



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**



**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

Διπλωματική Εργασία

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ  
ΒΙΟΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΥΦΑΛΩΝ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ**

Χριστοπούλου Αριάδνη

Επιβλέπων:

Δρ. Αναστασία Χριστοδούλου

Πειραιάς

Δεκέμβρης 2025

## 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 ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνέπειων αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίσθηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ 'Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία'.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

ΜΕΛΟΣ Α' (Επιβλέπων): Δρ. Αναστασία Χριστοδούλου

ΜΕΛΟΣ Β': Δρ. Ιωάννης Θεοδοκάς

ΜΕΛΟΣ Γ': Δρ. Ιωάννης Λαγούδης

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων  
των πλοίων”*

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου και επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας την κα Χριστοδούλου Αναστασία, για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγησή της που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου και όλη μου την οικογένεια για όλη την υποστήριξη και πιστή τους για εμένα, καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου μέχρι και σήμερα.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

## **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βιορύπανση των υφάλων πλοίων από μικροοργανισμούς, ένα φαινόμενο που έχει σοβαρές επιπτώσεις στην απόδοση των σκαφών, την κατανάλωση καυσίμων, και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η βιορύπανση συμβάλλει στην συσσώρευση μικροοργανισμών στους υφάλους των πλοίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης στο νερό και την πρόκληση σημαντικών λειτουργικών και μηχανικών προβλημάτων. Η εργασία εστιάζει στις τεχνολογίες και τις στρατηγικές διαχείρισης που έχουν αναπτυχθεί για την καταπολέμηση του φαινομένου, όπως τα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα και οι προληπτικοί καθαρισμοί. Επιπλέον, διερευνάται ο ρόλος της βιορύπανσης στη μεταφορά θαλάσσιων παθογόνων μικροοργανισμών και οι συνέπειές της στην εξάπλωση ξενικών ειδών. Μέσα από τη διερεύνηση των επιπτώσεων και των μεθόδων αντιμετώπισης, η μελέτη υπογραμμίζει την ανάγκη για διεθνή συνεργασία και την ανάπτυξη μη τοξικών αντιρρυπαντικών λύσεων, ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι για το περιβάλλον και να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της ναυτιλίας.

Λέξεις κλειδιά: βιορύπανση, μικροοργανισμοί, τεχνολογίες, περιβάλλον.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

## **Abstract**

This thesis examines the biofouling of ship reefs by microorganisms, a phenomenon that has serious implications for vessel performance, fuel consumption, and environmental sustainability. Biofouling contributes to the accumulation of microorganisms on ship reefs, resulting in increased water resistance and causing significant operational problems. The paper focuses on the technologies and management strategies that have been developed to combat this phenomenon, such as anti-fouling coatings and preventive cleaning. In addition, the role of biofouling in the transport of marine pathogens and its consequences on the spread of invasive species is explored. By exploring the impacts and methods of response, the study highlights the need for international cooperation and the development of non-toxic anti-pollution solutions to reduce environmental risks and improve the efficiency of shipping.

Keywords: Biofouling, microorganisms, technologies, environment.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων  
των πλοίων”*

## **Πίνακας Περιεχομένων**

Abstract

1.Εισαγωγή.....	1
1.2 Διαχείριση βιολογικών ρύπων.....	2
1.3 Προληπτική και αντιδραστική διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης.....	5
1.4 Διεθνή πρότυπα και κανονισμοί.....	7
1.5 Πεδίο εφαρμογής και δομή.....	9
2.Διαδικασία της βιορύπανσης και οι επιπτώσεις της.....	10
2.1 Επιπτώσεις στην απόδοση του σκάφους.....	13
2.2 Τεχνολογίες αντιρρυπαντικής προστασίας.....	15
2.2.1 Αντιρρυπαντικές επιστρώσεις.....	16
2.2.2 Βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα.....	17
2.2.3 Μη βιοκτόνα και μη τοξικά αντιρρυπαντικά διαλύματα.....	24
2.2.4 Παρουσία και απουσία αντιρρυπαντικών επιστρώσεων.....	32
3. Χαρακτηριστικά του πλοίου και προφίλ λειτουργίας.....	34
3.1 Σχεδιασμός πλοίου.....	34
3.1.1 Εξειδικευμένες περιοχές.....	34
3.1.2 Υπολείμματα σε εξειδικευμένες περιοχές.....	38
3.2 Ταχύτητα πλοίου.....	42
3.3 Διάρκεια υπηρεσίας.....	45
3.4 Διαδρομές μεταφοράς.....	50



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων  
των πλοίων”*

4. Ο ρόλος της βιολογικής ρύπανσης των σκαφών στη μετατόπιση θαλάσσιων παθογόνων μικροοργανισμών.....	55
4.1 Μετατόπιση παθογόνων που σχετίζονται με τη βιολογική ρύπανση των σκαφών....	59
4.2 Πιθανές επιλογές διαχείρισης.....	61
4.3 Προσέγγιση διαχείρισης διαδρομής.....	64
4.4 Προληπτικός καθαρισμός μέσα στο νερό(PIC) για την υποστήριξη της συνεχιζόμενης συντήρησης των πλοίων.....	65
4.5 Προσέγγιση του ζητήματος “καθαρίστε πριν φύγετε”.....	66
5. Συζήτηση.....	68
6. Συμπεράσματα.....	71
7. Προτάσεις για μελλοντική ερευνά.....	81
Βιβλιογραφία.....	86



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

## **1 1.Εισαγωγή**

### **1.1 Γιατί αποτελεί πρόβλημα η βιολογική ρύπανση;**

Η βιολογική ρύπανση (ή απλώς ρύπανση) των σκαφών οδηγεί σε διάβρωση και αυξάνει την αντίσταση στο νερό και την κατανάλωση καυσίμων. Επιπλέον, τα σκάφη που φέρουν βιορύπανση αποτελούν κίνδυνο για την εξάπλωση μη αυτοχθόνων, χωροκατακτητικών υδρόβιων ειδών στα οικοσυστήματα σε όλο τον κόσμο. Η βιολογική ρύπανση αρχίζει όταν μια επιφάνεια χωρίς προστασία από τη ρύπανση εκτίθεται στο νερό. Τα κύττα των σκαφών προστατεύονται με αντιρρυπαντική επίστρωση με ιδιότητες που μειώνουν και αποτρέπουν τη ρύπανση. Η θαλάσσια ρύπανση αρχίζει με τα βακτήρια που σχηματίζουν βιοϋμενίου στο κύτος του σκάφους ή σε άλλη επιφάνεια που βρέχεται με θαλασσινό νερό. Τα βακτήρια ακολουθούνται από φύκια, ιδίως διάτομα, και, στη συνέχεια, άλλοι οργανισμοί όπως πρωτόζωα, μακροφύκη και προνύμφες αγκαθωτών και δίθυρων προσκολλώνται στην επιφάνεια. Το microfouling είναι στάδια ρύπανσης που είναι αόρατα στο ανθρώπινο μάτι, ενώ το macrofouling μπορεί να παρατηρηθεί από το ανθρώπινο μάτι (IMO, 2011). Η παρουσία βιοϋμενίου και μικροβρωμιάς αυξάνει την αντίσταση του νερού, ενώ η αντίσταση του νερού αυξάνεται αισθητά, όταν το κύτος του σκάφους φέρει μακροβρωμιά.

Το μεγάλο ενδιαφέρον για την αποφυγή της υπερβολικής κατανάλωσης καυσίμων είναι ο κύριος λόγος που οδηγεί τους ιδιοκτήτες εμπορικών πλοίων να διατηρούν τη βιολογική ρύπανση του κύτους στο ελάχιστο. Για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, η ρύπανση του κύτους μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου έως και 20% μεταξύ των διαστημάτων ελλιμενισμού, ενώ η ρύπανση εξειδικευμένων περιοχών όπως οι έλικες μπορεί να οδηγήσει σε υπερκατανάλωση καυσίμου έως και 5% (FORCE). Η εξάλειψη της βιολογικής ρύπανσης των επιφανειών του πλοίου οδηγεί σε βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων και μειώνει τον



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

κίνδυνο εξάπλωσης ζωντανών οργανισμών σε νέα οικοσυστήματα, όπου μπορεί να αναπαραχθούν και να γίνουν εισβάλλοντα είδη. Τα χωροκατακτητικά υδρόβια είδη μπορεί να υπερτερούν των αυτόχθονων ειδών του οικοσυστήματος, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη βιοποικιλότητα του οικοσυστήματος και να έχει αντίκτυπο σε οικονομικά συμφέροντα, όπως η τοπική αλιεία. Η εξάπλωση μη αυτοχθόνων, χωροκατακτητικών υδρόβιων ειδών με τη βιολογική ρύπανση των σκαφών ή την απόρριψη υδάτινου έρματος έχει τύχει σημαντικής διεθνούς προσοχής. Η αποτελεσματική διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης των σκαφών είναι επομένως απαραίτητη για την προστασία της βιοποικιλότητας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

## **1.2 Διαχείριση βιολογικών ρύπων**

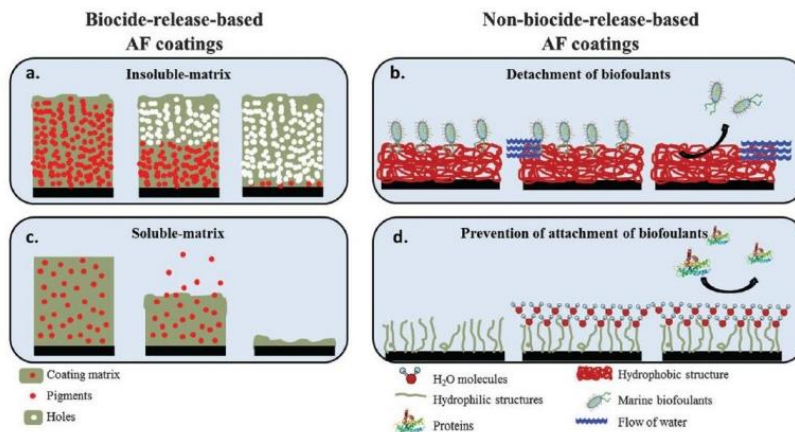
Το κύριο στοιχείο για την διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης των εμπορικών πλοίων είναι η χρήση προστατευτικών αντιρρυπαντικών επιστρώσεων. Ορισμένες αντιρρυπαντικές επιστρώσεις περιέχουν βιοκτόνο το οποίο απελευθερώνεται αργά και εμποδίζει την επικάθιση στην επιφάνεια (Σχήμα 1.1α, γ). Χρησιμοποιούνται διάφορα βιοκτόνα, αλλά κυρίως ο χαλκός και ο ψευδάργυρος έχουν εφαρμοστεί μετά την απαγόρευση της τριβουτυλίνης στις αρχές της τρέχουσας χιλιετίας. Μια από τις πιο συνηθισμένες επιστρώσεις βασίζεται σε αυτοσκληρυνόμενη βαφή συμπολυμερούς (SPC) (Σχήμα 1.1γ). Χρησιμοποιούνται επίσης μη βιοκτόνα επιχρίσματα ή επιχρίσματα με χαμηλές συγκεντρώσεις βιοκτόνων και η προστασία από τη ρύπανση των επιχρισμάτων αυτών επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση της προσκόλλησης μικροοργανισμών στο κύτος (Σχήμα 1.1β, δ). Αυτές οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις είναι συνήθως κατασκευασμένες από σιλικόνη, η οποία εμποδίζει τη σταθερή προσκόλληση των ρυπογόνων οργανισμών στο κύτος και διευκολύνει την απομάκρυνση των οργανισμών με τη δύναμη του νερού, όταν το σκάφος κινείται με κανονική ταχύτητα (Nurioglu et al., 2015). Τέλος, οι εποξειδικές αντιρρυπαντικές επιστρώσεις παρέχουν μια σκληρή



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

επιφάνεια που επιτρέπει τον τακτικό μηχανικό καθαρισμό (Lewis, 2020; Tamburri et al., 2020).



Σχήμα 1.1. Απεικονίσεις των διαφόρων αντιρρυπαντικών τεχνολογιών.

Αδιάλυτη μήτρα με υψηλή συγκέντρωση βιοκτόνου από την οποία το βιοκτόνο απελευθερώνεται με το χρόνο (α.). Διαλυτή μήτρα με βιοκτόνο, συνήθως γνωστή και ως αυτοπολυμερές συμπολυμερές (SPC), το οποίο διαλύεται αργά με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται το βιοκτόνο (γ.). Επικάλυψη χωρίς βιοκτόνο (ή επικάλυψη με χαμηλή συγκέντρωση βιοκτόνου), συνήθως με βάση τη σιλικόνη, η οποία εμποδίζει τη σταθερή προσκόλληση των ρυπογόνων οργανισμών (biofouls) και διευκολύνει την αποκόλληση των biofouls, όταν το σκάφος ταξιδεύει (β.). Μη βιοκτόνο επίστρωση με δραστικές ουσίες που εμποδίζουν την προσκόλληση των βιολογικών ρύπων (δ.) (Nurioglu et al., 2015).

Η αντιρρυπαντική επίστρωση είναι απαραίτητη για τη μείωση της βιολογικής ρύπανσης και συνήθως παρέχει αποτελεσματική προστασία, όταν το προϊόν χρησιμοποιείται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και η επίστρωση είναι κατάλληλη για τη δραστηριότητα του σκάφους. Όταν εφαρμόζεται για πρώτη φορά στην



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

επιφάνεια, η αντιρρυπαντική επίστρωση έχει αναμενόμενη διάρκεια ζωής και οι αντιρρυπαντικές ιδιότητες μειώνονται με την πάροδο του χρόνου. Παρά τα αποτελέσματα των αντιρρυπαντικών επιστρώσεων, μπορεί μερικές φορές να εμφανιστεί βιολογική ρύπανση όταν το σκάφος βρίσκεται σε προβλήτα ή αγκυροβολημένο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ιδίως σε ύδατα με υψηλή βιολογική δραστηριότητα. Επομένως, ο μηχανικός καθαρισμός του κύτους πραγματοποιείται συνήθως κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού με χρονικά διαστήματα 3-5 ετών. Ο υποβρύχιος καθαρισμός της γάστρας ή ο καθαρισμός μέσα στο νερό είναι μια εναλλακτική μέθοδος που εκτελείται από δύτες ή ρομπότ (π.χ. τηλεκατευθυνόμενα οχήματα, ROV).

Τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συνήθως ελλιμενίζονται κάθε πέντε χρόνια, αλλά μεταξύ των διαστημάτων ελλιμενισμού μπορεί να είναι απαραίτητος ο καθαρισμός του κύτους ή των εξειδικευμένων περιοχών μέσα στο νερό. Εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι για τον καθαρισμό των μεγάλων επιφανειών της γάστρας και τον καθαρισμό εξειδικευμένων περιοχών, όπως το στήθος της θάλασσας, η προπέλα, η σήραγγα των προωθητήριων ή η καρίνα του υδροσυλλέκτη. Ο καθαρισμός του κύτους είναι σχετικά εύκολος και το κύτος επηρεάζεται από τις μηχανικές επιδράσεις του νερού κατά τη διάρκεια του ταξιδιού που μειώνουν τη βιολογική ρύπανση.

Οι εξειδικευμένες περιοχές επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από τις μηχανικές καταπονήσεις και, ως εκ τούτου, είναι περισσότερο εκτεθειμένες στη βιολογική ρύπανση. Η βιολογική ρύπανση ορισμένων εξειδικευμένων περιοχών, όπως το θαλάσσιο στήθος και η σήραγγα των προωθητήριων, έχει μικρότερη επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου και, επομένως, τα οικονομικά κίνητρα για τον καθαρισμό αυτών των περιοχών είναι χαμηλότερα από ό,τι για το κύτος. Ένα ερωτηματολόγιο που απευθυνόταν σε ιδιοκτήτες εμπορικών πλοίων στις χώρες της Βαλτικής έδειξε ότι το 72% των συμμετεχόντων χρησιμοποιούσε κάποια μορφή καθαρισμού εντός του νερού (COMPLETE, 2021). Ο καθαρισμός μέσα στο νερό οδηγεί σε ερωτήματα σχετικά με τη διαδικασία καθαρισμού και το κατά πόσον λαμβάνονται σχετικές προφυλάξεις για την



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

προστασία του τοπικού υδάτινου περιβάλλοντος από την έκθεση σε επικίνδυνα χημικά ή μη αυτόχθονα χωροκατακτητικά υδρόβια είδη.

### **1.3 Προληπτική και αντιδραστική διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης**

Η διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης μπορεί να είναι είτε προληπτική είτε αντιδραστική. Ο προληπτικός καθαρισμός εκτελείται συχνά και πριν από την εγκατάσταση της βιολογικής ρύπανσης, χωρίς να χρησιμοποιούνται οι επιδόσεις του σκάφους ή οι αξιολογήσεις κινδύνου ως εναύσματα. Ο προληπτικός καθαρισμός μειώνει τον κίνδυνο βιολογικής ρύπανσης, καθώς η ρύπανση είναι εύκολο να αφαιρεθεί στα αρχικά της στάδια. Ο προληπτικός καθαρισμός απομακρύνει το στρώμα βιοϋμενίου και, ως εκ τούτου, αποτρέπει την ανάπτυξη της μακρορύπανσης. Οι πιο ήπιες διαδικασίες στον προληπτικό καθαρισμό οδηγούν σε λιγότερη τριβή και προάγουν τη βέλτιστη διάρκεια ζωής της αντιρρυπαντικής επίστρωσης. Τα τηλεχειριζόμενα οχήματα (ROV) χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό μέσα στο νερό της μακρορύπανσης και ενδεχομένως της μακρορύπανσης στο αρχικό της στάδιο. Τα ROV χρησιμοποιούν συνήθως έκλυση υψηλής πίεσης και έχουν την καλύτερη απόδοση σε μεγάλες επιφάνειες του κύτους. Ο αντιδραστικός καθαρισμός πραγματοποιείται μετά την παρατήρηση βιολογικών ρύπων ή επιπτώσεων που σχετίζονται με τη ρύπανση στην κατανάλωση καυσίμου του σκάφους ή στον κινητήριο άξονα (BIMCO, 2021a). Τόσο το κύτος όσο και οι περιοχές της κόγχης μπορούν να καθαρίζονται κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού ή μέσα στο νερό από δύτες που χρησιμοποιούν περιστρεφόμενες βούρτσες. Τα αρχικά στάδια της βιολογικής ρύπανσης μπορούν μερικές φορές να απομακρυνθούν από ROV με τη χρήση καθαρισμού υψηλής πίεσης. Χρησιμοποιούνται βούρτσες διαφορετικής σκληρότητας, και ειδικά οι μεταλλικές βούρτσες καθιστούν



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

δυνατή την απομάκρυνση σκληρών, ασβεστολιθικών μακροβρωμίων, όπως οι αγκαθωτοί μύκητες, τα δίθυρα και τα σωληνοειδή σκουλήκια, αλλά αυτή η επεξεργασία ενέχει μεγαλύτερο κίνδυνο ζημιάς στην επίστρωση και διαρροής υλικών επίστρωσης κατά τη διάρκεια του καθαρισμού. Κατά τον καθαρισμό μέσα στο νερό, η σύλληψη των υλικών που απελευθερώνονται απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς τα υλικά αυτά περιέχουν συνήθως ζωντανούς οργανισμούς και υλικά επικάλυψης. Πόσο αποτελεσματική είναι η σύλληψη; Ποια επεξεργασία εφαρμόζεται για τα υγρά απόβλητα του θαλασσινού νερού που παράγονται κατά τον καθαρισμό; Ποια είναι τα επίπεδα των ζωντανών οργανισμών και των υλικών επικάλυψης στο εκλυόμενο θαλασσινό νερό; Τα ερωτήματα αυτά είναι σημαντικά για να αξιολογηθεί κατά πόσον ο καθαρισμός μέσα στο νερό παρουσιάζει κίνδυνο για το τοπικό υδάτινο περιβάλλον.

Επειδή η βιολογική ρύπανση είναι εξαιρετικά μεταβλητή και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η δραστηριότητα του σκάφους και η διαδρομή πλεύσης, είναι σημαντικό να καθοριστεί ένα σχέδιο διαχείρισης της βιολογικής ρύπανσης για κάθε σκάφος. Επιπλέον, το σκάφος πρέπει να τηρεί επικαιροποιημένο το βιβλίο καταγραφής της βιολογικής ρύπανσης, όπως προβλέπεται στις κατευθυντήριες γραμμές του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για τη βιολογική ρύπανση (IMO, 2011). Μια μελέτη εμπορικών πλοίων με δρομολόγια στη Βαλτική Θάλασσα έδειξε ότι σχεδόν όλα τα πλοία διέθεταν σχέδιο διαχείρισης της βιολογικής ρύπανσης, αλλά το σχέδιο αυτό ήταν πολύ γενικό για να διατηρήσει επαρκή έλεγχο της βιολογικής ρύπανσης για το 60% των πλοίων (COMPLETE, 2021). Οι νέες ψηφιακές λύσεις διευκολύνουν τους πλοιοκτήτες και τις αρχές να χρησιμοποιούν και να έχουν πρόσβαση στο σχέδιο διαχείρισης της βιολογικής ρύπανσης και στο βιβλίο καταγραφής και να αποκτούν επισκόπηση της αξιολόγησης κινδύνου που συνδέεται με την κατάσταση της βιολογικής ρύπανσης ενός συγκεκριμένου σκάφους. Τέτοιες διευκολύνσεις είναι, π.χ., διαθέσιμες στο εργαλείο διαχείρισης της βιοασφάλειας Vessel Check® (Strydrom et al., 2020). Επιπλέον, ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων (COMPLETE, 2021) αναπτύσσεται στο πλαίσιο του έργου COMPLETE της Βαλτικής με στόχο να βοηθήσει τους ιδιοκτήτες



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

σκαφών να επιλέξουν το καλύτερο σύστημα αντιρρύπανσης με βάση ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων που επηρεάζουν τη βιολογική ρύπανση των σκαφών. Αυτά είναι δύο παραδείγματα εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων που μπορούν να βοηθήσουν τους πλοιοκτήτες να επιτύχουν ορθή διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του IMO για τη βιολογική ρύπανση και τους εθνικούς κανονισμούς.

#### **1.4 Διεθνή πρότυπα και Κανονισμοί**

Ο καθαρισμός μέσα στο νερό έχει οδηγήσει σε ανησυχία ότι τα βιοκτόνα (π.χ. κόμπερ και ψευδάργυρος) που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια του καθαρισμού μπορεί να οδηγήσουν σε συγκεντρώσεις βιοκτόνων που υπερβαίνουν τα τοπικά πρότυπα ποιότητας νερού (US Environmental Protection Agency, 1999). Ως απάντηση στην ανησυχία αυτή, την τελευταία δεκαετία αναπτύχθηκαν νέες διαδικασίες για τον καθαρισμό μέσα στο νερό με σύλληψη. Η αυξημένη εστίαση στη βιοασφάλεια και την ποιότητα των υδάτων οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων για τη σύλληψη υλικών επίστρωσης, χημικών ουσιών και δυνητικά χωροκατακτητικών ειδών στο νερό καθαρισμού. Μια ομάδα αλληλογραφίας στο πλαίσιο του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) έχει ξεκινήσει την αναθεώρηση των κατευθυντήριων γραμμών για τη βιολογική ρύπανση (IMO, 2011) και συντάσσει αναθεωρημένες κατευθυντήριες γραμμές για τον έλεγχο και τη διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης των πλοίων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της μεταφοράς χωροκατακτητικών υδρόβιων ειδών (IMO, 2021). Επιπλέον, ο διεθνής οργανισμός ναυτιλιακής βιομηχανίας BIMCO (Baltic and International Maritime Council) μαζί με το ICS (International Chamber of Shipping) εξέδωσαν μια διαδικασία έγκρισης (BIMCO, 2021a) και ένα βιομηχανικό πρότυπο (BIMCO 2021b) που προορίζονται για εταιρείες καθαρισμού εντός του νερού.

Η διαδικασία έγκρισης (BIMCO, 2021a) προορίζεται για τους παρόχους υπηρεσιών καθαρισμού εντός του νερού που απομακρύνουν και συλλαμβάνουν τους



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

μακροβρώμικους οργανισμούς που έχουν αποικίσει τις βυθισμένες επιφάνειες των πλοίων. Η έγκριση χορηγείται από έναν ανεξάρτητο φορέα έγκρισης που επαληθεύει το σύστημα καθαρισμού με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών και την τεκμηρίωση από έναν ανεξάρτητο οργανισμό δοκιμών. Η εταιρεία καθαρισμού πρέπει να διαθέτει διαδικασίες που περιγράφουν τον χειρισμό των υλικών καθώς και τη σύλληψη, τον διαχωρισμό ή/και την επεξεργασία του θαλασσινού νερού. Το βιομηχανικό πρότυπο της BIMCO (BIMCO 2021b) προβλέπει την εκτέλεση τριών διαφορετικών δοκιμών που πρέπει να πληρούν τα ακόλουθα τέσσερα κριτήρια:

1. Η διαδικασία καθαρισμού μέσα στο νερό απομακρύνει τουλάχιστον το 90% των μακροενυδρωμάτων (δηλ. άτομα ή αποικίες ορατές με το ανθρώπινο μάτι).

2. Ο διαχωρισμός και/ή η επεξεργασία των συλλεχθέντων υλικών κατά τον καθαρισμό μέσα στο νερό και τα δύο:

(1) αφαιρεί τουλάχιστον 90% (κατά μάζα) του υλικού από την εισροή του θαλασσινού νερού και

(2) τουλάχιστον 95% του σωματιδιακού υλικού στο νερό εκροής είναι  $\leq 10$  μμ σε ισοδύναμη σφαιρική διάμετρο (ESD)

3. Οι τοπικές παράμετροι ποιότητας του νερού των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) δεν είναι αυξημένες πάνω από τα επίπεδα περιβάλλοντος κατά την ίδια χρονική περίοδο.

4. Οι τοπικές παράμετροι ποιότητας του νερού των διαλυμένων και σωματιδιακών βιοκτόνων που βρέθηκαν στην AFC δεν είναι σημαντικά αυξημένες πάνω από τα επίπεδα περιβάλλοντος κατά την ίδια χρονική περίοδο. Το τέταρτο κριτήριο δεν είναι υποχρεωτικό για την έγκριση ενός συστήματος καθαρισμού, αλλά η συμμόρφωση με αυτό το κριτήριο μπορεί να απαιτηθεί, εάν το σύστημα χρησιμοποιείται σε λιμάνια με τοπικές απαιτήσεις για την απόρριψη των λυμάτων από τη διαδικασία καθαρισμού, π.χ. για τη συμμόρφωση με τα τοπικά πρότυπα ποιότητας των υδάτων.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Το βιομηχανικό πρότυπο BIMCO εφαρμόζει το μέγεθος των σωματιδίων και τα ολικά αιωρούμενα στερεά ως υποκατάστατα για τους οργανισμούς, τα υλικά επικάλυψης και άλλα υλικά που απομακρύνονται κατά τον καθαρισμό. Η απαίτηση ότι τουλάχιστον το 95% του σωματιδιακού υλικού στο νερό εκροής πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από 10 μm χρησιμοποιεί την υπόθεση ότι η αποτελεσματική δέσμευση των μικρών σωματιδίων θα εξασφαλίσει την αποτελεσματική δέσμευση του μικροπλαγκτον (π.χ. φύκια). Όταν τα σωματίδια στο νερό εκροής δεν προσδιορίζονται (π.χ. για τον ποσοτικό προσδιορισμό του μικροπλαγκτον) και προσδιορίζονται αποκλειστικά τα μεγέθη των σωματιδίων, είναι εξαιρετικά σημαντικό να μετριέται σωστά το μέγεθος των σωματιδίων. Εδώ ο πιθανός σχηματισμός συσσωματωμάτων που αποτελούνται από μικρά σωματίδια που συνδέονται μεταξύ τους μπορεί να αποτελέσει πρόκληση για τις σωστές μετρήσεις του μεγέθους των σωματιδίων. Μια προ επεξεργασία των δειγμάτων με έναν παράγοντα διασποράς μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο, αλλά μπορεί να είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί ότι το μέγιστο 5% των σωματιδίων είναι μεγαλύτερα από 10 μm, επειδή η ανάλυση μεγέθους σωματιδίων δεν κάνει διάκριση μεταξύ συσσωματωμάτων και μεμονωμένων σωματιδίων. Το τρέχον σχέδιο αναθεωρημένων κατευθυντήριων γραμμών του IMO για τη βιολογική ρύπανση (IMO, 2021) περιλαμβάνει επικαιροποιημένες συστάσεις για την εκτίμηση κινδύνου, την επιθεώρηση, τον καθαρισμό και τη συντήρηση. Οι αναθεωρημένες κατευθυντήριες γραμμές, όταν εκδοθούν, θα παρέχουν μια κοινή παγκόσμια προσέγγιση για τη διαχείριση και τον έλεγχο της βιορύπανσης, η οποία μπορεί να είναι χρήσιμη για τη μείωση των κινδύνων που σχετίζονται με τα χωροκατακτητικά υδρόβια είδη.

