσα των καταλοίπων που έχουν απομείνει θα είναι σύμφωνα με τις διατάξεις της παραγράφου (3) (β) του παρόντος Κανονισμού και έχει γίνει σχετική εγγραφή στο Βιβλίο Φορτίου.

Ουσίες κατηγορίας Β, έξω από τις ειδικές Περιοχές και ουσίες της Κατηγορίας Γ σε όλες τις περιοχές (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(5) Υπό την προϋπόθεση της εγκρίσεως μετά από παρακολούθηση, που μπορεί να θεωρηθεί αναγκαία από την Κυβέρνηση του Μέρους, από τον εξουσιοδοτημένο ή διορισμένο επιθεωρητή, ο πλοίαρχος του πλοίου, όσον αφορά μία ουσία κατηγορίας Β έξω από τις ειδικές περιοχές ή μία ουσία κατηγορίας Γ σε όλες τις περιοχές, θα εξασφαλίζει την συμμόρφωση με τ' ακόλουθα:

(α) Εάν η δεξαμενή έχει εκφορτωθεί μερικώς ή έχει εκφορτωθεί αλλά δεν έχει καθαρισθεί, ανάλογη εγγραφή θα γίνει στο Βιβλίο Φορτίου.

(β) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να καθαρισθεί εν πλω:

(ι) το σύστημα σωληνώσεως του Φορτίου που εξυπηρετεί αυτή τη δεξαμενή θα αποστραγγισθεί και σχετική εγγραφή θα γίνει στο Βιβλίο Φορτίου

(ιι) η ποσότητα της ουσίας που παραμένει στην δεξαμενή δεν θα υπερβαίνει την μέγιστη ποσότητα, η οποία δύναται να απορριφθεί στην θάλασσα γι' αυτή την ουσία σύμφωνα με τον Κανονισμό 5 (2) (γ) του παρόντος Παραρτήματος εκτός των ειδικών περιοχών αντιστοίχως αναφορικά με την περίπτωση των ουσιών της Κατηγορίας Γ. Ανάλογη εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου

(ιιι) όπου πρόκειται να απορριφθεί απομένουσα ποσότητα της ουσίας στην θάλασσα θα πληρούνται, οι εγκεκριμένες μέθοδοι και θα επιτευχθεί η απαραίτητη διάλυση της ουσίας, ικανοποιητική για μια τέτοια απόρριψη. Σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο του Φορτίου ή

(ιιιι) όπου τ' αποπλύματα της δεξαμενής δεν απορριφθούν στην θάλασσα εάν γίνει μία οποιαδήποτε εσωτερική μεταφορά των αποπλυμάτων δεξαμενής απ' αυτήν την δεξαμενή ανάλογη εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου και

(ιιιιι) κάθε μεταγενέστερη απόρριψη στην θάλασσα των αποπλυμάτων μιας τέτοιας δεξαμενής θα γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κανονισμού (5) του παρόντος Παραρτήματος για την ανάλογη περιοχή και Κατηγορία της ουσίας (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(γ) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να πλυθεί εν λιμένι:

(ι) τ' αποπλύματα της δεξαμενής θα απορρίπτονται σε εγκατάσταση υποδοχής και σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου ή

(ιι) τ' αποπλύματα της δεξαμενής θα παραμένουν επί του σκάφους και ανάλογη εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου, η οποία θα δηλώνει την θέση και την διάθεση των αποπλυμάτων της δεξαμενής.

(δ) Εάν μετά την εκφόρτωση της ουσίας της Κατηγορίας Γ' εντός μιας ειδικής περιοχής, κατάλοιπα ή αποπλύματα της δεξαμενής πρόκειται να μείνουν στο πλοίο μέχρι που το πλοίο ευρεθεί έξω από την ειδική περιοχή, ο Πλοίαρχος θα το δηλώσει με σχετική εγγραφή στο Βιβλίο Φορτίου και στην περίπτωση αυτή θα εφαρμοσθούν οι μέθοδοι που καθορίζονται στον Κανονισμό 5 (3) του παρόντος Παραρτήματος.

Ουσίες Κατηγορίας Β μέσα σε Ειδικές Περιοχές. (6) Υπό την προϋπόθεση της εγκρίσεως μετά από παρακολούθηση που μπορεί να θεωρηθεί αναγκαία από την Κυβέρνηση του Μέρους από τον εξουσιοδοτημένο ή διορισμένο επιθεωρητή, ο Πλοίαρχος του πλοίου, όσον αφορά μία ουσία κατηγορίας Β εντός μιας ειδικής περιοχής, θα εξασφαλίζει την συμμόρφωση με τ' ακόλουθα.

(α) Εάν η δεξαμενή έχει εκφορτωθεί μερικώς ή έχει εκφορτωθεί αλλά δεν έχει καθαρισθεί, μία σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου.

(β) Μέχρις ότου καθαρισθεί αυτή η δεξαμενή κάθε μεταγενέστερη διαδικασία αντλήσεως ή μεταφοράς που γίνεται σχετικά με αυτή την δεξαμενή θα εγγράφεται επίσης στο Βιβλίο Φορτίου.

(γ) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να πλυθεί, τα απόβλητα από την πλύση της δεξαμενής, η οποία θα περιέχει ποσότητα ύδατος, όχι μικρότερη από τα 0.5 τοις εκατό του ολικού όγκου της δεξαμενής, θα απορριφθεί από το πλοίο σε εγκατάσταση υποδοχής μέχρι ότου αδειάσει η δεξαμενή, οι αντλίες της και οι σωληνώσεις. Σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(δ) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να καθαρισθεί περαιτέρω και ν' αδειάσει στην θάλασσα, ο Πλοίαρχος θα πρέπει να:

(ι) βεβαιώσει ότι οι εγκεκριμένες μέθοδοι οι αναφερόμενες στον Κανονισμό 5 (8) (γ) του παρόντος Παραρτήματος θα εφαρμόζονται και ότι έγιναν οι σχετικές εγγραφές στο Βιβλίο Φορτίου και

(ιι) βεβαιώσει ότι κάθε απόρριψη στην θάλασσα έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κανονισμού 5 (8) του παρόντος Παραρτήματος και σχετική εγγραφή έγινε στο Βιβλίο Φορτίου.

(ε) Εάν μετά την εκφόρτωση μιας ουσίας της Κατηγορίας Β έξω από την ειδική περιοχή, υπολείμματα ή αποπλύματα της δεξαμενής πρόκειται να μείνουν στο πλοίο μέχρι που το πλοίο ευρεθεί έξω από την ειδική περιοχή, ο Πλοίαρχος θα το δηλώσει με μία σχετική εγγραφή στο Βιβλίο Φορτίου και στην περίπτωση αυτή θα εφαρμοσθούν οι μέθοδοι που εκτίθενται στον Κανονισμό 5 (2) του παρόντος Παραρτήματος.

Ουσίες Κατηγορίας Δ σε όλες τις περιοχές.

(7) Ο πλοίαρχος του πλοίου όσον αφορά την ουσία της Κατηγορίας Δ θα πρέπει να βεβαιώνει την συμμόρφωση με τ' ακόλουθα: (α) Εάν η δεξαμενή έχει εκφορτωθεί, μερικώς ή έχει εκφορτωθεί αλλά δεν έχει καθαρισθεί σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου.

(β) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να καθαρισθεί εν πλω:

(ι) το σύστημα σωληνώσεως του φορτίου, που εξυπηρετεί αυτή την δεξαμενή θ' αποστραγγισθεί και σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου

(ιι) όπου πρόκειται ν' απορριφθεί η απομένουσα ποσότητα της ουσίας στην θάλασσα θα επιτυγχάνεται η απαραίτητη διάλυση της ουσίας, ικανοποιητική για μια τέτοια απόρριψη. Σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου ή

(ιιι) όπου τ' αποπλύματα της δεξαμενής δεν απορριφθούν στην θάλασσα, εάν γίνει μία οποιαδήποτε εσωτερική μεταφορά των αποπλυμάτων δεξαμενής απ' αυτήν την δεξαμενή, σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο του Φορτίου και

(ιιιι) κάθε μεταγενέστερη απόρριψη στην θάλασσα των αποπλυμάτων μιας τέτοιας δεξαμενής θα γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κανονισμού 5 (4) του παρόντος Παραρτήματος (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(γ) Εάν η δεξαμενή πρόκειται να πλυθεί στο λιμένα:

(ι) τ' αποπλύματα της δεξαμενής θ' απορριφθούν σε εγκατάσταση υποδοχής και σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου ή

(ιι) τ' αποπλύματα της δεξαμενής θα παραμείνουν επί του σκάφους και σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου, η οποία να δηλώνει την θέση και την διάθεση των αποπλυμάτων της δεξαμενής.

Απόρριψη από δεξαμενή καταλοίπων

(8) Τα υπολείμματα που παραμένουν στο πλοίο, σε μια δεξαμενή καταλοίπων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων από τους υδροσυλλέκτες του αντλιοστασίου, που περιέχουν ουσία της Κατηγορίας Α ή μέσα σε ειδική περιοχή ουσία της Κατηγορίας Α ή Β θα απορριφθούν σε εγκατάσταση υποδοχής σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού 5 (1), (7) ή (8) του παρόντος Παραρτήματος, οποιαδήποτε έχει εφαρμογή. Σχετική εγγραφή θα γίνεται στο Βιβλίο Φορτίου.

(9) Τα υπολείμματα που παραμένουν στο πλοίο, στην δεξαμενή καταλοίπων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων από τους υδροσυλλέκτες του αντλιοστασίου που περιέχουν μια ποσότητα της ουσίας της Κατηγορίας Β εκτός της ειδικής περιοχής ή μία ουσία της Κατηγορίας Γ σε όλες τις περιοχές, επί πλέον του συνόλου των μεγίστων ποσοτήτων που καθορίζονται στον Κανονισμό 5 (2) (γ), 3 (γ) ή 9 (γ) του παρόντος Παραρτήματος, οποιοσδήποτε έχει εφαρμογή, θα απορριφθούν στην εγκατάσταση υποδοχής. Σχετική εγγραφή θα γίνεται στι Βιβλίο Φορτίου.

Κανονισμός 13 Δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος Δεξαμενές καθαρού έρματος και καθαρισμός με αργό πετρέλαιο

Υπό την αίρεση των διατάξεων των Κανονισμών 13Γ και 13Δ του παρόντος Παραρτήματος, τα πετρελαιοφόρα θα συμμορφώνονται με τις διατάξεις του παρόντος Κανονισμού.

Νέα πετρελαιοφόρα νεκρού βάρους (DEAD WEIGHT) 20.000 τόννων και άνω:

(1) Κάθε νέο πετρελαιοφόρο αργού πετρελαίου νεκρού βάρους 20.000 τόννων και άνω και κάθε νέο δεξαμενόπλοιο μεταφοράς προϊόντων πετρελαίου νεκρού βάρους 30.000 τόννων και άνω θα φέρει δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος και θα συμμορφώνεται με τις παραγράφους (2), (3) και (4) ή την παράγραφο (5) του παρόντος Κανονισμού. (2) Η χωρητικότητα των δεξαμενών διαχωρισμένου έρματος θα καθορίζεται έτσι, ώστε το πλοίο να δύναται να ταξιδεύει ασφαλώς χωρίς να καταφεύγει στην χρησιμοποίηση των δεξαμενών φορτίου για θαλάσσιο έρμα πλην των περιπτώσεων που καθορίζονται στην παράγραφο (3) ή (4) του παρόντος Κανονισμού. Σε όλες τις περιπτώσεις εν τούτοις, η χωρητικότητα των δεξαμενών διαχωρισμένου έρματος του πλοίου, θα είναι τουλάχιστον τέτοια ώστε σε κάθε κατάσταση υπό έρμα, καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού, συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων που ο πλους γίνεται μόνον με το άφορτο εκτόπισμα συν το διαχωρισμένο έρμα, τα βυθίσματα και η διαγωγή του πλοίου να μπορούν να πληρούν τις κάτωθι απαιτήσεις:

(α) το βύθισμα γάστρας στο μέσον του πλοίου (dm) σε μέτρα (χωρίς να υπολογίζεται οποιαδήποτε παραμόρφωση του πλοίου) δεν θα είναι μικρότερο από: $dm = 2.0 + 0.02L$ (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(β) τα βυθίσματα στην πρωραία και πρυμναία κατακόρυφο θ' αντιστοιχούν σ' αυτά που προσδιορίζονται από το βύθισμα στο μέσο του πλοίου (dm), όπως ορίζεται στην

υποπαράγραφο (α) της παρούσης παραγράφου, ώστε το πλοίο να έχει διαγωγή με την πρύμνη όχι μεγαλύτερη από 0.015 L και

(γ) σε κάθε περίπτωση το βύθισμα στην πρυμναία κάθετο να μην είναι μικρότερο απ' εκείνο που είναι απαραίτητο για να επιτευχθεί η πλήρης βύθιση της έλικας (κων) του πλοίου. (3) Σε καμιά περίπτωση δεν θα μεταφέρεται θαλάσσερμα στις δεξαμενές φορτίου πλην σπανίων περιπτώσεων ταξιδιών, που οι καιρικές συνθήκες είναι τόσο δυσμενείς, ώστε κατά την γνώμη του πλοιάρχου, είναι αναγκαίο να τοποθετηθεί πρόσθετο θαλάσσερμα στις δεξαμενές φορτίου για την ασφάλεια του πλοίου. Το πρόσθετο θαλάσσερμα αυτής της περιπτώσεως θα διοχετεύεται και θα απορρίπτεται σύμφωνα με τον Κανονισμό (9) του παρόντος Παραρτήματος και σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κανονισμού (15) του παρόντος Παραρτήματος σχετική δε εγγραφή θα γίνεται στο βιβλίο Πετρελαίου που αναφέρεται στον Κανονισμό 20 του παρόντος Παραρτήματος. (4) Στην περίπτωση νέων δεξαμενοπλοίων αργού πετρελαίου το πρόσθετο έρμα που επιτρέπεται να τοποθετηθεί σύμφωνα με την παράγραφο (3) του παρόντος Κανονισμού, θα μεταφέρεται σε δεξαμενές φορτίου μόνον εφ' όσον έχουν πλυθεί με αργό πετρέλαιο σύμφωνα με τον Κανονισμό 13B του παρόντος Παραρτήματος προ της αναχωρήσεως από τον λιμένα ή τερματικό σταθμό εκφορτώσεως.

(5) Ανεξαρτήτως των διατάξεων της παραγράφου (2) του παρόντος Κανονισμού οι καταστάσεις διαχωρισμένου έρματος πετρελαιοφόρων μήκους μικρότερου των 150 μέτρων θα ικανοποιούν την Αρχήν.

(6) Κάθε νέο πετρελαιοφόρο αργού πετρελαίου νεκρού βάρους 20.000 τόννων και άνω, θα είναι εξοπλισμένο με σύστημα καθαρισμού δεξαμενών φορτίου με αργό πετρέλαιο. Η Αρχή θα αναλάβει να εξασφαλίσει ότι, το σύστημα πληροί τις απαιτήσεις του κανονισμού 13B του παρόντος Παραρτήματος, σε χρονικό διάστημα ενός έτους αφ' ότου το πετρελαιοφόρο το πρώτον άρχισε να μεταφέρει αργό πετρέλαιο ή στο τέλος του τρίτου ταξιδιού μεταφοράς αργού πετρελαίου κατάλληλου για καθαρισμό με αργό πετρέλαιο, οιονδήποτε είναι αργότερο. Εκτός εάν το πετρελαιοφόρο μεταφέρει αργό πετρέλαιο που δεν είναι κατάλληλο για τον καθαρισμό με αργό πετρέλαιο, τότε θα χρησιμοποιεί το σύστημα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κανονισμού εκείνου (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α' 89/21.7.1982).

Υπάρχοντα δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου νεκρού βάρους 40.000 τόννων και άνω.

(7) Υπό την αίρεση των διατάξεων των παραγράφων (8) και (9) του παρόντος Κανονισμού κάθε υπάρχον πετρελαιοφόρο αργού πετρελαίου νεκρού βάρους (DEAD WEIGHT) 40.000 τόννων και άνω θα φέρει δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος και θα

συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των παραγράφων (2) και (3) του παρόντος Κανονισμού από την ημερομηνία θέσεως σε ισχύ του παρόντος Πρωτοκόλλου.

(8) Υπάρχοντα πετρελαιοφόρα αργού πετρελαίου που αναφέρονται στην παράγραφο (7) του παρόντος Κανονισμού δύναται, αντί να διαθέτουν δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος, να λειτουργούν χρησιμοποιώντας την μέθοδο καθαρισμού δεξαμενών φορτίου με αργό πετρέλαιο σύμφωνα με τον Κανονισμό 13B του παρόντος Παραρτήματος, εκτός αν το πετρελαιοφόρο αργού πετρελαίου προορίζεται να μεταφέρει αργό πετρέλαιο που δεν είναι κατάλληλο για καθαρισμό.