## **1.5 Πεδίο εφαρμογής και δομή**

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη βιορύπανση των υφάλων πλοίων από μικροοργανισμούς και τις επιπτώσεις της. Η δομή της εργασίας αναλύεται σε πέντε κύρια κεφάλαια:



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της βιολογικής ρύπανσης, οι λόγοι για τους οποίους αποτελεί πρόβλημα για τα πλοία, καθώς και οι τρέχουσες μέθοδοι διαχείρισης. Αναλύεται η διαφορά ανάμεσα στην προληπτική και αντιδραστική διαχείριση της βιορύπανσης, ενώ γίνεται αναφορά στα διεθνή πρότυπα που διέπουν το ζήτημα.

Το δεύτερο κεφάλαιο αυτό εστιάζει στη διαδικασία της βιορύπανσης, δηλαδή της προσκόλλησης και ανάπτυξης μικροοργανισμών στους υφάλους των πλοίων, και τις επιπτώσεις που έχει στην απόδοση των σκαφών, όπως είναι η αύξηση της αντίστασης και της κατανάλωσης καυσίμου. Εξετάζονται οι τεχνολογίες αντιρρυπαντικής προστασίας, περιλαμβανομένων των αντιρρυπαντικών επιστρώσεων, των βιοκτόνων και μη βιοκτόνων επιχρισμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού των πλοίων που επηρεάζουν τη βιορύπανση, όπως οι εξειδικευμένες περιοχές του σκάφους που είναι πιο επιρρεπείς σε αυτή. Εξετάζεται επίσης η σχέση της ταχύτητας του σκάφους, της διάρκειας υπηρεσίας και των διαδρομών μεταφοράς με το φαινόμενο της βιορύπανσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετώνται οι αντιρρυπαντικές ιδιότητες μικροοργανισμών, όπως βακτήρια και διάτομα, και γίνεται διερεύνηση των χημικών ενώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταπολέμηση της βιορύπανσης. Παρουσιάζονται, επίσης, προοπτικές για μελλοντικές τεχνολογίες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται ο ρόλος της βιορύπανσης στην εξάπλωση θαλάσσιων παθογόνων μικροοργανισμών μέσω των σκαφών. Αναλύονται οι προκλήσεις στη διαχείριση αυτών των μεταφορών και προτείνονται διάφορες στρατηγικές, όπως η προσέγγιση "Καθαρίστε πριν φύγετε" και ο προληπτικός καθαρισμός των σκαφών στο νερό.

## **2. Η διαδικασία της βιορύπανσης και οι επιπτώσεις της**

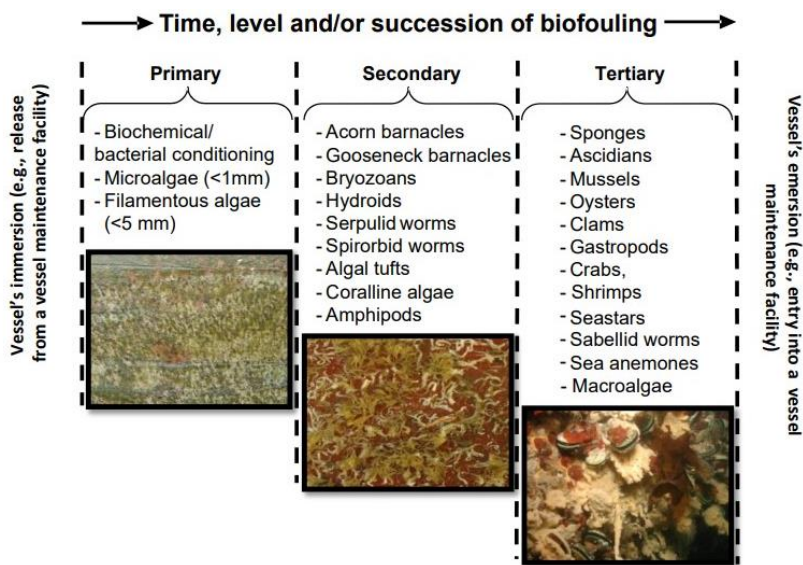
Γενικά, η συσσώρευση μιας θαλάσσιας κοινότητας ρύπανσης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία (Aldred & Clare 2008). Για λόγους απλότητας και πρακτικούς λόγους, η



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

διαδοχή της βιολογικής ρύπανσης έχει χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες: πρωτογενές, δευτερογενές και τριτογενές επίπεδο βιολογικής ρύπανσης (Σχήμα 2.1). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διαδοχή της βιολογικής ρύπανσης είναι μια δυναμική διαδικασία που περιλαμβάνει μετατοπίσεις στις κοινότητες της μικρό- και μακρορύπανσης με την πάροδο του χρόνου (Raeid et al. 2019). Κατά συνέπεια, οι τρεις κατηγορίες τείνουν να επικαλύπτονται. Το πρώτο στάδιο της διαδοχής της βιολογικής ρύπανσης είναι ο σχηματισμός ενός λεπτού βλενώδους στρώματος οργανικών και ορυκτών σαν “αποθέσεις”. Αρχίζει αμέσως μετά την εμβάπτιση μιας σκληρής επιφάνειας στο θαλασινό νερό (Raeid et al. 2019). Αυτή η βιοχημική προετοιμασία αποικίζεται γρήγορα, πρώτα από βακτήρια και στη συνέχεια από μικροφύκη, όπως διάτομα, πρωτόζωα, κυανοβακτήρια και πολυκύτταρους οργανισμούς, τα οποία δημιουργούν ένα λεπτό βιοφίλμ, το οποίο αναφέρεται επίσης ως στρώμα γλίτσας ή "microfouling" (Dobretsov et al. 2013, Georgiadis & Kluza 2014).



Σχήμα 2.1. Διαχρονική διαδοχή της βιολογικής ρύπανσης των σκαφών (Coutts et al., 2010c).



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Τα βιοϋμένια παρέχουν ένα κατάλληλο, αλλά όχι απαραίτητα υποχρεωτικό, υπόστρωμα για την προσκόλληση ή την ανάπτυξη μικροοργανισμών και την εγκατάσταση δευτερογενών οργανισμών βιολογικής ρύπανσης, οι οποίοι τείνουν να είναι οι πιο κυρίαρχοι και συχνά εμφανιζόμενοι οργανισμοί βιολογικής ρύπανσης στα κύττα των πλοίων. Ανάλογα με τη σύνθεση του βιοϋμενίου, η απελευθέρωση συγκεκριμένων ουσιών από τα θαλάσσια βακτήρια μπορεί να εμποδίσει την προσκόλληση και την ανάπτυξη μικροοργανισμών και την εγκατάσταση δευτερογενών ειδών βιορύπανσης, όπως προνύμφες ασπόνδυλων και σπόρια φυκιών (Dobretson et al. 2006). Το δεύτερο και το τρίτο στάδιο της διαδοχής περιλαμβάνουν τον αποικισμό του βιοϋμενίου από μακροβρώμικους οργανισμούς, όπως προνύμφες ασπόνδυλων και σπόρια μακροφυκών. Η δευτερογενής ρύπανση περιλαμβάνει συνήθως σκληρά ζώα που σχηματίζουν κρούστα, όπως ακανθοφόρα αγκάθια, βρυόζωα και σκουλήκια serpulid, αλλά μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μαλακές τούφες φυκιών και κινητά αμφίποδα (URS 2007). Η τριτογενής ρύπανση αποτελείται γενικά από μεγαλύτερους οργανισμούς, όπως σφουγγάρια, μοναχικά και σύνθετα θαλάσσια σκουλήκια, μύδια, στρείδια και φύκια. Κινητά ζώα, όπως καβούρια και θαλάσσια αστέρια, είναι σε θέση να ζουν μέσα σε αυτή την τριτογενή ανάπτυξη (Coutts & Taylor 2004, URS 2007). Οι βάρνακες και οι σερπουλιδικοί σωληνοσκόληκες είναι είδη που συναντώνται συχνά σε βρώμικα σκάφη, επειδή ξεπερνούν την πίεση επιλογής που ασκεί η κίνηση των σκαφών όντας ανθεκτικά στις υδροδυναμικές δυνάμεις (Coutts & Taylor 2004). Στα σκάφη, όταν τα συστήματα αντιρρύπανσης απουσιάζουν, είναι παλιά, φθαρμένα, υπερβολικά αποξηραμένα ή έχουν υποστεί άλλη βλάβη, η διαδοχή της ρύπανσης στα περισσότερα λιμενικά και παράκτια ύδατα ακολουθεί γενικά το χρονικό μοτίβο που περιγράφεται παρακάτω (URS 2007):

- πρωτογενές στρώμα γλίτσας με γκρίζες και πράσινες αποχρώσεις που ποικίλλουν ανάλογα με την περιεκτικότητα σε διάτομα και το φως



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

- αραχνοειδείς σωλήνες αμφίποδων (ανάλογα με την εποχή και το επίπεδο κίνησης του νερού)

- νηματοειδείς πράσινες άλγες που μπορούν να αναπτυχθούν σε υδατογραμμή ή σε διαγώνια γένια που παρέχουν καταφύγιο στα αμφίποδα και σε άλλους προσκολλημένους οργανισμούς,

- Σωληνοσκώληκες, αγκαθωτές γαρίδες, κόκκινα φύκια με χλοστάπητα, υδροειδή, όρθια βρυόζωα και εκτοκαρποειδή καφετιά φύκι, μύδια, στρείδια, σφουγγάρια με επικάθιση, θαλάσσιες ανεμώνες και θαλάσσια σκουλήκια, και

- μεγαλύτερες κινητές μορφές, όπως περιπλανώμενοι πολύχαιτοι, καβούρια, φώκιες, γυμνοβράγχια, κρινόζωα και ψάρια με εδαφική κυριαρχία.

## **2.1 Επιπτώσεις στην απόδοση του σκάφους**

Η βιολογική ρύπανση στο κύτος προκαλεί σημαντικό οικονομικό κόστος στη ναυτιλιακή βιομηχανία αυξάνοντας την υδροδυναμική αντίσταση, επηρεάζοντας την ευελιξία και μειώνοντας την ταχύτητα έως και 50% (Anisimov et al. 2019). Η ρύπανση εντός των εσωτερικών συστημάτων θαλασσινού νερού, όπως οι εναλλάκτες θερμότητας και τα συστήματα ψύξης, μπορεί να περιορίσει τη ροή και να μειώσει την αποδοτικότητα (Galil et al. 2019). Η αντίσταση τριβής αυξάνει το κόστος καυσίμου και τις ατμοσφαιρικές εκπομπές (Galil et al. 2019). Για παράδειγμα, για τη διατήρηση της κανονικής ταχύτητας του σκάφους, η κατανάλωση καυσίμου σε ένα σκάφος χωρίς κατάλληλη αντιρρυπαντική επίστρωση μπορεί να αυξηθεί κατά 40% (Dahlbäck et al. 2010). Ακόμη και η παρουσία βιοϋμενίου από μόνη της μπορεί να είναι ικανή να αλλάξει τη συνολική αντίσταση και να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου και να μειώσει την ταχύτητα του σκάφους, όπως διερευνήθηκε σε μελέτη με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης (Farkas et al. 2020). Τα βιοϋμένια μπορούν επίσης να αναπτυχθούν σε εσωτερικούς σωλήνες υπό έντονη πίεση ρύπανσης, όταν η παθητική προστασία μέσω των σωληνώσεων CuNi δεν μπορεί να αποτρέψει τον αποικισμό βακτηρίων με ανοχή στον χαλκό, προκαλώντας μικροβιακή διάβρωση των σωληνώσεων CuNi, ή όταν τα μικρόβια γίνονται ανθεκτικά στα μη



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

οξειδωτικά βιοκτόνα. Το αρχικό βιοφίλμ μπορεί στη συνέχεια να παρέχει ευνοϊκές συνθήκες για τον αποικισμό από μακροφάγα βακτήρια (Grandison et al. 2011).

Η βιολογική ρύπανση μπορεί να αυξήσει τη συχνότητα της συντήρησης των σκαφών, επειδή η βιολογική ρύπανση πρέπει να απομακρυνθεί με καθαρισμό μέσα στο νερό ή στην ξηρά και οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις μπορεί να χρειαστεί να ανανεωθούν νωρίτερα από το προγραμματισμένο διάστημα ξηράς αποβάθρας.

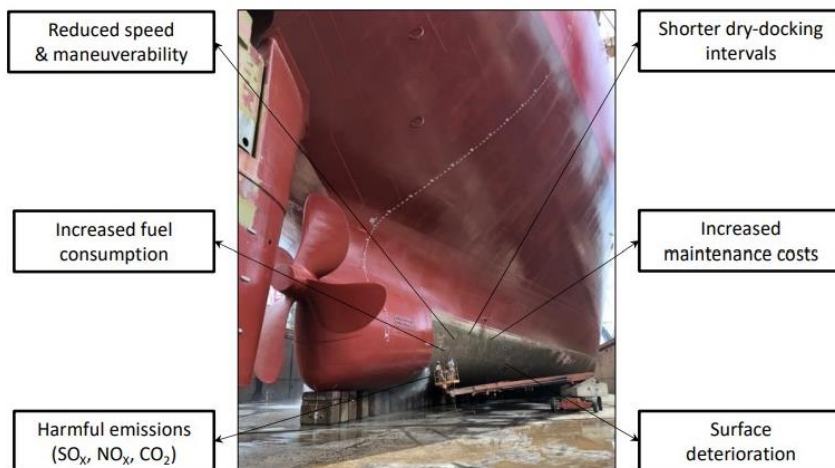
Ενώ υπάρχει οικονομικό κίνητρο για τη ναυτιλιακή βιομηχανία να ελέγχει τη βιολογική ρύπανση στα κύτη των πλοίων λόγω του οικονομικού κόστους της αυξημένης αντίστασης, υπάρχει μικρότερο ενδιαφέρον για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση της βιολογικής ρύπανσης σε εξειδικευμένες περιοχές, ιδίως σε εσωτερικές εξειδικευμένες περιοχές. Η βιολογική ρύπανση σε αυτές τις περιοχές δεν επηρεάζει τις επιδόσεις του πλοίου, όπως η ταχύτητα του πλοίου, με εξαίρεση τη ρύπανση των ελίκων και των DDSS. Η άποψη αυτή αντικατοπτρίζεται από το είδος της έρευνας στην οποία επενδύει η βιομηχανία, όπως οι ειδικές υδροδυναμικές επιδράσεις της τοπογραφίας της επικάλυψης και της βιολογικής ρύπανσης ή η αποτελεσματικότητα των βιοκτόνων και τα ποσοστά απελευθέρωσης (Davidson et al. 2016). Η εστίαση της βιομηχανίας στις περιοχές της γάστρας έρχεται σε πλήρη αντίθεση με εκείνη των διαχειριστών κινδύνου βιοασφάλειας, οι οποίοι θεωρούν τις εξειδικευμένες περιοχές ως πρωταρχικούς τομείς ανησυχίας για τον ρόλο τους στην ενίσχυση του κινδύνου βιοασφάλειας (Davidson et al. 2016). Ωστόσο, οι φορείς εκμετάλλευσης πλοίων και η βιομηχανία επιστρώσεων γνωρίζουν και ασχολούνται όλο και περισσότερο με τις ανησυχίες για τη βιοασφάλεια μέσω της εισαγωγής κατευθυντήριων γραμμών για τη διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης και, σε ορισμένα μέρη του κόσμου, κανονισμών για τη βιολογική ρύπανση (Davidson et al. 2016).



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

### Cost of biofouling on vessel hulls



**Σχήμα 2.2.** Το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος της βιολογικής ρύπανσης στα κύπη των πλοίων (Selim et al., 2017).

## 2.2 Τεχνολογίες αντιρρυπαντικής προστασίας

Οι φορείς εκμετάλλευσης σκαφών χρησιμοποιούν τεχνολογίες και πρακτικές διαχείρισης για την ελαχιστοποίηση της βιολογικής ρύπανσης σε όλες τις βυθισμένες επιφάνειες των σκαφών. Οι τεχνολογίες μπορούν να μειώσουν τη βιολογική ρύπανση σε επίπεδο αποδεκτό από τη βιομηχανία όσον αφορά τη λειτουργική αποδοτικότητα, δηλαδή τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων των σκαφών και τη μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (Davidson et al. 2016, Galil et al. 2019). Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν διαθέσιμες αποτελεσματικές τεχνολογίες που να αποτρέπουν τον σχηματισμό βιοϋμένιου στις βυθισμένες επιφάνειες των πλοίων. Τα θαλάσσια βιοϋμένια μπορούν να αναπτυχθούν ακόμη και στην επιφάνεια των αντιρρυπαντικών επικαλύψεων που περιέχουν βιοκτόνα (Dobretsov 2009) και οι τυχαίες ποσότητες μακρορύπανσης στα πλοία είναι συνηθισμένες, ακόμη και αν εφαρμόζονται οι βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης από τους πλοιοκτήτες (Georgiades & Kluzza 2017). Ο στόχος των τεχνολογιών



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

αντιρρύπανσης, όπως οι επιστρώσεις, δεν είναι απαραίτητα η αποτροπή της ανάπτυξης βιοϋμενίου και βιορύπανσης, αλλά η καθυστέρηση της εμφάνισής τους. Οι σύγχρονες επιστρώσεις είναι αποτελεσματικές σε αυτό και πολλά σκάφη μπορούν να επιτύχουν περιόδους ενδιάμεσου ξηρού ελλιμενισμού χωρίς πολλές ή και καθόλου παρεμβάσεις (Davidson et al. 2016). Εάν οι τεχνολογίες αντιρρύπανσης δεν είναι αποτελεσματικές στην καθυστέρηση της εμφάνισης της βιολογικής ρύπανσης για οποιονδήποτε λόγο, απαιτείται τακτικός καθαρισμός και επανεφαρμογή των αντιρρυπαντικών επιστρώσεων για την πρόληψη της εξέλιξης της ρύπανσης και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του σκάφους. Στην παρούσα ενότητα συνοψίζουμε τις τεχνολογίες αντιρρυπαντικής προστασίας που είναι διαθέσιμες στους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων. Αρχικά, συζητάμε τους διάφορους τύπους αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και τα χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια τα συστήματα που μπορούν να εγκατασταθούν για την πρόληψη της θαλάσσιας ανάπτυξης στα εσωτερικά συστήματα θαλασσινού νερού.

### **2.2.1 Αντιρρυπαντικές επιστρώσεις**

Η αντιρρυπαντική επίστρωση είναι ένα βερνικοχρώμα που έχει σχεδιαστεί για να εμποδίζει ή να ελαχιστοποιεί την προσκόλληση και την ανάπτυξη βιολογικών οργανισμών σε μια επιφάνεια στην οποία εφαρμόζεται το χρώμα (Georgiades et al. 2018). Τα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα μειώνουν την πιθανότητα εγκατάστασης και μετατόπισης εξωτικών θαλάσσιων ειδών. Η βιομηχανία ανησυχεί πρωτίστως για τις επιπτώσεις του biofouling στη δυναμική της πρόωσης και το σχετικό κόστος, γεγονός που αποτέλεσε την κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη μιας σειράς σύγχρονων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων. Αυτές οι σύγχρονες επιστρώσεις έχουν ως στόχο να διατηρούν ένα επαρκές επίπεδο προστασίας από τον αποικισμό για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, ανεξάρτητα από τις συνθήκες έκθεσης. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες αντιρρυπαντικών επικαλύψεων που χρησιμοποιούνται από τη ναυτιλιακή



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

βιομηχανία: βιοκτόνες αντιρρυπαντικές επικαλύψεις και μη βιοκτόνες επικαλύψεις απελευθέρωσης ρύπων. Και οι δύο τύποι επικαλύψεων αποσκοπούν στην καθυστέρηση/αποτροπή της προσκόλλησης ή της παραμονής των οργανισμών βιολογικής ρύπανσης σε υποβρύχια επιφάνειες. Και τα δύο χρειάζονται επίσης κατάλληλες ταχύτητες πλοίου για να αποδώσουν βέλτιστα και η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

### **2.2.2 Βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα**

Τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα περιέχουν τοξικούς παράγοντες που έχουν σχεδιαστεί για να εμποδίζουν την προσκόλληση και την ανάπτυξη των ειδών βιορύπανσης. Αυτές οι επιστρώσεις απελευθερώνουν βιοκτόνα στο οριακό στρώμα της βυθισμένης επιφάνειας με καθορισμένο ρυθμό, από όπου διασκορπίζονται στο θαλασσινό νερό (Tech Law 2017). Τα πρωτογενή βιοκτόνα περιλαμβάνουν ανόργανο χαλκό και τα δευτερογενή βιοκτόνα αποτελούνται από μια σειρά άλλων χημικών συστατικών (Lewis 2020). Ο χαλκός υπάρχει στο θαλάσσιο περιβάλλον σε χαμηλές συγκεντρώσεις και αποτελεί σημαντικό ιχνοστοιχείο για τους θαλάσσιους οργανισμούς. Σε υψηλές συγκεντρώσεις, ωστόσο, ο χαλκός είναι ένα τοξικό βαρύ μέταλλο που επηρεάζει αρνητικά τη θαλάσσια ζωή, για παράδειγμα, μειώνοντας την αναπαραγωγική επιτυχία και αλλοιώνοντας την ιστολογία στα ψάρια και διαταράσσοντας την κυτταρική διαίρεση στα διάτομα. Ορισμένα θαλάσσια είδη είναι ανθεκτικά στον χαλκό και μπορούν να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν όταν εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού (McElroy et al. 2017). Ο ρυθμός έκπλυσης και η αποτελεσματικότητα του βιοκτόνου καθορίζουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής της επίστρωσης (Anisimov et al. 2019), αλλά η απόδοση της επίστρωσης καθορίζεται επίσης από τη συγκέντρωση του βιοκτόνου εντός του χρώματος, την ποσότητα του χρώματος που εφαρμόζεται (πάχος ξηρού υμενίου), τη σωστή εφαρμογή και την αντιστοιχία μεταξύ του τύπου του χρώματος και του λειτουργικού προφίλ του σκάφους (Georgiades et al. 2018). Ορισμένα είδη ρύπανσης μπορεί να είναι ανθεκτικά στις τοξικές ουσίες. Για παράδειγμα, ορισμένα



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

λεπτά νηματοιειδή φύκι είναι ανθεκτικά στα τοξικά βιοκτόνα που περιέχονται στα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα. Ως εκ τούτου, τα σύγχρονα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα χρησιμοποιούν επίσης ένα ευρύ φάσμα ενισχυτικών βιοκτόνων (που ονομάζονται επίσης συν-βιοκτόνα), τα οποία προστίθενται για να επιτευχθεί ευρύτερο φάσμα προστασίας έναντι των βιολογικών οργανισμών ρύπανσης και συνήθως αποτελούν το 0,1-10% της σύνθεσης του χρώματος (Martins et al. 2018). Τα ενισχυτικά βιοκτόνα είναι τοξικά. Μπορούν να επηρεάσουν τόσο τα θαλάσσια είδη-στόχους όσο και τα μη-στόχους (Martins et al. 2018). Ένα άλλο σημείο ανησυχίας για τα αντιρρυπαντικά θαλάσσια επιχρίσματα είναι ότι χρησιμοποιούν μικροπλαστικά ως συνδετικούς παράγοντες, τα οποία έχουν ανιχνευθεί σε δείγματα νερού στα ανοικτά των νότιων ακτών της Κορέας και θεωρούνται περιβαλλοντικά προβληματικά. Ωστόσο, η χρήση των αντιρρυπαντικών χρωμάτων έχει ελεγχθεί για τον μετριασμό των κινδύνων για τους ανθρώπους και το περιβάλλον. Τα βιοκτόνα επιχρίσματα σχεδιάζονται για μια σειρά τύπων σκαφών και την προβλεπόμενη δραστηριότητα εξυπηρέτησης (π.χ. ταχύτητα ταξιδιού και συχνότητα κίνησης). Η διάρκεια ζωής των βιοκτόνων επικαλύψεων ποικίλλει σημαντικά και ορισμένα βιοκτόνα είναι πιο ισχυρά έναντι ορισμένων τύπων ρυπογόνων οργανισμών από ό,τι άλλα. Οι πλοιοκτήτες και οι διαχειριστές των πλοίων θα πρέπει να ζητούν συμβουλές από τους κατασκευαστές των επιστρώσεων για να καθορίσουν ποιος τύπος επίστρωσης ταιριάζει καλύτερα στα πρότυπα δραστηριότητας του πλοίου τους, ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη αποτελεσματικότητα. Οποιαδήποτε απόκλιση από τις συνθήκες για τις οποίες έχει σχεδιαστεί η επίστρωση μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της επίστρωσης και να οδηγήσει σε πρόωρη συσσώρευση υψηλών επιπέδων βιολογικών ρύπων (Georgiades et al. 2018).

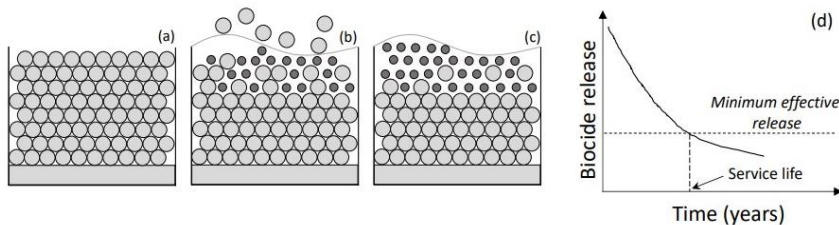
Οι βιοκτόνες επικαλύψεις διατίθενται σε διάφορους τύπους, όπως: (1) αδιάλυτη μήτρα, έκλυση εξ επαφής- (2) διαλυτή μήτρα, συμβατική- (3) διαλυτή μήτρα, πολυμερές ελεγχόμενης εξάντλησης (CDP)- (4) αυτοπολυμερές συμπολυμερές (SPC)- (5) υβριδικές επιστρώσεις- και (6) μεταλλικά συστήματα επιστρώσεων.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Τα επιχρίσματα έκλυσης επαφής με αδιάλυτη μήτρα περιέχουν ένα μηχανικά ανθεκτικό και ανθεκτικό υλικό που σχηματίζει φιλμ (συνδετικό υλικό), το οποίο συνδυάζεται με όσο το δυνατόν περισσότερη ποσότητα χρωστικού βιοκτόνου (συνήθως οξείδιο του χαλκού). Η φρεσκοβαμμένη επιφάνεια περιέχει σωματίδια βιοκτόνου (Σχήμα 2.3, ανοιχτοί γκρι κύκλοι). Όταν το φιλμ βαφής εκτίθεται σε θαλασσινό νερό, τα σωματίδια βιοκτόνου διαλύονται από τη επιφάνεια φιλμ-νερού, δημιουργώντας πόρους στο φιλμ. Οι πόροι γεμίζουν με νερό και εκθέτουν περαιτέρω σωματίδια βιοκτόνου. Η διαδικασία αυτή εξελίσσεται βαθύτερα στο φιλμ βαφής και η ροή του βιοκτόνου μειώνεται εκθετικά με το χρόνο (Finnie & Williams 2009), καθώς αυξάνεται η διαδρομή διάχυσης των σωματιδίων βιοκτόνου προς την επιφάνεια της βαφής. Η απελευθέρωση των βιοκτόνων είναι συνήθως ανομοιόμορφη, με υψηλούς αρχικούς ρυθμούς απελευθέρωσης που ακολουθούνται από απότομη μείωση με την πάροδο του χρόνου (Georgiades et al. 2018).



**Σχήμα 2.3.** Αδιάλυτη μήτρα, χρώμα έκλυσης επαφής (Anisimov et al., 2019).

Τα επιχρίσματα διαλυτής μήτρας είναι χρώματα σχεδιασμένα να απελευθερώνουν βιοκτόνα με σταθερό ρυθμό μέχρι να διαλυθούν πλήρως. Τα συμβατικά χρώματα διαλυτής μήτρας περιέχουν ένα συνδετικό υλικό που είναι ελαφρώς διαλυτό στο νερό. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο διαλυτό συστατικό συνδετικού υλικού είναι το κολοφώνιο ή ένα παράγωγό του (Finnie & Williams 2009). Η



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

ενυδάτωση διαλύει αργά την επιφάνεια του επιχρίσματος, απελευθερώνοντας το ελεύθερα συνδεδεμένο βιοκτόνο (Georgiades et al. 2018). Αυτός ο τύπος συστήματος επικάλυψης διαλυτής μήτρας ονομάζεται αφαιρετικό ή διαβρωτικό, επειδή η διάλυση του συστατικού συνδεδεμένου υλικού οδηγεί σε αραίωση του φιλμ βαφής με την πάροδο του χρόνου (Finnie & Williams 2009). Το κολοφώνιο διευκολύνει τη στίλβωση της επιφάνειας, η οποία αποσκοπεί στη διατήρηση του μήκους της διαδρομής διάχυσης, δηλαδή της απόστασης μεταξύ των διαλυόμενων σωματιδίων βιοκτόνου και της επιφάνειας του χρώματος. Ωστόσο, ο ρυθμός έκπλυσης των βιοκτόνων είναι συχνά πολύ γρήγορος και ανεξέλεγκτος. Περαιτέρω, ο σχηματισμός αδιάλυτου ανθρακικού χαλκού στη μήτρα μπορεί να αποτρέψει την απελευθέρωση σωματιδίων βιοκτόνου (Anisimov et al. 2019). Το εκλυμένο στρώμα είναι η πορώδης, εξαντλημένη σε  $\text{Cu}_2\text{O}$  μήτρα συνδεδεμένου υλικού που γεμίζει με θαλασσινό νερό. Είναι μηχανικά ασθενές και απομακρύνεται εν μέρει από τη ροή του νερού, αλλά με την πάροδο του χρόνου το πάχος του εκλυμένου στρώματος μπορεί να αυξηθεί και να οδηγήσει σε αναποτελεσματική δράση στίλβωσης, πρόωρη αστοχία και λιγότερο ελεγχόμενη απελευθέρωση βιοκτόνου (Lewis 2020).

Τα συνδεδεμένα υλικά των συμβατικών διαλυτών χρωμάτων μήτρας είναι ευαίσθητα στην ατμοσφαιρική οξειδωτική και απαιτούν ταχεία επαναφορά μετά την αποξήρανση (Lewis 2020). Η δραστηριότητα των βιοκτόνων σωματιδίων είναι επίσης ασθενής σε σταθερές συνθήκες, γεγονός που καθιστά αυτόν τον τύπο χρώματος ακατάλληλο για σκάφη με αργή ταχύτητα ή σκάφη που παραμένουν ανενεργά για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή ταχύτητα του σκάφους μπορεί να διαβρώσει τη μήτρα πολύ γρήγορα, θέτοντας σε κίνδυνο την αποτελεσματικότητα της αντιρρυπαντικής επίστρωσης. Τα συστήματα επικάλυψης πολυμερών ελεγχόμενης εξάντλησης (CDP) είναι η πιο σύγχρονη εκδοχή των συμβατικών χρωμάτων διαλυτής μήτρας και οι μηχανισμοί λειτουργίας τους θεωρούνται παρόμοιοι (Almeida et al. 2007). Τα CDP ελέγχουν τον ρυθμό διάλυσης της μήτρας καλύτερα από τα συμβατικά χρώματα διαλυτής μήτρας, χρησιμοποιώντας έναν



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

συνδυασμό πολυμερών συστατικών με συνδεδετικά υλικά διαλυτά στο θαλασσινό νερό (Finnie & Williams 2009, Georgiades et al. 2018). Τα συστατικά που ελέγχουν τη διαδικασία διάλυσης επιτρέπουν στα βιοκτόνα και το διαλυτό συνδεδετικό υλικό να ξεπλένονται από την επιφάνεια με σταθερό ρυθμό απόσβεσης/διάβρωσης. Στα μειονεκτήματα των συστημάτων επικάλυψης CDP περιλαμβάνονται η ανεπαρκής αυτοεξομάλυνση, η αύξηση των εκλυμένων στρωμάτων με την πάροδο του χρόνου, η μεταβλητή απελευθέρωση βιοκτόνων και η μικρή διάρκεια ζωής της επικάλυψης. Μπορεί να είναι δυνατή η παράταση της πραγματικής διάρκειας ζωής των CDP με τον τακτικό καθαρισμό μέσα στο νερό που αφαιρεί το εκλυμένο στρώμα και αναζωογονεί το φιλμ βαφής (Finnie & Williams 2009). Στις ΗΠΑ, η πλειονότητα των πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού είναι επικαλυμμένα με CDP χαλκού με βάση το κολοφώνιο. Τα πλοία αυτά περνούν μεγάλα χρονικά διαστήματα ανενεργά σε ένα λιμάνι. Οι μεγάλες περίοδοι αδράνειας απαιτούν καθαρισμό μέσα στο νερό, ο οποίος διατηρεί τα πλοία εντός καθορισμένων λειτουργικών συνθηκών. Οι δραστηριότητες προληπτικού καθαρισμού δεν θα πρέπει να επηρεάσουν σημαντικά την εξάντληση των επιστρώσεων με την πάροδο του χρόνου, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί κύκλοι στεγνών αποθηκών των 12 ετών για αυτά τα πλοία του Πολεμικού Ναυτικού, αλλά εάν τα πλοία θα καθαρίζονταν αντιδραστικά, οι επιστρώσεις θα μπορούσαν να αναμένεται να εξαντληθούν σημαντικά, μειώνοντας τον κύκλο στεγνών αποθηκών (Davidson et al. 2016). Τα χρώματα CDP βασίζονται στη φυσική διαδικασία ενυδάτωσης και διάλυσης του διαλυτού συνδεδετικού υλικού. Αυτή είναι η βασική διαφορά μεταξύ των χρωμάτων CDP και των χρωμάτων SPC, όπου ο μηχανισμός αφαίρεσης βασίζεται στην υδρόλυση.

Οι αντιρρυπαντικές βαφές αυτοστίλβωσης με συμπολυμερή (SPC) αποτελούν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις συμβατικές βαφές και την εκθετική μείωση του ρυθμού απελευθέρωσης βιοκτόνων με την πάροδο του χρόνου. Τα χρώματα SPC αποτελούνται από συμπολυμερή, τα οποία αποτελούνται από βιοκτόνα χημικά συνδεδεμένα με πολυμερείς σκελετούς του συνδεδετικού υλικού του χρώματος. Αυτά τα χρώματα απελευθερώνουν συμπολυμερή που υδρολύονται (διασπώνται) με την επαφή



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

και την κίνηση μέσω του θαλασσινού νερού, απελευθερώνοντας τα βιοκτόνα. Η αντίδραση αυτή λαμβάνει χώρα σε απόσταση λίγων νανομέτρων από την επιφάνεια της επικάλυψης, γεγονός που διατηρεί τα στρώματα σε λεπτά κατά τη διάρκεια περιόδων εμβάπτισης. Καθώς κάθε μοριακό στρώμα του συμπολυμερούς αντιδρά και διαλύεται μέσω αργής και ελεγχόμενης υδρόλυσης, το στρώμα που βρίσκεται από κάτω μπορεί να αντιδράσει, με αποτέλεσμα τη συνεχή ανανέωση της επιφάνειας που ονομάζεται "αυτογαλίσμα". Οι ποσότητες αδιάλυτου συνδετικού υλικού στο χρώμα είναι μικρές. Κατά συνέπεια, το εκλυμένο στρώμα των χρωμάτων SPC παραμένει λεπτό, επιτρέποντας στον ρυθμό απελευθέρωσης βιοκτόνου να είναι ουσιαστικά σταθερός για όλη τη διάρκεια ζωής του χρώματος (Almeida et al. 2007- Finnie & Williams 2010). Τα χρώματα SPC ποικίλλουν ως προς τον ρυθμό αυτογαλίσματος (m ανά έτος) για να καλύπτουν σκάφη με διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας και πρότυπα δραστηριότητας. Ο ρυθμός στίλβωσης και η απελευθέρωση βιοκτόνων αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού και της ταχύτητας του σκάφους.

Τα χρώματα SPC έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στη ναυτιλιακή βιομηχανία λόγω του σταθερού ρυθμού απελευθέρωσης βιοκτόνων και άλλων πλεονεκτημάτων. Σχεδόν το 70% του συνόλου της εμπορικής ναυτιλίας χρησιμοποιούσε αυτά τα χρώματα το 1999. Οι προηγούμενες εκδόσεις των χρωμάτων SPC χρησιμοποιούσαν TBT ως συμπολυμερές. Ωστόσο, το TBT έχει καλά τεκμηριωμένες βλαβερές παρενέργειες στους θαλάσσιους οργανισμούς που δεν αποτελούν στόχο και στο θαλάσσιο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένης της βιοσυσσώρευσης και της βιομεγέθυνσης και, ως εκ τούτου, απαγορεύτηκε μέσω διεθνούς σύμβασης, από τον Σεπτέμβριο του 2008 (IMO 2001). Λόγω αυτής της κανονιστικής αλλαγής, οι εταιρείες χρωμάτων έχουν επενδύσει στην έρευνα για την ανάπτυξη αντιρρυπαντικών επιστρώσεων που περιέχουν λιγότερο τοξικά βιοκτόνα. Τα χρώματα SPC νέας τεχνολογίας μπορεί να έχουν αποτελεσματική διάρκεια ζωής έως και 60 μήνες ή και περισσότερο, παρόμοια με τα χρώματα TBT-SPC (Lewis 2020), αλλά αρκετοί συγγραφείς πιστεύουν ότι τα χρώματα SPC χωρίς TBT δεν επιτυγχάνουν στην πραγματικότητα την ίδια αποτελεσματική διάρκεια ζωής. Τα



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

υβριδικά αφαιρετικά συστήματα αυτογαλίσματος συνδυάζουν τις ιδιότητες των CDP και των χρωμάτων SPC, συνδυάζοντας την υδρολύσιμη τεχνολογία SPC με την τεχνολογία CDP με βάση το κολοφώνιο. Στα υβριδικά συστήματα, η απελευθέρωση των βιοκτόνων βασίζεται στην υδρόλυση και την ενυδάτωση, πράγμα που σημαίνει ότι παρουσιάζουν τόσο χαρακτηριστικά CDP (επιφανειακή ανοχή, ελκυστικά στερεά όγκου) όσο και χαρακτηριστικά SPC (αυτογαλίσμα, ελεγχόμενη απελευθέρωση βιοκτόνων και μειωμένο πάχος του στρώματος έκπλυσης). Σε γενικές γραμμές, τα υβριδικά χρώματα παραμένουν αποτελεσματικά στην πρόληψη της βιολογικής ρύπανσης μεταξύ 3 και 5 ετών (Πίνακας 1). Οι ενώσεις ρητίνης είναι βασικά συστατικά στα υβριδικά σκευάσματα και συνδυάζονται με SPC χωρίς TBT ή άλλα πολυμερή σε μεγαλύτερες ποσότητες από ό,τι στα ακρυλικά χρώματα SPC (Finnie & Williams 2009). Στα μεταλλικά συστήματα επικάλυψης ο χαλκός ή το κράμα χαλκού-νικελίου αναμιγνύεται στο σύστημα επικάλυψης είτε ως μεταλλικό περίβλημα είτε ως μεταλλικά σωματίδια. Αυτά τα συστήματα επικάλυψης δεν είναι πρακτικά για χρήση σε σκάφη, επειδή δεν είναι δυνατή η ανανέωση της επικάλυψης. Η κύρια χρήση τους είναι για υπεράκτιες και σταθερές εγκαταστάσεις (Georgiades et al. 2018). Οι επικαλύψεις με βάση τα ένζυμα είναι εναλλακτικές λύσεις για τα αντιρρυπαντικά με βάση τα μέταλλα. Τα ένζυμα είναι φθινά και θεωρείται ότι είναι φιλικά προς το περιβάλλον επειδή βιοδιασπώνται γρήγορα. Οι ιδιότητες αναστολής της ρύπανσης αυτών των επικαλύψεων μπορούν να βασίζονται σε άμεσες ή έμμεσες επιδράσεις. Η άμεση ενζυμική αντιρρύπανση αναφέρεται σε ένζυμα που παρεμβαίνουν ενεργά στους οργανισμούς αντιρρύπανσης. Η άμεση ενζυμική αντιρρύπανση μπορεί να είναι "βιοκτόνος", όταν το υπόστρωμα του ενζύμου είναι ζωτικής σημασίας για τους οργανισμούς ρύπανσης. Ή μπορεί να είναι "προσκολλητική αποικοδόμηση", όταν το υπόστρωμα του ενζύμου επηρεάζει την ικανότητα του ρυπογόνου οργανισμού να προσκολλάται στην επιφάνεια. Η έμμεση ενζυμική ρύπανση βασίζεται στην ενζυμική παραγωγή βιοκτόνων από υποστρώματα που υπάρχουν στο θαλασσινό νερό ή στην επίστρωση (Lejars et al. 2012). Τα ένζυμα που χρησιμοποιούνται για την άμεση "βιοκτόνο" ενζυμική αντιρρύπανση εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της οδηγίας για τα βιοκτόνα προϊόντα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

πρέπει να εγκρίνονται πριν από τη χρήση τους. Μόνο ένα ενζυμικό πρόσθετο για χρώματα με βάση το νερό ή τους διαλύτες ήταν διαθέσιμο στο εμπόριο το 2012, για την αγορά σκαφών αναψυχής (Lejars et al. 2012). Πριν από την ευρύτερη χρήση αυτής της τεχνολογίας, η έρευνα πρέπει να εξαλείψει τα εμπόδια στη χρησιμότητά τους, όπως η ανεπαρκής σταθερότητα και ενεργοποίηση των ενζύμων, η αποτελεσματικότητα ευρέος φάσματος και η ποσότητα του παραγόμενου βιοκτόνου. Οι Lejars et al. (2012) σημείωσαν ότι η μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα των επικαλύψεων με βάση τα ένζυμα έναντι όλων των ρυπογόνων οργανισμών δεν έχει ακόμη αναφερθεί. Ως παράδειγμα επιφανειακής μηχανικής με τη χρήση βιοκτόνων με μη τοξικά υποπροϊόντα, μια μελέτη με τη χρήση νανοράβδων οξειδίου του ψευδαργύρου (μικροσκοπικές εξαγωνικές δομές) έδειξε ότι επιφάνειες γυαλιού με επικάλυψη νανοράβδων μείωσαν σημαντικά την πυκνότητα και τη βιωσιμότητα των βακτηρίων. Οι νανοράβδοι απέκτησαν τις αντιρρυπαντικές τους ιδιότητες μέσω του σχηματισμού αντιδραστικών ειδών οξυγόνου τα οποία κατέστρεφαν τα κυτταρικά τοιχώματα των μικροβίων. Οι επικαλύψεις αυτές ονομάζονται επίσης φωτοκαταλυτικές επικαλύψεις λόγω της ικανότητάς τους να καταλύουν την παραγωγή δραστικών ειδών οξυγόνου, όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου δεν είναι περιβαλλοντικά τοξικό μετά την πλήρη αποικοδόμησή του.

### **2.2.3 Μη βιοκτόνα και μη τοξικά αντιρρυπαντικά διαλύματα**

Οι ανησυχίες σχετικά με τις αρνητικές επιπτώσεις των βιοκτόνων στο περιβάλλον έχουν τροφοδοτήσει την έρευνα για μη βιοκτόνες λύσεις, με τις επικαλύψεις που απελευθερώνουν το ρύπο (FRC) να θεωρούνται οι πιο πρακτικές. Παρ' όλα αυτά, τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά εξακολουθούν να κυριαρχούν στην αγορά αντιρρυπαντικών για τα εμπορικά σκάφη και τα σκάφη αναψυχής και θα κυριαρχούν στο άμεσο μέλλον, όπως δείχνουν τα στοιχεία της αγοράς, με βελτιωμένα προϊόντα. Το 2014, το μερίδιο αγοράς των FRCs ήταν μόνο περίπου 10%, αλλά όλοι οι μεγάλοι προμηθευτές προϊόντων αντιρρυπαντικής επικάλυψης περιλαμβάνουν πλέον ελαστομερή FRCs στη γκάμα των προϊόντων τους. Τα FRC εξελίσσονται ταχύτερα από το καθιερωμένο επιχειρηματικό



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

μοντέλο βιοκτόνων αντιρρύπανσης (Rittschof 2009) και οι Lindholdt κ.ά. (2015) ανέμεναν ότι τα FRC θα κερδίζουν συνεχώς μερίδια στην αγορά βιομηχανικών θαλάσσιων επιστρώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες δυνατότητές τους για τη μείωση της αντίστασης και τον έλεγχο της βιολογικής ρύπανσης. Το 2021, τα SPC εξακολουθούν να κατέχουν μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς θαλάσσιων επιστρώσεων σε σύγκριση με τα FRC, αλλά το ενδεχόμενο αυξημένης ρύθμισης των βιοκτόνων κατά της ρύπανσης μπορεί να δώσει κίνητρα για την αλλαγή αυτής της σχέσης. Οι επικαλύψεις με αντιρρυπαντικά είναι μη βιοκτόνες και έχουν επιφανειακές ιδιότητες που ελαχιστοποιούν την προσκόλληση των βιολογικών οργανισμών και διευκολύνουν την απομάκρυνσή τους με τη ροή του νερού (Finnie & Williams 2009). Η επιφάνεια των FRC είναι λεία και έχει χαμηλό συντελεστή τριβής λόγω της χαμηλής επιφανειακής ενέργειας. Η επιφανειακή ενέργεια είναι ένα χαρακτηριστικό του υποστρώματος που επηρεάζει τη διαδικασία αποικισμού, σύμφωνα με το οποίο η χαμηλότερη επιφανειακή ενέργεια μειώνει τη δύναμη προσκόλλησης των οργανισμών ρύπανσης (Callow & Fletcher 1994). Η χαμηλή επιφανειακή ενέργεια διευκολύνει τη ροή του νερού κατά μήκος της επιφάνειας και την απομάκρυνση των ασθενώς προσκολλημένων ρυπογόνων οργανισμών (Anisimov et al. 2019). Τα φθοροπολυμερή και τα ελαστομερή σιλικόνης είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ενώσεις στα FRC για την επίτευξη αυτών των επιθυμητών επιφανειακών ιδιοτήτων, αλλά διαφέρουν ως προς τον μηχανισμό απελευθέρωσης ρύπων. Οι επικαλύψεις με βάση τη σιλικόνη θεωρούνται πιο αποτελεσματικές στην πρόληψη της βιολογικής ρύπανσης επειδή μπορούν να εφαρμοστούν σε παχύτερα στρώματα, επιτρέποντας μια πιο αποτελεσματική δράση αποκόλλησης της σιλικόνης από τη θαλάσσια κόλλα (Lewis 2009). Η αποτελεσματικότητα των FRC με βάση τη σιλικόνη μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με την προσθήκη σιλικόνης ή φθοριούχων ελαίων (Lewis 2009). Η τεχνολογία FRC είναι ακριβή λόγω του υψηλότερου αρχικού κόστους βαφής και εφαρμογής (Lejars et al. 2012) και δεν είναι κατάλληλη για όλους τους τύπους σκαφών. Οι οργανισμοί βιολογικής ρύπανσης είναι ικανοί να προσκολλώνται στις επιστρώσεις, αλλά οι περισσότεροι τύποι ρύπανσης απομακρύνονται σε ταχύτητες ταξιδιού μεγαλύτερες από



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

15 κόμβους. Τα αγκάθια μπορούν να αποκολληθούν σε ταχύτητες γύρω στους 10 κόμβους, αλλά το βιοφίλμ μπορεί να παραμείνει άθικτο ακόμη και σε ταχύτητες άνω των 30 κόμβων. Συνεπώς, η εφαρμογή των FRCs περιορίζεται σε πλοία υψηλής ταχύτητας (>15 κόμβων)/υψηλής δραστηριότητας, όπως τα γρήγορα πορθμεία, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα πλοία μεταφοράς αερίου, τα πλοία μεταφοράς οχημάτων, τα δεξαμενόπλοια, τα ψυγεία (πλοία ψυχόμενου φορτίου), τα κρουαζιερόπλοια και τα μεγάλα πλοία roll-on, roll-off (RoRo). Ωστόσο, οι παραγωγοί ορισμένων εμπορικά διαθέσιμων FRC ισχυρίζονται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλους τους τύπους πλοίων (PPG Industries 2020) με ταχύτητες >10 κόμβων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της επικάλυψης (Lejars et al. 2012). Η αποτελεσματικότητα των FRC μπορεί να διαρκέσει 5-10 χρόνια, εάν συντηρούνται σωστά (Anisimov et al. 2019), ή και περισσότερο. Ωστόσο, μια ανασκόπηση αναφέρει διάρκεια ζωής μόνο 2 - 5 ετών για τα συστήματα FRC.

Τα σημερινά FRC με βάση τη σιλικόνη είναι ευαίσθητα σε ζημιές από ξύσιμο ή χάραξη που προκαλούνται από τις αλυσίδες αγκύρωσης ή όταν αγκυροβολούν παράλληλα. Καθώς αυτές οι επικαλύψεις βασίζονται στις ειδικές ιδιότητες της επιφάνειάς τους για την ελαχιστοποίηση της προσκόλλησης των ρυπαντικών οργανισμών, οποιαδήποτε βλάβη θα είχε σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητά τους (Lejars et al. 2012). Επίσης, εάν τα σκάφη παραμένουν ανενεργά για παρατεταμένο χρονικό διάστημα ή δεν διατηρούν ταχύτητες λειτουργίας για την απομάκρυνση των ρυπογόνων οργανισμών τα FRC είναι πιθανό να είναι λιγότερο αποτελεσματικά και να απαιτείται καθαρισμός του κύτους. Ωστόσο, ο αντιδραστικός καθαρισμός μέσα στο νερό ή ο προληπτικός καλλωπισμός δεν απελευθερώνουν βιοκτόνα στο περιβάλλον. Όταν συγκρίθηκαν με βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα σε πείραμα πεδίου, οι επιφάνειες με επικάλυψη που απελευθερώνουν ρύπους συσώρευσαν περισσότερους οργανισμούς βιορύπανσης μετά από περίοδο στάσης 28 ημερών, αλλά η διαφορά αυτή εξισορροπήθηκε μετά από 45 ημέρες. Παρά τη φήμη τους ως φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στις



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

βιοκτόνες αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, τα FRC ενδέχεται να μην είναι τόσο ακίνδυνα όσο πιστεύεται ευρέως. Ο Rittschof (2009) υποστηρίζει ότι τα περισσότερα FRC περιέχουν τοξικά πρόσθετα και απελευθερώνουν ενώσεις όπως οι σιλικόνες στο περιβάλλον με άγνωστες συνέπειες για το περιβάλλον. Επιβεβαιώνοντας αυτή την εκτίμηση, ο Nendza (2007) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα αδρανή σιλικονούχα έλαια, που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στα FRC, έχουν τη δυνατότητα να παγιδεύουν φυσικομηχανικά και να πνίγουν τους θαλάσσιους οργανισμούς. Η καινοτόμος έρευνα πειραματίζεται με τη βελτίωση της πρόσφυσης και της ανθεκτικότητας του υλικού επικάλυψης με βάση τη σιλικόνη, διατηρώντας παράλληλα τις ιδιότητες απελευθέρωσης ρύπων του συστατικού σιλικόνης, αναπτύσσοντας έτσι υβριδικά FRC με βάση τη σιλικόνη. Για παράδειγμα, οι ερευνητές ενσωμάτωσαν ναοπληρώματα ή τροποποίησαν τη μήτρα σιλικόνης με συστατικά όπως πολυουρεθάνη, εποξειδικές ρητίνες, sol-gels, υδρογέλες, φθοριούχα τμήματα ή εισήγαγαν βιοκτόνα (Lejars et al. 2012). Τα υβριδικά βιοκτόνα/FRC συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των βιοκτόνων επικαλύψεων με τα χαρακτηριστικά των FRC (βλ. Lejars et al. 2012). Αυτά τα βιοκτόνα FRC είναι ανθεκτικά στην ρύπανση κατά τη διάρκεια περιόδων αδράνειας (έως και 120 ημέρες) και προστατεύουν τα σκάφη που λειτουργούν με μεγάλα διαστήματα λειτουργίας (έως και 90 μήνες), γεγονός που αποτελούσε τον κύριο περιορισμό των FRC πρώτης γενιάς. Μια άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση ζιτεριονικών πολυμερών. Οι νέες επικαλύψεις που ενσωματώνουν αυτά τα πολυμερή εμφάνισαν ιδιότητες μη ρύπανσης και είχαν χαμηλή πρόσφυση ρύπανσης παρόμοια ή καλύτερη από τις εμπορικές επικαλύψεις ελέγχου και τα πρότυπα. Όπως και άλλα ναυτιλιακά χρώματα, η χρήση επικαλύψεων με βάση τη σιλικόνη στη ναυτιλιακή βιομηχανία δίνει μια εικόνα ποικίλης επιτυχίας ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης του χρησιμοποιούμενου προϊόντος τη δεδομένη χρονική στιγμή. Το 2003, ο διεθνής διαχειριστής πλοίων Maersk ξεκίνησε την εφαρμογή βαφής σιλικόνης χωρίς βιοκτόνα σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δεξαμενόπλοια και εφοδιαστικά πλοία. Ωστόσο, μόλις τέσσερα χρόνια αργότερα η ναυτιλιακή εταιρεία σταμάτησε την εφαρμογή βαφής με βάση τη σιλικόνη λόγω της ανάπτυξης στρώματος γλίτσας και της ταχείας μείωσης της απόδοσης των πλοίων με τη



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

συγκεκριμένη βαφή. Η Maersk κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων μέσω των FRC είχε μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τη χρήση βιοκτόνων επιχρισμάτων. Αντίθετα, η εφαρμογή της τεχνολογίας απελευθέρωσης ρύπων σιλικόνης υδρογέλης τρίτης γενιάς σε ένα μεγάλο μεταφορικό πλοίο έδειξε ότι οι επιστρώσεις υδρογέλης σιλικόνης προστάτευαν αποτελεσματικά τα κύτη του πλοίου από τη γλίτσα και τα φύκια για έως και 25 μήνες με εκτιμώμενη δραστηριότητα 60% του χρόνου και μέση ταχύτητα πλεύσης 13 κόμβων. Αυτό έδειξε ότι η τεχνολογία αυτή είναι αποτελεσματική σε χαμηλή ταχύτητα σκάφους και χαμηλή δραστηριότητα. Μια μελέτη σε μια σειρά διαφορετικών τύπων σκαφών που περιλάμβανε ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών προφίλ έδειξε ότι στις επιφάνειες του κύτους, οι επικαλύψεις SPC και οι FRC προσέφεραν μεγαλύτερη και πιο αξιόπιστη προστασία από τη βιολογική ρύπανση από ό,τι οι επικαλύψεις CDP (Lewis 2016). Η εφαρμογή FRCs σε σχάρες εισαγωγής και πτερύγια προπέλας μπορεί να ελαχιστοποιήσει την προσκόλληση, την επιβίωση και την ανάπτυξη βιολογικών ρύπων (Lewis 2016). Ωστόσο, τα συμπεράσματα αυτά περιορίζονται σε γενικεύσεις, λόγω της έλλειψης δεδομένων που δεν επέτρεπε τη στατιστική ανάλυση.