(9) Υπάρχοντα πετρελαιοφόρα αργού πετρελαίου που αναφέρονται στην παράγραφο (7) ή (8) του παρόντος Κανονισμού δύναται, αντί να είναι εφοδιασμένα με δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος, ή να λειτουργούν χρησιμοποιώντας την μέθοδο καθαρισμού δεξαμενών φορτίου με αργό πετρέλαιο, να λειτουργούν με δεξαμενές αποκλειστικά για καθαρό έρμα, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού 13A του παρόντος Παραρτήματος για την ακόλουθη περίοδο:

(α) για πετρελαιοφόρα αργού πετρελαίου νεκρού βάρους (DEAD WEIGHT) 70.000 τόννων και άνω έως δύο έτη μετά την ημερομηνία θέσεως σε ισχύ του παρόντος Πρωτοκόλλου και

(β) για πετρελαιοφόρα αργού πετρελαίου νεκρού βάρους (DEAD WEIGHT) 40.000 τόννων και άνω αλλά κάτω των 70.000 τόννων, έως τέσσερα έτη μετά την ημερομηνία θέσεως σε ισχύ του παρόντος Πρωτοκόλλου.

Υπάρχοντα δεξαμενόπλοια προϊόντων πετρελαίου νεκρού βάρους (DEAD WEIGHT) 40.000 τόννων και άνω (10) Από την ημερομηνία θέσεως εν ισχύ του παρόντος πρωτοκόλλου κάθε υπάρχον πετρελαιοφόρο προϊόντων νεκρού βάρους (DEAD WEIGHT) 40.000 τόννων και άνω θα φέρει δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος και θα πληροί τις απαιτήσεις των παραγράφων (2) και (3) του παρόντος Κανονισμού ή εναλλακτικά, θα λειτουργεί με δεξαμενές αποκλειστικά για καθαρό έρμα, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού 13A του παρόντος Παραρτήματος (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

Μεταχείριση πετρελαιοφόρου ως τοιούτου με δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος. (11) Κάθε πετρελαιοφόρο που δεν απαιτείται να φέρει δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος σύμφωνα με την παράγραφο (1), (7) ή (10) του παρόντος Κανονισμού δύναται να τύχει μεταχειρίσεως σαν πετρελαιοφόρο διαχωρισμένου έρματος, υπό την προϋπόθεση ότι πληροί

τις απαιτήσεις των παραγράφων (2) και (3) ή της παραγράφου (5) αναλόγως της περιπτώσεώς του, του παρόντος Κανονισμού.

Κανονισμός 20

Βιβλίο Πετρελαίου

(1) Κάθε πετρελαιοφόρο 150 κόνων ολικής χωρητικότητας και άνω και κάθε πλοίο 400 κόνων ολικής χωρητικότητας και άνω που δεν είναι πετρελαιοφόρο θα εφοδιάζεται με βιβλίο πετρελαίου, είτε σαν τμήμα του επίσημου ημερολογίου είτε κατά άλλο τρόπο, σύμφωνα με το υπόδειγμα του Προσαρτήματος III του παρόντος Παραρτήματος.

(2) Το βιβλίο πετρελαίου θα συμπληρώνεται κάθε φορά που λαμβάνει χώρα οποιαδήποτε από τις ακόλουθες λειτουργίες στο πλοίο οι οποίες επηρεάζουν την κατάσταση φορτώσεως των δεξαμενών.

(α) Για πετρελαιοφόρα:

(ι) φόρτωση του φορτίου πετρελαίου (ιι) εσωτερική μεταφορά του φορτίου πετρελαίου κατά την διάρκεια του ταξιδιού

(ιιι) άνοιγμα ή κλείσιμο πριν και μετά την φόρτωση ή την εκφόρτωση των επιστομιών ή παρομοίων εξαρτημάτων που συνδέουν εσωτερικώς τις δεξαμενές φορτίου (ιιιι) άνοιγμα ή κλείσιμο των μέσων της επικοινωνίας μεταξύ των σωληνώσεων του φορτίου και των σωληνώσεων του θαλασσίου έρματος (ιιιιι) άνοιγμα ή κλείσιμο των επιστομιών της πλευράς του πλοίου πριν, κατά την διάρκεια ή μετά την φόρτωση ή την εκφόρτωση

(ιιιιι) εκφόρτωση του φορτίου πετρελαίου (ιιιιιι) ερματισμός των δεξαμενών φορτίου (ιιιιιιι) Καθαρισμός των δεξαμενών φορτίου (ιγ) απόρριψη έρματος εκτός από το διαχωρισμένο έρμα (γ) απόρριψη του ύδατος από τις δεξαμενές καταλοίπων

(γι) διάθεση καταλοίπων (γιι) απόρριψη από το πλοίο στην θάλασσα των υδάτων των υδροσυλλεκτών, που συγκεντρώνονται στο μηχανοστάσιο ενώ ευρίσκεται σε λιμάνι κατά την συνήθη απόρριψη στην θάλασσα των υδάτων από τους υδροσυλλέκτες που συγκεντρώνονται στο μηχανοστάσιο (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α'89/21.7.1982).

(β) Για πλοία που δεν είναι πετρελαιοφόρα: (ι) ερματισμός ή καθαρισμός των δεξαμενών καυσίμου πετρελαίου ή των χώρων φορτίου πετρελαίου (ιι) απόρριψη του έρματος ή του ύδατος καθαρισμού από τις δεξαμενές που αναφέρονται στο (ι) της παρούσης υποπαραγράφου. (ιιι) διάθεση καταλοίπων

(iv) απόρριψη από το πλοίο στην θάλασσα των υδάτων των υδροσυλλεκτών που συγκεντρώνονται στο μηχανοστάσιο, ενώ ευρίσκεται σε λιμάνι και στην συνήθη απόρριψη στην θάλασσα των υδάτων από τους υδροσυλλέκτες, που έχουν συγκεντρωθεί στο μηχανοστάσιο.

(3) Σε περίπτωση τέτοιων απορρίψεων πετρελαίου ή μίγματος πετρελαίου, όπως αναφέρεται στον Κανονισμό 11 του παρόντος Παραρτήματος ή στην περίπτωση τυχαίας ή άλλης εξαιρετικής απορρίψεως πετρελαίου, που δεν εξαιρείται από τον παρόντα Κανονισμό θα γίνει έκθεση στο Βιβλίο Πετρελαίου των περιστατικών και των αιτιών της απορρίψεως.

(4) Κάθε λειτουργία που περιγράφεται στην παράγραφο (2) του παρόντος Κανονισμού θα αναφέρεται πλήρως χωρίς καθυστέρηση στο Βιβλίο Πετρελαίου με τρόπο ώστε να συμπληρωθούν όλες οι εγγραφές που απαιτούνται για αυτήν την συγκεκριμένη λειτουργία. Κάθε τμήμα Βιβλίου θα είναι υπογεγραμμένο από τον αξιωματικό ή τους Αξιωματικούς υπηρεσίας για την αναφερόμενη λειτουργία και υπογεγραμμένο επίσης από τον Πλοίαρχο του πλοίου. Οι εγγραφές στο Βιβλίο πετρελαίου θα είναι στην επίσημη γλώσσα του Κράτους, την σημαία του οποίου φέρει το πλοίο για πλοία δε που έχουν Διεθνές πιστοποιητικό Αποφυγής Ρυπάνσεως από πετρέλαιο (1973) και στα Αγγλικά ή τα Γαλλικά. Οι εγγραφές στην επίσημη εθνική γλώσσα του Κράτους, την σημαία του οποίου φέρει το πλοίο θα επικρατούν, σε περίπτωση αμφισβητήσεως ή ασυμφωνίας.

(5) Το Βιβλίο Πετρελαίου θα φυλάσσεται σε κατάλληλο μέρος, ώστε να είναι αμέσως διαθέσιμο κατά πάντα χρόνο και θα κρατείται επί του πλοίου εκτός της περιπτώσεως πλοίων, χωρίς πλήρωμα υπό ρυμούλκηση. Θα διατηρείται επί μία περίοδο τριών ετών μετά την τελευταία εγγραφή.

(6) Η αρμόδια Αρχή της Κυβερνήσεως του Μέρους της Συμβάσεως μπορεί να επιθεωρήσει το Βιβλίο Πετρελαίου κάθε πλοίου στο οποίο εφαρμόζεται το παρόν Παράρτημα ενώ το πλοίο ευρίσκεται σε λιμάνι ή σταθμούς μακριά από την ακτή και μπορεί να λαμβάνει αντίγραφο κάθε εγγραφής σ' αυτό το βιβλίο και μπορεί να απαιτήσει από τον Πλοίαρχο του πλοίου να επικυρώσει το ακριβές του αντιγράφου αυτής της καταγραφής. Κάθε αντίγραφο που γίνεται έτσι και έχει επικυρωθεί από τον Πλοίαρχο ως ακριβές αντίγραφο μιας εγγραφής στο βιβλίο πετρελαίου θα γίνεται αποδεκτό σε κάθε δικαστική διαδικασία σαν μαρτυρία των γεγονότων που εκθέτονται στην εγγραφή. Η επιθεώρηση ενός Βιβλίου Πετρελαίου και η λήψη του επικυρωθέντος αντιγράφου από την αρμόδια Αρχή σύμφωνα με την παρούσα

παράγραφο θα εκτελείται όσον το δυνατό ταχύτερα, χωρίς να προκαλεί στο πλοίο αδικαιολόγητη καθυστέρηση (Νόμος 1269 ΦΕΚ Α΄89/21.7.1982).

Οι εθνικές προσεγγίσεις για τη ρύθμιση του καθαρισμού των σκαφών ποικίλλουν σημαντικά, αλλά γενικά στοχεύουν στην προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων από χωροκατακτητικά είδη, στη μείωση της ρύπανσης από αντιρρυπαντικά επιχρίσματα και στη διασφάλιση ασφαλών συνθηκών εργασίας για τους χειριστές. Αντί να απαγορεύουν ή να επιτρέπουν απλώς τον καθαρισμό των σκαφών, οι περισσότερες εθνικές νομοθεσίες υιοθετούν πλέον ένα πλαίσιο βασισμένο στον κίνδυνο: επιτρέπουν τον καθαρισμό υπό συγκεκριμένες συνθήκες και με εγκεκριμένες μεθόδους που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές βλάβες.

Σε πολλές δικαιοδοσίες (όπως η Αυστραλία, η Νέα Ζηλανδία και οι Ηνωμένες Πολιτείες), ο καθαρισμός εν πλω είτε απαγορεύεται εντελώς είτε επιτρέπεται μόνο όταν δεν απελευθερώνονται υπολείμματα αντιρρυπαντικών χρωμάτων στο νερό. Για παράδειγμα, το πρότυπο διαχείρισης κινδύνων σκαφών της Νέας Ζηλανδίας απαιτεί τα σκάφη να φτάνουν με «καθαρό κύτος», μεταθέτοντας ουσιαστικά την ευθύνη στους πλοιοκτήτες να αποτρέπουν τη συσσώρευση ρύπων αντί να την απομακρύνουν στο λιμάνι. Ο κανονισμός αυτός αποσκοπεί κυρίως στην πρόληψη της εισαγωγής χωροκατακτητικών ειδών που μπορούν να μεταφερθούν στις επιφάνειες της γάστρας.

Αντίθετα, οι ευρωπαϊκές χώρες συχνά επιτρέπουν τον καθαρισμό εντός του νερού, αλλά υπό αυστηρές προϋποθέσεις. Για παράδειγμα, στη Φινλανδία και τη Σουηδία, τα πλοία μπορούν να καθαρίζονται σε καθορισμένες περιοχές εξοπλισμένες με συστήματα συλλογής και φιλτραρίσματος που συλλέγουν τα υλικά ρύπανσης και αποτρέπουν την απελευθέρωση βιοκτόνων, βαρέων μετάλλων ή μικροπλαστικών στη θάλασσα. Αυτό αντανακλά μια αρχή προφύλαξης, σύμφωνα με την οποία ο καθαρισμός επιτρέπεται μόνο εάν ελέγχονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες ακολουθούν ένα πιο κατακερματισμένο μοντέλο: ενώ ομοσπονδιακές υπηρεσίες όπως η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) παρέχουν γενικούς κανονισμούς για τις απορρίψεις μέσω της Γενικής Άδειας Πλοίων (VGP), οι μεμονωμένες πολιτείες μπορούν να επιβάλλουν αυστηρότερα πρότυπα. Για παράδειγμα, η Καλιφόρνια και η πολιτεία της Ουάσιγκτον έχουν θεσπίσει κανονισμούς που περιορίζουν τον καθαρισμό της γάστρας στο νερό και ενθαρρύνουν τη χρήση μη τοξικών αντιρρυπαντικών επιστρώσεων. Αυτό δημιουργεί προκλήσεις για τους πλοιοκτήτες, οι οποίοι πρέπει να

συμμορφώνονται με διαφορετικούς περιφερειακούς κανόνες όταν πλέουν κατά μήκος των ακτών των ΗΠΑ.

Από τη σκοπιά των πλοιοκτητών, η εθνική νομοθεσία έχει τρεις σημαντικές συνέπειες:

Κόστος συμμόρφωσης: Οι πλοιοκτήτες ενδέχεται να υποχρεούνται να προγραμματίζουν τον καθαρισμό της γάστρας σε συγκεκριμένες εγκεκριμένες εγκαταστάσεις, οι οποίες δεν είναι πάντα γεωγραφικά βολικές.

Λειτουργικός σχεδιασμός: Η απαγόρευση του καθαρισμού εν πλω σε ορισμένες χώρες σημαίνει ότι τα πλοία πρέπει να βασίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό σε προγράμματα ξηράς αποβάθρας και προηγμένα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα.

Νομική αβεβαιότητα: Επειδή η νομοθεσία διαφέρει από χώρα σε χώρα, τα πλοία που λειτουργούν σε παγκόσμιο επίπεδο αντιμετωπίζουν ένα μωσαϊκό απαιτήσεων, το οποίο περιπλέκει τη συμμόρφωση και αυξάνει το διοικητικό φόρτο.

Συνοψίζοντας, η εθνική νομοθεσία για τον καθαρισμό της γάστρας αντανακλά μια ισορροπία μεταξύ της προστασίας του περιβάλλοντος και της επιχειρησιακής σκοπιμότητας. Ενώ ορισμένες χώρες υιοθετούν πολιτικές μηδενικής ανοχής για τον καθαρισμό εντός του νερού, άλλες επικεντρώνονται στον έλεγχο της διαδικασίας καθαρισμού μέσω τεχνολογιών σύλληψης. Για τις διεθνείς ναυτιλιακές εταιρείες, η ποικιλομορφία των εθνικών κανόνων υπογραμμίζει την ανάγκη για εναρμονισμένα πρότυπα, όπου οι κατευθυντήριες γραμμές του ΔΝΟ διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο (βλ. ενότητα 5.2).

5.2 Κατευθυντήριες γραμμές του IMO για τις πρακτικές καθαρισμού

Η γάστρα του πλοίου είναι κρίσιμη κατασκευή που απαιτεί τακτικό και σχολαστικό καθαρισμό για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα της ναυσιπλοΐας. Ο καθαρισμός περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογικές, λειτουργικές και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις, οι οποίες ρυθμίζονται από τη διεθνή ναυτιλιακή νομοθεσία. Μεταξύ των σημαντικότερων ρυθμιστικών φορέων που εποπτεύουν τις ναυτιλιακές δραστηριότητες είναι ο **Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)** και η **Σύμβαση MARPOL** (Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία). Αυτά τα κανονιστικά πλαίσια θεσπίζουν κατευθυντήριες γραμμές για τις πρακτικές καθαρισμού, τη διαχείριση αποβλήτων και την πρόληψη της ρύπανσης, διασφαλίζοντας ότι οι λειτουργίες των πλοίων παραμένουν συμβατές

με τα παγκόσμια πρότυπα ασφάλειας και περιβάλλοντος. Η παρούσα ανάλυση διερευνά τις βασικές πτυχές των κατευθυντήριων γραμμών του IMO και των κανονισμών της MARPOL που σχετίζονται με τον καθαρισμό της τιμονιέρας του πλοίου και τις ευρύτερες επιπτώσεις τους (IMO, 2020).

Ο **Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)** είναι ένας εξειδικευμένος οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών που είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση των παγκόσμιων ναυτιλιακών πρακτικών. Ιδρύθηκε το 1948 και αναπτύσσει πρότυπα για τη ναυτική ασφάλεια, την προστασία και τις περιβαλλοντικές επιδόσεις. Σημαντική εστίαση των κανονισμών του IMO είναι η διατήρηση της υγιεινής και της ασφάλειας σε κρίσιμους χώρους όπως η τιμονιέρα, όπου ο ακατάλληλος καθαρισμός μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργικούς κινδύνους και μόλυνση του περιβάλλοντος (IMO, 2020).

Ο IMO παρέχει γενικές και ειδικές συστάσεις σχετικά με τις πρακτικές καθαρισμού στα πλοία, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης φιλικών προς το περιβάλλον ουσιών και ασφαλών μεθόδων διάθεσης. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές ενσωματώνονται σε διάφορες συμβάσεις του IMO, όπως ο **Διεθνής Κώδικας Διαχείρισης Ασφάλειας (ISM)**, η **Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS)**, και η **Διεθνής Σύμβαση για τα Πρότυπα Εκπαίδευσης, Πιστοποίησης και Φύλαξης των Ναυτικών (STCW)** (IMO, 2020).