Οι Molino et al. (2009) συνέκριναν την απόδοση τριών διαφορετικών τύπων επίστρωσης χρησιμοποιώντας πειραματικά πάνελ βυθισμένα σε θαλασσινό νερό. Χρησιμοποίησαν δύο αντιρρυπαντικές επικαλύψεις SPC, η μία που περιείχε TBT και η άλλη χωρίς TBT, και ένα FRC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το FRC υπέστη τον ταχύτερο αποικισμό από βακτήρια, τα οποία έφτασαν σε κάλυψη επιφάνειας 40-50% μέσα σε 2-4 ημέρες σε σύγκριση με 3-8 ημέρες για τις βιοκτόνες αντιρρυπαντικές επιστρώσεις. Μετά από 16 ημέρες και οι τρεις επικαλύψεις είχαν υποστεί σημαντική ρύπανση. Μια άλλη στρατηγική για την ανάπτυξη μη τοξικών αντιρρυπαντικών λύσεων είναι η διαμόρφωση μιας τοπογραφίας της επιφάνειας που καθιστά δυσκολότερη την προσκόλληση των ρυπογόνων οργανισμών ή αποδυναμώνει τη δύναμη προσκόλλησής τους. Μια πρόσφατη ανασκόπηση διαπίστωσε ότι τα πολύπλοκα και ιεραρχικά σχέδια επιφανειών ήταν πιο αποτελεσματικά κατά της βιολογικής ρύπανσης από ό,τι τα κανονικά



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτής της στρατηγικής κατά της ρύπανσης είναι ασαφής, καθώς οι περισσότερες μελέτες διερεύνησαν τους μηχανισμούς και τις επιδόσεις των κατασκευασμένων επιφανειών στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας ένα περιορισμένο φάσμα ειδών δοκιμής. Οι Ware et al. (2018), για παράδειγμα, σχεδίασαν μια ναοδομημένη ρυτιδωτή επιφάνεια που μιμείται τον μηχανισμό λίπανσης του φυτού pitcher. Η ναοδομημένη τσαλακωμένη επιφάνεια, εμποτισμένη με έλαιο σιλικόνης, ανέστειλε τη βακτηριακή ρύπανση και μείωσε την προσκόλληση φυκιών σε μια μελέτη πεδίου, δείχνοντας δυνατότητες μετάφρασης σε εμπορική εφαρμογή. Η βιομημητική αναφέρεται σε μελέτες που αντιγράφουν πτυχές της βιολογίας για την ανάπτυξη παρόμοιων προϊόντων για συγκεκριμένο σκοπό. Η βιομημητική έρευνα για την πρόληψη της ρύπανσης περιλαμβάνει τη διερεύνηση και την ανάπτυξη φυσικών προϊόντων, φαρμακευτικών ουσιών (φαρμακευτικά φάρμακα) και επιφανειακών δομών (Rittschof 2009, Ware et al. 2018). Το πηγαίο υλικό για αυτού του είδους την έρευνα δεν περιορίζεται στο θαλάσσιο περιβάλλον, για παράδειγμα, χερσαίες φυτικές επιφάνειες ή σπόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μοντέλα για μη τοξικά αντιρρυπαντικά διαλύματα (Ware et al. 2018). Οι Clasen & Kesel (2019) διερεύνησαν γιατί ορισμένοι σπόροι τροπικών και υποτροπικών χερσαίων φυτών μπορούν να παραμείνουν απαλλαγμένοι από ρύπανση όταν παρασύρονται σε θαλάσσια ύδατα. Διαπιστώθηκε ότι το σχήμα και το μέγεθος των παρασυρόμενων σπόρων φυτών είναι σημαντικοί παράγοντες για την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης, αλλά οι επιφανειακές μικροδομές πιθανότατα είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση, για παράδειγμα οι κανονικές κυψελωτές επιφάνειες. Η μελέτη αυτή απέκλεισε την επίδραση των χημικών ουσιών. Οι επιστήμονες διερευνούν ενεργά τη χρήση φυσικών προϊόντων για την προστασία από τη ρύπανση εδώ και δεκαετίες (Lewis 2009, Rittschof 2009), μελετώντας οργανισμούς που δεν παρουσιάζουν ρύπανση στις επιφάνειές τους λόγω εγγενών φυσικών χημικών αμυντικών μηχανισμών. Τα φυτά και τα ζώα παράγουν και εκκρίνουν δευτερογενείς μεταβολίτες, ενώσεις που δεν είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη και την εξέλιξη, ως άμυνα έναντι των θηρευτών αλλά και για την αποτροπή της εγκατάστασης (Kutchan et al. 2015). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

αντιμικροβιακής άμυνας των φυσικών προϊόντων μπορεί να ποικίλλει εποχιακά. Περίπου 700 θαλάσσια φυσικά προϊόντα ή δευτερογενείς μεταβολίτες έχουν αναφερθεί ότι παρουσιάζουν αντιρρυπαντικές ιδιότητες. Ωστόσο, μόνο λίγες από αυτές μπορούν να θεωρηθούν δυνητικοί υποψήφιοι για εμπορικά προϊόντα, λόγω θεμελιωδών ατελειών και προβλημάτων με την ανάπτυξη φυσικών προϊόντων ως αντιρρυπαντικών, συμπεριλαμβανομένων (i) των ανασταλτικών επιδράσεων των φυσικών προϊόντων που επηρεάζουν μόνο ένα στενό φάσμα ειδών, (ii) των περιορισμένων τοξικολογικών και οικοτοξικολογικών πληροφοριών για τις ενώσεις, (iii) των αντιρρυπαντικών ιδιοτήτων των περισσότερων ενώσεων που δοκιμάστηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές αλλά δεν επαληθεύτηκαν στο πεδίο, και (iv) της ανάγκης σύνθεσης ενώσεων σε μεγάλη κλίμακα και της συμβατότητας με τα συστατικά των βασικών χρωμάτων. Τα ζητήματα αυτά αφορούν επίσης τα προϊόντα που παρασκευάζονται από τον άνθρωπο. Ομοίως, μεγάλος αριθμός φαρμακευτικών ουσιών είναι διαθέσιμος αλλά πρέπει να αξιολογηθεί η δυνατότητά τους να δράσουν ως αντιρρυπαντικοί παράγοντες στο πλαίσιο της υπάρχουσας τεχνολογίας επιστρώσεων. Τα φαρμακευτικά προϊόντα έχουν γνωστές χημικές ιδιότητες, βιολογική δραστικότητα και διαδικασίες σύνθεσης, γεγονός που διευκολύνει την κρατική καταχώριση και την εμπορία σε σύγκριση με τα φυσικά προϊόντα (Rittschof 2009). Καθώς τα φαρμακευτικά προϊόντα είναι σταθερά εκ κατασκευής, μπορεί να συσσωρευτούν στο περιβάλλον, γεγονός που απαιτεί έρευνα για την απομάκρυνση ή την αποικοδόμησή τους (Lewis 2009). Οι επιστήμονες μελετούν τη λειτουργικότητα των φυσικών επιφανειών της χλωρίδας και της πανίδας για να εμπνευστούν στην προσπάθειά τους να αναπτύξουν επιφάνειες ανθεκτικές στη βιολογική ρύπανση χωρίς τη χρήση τοξικών ουσιών. Έχουν μελετηθεί διάφορα φυσικά μοντέλα, όπως δέρματα φαλαινών και καρχαριών, εχινόδερμα, καρκινοειδή, κόκκινα μακροφύκη, έντομα, φτέρες και δίθυρα μαλάκια. Οι χημικοί μηχανικοί, για παράδειγμα, διερευνούν πώς να αποτρέψουν τη βιολογική ρύπανση σε υποβρύχιες επιφάνειες στο νερό, παρατηρώντας πώς οι επιφανειακές ιδιότητες επηρεάζουν τη διαβρεξιμότητα των υλικών στη φύση. Το φύλλο του λωτού είναι ένα παράδειγμα δημοφιλούς αντικειμένου μελέτης λόγω του αξιοσημείωτου μηχανισμού αυτοκαθαρισμού του. Για να σχεδιάσουν



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

επιφάνειες που είναι ανθεκτικές στη βιολογική ρύπανση, οι μηχανικοί διερευνούν επιλογές που προσαρμόζουν τις χημικές και φυσικές ιδιότητές τους. Μια επιλογή αφορά το σχεδιασμό μιας επιφάνειας που προτιμά την επαφή με το νερό από εκείνη με τη βιολογική ύλη, απωθώντας έτσι τους ρυπογόνους οργανισμούς με κατοπτρική απεικόνιση του φαινομένου του λωτού. Τέτοιες επιφάνειες θα είναι υπερυδροφίλες. Η άλλη επιλογή περιλαμβάνει την ανάπτυξη επιφανειών που είναι υπερυδροφοβές (υδατοαπωθητικές) κάτω από το νερό, κάνοντάς τις τραχιές ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν ένα φιλμ αέρα μεταξύ αυτών και του περιβάλλοντος νερού. Τα εμπορικά ένζυμα μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα των ρυπογόνων οργανισμών, όπως τα βακτήρια, να προσκολλώνται σε υποβρύχιες επιφάνειες, στοχεύοντας στις ενώσεις που παράγονται από τους ρυπογόνους οργανισμούς για την αγκύρωση των κυττάρων στην επιφάνεια. Ορισμένα ένζυμα θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε ή πάνω σε μια αντιρρυπαντική επίστρωση για να αναστείλουν την προσκόλληση. Ωστόσο, η επιτυχής ενσωμάτωση ενζύμων σε θαλάσσια αντιρρυπαντικά επιχρίσματα και η επίτευξη αντιρρυπαντικής προστασίας ευρέος φάσματος με μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα παραμένει πρόκληση, λόγω ζητημάτων με τη σταθερότητα και τη δραστηριότητα των ενζύμων (Aykin et al. 2019). Η βιολογική ρύπανση αποτελεί πρόβλημα σε ιατρικούς χώρους, επειδή μπορεί να βλάψει τη λειτουργία των ιατρικών συσκευών. Το ζήτημα αυτό έχει προκαλέσει την ιατρική έρευνα για τη χρήση πεπτιδίων ως συστατικών αντιρρυπαντικών επικαλύψεων που μπορούν να αποτρέψουν τη βιορύπανση χωρίς να απελευθερώνουν επιβλαβείς χημικές ουσίες. Τα πεπτίδια είναι μη τοξικά, επειδή διασπώνται σε καλοήγη αμινοξέα όταν βρίσκονται στο περιβάλλον. Η μέθοδος αυτή μπορεί να βρει εφαρμογή και σε άλλα περιβάλλοντα, όπως η θαλάσσια βιολογική ρύπανση. Το Ινστιτούτο Cawthron στη Νέα Ζηλανδία, για παράδειγμα, συνθέτει και αξιολογεί επί του παρόντος πιθανά υποψήφια πεπτίδια για χρήση σε σκευάσματα κατά της ρύπανσης. Η βιοτεχνολογία μπορεί επίσης να προσφέρει λύσεις, όπως η πρόληψη της προσκόλλησης συγκεκριμένων οργανισμών ρύπανσης. Το Selektore®, για παράδειγμα, είναι ένα οργανικό μόριο που αναπτύχθηκε για χρήση σε συστήματα θαλάσσιων χρωμάτων για τη βιοαπομάκρυνση των αχιβάδων. Όταν οι



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

προνύμφες των αχιβάδων έρχονται σε επαφή με αυτό το μόριο, γίνονται υπερδραστήριες (μπαίνουν σε "κατάσταση κολύμβησης") και δεν μπορούν να προσκόλληθούν στην επιφάνεια που έχει βαφτεί με Selektore®. Το αποτέλεσμα είναι αναστρέψιμο και οι προνύμφες μπορούν να επανέλθουν στην κανονική τους κατάσταση (itech 2021). Άλλες μη τοξικές εναλλακτικές λύσεις για τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα περιλαμβάνουν "έξυπνα" πολυμερή, επιχρίσματα ινών, επιχρίσματα με δυνατότητα πλύσης και αδρανή επιχρίσματα (π.χ. που χρησιμοποιούνται στη Βαλτική, BMEPC 2020), ηλεκτρομαγνητικά και ηχητικά αποτρεπτικά μέσα και βιοκτόνα επιχρίσματα που δεν εμπλέκονται. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να αναστείλουν την προσκόλληση ή/και την ανάπτυξη των βιολογικών οργανισμών ρύπανσης, αλλά δεν έχουν αποδειχθεί όλες πρακτικές λύσεις για ευρεία εφαρμογή, διότι είτε (i) δεν έχουν αναπτυχθεί σε λειτουργικό σύστημα επικάλυψης, (ii) είναι δαπανηρές στην εφαρμογή, (iii) δεν είναι ανθεκτικές, (iv) δεν μπορούν να προσφέρουν μακροπρόθεσμη προστασία από ένα ευρύ φάσμα οργανισμών ρύπανσης, ή (v) δεν μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε διαφορετικές συνθήκες ναυπηγείου (Lewis 2009). Οι εξαιρετικά σκληρές, αδρανείς επιστρώσεις, όπως η Ecospeed, για παράδειγμα, έχουν εξελιχθεί σε ένα λειτουργικό σύστημα επίστρωσης και χρησιμοποιούνται από πλοία που ταξιδεύουν με πάγο, κρουαζιερόπλοια και γιοτ. Ωστόσο, αυτές οι επιστρώσεις πρέπει να καθαρίζονται τακτικά με ειδικά αναπτυγμένο εξοπλισμό και εργαλεία για να διατηρείται η ρύπανση σε επίπεδο μικρορύπανσης (Subsea Industries 2021). Ο Scardino (2009) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι θα απαιτηθούν πολλαπλές στρατηγικές, συμπεριλαμβανομένης της νανοτεχνολογίας, των φυσικών προϊόντων και της επιφανειακής χημείας, για να επιτευχθεί αντοχή σε ρύπανση ευρέος φάσματος.

#### **2.2.4 Παρουσία και απουσία αντιρρυπαντικών επιστρώσεων**

Η χρήση κατάλληλων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων στα κύτη των σκαφών αποτελεί σήμερα την καλύτερη άμυνα κατά της συσσώρευσης και της μετατόπισης εξωτικών θαλάσσιων ειδών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σκάφους. Για να είναι αποτελεσματική, η επιλογή της αντιρρυπαντικής επίστρωσης πρέπει να ταιριάζει με το



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

λειτουργικό προφίλ του σκάφους. Οι φορείς εκμετάλλευσης πλοίων πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις διαφορετικές ανάγκες των περιοχών των πλοίων (κύρια γάστρα και εξειδικευμένες περιοχές) και να επιλέγουν ενδεχομένως πολλαπλά συστήματα αντιρρυπαντικής επικάλυψης για να επιτύχουν τη συνολική ελαχιστοποίηση της βιολογικής ρύπανσης (Georgiades et al. 2018). Κάθε σκάφος που δεν διαθέτει αντιρρυπαντική επίστρωση ή επίστρωση απελευθέρωσης ρύπων θα συσσωρεύει μεγαλύτερα επίπεδα βιορύπανσης και θα αποτελεί μεγαλύτερη πιθανότητα μετατόπισης εξωτικών θαλάσσιων ειδών σε σχέση με τα σκάφη που εφαρμόζουν αποτελεσματικά συστήματα αντιρρύπανσης. Η έκταση της θαλάσσιας βιολογικής ρύπανσης εξαρτάται από διάφορους αβιοτικούς και βιοτικούς παράγοντες, όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία, τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών, οι ρυθμοί ροής και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η πίεση ρύπανσης ποικίλλει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και ο κίνδυνος ρύπανσης σε εύκρατες, ψυχρές και πολικές περιοχές είναι γενικά χαμηλότερος σε σύγκριση με τις έντονες πιέσεις ρύπανσης που αναφέρονται σε υποτροπικές και τροπικές περιοχές. Οι επιστρώσεις που εφαρμόζονται σε σκάφη που λειτουργούν σε περιοχές με πάγο και θερμοκρασίες υπό το μηδέν προσαρμόζονται σε αυτές τις συνθήκες. Σε ορισμένα πλοία που δραστηριοποιούνται μόνο σε ψυχρά ύδατα (π.χ. Βαλτική Θάλασσα) μπορεί να μην εφαρμόζονται αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, καθώς ορισμένοι φορείς εκμετάλλευσης πλοίων θεωρούν ότι οι οργανισμοί ρύπανσης δεν προκαλούν προβλήματα σε αυτά τα περιβάλλοντα. Επί του παρόντος, αυτό μπορεί να ισχύει, καθώς μόνο πολύ χαμηλοί αριθμοί εξωτικών θαλάσσιων ειδών έχουν καταγραφεί γύρω από την Ανταρκτική και τα νησιά εκεί κοντά, χωρίς να υπάρχουν όμως εγκατεστημένοι πληθυσμοί. Ωστόσο, η συνεχιζόμενη κλιματική αλλαγή θα μεταβάλει τις συνθήκες για τα εξωτικά θαλάσσια είδη και θα αυξήσει, σε συνδυασμό με την προβλεπόμενη αύξηση της ανθρώπινης δραστηριότητας στις περιοχές αυτές, τον κίνδυνο εγκατάστασης εξωτικών θαλάσσιων ειδών. Υπάρχουν ορισμένες περιοχές σε κάθε τύπο σκάφους που συχνά δεν καλύπτονται από καμία αντιρρυπαντική επίστρωση ή στο μέτρο του δυνατού, όπως οι άνοδοι καθοδικής προστασίας, οι έλικες και οι άξονες των ελίκων (τα περιβλήματα των αξόνων των ελίκων είναι επικαλυμμένα), τα



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

αποθέματα των πηδαλίων και οι λωρίδες στήριξης των μπλοκ πρόσδεσης. Αυτό καθιστά αυτές τις εξειδικευμένες περιοχές, καθώς και τις περιοχές με ανεπαρκώς εφαρμοζόμενη ή σε κακή κατάσταση αντιρρυπαντική επίστρωση, εστίες βιορύπανσης και περιοχές που προκαλούν ανησυχία για τη βιοασφάλεια (Davidson et al. 2016). Ωστόσο, τα πτερύγια της προπέλας που δεν καλύπτονται από αντιρρυπαντική επίστρωση αποτελούν λιγότερο ανησυχητικό παράγοντα βιοασφάλειας σε ενεργά σκάφη, επειδή η κίνηση των πτερυγίων μέσα στο νερό εμποδίζει την προσκόλληση των περισσότερων μακρορρυπαντικών οργανισμών. Παρόλα αυτά, ορισμένοι ευαίσθητοι στην υδροδυναμική ταξινομητικοί οργανισμοί με υψηλό ποσοστό κάλυψης μπορεί να είναι σε θέση να επιμείνουν.

### **3. Χαρακτηριστικά του σκάφους και προφίλ λειτουργίας**

Εκτός από την τεχνολογία για την αποτροπή της προσκόλλησης οργανισμών ρύπανσης στα σκάφη, ο σχεδιασμός του σκάφους, η ταχύτητα του σκάφους, οι περίοδοι ακινησίας και οι διαδρομές διέλευσης επηρεάζουν επίσης το επίπεδο και το είδος της βιολογικής ρύπανσης που υπάρχει.

#### **3.1 Σχεδιασμός σκάφους**

##### **3.1.1 Εξειδικευμένες περιοχές**

Τα θαλάσσια σκάφη κατασκευάζονται για να εξυπηρετούν έναν συγκεκριμένο σκοπό, είτε πρόκειται για τη μεταφορά φορτίου από το ένα λιμάνι στο άλλο, είτε για τη μεταφορά ανθρώπων για ψυχαγωγικούς σκοπούς. Όλα τα πλοία έχουν περιοχές που είναι συνεχώς βυθισμένες στο θαλασσινό νερό όταν βρίσκονται σε ενεργό υπηρεσία, ανεξάρτητα από τον ειδικό σχεδιασμό τους. Η μεγαλύτερη επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό είναι το κύτος του πλοίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από κατακόρυφες, καμπύλες και επιφάνειες με επίπεδο πυθμένα. Διάφορες πρόσθετες και πιο ετερογενείς επιφάνειες εξειδικευμένων περιοχών προεξέχουν (π.χ. πηδάλια και



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

έλικες) ή είναι εσοχή από το κύτος. Οι εσοχές μπορεί να είναι δύσκολο να προσεγγιστούν και να καθαριστούν και συχνά δεν καλύπτονται από αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, αλλά ακόμη και όταν καλύπτονται, η προστασία από τις επιστρώσεις αυτές μπορεί να υποβαθμιστεί γρήγορα (Inglis κ.ά. 2010). Ή, αν εφαρμόστηκαν επιστρώσεις, μπορεί να μην είναι αποτελεσματικές επειδή η ίδια επίστρωση που εφαρμόστηκε στο κύτος εφαρμόστηκε και στις περιοχές των εσοχών.

Η παρουσία, το μέγεθος, η πολυπλοκότητα και ο αριθμός των εξειδικευμένων περιοχών ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του σκάφους (Lacoursière-Roussel 2013). Για παράδειγμα, μια μελέτη για την ποσοτικοποίηση της έκτασης των εξειδικευμένων περιοχών στα εμπορικά πλοία έδειξε ότι τα επιβατηγά πλοία είχαν το υψηλότερο ποσοστό (27%) εξειδικευμένων περιοχών σε σχέση με τη συνολική επιφάνεια που βρέχεται, ακολουθούμενα από τα ρυμουλκά (25%), τα αλιευτικά σκάφη (21%) και τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και τα δεξαμενόπλοια (7-8%). Οι σήραγγες προώθησης συνέβαλαν σε ποσοστό >50% της συνολικής επιφάνειας κόγχης στα επιβατηγά πλοία και στα ρυμουλκά (Moser et al. 2017). Το μέγεθος των περιοχών κόγχης σχετίζεται με το συνολικό μέγεθος ενός σκάφους. Αυτή η σχέση έχει σημασία όσον αφορά τον κίνδυνο βιοασφάλειας, επειδή τα μεγαλύτερα σκάφη έχουν μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια διαβροχής και, επομένως, μεγαλύτερη επιφάνεια διαθέσιμη για την προσκόλληση των ρυπογόνων οργανισμών, στο κύτος και στις περιοχές κόγχης. Για παράδειγμα, το μέγεθος των περιοχών κόγχης των bulkers είναι περίπου 3,5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο των αλιευτικών σκαφών και παρέχει περίπου 5 km<sup>2</sup> μεγαλύτερη επιφάνεια για προσκόλληση και αποικισμό από βρώμικούς οργανισμούς (Moser et al. 2017).

Οι εξειδικευμένες περιοχές στο κύτος ενός σκάφους περιλαμβάνουν (Σχήμα 3.1):

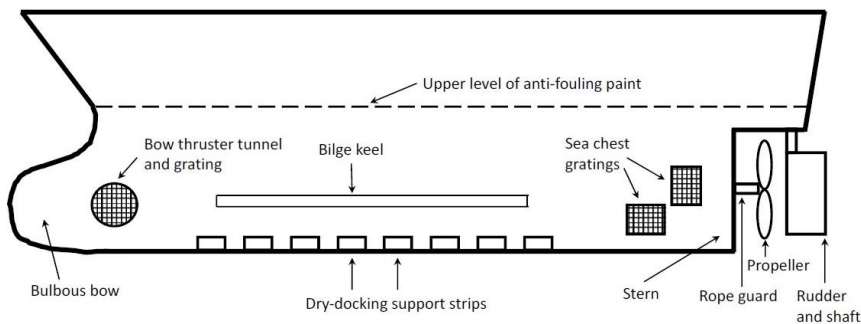
- πλήρη
- σήραγγες προωθητήρων
- υδροσυλλέκτες



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

- θαλάσσια σεντούκια, συμπεριλαμβανομένων των σχαρών και των εσωτερικών συστημάτων θαλασσινού νερού
- λωρίδες στήριξης ξηρού ελλιμενισμού
- έλικα
- πηδάλιο και
- προστατευτικό σχοινί (Inglis et al. 2010).



Σχήμα 3.1. Κύτος σκάφους και εξειδικευμένες περιοχές (Coutts & Taylor, 2004).

Ορισμένα σκάφη έχουν βολβοειδή πλώρη, μια προέκταση του κύτους κάτω από την ίσαλο γραμμή. Ο κύριος σκοπός της είναι να δημιουργήσει μια ζώνη χαμηλής πίεσης για να μειώσει ή να εξαλείψει το κύμα της πλώρης που δημιουργεί αντίσταση. Η εγκατάσταση προωθητήρων πλώρης, εγκάρσιων προωθητικών μονάδων σήραγγας στην πλώρη, παρέχει αποτελεσματική ικανότητα ελιγμών για μεγάλα σκάφη, ιδίως σε περιορισμένα ύδατα. Οι εγκάρσιοι προωθητήρες μπορούν επίσης να εγκατασταθούν στην πρύμνη ενός σκάφους. Σε γενικές γραμμές, οι εγκάρσιες μονάδες πρόωσης είναι πιο αποτελεσματικές όταν το σκάφος είναι ακίνητο, αλλά χάνουν την αποτελεσματικότητά τους με την ταχύτητα (Carlton 2012).



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Οι πλωτήρες υδροσυλλεκτών είναι μακριές στενές πλωτήρες που τοποθετούνται στη στροφή του υδροσυλλέκτη για να παρέχουν υδροδυναμική σταθερότητα και να προστατεύουν το σκάφος από την κύλιση. Είναι η απλούστερη μορφή σταθεροποιητή. Οι πυθμένες παρέχουν απόσβεση της κύλισης της γάστρας, ιδίως σε χαμηλές ταχύτητες, αλλά αυξάνουν επίσης την αντίσταση της γάστρας σε ήρεμα νερά.

Τα θαλάσσια σεντούκια είναι κοιλότητες στο κύτος ενός σκάφους που στεγάζουν τα ανοίγματα του εσωτερικού συστήματος θαλασσινού νερού (Σχήμα 7). Είναι εφοδιασμένα με σχάρες που εμποδίζουν την είσοδο μεγάλων θραυσμάτων στα θαλάσσια σεντούκια κατά την άντληση έρματος. Τα θαλάσσια στήθη συμβάλλουν στην αύξηση της αποτελεσματικότητας της άντλησης θαλασσινού νερού στους εσωτερικούς σωλήνες παρέχοντας μια ακίνητη δεξαμενή νερού για έρμα, ψύξη μηχανών και καταστολή πυρκαγιάς (Growcott et al. 2016).

Οι λωρίδες στήριξης κατά την αποξήρανση (DDSS) είναι περιοχές κατά μήκος του πυθμένα του κύτους όπου τοποθετούνται μπλοκ για να παρέχουν στήριξη όταν το σκάφος είναι ακίνητο σε αποξηραντήριο. Καθώς οι περιοχές του κύτους που καλύπτονται από τις λωρίδες στήριξης κατά τη διάρκεια της αποξήρανσης δεν είναι προσβάσιμες, οι περιοχές αυτές μπορούν να παραμείνουν ελεύθερες από τυχόν αντιρρυπαντικές επιστρώσεις.

Οι έλικες είναι συσκευές πρόωσης πλοίων που κυκλοφορούν σε πολλές μορφές. Ο πιο συνηθισμένος τύπος στα εμπορικά πλοία είναι οι έλικες σταθερού βήματος, που ονομάζονται επίσης βιδωτές έλικες (Moser et al. 2017). Οι έλικες σταθερού βήματος χρησιμοποιούνται σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, εμπορικά και ναυτικά πλοία και σε ταχύπλοα περιπολικά σκάφη. Οι έλικες ποικίλλουν ως προς το μέγεθος, το υλικό που χρησιμοποιείται και τον αριθμό των πτερυγίων της έλικας (Carlton 2012). Συνδέονται με το κύτος μέσω ενός άξονα έλικας ο οποίος συνήθως περιβάλλεται από μια σήραγγα άξονα για να αποφεύγεται η διαρροή νερού σε αυτά τα διαμερίσματα. Τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα εφαρμόζονται σπάνια στις έλικες, επειδή το χρώμα



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

διαβρώνεται γρήγορα υπό τις συνθήκες υψηλής διάτμησης και προκαλεί ανεξέλεγκτη απελευθέρωση βιοκτόνων.

Τα περιβλήματα των ελικοφόρων αξόνων αποτελούν προστατευτικά φράγματα για τους ελικοφόρους άξονες που τους προστατεύουν από την εμπλοκή σε σχοινιά ή δίχτυα, αλλά είναι επίσης επιρρεπή σε ρύπανση από εξωτικά θαλάσσια είδη (CDS 2020a). Τα προστατευτικά σχοινιών είναι λεπίδες προσαρτημένες στο περίβλημα του άξονα, που κόβουν τυχόν μπλεγμένα σχοινιά ή δίχτυα.

Τα πηδάλια είναι ενεργοποιητές σε ένα σκάφος, επιβάλλουν μια ενέργεια ελέγχου. Τα περισσότερα σκάφη επιφανείας χρησιμοποιούν πηδάλια για τη διόρθωση της πορείας του σκάφους, αλλά τα πηδάλια προκαλούν επίσης κίνηση κύλισης σε ορισμένα σκάφη. Στα εμπορικά πλοία, τα πηδάλια βρίσκονται συνήθως στην πρύμνη του σκάφους, πίσω από την προπέλα. Άλλα συστήματα πρόωσης δεν διαθέτουν πηδάλια, για παράδειγμα, τα συστήματα πρόωσης αζιπόδων αποτελούνται από ένα περίβλημα που περιέχει μια έλικα. Η θήκη μπορεί να περιστρέφει για να αλλάξει η κατεύθυνση του σκάφους.

### **3.1.2 Υπολείμματα σε εξειδικευμένες περιοχές**

Οι εξειδικευμένες περιοχές έχουν περιγράψει ως εστίες συσσώρευσης βιολογικών ρύπων (Davidson et al. 2016), καθώς η αφθονία των βιολογικών ρύπων τείνει να είναι μεγαλύτερη στις εξειδικευμένες περιοχές από ό,τι στο κύριο κύτος των πλοίων (Inglis et al. 2010, Davidson et al. 2009, Lacoursière-Roussel et al. 2012). Οι Davidson κ.ά. (2014) έδειξαν ότι συγκεκριμένα στοιχεία των θέσεων διέφεραν σημαντικά ως προς την ποσοστιαία κάλυψη από βιολογική ρύπανση και τάχθηκαν υπέρ της επέκτασης της διαστρωμάτωσης των δειγμάτων πέραν της περιοχής της θέσης σε περιοχή υπό-θέσης.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Οι ομοιόμορφες περιοχές του κύτους είναι συνήθως σχετικά καθαρές από οργανισμούς ρύπανσης λόγω των αποτελεσματικών αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και των μεγαλύτερων υδροδυναμικών δυνάμεων. Ωστόσο, σημαντική ρύπανση μπορεί να υπάρχει σε:

- περιοχές που προστατεύονται από τη συνεχή στρωτή ροή του νερού που μπορεί να απομακρύνει τους ρυπογόνους οργανισμούς: σχάρες θαλάσσιου κύτου, σωλήνες εισαγωγής, σήραγγες προωθητήριων πλώρης και προστατευτικά σχοινιών,
- περιοχές με μη βαμμένες επιφάνειες: κόμβοι καθοδικής προστασίας, έλικες και οι άξονες τους, πηδάλια και DDSS,
- περιοχές όπου τα αντιρρυπαντικά επιχρίσματα καταστρέφονται και είναι αναποτελεσματικά λόγω των υψηλών στροβιλισμών και της σπηλαιώσης: έλικες, πηδάλια, σχάρες εισαγωγής, πρυμναία καρίνα, θαλάσσια σεντούκια και γύρω από τους προωθητές πλώρης,
- περιοχές όπου οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις είναι αναποτελεσματικές επειδή έχουν φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής τους: DDSS,
- δύσκολα προσβάσιμες περιοχές όπου οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις εφαρμόστηκαν ανεπαρκώς: θαλάσσια σεντούκια, σχάρες θαλάσσιων σεντουκιών και ψυγεία κιβωτίων,
- σύνθετα εξαρτήματα ή εξοπλισμό: ψυγεία και μονάδες πρόωσης έκτακτης ανάγκης (Growcott et al. 2016).

Μια μελέτη της βιολογικής ρύπανσης σε εμπορικά πλοία στη Νέα Ζηλανδία έδειξε ότι οι έλικες δεν είχαν καμία αντιρρυπαντική επίστρωση, ενώ η βολβοειδής πλώρη είχε συχνά κατεστραμμένη βαφή και η καρίνα, το πηδάλιο, το προστατευτικό σχοινί και οι σχάρες του θαλάσσιου στήθους καλύπτονταν συχνά με αναποτελεσματικές αντιρρυπαντικές επιστρώσεις. Η μελέτη αυτή διαπίστωσε τα υψηλότερα επίπεδα βιολογικής ρύπανσης στα DDSS και στις σχάρες του θαλάσσιου στήθους. Παρόλο που τα



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

DDSS τεχνικά δεν αποτελούν κόγχες, επειδή δεν είναι προεξοχές ή εσοχές, εξακολουθούν να θεωρούνται περιοχή κόγχης (Davidson et al. 2016). Καθώς οι DDSS συχνά παραμένουν ελεύθερες από οποιεσδήποτε αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, μπορεί να αποτελέσουν εστίες βιορύπανσης. Για παράδειγμα, οι Piola & Conwell (2010) διαπίστωσαν ότι μεταξύ των διαφόρων περιοχών εξειδικευμένων περιοχών σε διεθνή αλιευτικά σκάφη που έφταναν στη Νέα Ζηλανδία, η βιομάζα ρύπανσης και ο αριθμός των ειδών ήταν σταθερά υψηλότερα στα DDSS. Οι Inglis et al. (2010) συνέκριναν την έκταση της βιολογικής ρύπανσης μεταξύ διαφορετικών τύπων εξειδικευμένων περιοχών σε σκάφη που φθάνουν στη Νέα Ζηλανδία. Η ρύπανση παρατηρήθηκε συχνότερα και σε μεγαλύτερους αριθμούς στο DDSS σε σύγκριση με άλλα μέρη της γενικής επιφάνειας του κύτους, αλλά αυτό το πρότυπο δεν ήταν συνεπές μεταξύ των σκαφών, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης της βιομάζας της βιορύπανσης και του πλούτου των ειδών σχετιζόταν με διαφορές μεταξύ των σκαφών. Ταυτόχρονα, η ρύπανση στο DDSS δεν ήταν πολύ συχνή σε σύγκριση με άλλες εξειδικευμένες περιοχές, όπως οι σχάρες και οι προωθητές πλήρης, οι οποίες ήταν τα πιο συνηθισμένα σημεία παρατήρησης βιολογικών ρύπων (Inglis et al. 2010). Παρομοίως, ο McClary (2018) ανέφερε ότι οι DDSS ήταν από τις λιγότερο μολυσμένες εξειδικευμένες περιοχές. Ωστόσο, οι οργανισμοί ρύπανσης προσκολλώνται και αποικίζουν τα DDSS, επομένως είναι σημαντικό να εφαρμόζονται επικαλύψεις κατά της ρύπανσης. Εάν είναι δυνατόν, οι θέσεις των μπλοκ στήριξης θα πρέπει να μεταβάλλονται σε εναλλασσόμενες αποξηλώσεις, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμόζονται αντιρρυπαντικές επιστρώσεις σε περιοχές που δεν αγγίζουν τα μπλοκ (Georgiades et al. 2018). Η εκ νέου πλεύση και η μετατόπιση της θέσης των σκαφών κατά τη διάρκεια του ίδιου dry-docking δεν συμβαίνει συχνά λόγω του σχετικού κόστους (Davidson et al. 2016).

Σε ορισμένους τύπους σκαφών, οι σήραγγες των προωθητήρων συμβάλλουν σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 50% της συνολικής επιφάνειας της κόγχης, αλλά η κατάστασή τους ως εστίες βιολογικής ρύπανσης μπορεί να υποτιμάται, επειδή ο καθαρισμός των σηράγγων των προωθητήρων μέσα στο νερό μπορεί να είναι



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

αναποτελεσματικός και να αποτελεί χαμηλότερη προτεραιότητα. Μια έρευνα για τη βιολογική ρύπανση σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων υποστηρίζει αυτή την εκτίμηση. Μακροσκοπική βιολογική ρύπανση παρατηρήθηκε συχνότερα στα πηδάλια, στους πρυμναίους σωλήνες και στις σχάρες των πρωραίων προωστήρων (Davidson et al. 2009). Οι σχάρες πάνω από τα θαλάσσια σεντούκια και τα ανοίγματα των σηράγγων των προωθητήρων βρέθηκαν να είναι οι πιο έντονα λερωμένες εξειδικευμένες περιοχές σε μια έρευνα εμπορικών πλοίων που έφταναν στην Αυστραλία (McClary 2018). Οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις που εφαρμόζονται στα ανοίγματα των σηράγγων των προωθητήρων θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν σε ζημιές από σπηλαίωση (Georgiades et al. 2018). Όλες οι προαναφερθείσες μελέτες δεν αξιολόγησαν τις εσωτερικές περιοχές εξειδικευμένων περιοχών.

Η συσσώρευση ειδών ρύπανσης στα θαλάσσια σεντούκια οφείλεται πιθανώς στην ανεπαρκή απελευθέρωση βιοκτόνων είτε λόγω i) της τυρβώδους ροής του νερού που προκαλεί ταχεία στίλβωση και εξάντληση των αντιρρυπαντικών επιστρώσεων, είτε ii) της χαμηλής ροής σε στατικούς θύλακες παρόμοιους με αυτούς των αραγμένων σκαφών, που οδηγεί σε ανεπαρκή απελευθέρωση βιοκτόνων, καθώς η επίστρωση δεν στίλβετε αποτελεσματικά υπό μειωμένη υδροδυναμική ροή. Εάν η αποτελεσματικότητα του συστήματος αντιρρύπανσης σε εσωτερικές εξειδικευμένες περιοχές διακυβεύεται εξαιτίας αυτών των λόγων ή εάν το σύστημα δεν είναι κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εξειδικευμένη περιοχή, τότε οι κοινότητες βιορύπανσης μπορούν να προχωρήσουν προς τριτογενή επίπεδα βιορύπανσης. Τα θαλάσσια σεντούκια μπορούν να περιέχουν διάφορα εξωτικά θαλάσσια είδη, συμπεριλαμβανομένων ενήλικων κινητών οργανισμών, και έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν και να διασπείρουν τα είδη αυτά σε μεγάλες αποστάσεις (Gewing & Shenkar 2017). Οι συγκεντρώσεις βιολογικών ρύπων σε εσωτερικές περιοχές μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως "μηχανικοί μικροενδιαιτημάτων", παρέχοντας μια επιφανειακή μήτρα που άλλοι οργανισμοί ρύπανσης βρίσκουν κατάλληλη για προσκόλληση και ανάπτυξη (Davidson et al. 2009). Οι σωλήνες εκτόνωσης ατμού μπορούν να τοποθετηθούν μέσα σε θαλάσσια σεντούκια για



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

να αποτρέψουν και να ελαχιστοποιήσουν την ανάπτυξη βιολογικών ρύπων. Στις εξωτερικές επιφάνειες αυτών των σωλήνων και των σχετικών στηριγμάτων συγκράτησης θα πρέπει να εφαρμόζονται κατάλληλες επιστρώσεις κατά της ρύπανσης (Georgiades et al. 2018).

Η πιο αποτελεσματική και διαρκής στρατηγική για την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης των εξειδικευμένων περιοχών είναι να εξεταστεί το ζήτημα της βιολογικής ρύπανσης κατά τον αρχικό σχεδιασμό και την κατασκευή ενός σκάφους. Οι ακόλουθες συστάσεις παρέχουν παραδείγματα προσαρμογής που πρέπει να ληφθούν υπόψη (Georgiades et al. 2018):

- να αποκλείονται οι μικρές κόγχες και οι προστατευμένες περιοχές, αν είναι δυνατόν
- να σχεδιάζονται στρογγυλές ή/και λοξές γωνίες, σχάρες και προεξοχές για καλύτερη εφαρμογή των αντιρρυπαντικών επιστρώσεων
- να ελαχιστοποιείται το μέγεθος και ο αριθμός των θαλασσινών σεντουκιών και να τοποθετείται ένα MGPS
- να τοποθετούνται σωλήνες εκτόνωσης ατμού μέσα στα θαλασσινά σεντούκια
- να μειώνονται οι καμπύλες και οι στροφές στα εσωτερικά συστήματα ψύξης του θαλασσινού νερού και να επιλέγεται το κατάλληλο υλικό και
- να σχεδιάζονται εξαρτήματα που είναι εύκολα προσβάσιμα για επιθεώρηση, καθαρισμό και συντήρηση (π.χ. σχάρες με μεντεσέδες για πρόσβαση των δυτών, ανασυρόμενα εξαρτήματα και εξοπλισμός).

### **3.2 Ταχύτητα σκάφους**

Η ταχύτητα διέλευσης του σκάφους αποτελεί μέρος του προφίλ λειτουργίας ενός σκάφους, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την επιτυχή μετατόπιση εξωτικών θαλάσσιων ειδών. Τα θαλάσσια σκάφη κυμαίνονται από κινητές πλατφόρμες πετρελαίου και αργά κινούμενα σκάφη (π.χ. φορτηγίδες, ρυμουλκά, σκάφη αναψυχής, αλιευτικά σκάφη,



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

εξέδρες εξερεύνησης πετρελαίου, πλωτές δεξαμενές) έως ταχύτερα κινούμενα πορθμεία και πολεμικά σκάφη. Σε γενικές γραμμές, τα αργά κινούμενα σκάφη (5-10 κόμβοι) περιέχουν μεγαλύτερο αριθμό και ποικιλομορφία οργανισμών βιολογικών ρύπων (τόσο στην επιφάνεια του κύτους όσο και σε εξειδικευμένες περιοχές) ικανών να επιβιώσουν σε μια θέση υποδοχής, επειδή εκτίθενται σε υδροδυναμικές δυνάμεις αντίστασης που είναι σημαντικά μικρότερες από ό,τι στα ταχύτερα κινούμενα σκάφη (Davidson et al. 2009- McClary 2018). Ωστόσο, παίζουν ρόλο και άλλοι παράγοντες, όπως το προφίλ λειτουργίας και η λειτουργία των αντιρρυπαντικών επιστρώσεων. Τα αργοκίνητα σκάφη τείνουν να περνούν παρατεταμένες περιόδους σε ένα περιβάλλον υποδοχής, αυξάνοντας το παράθυρο ευκαιρίας για εισβολή μεταφερόμενων οργανισμών.

Οι οργανισμοί ρύπανσης που συνήθως βρίσκονται στα πλοία δυσκολεύονται να προσκολληθούν σε υποστρώματα σε ταχύτητες άνω των 4-5 κόμβων. Πολλά σύγχρονα πλοία ταξιδεύουν με ταχύτητα >20 κόμβων, γεγονός που θα εμπόδιζε την προσκόλληση των οργανισμών σε αυτές τις ταχύτητες, επομένως η προσκόλληση και η εγκατάσταση πιθανώς συμβαίνει σε περιοχές λιμένων όπου οι ταχύτητες των πλοίων είναι χαμηλότερες ή όταν τα πλοία είναι αγκυροβολημένα ή αγκυροβολημένα. Η προσκόλληση των ειδών είναι επίσης ευκολότερη σε προστατευόμενες εξειδικευμένες περιοχές όπου οι υδροδυναμικές δυνάμεις είναι χαμηλότερες. Μετά την παγκόσμια οικονομική κρίση του 2008-09, πολλές ναυτιλιακές εταιρείες υιοθέτησαν την πλεύση με μειωμένη ταχύτητα για εξοικονόμηση καυσίμων. Τα πλοία που κινούνται με μειωμένη ταχύτητα ασκούν αυτό που είναι γνωστό ως "αργό ατμόπλοιο" (18-20 κόμβοι) ή "πολύ αργό ατμόπλοιο" (15-18 κόμβοι). Η πλεύση με αυτές τις χαμηλές ταχύτητες (20-25 κόμβοι) μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως αυξημένα επίπεδα βιολογικής ρύπανσης στα κύπη των σκαφών και στις εξειδικευμένες περιοχές. Ορισμένοι κατασκευαστές επιχειρημάτων έχουν ήδη αντιδράσει σε αυτή την τάση και προσφέρουν AFC που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πλοία που πλέουν με αργό ατμό.

Η μορφολογία των βιολογικών οργανισμών μπορεί να καθορίσει κατά πόσον η ταχύτητα του σκάφους επηρεάζει την επιβίωσή τους κατά τη διέλευση (Coutts et al.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

2010a). Οι ταχύτητες των πλοίων 5 και 10 κόμβων είχαν μικρή επίδραση στον πλούτο των ειδών των συνόλων των προσκολλημένων βιολογικών ρύπων, αλλά οι ταχύτητες των 18 κόμβων μείωσαν τον πλούτο κατά 50%. Ορισμένοι οργανισμοί ήταν πιο ανθεκτικοί στις δυνάμεις υδροδυναμικής αντίστασης, για παράδειγμα εκείνοι με σκληρές ασβεστολιθικές δομές σώματος, μορφές με χαμηλό προφίλ που σχηματίζουν κρούστες και/ή ευέλικτες μορφολογίες. Ωστόσο, ακόμη και τα μοναχικά ασκίδια με μαλακό σώμα παρέμειναν σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστα από ταχύτητες 18 κόμβων. Επιπλέον, σε πείραμα με πλάκα εγκατάστασης δεν διαπιστώθηκε καμία επίδραση της ταχύτητας ροής ή της διάρκειας επεξεργασίας στην επιβίωση του άμισχου βρυοζώου *Bugula peritina*, που εκτέθηκε σε 6 και 18 κόμβους για 2 και 8 ημέρες. Σε ένα πείραμα έλξης με χρήση πλακών διευθέτησης, η κάλυψη ή ο αριθμός των ατόμων διαφορετικών ρυπαντικών οργανισμών μειώθηκε με την αύξηση της ταχύτητας, αλλά στους 20 κόμβους τα είδη εξακολουθούσαν να είναι σε θέση να παραμείνουν και να επιβιώσουν από τη μεταφορά (Kauano et al. 2017).

Η εγκατάσταση των ειδών και η συσσώρευση των βιολογικών ρύπων γίνεται σταδιακά στα ενεργά σκάφη και η ταχύτητα του σκάφους επηρεάζει τη διαδοχή και τις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις βιολογικών ρύπων (Coutts et al. 2010b). Τα γρηγορότερα σκάφη είναι πιθανό να "επιλέγουν" κοινότητες ρύπανσης που μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες δυνάμεις υδροδυναμικής αντίστασης (π.χ. σκληρά, μοναχικά, εγκλωβισμένα taxa), αλλά η επιτυχία της μετατόπισης δεν σημαίνει απαραίτητα επιτυχή εγκατάσταση αυτών των πιο ανθεκτικών στην αντίσταση εξωτικών θαλάσσιων ειδών σε μια περιοχή υποδοχής (Coutts et al. 2010b).

Οι Davidson et al. (2008a) ανέφεραν ένα σενάριο όπου η αργή ταχύτητα των σκαφών συμβάλλει στον κίνδυνο βιοασφάλειας. Στις ΗΠΑ τα παρωχημένα σκάφη συχνά ρυμουλκούνται σε άλλη τοποθεσία για διάθεση. Συνήθως αυτά τα σκάφη βρίσκονται στο ακραίο άκρο του φάσματος βιολογικής ρύπανσης, καθώς έχουν αγκυροβολήσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα (με αντιρρυπαντικές βαφές που έχουν περάσει τη διάρκεια ζωής τους και μη λειτουργικά MGPS) πριν ρυμουλκηθούν. Σε μια μελέτη των



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

συγκεντρώσεων βιολογικών ρύπων σε απαρχαιωμένα σκάφη πριν και μετά τη μεταφορά τους σε τόπο διάθεσης, οι ταχύτητες ρυμούλκησης δύο σκαφών (ενός πετρελαιοφόρου και ενός μεταφορικού σκάφους) ήταν αργές και κατά μέσο όρο 6,4 κόμβοι. Όταν τα εν λόγω σκάφη έφτασαν στον προορισμό τους, η έκταση της βιολογικής ρύπανσης είχε μειωθεί, αλλά, απροσδόκητα, ο πλούτος των ειδών είχε αυξηθεί, γεγονός που υποδηλώνει ότι κατά τη διάρκεια του αργού ταξιδιού σε ανοικτά και παράκτια ύδατα πραγματοποιήθηκε πρόσθετη εγκατάσταση νέων ειδών (Davidson et al. 2008a).

Ενώ η μετατόπιση μεγάλου αριθμού βιολογικών ρυπαντών στο κύτος του σκάφους είναι πολύ πιο πιθανή σε πλοία που κινούνται αργά σε σύγκριση με πλοία που κινούνται γρήγορα, το ποσοστό επιβίωσης των ρυπαντών εξαρτάται επίσης από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις κατά τη διάρκεια της διέλευσης.

### **3.3 Διάρκεια υπηρεσίας**

Μια άλλη πτυχή του προφίλ λειτουργίας ενός σκάφους είναι το μοτίβο δραστηριότητάς του, το οποίο περιλαμβάνει περιόδους κατά τις οποίες είναι ακίνητο και ανενεργό, για παράδειγμα όταν βρίσκεται σε ανοικτό αγκυροβόλιο ή αγκυροβολημένο σε λιμάνι. Οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής σε λιμάνια και μαρίνες έχουν συσχετιστεί με αυξημένη συσσώρευση βιολογικών ρύπων, τόσο για τα εμπορικά όσο και για τα σκάφη αναψυχής (Davidson et al. 2018). Οι επικαλύψεις διαλυτής μήτρας και οι επικαλύψεις έκπλυσης επαφής είναι πιο αποτελεσματικές από τις FRC στην αναστολή της ανάπτυξης βιολογικών ρύπων κατά τη διάρκεια της παραμονής ενός σκάφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείται κάποια δραστηριότητα του σκάφους για να προκληθεί αυτογύαλισμα και απελευθέρωση βιοκτόνων ή για να απομακρυνθούν οι προσκολλημένοι οργανισμοί ρύπανσης από τις επιφάνειες που είναι βαμμένες με FRC με υδροδυναμική αντίσταση. Παρόλο που δύο πρόσφατες μελέτες (Davidson et al. 2014) δεν διαπίστωσαν θετική συσχέτιση μεταξύ των μεγαλύτερων χρόνων παραμονής σε λιμμένα και του επιπέδου κάλυψης από βιολογική ρύπανση, υπάρχουν λόγοι για τους οποίους αυτό μπορεί να μην είναι ευρέως εφαρμόσιμο. Η πρώτη μελέτη εξέτασε τα πλοία που έφταναν σε λιμάνια της Καλιφόρνιας. Η έλλειψη επίδρασης της μακράς



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

παραμονής σε λιμένες στα επίπεδα βιολογικών ρύπων σε αυτή τη μελέτη θα μπορούσε να οφείλεται στην έκθεση των θαλάσσιων οργανισμών σε γλυκό νερό στα λιμάνια και τις διώρυγες (Davidson et al. 2014), η οποία θα μείωνε την κάλυψή τους ως αποτέλεσμα του θανάτου τους από ωσμωτικό σοκ (εμβάπτιση σε γλυκό νερό). Η άλλη μελέτη, η οποία διερεύνησε την αφθονία ρύπανσης και τον πλούτο ειδών στα θαλάσσια σεντούκια εμπορικών πλοίων στον Καναδά, απέδωσε την έλλειψη θετικής συσχέτισης σε περιορισμένα δεδομένα σχετικά με τις διάρκειες λιμένων και τα συστήματα αντιρρύπανσης.

Η βιολογική ρύπανση μπορεί να συσσωρευτεί γρήγορα στα κύττα και τις περιοχές των νησίδων των ανενεργών σκαφών. Με μια πειραματική διάταξη σε δύο μαρίνες στην ανατολική και τη δυτική ακτή των ΗΠΑ εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της διάρκειας των περιόδων ακινησίας και της συσσώρευσης της βιολογικής ρύπανσης με τη χρήση πινάκων ρύπανσης. Σε αυτή τη μελέτη, τα AFC ήταν αποτελεσματικά στην πρόληψη της βιολογικής ρύπανσης σε δοκιμαστικά πάνελ κατά τη διάρκεια στατικών συνθηκών σε έναν χώρο δοκιμών, αλλά μετά από 60 ημέρες η κάλυψη από μακρορύπανση είχε φτάσει το 20% στον άλλο χώρο δοκιμών. Τα επίπεδα βιολογικής ρύπανσης ήταν υψηλά (>85% κάλυψη) σε μη επικαλυμμένα πάνελ ελέγχου μετά από 28 ημέρες εμβάπτισης σε στατικές συνθήκες (Davidson et al. 2020). Οι FRC ήταν λιγότερο αποτελεσματικές στην πρόληψη της βιολογικής ρύπανσης, αλλά τα παρατηρούμενα υψηλά επίπεδα βιολογικής ρύπανσης (>70% κάλυψη) σε μία τοποθεσία δοκιμής μετά από 45 ημέρες μπορεί να οφείλονται στο ότι οι μακρορύπανθοι απέκτησαν πάτημα στις πλάκες PVC που υποστήριζαν το πείραμα κατά τη διάρκεια του πειράματος (Davidson et al. 2020).

Τα διαφορετικά πρότυπα δραστηριότητας των διαφόρων τύπων σκαφών μπορεί να μεταφράζονται σε διαφορετικά επίπεδα κινδύνου βιοασφάλειας. Τα σκάφη αναψυχής θεωρούνται υψηλότερου κινδύνου υπό μια σχετική έννοια, λόγω των μεγάλων περιόδων ακινησίας τους, των αργών και περιπλανώμενων ταξιδιών τους. Τα εμπορικά σκάφη ενδέχεται να ενέχουν μικρότερο σχετικό κίνδυνο βιοασφάλειας με βάση την ταχεία αναστροφή τους και τις περιορισμένες περιόδους αδράνειας. Ωστόσο,



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

σε γενικές γραμμές, η βιολογική ρύπανση που σχετίζεται με όλους τους τύπους σκαφών αποτελεί κίνδυνο για τις φυσικές, οικονομικές και κοινωνικές αξίες (Inglis et al. 2010-Georgiades et al. 2020).

Στατιστικά στοιχεία για τη διαφορά στα πρότυπα δραστηριότητας μεταξύ των εμπορικών σκαφών και των σκαφών αναψυχής, καθώς και μεταξύ των διαφόρων τύπων εμπορικών σκαφών, είναι διαθέσιμα από στοχευμένες ερευνητικές μελέτες ή εκθέσεις παραγωγικότητας που δημοσιεύονται από κυβερνητικές υπηρεσίες ή διακυβερνητικούς φορείς.

Για παράδειγμα, οι Inglis et al. (2010) ανέφεραν έντονες διαφορές στα πρότυπα δραστηριότητας όταν συνέκριναν τα εμπορικά σκάφη με τα σκάφη αναψυχής που έφταναν στη Νέα Ζηλανδία. Κατά μέσο όρο, τα σκάφη αναψυχής περνούσαν περισσότερο χρόνο στο λιμάνι και στη θάλασσα και είχαν μεγαλύτερες περιόδους ακινησίας σε σύγκριση με τα εμπορικά σκάφη. Τα σκάφη αναψυχής επισκέπτονταν επίσης λιγότερα λιμάνια και είχαν την τάση να φθάνουν από μικρότερο φάσμα διεθνών βιοπεριφερειών. Η σύγκριση διαφορετικών τύπων εμπορικών πλοίων έδειξε ότι τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου ήταν ανενεργά για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και επίσης περνούσαν περισσότερο χρόνο στα λιμάνια και στη θάλασσα σε σχέση με τους άλλους τύπους εμπορικών πλοίων (Inglis et al. 2010, Davidson et al. 2018). Ομοίως, τα αργά κινούμενα σκάφη, όπως οι φορτηγίδες, οι πλωτοί γερανοί και οι εξέδρες άντλησης πετρελαίου, ενδέχεται να είναι ανενεργά στα λιμάνια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και δεν καθαρίζονται τακτικά. Οι βυθοκόροι θεωρούνται επίσης υψηλού κινδύνου λόγω των αργών ταχυτήτων τους και των μεγάλων περιόδων παραμονής τους στο λιμάνι (άνω των 30 ημερών), επιπλέον του κινδύνου βιοασφάλειας που ενέχουν λόγω της στενής αλληλεπίδρασής τους με τον πυθμένα της θάλασσας.