- **Συμμόρφωση με τον κώδικα ISM:** Ο Κώδικας ISM επιβάλλει στους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων να εφαρμόζουν ένα δομημένο σύστημα διαχείρισης για την εξασφάλιση διαδικασιών ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένου του καθαρισμού και της συντήρησης του εξοπλισμού πλοήγησης στην γάστρα.
- **Σύμβαση SOLAS:** Η σύμβαση αυτή δίνει έμφαση στην πρόληψη πυρκαγιάς και στον κατάλληλο εξαερισμό κατά τις εργασίες καθαρισμού, καθώς οι χημικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό του τιμονιού μπορεί να δημιουργήσουν επικίνδυνες συνθήκες (IMO, 2023).
- **Πρότυπα STCW:** Τα μέλη του πληρώματος που εμπλέκονται στον καθαρισμό πρέπει να υποβάλλονται σε εκπαίδευση σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές STCW, ώστε να διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τις βέλτιστες πρακτικές για την υγιεινή και την περιβαλλοντική ασφάλεια.

Ο ΙΜΟ ενθαρρύνει τη χρήση βιοδιασπώμενων καθαριστικών μέσων και επιβάλλει την αποφυγή επιβλαβών χημικών ουσιών. Οι κατευθυντήριες γραμμές στο πλαίσιο των πρωτοβουλιών του ΙΜΟ για την πράσινη ναυτιλία συνιστούν:

Μείωση της χρήσης τοξικών χημικών ουσιών σε διαλύματα καθαρισμού.

Εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων εξαερισμού για την αποφυγή επιβλαβών εκπομπών (ΙΜΟ, 2023).

Χρήση αυτοματοποιημένης τεχνολογίας καθαρισμού για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης του ανθρώπου σε επικίνδυνες ουσίες.

Το **σχέδιο διαχείρισης απορριμμάτων (GMP)** του ΙΜΟ, που επιβάλλεται βάσει του **παραρτήματος V της MARPOL**, απαιτεί από τα πλοία να διαχωρίζουν και να απορρίπτουν κατάλληλα τα απόβλητα που παράγονται από τις δραστηριότητες καθαρισμού, συμπεριλαμβανομένων:

- **Χημικά κατάλοιπα** από τα καθαριστικά μέσα.
- **Μολυσμένα λύματα** από εργασίες καθαρισμού.
- **Διάθεση στερεών αποβλήτων** σύμφωνα με τους κανονισμούς των λιμενικών εγκαταστάσεων υποδοχής.

Επισκόπηση της σύμβασης MARPOL

Η **Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL)** είναι μία από τις πιο κρίσιμες διεθνείς συνθήκες που αφορούν τη ρύπανση από θαλάσσιες δραστηριότητες. Η MARPOL, η οποία εγκρίθηκε το 1973 και τροποποιήθηκε από το Πρωτόκολλο του 1978, αποτελείται από έξι παραρτήματα, καθένα από τα οποία ασχολείται με συγκεκριμένους τύπους ρύπανσης από πλοία. Ο καθαρισμός πηδαλίου του πλοίου εμπίπτει στους ευρύτερους κανονισμούς της MARPOL σχετικά με τη χρήση χημικών ουσιών, την απόρριψη υγρών αποβλήτων και τον έλεγχο της ρύπανσης (ΙΜΟ, 2023).

Παράρτημα I της MARPOL: Πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο

Ενώ το παράρτημα I επικεντρώνεται κυρίως στις πετρελαιοκηλίδες, εφαρμόζεται επίσης στα προϊόντα καθαρισμού που περιέχουν ουσίες με βάση το πετρέλαιο. Ο κανονισμός επιβάλλει ότι:

- **Τα καθαριστικά με βάση το πετρέλαιο** δεν πρέπει να απορρίπτονται στη θάλασσα.

- Πρέπει να χρησιμοποιούνται **διαχωριστές πετρελαίου** όταν τα προϊόντα καθαρισμού περιέχουν παράγωγα πετρελαίου.
- **Οι λιμενικές εγκαταστάσεις υποδοχής** πρέπει να χρησιμοποιούνται για την απόρριψη τυχόν μολυσμένων με πετρέλαιο υπολειμμάτων καθαρισμού.

Παράρτημα II της MARPOL: Έλεγχος των επιβλαβών υγρών ουσιών

Τα μέσα καθαρισμού που χρησιμοποιούνται στην τιμονιέρα μπορεί να περιέχουν **επιβλαβείς υγρές ουσίες (NLS)**, οι οποίες μπορεί να είναι επιβλαβείς για τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Το παράρτημα II ρυθμίζει:

- Την **ταξινόμηση των μέσων καθαρισμού** σε επιτρεπόμενες και περιορισμένες ουσίες.
- Τα **κριτήρια απόρριψης** για τα καθαριστικά διαλύματα, διασφαλίζοντας ότι δεν απελευθερώνονται επικίνδυνα χημικά στον ωκεανό.
- Την **απαίτηση τεκμηρίωσης** σχετικά με τη διάθεση των υπολειμμάτων καθαρισμού που περιέχουν NLS (BIMCO, 2025).

Παράρτημα III της MARPOL: Επιβλαβείς ουσίες σε συσκευασμένη μορφή

Πολλά προϊόντα καθαρισμού που χρησιμοποιούνται μεταφέρονται σε εμπορευματοκιβώτια. Το παράρτημα III διέπει την επισήμανση, τη συσκευασία και το χειρισμό των επικίνδυνων ουσιών καθαρισμού για την αποφυγή τυχαίας διαρροής ή μόλυνσης. Οι κανονισμοί στο πλαίσιο αυτού του παραρτήματος περιλαμβάνουν:

- Σωστή **αποθήκευση** των χημικών ουσιών καθαρισμού για την αποφυγή διαρροών.
- **Κανονισμοί διάθεσης** που διασφαλίζουν ότι τα απόβλητα συσκευασίας χειρίζονται κατάλληλα.
- **Επισήμανση και τεκμηρίωση** για τα χημικά επί του σκάφους που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό (BIMCO, 2025).

Παράρτημα IV της MARPOL: Πρόληψη της ρύπανσης από λύματα

Αν και το παράρτημα IV ασχολείται κυρίως με τα ανθρώπινα απόβλητα, είναι επίσης σχετικό με τις δραστηριότητες καθαρισμού που περιλαμβάνουν τη διάθεση λυμάτων. Επιβάλλει τα εξής:

- Τα γκρίζα ύδατα από τον καθαρισμό πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία πριν από την απόρριψη.
- Τα πλοία πρέπει να χρησιμοποιούν **εγκεκριμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων** για τα λύματα που παράγονται από εργασίες καθαρισμού.
- Πρέπει να τηρούνται αυστηρά **όρια απόρριψης** εντός **ειδικών περιοχών** που ορίζονται από τη MARPOL (BIMCO, 2025).

Παράρτημα V της MARPOL: Κανονισμοί διάθεσης απορριμμάτων

Το παράρτημα V είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον καθαρισμό της τιμονιέρας, καθώς ρυθμίζει:

- Τη **διάθεση των πανιών καθαρισμού, των πανιών και των στερεών αποβλήτων.**
- Την απαγόρευση **απόρριψης πλαστικών ή άλλων μη βιοδιασπώμενων υλικών** που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό.
- Την τήρηση **βιβλίων καταγραφής απορριμμάτων**, όπου τεκμηριώνονται όλες οι δραστηριότητες διάθεσης αποβλήτων που σχετίζονται με τις εργασίες καθαρισμού.

Παράρτημα VI της MARPOL: Πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Ορισμένες διαδικασίες καθαρισμού συνεπάγονται την απελευθέρωση **πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC)**, οι οποίες συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Το παράρτημα VI ορίζει όρια για:

- Τη **χρήση χημικών αερολυμάτων** σε διαλύματα καθαρισμού.
- Την **εκπομπή επικίνδυνων αναθυμιάσεων** από καθαριστικά μέσα με χημική βάση.
- Την προώθηση **εναλλακτικών λύσεων με χαμηλές εκπομπές**, όπως ο καθαρισμός με ατμό και η απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία.

Μέτρα συμμόρφωσης και βέλτιστες πρακτικές του κλάδου

Για να εξασφαλιστεί η συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO και της MARPOL, η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει υιοθετήσει διάφορες βέλτιστες πρακτικές, όπως

- **Επιθεωρήσεις ρουτίνας:** Τα πλοία υποβάλλονται σε περιοδικούς ελέγχους για να επαληθεύεται η τήρηση των κανονισμών καθαρισμού και διαχείρισης αποβλήτων.

- **Προγράμματα εκπαίδευσης του πληρώματος:** Οι ναυτικοί λαμβάνουν εκπαίδευση σχετικά με τη χρήση ασφαλών και συμβατών προϊόντων καθαρισμού.
- **Χρήση φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών καθαρισμού:** Οι εταιρείες επενδύουν σε **βιοδιασπώμενα απορρυπαντικά, καθαρισμό με ατμό και αυτοματοποιημένα συστήματα καθαρισμού** για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- **Συνεργασίες για τη διάθεση των αποβλήτων:** Τα πλοία συνεργάζονται με τις λιμενικές εγκαταστάσεις υποδοχής για να διασφαλίσουν τη σωστή διαχείριση των αποβλήτων και τη διάθεση των χημικών ουσιών.

Ο καθαρισμός ενός πλοίου υπόκειται σε αυστηρούς διεθνείς κανονισμούς βάσει των κατευθυντήριων γραμμών του IMO και των διατάξεων της MARPOL. Οι κανονισμοί αυτοί επικεντρώνονται στη διατήρηση της ασφάλειας, τη μείωση της ρύπανσης και την εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών καθαρισμού. Η συμμόρφωση με αυτά τα διεθνή πλαίσια διασφαλίζει ότι τα πλοία λειτουργούν με ασφάλεια και με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Καθώς οι ναυτιλιακοί κανονισμοί συνεχίζουν να εξελίσσονται, ο κλάδος πρέπει να παραμείνει ενεργός στην υιοθέτηση **καινοτόμων, φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών καθαρισμού** και στην τήρηση των διεθνών περιβαλλοντικών προτύπων (BIMCO, 2025).

5.3 Κανονισμοί για την ασφάλεια και την υγεία στο χώρο εργασίας

Οι κανονισμοί για την ασφάλεια και την υγεία στον χώρο εργασίας είναι θεμελιώδους σημασίας για να διασφαλιστεί ότι οι εργασίες καθαρισμού στην τιμονιέρα του πλοίου δεν θέτουν σε κίνδυνο τους εργαζόμενους. Ο Οργανισμός Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας (OSHA) και η Διεθνής Οργάνωση Εργασίας (ΔΟΕ) παρέχουν ολοκληρωμένα πλαίσια για την προστασία των ναυτικών εργαζομένων από διάφορους κινδύνους, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε χημικές ουσίες, των σωματικών τραυματισμών και των εργονομικών προκλήσεων. Τα ρυθμιστικά πρότυπα του OSHA επιβάλλουν τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, τον κατάλληλο χειρισμό επικίνδυνων ουσιών και την τήρηση των απαιτήσεων για τον ατομικό προστατευτικό εξοπλισμό (ΜΑΠ). Η ΔΟΕ, μέσω της Σύμβασης Ναυτικής Εργασίας (MLC), θεσπίζει επίσης τα απαραίτητα πρωτόκολλα ασφαλείας για τη διατήρηση ασφαλών και υγιεινών συνθηκών εργασίας, τονίζοντας τη σημασία της εκπαίδευσης και της πρόληψης των κινδύνων σε περιβάλλοντα πλοίων (Port technology, 2025).

Η χρήση του ατομικού προστατευτικού εξοπλισμού (ΜΑΠ) αποτελεί πρωταρχική δικλείδα ασφαλείας κατά της έκθεσης σε επικίνδυνα καθαριστικά μέσα και μολυσματικούς παράγοντες που υπάρχουν στο πηδάλιο του πλοίου. Οι κατευθυντήριες γραμμές του OSHA και της ΔΟΕ ορίζουν ότι το προσωπικό καθαρισμού πρέπει να είναι εφοδιασμένο με γάντια, αναπνευστήρες, προστατευτικά γυαλιά και κατάλληλο ρουχισμό για να προστατεύεται από πιθανές βλάβες. Οι εργοδότες είναι υπεύθυνοι να διασφαλίζουν ότι οι εργαζόμενοι εκπαιδεύονται επαρκώς στη σωστή χρήση, συντήρηση και απόρριψη των ΜΑΠ. Θα πρέπει να διενεργούνται τακτικές εκτιμήσεις κινδύνου για τον εντοπισμό των κινδύνων στον χώρο εργασίας, ακολουθούμενες από την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων για τον μετριασμό των πιθανών κινδύνων. Η παραμέληση αυτών των μέτρων ασφαλείας μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρούς τραυματισμούς, αναπνευστικά προβλήματα ή χημικά εγκαύματα, καθιστώντας τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς για τα ΜΑΠ μια κρίσιμη πτυχή της ασφάλειας στο χώρο εργασίας στη ναυτιλία (Port technology, 2025).

Οι κανονισμοί για τη διάθεση χημικών ουσιών και αποβλήτων διέπουν τη διαχείριση των επικίνδυνων ουσιών που χρησιμοποιούνται κατά τις διαδικασίες καθαρισμού. Η MARPOL (Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία) επιβάλλει αυστηρές κατευθυντήριες γραμμές για την αποτροπή της μόλυνσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από επιβλαβείς χημικές ουσίες. Οι ουσίες καθαρισμού που ταξινομούνται ως επικίνδυνες πρέπει να αποθηκεύονται σε σαφώς καθορισμένους χώρους με κατάλληλη σήμανση και συνοδευτικά δελτία δεδομένων ασφαλείας. Οι διαδικασίες διάθεσης πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τις απαιτήσεις των λιμενικών εγκαταστάσεων υποδοχής, διασφαλίζοντας ότι οι τοξικές ουσίες υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία πριν από τη διάθεση. Η μη συμμόρφωση με αυτούς τους κανονισμούς μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες, συμπεριλαμβανομένης της ρύπανσης και της ζημίας στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Τα λύματα και οι εκπομπές που παράγονται από τις δραστηριότητες καθαρισμού απαιτούν επιμελή διαχείριση για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς της MARPOL. Τα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά τις εργασίες καθαρισμού του τιμονιού πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία πριν από την απόρριψη για την απομάκρυνση τυχόν επιβλαβών ρύπων. Τα χημικά κατάλοιπα, συμπεριλαμβανομένων των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), αποτελούν κίνδυνο για την ποιότητα του αέρα και πρέπει να ελαχιστοποιούνται με τη χρήση εναλλακτικών ουσιών φιλικών προς το περιβάλλον. Τα προηγμένα συστήματα φιλτραρίσματος και οι βιώσιμες τεχνολογίες καθαρισμού μπορούν να μειώσουν το

περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δραστηριοτήτων συντήρησης πλοίων, διασφαλίζοντας ότι οι εκπομπές και τα απόβλητα πληρούν τα διεθνή κανονιστικά πρότυπα. Η υιοθέτηση οικολογικών λύσεων καθαρισμού, όπως βιοδιασπώμενα απορρυπαντικά και μέθοδοι αποδοτικής χρήσης του νερού, ενισχύει περαιτέρω τη συμμόρφωση με τους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας (Port technology, 2025).

Για τη διατήρηση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς για την ασφάλεια στο χώρο εργασίας και τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, οι φορείς εκμετάλλευσης πλοίων πρέπει να εφαρμόζουν αυστηρά προγράμματα κατάρτισης για το προσωπικό καθαρισμού. Τα προγράμματα αυτά θα πρέπει να καλύπτουν τεχνικές ασφαλούς χειρισμού επικίνδυνων ουσιών, σωστή χρήση ΜΑΠ, διαδικασίες αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης και πρωτόκολλα διάθεσης αποβλήτων. Η συνεχής παρακολούθηση και η τήρηση των κατευθυντήριων γραμμών OSHA, ILO και MARPOL όχι μόνο προστατεύουν τα μέλη του πληρώματος, αλλά συμβάλλουν και στη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η επιβολή αυστηρών μέτρων ασφαλείας διασφαλίζει ότι οι διαδικασίες καθαρισμού στην τιμονιέρα του πλοίου διεξάγονται με υπευθυνότητα, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για το θαλάσσιο οικοσύστημα (Port technology, 2025).

6. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του καθαρισμού της γάστρας

Η διαδικασία καθαρισμού της γάστρας των πλοίων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της υδροδυναμικής απόδοσης και τον έλεγχο της κατανάλωσης καυσίμων, αλλά δημιουργεί επίσης σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους. Όταν οι επιφάνειες της γάστρας καθαρίζονται εν πλω ή κατά τη διάρκεια δεξαμενισμού, ρύποι και βιολογικό υλικό απελευθερώνονται αναπόφευκτα στο περιβάλλον. Αυτά περιλαμβάνουν χημικά κατάλοιπα από αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, βιώσιμους οργανισμούς που μπορούν να εξαπλωθούν ως χωροκατακτητικά είδη και σωματιδιακά απορρίμματα όπως βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά.

Η περιβαλλοντική διάσταση του καθαρισμού της γάστρας είναι επομένως κεντρικής σημασίας τόσο για τους εθνικούς κανονισμούς όσο και για τις διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές, καθώς συνδέει άμεσα τις θαλάσσιες επιχειρησιακές πρακτικές με την υγεία του οικοσυστήματος και την προστασία της παγκόσμιας βιοποικιλότητας. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τέσσερις κύριοι τομείς περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος: η απελευθέρωση υπολειμμάτων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και βιοκτόνων, η εξάπλωση χωροκατακτητικών ειδών μέσω των δραστηριοτήτων καθαρισμού, η ρύπανση από βαρύτερα μέταλλα και μικροπλαστικά, καθώς και μελέτες περιπτώσεων που απεικονίζουν την πραγματική έκταση αυτών των ζητημάτων.