Τα επιβατηγά πλοία, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων/γενικού φορτίου, τα πλοία RoRo, τα φορτηγά μεταφοράς αυτοκινήτων και τα ψυγεία είχαν τους ταχύτερους χρόνους μετακίνησης στα λιμάνια, οι οποίοι κυμαίνονταν από 0,9 έως 1,89 ημέρες (Inglis et al. 2010). Εξετάζοντας ένα παγκόσμιο σύνολο δεδομένων, το 2018, ένας τυπικός



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

κατάπλους πλοίου είχε χρόνο περιστροφής 0,97 ημέρες (διάμεσος των 25 κορυφαίων οικονομιών, 0,7 ημέρες για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων). Αντίθετα, τα πλοία μεταφοράς ξηρού χύδην φορτίου περνούσαν 2,05 ημέρες στο λιμάνι, τα πλοία μεταφοράς υγρών χύδην φορτίων 0,94 ημέρες και τα λοιπά πλοία μεταξύ 1,02-1,11 ημερών (UNCTAD 2019). Η ανάπτυξη των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, η βελτιστοποίηση των λιμενικών υποδομών και λειτουργιών και η σύγχρονη τεχνολογία για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της φόρτωσης έχουν ως αποτέλεσμα τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων να περνούν λιγότερο από μία ημέρα και συνήθως λιγότερο από 12 ώρες σε ένα λιμάνι (Davidson et al. 2009, UNCTAD 2019), αλλά αυτό εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση του λιμένα. Ο διάμεσος χρόνος περιστροφής των πλοίων ήταν 30,9 ώρες για τους πέντε τερματικούς σταθμούς εμπορευματοκιβωτίων της Αυστραλίας από τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο του 2019. Οι επιδόσεις μεταξύ των τερματικών σταθμών διέφεραν, με τον διάμεσο χρόνο ανατροπής των πλοίων να κυμαίνεται από 20,7 έως 36,7 ώρες κατά την εν λόγω περίοδο.

Οι Sylvester et al. (2011) ανέπτυξαν μια απλή προσέγγιση μοντελοποίησης για την πρόβλεψη της έκτασης και της έντασης της βιολογικής ρύπανσης σε εμπορικά πλοία στον Καναδά. Στο πλαίσιο της μελέτης, ερευνήθηκαν 40 υπερωκεάνια εμπορικά πλοία, συμπεριλαμβανομένων πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτηγών πλοίων και δεξαμενόπλοιων μεταφοράς πετρελαίου και χημικών προϊόντων, φορτηγών πλοίων RoRo και ενός στρώματος καλωδίων. Ο χρόνος παραμονής στο λιμάνι και ο χρόνος από την τελευταία εφαρμογή αντιρρυπαντικών επιστρώσεων ήταν σημαντικές συν διακυμάνσεις για την πίεση πολλαπλασιασμού και αποικισμού στο μοντέλο.

Ορισμένες μελέτες έχουν διερευνήσει την επίδραση των περιόδων ακινησίας στην έκταση της βιολογικής ρύπανσης στα σκάφη αναψυχής. Οι Floerl & Inglis (2005) διαπίστωσαν ότι η διάρκεια της περιόδου ακινησίας σε μια μαρίνα συσχετίζεται ελάχιστα με την αφθονία της βιολογικής ρύπανσης στα σκάφη αναψυχής. Ωστόσο, η επιρροή αυτής της μεταβλητής καλύφθηκε από την επίδραση των αντιρρυπαντικών



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

επιστρώσεων, καθώς τα σκάφη με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ρύπους ήταν εκείνα στα οποία δεν είχαν εφαρμοστεί αντιρρυπαντικές επιστρώσεις για >20 μήνες και είχαν παραμείνει ανενεργά σε μια μαρίνα για >8,5 μήνες. Οι Pelletier-Rousseau κ.ά. (2019) διεξήγαγαν έρευνες ρύπανσης σκαφών αναψυχής στον Καναδά και το διάστημα αποξήρανσης (δηλ. ενεργός και ανενεργός χρόνος στο νερό) ήταν ο ισχυρότερος προγνωστικός παράγοντας της κατάστασης της βιολογικής ρύπανσης σε αυτή τη μελέτη. Χρησιμοποιώντας ένα ευρύτερο γεωγραφικό πεδίο, οι Lacoursière-Roussel et al. (2012) συνέκριναν τη βιολογική ρύπανση σε σκάφη αναψυχής στον Καναδά με σκάφη στη Νέα Ζηλανδία. Θεώρησαν ότι οι περίοδοι ακινητοποίησης αποτελούν πιο αξιόπιστο δείκτη πρόβλεψης της ρύπανσης των σκαφών από ό,τι ο χρόνος από την τελευταία αντιρρυπαντική επάλειψη, με βάση την υπόθεση ότι οι περισσότερες εξειδικευμένες περιοχές δεν αντιμετωπίζονται με αντιρρυπαντικές επαλείψεις. Οι Clarke Murray et al. (2013) διαπίστωσαν ότι ο χρόνος παραμονής των σκαφών αναψυχής στο νερό στον Καναδά είχε θετική σχέση με τη μακροβρωμιά, τα σκάφη που ήταν αποθηκευμένα στο νερό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα είχαν μεγαλύτερες πιθανότητες μικροβρωμιάς. Σύμφωνα με τις άλλες μελέτες, τα σκάφη αναψυχής στη Σκωτία που παρέμειναν για μεγάλο χρονικό διάστημα ακίνητα στο λιμάνι, με λιγότερη δραστηριότητα τους τελευταίους 12 μήνες σε σύγκριση με άλλα σκάφη αναψυχής, είχαν περισσότερες πιθανότητες να έχουν προσκολλημένα στο κύτος τους είδη μακρορύπανσης.

Μια μελέτη που εξέτασε τη βιολογική ρύπανση σε σκάφη αναψυχής, εμπορικά και στρατιωτικά σκάφη σε σχέση με διάφορες μεταβλητές δεν διαπίστωσε επίδραση της περιόδου ακινησίας στην αφθονία και τον πλούτο των συγκεντρώσεων ρύπανσης. Τα στρατιωτικά σκάφη είχαν τον υψηλότερο μέσο αριθμό ατόμων και ειδών ρύπανσης στα κύτη και στις περιοχές κόγχης, γεγονός που αποδόθηκε σε ανεπαρκείς διαδικασίες καθαρισμού για αυτόν τον τύπο σκαφών.

### **3.4 Διαδρομές μεταφοράς**



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Οι διαδρομές διέλευσης των σκαφών συμβάλλουν στη βιολογική ρύπανση των θαλάσσιων σκαφών, αρχής γενομένης από τη στιγμή του τελευταίου στεγνού ελλιμενισμού ή καθαρισμού. Το πρότυπο ταξιδιού περιλαμβάνει τον αριθμό των λιμένων που επισκέπτεται ένα σκάφος και τις ναυτιλιακές διαδρομές από τον λιμένα του πρώτου κατάπλου έως τον προορισμό του.

Ο αριθμός των λιμένων που επισκέπτονται είναι ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τη βιολογική ρύπανση. Ένα μοντέλο πρόβλεψης που χρησιμοποίησε υπερωκεάνια πλοία στον Καναδά συνέκρινε δύο λιμάνια και έδειξε ότι τα πλοία που είχαν επισκεφθεί περισσότερες περιοχές έφταναν με μεγαλύτερη αφθονία και αριθμό ειδών ρύπανσης. Αυτό είναι πιθανό αποτέλεσμα της έκθεσης σε μεγαλύτερη ποικιλία θαλάσσιων κοινοτήτων (Sylvester et al. 2011). Μια έρευνα σε διεθνή εμπορικά πλοία που έφτασαν στην Αυστραλία προσδιόρισε μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των λιμενικών προσεγγίσεων από την τελευταία εφαρμογή αντιρρυπαντικής επίστρωσης και της βαθμολογίας ρύπανσης του κύτους και των εξωτερικών περιοχών της κόγχης σε συνδυασμό (McClary 2018). Ωστόσο, τα αποτελέσματα παραμορφώθηκαν από τις χαμηλές βαθμολογίες ρύπανσης των περιοχών του κύτους των πλοίων που επισκέφθηκαν μεγάλο αριθμό διαφορετικών λιμένων. Οι Inglis κ.ά. (2010) διαπίστωσαν θετική σχέση μεταξύ της προβλεπόμενης πιθανότητας παρουσίας εγκατεστημένων εξωτικών θαλάσσιων ειδών στη Νέα Ζηλανδία και του αριθμού των λιμένων που επισκέφθηκαν εμπορικά σκάφη και σκάφη αναψυχής μετά την αντιρρυπαντική επικάλυψη, με απότομη αύξηση όταν τα εμπορικά σκάφη είχαν επισκεφθεί περισσότερους από 30 λιμένες. Ο παράγοντας κινδύνου του "μέσου αριθμού ημερών παραμονής σε λιμάνι" ήταν ισχυρότερος για τα σκάφη αναψυχής (Georgiades et al. 2020).

Επειδή κάθε λιμένας έχει τη δική του δεξαμενή ειδών, τα σκάφη που επισκέπτονται πολλά διαφορετικά λιμάνια θα αναπτύξουν αναπόφευκτα ένα σύνολο ρύπων που μπορεί να ποικίλλει σημαντικά εντός του ίδιου σκάφους και μεταξύ των σκαφών (Inglis et al. 2010), αλλά για τα σκάφη αναψυχής με μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στα λιμάνια



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

τα σύνολα ρύπων είναι πιθανό να αντικατοπτρίζουν τα σύνολα του μόνιμου βιόκοσμου στη μαρίνα προέλευσης του σκάφους (Floerl & Inglis 2005). Τα σκάφη αναψυχής μπορεί να επισκέπτονται μια σειρά από διαφορετικές τοποθεσίες, αλλά και περιοχές στις οποίες τα μεγαλύτερα σκάφη δεν έχουν πρόσβαση. Τα σκάφη αναψυχής μπορούν δυνητικά να μεταφέρουν εξωτικά θαλάσσια είδη σε προστατευμένες περιοχές, όπως όρμους και λιμνοθάλασσες. Τα φυσικά αργά κινούμενα νερά σε ορισμένους κόλπους και λιμνοθάλασσες μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη θερμοκρασία και αλατότητα του νερού, γεγονός που θα μπορούσε να παρέχει κατάλληλες συνθήκες για την επιτυχή εγκατάσταση ορισμένων εξωτικών θαλάσσιων ειδών.

Τα σκάφη που κινούνται σε μια παρόμοια γεωγραφική περιοχή, στην οποία οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι συγκρίσιμες ή ίδιες, μπορούν να αναπτύξουν υψηλά επίπεδα βιολογικών ρύπων. Για παράδειγμα, οι Coutts & Taylor (2004) διαπίστωσαν ότι τα σκάφη που πραγματοποιούσαν εγχώριες εμπορικές συναλλαγές σε όλη τη Νέα Ζηλανδία ή στη Θάλασσα Τασμάν είχαν τον υψηλότερο μέσο πλούτο ειδών και το υψηλότερο ποσοστό κάλυψης από οργανισμούς, σε σύγκριση με άλλα σκάφη. Παρομοίως, ένα ακραίο φαινόμενο με σημαντικά μικρότερο εύρος ταξιδιού σε ένα σύνολο πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που ερευνήθηκαν είχε τα υψηλότερα επίπεδα βιολογικής ρύπανσης (Davidson et al. 2009). Τα παραδείγματα αυτά υποδεικνύουν ότι, σε σύγκριση με τις διαδρομές διέλευσης μεταξύ γεωγραφικών πλατών (μεταξύ ημισφαιρίων), τα ταξίδια που παραμένουν εντός του ίδιου γεωγραφικού πλάτους μπορεί να είναι λιγότερο στρεσογόνα για τους προσκολλημένους οργανισμούς ρύπανσης, καθώς εκτίθενται σε λιγότερο φυσιολογικό στρες, για παράδειγμα σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Είναι ενδιαφέρον ότι ένα μοντέλο πρόβλεψης των Seebens κ.ά. (2013) διαπίστωσε ότι η πιθανότητα εισβολής είναι υψηλότερη για ενδιάμεσες γεωγραφικές αποστάσεις (8.000-10.000 χλμ.) μεταξύ λιμένων δότη και παραλήπτη, εύρημα που φέρεται να ταιριάζει με τις παρατηρήσεις πεδίου.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Τα μη γεωγραφικά ταξίδια συνδέονται συνήθως με σημαντικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της αλατότητας (Davidson et al. 2008a). Οι διαδρομές διέλευσης που απαιτούν από τα σκάφη να διέρχονται συχνά από δια-ωκεάνιους διαδρόμους, όπως οι διώρυγες του Παναμά και του Σουέζ, ενδέχεται να επηρεάσουν τον βαθμό της βιολογικής ρύπανσης, καθώς τα περάσματα αυτά εκθέτουν τους ρυπαντικούς οργανισμούς σε πιθανές φυσιολογικά στρεσογόνες συνθήκες. Οι οργανισμοί εκτίθενται σε θερμό γλυκό νερό κατά τη διέλευση από τη διώρυγα του Παναμά και σε θερμό νερό και θαλάσσια υπεραλατότητα κατά τη διέλευση από τη διώρυγα του Σουέζ. Αυτά τα βιολογικά στρεσογόνα περιβάλλοντα μπορεί να φιλτράρουν ή να σκοτώσουν ένα μέρος των ειδών που είναι προσκολλημένα στα κύτη των πλοίων, ωστόσο οι επιπτώσεις στους βιοτόπους δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητές (Miller et al. 2018).

Σε αυτό το πλαίσιο, είναι πιο πιθανό θαλάσσια είδη από ωκεανούς με ψυχρά νερά, όπως ο Νότιος Ωκεανός, να μεταφερθούν και να εγκατασταθούν σε βόρεια περιβάλλοντα παρά το αντίθετο. Τα θαλάσσια είδη που είναι προσαρμοσμένα σε ψυχρότερα ύδατα μπορούν να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν σε θερμοκρασίες νερού που είναι υψηλότερες από τις συνήθεις αβιοτικές συνθήκες του ενδιαϊτήματός τους, αλλά τα είδη από χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη μπορεί να δυσκολευτούν να εισβάλουν σε ψυχρότερα περιβάλλοντα λόγω των φυσικών διαφορών μεταξύ του περιβάλλοντος δότη και του περιβάλλοντος υποδοχής. Μελέτη της βιολογικής ρύπανσης σε πλοία που διέρχονται από και προς την Αρκτική έδειξε ότι ο πλούτος των ειδών και η αφθονία των συνόλων ρύπανσης στα πλοία μειώθηκε έντονα, κατά 70% και 80% αντίστοιχα, μετά τη διέλευση από τα εύκρατα στα αρκτικά ύδατα (τα πλοία που έλαβαν δείγμα απέφυγαν να έρθουν σε επαφή με τον πάγο, συνεπώς δεν παρατηρήθηκαν επιπτώσεις της απόξεσης του πάγου στις βιολογικές συγκεντρώσεις ρύπανσης). Σε αυτή την περίπτωση, οι εξειδικευμένες περιοχές δεν ήταν σε θέση να προστατεύσουν τα taxa της βιολογικής ρύπανσης από τις σκληρές αρκτικές συνθήκες. Παρά την κακή επιβίωση των οργανισμών ρύπανσης, εξακολουθεί να υπάρχει ο κίνδυνος μεταφοράς εξωτικών θαλάσσιων ειδών στην Αρκτική μέσω της βιολογικής ρύπανσης των σκαφών.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Στο άλλο άκρο του φάσματος των θερμοκρασιών του θαλασσινού νερού, τα σκάφη που επισκέπτονται λιμάνια σε τροπικές περιοχές συνήθως ρυπαίνονται περισσότερο (Davidson et al. 2014), και σε μικρότερο χρονικό διάστημα, από εκείνα που εκτελούν δρομολόγια σε πιο εύκρατες ζώνες. Οι θερμότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού των εύκρατων ζωνών ευνοούν την ταχύτερη ανάπτυξη της ρύπανσης στα ανενεργά σκάφη σε σχέση με τους ψυχρότερους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες. Οι θερμότερες θερμοκρασίες οδηγούν επίσης συνήθως σε μεγαλύτερη βιολογική ρύπανση των πλοίων που βρίσκονται σε λειτουργία. Οι Gewing & Shenkar (2017) παρατήρησαν αύξηση της αφθονίας και του πλούτου των ασκηταριών σε εξειδικευμένες περιοχές στρατιωτικών σκαφών με την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού (μέχρι το επίπεδο των τροπικών υδάτων).

Η προέλευση του πλοίου χρησιμοποιήθηκε ως μεταβλητή σε μια μελέτη στον Καναδά και έδειχνε αν ένα πλοίο ταξίδεψε στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό πριν φτάσει σε ένα λιμάνι. Η προέλευση του πλοίου δεν επηρέασε τον ταξινομικό πλούτο ή την αφθονία των ειδών ρύπανσης στα θαλάσσια σεντούκια των εμπορικών πλοίων που βρίσκονται σε δεξαμενισμό. Ωστόσο, τα θαλάσσια σεντούκια των διεθνών πλοίων στην εν λόγω μελέτη περιείχαν σημαντικά περισσότερα μη ενδημικά είδη από ό,τι τα εγχώρια πλοία. Μια μελέτη σε ένα γαλλικό λιμάνι έδειξε ότι η περιοχή προέλευσης δεν επηρέασε τη συγκέντρωση των ειδών μακροφυκών στα κύτη των εμπορικών πλοίων, καθώς τα είδη μακροφυκών που βρέθηκαν ήταν ήδη πανταχού παρόντα στα λιμάνια.

Τα είδη είναι ικανά να επιβιώνουν σε μεγάλες αποστάσεις μέσω εμπορικών πλοίων κατά μήκος των ναυτιλιακών οδών, όπως αποδεικνύεται από εξωτικά είδη που έχουν εγκατασταθεί εκατέρωθεν του ίδιου ωκεανού στο ίδιο ημισφαίριο. Η πιθανότητα επιβίωσης εξαρτάται από το είδος των ειδών ρύπανσης και την ικανότητά τους να διατηρούνται κατά τη διάρκεια μακράς διέλευσης. Στα παράκτια ύδατα υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση τροφής για τους οργανισμούς βιολογικής ρύπανσης σε σχέση με τον ανοικτό ωκεανό, αλλά η πρόσβαση στην τροφή μπορεί να είναι δύσκολη όσο είναι προσκολλημένοι σε ένα πλοίο. Οι τροφοδότες που τρέφονται με φίλτρα νερού,



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

όπως τα ασκιδοειδή, μπορεί να έχουν τη φυσική ικανότητα να παραμένουν προσκολλημένοι στις επιφάνειες του κύτους κατά τη διάρκεια υπερωκεάνιων ταξιδιών, αλλά μπορεί να μην είναι σε θέση να το επιβιώσουν εάν ο χρόνος φιλτραρίσματος τους είναι περιορισμένος ή περιορίζεται από την αυξημένη ταχύτητα του νερού. Οι επιπτώσεις των μεγάλων χρόνων ταξιδιού στους οργανισμούς ρύπανσης μπορεί να καθυστερούν και να είναι παρατηρήσιμες μετά την άφιξη, όπως στην περίπτωση των αποικιών *Bugula peritina* σε πείραμα με πλάκες εγκατάστασης. Το μεγαλύτερο και ταχύτερο ταξίδι μείωσε τους ρυθμούς ανάπτυξης μετά το ταξίδι σε αυτό το είδος ρύπανσης. Σε γενικές γραμμές, τα εμπορικά σκάφη που πραγματοποιούν τακτικά μικρότερα εσωτερικά ταξίδια είναι πιθανότερο να συσσωρεύουν και να διατηρούν συγκεντρώσεις ρύπανσης σε σχέση με τα σκάφη που ταξιδεύουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις (Davidson et al. 2009). Επιπλέον, τα σκάφη που αναλαμβάνουν διαδοχικά μικρά ενδοπαραθαλάσσια ταξίδια και έχουν μικρές περιόδους παραμονής μπορεί να είναι σε θέση να μεταφέρουν βιώσιμους οργανισμούς που είναι πιο επιτυχημένοι αναπαραγωγικά και ικανοί να εγκατασταθούν σε σχέση με εκείνους που μεταφέρονται με σκάφη με μεγαλύτερα ταξίδια και περιόδους παραμονής.

Η μέθοδος διέλευσης (δηλ. τα σκάφη που εισέρχονται στην Αυστραλία εν πλω ή ως φορτίο εκτός πλω) θα επηρεάσει επίσης την επιβίωση των εξωτικών θαλάσσιων ειδών που μετατοπίζονται. Η επιβίωση είναι πιθανόν να είναι μεγαλύτερη για τα σκάφη που μεταφέρονται στην Αυστραλία μέσω νερού. Ωστόσο, η ξηρή μεταφορά δεν εξαλείφει τον κίνδυνο, διότι ορισμένα είδη μπορούν να επιβιώσουν σε περιόδους αποξήρανσης. Για παράδειγμα, σε μια περίπτωση, τα ασιατικά πράσινα μύδια *Perna viridis* επέζησαν σε ένα ταξίδι δύο μηνών σε μια φορτηγίδα που μεταφέρθηκε με ένα βαρύ ανυψωτικό πλοίο από τη βορειοανατολική Ασία στο Βόρειο Κουίνσλαντ (Andersen et al. 2006). Αν και η φορτηγίδα εισήχθη έξω από το νερό ως φορτίο του βαρέως ανυψωτικού πλοίου, τα ασιατικά πράσινα μύδια επέζησαν από το ταξίδι των δύο περίπου μηνών. Επομένως, μια τέτοια μέθοδος μεταφοράς, χωρίς διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης, δεν εξαλείφει τον κίνδυνο μετατόπισης εξωτικών θαλάσσιων



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

ειδών. Ο καθαρισμός του σκάφους μόλις αυτό βγήκε από το νερό θα μείωνε τον κίνδυνο βιοασφάλειας.

#### **4. Ο ρόλος της βιολογικής ρύπανσης των σκαφών στη μετατόπιση θαλάσσιων παθογόνων**

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) ορίζει τη βιολογική ρύπανση ως την ανάπτυξη και τη συσσώρευση οργανισμών σε βυθισμένες επιφάνειες ή κατασκευές πλοίων (International Maritime Organization [IMO], 2011). Συνήθως, οποιοδήποτε υπόστρωμα τοποθετείται σε φυσικά ύδατα αποικίζεται γρήγορα από μικροοργανισμούς (δημιουργώντας ένα βιοφίλμ, γνωστό και ως στρώμα γλίτσας), το οποίο ακολουθείται από μια διαδοχή ποικίλων αδρανών ή καθιστών μικρό- και μακρό οργανισμών (Amara et al., 2018). Η βιολογική ρύπανση των σκαφών αναγνωρίζεται ως μια σημαντική, και ίσως η σημαντικότερη, οδός για την εισαγωγή, την εγκατάσταση και την επακόλουθη εξάπλωση θαλάσσιων μη αυτόχθονων μικροοργανισμών (Bailey et al., 2020). Παρόμοια με τις ανησυχίες σχετικά με τη μεταφορά ανθρώπινων παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό έρματος των πλοίων (Ruiz et al., 2000a), η δυνατότητα της βιολογικής ρύπανσης των πλοίων να λειτουργεί ως φορέας μη αυτόχθονων παθογόνων μικροοργανισμών έχει επισημανθεί εδώ και αρκετό καιρό (Howard, 1994). Παθογόνα έχουν βρεθεί σε βιοφίλμ που αναπτύσσονται στις επιφάνειες των σκαφών (Shikuma and Hadfield, 2010), και οι ώριμοι οργανισμοί εντός των βιολογικών συγκεντρώσεων ρύπανσης των σκαφών είναι πιθανότερο να φιλοξενούν παθογόνα από ό,τι τα νεότερα ή προ νυμφικά πλαγκτονικά τους στάδια που σχετίζονται με το νερό έρματος.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, ο όρος παθογόνο χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει ιούς, βακτήρια, πρωτόζωα και μύκητες που προκαλούν ασθένειες σε άλλους οργανισμούς- ο όρος σκάφος χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει κάθε περιγραφή πλοίου, βάρκας ή άλλου σκάφους που χρησιμοποιείται στην πλωτή ναυσιπλοΐα, δηλαδή περιλαμβάνονται τόσο τα σκάφη αναψυχής όσο και τα εμπορικά



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

σκάφη. Ο ρόλος των ανθρωπογενών φορέων στις βιοτικές ανταλλαγές σε παγκόσμια κλίμακα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε πρότυπα και διαδικασίες που συνδέονται με μετατοπίσεις μικροοργανισμών και βιογεωγραφία (Ruiz et al., 2000b), επομένως το μέγεθος και οι επιπτώσεις των θαλάσσιων μετατοπίσεων μικροοργανισμών είναι πιθανότατα "κατά πολύ υποτιμημένες" (Lohan et al., 2020). Ωστόσο, οι πρακτικές δυσκολίες στην ταυτοποίηση και ανίχνευση μικροοργανισμών και η έλλειψη βασικών γνώσεων σχετικά με τις γεωγραφικές περιοχές εξάπλωσης των ιθαγενών οργανισμών έχουν παρεμποδίσει τις ερευνητικές προσπάθειες (Lohan et al., 2020). Στην ανάλυση κινδύνου για την υποστήριξη της εφαρμογής των κανονισμών της Νέας Ζηλανδίας για τη βιολογική ρύπανση (Ministry for Primary Industries New Zealand [MPI], 2018), οι Bell κ.ά. (2011) προσδιόρισαν ότι οι πρόσφατες αλλαγές στα πρότυπα ναυτιλίας, συμπεριλαμβανομένων του αυξημένου όγκου της ναυτιλίας, της επέκτασης των εμπορικών διαδρομών και των αυξημένων ταχυτήτων των σκαφών, παρείχαν μεγαλύτερη πιθανότητα μετατόπισης θαλάσσιων μη αυτόχθονων μακρό οργανισμών.

Ο ρυθμός παράδοσης μικροοργανισμών που σχετίζονται με τη βιολογική ρύπανση των σκαφών μπορεί να αυξάνεται ομοίως με την πάροδο του χρόνου (Ragenkopp-Lohan et al., 2020). Επομένως, ο ρόλος της ναυτιλίας, και ιδίως του βιολογικού ρύπανσης των πλοίων, στις μετακινήσεις παθογόνων μπορεί να υπονομεύσει τους κανονισμούς και τις βελτιωμένες πρακτικές διαχείρισης που αποσκοπούν στην αντιμετώπιση των κυριότερων ανθρωπογενών φορέων για τις ιστορικές μετακινήσεις παθογόνων, όπως οι υδατοκαλλιέργειες και η αλιεία (Ragenkopp-Lohan et al., 2020). Ενώ η βιολογική ρύπανση των σκαφών έχει επίσης αποτελέσει αντικείμενο αυξημένου ελέγχου και διαχείρισης σε ορισμένες δικαιοδοσίες (Georgiades et al., 2020), παραμένει σε μεγάλο βαθμό μη ρυθμισμένος φορέας οργανισμών ευρείας κλίμακας τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Οι απειλές που θέτουν οι μη αυτόχθονες παθογόνοι οργανισμοί είναι παρόμοιες με τους θαλάσσιους μη αυτόχθονες μακροοργανισμούς: μόλις εγκατασταθούν είναι δύσκολο να



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

ελεγχθούν και η εξάλειψη είναι συχνά ανέφικτη ή ανεπιτυχής (Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science [CEFAS], 2009- Georgiades 2020).

Συνεπώς, η πρόληψη είναι το μόνο αποτελεσματικό μέτρο (Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science [CEFAS], 2009- Georgiades 2016). Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την οστρακοκαλλιέργεια και την αλιεία, όπου η εισαγωγή και η εγκατάσταση νέων παθογόνων μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Για παράδειγμα, η *Bonamia ostreae* και η *Marteilia refringens* μείωσαν δραστικά την ευρωπαϊκή παραγωγή καλλιεργούμενων πλατύ στρειδιών (*Ostrea edulis*) από 29.595 τόνους το 1961 σε 5.921 τόνους το 2000 (Culloty and Mulcahy, 2007). Μόνο μεταξύ του 1980 και του 1983, οι εκτιμώμενες απώλειες στη Γαλλία περιλάμβαναν μείωση της απασχόλησης στη βιομηχανία κατά 20%, 240 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ σε τζίρο και 200 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ σε προστιθέμενη αξία (Arzul et al., 2006). Η ευρωπαϊκή παραγωγή πλατύ στρείδι έχει σταθεροποιηθεί αλλά σε χαμηλά επίπεδα (<3.000 τόνοι, Gouilletquer, 2004), χρησιμοποιώντας τροποποιημένες τεχνικές εκτροφής με χαμηλότερη απασχόληση από αυτή που παρείχε ιστορικά ο κλάδος (Arzul et al., 2006, Culloty and Mulcahy, 2007). Με βάση αυτές τις επιπτώσεις, η εισαγωγή του *B. ostreae* στη Νέα Ζηλανδία το 2015 οδήγησε στην προληπτική αποψίλωση όλων των αποθεμάτων καλλιεργούμενων πλατύστρικων στρειδιών (*O. chilensis*) για την προστασία των μη μολυσμένων περιοχών, ιδίως της αλιείας άγριων στρειδιών Bluff στο νότιο άκρο της Νότιας Νήσου (Farnsworth 2020).

Ο μικροπαραλλακτικός ιός του έρπητα των οστρακοειδών 1 (OsHV-1) έχει προκαλέσει μαζική θνησιμότητα σε ιχθύ δια και νεαρά στρείδια του Ειρηνικού (*Crassostrea gigas*) στη Γαλλία (Ségarra 2010), την Αυστραλία (Paul-Pont 2014) και τη Νέα Ζηλανδία (Bingham 2013). Κατά τη διάρκεια των αρχικών κρουσμάτων, καταγράφηκαν απώλειες αποθεμάτων έως και 100% (Keeling 2014), ενώ η ασθένεια μείωσε στο μισό την παραγωγή στρειδιών Ειρηνικού της Νέας Ζηλανδίας. Οι άμεσες επιπτώσεις στη βιομηχανία και το κόστος αντιμετώπισης της βιοασφάλειας για τον OsHV-1 και το *B. ostreae* στη Νέα Ζηλανδία ξεπέρασαν κατά πολύ εκείνες που



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

σχετίζονται με τους θαλάσσιους μη αυτόχθονες μακροοργανισμούς (Georgiades et al., 2020). Η εισαγωγή του *Haplosporidium nelsoni* στις μεσοατλαντικές ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών τη δεκαετία του 1950 είχε επίσης εκτεταμένες επιπτώσεις στους πληθυσμούς της *Crassostrea virginica*, με θνησιμότητα που ξεπέρασε το 90% στους κόλπους Delaware και Chesapeake. Μεταξύ 1958 και 1983, υπολογίστηκε ότι το *H. nelsoni* είχε μειώσει τις εκφορτώσεις στρειδιών στον κόλπο Delaware κατά δύο τρίτα. Η εισαγωγή του *H. nelsoni*, σε συνδυασμό με τη ρύπανση και την υπεραλίευση των στρειδιών, οδήγησε σε μεγάλης κλίμακας οικολογικές επιπτώσεις στον Κόλπο Chesapeake (Kemp et al., 2005) και οι εκτεταμένες προσπάθειες διαχείρισης και αποκατάστασης έχουν επιτύχει σχετικά μέτρια επιτυχία.

Η αλιεία στον κόλπο Chesapeake μειώθηκε στο 2% των ιστορικών αλιευμάτων της μέσα σε 30 χρόνια και εξετάστηκε σοβαρά το ενδεχόμενο εισαγωγής και καλλιέργειας μη ιθαγενών ειδών στρειδιών (συμπεριλαμβανομένων των *C. gigas* και *C. ariakensis*) (Tamburri et al., 2008). Ενώ έχουν θεσπιστεί κανονισμοί για τη βιολογική ρύπανση των σκαφών από ορισμένες δικαιοδοσίες (Georgiades et al., 2020), αυτοί επικεντρώνονται σε μεγάλο βαθμό στην πρόληψη της μετατόπισης θαλάσσιων μη αυτόχθονων μακροοργανισμών. Ωστόσο, εμφανίζονται νέες πληροφορίες σχετικά με τη μετατόπιση παθογόνων μικροοργανισμών που σχετίζονται με τη βιολογική ρύπανση (RagenkorrLohan et al., 2020). Τα μέτρα διαχείρισης της βιολογικής ρύπανσης που εφαρμόζονται συνήθως στα σκάφη, όπως ο καθαρισμός της μακρορύπανσης μέσα στο νερό [δηλαδή ο αντιδραστικός καθαρισμός μέσα στο νερό (RIC)], προκαλούν επίσης ανησυχία, καθώς μπορεί να αυξήσουν την πιθανότητα απελευθέρωσης και εγκατάστασης παθογόνων σε νέες περιοχές.

Υπό το φως των σημαντικών αρνητικών συνεπειών που έχουν προκαλέσει μέχρι στιγμής οι νέες εισαγωγές παθογόνων, η κατανόηση του κινδύνου μετατόπισης παθογόνων από τη βιολογική ρύπανση των σκαφών είναι ζωτικής σημασίας για την ενημέρωση σχετικά με τις κατευθυντήριες γραμμές, τους κανονισμούς και τις διαχειριστικές προσεγγίσεις για την προστασία των θαλάσσιων αξιών, όπως η



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

βιοποικιλότητα, οι συνήθειες και ψυχαγωγικές πρακτικές, η αλιεία και η υδατοκαλλιέργεια. Η παρούσα ανάλυση εξετάζει τη βιβλιογραφία για να διερευνήσει την πιθανότητα αυτής της οδού μετατόπισης, συμπεριλαμβανομένων των συνεπειών για τη συντήρηση των σκαφών, και συζητά πιθανές επιλογές διαχείρισης του κινδύνου, κατά περίπτωση.

#### **4.1 Μετατόπιση παθογόνων που σχετίζονται με τη βιολογική ρύπανση των σκαφών**

Ο Howard (1994) σημείωσε ότι η εγχώρια μεταφορά του *B. ostreae* από την Κορνουάλη στο Πλίμουθ (Αγγλία) πιθανόν να έγινε με βιολογική ρύπανση, η οποία περιλάμβανε ζωντανά μαλάκια, σε φορτηγίδες από σκυρόδεμα. Το συμπέρασμα αυτό βασίστηκε στο γεγονός ότι το Πλίμουθ δεν είχε ιστορικό της νόσου ούτε λόγο να δέχεται μεταφορές ζωντανών στρειδιών για σκοπούς υδατοκαλλιέργειας (Howard, 1994). Η εξάπλωση του *B. ostreae* έχει επίσης συνδεθεί με τη βιολογική ρύπανση πλοίων στις Κάτω Χώρες και στην Ιρλανδία. Το *Bonamia ostreae* εντοπίστηκε στο νότιο ημισφαίριο (Νέα Ζηλανδία) το 2015 (Lane et al., 2016) και πιθανότατα εισήχθη μέσω βιολογικής ρύπανσης από σκάφη (Lane et al., 2020). Η εξάπλωση του *B. exitiosa*, από τη νότια Νέα Ζηλανδία στο Βόρειο Ημισφαίριο και την Αργεντινή, έχει ομοίως συνδεθεί με τη ναυτιλία (Lane et al., 2018). Το *B. ostreae* και άλλα παθογόνα μαλάκια συνδέονται με μη αυτόχθονες ασπιδοφόρους, υπογραμμίζοντας τον πιθανό ρόλο των μη μαλακίων βιολογικών ειδών ως φορέων αυτού του παθογόνου.

Η βιολογική ρύπανση των σκαφών προτείνεται ως υπεύθυνη για την εισαγωγή του OsHV-1 στη Νέα Ζηλανδία (Lane et al., 2020) και την Αυστραλία και την επακόλουθη εξάπλωσή του στην Αυστραλία, στην Τασμάνια και τη Νότια Αυστραλία. Οι Fuhrmann και Hick (2020) διαπίστωσαν ότι η εργαστηριακή μετάδοση του OsHV-1 μεταξύ δοτών και αφελών στρειδιών του Ειρηνικού μέσω ενός προσομοιωμένου σεναρίου βιολογικής ρύπανσης ήταν αληθοφανής αλλά περίπλοκη. Ενώ η μετάδοση από άλλα είδη βιολογικών ρύπων δεν παρατηρήθηκε από τους Fuhrmann και Hick (2020), η συσχέτιση



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

του OsHV-1 με ορισμένους οργανισμούς βιολογικών ρύπων (π.χ. είδη βρυοζώων) υποδηλώνει ότι μπορεί να προστατεύουν τον ιό από την αποικοδόμηση. Η μετάδοση του OsHV-1 σε αφελή στρείδια του Ειρηνικού έχει επίσης αποδειχθεί μετά από συγκατοίκηση με εκτεθειμένα άγρια καβούρια και μύδια. Αυτά τα taxa έχουν εντοπιστεί προηγουμένως μέσα σε συγκροτήματα βιολογικής ρύπανσης πλοίων (Coutts et al., 2003).

Οι μηχανισμοί με τους οποίους τα θαλάσσια μη αυτόχθονα είδη μπορούν να επηρεάσουν τις αλληλεπιδράσεις παθογόνου-ξενιστή είναι πολύπλοκοι, γεγονός που έχει πιθανές συνέπειες για τη συσχέτιση και τη μεταφορά τους με σκάφη. Οι μετακινήσεις των πλοίων έχουν επίσης συνδεθεί με την εισαγωγή του *H. nelsoni* στις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά είτε μέσω της βιολογικής ρύπανσης είτε μέσω της απελευθέρωσης σπορίων του *H. nelsoni* από απορρίψεις υδάτων έρματος. Ο Hine (1996) ανέδειξε την οδό της βιολογικής ρύπανσης ως κίνδυνο εξάπλωσης του *Perkinsus marinus* και οι Pagenkopp-Lohan κ.ά. (2018) και Itoh κ.ά. (2019) κατέδειξαν περαιτέρω τη δυνατότητα της ναυτιλίας να συμβάλλει στη διασπορά των ειδών *Perkinsus* σε μεγάλες αποστάσεις. Εκτός από τα παθογόνα, είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι τα παρασιτικά ασπόνδυλα μπορεί να μεταφέρονται με τη βιολογική ρύπανση των πλοίων (Davidson et al., 2013). Βρέθηκε ότι παρασιτικά ασπόνδυλα μόλυναν το 7,8% των μυδιών που ελήφθησαν σε δείγματα από 23 σκάφη που δραστηριοποιούνται στη δυτική ακτή των ΗΠΑ, συμπεριλαμβανομένων των παρασιτικών κωπήποδων *Pseudomyicola spinosus* και *Modiolicola gracilis*. Η μεταφορά μολυσμένων μυδιών με τη διεθνή ναυτιλία έχει επίσης ενοχοποιηθεί για τη διηπειρωτική εξάπλωση μιας μεταδοτικής νεοπλασίας των μαλακίων (Yonemitsu et al., 2019).

Αξιολογώντας τους κινδύνους από παθογόνα που συνδέονται με τη μετατόπιση κελυφών μαλακίων για την αποκατάσταση υφάλων, ο Diggles (2020) σημείωσε τη δυνατότητα εισαγωγής στην Αυστραλία παθογόνων μαλακίων, συμπεριλαμβανομένων των ιριδοίων, του OsHV1 και των ειδών *Bonamia*, μέσω της βιολογικής ρύπανσης των πλοίων ειδικά και άλλων, συμπεριλαμβανομένων των ειδών *H. nelsoni* και *Perkinsus*,



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

μέσω της ναυτιλίας γενικότερα. Ο Οδηγός αναγνώρισης πεδίου της αυστραλιανής κυβέρνησης για τις ασθένειες των υδρόβιων ζώων αναγνωρίζει επίσης τη βιολογική ρύπανση των πλοίων ως πιθανή οδό για τη μετακίνηση διαφόρων ειδών Βοηπαμία και του OsHV-1. Τα παραδείγματα αυτά δείχνουν ότι ο ρόλος της ναυτιλίας, και πιο συγκεκριμένα της βιολογικής ρύπανσης των σκαφών, στη μετατόπιση παθογόνων αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως σοβαρός παράγοντας κινδύνου για την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης λοιμώξεων και εστιών ασθενειών σε διάφορες κλίμακες (εντός περιοχών και σε ωκεάνιες κλίμακες μεγάλων αποστάσεων).

## 4.2 Πιθανές επιλογές διαχείρισης

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να απελευθερωθούν από τη βιολογική ρύπανση του σκάφους: α) αποκολλώνται από το προσκολλημένο βιοφίλμ, β) διασκορπίζονται από τον προληπτικό καθαρισμό εντός του νερού (PIC), γ) αποβάλλονται από τη μακρορύπανση που παραμένει άθικτη στο σκάφος, δ) αποβάλλονται με τη μακρορύπανση που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια των συνήθων λειτουργιών του σκάφους (π.χ. πτώση των προσκολλημένων ειδών ή ενεργή διαφυγή των κινητών ειδών), διασκορπίζονται με ή χωρίς τους ξενιστές τους κατά την εφαρμογή RIC. Προσδιορίσαμε μια διττή προσέγγιση για την προστασία των θαλάσσιων ειδών από την εισαγωγή παθογόνων που σχετίζονται με την ρύπανση των σκαφών, μέσω: (1) τον περιορισμό του όγκου και της συχνότητας των μετατοπίσεων παθογόνων μέσω της συνεχιζόμενης μεταφοράς σκαφών (δηλ. πίεση πολλαπλασιασμού, Lockwood et al., 2005) και (2) την αποφυγή απελευθερώσεων παθογόνων με δραστηριότητες αντιδραστικής διαχείρισης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτών των προσεγγίσεων έχουν όλα τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο κλάδος των αντιρρυπαντικών στη ναυτιλία δημιουργήθηκε για την πρόληψη και τη διαχείριση της βιολογικής ρύπανσης στα πλοία. Το κύριο βάρος έχει δοθεί στις

Commented [AC1]: ?

Commented [AC2]: ?



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

επιφανειακές βαφές ή επικαλύψεις στις βυθισμένες επιφάνειες των πλοίων για την πρόληψη της ανάπτυξης μακροενυδάτωσης (με χρήση βιοκτόνων, όπως ενώσεις με βάση το χαλκό και τον ψευδάργυρο) ή/και τον περιορισμό της προσκόλλησης μακροενυδάτωσης (μη βιοκτόνα ή επικαλύψεις που απελευθερώνουν τη ρύπανση, όπως επικαλύψεις με βάση τη σιλικόνη- Lewis, 2020). Η χρήση βιοκτόνων επικαλύψεων αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ της αποδοτικότητας των καυσίμων των σκαφών, των μειωμένων εκπομπών καυσαερίων και της μειωμένης μετατόπισης μη αυτοχθόνων ειδών, έναντι των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βιοκτόνων (Scianni and Georgiades, 2019). Παρόλο που αυτές οι επιστρώσεις έχουν εξελιχθεί προς πιο εξελιγμένα, οικονομικά αποδοτικά και περιβαλλοντικά αποδεκτά προϊόντα, τα αντιρρυπαντικά δεν αποτρέπουν τον σχηματισμό βιοφίλμ (Dobretson, 2010) ή την τυχαία μακροβρωμιά που εγκαθίσταται κατά τη διάρκεια των περιόδων λειτουργίας των πλοίων (δηλαδή, το χρονικό διάστημα μεταξύ των αποξηλώσεων των πλοίων). Υπάρχουν περιοχές των πλοίων που δεν μπορούν να βαφτούν (π.χ. άνοδοι), είναι δύσκολο να βαφτούν (π.χ. λωρίδες στήριξης σε ξηρά αποβάθρα) ή παρουσιάζουν μη βέλτιστη απόδοση της επίστρωσης λόγω επιφανειακών ή υδροδυναμικών προβλημάτων (π.χ. θαλάσσια στήθη, σχάρες, πηδάλια και προεξοχές). Αυτές οι "εξειδικευμένες περιοχές" αποτελούν εστίες συσσώρευσης βιολογικών ρύπων (Davidson et al., 2009, 2016) που απαιτούν συνεχή επαγρύπνηση και συντήρηση (Georgiades et al., 2018- Ministry for Primary Industries New Zealand [MPI], 2018).

Ενώ οι ρυθμοί απελευθέρωσης βιοκτόνων από τις επιστρώσεις μπορούν να εκτιμηθούν και οι περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις να προβλεφθούν, δεν έχουν γίνει ποσοτικές εκτιμήσεις ή εκτιμήσεις των ρυθμών ή των ποσοτήτων απελευθέρωσης ζωντανών μικρό- ή μακρο-βρωμιδικών οργανισμών στα παράκτια οικοσυστήματα ως αποτέλεσμα των συνήθων λειτουργιών των πλοίων. Ο καθαρισμός μέσα στο νερό έχει αναδειχθεί ως η κύρια προσέγγιση για την αντιμετώπιση των περιορισμών στην απόδοση της επικάλυψης και των λειτουργικών επιπτώσεων της βιολογικής ρύπανσης που συσσωρεύεται κατά τη λειτουργία. Ο καθαρισμός μέσα στο νερό περιλαμβάνει



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

συνήθως τη χρήση συστημάτων καθαρισμού ή καροτσιών με δύτες ή τηλεχειριζόμενα συστήματα καθαρισμού ή καροτσάκι που απομακρύνουν τη βιολογική ρύπανση από τις επιφάνειες του κύτους (McClay et al., 2015- Tamburri et al., 2020).

Αν και ο καθαρισμός μέσα στο νερό πραγματοποιείται συχνά ως απάντηση σε θεμελιώδεις επιχειρησιακούς παράγοντες, όπως η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου (για την επαναφορά των επιφανειών της γάστρας σε μια πιο υδροδυναμική κατάσταση), μπορεί να έχει ακούσιες συνέπειες, όπως: (α) αυξημένη απελευθέρωση αντιρρυπαντικών βιοκτόνων στα ύδατα του περιβάλλοντος- (β) ενεργή απελευθέρωση ζωντανών οργανισμών βιορύπανσης ή των πολλαπλασιαστών τους στα τοπικά ενδιαίτηματα, με αυξημένο κίνδυνο εισαγωγής μη αυτόχθονων ειδών- και (γ) μειωμένη κατάσταση της επικάλυψης που μειώνει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των αντιρρυπαντικών (Scianni and Georgiades, 2019- Tamburri et al., 2020). Υπάρχει αυξανόμενη συναίνεση διεθνώς ότι θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση αυτών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με την απομάκρυνση από τον καθαρισμό των μικροοργανισμών μέσα στο νερό που δεν επιχειρεί να συμβάλει τα συντρίμια (δηλ. RIC) και προς RIC που συμβάλει, περιορίζει και επεξεργάζεται τα συντρίμια (RICC) ή PIC για την πρόληψη της εγκατάστασης και της ανάπτυξης των μακρορρύπων. Για όλα τα συστήματα καθαρισμού μέσα στο νερό, υπάρχουν δύο κύριες διαδικασίες που μπορούν να απελευθερώσουν βιολογικό υλικό, συμπεριλαμβανομένων παθογόνων μικροοργανισμών: (α) εφαρμογή της μονάδας καθαρισμού στην επιφάνεια του σκάφους (είτε μέσω ελλιπούς ή αναποτελεσματικής σύλληψης των συντριμμίων από την κεφαλή καθαρισμού) και (β) απελευθέρωση ανεπεξέργαστων ή ελλιπώς επεξεργασμένων λυμάτων (Scianni and Georgiades, 2019).

#### **4.3 Προσέγγιση διαχείρισης διαδρομής**



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Έχουν θεσπιστεί κανονισμοί για τη βιολογική ρύπανση ώστε να περιορίσουν τη μετατόπιση θαλάσσιων μη αυτόχθονων μακροοργανισμών (Georgiades et al., 2020). Το πρότυπο διαχείρισης κινδύνου για βιορύπανση σε σκάφη που φθάνουν στη Νέα Ζηλανδία (CRMS-BIOFOUL) της Νέας Ζηλανδίας ορίζει όρια "καθαρής γάστρας", τα οποία διέπονται από το δρομολόγιο του σκάφους.

Αυτά τα κατώτατα όρια, ενώ αναγνωρίζουν ζητήματα σκοπιμότητας και πρακτικότητας, σχεδιάστηκαν για να περιορίσουν τον πλούτο και την πυκνότητα των ειδών μακροοργανισμών, περιορίζοντας την αναπαραγωγή και την εγκατάσταση. Η ολιστική προσέγγιση του "επιπέδου ρύπανσης" που εφαρμόζει η Νέα Ζηλανδία διαχειρίζεται τον κίνδυνο, αλλά αποφεύγει τις δυσκολίες, το κόστος και τον χρόνο που σχετίζονται με τις ταξινομικές ταυτοποιήσεις (Bell et al., 2011). Η προσέγγιση αυτή προστατεύει επίσης από είδη που δεν είναι ακόμη γνωστό ότι είναι χωροκατακτητικά και δεν απαιτεί τον σχηματισμό και τη συνεχή διατήρηση καταλόγων "ειδών κινδύνου" ούτε το συνεχές κόστος της επιτήρησης και της υποβολής εκθέσεων βάσει των εν λόγω καταλόγων.

Η πιθανότητα μετατόπισης παθογόνων από τα σκάφη μειώνεται αποτελεσματικότερα με τον περιορισμό της ποσότητας των μακροενυδρωμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν ευπαθείς ξενιστές και είδη-φορείς, στα εισερχόμενα διεθνή ή διαπεριφερειακά σκάφη. Παρόμοια με την πρόβλεψη των εισερχομένων θαλάσσιων μακροοργανισμών (Bell et al., 2011), ο προσδιορισμός μελλοντικών θαλάσσιων παθογόνων υψηλού κινδύνου είναι δύσκολος- επιπλέον, η σχετική έλλειψη πληροφοριών στον τομέα αυτό (Lane et al., 2020- Pagenkopp-Lohan et al., 2020) και η πολυπλοκότητα που σχετίζεται με την εισαγωγή και την εγκατάσταση παθογόνων (ενότητα "Συσχετίσεις παθογόνων που περιλαμβάνονται στον κατάλογο του ΟΗΕ και άλλων σημαντικών παθογόνων με γνωστά είδη βιολογικής ρύπανσης") δημιουργούν προκλήσεις και αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του κινδύνου.

Επομένως, μια προσέγγιση διαχείρισης των διαδρομών για την ολιστική διαχείριση των μετακινήσεων παθογόνων που συνδέονται με τη βιολογική ρύπανση των



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

σκαφών είναι πιθανόν να είναι πιο αποτελεσματική από μια προσέγγιση που αφορά μόνο παθογόνα. Ο καθαρισμός εντός του νερού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των κινδύνων που σχετίζονται με την οδό βιορύπανσης των σκαφών (Georgiades et al., 2018). Υπάρχουν, ωστόσο, πολλαπλές προσεγγίσεις που πρέπει να εξεταστούν για την προώθηση μιας "στρατηγικής καθαρισμού" για τη ρητή ελαχιστοποίηση της μεταφοράς παθογόνων μικροοργανισμών και μικροοργανισμών. Οι ακόλουθες ενότητες βασίζονται στα υπάρχοντα εργαλεία, ενώ παράλληλα προσδιορίζουν τις προκλήσεις, τα κενά γνώσης και τις πιθανές λύσεις.

#### **4.4 Προληπτικός καθαρισμός μέσα στο νερό (PIC) για την υποστήριξη της συνεχιζόμενης συντήρησης των σκαφών**

Ο προληπτικός καθαρισμός μέσα στο νερό (PIC) είναι μια αναδυόμενη προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την πρόληψη του σχηματισμού βιοϋμενίου, την απομάκρυνσή του από το κύτος (συμπεριλαμβανομένων των μικροσκοπικών σταδίων ζωής των οργανισμών μακρορύπανσης) και τελικά για την πρόληψη ή τη μείωση της εγκατάστασης και της ανάπτυξης της μακρορύπανσης (Scianni and Georgiades, 2019). Λόγω της εφαρμογής του σε πρώιμο στάδιο της διαδικασίας βιολογικής ρύπανσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν λιγότερο λειαντικές τεχνικές που είναι πιο συνεπείς με τις συστάσεις των κατασκευαστών αντιρρυπαντικών συστημάτων. Παρόλο που απελευθερώνεται σημαντική ποσότητα μικροσκοπικού υλικού στο θαλάσσιο περιβάλλον, η PIC θεωρείται ως δραστηριότητα σχετικά χαμηλού κινδύνου, επειδή ελαχιστοποιεί τη μετατόπιση των ειδών μακρορύπανσης (Department of Agriculture [DOA] et al., 2015) και, επομένως, ελαχιστοποιεί την πιθανή μετατόπιση παθογόνων μικροοργανισμών που πολλαπλασιάζονται σε οργανισμούς μακρορύπανσης.

Επιβλαβή μικροφύκη (συμπεριλαμβανομένων των διατομών και των δινομαστιγωτών) και παθογόνα μπορούν να εμφανιστούν στο βιοφίλμ των αγγείων.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Ωστόσο, ο σχηματισμός βιοφίλμ και η επακόλουθη αποκόλλησή του από τις υποβρύχιες περιοχές των σκαφών κατά τη διάρκεια των συνήθων λειτουργιών (συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεων με ρυμουλκά, φορτηγίδες δεξαμενισμού, πιλοτικά σκάφη, φτερά, σχοινιά κ.λπ.) δεν μπορεί να αποφευχθεί (Dobretson, 2010) χωρίς σχεδόν συνεχή συντήρηση. Μπορεί να είναι νοητή η επεξεργασία των απελευθερωμένων μικροοργανισμών που σχετίζονται με το βιοφίλμ κατά τη διάρκεια της PIC [π.χ. έκθεση των εκρών της μονάδας καθαρισμού σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV)], ωστόσο ο ρόλος του βιοφίλμ στις μετακινήσεις παθογόνων και μη αυτόχθονων ειδών απαιτεί αποσαφήνιση, επομένως οι αποφάσεις σχετικά με τη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα της PIC απαιτούν την εξέταση αυτής της αβεβαιότητας.

#### **4.5 Η προσέγγιση "Καθαρίστε πριν φύγετε"**

Για τον περαιτέρω περιορισμό της πιθανότητας μετατόπισης παθογόνων μικροοργανισμών, η υιοθέτηση της προσέγγισης του αντιδραστικού καθαρισμού μέσα στο νερό (RIC) "καθαρίστε πριν φύγετε" θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, λαμβάνοντας υπόψη ότι η γεωγραφική προέλευση της συσσωρευμένης ρύπανσης υπαγορεύει τον κίνδυνο βιοασφάλειας (Department of Agriculture [DOA] et al., 2015). Η προσέγγιση αυτή αναγνωρίζει ότι το πιο αποτελεσματικό σημείο εστίασης για τη διαχείριση είναι η πρόληψη και, ως εκ τούτου, επιδιώκει να διαχειριστεί τον κίνδυνο μετατόπισης παθογόνων στην πηγή για να περιορίσει την εξάπλωση και τις επιπτώσεις στα κατάντη (Ricciardi et al., 2020). Η εφαρμοσιμότητα αυτής της πρακτικής εξαρτάται από το προηγούμενο δρομολόγιο του σκάφους, την κατάσταση παθογόνων στην περιοχή υποδοχής και στις περιοχές που έχουν επισκεφθεί προηγουμένως και την εγγύτητα σε περιοχές υψηλής αξίας. Η διαχείριση της περιβαλλοντικής μόλυνσης από τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικής προστασίας αποτελεί βασικό στοιχείο αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μια τέτοια προσέγγιση (Scianni and Georgiades, 2019).

Η μακρά ιστορία των καταστροφικών επιπτώσεων που προκαλούνται από τη διασυννοριακή μετατόπιση θαλάσσιων παθογόνων έχει οδηγήσει σε βελτιωμένες



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

πρακτικές από ρυθμιστικούς και μη ρυθμιστικούς ελέγχους που εφαρμόζονται σε καθιερωμένες οδούς, όπως η αλιεία και η υδατοκαλλιέργεια. Τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι η βιολογική ρύπανση των σκαφών είναι επίσης μια βιώσιμη και σημαντική οδός για τη μετατόπιση θαλάσσιων παθογόνων που αποτελεί κίνδυνο για τις θαλάσσιες αξίες. Συνεπώς, αυτή η σε μεγάλο βαθμό μη ελεγχόμενη οδός αποτελεί σημαντικό κενό στα μέτρα βιοασφάλειας που έχουν δεσμευτεί για την πρόληψη και τον έλεγχο των υδάτινων ασθενειών.