6.1 Απελευθέρωση υπολειμμάτων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και βιοκτόνων

Οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις έχουν σχεδιαστεί για να εμποδίζουν την προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών, αλλά η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, απαιτώντας περιοδικό καθαρισμό. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του καθαρισμού και των αντιρρυπαντικών στρωμάτων είναι πολύπλοκη: η φυσική απομάκρυνση των ρύπων συχνά απομακρύνει όχι μόνο βιολογικό υλικό, αλλά και θραύσματα της ίδιας της προστατευτικής επίστρωσης, απελευθερώνοντας χημικά συστατικά στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ιστορικά, τα επιχρίσματα περιείχαν οργανικές ενώσεις κασσίτερου, όπως το τριβουτυλοκασσίτερο (TBT), οι οποίες καταργήθηκαν σταδιακά μετά τη Διεθνή Σύμβαση του 2001 για τον Έλεγχο των Επιβλαβών Αντιρρυπαντικών Συστημάτων στα Πλοία, λόγω της τοξικότητάς και της ανθεκτικότητάς τους. Ωστόσο, τα σύγχρονα επιχρίσματα εξακολουθούν να βασίζονται σε χαλκό, ψευδάργυρο και διάφορα ενισχυτικά βιοκτόνα, τα

οποία, αν και λιγότερο τοξικά από το TBT, εξακολουθούν να ενέχουν οικολογικούς κινδύνους όταν κινητοποιούνται σε σημαντικές ποσότητες (Lagerström et al., 2020; Turner, 2010).

Οι Lagerström και συνάδελφοι (2020) ποσοτικοποίησαν την έκπλυση χαλκού από σύγχρονα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα και διαπίστωσαν ότι, σε πολλές περιπτώσεις, οι ρυθμοί έκλυσης υπερέβαιναν τις προβλεπόμενες περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις κατά δύο έως τρεις φορές. Ενώ η κανονική έκπλυση συμβαίνει παθητικά με την πάροδο του χρόνου, ο μηχανικός καθαρισμός επιταχύνει αυτή τη διαδικασία, καθώς αποξέει την επιφάνεια και εκθέτει νέα στρώματα ενεργού βαφής. Ο Turner (2010) τόνισε ότι το πρόβλημα επιδεινώνεται σε λιμενικά περιβάλλοντα, όπου τα υπολείμματα καθαρισμού συσσωρεύονται στα ιζήματα και λειτουργούν ως μακροπρόθεσμες πηγές μεταλλικής μόλυνσης. Τα υπολείμματα αυτά μπορεί να υπερβαίνουν τα ρυθμιστικά όρια για τον οικοτοξικολογικό κίνδυνο, ιδίως σε ρηγά ή κλειστά νερά με περιορισμένη κυκλοφορία.

Ο καθαρισμός εντός του νερού παρουσιάζει μια μοναδική πρόκληση, επειδή πραγματοποιείται στο ίδιο περιβάλλον όπου απελευθερώνονται τα βιοκτόνα. Σε αντίθεση με τις ελεγχόμενες εγκαταστάσεις ξηράς δεξαμενής, οι οποίες μπορούν να συλλέγουν και να επεξεργάζονται τα απορρίμματα, ο καθαρισμός εντός του νερού απορρίπτει σωματίδια βαφής και βιοκτόνα απευθείας στη στήλη νερού. Οι Oliveira et al. (2020) απέδειξαν ότι ο καθαρισμός εντός του νερού μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απελευθέρωση χαλκού και ψευδαργύρου στα γύρω νερά, με μετρήσιμες επιπτώσεις στη χημεία του νερού και πιθανή βλάβη σε μη στοχευόμενους οργανισμούς. Σε μεταγενέστερη εργασία τους (Oliveira et al., 2022) τόνισαν ότι, αν και ο καθαρισμός εντός του νερού μειώνει την αντίσταση και τις εκπομπές καυσίμων, μπορεί να αντισταθμίσει ακούσια ορισμένα από αυτά τα οφέλη εισάγοντας ρύπους στα τοπικά οικοσυστήματα. Το παράδοξο είναι σαφές: τα περιβαλλοντικά οφέλη σε παγκόσμια κλίμακα (χαμηλότερες εκπομπές CO₂ από τη βελτιωμένη απόδοση της γάστρας) μπορεί να έρχονται σε σύγκρουση με τα τοπικά περιβαλλοντικά κόστη (ρύπανση από βιοκτόνα κοντά στα λιμάνια).

Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν την ανάγκη για ρυθμιστικά πλαίσια που απαιτούν τη συλλογή και επεξεργασία των υπολειμμάτων κατά τη διάρκεια των εργασιών καθαρισμού. Τεχνολογίες όπως τα συστήματα συλλογής με κενό αέρα και τα συστήματα φιλτραρίσματος υιοθετούνται όλο και περισσότερο στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, όπου η νομοθεσία δίνει έμφαση στην αρχή της προφύλαξης. Ωστόσο, ακόμη και με τα συστήματα συλλογής, είναι αναπόφευκτη η απελευθέρωση βιοκτόνων σε κάποιο βαθμό, γεγονός που υπογραμμίζει

την ανάγκη για συνεχή ανάπτυξη μη τοξικών αντιρρυπαντικών επιστρώσεων που δεν βασίζονται στην έκλυση βιοκτόνων.

6.2 Εξάπλωση χωροκατακτητικών ειδών μέσω δραστηριοτήτων καθαρισμού

Πέρα από τα χημικά προβλήματα, ο καθαρισμός της γάστρας έχει μια βαθιά βιολογική διάσταση: η κινητοποίηση των οργανισμών που προκαλούν ρύπανση κατά τον καθαρισμό μπορεί να συμβάλει στην εξάπλωση χωροκατακτητικών μη ενδημικών ειδών (NIS). Η βιολογική ρύπανση αναγνωρίζεται ως μία από τις κύριες οδούς για τις θαλάσσιες εισβολές, με τα πλοία να λειτουργούν ως φορείς που μεταφέρουν οργανισμούς πέρα από τα βιογεωγραφικά όρια (Chan et al., 2022). Όταν ο καθαρισμός απομακρύνει τη βιομάζα ρύπανσης, οι αποκολλημένοι οργανισμοί μπορεί να παραμείνουν βιώσιμοι, να εγκατασταθούν σε τοπικούς οικοτόπους και να δημιουργήσουν νέους πληθυσμούς.

Οι Chan και συνεργάτες (2022) σημείωσαν ότι, ενώ η διαχείριση του έρματος έχει λάβει μεγάλη προσοχή από τις ρυθμιστικές αρχές, η βιοεπικάλυψη της γάστρας μπορεί στην πραγματικότητα να αποτελεί εξίσου σημαντικό ή και μεγαλύτερο φορέα για την εισαγωγή ειδών. Η διαδικασία καθαρισμού επιταχύνει αυτόν τον κίνδυνο, καθώς μπορεί να απελευθερώσει μεγάλες ποσότητες βιώσιμης βιομάζας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό όταν τα πλοία καθαρίζονται σε παράκτια ύδατα που γειτνιάζουν με ευαίσθητα οικοσυστήματα, όπως κοραλλιογενείς ύφαλοι, θαλάσσια λιβάδια ή ζώνες υδατοκαλλιέργειας.

Το ζήτημα δεν περιορίζεται σε μακροοργανισμούς όπως μύδια ή πεταλίδες. Μικροσκοπικοί οργανισμοί όπως προνύμφες και κύστες συχνά υπάρχουν σε βιοφίλμ και μπορούν να διασκορπιστούν κατά τον καθαρισμό. Ο Turner (2010) παρατήρησε ότι τα σωματιδιακά υπολείμματα από αντιρρυπαντικά χρώματα συχνά περιέχουν ενσωματωμένη οργανική ύλη, δημιουργώντας έναν συνδυασμένο φορέα χημικής και βιολογικής ρύπανσης. Αυτή η συνέργεια αυξάνει το οικολογικό αποτύπωμα του καθαρισμού της γάστρας πολύ περισσότερο από ό,τι θα μπορούσε να υποτεθεί από τη χημική μόλυνση και μόνο.

Ως εκ τούτου, οι ρυθμιστικές απαντήσεις έχουν δώσει έμφαση στην προληπτική διαχείριση και όχι στον αντιδραστικό καθαρισμό. Για παράδειγμα, το Πρότυπο Διαχείρισης Κινδύνου Σκαφών της Νέας Ζηλανδίας απαιτεί τα πλοία να φτάνουν με καθαρή γάστρα, ελαχιστοποιώντας έτσι την ποσότητα της βιομάζας που θα μπορούσε να απελευθερωθεί μέσω

του καθαρισμού στα τοπικά ύδατα. Ομοίως, οι κατευθυντήριες γραμμές στο πλαίσιο διαχείρισης της βιοβλάστησης του ΔΝΟ (IMO, 2023) ενθαρρύνουν τα πλοία να εφαρμόζουν προληπτικές στρατηγικές διαχείρισης της γάστρας, όπως ο έγκαιρος καθαρισμός πριν από τη συσσώρευση σημαντικής βλάστησης. Με τη μείωση της πυκνότητας της βιομάζας στα κύτη, μειώνεται αντίστοιχα η πιθανότητα εξάπλωσης χωροκατακτητικών ειδών κατά τον καθαρισμό.

Ωστόσο, η επιβολή των κανονισμών παραμένει ασυνεπής σε όλες τις δικαιοδοσίες και ο καθαρισμός εντός του νερού συνεχίζει να πραγματοποιείται σε πολλά λιμάνια χωρίς τη συλλογή της βιομάζας. Η απουσία εναρμονισμένων διεθνών κανονισμών σημαίνει ότι οι εισβολές που σχετίζονται με τη βιολογική ρύπανση παραμένουν ένας επίμονος και υποτιμημένος κίνδυνος. Οι Chan et al. (2022) υποστηρίζουν ότι είναι απαραίτητος ο παγκόσμιος συντονισμός, καθώς η εξάπλωση των χωροκατακτητικών ειδών δεν περιορίζεται από τα εθνικά σύνορα, αλλά επηρεάζει ολόκληρες περιοχές.

6.3 Κίνδυνοι ρύπανσης: βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά

Ενώ η χημική απελευθέρωση βιοκτόνων αποτελεί πρωταρχικό μέλημα, ο καθαρισμός της γάστρας παράγει επίσης σημαντικές ποσότητες σωματιδιακής ρύπανσης. Η τριβή των αντιρρυπαντικών χρωμάτων κατά τη μηχανική καθαριότητα απομακρύνει όχι μόνο τους οργανισμούς που προκαλούν ρύπανση, αλλά και θραύσματα της υποκείμενης μήτρας επικάλυψης, η οποία συνήθως περιέχει μέταλλα όπως χαλκό και ψευδάργυρο. Αυτά τα σωματίδια συσσωρεύονται στη στήλη νερού και στα ιζήματα, όπου μπορούν να παραμείνουν για μεγάλες περιόδους και να λειτουργήσουν ως χρόνιες πηγές ρύπανσης.

Οι Lagerström et al. (2020) μέτρησαν τους ρυθμούς έκλυσης χαλκού από αντιρρυπαντικά χρώματα και διαπίστωσαν ότι, ακόμη και υπό κανονικές συνθήκες έκπλυσης, η ροή χαλκού στο θαλάσσιο περιβάλλον υπερέβαινε τις προβλεπόμενες τιμές. Όταν συμβαίνουν μηχανικές διαταραχές, όπως βούρτσισμα ή υδροβολές, η έκλυση αυξάνεται δραματικά. Αυτά τα σωματίδια, μόλις αποκολληθούν, συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα διαλυμένα βιοκτόνα: δεν είναι άμεσα βιοδιαθέσιμα, αλλά μπορούν να κατακαθίσουν στα ιζήματα και να υποστούν σταδιακή έκπλυση κατά τη διάρκεια ετών ή δεκαετιών. Αυτή η μακροχρόνια ανθεκτικότητα καθιστά τα υπολείμματα καθαρισμού της γάστρας ιδιαίτερα προβληματικά σε λιμάνια, ναυπηγεία και μαρίνες, όπου οι επαναλαμβανόμενες δραστηριότητες καθαρισμού δημιουργούν συσσωρευμένη ρύπανση. Ο Turner (2010) τόνισε ότι τα σωματίδια αντιρρυπαντικών χρωμάτων αντιπροσωπεύουν μια ξεχωριστή κατηγορία

θαλάσσιας ρύπανσης, γεφυρώνοντας τα χαρακτηριστικά των βαρέων μετάλλων και των μικροπλαστικών. Περιέχουν τόσο τοξικά στοιχεία όπως χαλκό και ψευδάργυρο όσο και συνθετικά πολυμερή που κατακερματίζονται περαιτέρω, εισάγοντας έτσι πολλαπλούς παράγοντες πίεσης στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Η διάσταση των μικροπλαστικών στον καθαρισμό των σκαφών έχει λάβει αυξανόμενη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Οι Kim et al. (2024) απέδειξαν ότι η υδροβολή των σκαφών κατά τη συντήρηση παράγει σημαντικές ποσότητες μικροπλαστικών υπολειμμάτων που προέρχονται από τις βαφές. Αυτά τα μικροπλαστικά διαφέρουν από άλλες κοινές πηγές, όπως τα απορρίμματα συσκευασίας, καθώς είναι συνήθως φορτωμένα με βιοκτόνα και βαρέα μέταλλα, δημιουργώντας ένα πιο περίπλοκο τοξικολογικό προφίλ. Μόλις εισαχθούν στο θαλάσσιο περιβάλλον, αυτά τα μικροπλαστικά μπορούν να καταποθούν από πλαγκτόν, φίλτρα και ψάρια, μεταφέροντας ρύπους μέσω της τροφικής αλυσίδας. Οι Oliveira et al. (2020, 2022) τόνισαν ότι, ενώ ο καθαρισμός στο νερό μειώνει την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές CO₂ σε παγκόσμια κλίμακα, η συνοδευτική απελευθέρωση τοξικών σωματιδίων βαφής αντισταθμίζει τοπικά ορισμένα από αυτά τα οφέλη.

Οι επιπτώσεις της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά εκτείνονται πέρα από την άμεση οικολογική τοξικότητα. Η μόλυνση των ιζημάτων δημιουργεί μακροπρόθεσμες προκλήσεις για τις εργασίες εκβάθυνσης, καθώς τα μολυσμένα ιζήματα μπορεί να απαιτούν δαπανηρή επεξεργασία ή απόρριψη. Η βιοσυσσώρευση μετάλλων σε βενθικούς οργανισμούς μπορεί επίσης να επηρεάσει την υδατοκαλλιέργεια και την αλιεία, εισάγοντας οικονομικούς κινδύνους παράλληλα με τους οικολογικούς. Ο Turner (2010) υποστήριξε ότι τα σωματίδια που προέρχονται από αντιρρυπαντικά αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες παραγνωρισμένες πηγές μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον, ανταγωνιζόμενα σε κλίμακα τα σωματίδια φθοράς ελαστικών, αλλά υπόκεινται σε πολύ λιγότερο ρυθμιστικό έλεγχο.

Επομένως, η διαχείριση των κινδύνων ρύπανσης από τον καθαρισμό της γάστρας πρέπει να αντιμετωπίζει τόσο τη χημική έκπλυση όσο και τη δημιουργία σωματιδίων. Οι τεχνολογίες σύλληψης που συνδυάζουν την αναρρόφηση με τη λεπτή διήθηση αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως απαραίτητες, αλλά η ευρεία υιοθέτησή τους εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Χωρίς τέτοια μέτρα, οι συνήθειες δραστηριότητες καθαρισμού θα συνεχίσουν να αποτελούν σημαντική πηγή βαρέων μετάλλων και μικροπλαστικών για τα παράκτια οικοσυστήματα.

6.4 Μελέτες περιπτώσεων και δεδομένα παρακολούθησης

Αρκετές μελέτες περιπτώσεων απεικονίζουν το μέγεθος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τον καθαρισμό της γάστρας . Οι Oliveira et al. (2020) διεξήγαγαν πειράματα πεδίου για να μετρήσουν την απελευθέρωση χαλκού και ψευδαργύρου κατά τη διάρκεια καθαρισμών στο νερό. Τα δεδομένα τους έδειξαν ότι οι τοπικές συγκεντρώσεις χαλκού στα γύρω ύδατα αυξήθηκαν έως και 50 φορές σε σχέση με τα επίπεδα του περιβάλλοντος αμέσως μετά τον καθαρισμό, με μετρήσιμες επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού. Σε μια μεταγενέστερη μελέτη, οι Oliveira et al. (2022) μοντελοποίησαν τη σχέση μεταξύ των εκπομπών που προκαλούνται από τον καθαρισμό και της εξοικονόμησης καυσίμων και CO₂ που επιτυγχάνεται από την αποκατάσταση της αποδοτικότητας της γάστρας . Τα αποτελέσματα υπογράμμισαν την παράδοση φύση του καθαρισμού: ενώ οι παγκόσμιες εκπομπές μειώνονται, τα τοπικά θαλάσσια περιβάλλοντα εκτίθενται σε έντονη ρύπανση.

Ο Turner (2010) κατέγραψε πολυάριθμες εκστρατείες παρακολούθησης σε λιμάνια σε όλη την Ευρώπη, όπου τα ιζήματα περιείχαν υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού και ψευδαργύρου που αποδίδονταν κυρίως σε δραστηριότητες συντήρησης πλοίων, συμπεριλαμβανομένου του καθαρισμού και της βαφής της γάστρας . Σε αρκετές περιπτώσεις, η ρύπανση των ιζημάτων υπερέβαινε τα πρότυπα ποιότητας του περιβάλλοντος, οδηγώντας σε περιορισμούς στην εκβάθυνση και σε αυξημένο κόστος για τις λιμενικές αρχές. Αυτά τα ευρήματα επιβεβαίωσαν ότι τα αντιρρυπαντικά σωματίδια δεν διασκορπίζονται απλά, αλλά συχνά συσσωρεύονται στα ιζήματα των λιμανιών, όπου συνεχίζουν να εκλύουν ρύπους πολύ καιρό μετά την αρχική τους απελευθέρωση.

Οι Chan et al. (2022) παρουσίασαν βιολογικές μελέτες περιπτώσεων που υπογραμμίζουν τον τρόπο με τον οποίο ο καθαρισμός συμβάλλει στην εξάπλωση των χωροκατακτητικών ειδών. Σε ένα παράδειγμα, το μεσογειακό μύδι *Mytilus galloprovincialis* εισήχθη στη Νότια Αφρική μέσω της ρύπανσης της γάστρας και στη συνέχεια καθιερώθηκε ως κυρίαρχο εισβλητικό είδος. Αν και η αρχική μεταφορά πραγματοποιήθηκε μέσω προσκόλλησης στη γάστρα, οι πρακτικές καθαρισμού στα τοπικά ύδατα διευκόλυναν την περαιτέρω διασπορά με την απελευθέρωση βιώσιμων θραυσμάτων. Ομοίως, η εξάπλωση του εισβλητικού βρυοζώου *Bugula neritina* στη Νέα Ζηλανδία συνδέθηκε με δραστηριότητες καθαρισμού της γάστρας που διασκόρπισαν αποικίες κοντά σε ευαίσθητες εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας. Αυτές οι περιπτώσεις δείχνουν ότι ο καθαρισμός, εάν πραγματοποιείται

χωρίς τη συλλογή βιομάζας, μπορεί να μετατρέψει έναν ήδη επικίνδυνο φορέα ρύπανσης σε έναν ενεργό μηχανισμό διασποράς.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO, 2023) έχει αναγνωρίσει αυτούς τους κινδύνους στις επικαιροποιημένες κατευθυντήριες γραμμές του για τη βιοβλάστηση, τονίζοντας ότι ο καθαρισμός θα πρέπει ιδανικά να πραγματοποιείται σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπου τα απορρίμματα μπορούν να συλλέγονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία. Ωστόσο, όπως παρατήρησαν οι Oliveira et al. (2022), η συμμόρφωση με αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές παραμένει άνιση και πολλά λιμάνια δεν διαθέτουν την υποδομή για την επιβολή ελεγχόμενων πρακτικών καθαρισμού. Τα δεδομένα παρακολούθησης από τη Βόρεια Ευρώπη, που συγκεντρώθηκαν από τους Lagerström et al. (2020), έδειξαν ότι ακόμη και σε περιοχές με αυστηρότερη περιβαλλοντική νομοθεσία, οι αυξημένες συγκεντρώσεις χαλκού και ψευδαργύρου παρέμειναν κοντά στα ναυπηγεία, υπογραμμίζοντας το χάσμα μεταξύ της ρυθμιστικής πρόθεσης και των πρακτικών αποτελεσμάτων.

Οι μελέτες περιπτώσεων αποκαλύπτουν επομένως ένα σταθερό μοτίβο: ο καθαρισμός προσφέρει λειτουργικά και κλιματικά οφέλη σε κλίμακα παγκόσμιας ναυτιλίας, αλλά επιβάλλει δυσανάλογα οικολογικά κόστη στα τοπικά περιβάλλοντα όπου πραγματοποιείται. Αυτά τα κόστη εκδηλώνονται με πολλαπλές μορφές — μόλυνση ιζημάτων, εισαγωγή χωροκατακτητικών ειδών και διάδοση μικροπλαστικών — καθιστώντας τον καθαρισμό της γάστρας μια πολυδιάστατη περιβαλλοντική πρόκληση.

Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του καθαρισμού της γάστρας είναι πολυδιάστατος, περιλαμβάνοντας χημικές, βιολογικές και σωματιδιακές διαστάσεις. Η απελευθέρωση υπολειμμάτων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και βιοκτόνων συμβάλλει στη μεταλλική μόλυνση των ιζημάτων και στην οξεία τοξικότητα στα λιμενικά ύδατα. Οι δραστηριότητες καθαρισμού λειτουργούν επίσης ως φορείς για την εξάπλωση χωροκατακτητικών ειδών, ενισχύοντας τον ρόλο των πλοίων ως μηχανισμών παγκόσμιας διασποράς. Η παραγωγή μικροπλαστικών φορτωμένων με βαρέα μέταλλα προσθέτει ένα νέο επίπεδο ανησυχίας, συνδυάζοντας την ανθεκτικότητα των συνθετικών πολυμερών με την τοξικότητα των ενσωματωμένων βιοκτόνων. Μελέτες περιπτώσεων και εκστρατείες παρακολούθησης επιβεβαιώνουν ότι αυτές οι επιπτώσεις δεν είναι θεωρητικές, αλλά μετρήσιμες και επίμονες σε διάφορα γεωγραφικά πλαίσια.

Η πρόκληση για τους νομοθέτες και τη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι να εξισορροπήσουν τα σαφή λειτουργικά και κλιματικά οφέλη του καθαρισμού με αυτές τις

τοπικές περιβαλλοντικές βλάβες. Οι τεχνολογίες σύλληψης και επεξεργασίας υπολειμμάτων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη αντιρρυπαντικών επιστρώσεων χωρίς βιοκτόνα, αποτελούν τις πιο ελπιδοφόρες λύσεις για τη μείωση των επιπτώσεων. Ωστόσο, χωρίς εναρμονισμένη παγκόσμια εφαρμογή, οι οικολογικοί κίνδυνοι που συνδέονται με τον καθαρισμό των σκαφών θα παραμείνουν σημαντικοί. Οι μελλοντικές στρατηγικές πρέπει να ενσωματώνουν τις ανησυχίες σχετικά με τις χημικές, βιολογικές και σωματιδιακές ουσίες σε ολοκληρωμένα πλαίσια διαχείρισης της βιορρύπανσης, διασφαλίζοντας ότι η επιδίωξη της αποδοτικότητας των καυσίμων δεν θα γίνεται σε βάρος της υγείας του θαλάσσιου οικοσυστήματος.

7. Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών καθαρισμού

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή τεχνολογιών καθαρισμού της γάστρας έχουν αυξηθεί παράλληλα με την αυξανόμενη αναγνώριση της ρύπανσης ως απειλή τόσο για την οικονομική αποδοτικότητα όσο και για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Ενώ τα προηγούμενα κεφάλαια περιέγραψαν τους φυσικούς μηχανισμούς και τις περιβαλλοντικές συνέπειες της ρύπανσης, η ενότητα αυτή έχει ως στόχο να συγκρίνει τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό, λαμβάνοντας υπόψη την τεχνική αποδοτικότητα, το λειτουργικό κόστος, τις περιβαλλοντικές επιδόσεις, την ασφάλεια των εργαζομένων και τη συμμόρφωση με τα ρυθμιστικά πλαίσια. Μια τέτοια συγκριτική αξιολόγηση είναι απαραίτητη, καθώς δεν υπάρχει μια τεχνολογία που να είναι καθολικά βέλτιστη. Αντίθετα, κάθε λύση αντιπροσωπεύει έναν συμβιβασμό μεταξύ της αποτελεσματικότητας του καθαρισμού, του κινδύνου ζημιάς στο επίχρισμα, της διαχείρισης των απορριμμάτων και της οικονομικής σκοπιμότητας.

Η βιβλιογραφία προσφέρει ένα ευρύ φάσμα προσεγγίσεων για τον καθαρισμό της γάστρας, που κυμαίνονται από το παραδοσιακό χειροκίνητο τρίψιμο από δύτες έως τα υψηλά αυτοματοποιημένα ρομποτικά συστήματα που μπορούν να λειτουργούν συνεχώς. Κάθε μέθοδος έχει εξελιχθεί για να αντιμετωπίσει συγκεκριμένους περιορισμούς προηγούμενων πρακτικών, αλλά όλες διαμορφώνονται από τις ίδιες θεμελιώδεις προκλήσεις: την ανάγκη να αφαιρεθούν αποτελεσματικά οι ρύποι χωρίς να απελευθερωθούν ρύποι ή να καταστραφούν τα επιχρίσματα. Το κεφάλαιο αυτό ξεκινά με μια αξιολόγηση του χειροκίνητου καθαρισμού και του καθαρισμού με δύτες, προχωρά στα μηχανικά μηχανοκίνητα συστήματα και στη συνέχεια εξετάζει τις προηγμένες μεθόδους χωρίς επαφή. Τα επόμενα τμήματα εξετάζουν το ρόλο των ρομποτικών τεχνολογιών πρόσδεσης και αξιολογούν τον τρόπο με τον οποίο οι περιβαλλοντικές και κανονιστικές πιέσεις διαμορφώνουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας.

7.1 Χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες

Ο χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες παραμένει μία από τις παλαιότερες και απλούστερες μεθόδους συντήρησης της γάστρας. Οι δύτες, εξοπλισμένοι με χειροκίνητες βούρτσες, ξύστρες ή πίδακες νερού υψηλής πίεσης, απομακρύνουν φυσικά τις αποθέσεις από τις βυθισμένες επιφάνειες. Αν και τεχνολογικά απλή, αυτή η προσέγγιση έχει σημαντικούς περιορισμούς. Οι Song et al. (2020) εξέτασαν τις μεθόδους χειροκίνητου καθαρισμού και τόνισαν ότι είναι πολύ χρονοβόρες, αργές και εξαρτώνται από την αντοχή και την ασφάλεια των δυτών. Επιπλέον, οι δύτες έχουν περιορισμένη πρόσβαση σε ορισμένες περιοχές της

γάστρας , ιδίως κάτω από τις καρίνα, τα θαλάσσια κιβώτια ή τις μεγάλες επίπεδες επιφάνειες, με αποτέλεσμα την άνιση ποιότητα καθαρισμού.

Από την άποψη της αποτελεσματικότητας, ο καθαρισμός με δύτες μπορεί να απομακρύνει αποτελεσματικά τις αρχικές επικαθίσεις, όπως λάσπη και φύκια, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικός έναντι των σταθερά προσκολλημένων ασβεστοειδών οργανισμών, όπως οι πεταλίδες. Οι Albitar et al. (2016) τόνισαν ότι η παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενη χειροκίνητη απόξεση ενέχει επίσης τον κίνδυνο να καταστρέψει τα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής τους και εκθέτοντας τις γυμνές μεταλλικές επιφάνειες σε διάβρωση. Η ζημιά στα επιχρίσματα αυξάνει το μακροπρόθεσμο κόστος, καθώς τα πλοία απαιτούν συχνότερη επαναβαφή, και μπορεί να επιταχύνει τη μελλοντική ανάπτυξη ρύπανσης.

Από οικονομική άποψη, ο χειροκίνητος καθαρισμός θεωρείται παραδοσιακά χαμηλού κόστους λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε εξοπλισμό. Ωστόσο, αυτή η αντίληψη είναι παραπλανητική όταν λαμβάνονται υπόψη το κόστος εργασίας, οι κίνδυνοι για την ασφάλεια και οι απαιτήσεις ασφάλισης. Η σύγχρονη ναυτιλία λειτουργεί με αυστηρά χρονοδιαγράμματα και ο χρόνος διακοπής που απαιτείται για τον καθαρισμό με δύτες, σε συνδυασμό με τους επαγγελματικούς κινδύνους, καθιστά αυτή τη μέθοδο όλο και λιγότερο ελκυστική σε σύγκριση με τις αυτοματοποιημένες λύσεις (Song et al., 2020).

Η περιβαλλοντική απόδοση είναι ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα. Οι δύτες σπάνια χρησιμοποιούν συστήματα συλλογής, οπότε τα υπολείμματα ρύπων και τα σωματίδια βαφής απελευθερώνονται απευθείας στο περιβάλλον νερό. Οι Oliveira et al. (2020) απέδειξαν ότι αυτός ο ανεξέλεγκτος καθαρισμός έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες τοπικές συγκεντρώσεις χαλκού και ψευδαργύρου, υπογραμμίζοντας τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που συνδέονται με τις χειροκίνητες μεθόδους. Για το λόγο αυτό, πολλές δικαιοδοσίες έχουν αρχίσει να περιορίζουν ή να απαγορεύουν τον καθαρισμό με δύτες στο νερό, ιδίως σε οικολογικά ευαίσθητες περιοχές.

Συνοψίζοντας, ο χειροκίνητος καθαρισμός από δύτες παραμένει μια παραδοσιακή πρακτική, κατάλληλη για μικρά σκάφη ή επείγουσες παρεμβάσεις, αλλά όλο και πιο ασυμβίβαστη με τις σύγχρονες απαιτήσεις για αποδοτικότητα, προστασία του περιβάλλοντος και ασφάλεια των εργαζομένων.

7.2 Μηχανοκίνητα συστήματα βουρτσών

Η πιο διαδεδομένη εναλλακτική λύση στον χειροκίνητο καθαρισμό είναι η χρήση μηχανοκίνητων συστημάτων με περιστρεφόμενες βούρτσες ή κεφαλές τρίψιμο, που λειτουργούν είτε από δύτες είτε από τηλεχειριζόμενες μονάδες. Αυτά τα συστήματα αυξάνουν την ταχύτητα και την ομοιομορφία του καθαρισμού, μειώνοντας ταυτόχρονα τις σωματικές απαιτήσεις από τους δύτες. Οι Song (2020) προσδιόρισαν τα συστήματα με βούρτσες ως την κυρίαρχη εμπορική τεχνολογία, που αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών καθαρισμού στο νερό παγκοσμίως.

Οι μηχανοκίνητες βούρτσες παρέχουν πιο ομοιόμορφο καθαρισμό από το χειροκίνητο τρίψιμο και μπορούν να αφαιρέσουν ένα ευρύτερο φάσμα οργανισμών που προκαλούν ρύπανση. Οι Chen et al. (2023) ανέφεραν ότι τα ρομποτικά συστήματα βουρτσών επιτυγχάνουν αποδοτικότητα αφαίρεσης άνω του 90% τόσο για την λάσπη όσο και για τη σκληρή ρύπανση, καθιστώντας τα εξαιρετικά αποτελεσματικά για τη διατήρηση της υδροδραστικής απόδοσης. Η ταχύτητα λειτουργίας είναι επίσης σημαντικά υψηλότερη: ενώ οι δύτες μπορούν να καθαρίσουν μόνο λίγα τετραγωνικά μέτρα ανά ώρα με το χέρι, τα μηχανοκίνητα συστήματα μπορούν να καθαρίσουν εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα, μειώνοντας τον χρόνο ακινητοποίησης του σκάφους.

Ωστόσο, τα συστήματα με βούρτσες παρουσιάζουν προκλήσεις όσον αφορά τη διατήρηση της επίστρωσης. Η υπερβολική πίεση βουρτσίσματος ή η χρήση ακατάλληλων υλικών για τις τρίχες μπορεί να φθείρει τις αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής τους (Albitar et al., 2016). Οι χειριστές πρέπει να εξισορροπούν προσεκτικά τη συχνότητα καθαρισμού και την ένταση της βούρτσας, ώστε να ελαχιστοποιούν τη φθορά της επίστρωσης. Ορισμένα συστήματα αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα ενσωματώνοντας κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας και ρυθμιζόμενη σκληρότητα των τριχών, ώστε να προσαρμόζονται στις συνθήκες της γάστρας.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μηχανοκίνητων βουρτσών είναι σημαντικές. Όπως και ο χειροκίνητος καθαρισμός, ενέχουν τον κίνδυνο να απελευθερώσουν σημαντικές ποσότητες σωματιδίων βαφής και υπολειμμάτων ρύπανσης στο νερό. Οι Oliveira et al. (2022) μοντελοποίησαν την απελευθέρωση ρύπων που σχετίζεται με τα συστήματα μηχανοκίνητων βουρτσών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, χωρίς μηχανισμούς συλλογής, τέτοιες λειτουργίες μπορούν να προκαλέσουν τοπικές αιχμές στις συγκεντρώσεις χαλκού και ψευδαργύρου. Ωστόσο, τα συστήματα που ενσωματώνουν αναρρόφηση και φιλτράρισμα —

τα οποία απαιτούνται πλέον σε πολλά ευρωπαϊκά λιμάνια— μπορούν να μετριάσουν αυτό το πρόβλημα συλλέγοντας τα υπολείμματα για ασφαλή απόρριψη. Αυτά τα συστήματα βουρτσών με δυνατότητα συλλογής αποτελούν συμβιβασμό μεταξύ αποδοτικότητας και προστασίας του περιβάλλοντος, αν και έχουν υψηλότερο κόστος κεφαλαίου και συντήρησης.

Από οικονομική άποψη, τα μηχανοκίνητα συστήματα βουρτσών προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση σε σύγκριση με τον χειροκίνητο καθαρισμό, μειώνοντας τον χρόνο ακινητοποίησης και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα της γάστρας. Οι Wei et al. (2024) σημείωσαν ότι η επένδυση σε ρομποτικά συστήματα βουρτσών δικαιολογείται για μεγάλα σκάφη, καθώς η εξοικονόμηση καυσίμων υπερτερεί των κεφαλαιουχικών δαπανών σε σύντομο χρονικό διάστημα απόσβεσης. Ωστόσο, οι μικρότεροι χειριστές ενδέχεται να εξακολουθούν να βασίζονται σε απλούστερες λύσεις με δύτες λόγω των χαμηλότερων δαπανών, ακόμη και αν αυτό έχει αρνητικές επιπτώσεις στη μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα.

7.3 Μέθοδοι καθαρισμού χωρίς επαφή

Σε απάντηση στις ανησυχίες σχετικά με τη φθορά της επίστρωσης και την απελευθέρωση ρύπων, οι τεχνολογίες καθαρισμού χωρίς επαφή έχουν αναδειχθεί ως πολλά υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται σε πίδακες νερού, σπηλαίωση, υπερήχους ή ακόμη και λέιζερ για την απομάκρυνση των ρύπων χωρίς φυσική τριβή. Οι Song et al. (2020) παρέιχαν μια επισκόπηση αυτών των προσεγγίσεων, σημειώνοντας το δυναμικό τους να ελαχιστοποιήσουν τη φθορά της επίστρωσης και να μειώσουν την απελευθέρωση μικροπλαστικών.

Η εκτόξευση νερού υπό υψηλή πίεση είναι μια από τις πιο καθιερωμένες μεθόδους χωρίς επαφή. Κατευθύνοντας ρεύματα νερού υπό πίεση στην επιφάνεια της γάστρας, οι ρύποι απομακρύνονται χωρίς μηχανικό βούρτσισμα. Ωστόσο, ο Turner (2010) επεσήμανε ότι η υδροβολή παράγει σημαντικά υπολείμματα βαφής, συμπεριλαμβανομένων μικροπλαστικών και σωματιδίων βαρέων μετάλλων, τα οποία διασκορπίζονται ευρέως στο περιβάλλον. Οι Kim et al. (2024) επιβεβαίωσαν αυτό το γεγονός στη μελέτη τους για τα υπολείμματα υδροβολής, η οποία αναγνώρισε τα μικροπλαστικά που προέρχονται από αντιρρυπαντικά ως σημαντική πηγή ρύπανσης. Έτσι, ενώ η υδροβολή αποφεύγει την άμεση τριβή των επιστρώσεων, δημιουργεί ξεχωριστές περιβαλλοντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω αποτελεσματικών συστημάτων συλλογής.

Ο καθαρισμός με υπερήχους και σπηλαιώση αντιπροσωπεύουν πιο καινοτόμες λύσεις. Οι Guo et al. (2022) ανέπτυξαν ένα υποβρύχιο ρομπότ χρησιμοποιώντας αρνητική πίεση βασισμένη στον νόμο του Bernoulli σε συνδυασμό με καθαρισμό με σπηλαιώση, το οποίο επέδειξε ισχυρή ικανότητα καθαρισμού χωρίς άμεση επαφή. Οι φυσαλίδες σπηλαιώσης που δημιουργούνται κοντά στη γάστρα καταρρέουν βίαια, απομακρύνοντας τους οργανισμούς που προκαλούν ρύπανση. Αυτή η τεχνική μειώνει τη φθορά των επιστρώσεων και μπορεί να βελτιώσει τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα, αν και οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεών της στις επιστρώσεις και τα γύρω οικοσυστήματα απαιτούν περαιτέρω μελέτη.

Ο καθαρισμός με λέιζερ βρίσκεται σε πιο πειραματικό στάδιο. Οι Song et al. (2020) περιέγραψαν εργαστηριακές δοκιμές όπου λέιζερ υψηλής έντασης εξατμίζονταν τα υλικά ρύπανσης χωρίς να βλάπτουν τις υποκείμενες επιστρώσεις. Αν και τεχνικά πολλά υποσχόμενα, τα συστήματα λέιζερ αντιμετωπίζουν προκλήσεις όσον αφορά την απαίτηση ισχύος, την ασφάλεια και τη λειτουργική σκοπιμότητα σε συνθήκες βύθισης. Οι Albitar et al. (2016) παρατήρησαν ότι οι προηγμένες τεχνολογίες όπως τα λέιζερ παραμένουν περιορισμένες σε εξειδικευμένη έρευνα, με αβέβαιες προοπτικές για εμπορική υιοθέτηση.

Συνολικά, οι μέθοδοι χωρίς επαφή είναι πολλά υποσχόμενες για τη μείωση της φθοράς των επιστρώσεων και της απελευθέρωσης μικροπλαστικών, αλλά ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος δεν είναι εγγενώς χαμηλότερος. Χωρίς τη συλλογή υπολειμμάτων, αυτές οι τεχνολογίες ενδέχεται να διασκορπίζουν ρύπους εξίσου αποτελεσματικά με τα συστήματα βουρτσών. Η εμπορική τους βιωσιμότητα θα εξαρτηθεί από την εξισορρόπηση της απόδοσης, του κόστους και των περιβαλλοντικών διασφαλίσεων.

7.4 Τεχνολογίες πρόσφυσης στον ρομποτικό καθαρισμό

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την απόδοση των ρομποτικών συστημάτων καθαρισμού είναι ο τρόπος με τον οποίο η μηχανή προσκόλλεται στην επιφάνεια της γάστρας. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες στρατηγικές προσκόλλησης, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διαφορετική ισορροπία μεταξύ σταθερότητας, ενεργειακής απόδοσης και λειτουργικής ευελιξίας. Οι Albitar et al. (2016) ταξινόμησαν αυτές τις μεθόδους σε τρεις κύριες ομάδες — μαγνητική προσκόλληση, προσκόλληση με αρνητική πίεση με βάση την αναρρόφηση και προσκόλληση με δύναμη ώθησης — με υβριδικές και βιομιμητικές προσεγγίσεις να εμφανίζονται πιο πρόσφατα.

Η μαγνητική προσκόλληση είναι μία από τις πιο ισχυρές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Τα ρομπότ που είναι εξοπλισμένα με μόνιμους μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες μπορούν να διατηρήσουν σταθερή επαφή με τα ατσάλινα κύτη, ακόμη και σε συνθήκες τυρβώδους ροής. Οι Chen et al. (2023) περιέγραψαν ένα ρομποτικό σύστημα που χρησιμοποιεί μαγνητική προσκόλληση και πέτυχε αποτελεσματικό καθαρισμό σε μια σειρά υποβρύχιων σεναρίων, τονίζοντας την αξιοπιστία του. Τα κύρια μειονεκτήματα της μαγνητικής προσκόλλησης είναι η ασυμβατότητά της με μη μεταλλικά κύτη, όπως αυτά που είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο ή σύνθετα υλικά, και η αυξημένη αντίσταση και κατανάλωση ενέργειας που συνδέεται με τον χειρισμό μαγνητών κατά μήκος καμπύλων επιφανειών.

Η προσκόλληση με αρνητική πίεση, που βασίζεται στην αναρρόφηση ή στην αρχή του Bernoulli, αντιπροσωπεύει μια άλλη προσέγγιση. Οι Guo et al. (2022) παρουσίασαν ένα καινοτόμο ρομπότ που χρησιμοποιεί την αναρρόφηση Bernoulli, όπου η ροή νερού υψηλής ταχύτητας δημιουργεί μια διαφορά πίεσης που στερεώνει το ρομπότ στη γάστρα. Αυτή η μέθοδος προσφέρει προσαρμοστικότητα σε καμπύλες ή ακανόνιστες επιφάνειες και μειώνει τη μηχανική καταπόνηση στα επιχρίσματα. Ωστόσο, τα συστήματα αναρρόφησης απαιτούν συνεχή εισροή ενέργειας για τη διατήρηση της προσκόλλησης, γεγονός που μπορεί να αυξήσει το λειτουργικό κόστος και να περιορίσει την αντοχή. Επιπλέον, οι προκλήσεις στεγανοποίησης σε άγριες θάλασσες μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη σταθερότητα.

Η πρόσφυση με δύναμη ώθησης βασίζεται στην ώθηση που παράγεται από την έλικα ή τον πίδακα για να πιέσει το ρομπότ στη γάστρα. Αν και αυτή η προσέγγιση επιτρέπει ευελιξία και γρήγορη αποκόλληση όταν χρειάζεται, καταναλώνει σημαντική ισχύ και μπορεί να προκαλέσει τοπικές αναταράξεις. Οι Wei et al. (2024) παρουσίασαν έναν σύνθετο σχεδιασμό που συνδυάζει την πρόσφυση με βάση την ώθηση με μηχανικούς τροχούς, ο οποίος βελτίωσε την κινητικότητα και ταυτόχρονα μείωσε την ενεργειακή ζήτηση. Τέτοια υβριδικά συστήματα αποτελούν παράδειγμα της τάσης προς πολυλειτουργικά ρομπότ που βελτιστοποιούν την απόδοση σε διάφορες συνθήκες.

Οι βιομιμητικές μέθοδοι προσκόλλησης, παραμένουν στο στάδιο της έρευνας, αλλά είναι πολλά υποσχόμενες για προσκόλληση χαμηλής ενέργειας και χωρίς ζημιές. Οι Song et al. (2020) υπογράμμισαν τα πρώιμα πειραματικά σχέδια που χρησιμοποιούν μικροδομημένες επιφάνειες για να αναπαράγουν την ξηρή προσκόλληση κάτω από το νερό. Αν και δεν είναι ακόμη εμπορικά βιώσιμες, αυτές οι προσεγγίσεις μπορεί τελικά να προσφέρουν

ασφαλέστερες και αποδοτικότερες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις μαγνητικές ή τις μεθόδους αναρρόφησης.

Η τεχνολογία προσκόλλησης δεν είναι απλώς μια τεχνική επιλογή, αλλά διαμορφώνεται από κανονιστικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, τα λιμάνια της ΕΕ που απαιτούν τη συλλογή υπολειμμάτων προτιμούν ρομπότ με σταθερή προσκόλληση, ικανά να μεταφέρουν σωλίνες αναρρόφησης και μονάδες φιλτραρίσματος. Αντίθετα, σε περιοχές όπως η Νέα Ζηλανδία, όπου ισχύουν αυστηρά πρότυπα «καθαρού κύτους» κατά την άφιξη, δίνεται έμφαση στον προληπτικό καθαρισμό με συστήματα υψηλής κινητικότητας που μπορούν να λειτουργούν γρήγορα ανοικτά της ακτής. Έτσι, η μέθοδος προσκόλλησης επηρεάζει όχι μόνο την απόδοση του καθαρισμού, αλλά και την ικανότητα συμμόρφωσης με τα περιφερειακά νομικά πλαίσια.

7.5 Συγκριτική αξιολόγηση

Τεχνική απόδοση

Από καθαρά τεχνική άποψη, τα μηχανοκίνητα συστήματα βουρτσών παραμένουν η πιο αποτελεσματική και αποδεδειγμένη τεχνολογία, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση απομάκρυνσης σε διάφορους τύπους ρύπανσης (Chen et al., 2023; Song et al., 2020). Μέθοδοι χωρίς επαφή, όπως η σπηλαιώση ή οι υπερήχοι, παρουσιάζουν δυνατότητες, αλλά βρίσκονται ακόμη σε φάση βελτίωσης, ενώ τα συστήματα με λέιζερ παραμένουν πειραματικά. Οι ρομποτικές τεχνολογίες προσκόλλησης βελτιώνουν την κινητικότητα και τη συνέπεια, ιδίως τα μαγνητικά και τα συστήματα αναρρόφησης, αν και το καθένα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του όσον αφορά τη συμβατότητα των υλικών της γάστρας και την ενεργειακή ζήτηση.

Οικονομικές εκτιμήσεις

Η οικονομική βιωσιμότητα είναι συχνά ο αποφασιστικός παράγοντας για τους χειριστές. Οι Wei et al. (2024) υποστήριξαν ότι τα ρομποτικά συστήματα, αν και είναι δαπανηρά στην αγορά, συνήθως αποσβένονται γρήγορα μέσω της εξοικονόμησης καυσίμων. Για τα μεγάλα σκάφη, όπου το κόστος καυσίμων κυριαρχεί στους λειτουργικούς προϋπολογισμούς, η απόδοση της επένδυσης μπορεί να επιτευχθεί μέσα σε ένα μόνο έτος. Τα μικρότερα πλοία, ωστόσο, ενδέχεται να συνεχίσουν να βασίζονται σε απλούστερες, φθηνότερες μεθόδους λόγω των χαμηλότερων πιθανών εξοικονομήσεων. Ο χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες, που κάποτε θεωρούνταν χαμηλού κόστους, καθίσταται αντιοικονομικός

όταν ληφθούν υπόψη τα έξοδα ασφάλισης, εργασίας και διακοπής λειτουργίας (Song et al., 2020).

Περιβαλλοντικές επιδόσεις

Οι περιβαλλοντικές επιδόσεις ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των τεχνολογιών. Ο χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες και τα συστήματα βουρτσών χωρίς συλλογή απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες σωματιδίων βαφής και υπολειμμάτων ρύπανσης, προκαλώντας τοπική ρύπανση (Oliveira et al., 2020; Turner, 2010). Τα συστήματα με ενσωματωμένη αναρρόφηση και φιλτράρισμα μειώνουν σημαντικά αυτόν τον αντίκτυπο, καθιστώντας τα πιο συμβατά με τα περιβαλλοντικά πρότυπα της ΕΕ (Oliveira et al., 2022). Η υδροβολή και άλλες μέθοδοι υψηλής ενέργειας παράγουν μεγάλες ποσότητες μικροπλαστικών (Kim et al., 2024), τα οποία ενέχουν μακροπρόθεσμους οικολογικούς κινδύνους. Ο καθαρισμός με σπηλαιώση και υπερήχους μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη φθορά της επίστρωσης, αλλά απαιτεί περαιτέρω μελέτη για να επιβεβαιωθεί η οικολογική ασφάλεια.

Συμμόρφωση με κανονισμούς

Η επιλογή της τεχνολογίας καθαρισμού επηρεάζεται σε από τα περιφερειακά κανονιστικά πλαίσια:

Ευρωπαϊκή Ένωση και σκανδιναβικές χώρες: Οι κανονισμοί δίνουν προτεραιότητα στη συλλογή υπολειμμάτων. Τα ρομπότ με βούρτσες και ενσωματωμένη αναρρόφηση και φιλτράρισμα έχουν την καλύτερη απόδοση σε αυτή την περίπτωση, καθώς συνδυάζουν την αποτελεσματικότητα με τη συμμόρφωση με τα περιβαλλοντικά πρότυπα. Τα δεδομένα παρακολούθησης από τους Lagerström et al. (2020) υποστηρίζουν την αποτελεσματικότητα τέτοιων συστημάτων στη μείωση της απελευθέρωσης χαλκού. Νέα Ζηλανδία: Το πρότυπο Craft Risk Management Standard απαιτεί τα σκάφη να φτάνουν με καθαρά κύτη, αποθαρρύνοντας αποτελεσματικά τη συσσώρευση ρύπων. Εδώ, τα φορητά ρομποτικά συστήματα ή τα συστήματα με τη βοήθεια δυτών είναι λιγότερο χρήσιμα, καθώς αποθαρρύνεται ο αντιδραστικός καθαρισμός στο λιμάνι. Αντ' αυτού, προτιμάται ο προληπτικός καθαρισμός σε ανοικτά ύδατα ή η χρήση προηγμένων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων (Chan et al., 2022).

Ηνωμένες Πολιτείες (κανόνες σε επίπεδο πολιτείας): Πολιτείες όπως η Καλιφόρνια και η Ουάσιγκτον περιορίζουν τον καθαρισμό εντός του νερού και προωθούν μη τοξικά επιχρίσματα. Τα ρομποτικά συστήματα που μπορούν να εκτελέσουν καθαρισμό με ελαφρύ άγγιγμα χωρίς να καταστρέφουν τα προηγμένα επιχρίσματα είναι τα πιο κατάλληλα.

Παγκόσμιες κατευθυντήριες γραμμές του ΔΝΟ: Ο ΔΝΟ (2023) συνιστά τη συλλογή και τον υπεύθυνο καθαρισμό, αλλά δεν διαθέτει εξουσία επιβολής. Ως εκ τούτου, οι φορείς εκμετάλλευσης που στοχεύουν στις βέλτιστες διεθνείς πρακτικές υιοθετούν όλο και περισσότερο ρομποτικά συστήματα που συνδυάζουν την αποδοτικότητα με τη συλλογή απορριμμάτων, ευθυγραμμίζοντας τόσο τους παγκόσμιους κλιματικούς στόχους όσο και την τοπική προστασία του περιβάλλοντος.

Ασφάλεια και υγεία στην εργασία

Ο χειροκίνητος κενός καθαρισμός ενέχει σημαντικούς κινδύνους, όπως νόσο αποσυμπίεσης, εμπλοκή και έκθεση σε τοξικά κατάλοιπα. Τα ρομποτικά συστήματα μειώνουν σημαντικά αυτούς τους κινδύνους, ιδίως όταν λειτουργούν εξ αποστάσεως ή αυτόνομα. Οι Park et al. (2023) υπογράμμισαν τις προόδους στους ρομποτικούς χειριστές που μπορούν να έχουν πρόσβαση σε δυσπρόσιτες περιοχές χωρίς την παρέμβαση δυτών, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια. Τα ρυθμιστικά πλαίσια που διέπουν την ασφάλεια στην εργασία (π.χ. οδηγίες της ΕΕ για τον χώρο εργασίας) ευνοούν έμμεσα την υιοθέτηση ρομποτικών συστημάτων, αποθαρρύνοντας τις υψηλού κινδύνου εργασίες δυτών.

Η συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών καθαρισμού της γάστρας αποκαλύπτει ένα σύνθετο τοπίο συμβιβασμών μεταξύ αποδοτικότητας, κόστους, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ασφάλειας και συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Ο χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες, αν και εξακολουθεί να εφαρμόζεται, είναι όλο και πιο ασυμβίβαστος με τις σύγχρονες απαιτήσεις λόγω της αναποτελεσματικότητας, των κινδύνων για την ασφάλεια και της ανεξέλεγκτης έκλυσης ρύπων. Τα μηχανοκίνητα συστήματα βουρτσών παραμένουν η κυρίαρχη τεχνολογία, συνδυάζοντας αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα με σχετικά χαμηλό κόστος. Οι μέθοδοι χωρίς επαφή αντιπροσωπεύουν ένα αναδυόμενο πεδίο, προσφέροντας πιθανά πλεονεκτήματα στη διατήρηση της επίστρωσης, αλλά αντιμετωπίζοντας προκλήσεις στον έλεγχο των ρύπων και την εμπορική ετοιμότητα.

Οι ρομποτικές τεχνολογίες προσκόλλησης ενισχύουν την κινητικότητα και την ευελιξία των συστημάτων καθαρισμού, με τις μεθόδους μαγνητικής και αναρρόφησης να κυριαρχούν στην τρέχουσα πρακτική. Οι μελλοντικές εξελίξεις ενδέχεται να στραφούν όλο και περισσότερο προς τη βιομηχανική προσκόλληση για βελτιωμένη αποδοτικότητα και ασφάλεια. Τελικά, μια τεχνολογία καθαρισμού εξαρτάται όχι μόνο από τεχνικούς παράγοντες, αλλά και από το κανονιστικό πλαίσιο στο οποίο λειτουργεί το σκάφος.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, όπου η σύλληψη υπολειμμάτων είναι υποχρεωτική σε πολλά λιμάνια, τα ρομποτικά συστήματα βουρτσών με ενσωματωμένη αναρρόφηση είναι τα πιο συμβατά με τη συμμόρφωση. Στη Νέα Ζηλανδία, τα αυστηρά πρότυπα καθαρού κύτους κατά την άφιξη μετατοπίζουν την έμφαση προς τα προληπτικά επιχρίσματα και τον καθαρισμό ανοικτής θάλασσας αντί για αντιδραστικές μεθόδους με βάση το λιμάνι. Στις πολιτείες των ΗΠΑ με ισχυρές περιβαλλοντικές πολιτικές, προτιμώνται οι τεχνολογίες που ελαχιστοποιούν τη φθορά των επιχρισμάτων και τη δημιουργία μικροπλαστικών.

Σε όλες τις περιοχές, η κεντρική τάση είναι σαφής: οι τεχνολογίες που συνδυάζουν υψηλή απόδοση με περιβαλλοντικές διασφαλίσεις και μειωμένο επαγγελματικό κίνδυνο κερδίζουν έδαφος. Η συνεχής καινοτομία, ιδίως στον τομέα της συλλογής υπολειμμάτων και των μη τοξικών αντιρρυπαντικών συστημάτων, θα είναι απαραίτητη για την εξισορρόπηση των ανταγωνιστικών απαιτήσεων της λειτουργικής αποδοτικότητας, της προστασίας του περιβάλλοντος και της συμμόρφωσης με τους παγκόσμιους κανονισμούς.

8. Μελλοντικές προοπτικές και ερευνητικά κενά

Η αυξανόμενη σημασία του καθαρισμού της γάστρας τόσο ως λειτουργική αναγκαιότητα όσο και ως περιβαλλοντική ευθύνη έχει δημιουργήσει δυναμική για καινοτομία σε πολλαπλά τεχνολογικά και ρυθμιστικά μέτωπα. Ενώ η συγκριτική αξιολόγηση στο Κεφάλαιο 7 υπογράμμισε το τρέχον τοπίο των τεχνολογιών καθαρισμού, το μέλλον του τομέα θα διαμορφωθεί από τις εξελίξεις στη ρομποτική, την ανάπτυξη εναλλακτικών στρατηγικών κατά της ρύπανσης, τα βελτιωμένα συστήματα παρακολούθησης και την ενσωμάτωση των πρακτικών καθαρισμού στις παγκόσμιες πολιτικές αποανθρακοποίησης. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά κενά στην έρευνα, ιδίως όσον αφορά τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές συνέπειες των υπολειμμάτων καθαρισμού και τη βελτιστοποίηση των προληπτικών στρατηγικών που συμπληρώνουν τον καθαρισμό.

8.1 Προόδους στη ρομποτική καθαριότητα και προσκόλληση

Η ρομποτική καθαριότητα της γάστρας έχει ήδη αλλάξει τις πρακτικές του κλάδου, απομακρύνοντάς τον από τις επικίνδυνες χειροκίνητες μεθόδους, και οι μελλοντικές εξελίξεις είναι πιθανό να εδραιώσουν αυτή την τάση. Οι Chen et al. (2023) κατέδειξαν το δυναμικό των αναρριχητικών ρομπότ με προηγμένους μηχανισμούς προσκόλλησης, ικανά να έχουν πρόσβαση σε περιοχές που παραδοσιακά ήταν δύσκολο να προσεγγίσουν οι δύτες ή οι μηχανοκίνητες βούρτσες. Ομοίως, οι Guo et al. (2022) εισήγαγαν ένα σύστημα προσκόλλησης αρνητικής πίεσης βασισμένο στον νόμο του Bernoulli, το οποίο προσφέρει πολλά υποσχόμενη προσαρμοστικότητα σε πολύπλοκες γεωμετρίες κύτους. Απαιτείται συνεχής έρευνα για τη βελτίωση αυτών των συστημάτων προσκόλλησης όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, ιδίως δεδομένου ότι οι μέθοδοι που βασίζονται στην αναρρόφηση και την ώθηση καταναλώνουν σημαντική ισχύ.

Οι Wei et al. (2024) υπογράμμισαν την αυξανόμενη τάση των σύνθετων ρομπότ που συνδυάζουν πολλαπλές τεχνικές προσκόλλησης για να επιτύχουν ευελιξία σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Τέτοια υβριδικά ρομπότ μπορεί να αντιπροσωπεύουν την επόμενη γενιά εμπορικά βιώσιμων συστημάτων, ικανά να ικανοποιήσουν τις διπλές απαιτήσεις της αποδοτικότητας και της περιβαλλοντικής συμμόρφωσης. Ωστόσο, η ευρεία υιοθέτησή τους θα απαιτήσει μείωση του κόστους και περαιτέρω επικύρωση σε πραγματικές συνθήκες λιμενικών περιβαλλόντων. Οι Park et al. (2023) πρόσθεσαν ότι οι ρομποτικοί χειριστές που είναι ικανοί να καθαρίζουν εξειδικευμένες περιοχές, όπως οι θάλαμοι θαλάσσης, βρίσκονται

ακόμη σε αρχικό στάδιο, αφήνοντας σημαντικά κενά στην ολοκληρωμένη κάλυψη της γάστρας .

8.2 Μη τοξικές στρατηγικές κατά της ρύπανσης

Η εξάρτηση από επιστρώσεις με βάση βιοκτόνα συνεχίζει να δημιουργεί προκλήσεις κατά τον καθαρισμό, καθώς τα υπολείμματα εισάγουν βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά στο περιβάλλον (Lagerström et al., 2020; Turner, 2010). Επομένως, η μελλοντική έρευνα πρέπει να επιταχύνει την ανάπτυξη μη τοξικών ή χωρίς βιοκτόνα αντιρρυπαντικών επιστρώσεων. Αυτές περιλαμβάνουν επιστρώσεις αποκόλλησης ρύπων με βάση τη χημεία σιλικόνης ή φθοροπολυμερούς, βιομιμητικές επιφάνειες εμπνευσμένες από το δέρμα του καρχαρία και επιστρώσεις νανοτεχνολογίας που μεταβάλλουν την ενέργεια της επιφάνειας για να μειώσουν την πρόσφυση.

Οι Song et al. (2020) εξέτασαν πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες εργαστηριακής κλίμακας, όπως η πρόληψη της ρύπανσης με λέιζερ και υπερήχους, οι οποίες θα μπορούσαν να συνδυαστούν με μη τοξικά επιχρίσματα για την περαιτέρω μείωση της πίεσης ρύπανσης. Η πρόκληση έγκειται στη διασφάλιση της ανθεκτικότητας και της οικονομικής αποδοτικότητας στο σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον. Ενώ τα επιχρίσματα παρέχουν παθητική προστασία, η επιτυχία τους εξαρτάται τελικά από τον τρόπο με τον οποίο οι στρατηγικές καθαρισμού συντονίζονται με αυτά. Οι Oliveira et al. (2020, 2022) τόνισαν ότι χωρίς την αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ επιστρώσεων και καθαρισμού, το πρόβλημα της απελευθέρωσης σωματιδίων βαφής θα παραμείνει. Οι μελλοντικές προοπτικές πρέπει επομένως να θεωρούν τις επιστρώσεις και τον καθαρισμό ως ολοκληρωμένα συστήματα και όχι ως ξεχωριστές παρεμβάσεις.

8.3 Μοντέλα παρακολούθησης και πρόβλεψης

Η αποτελεσματική διαχείριση της γάστρας απαιτεί ακριβείς και έγκαιρες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της ρύπανσης και τις απώλειες απόδοσης. Οι Schultz (2007) και Townsin (2003) τόνισαν ότι οι επιπτώσεις της ρύπανσης είναι μετρήσιμες όσον αφορά την αντίσταση και την κατανάλωση καυσίμου, αλλά απαιτείται προγνωστική μοντελοποίηση για τον βέλτιστο προγραμματισμό των παρεμβάσεων καθαρισμού. Το πλαίσιο ISO 19030 παρέχει ήδη τυποποιημένες μεθόδους για τη μέτρηση των απωλειών απόδοσης της γάστρας και της προπέλας, αλλά δεν έχει υιοθετηθεί καθολικά (ISO, 2016α; 2016β).

Οι μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση της παρακολούθησης με βάση αισθητήρες με προγνωστική ανάλυση, υποστηριζόμενη από τεχνητή νοημοσύνη. Η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την τραχύτητα της γάστρας, τη ροή του οριακού στρώματος και την κατάσταση της επίστρωσης θα μπορούσε να ενημερώσει τη λήψη αποφάσεων για τα προγράμματα καθαρισμού, εξισορροπώντας το λειτουργικό κόστος με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ο συνδυασμός αυτών των μοντέλων με περιφερειακούς χάρτες πίεσης ρύπανσης, όπως εκείνοι που έχουν αναπτυχθεί για τροπικά νερά, θα επέτρεπε στα πλοία να υιοθετήσουν προσαρμοστικές στρατηγικές.

8.4 Ρυθμιστικό πλαίσιο

Το μέλλον του καθαρισμού της γάστρας είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις παγκόσμιες προσπάθειες αποανθρακοποίησης. Η στρατηγική του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% έως το 2050 ασκεί σημαντική πίεση στους πλοιοκτήτες να βελτιστοποιήσουν την αποδοτικότητα της γάστρας (IMO, 2023). Οι Schultz (2007) και Oliveira et al. (2022) απέδειξαν ότι η ρύπανση αυξάνει σημαντικά τις εκπομπές CO₂, υπογραμμίζοντας τον καθαρισμό ως κρίσιμη στρατηγική μετριασμού.

Οι περιφερειακοί κανονισμοί θα διαμορφώσουν επίσης την υιοθέτηση της τεχνολογίας. Η έμφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις τεχνολογίες δέσμευσης ευνοεί τα ρομποτικά συστήματα με ενσωματωμένη διήθηση, ενώ το πρότυπο καθαρού κύτους της Νέας Ζηλανδίας ενθαρρύνει την προληπτική διαχείριση μέσω επιστρώσεων και καθαρισμού ανοικτής θάλασσας (Chan et al., 2022). Ωστόσο, η έλλειψη εναρμονισμένων παγκόσμιων προτύπων δημιουργεί αβεβαιότητα για τους πλοιοκτήτες, οι οποίοι πρέπει να συμμορφώνονται μέσα σε ένα μωσαϊκό εθνικών κανονισμών. Η μελλοντική ανάπτυξη πολιτικών θα πρέπει να καλύψει αυτό το κενό, δημιουργώντας διεθνώς δεσμευτικούς κανόνες που θα ευθυγραμμίζουν την τοπική προστασία του περιβάλλοντος με την παγκόσμια απαίτηση για αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

8.5 Ερευνητικά κενά

Παρά τη σημαντική πρόοδο, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά κενά στην έρευνα για τον καθαρισμό της γάστρας. Οι μακροπρόθεσμες οικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών από τις αντιρρυπαντικές επικαλύψεις δεν είναι καλά κατανοητές, ιδίως όσον αφορά τη βιοσυσσώρευση και τη τροφική μεταφορά (Kim et al., 2024). Ομοίως, ενώ τα

συστήματα σύλληψης μειώνουν την απελευθέρωση ρύπων, η λειτουργική τους αποδοτικότητα και οι απαιτήσεις συντήρησης απαιτούν περαιτέρω μελέτη προτού μπορέσουν να τυποποιηθούν σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ένα άλλο κενό αφορά την αξιολόγηση των συνδυασμένων συστημάτων. Οι περισσότερες έρευνες αξιολογούν τις επιστρώσεις ή τις τεχνολογίες καθαρισμού μεμονωμένα, αλλά οι αλληλεπιδράσεις τους είναι κρίσιμες. Για παράδειγμα, ο τρόπος με τον οποίο η συχνότητα του ρομποτικού καθαρισμού επηρεάζει τη διάρκεια ζωής των επιστρώσεων χωρίς βιοκτόνα παραμένει ανεξερεύνητος. Τέλος, η κοινωνικοοικονομική διάσταση του καθαρισμού της γάστρας —πώς οι μικροί φορείς σε αναπτυσσόμενες περιοχές μπορούν να έχουν πρόσβαση σε προηγμένες τεχνολογίες— απαιτεί προσοχή για να διασφαλιστεί ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη κατανέμονται ισότιμα σε όλο τον παγκόσμιο στόλο.

Οι μελλοντικές προοπτικές για τον καθαρισμό της γάστρας καθορίζονται από τις δύο επιταγές της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας. Η ρομποτική θα συνεχίσει να μειώνει την εξάρτηση από τους δύτες, αλλά τα συστήματα πρόσφυσης πρέπει να βελτιωθούν όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα και την προσαρμοστικότητα. Τα επιχρίσματα χωρίς βιοκτόνα προσφέρουν μια διέξοδο από τη χημική ρύπανση, αλλά η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την ενσωμάτωσή τους σε βελτιστοποιημένες πρακτικές καθαρισμού. Τα συστήματα παρακολούθησης και τα προγνωστικά μοντέλα θα εξελιχθούν σε βασικά εργαλεία για την εξισορρόπηση του κόστους, της ασφάλειας και των περιβαλλοντικών επιδόσεων. Πάνω απ' όλα, απαιτείται εναρμόνιση των κανονιστικών ρυθμίσεων για να διασφαλιστεί ότι η τοπική προστασία του περιβάλλοντος δεν έρχεται σε σύγκρουση με τους παγκόσμιους στόχους για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η αντιμετώπιση αυτών των κενών θα απαιτήσει συνεργατική έρευνα που θα ενώνει μηχανικούς, οικολόγους, ρυθμιστικές αρχές και πλοιοκτήτες. Ο δρόμος προς τα εμπρός για τον καθαρισμό της γάστρας δεν βρίσκεται σε σταδιακές βελτιώσεις των υφιστάμενων μεθόδων, αλλά σε μια προσέγγιση βασισμένη σε συστήματα που ενσωματώνει την τεχνολογία, τις επικαλύψεις, την παρακολούθηση και τη ρύθμιση σε μια συνεκτική στρατηγική για τη βιώσιμη ναυτιλία.

9. Συμπέρασμα

Η μελέτη του καθαρισμού της γάστρας των πλοίων αποκάλυψε τον διπλό ρόλο του ως λειτουργική αναγκαιότητα και περιβαλλοντική πρόκληση. Σε όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας, εξετάστηκαν πολλαπλές διαστάσεις της ρύπανσης της γάστρας και των τεχνολογιών καθαρισμού, από τις υδροδυναμικές επιπτώσεις και τις επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμων έως τις περιβαλλοντικές συνέπειες των υπολειμμάτων καθαρισμού, τη συγκριτική αποδοτικότητα των διαθέσιμων τεχνολογιών και το εξελισσόμενο κανονιστικό πλαίσιο. Συνολικά, τα στοιχεία αποδεικνύουν ότι ο καθαρισμός της γάστρας δεν είναι απλώς μια δραστηριότητα συντήρησης, αλλά ένα κρίσιμο συστατικό της βιώσιμης ναυτιλίας και των παγκόσμιων στρατηγικών απεξάρτησης από τον άνθρακα.

Ένα από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα αυτής της έρευνας είναι το μέγεθος των επιπτώσεων στην απόδοση που συνδέονται με την ρύπανση της γάστρας. Όπως αποδείχθηκε από τους Schultz (2007) και Townsin (2003), ακόμη και ελαφριά στρώματα βιοφίλμ μπορούν να αυξήσουν την αντίσταση και την κατανάλωση καυσίμου κατά 10 έως 20 τοις εκατό, ενώ η βαριά ρύπανση μπορεί να οδηγήσει σε επιπτώσεις που υπερβαίνουν το 40 τοις εκατό. Τέτοιες αυξήσεις έχουν σοβαρές οικονομικές συνέπειες για τους χειριστές και εξίσου σοβαρές επιπτώσεις στις εκπομπές. Ο Candries (2001) και τα πρότυπα ISO 19030 (2016α, 2016β) έχουν επισημάνει περαιτέρω ότι αυτές οι επιπτώσεις είναι ποσοτικοποιήσιμες και προβλέψιμες, τονίζοντας την ανάγκη για τυποποιημένη παρακολούθηση της απόδοσης και προληπτικές παρεμβάσεις.

Ωστόσο, ο καθαρισμός της γάστρας δεν είναι χωρίς περιβαλλοντικές συνέπειες. Η απελευθέρωση υπολειμμάτων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και βιοκτόνων κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων καθαρισμού εισάγει βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά στο θαλάσσιο περιβάλλον, με τεκμηριωμένους οικολογικούς κινδύνους (Lagerström et al., 2020; Turner, 2010; Kim et al., 2024). Επιπλέον, οι εργασίες καθαρισμού μπορεί να διασκορπίσουν βιώσιμους οργανισμούς, συμβάλλοντας στην εξάπλωση χωροκατακτητικών ειδών (Chan et al., 2022). Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν το παράδοξο του καθαρισμού της γάστρας: ενώ προσφέρει παγκόσμια οφέλη μειώνοντας τις εκπομπές CO₂ μέσω της αποκατάστασης της αποδοτικότητας, μπορεί να επιβάλει τοπικά κόστη στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Οι μελέτες των Oliveira et al. (2020, 2022) έχουν καταγράψει σαφώς αυτή την ένταση, δείχνοντας ότι το οικολογικό αποτύπωμα του καθαρισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αν τα απορρίμματα συλλέγονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία.

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών αποκάλυψε ότι καμία μεμονωμένη προσέγγιση δεν είναι καθολικά βέλτιστη. Ο χειροκίνητος καθαρισμός με δύτες, αν και ιστορικά σημαντικός, είναι όλο και πιο ασυμβίβαστος με τα σύγχρονα πρότυπα ασφάλειας και περιβάλλοντος (Song et al., 2020). Τα μηχανοκίνητα συστήματα βουρτσών παραμένουν η κυρίαρχη μέθοδος λόγω της αποδοτικότητας και της οικονομικής τους αποτελεσματικότητας, αλλά η περιβαλλοντική τους απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ενσωμάτωση συστημάτων αναρρόφησης και φιλτραρίσματος (Wei et al., 2024). Οι μέθοδοι χωρίς επαφή, όπως η σπηλαιώση, οι υπέρηχοι και η υδροβολή, είναι πολλά υποσχόμενες για τη μείωση της φθοράς των επιστρώσεων, αλλά αντιμετωπίζουν προκλήσεις όσον αφορά την απελευθέρωση ρύπων και την ενεργειακή ζήτηση (Guo et al., 2022; Kim et al., 2024). Οι εξελίξεις στις ρομποτικές τεχνολογίες πρόσφυσης (Chen et al., 2023; Albitar et al., 2016) αποτελούν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός, καθώς επιτρέπουν τον αυτόνομο καθαρισμό που μειώνει τους επαγγελματικούς κινδύνους και ευθυγραμμίζεται με τις όλο και πιο αυστηρές κανονιστικές απαιτήσεις.

Το νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο παραμένει κατακερματισμένο, αλλά επιρροή. Ο ΔΝΟ (2023) έχει εκδώσει μη δεσμευτικές κατευθυντήριες γραμμές, ενώ η Νέα Ζηλανδία και ορισμένες πολιτείες των ΗΠΑ έχουν θεσπίσει αυστηρότερα εθνικά πρότυπα. Τα ευρωπαϊκά λιμάνια έχουν πρωτοστατήσει στις απαιτήσεις σύλληψης για τον καθαρισμό εντός του νερού, υποστηριζόμενα από στοιχεία για επίμονη μεταλλική μόλυνση στα ιζήματα (Lagerström et al., 2020). Αυτές οι διαφορετικές προσεγγίσεις καταδεικνύουν την ένταση μεταξύ εναρμόνισης και εθνικής κυριαρχίας, αλλά υπογραμμίζουν επίσης μια παγκόσμια τάση: οι τεχνολογίες και οι πρακτικές που ελαχιστοποιούν την απελευθέρωση ρύπων και τους κινδύνους από χωροκατακτητικά είδη ευνοούνται όλο και περισσότερο.

Οι μελλοντικές προοπτικές δίνουν έμφαση στην ενσωμάτωση τεχνολογιών καθαρισμού με μη τοξικά αντιρρυπαντικά επιχρίσματα, προηγμένα συστήματα πρόσφυσης και προγνωστική παρακολούθηση. Παραμένουν κενά στην έρευνα σχετικά με τις μακροπρόθεσμες οικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών και την αλληλεπίδραση μεταξύ της συχνότητας καθαρισμού και της διάρκειας ζωής των επιχρισμάτων (Turner, 2010; Kim et al., 2024). Ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης και των μοντέλων απόδοσης που βασίζονται σε αισθητήρες, όπως προβλέπεται στο πρότυπο ISO 19030, προσφέρει την υπόσχεση για πιο ακριβή προγραμματισμό των παρεμβάσεων, εξισορροπώντας τα οικονομικά και περιβαλλοντικά αποτελέσματα.

Τελικά, το συμπέρασμα είναι σαφές: ο καθαρισμός της γάστρας είναι απαραίτητη διαδικασία συντήρησης για τα πλοία. Η αποτελεσματική διαχείρισή της απαιτεί μια προσέγγιση βασισμένη σε συστήματα που ενσωματώνει την τεχνολογική καινοτομία, τις περιβαλλοντικές διασφαλίσεις και τη ρυθμιστική συνοχή. Οι Schultz (2007) και Townsin (2003) τόνισαν πριν από δεκαετίες ότι οι κυρώσεις για την ρύπανση είναι πολύ μεγάλες για να αγνοηθούν, και αυτό ισχύει και σήμερα. Ωστόσο, η πρόκληση έχει εξελιχθεί: οι χειριστές πρέπει πλέον όχι μόνο να διατηρήσουν την αποδοτικότητα, αλλά και να διασφαλίσουν ότι οι πρακτικές καθαρισμού είναι σύμφωνες με τους κλιματικούς στόχους και τα πρότυπα προστασίας του περιβάλλοντος.

Η πορεία προς τα εμπρός περιλαμβάνει τρεις αλληλεξαρτώμενες στρατηγικές. Πρώτον, η επένδυση σε προηγμένα ρομποτικά συστήματα με αποτελεσματική συλλογή υπολειμμάτων θα επιτρέψει στους φορείς εκμετάλλευσης να επιτύχουν αύξηση της αποδοτικότητας χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο το τοπικό θαλάσσιο περιβάλλον. Δεύτερον, η μετάβαση σε αντιρρυπαντικά επιχρίσματα χωρίς βιοκτόνα πρέπει να επιταχυνθεί για να εξλειφθεί η βασική αιτία της έκλυσης τοξικών ρύπων. Τρίτον, τα διεθνή ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει να προχωρήσουν πέρα από τις κατευθυντήριες γραμμές προς εναρμονισμένες, εκτελεστές προδιαγραφές που ενσωματώνουν τη διαχείριση της γάστρας σε ευρύτερες περιβαλλοντικές πολιτικές.

Αντιμετωπίζοντας αυτές τις προτεραιότητες, ο καθαρισμός της γάστρας μπορεί να εξελιχθεί από μια αντιδραστική εργασία συντήρησης σε έναν προληπτικό πυλώνα της βιώσιμης ναυτιλίας. Με αυτόν τον τρόπο, θα συμβάλει όχι μόνο στη μείωση του κόστους για τους χειριστές πλοίων, αλλά και στην επίτευξη των διεθνών περιβαλλοντικών και κλιματικών στόχων. Το μέλλον των θαλάσσιων μεταφορών εξαρτάται από την αναγνώριση του καθαρισμού της γάστρας ως κάτι περισσότερο από μια τεχνική αναγκαιότητα: είναι μια ζωτική διασταύρωση τεχνολογίας, οικολογίας και πολιτικής που θα διαμορφώσει την πορεία της παγκόσμιας ναυτιλίας στις επόμενες δεκαετίες.

Βιβλιογραφία

- ACT/MERC (2022). *Guidelines for testing ship biofouling in-water cleaning systems*.
- Adland, R., Cariou, P., Jia, H., & Wolff, F. C. (2018). The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 178, 1-13.
- Albitar, H., Ananiev, A., & Kalaykov, I. (2013, August). New concept of in-water surface cleaning robot. In *2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 1582-1587). IEEE.
- Albitar, H., Dandan, K., Ananiev, A., & Kalaykov, I. (2016). Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(1), 7.
- Asbeck, A. T., Kim, S., McClung, A., Parness, A., & Cutkosky, M. R. (2006, May). Climbing walls with microspines. In *IEEE ICRA* (pp. 4315-4317). Fla..
- Balashov, V. S., Gromov, B. A., Ermolov, I. L., & Roskilly, A. P. (2011). Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot. *Russian engineering research*, 31(6), 589-592.
- BIMCO. (2025, February 3). *In-water cleaning guidance finalized by the IMO's pollution prevention and response sub-committee*. BIMCO. <https://www.bimco.org/news-insights/bimco-news/2025/202502/20250203-inwater-cleaning/>
- California State Lands Commission (2018). *Article 4.8 Biofouling management regulations*.
- Candries, M. (2001). *Drag, boundary-layer and roughness characteristics of marine surfaces*. PhD thesis.
- Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C., & Wood, R. J. (2006). Modern approaches to marine antifouling coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3642-3652.
- Chan, F.T. et al. (2022). *Ship biofouling as a vector for non-indigenous aquatic species*. *Frontiers in Marine Science*.
- Chen, L., Cui, R., Yan, W., Xu, H., Zhao, H., & Li, H. (2023). Design and climbing control of an underwater robot for ship hull cleaning. *Ocean Engineering*, 274, 114024.

Cioanta I, McGhin C (2017) *Cleaning and grooming water submerged structures using acoustic pressure shock waves*. U.S. Patent No. 9840313, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 3–4

Courson B, Shelburne J (2001) *Portable encapsulated underwater ultrasonic cleaner*. U.S. Patent No. 6259653, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1–2

Ferreira, C. Z., Conte, G. Y. C., Avila, J. P. J., Pereira, R. C., & Ribeiro, T. M. C. (2013, November). Underwater robotic vehicle for ship hull inspection: control system architecture. In *Proceedings of the International Congress of Mechanical Engineering* (pp. 20-22).

Floerl, O., Peacock, L., Seaward, K., & Inglis, G. (2010). Review of biosecurity and contaminant risks associated with in-water cleaning. *Australian Department of Agriculture, Fisheries and Forestry*, 1-136.

Fowler MP (1987) *Optical cleaning system for removing matter from underwater surfaces*. U.S. Patent No. 4689523, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2–3

Guo, T., Deng, Z. D., Liu, X., Song, D., & Yang, H. (2022). Development of a new hull adsorptive underwater climbing robot using the Bernoulli negative pressure effect. *Ocean Engineering*, 243, 110306.

Hua, J., Chiu, Y. S., & Tsai, C. Y. (2018). En-route operated hydroblasting system for counteracting biofouling on ship hull. *Ocean Engineering*, 152, 249-256.

IMO (2018). *Hull scrapings and marine coatings as a source of microplastics*. (IUCN/IMO report).

IMO (2023). *2023 Guidelines for the control and management of ships' biofouling...* Resolution MEPC.378(80).

IMO (2025). *Guidance on in-water cleaning of ships' biofouling (Secretariat)*. MEPC.1/Circ.918.

International Maritime Organization. (2020, January 1). *IMO 2020 – Cleaner shipping for cleaner air*. International Maritime Organization.

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>

International Maritime Organization. (2023). *2023 guidelines for the control and management of ships' biofouling*. International Maritime Organization.
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.378%2880%29.pdf>

ISO (2016). *ISO 19030-1: Ships and marine technology — Measurement of changes in hull and propeller performance — Part 1*.

ISO (2016). *ISO 19030-3: ... — Part 3: Alternative methods*.

Kim, T. et al. (2024). *Microplastics derived from antifouling paint during ship-hull hydroblasting*. Science of the Total Environment (PubMed record).

Kostenko, V. V., Bykanova, A. Y., & Tolstonogov, A. Y. (2019, June). Underwater robotics complex for inspection and laser cleaning of ships from biofouling. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 272, No. 2, p. 022103). IOP Publishing.

Lagerström, M., Ytreberg, E., Wiklund, A. K. E., & Granhag, L. (2020). Antifouling paints leach copper in excess—study of metal release rates and efficacy along a salinity gradient. *Water research*, 186, 116383.

Lee, M. H., Park, Y. D., Park, H. G., Park, W. C., Hong, S., Lee, K. S., & Chun, H. H. (2012). Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(4), 335-352.

Mazue, G., Viennet, R., Hihn, J. Y., Carpentier, L., Devidal, P., & Albaña, I. (2011). Large-scale ultrasonic cleaning system: design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz). *Ultrasonics sonochemistry*, 18(4), 895-900.

Morrissey, D. J., & Woods, C. (2015). In-water cleaning technologies: review of information.

Murphy, M. P., Tso, W., Tanzini, M., & Sitti, M. (2006, October). Waalbot: An agile small-scale wall climbing robot utilizing pressure sensitive adhesives. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3411-3416). IEEE.

New Zealand MPI (2024). *Biofouling management — Craft Risk Management Standard (CRMS)*.

- Oliveira D (2017) *The enemy below-adhesion and friction of ship hull fouling*. Master thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 56–67
- Oliveira, D.R. et al. (2020 & 2022). *In-water cleaning effects on coatings; tool for cost & emission reduction (Cu/Zn modeled from field data)*. *Biofouling* (2020) / *Journal of Cleaner Production* (2022).
- Osaka T, Norita J (2014) Submersible cleaning robot. U.S. Patent No. 8757181, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2–4
- Park, D., Han, J. B., Yeu, T., Cho, S. G., Kim, S., Kim, H., & Lee, Y. (2023). Development of an autonomous cleaning robot with a hydraulic manipulator arm for the cleaning of niche areas of a ship hull. *Journal of marine science and engineering*, 11(5), 973.
- Port Technology. (2025, February 3). *IMO finalizes in-water cleaning guidance*. Port Technology. <https://www.porttechnology.org/news/imo-finalises-in-water-cleaning-guidance/>
- Ross, B., Bares, J., & Fromme, C. (2003). A semi-autonomous robot for stripping paint from large vessels. *The international journal of robotics research*, 22(7-8), 617-626.
- Schultz, M.P. (2007). *Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering*. *Biofouling*.
- Smith FM, Colvin G (2014) *Magnetic track*. U.S. Patent Application No. 2014/0077.587, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 6–7
- Song, C., & Cui, W. (2020). Review of underwater ship hull cleaning technologies. *Journal of marine science and application*, 19(3), 415-429.
- Song, C., Cui, W. Review of Underwater Ship Hull Cleaning Technologies. *J. Marine. Sci. Appl.* 19, 415–429 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00157-z>
- Souto, D., Faiña, A., López-Peña, F., & Duro, R. J. (2013, May). Lappa: A new type of robot for underwater non-magnetic and complex hull cleaning. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3409-3414). IEEE.

- Tan, W., Zhang, C., & Liu, L. (2018, July). An introduction to biomimetic underwater adhesion system. In *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)* (pp. 479-483). IEEE.
- Townsin, R.L. (2003). *The ship hull fouling penalty*. Biofouling.
- Tribou, M., & Swain, G. (2010). The use of proactive in-water grooming to improve the performance of ship hull antifouling coatings. *Biofouling*, 26(1), 47-56.
- Turner, A. (2010). Marine pollution from antifouling paint particles. *Marine pollution bulletin*, 60(2), 159-171.
- Unver, O., Uneri, A., Aydemir, A., & Sitti, M. (2006, May). Geckobot: A gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.* (pp. 2329-2335). IEEE.
- Wei, K., Zhang, Z., & Zhou, Z. (2024). Design of a new composite underwater hull cleaning robot. *Journal of Sea Research*, 198, 102488.
- Yi, Z., Gong, Y., Wang, Z., & Wang, X. (2009, August). Development of a wall climbing robot for ship rust removal. In *2009 International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 4610-4615). IEEE.
- Zeng, C., & Cai, Z. X. (2012). The study of hull cleaning remote-control machine. *Robot Tech Appl*, 29(1), 14-17.