Τα προληπτικά μέτρα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στους κανονισμούς της Νέας Ζηλανδίας και της Καλιφόρνιας για τη βιολογική ρύπανση, μειώνουν την πιθανότητα μετατόπισης παθογόνων μειώνοντας την ποικιλομορφία, το μέγεθος του πληθυσμού και τη συνολική μάζα των ευπαθών ξενιστών και των ειδών-φορέων στα σκάφη. Τα αντιδραστικά μέτρα, όπως η απομάκρυνση της μακρορύπανσης μέσα στο νερό, μπορεί, ωστόσο, να επιδεινώσουν το πρόβλημα και πιθανόν να χρειαστούν τροποποιήσεις για τη διαχείριση του κινδύνου που συνδέεται με τα παθογόνα. Ενώ τα διδάγματα που αντλήθηκαν από τη διαχείριση του έρματος, την επεξεργασία λυμάτων και τις βιομηχανίες υδατοκαλλιέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη κριτηρίων καθαρισμού και επεξεργασίας λυμάτων για αντιδραστικές προσεγγίσεις, η πρόληψη ή η σημαντική μείωση της μετατόπισης παθογόνων μικροοργανισμών με τη χρήση προληπτικών μέτρων για το βιολογικό ρύπανση των σκαφών είναι πιθανό να είναι πιο αποτελεσματική. Ωστόσο, τόσο οι προληπτικές όσο και οι αντιδραστικές λύσεις έχουν τις δικές τους μοναδικές προκλήσεις. Η ισορροπία μεταξύ της προστασίας της θάλασσας και της μείωσης του κινδύνου σε σχέση με τη σκοπιμότητα και το κόστος της επεξεργασίας απαιτεί προσεκτική εξέταση.

## **5. Συζήτηση**

Η διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων συνεπάγεται σε σημαντικό βαθμό στο οικονομικό κόστος, τόσο για τα προληπτικά όσο και για τα αντιδραστικά μετρά. Η



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

ανάγκη για τακτική συντήρηση καθαρισμού ή εφαρμογής αντιρρυπαντικών επιστρώσεων, οδηγεί σε περιόδους κατά τις οποίες τα πλοία παραμένουν εκτός λειτουργίας, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται ο πλοιοκτήτης με άμεσες δαπάνες συντήρησης και έμμεσες απώλειες εσοδών λόγω καθυστέρησης δρομολογίων. Πάρα το γεγονός ότι η οικονομική σύγκριση των πρακτικών δεν αποτελεί μέρος της παρούσας εργασίας, η διερεύνηση των διαθέσιμων εκτιμήσεων κόστους είναι κρίσιμη για τη συνολική κατανόηση της αποτελεσματικότητας των επιλογών διαχείρισης.

Οι μελέτες των Floerl et al.(2010) και Inglis et al.(2012) προσφέρουν ένα αξιόπιστο πλαίσιο ανάλυσης, καταδεικνύοντας ότι το κόστος απομάκρυνσης βιορύπανσης αυξάνεται σημαντικά με το μέγεθος του σκάφους και τη χρήση εξειδικευμένων υποδομών, όπως οι ξηρές δεξαμενές. Η μίσθωση δεξαμενής και η πρόσβαση σε εξοπλισμό αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος κόστους για μικρά και μεσαίου μεγέθους σκάφη, ενώ στα μεγάλα πλοία ο χρόνος και οι τεχνικές απαιτήσεις του καθαρισμού(π.χ. υδροβολή υψηλής πίεσης) καθίστανται σημαντικοί παράγοντες.

Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ προληπτικών και αντιδραστικών μέτρων δεν περιορίζεται στο οικονομικό αλλά επεκτείνεται στις μακροπρόθεσμες λειτουργικές επιπτώσεις. Οι προληπτικοί καθαρισμοί και η εφαρμογή συγχρόνων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων στοχεύουν στη μείωση της συσσώρευσης βιοϋμενίου, γεγονός που μπορεί να μειώσει σημαντικά τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του πλοίου, επιφέροντας μακροπρόθεσμο οικονομικό όφελος. Πάρα ταύτα, η επένδυση σε τεχνολογίες υψηλού κόστους συχνά αποθαρρύνει τους πλοιοκτήτες, ιδιαίτερα όταν η απόδοση της επένδυσης δεν είναι άμεσα ορατή.

Αντίθετα, τα αντιδραστικά μέτρα εφαρμόζονται μόνο όταν η βιορύπανση έχει ήδη προκαλέσει μετρήσιμη υποβάθμιση της απόδοσης του πλοίου. Παρότι αυτά τα μέτρα μπορεί να φαίνονται οικονομικότερα σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο, μακροπρόθεσμα οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμων, υψηλότερες εκπομπές και μεγαλύτερους κύκλους φθοράς των επιστρώσεων. Η κριτική προσέγγιση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πραγματικό κόστος της αντιδραστικής διαχείρισης είναι συχνά υποεκτιμημένο, καθώς



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι έμμεσες λειτουργικές απώλειες.

Ο καθαρισμός σε ξηρά δεξαμενή αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο πλήρους απομάκρυνσης των βιολογικών οργανισμών και εφαρμογής νέων επιστρώσεων, αλλά συνοδεύεται από πολύ υψηλό κόστος και μεγάλη διάρκεια εργασιών (συχνά 5–10 ημέρες). Επιπλέον, η διαθεσιμότητα ξηρών δεξαμενών είναι περιορισμένη σε ορισμένες περιοχές (π.χ. Αυστραλία), οδηγώντας σε καθυστερήσεις ή ταξίδια προς άλλα λιμάνια, τα οποία επιβαρύνουν ακόμη περισσότερο τον προϋπολογισμό.

Αντίθετα, ο καθαρισμός εντός νερού παρουσιάζεται ως ταχύτερη και συχνά φθηνότερη επιλογή—ιδιαίτερα για μικρά και μεσαίου μεγέθους πλοία—με εξοικονόμηση 10–65% σε σχέση με τον καθαρισμό σε ξηρά δεξαμενή. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή φέρει σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε απελευθέρωση βιολογικού υλικού, βιοκτόνων ή χημικατακτακτικών ειδών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπλέον, τα συστήματα καθαρισμού εντός νερού παρουσιάζουν τεχνικούς περιορισμούς, καθώς δεν μπορούν να προσεγγίσουν όλες τις εξειδικευμένες περιοχές του κύτους, γεγονός που μειώνει τη συνολική αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.

Η κριτική σύγκριση υπογραμμίζει ότι, παρά το χαμηλότερο κόστος, ο καθαρισμός εντός νερού ενδέχεται να μην είναι κατάλληλος για πλοία υψηλού κινδύνου ή για περιοχές με αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα.

Οι οικονομικές εκτιμήσεις των Floerl et al. (2010) και Inglis et al. (2012) βασίζονται σε δεδομένα που πλέον απέχουν πάνω από μία δεκαετία. Οι συνθήκες της ναυτιλιακής αγοράς έχουν αλλάξει δραματικά έκτοτε, με σημαντική αύξηση στο κόστος υλικών, στη ζήτηση για δεξαμενές, και στις απαιτήσεις συμμόρφωσης με νέους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Επομένως, η πραγματική οικονομική επιβάρυνση για το 2025 είναι πιθανό να είναι σημαντικά υψηλότερη.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

Η έλλειψη πρόσφατων, συστηματικών μελετών αποτελεί ένα ερευνητικό κενό, το οποίο δυσχεραίνει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων από τις ναυτιλιακές εταιρείες και τις ρυθμιστικές αρχές.

Παρά το οικονομικό κόστος, η επιλογή στρατηγικής διαχείρισης της βιορύπανσης δεν μπορεί να στηρίζεται αποκλειστικά σε οικονομικά κριτήρια. Η μεταφορά βιολογικού υλικού από μη συμμορφούμενα πλοία αποτελεί σημαντική απειλή για τη θαλάσσια βιοποικιλότητα, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλής οικολογικής ευαισθησίας. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάσχυση και ο καθαρισμός σε ξηρά δεξαμενή, αν και ακριβότερη λύση, παραμένει η πλέον φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος για μικρά και μεσαία σκάφη.

Για μεγάλα εμπορικά πλοία, όπου η δεξαμενή δεν είναι πάντοτε τεχνικά ή οικονομικά εφικτή, αναδεικνύεται η ανάγκη ανάπτυξης προηγμένων μεθόδων in-water cleaning με συστήματα σύλληψης (capture Systems), ώστε να περιοριστεί ο κίνδυνος διασποράς ξενικών ειδών.

Η σύγχρονη εικόνα αναδεικνύει ότι καμία από τις υπάρχουσες μεθόδους δεν αποτελεί ιδανική λύση. Το πραγματικό ερώτημα δεν είναι ποια μέθοδος είναι φθηνότερη, αλλά ποιος συνδυασμός τεχνικών μπορεί να εξισορροπήσει οικονομική βιωσιμότητα, ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικού κινδύνου και βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης.

Η παρούσα ανάλυση καθιστά σαφές ότι απαιτείται:

- Α)επικαιροποίηση του κανονιστικού πλαισίου,
- Β)Ανάπτυξη νέων τεχνολογιών χωρίς βιοκτόνα,
- Γ)προτυποποίηση συστημάτων in-water cleaning,
- Δ)μακροπρόθεσμος σχεδιασμός διαχείρισης,
- Ε)διεθνής συνεργασία για την αξιολόγηση κινδύνων βιοασφάλειας.



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

## **6. Συμπεράσματα**

Η βιορύπανση των υφάλων των πλοίων αναδεικνύεται, μέσα από τη διεθνή βιβλιογραφία και την παρούσα ανάλυση, ως μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει σύγχρονα η ναυτιλιακή βιομηχανία. Η φύση του φαινομένου είναι ενδογενώς σύνθετη και πολυεπίπεδη, καθώς συνδυάζει βιολογικούς, τεχνολογικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθιστώντας την αντιμετώπισή του απαιτητική και πολυδιάστατη. Η εξέλιξη της βιοπροσκόλλησης σε στάδια (μικρορύπανση – μακρορύπανση – πλήρης κάλυψη επιφάνειας) αποδεικνύει την ανάγκη για πρώιμη παρέμβαση, καθώς η καθυστερημένη διαχείριση συνδέεται με εκθετικά αυξανόμενες επιπτώσεις.

Σε τεχνικό επίπεδο, η παρούσα μελέτη κατέδειξε ότι η βιορύπανση επηρεάζει άμεσα την υδροδυναμική συμπεριφορά των πλοίων, αυξάνοντας την αντίσταση τριβής και μειώνοντας την επιχειρησιακή αποδοτικότητα. Ακόμη και λεπτά στρώματα βιοϋμενίου μπορούν να αυξήσουν την κατανάλωση καυσίμων κατά 5–10%, ενώ η εκτεταμένη μακρορύπανση μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ταχύτητας έως και 40% και αύξηση κατανάλωσης καυσίμων έως και 30% (Schultz, 2007). Οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι αμελητέες, ιδίως σε έναν κλάδο όπου τα καύσιμα αποτελούν έως και το 60% των λειτουργικών εξόδων. Επομένως, το πρόβλημα δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως περιβαλλοντικό, αλλά και ως ζήτημα επιχειρησιακής και οικονομικής βιωσιμότητας.

Εξίσου κρίσιμη είναι η περιβαλλοντική διάσταση της βιορύπανσης. Η ανάπτυξη οργανισμών στο κύτος του πλοίου συνδέεται άμεσα με την ανεξέλεγκτη μεταφορά θαλάσσιων ξενικών ειδών, τα οποία μπορούν να εποίκησουν νέα οικοσυστήματα και να προκαλέσουν σημαντικές οικολογικές ανισορροπίες. Σε πολλές περιπτώσεις, τα είδη αυτά μπορούν να λειτουργήσουν ως παθογόνοι φορείς, με πιθανές επιπτώσεις τόσο στη θαλάσσια ζωή όσο και στην ανθρώπινη υγεία (Leung & MacKenzie, 2021). Η διπλή απειλή από το έρμα και τη βιορύπανση επιβεβαιώνει ότι η ολοκληρωμένη διαχείριση



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

του προβλήματος αποτελεί υποχρέωση στο πλαίσιο της σύγχρονης θαλάσσιας περιβαλλοντικής πολιτικής.

Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις, δεν υπάρχει ακόμη «τέλεια» λύση για την πλήρη εξάλειψη της βιορύπανσης. Οι αντιρρυπαντικές επιστρώσεις με βιοκτόνα, αν και αποτελεσματικές, έχουν περιβαλλοντικές συνέπειες λόγω της σταδιακής έκλυσης μετάλλων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, οι μη βιοκτόνες, φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες, όπως οι επιστρώσεις σιλικόνης και οι φωτοκαταλυτικές επιφάνειες, παρουσιάζουν υψηλό κόστος και απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας για να αποδώσουν βέλτιστα. Η πρόσδος των τελευταίων δεκαετιών αποδεικνύει ότι καμία τεχνολογία δεν μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα διαχείρισης βιορύπανσης, στο οποίο εντάσσονται η παρακολούθηση, η τακτική επιθεώρηση και η ορθολογική επιλογή τεχνικών καθαρισμού.

Επιπλέον, αξιοσημείωτο εύρημα αποτελεί το σημαντικό οικονομικό κόστος των μέτρων διαχείρισης. Ο καθαρισμός σε ξηρά δεξαμενή, οι επιστρώσεις και οι καθυστερήσεις στο επιχειρησιακό πρόγραμμα του πλοίου συνεπάγονται σημαντικές δαπάνες για τους πλοιοκτήτες. Παρότι ο καθαρισμός εντός του νερού φαίνεται οικονομικά προτιμότερη λύση, η χρήση του παραμένει αντικείμενο αντιπαράθεσης λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η πιθανή απελευθέρωση οργανισμών ή βιοκτόνων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι αναλύσεις κόστους που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Floerl et al., 2010· Lewis, 2013) υπογραμμίζουν ότι η οικονομική διάσταση πρέπει να αξιολογείται παράλληλα με την τεχνική και περιβαλλοντική.

Σε ρυθμιστικό επίπεδο, η ύπαρξη κατευθυντήριων γραμμών από τον IMO (2011, 2021) αποτελεί σημαντικό βήμα προς τη δημιουργία ενός διεθνούς πλαισίου, χωρίς όμως να διασφαλίζει πλήρη συμμόρφωση. Η έλλειψη υποχρεωτικής εφαρμογής των προτύπων για τη βιορύπανση δημιουργεί κενά και ανομοιομορφίες μεταξύ κρατών, γεγονός που δυσχεραίνει την αποτελεσματική διαχείριση του προβλήματος σε παγκόσμιο επίπεδο. Η



*“Αριάδνη Χριστοπούλου”,*

*“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”*

διεθνής ναυτιλία, ως παγκόσμια βιομηχανία, απαιτεί ενιαία στρατηγική και όχι μεμονωμένες εθνικές πρωτοβουλίες.

Συνολικά, η βιορύπανση αναγνωρίζεται ως πρόβλημα που απαιτεί συντονισμένη, διεπιστημονική και πολυεπίπεδη αντιμετώπιση. Η τεχνολογία από μόνη της δεν αρκεί· χρειάζονται κανονισμοί, οικονομικά κίνητρα, εκπαίδευση πληρωμάτων, επενδύσεις σε έρευνα και συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα. Το μέλλον ίσως βρίσκεται σε συνδυαστικές λύσεις, όπου υλικά νέας γενιάς, συστήματα αισθητήρων, ρομποτικοί καθαρισμοί και έξυπνα εργαλεία πρόγνωσης θα δημιουργήσουν μια ολοκληρωμένη στρατηγική προστασίας των υφάλων.

Η αποτελεσματική διαχείριση της βιορύπανσης συμβάλλει όχι μόνο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων, αλλά και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας, ενισχύοντας τη μετάβαση προς μια περισσότερο βιώσιμη και περιβαλλοντικά υπεύθυνη θαλάσσια μεταφορά. Η ανάγκη για συνεχή έρευνα παραμένει καίρια· οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι περιβαλλοντικές προκλήσεις καθιστούν επιβεβλημένη τη διαρκή διερεύνηση νέων λύσεων που θα συνδυάζουν υψηλή αποτελεσματικότητα, οικονομική βιωσιμότητα και περιβαλλοντική ασφάλεια.

## **7. Προτάσεις για μελλοντική ερευνά**

Η βιορύπανση αποτελεί ένα σύνθετο και δυναμικά εξελισσόμενο πεδίο έρευνας με σημαντικές επιστημονικές, τεχνολογικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές διαστάσεις. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου, καθώς και οι επιπτώσεις του στη ναυτιλία, στο θαλάσσιο οικοσύστημα και στις παράκτιες οικονομικές δραστηριότητες, καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω εμβάθυνση της επιστημονικής γνώσης και την ανάπτυξη καινοτόμων ερευνητικών προσεγγίσεων. Στο πλαίσιο αυτό, τα ακόλουθα ερευνητικά αντικείμενα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ανταποκρίνονται στις σύγχρονες προκλήσεις και προοπτικές του πεδίου:



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Μελέτη της επίδρασης της βιορύπανσης στις υδατοκαλλιέργειες και στις αλιευτικές περιοχές, με έμφαση στις επιπτώσεις στην παραγωγικότητα, στη βιοποικιλότητα και στη διασπορά παθογόνων οργανισμών.

Ανάλυση του κοινωνικό-οικονομικού αποτυπώματος της εξάπλωσης σε εισβάλλοντα είδη, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων στην τοπική οικονομία, στην απασχόληση και στη διαχείριση φυσικών πόρων.

Διερεύνηση νανοτεχνολογικών και φωτοκαταλυτικών υλικών ως καινοτόμων και μη τοξικών λύσεων για αντιρρυπαντικές επιστρώσεις, με αξιολόγηση της αποδοτικότητας, της ανθεκτικότητας και των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Ποσοτικοποίηση του οικονομικού κόστους της βιορύπανσης για τις ναυτιλιακές εταιρείες, μέσω ανάπτυξης ολοκληρωμένων οικονομικών μοντέλων που θα βασίζονται σε ανάλυση κόστους καυσίμων, δεξαμενισμού, συντήρησης και επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες, καθώς και στη διαμόρφωση προτάσεων βελτιστοποίησης.

Συγκριτική ανάλυση του νομοθετικού πλαισίου για τη διαχείριση της βιορύπανσης, με εξέταση διεθνών, ευρωπαϊκών και εθνικών κανονισμών, εντοπισμό κενών εφαρμογής και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους.

Η περαιτέρω έρευνα στους παραπάνω άξονες μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση της βιορύπανσης και στη διαμόρφωση ολοκληρωμένων στρατηγικών πρόληψης και αντιμετώπισής της.

## Βιβλιογραφία

Aldred, N & Clare, AS 2008, ‘The adhesive strategies of cyprids and development of barnacle-resistant marine coatings’, *Biofouling*, vol. 24, no. 5, pp. 351–363.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Amara, I., Miled, W., Slama, R. B., and Ladhari, N. (2018). Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment. *Environ. Toxicol. Pharm.* 57, 115–130. Doi: 10.1016/j.etap.2017.12.001

Anisimov, AV, Mikhailova, MA & Uvarova, EA 2019, ‘Modern approaches to the development of marine antifouling coatings’, *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 10, no. 6, pp. 1384–1389.

Arzul, I., Moissec, L., Blanchet, E., Garcia, C., Francois, C., and Joly, J.-P. (2006). “Bonamia ostreae and *Ostrea edulis*: a Stable Host–parasite System in France?” in *Proceedings of the 11th International Symposium on Veterinary Epidemiology and Economics*. Cairns.

Aykin, E, Omuzbuken, B & Kacar, A 2019, ‘Microfouling bacteria and the use of enzymes in eco-friendly antifouling technology’, *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 16, pp. 847–856.

Bailey, S. A., Brown, L., Campbell, M. L., Carlton, J. T., Castro, N., Chainho, P., et al. (2020). Trends in the detection of aquatic non-indigenous species across global marine, estuarine and freshwater ecosystems: A 50-year perspective. *Diver. Distribut.* 26, 1780–1797. doi: 10.1111/ddi.13167

Bauer WD, Robinson JB. 2002. Disruption of bacterial quorum sensing by other organisms. *Curr Opin Biotech* 13:234 – 237.

Bell, A., Philipps, S., Denny, C., Georgiades, E., and Kluza, D. (2011). *Risk Analysis: Vessel Biofouling*. Ministry of Agriculture and Forestry Biosecurity. New Zealand: Wellington.

Bewley CA, Holland ND, Faulkner DJ. 1996. Two classes of metabolites from *Theonella swinhoei* are localized in distinct populations of bacterial symbionts. *Experientia* 52:716 – 722.

Bingham, P., Brangenberg, N., Williams, R., and van Andel, M. (2013). Investigation into the first diagnosis of ostreid herpesvirus type 1 in Pacific oysters. *Surveillance* 40, 20–24.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

BMEPC 2020, *Proposal for a regional Baltic biofouling management roadmap*, Baltic Marine Environment Protection Commission, accessed March 16, 2021, from <<https://portal.helcom.fi/meetings/MARITIME%2020-2020-787/MeetingDocuments/4-1%20Proposal%20for%20a%20Regional%20Baltic%20Biofouling%20Management%20Roadmap.pdf>>.

BIMCO. 2021a. *Approval procedure for in-water cleaning companies*. BIMCO and International Chamber of Shipping.

BIMCO. 2021b. *Industry standard on in-water cleaning with capture. Version 1.0*. BIMCO and International Chamber of Shipping.

Burgess JG, Boyd KG, Armstrong E, Jiang Z, Yan L, Berggren M, May U, Pisacane T, Granmo A, Adams DR. 2003. The development of a marine natural product-based antifouling paint. *Biofouling* 19:197 – 205.

CDS 2020a, *Inspections, maintenance and antifouling. Rope guards*, Commercial Diving Services Pty Ltd, accessed April 15, 2020, from <<http://www.commercialdiving.com.au/ship-rope-guard.html>>.

Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science [Cefas]. (2009). *Shellfish Biosecurity Measures Plan. Guidance and Templates for Shellfish Farmers and Traders*. Weymouth: Fish Health Inspectorate, Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science.

Clare AS. 1998. Towards non-toxic antifouling. *J Mar Biotechnol* 6:3 – 6.

Clarke Murray, C, Therriault, TW & Pakhomov, E 2013, ‘What lies beneath? An evaluation of rapid assessment tools for management of hull fouling’, *Environmental Management*, vol. 52, pp. 374–384.

Clasen, A & Kesel, AB 2019, ‘Microstructural surface properties of drifting seeds—a model for non-toxic antifouling solutions’, *Biomimetics*, vol. 4, no. 37.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

COMPLETE. 2021. Proposal for a regional Baltic biofouling management roadmap. *Baltic COMPLETE Project*. <https://balticcomplete.com/publications/project-reports/320-proposal-for-a-regional-baltic-biofouling-management-roadmap>

Coutts, ADM, Piola, RF, Taylor, MD, Hewitt, CL & Gardner, JPA 2010b, ‘The effect of vessel speed on the survivorship of biofouling organisms at different hull locations’, *Biofouling*, vol. 26, no. 5, pp. 539–553.

Coutts, ADM, Valentine, JP, Edgar, GJ, Davey, A & Burgess-Wilson, B 2010c, ‘Removing vessels from the water for biofouling treatment has the potential to introduce mobile non-indigenous marine species’, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 60, pp. 1533–1540.

Coutts, ADM & Taylor, MD 2004, ‘A preliminary investigation of biosecurity risks associated with biofouling on merchant vessels in New Zealand’, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, vol. 38, pp. 215–229.

Coutts, A. D. M., Moore, K. M., and Hewitt, C. L. (2003). Ships’ sea-chests: an overlooked transfer mechanism for non-indigenous marine species? *Mar. Pollut. Bull.* 46, 1504–1515.

Culloty, S. C., and Mulcahy, M. F. (2007). *Bonamia ostreae* in the Native Oyster *Ostrea edulis*. *Mar. Environ. Health Series* 2007:29.

Dahlbäck, B, Blanck, H & Nydén, M 2010, ‘The challenge to find new sustainable antifouling approaches for shipping’, *Coastal Marine Science*, vol. 31, no. 1, pp. 212–215.

Davidson, I, Scianni, C, Ceballos, L, Zabin, C, Ashton, G & Ruiz, G 2014, *Evaluating ship biofouling and emerging management tools for reducing biofouling-mediated species incursions*. Factors that influence biofouling *Report to the Marine Invasive Species Program of the California State Lands Commission, Sacramento, California*.

Davidson, I, Scianni, C, Hewitt, C, Everett, R, Holm, E, Tamburri, M & Ruiz, G 2016, ‘Mini-review: Assessing the drivers of ship biofouling management – aligning industry and biosecurity goals’, *Biofouling*, vol. 32, no. 4, pp. 411–428.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Davidson, IC, Brown, CW, Sytsma, MD & Ruiz, GM 2009, ‘The role of containerships as transfer mechanisms of marine biofouling species’, *Biofouling*, vol. 25, no. 7, pp. 645–655.

Davidson, IC, McCann, LD, Fofonoff, PW, Sytsma, MD & Ruiz, GM 2008a, ‘The potential for hull-mediated species transfers by obsolete ships on their final voyages’, *Diversity and Distributions*, vol. 14, pp. 518–529.

Davidson, IC, Scianni, C, Minton, MS & Ruiz, GM 2018, ‘A history of ship specialization and consequences for marine invasions, management and policy’, *Journal of Applied Ecology*, vol. 55, pp. 1799–1811.

Davidson, IC, Smith, G, Ashton, GV, Ruiz, GM & Scianni, C 2020, ‘An experimental test of stationary lay-up periods and simulated transit on biofouling accumulation and transfer on ships’, *Biofouling*, vol. 36, pp. 455–466.

Demain AL. 1999. Pharmaceutically active secondary metabolites of microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol* 52:455 – 463.

Diggles, B. K. (2020). Risk Analysis: Biosecurity Risks Related to Recycling of Mollusc Shell Waste for Shellfish Reef Restoration. New Zealand: DigsFish Services Report DF20-03b for Fisheries Research and Development Corporation.

Department of Agriculture [DOA], Department of the Environment [DOE], and New Zealand Ministry for Primary Industries [MPI]. (2015). Antifouling and in-Water Cleaning Guidelines. Canberra: Department of Agriculture.

Dobretsov, S, Abed, RMM & Voolstra, CR 2013, ‘The effect of surface color on the formation of marine micro and macrofouling communities’, *Biofouling*, vol. 29, no. 6, pp. 617–627.

Dobretsov, S, Dahms, H-U & Qian, P-Y 2006, ‘Inhibition of biofouling by marine microorganisms and their metabolites’, *Biofouling*, vol. 22, no. 1, pp. 43–54.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Farkas, A, Song, S, Degiuli, N, Martić, I & Demirel, YK 2020, ‘Impact of biofilm on the ship propulsion characteristics and the speed reduction’, *Ocean Engineering*, vol. 199, p. 107033.

Farnsworth, M., Culloty, S., Carnegie, R., Diggles, B., Deveney, M., and Michael, K. (2020). Report of the Technical Advisory Group 2019 on a Return to Flat Oyster Farming. 23-27 September 2019. Wellington: Produced for Biosecurity New Zealand.

Faulkner DJ. 2000. Marine natural products. *Nat Prod Rep* 17:7 – 55.

Finnie, AA & Williams, DN 2009, ‘Paint and coatings technology for the control of marine fouling’, in S Dürr & J Thomason (eds), *Biofouling*, John Wiley & Sons, Incorporated, UK, pp. 185–206.

Fenical W. 1993. Chemical studies of marine bacteria: developing a new resource. *Chem Rev* 93: 1673 – 1683.

Fenical W, Jensen PR. 1993. Enzyme inhibitors and other bioactive compounds from marine actinomycetes. In: Attaway D, Zaborsky O, editors. *Marine biotechnology*. Vol. 1. New York: Plenum Press. pp 419 – 457.

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

Floerl, O & Inglis, GJ 2005, ‘Starting the invasion pathway: the interaction between source populations and human transport vectors’, *Biological Invasions*, vol. 7, pp. 589–606.

FORCE. *Performance of ships in service*. Retrieved August 23, 2021, from <https://forcetechnology.com/en/cases/performance-of-ships-in-service>

Fuhrmann, M., and Hick, P. M. (2020). *Vessel Biofouling and Aquatic Pathogens*. Biosecurity New Zealand Technical Paper. New Zealand: Ministry for Primary Industries.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Galil, B, McKenzie, C, Bailey, S, Campbell, M, Davidson, I, Drake, L, Hewitt, C, Occhipinti-Ambrogi, A & Piola, R 2019, *ICES viewpoint background document: evaluating and mitigating introduction of marine non-native species via vessel biofouling. ICES ad hoc report 2019*, International Council for the Exploration of the Sea.

Georgiades, E, Growcott, A & Kluza, D 2018, *Technical guidance on biofouling management for vessels arriving to New Zealand*, Ministry for Primary Industries, New Zealand.

Georgiades, E & Kluza, D 2014, *Science underpinning the thresholds proposed in the CRMS: Biofouling on vessels arriving to New Zealand. MPI Technical Paper no. 2014/22*, Ministry for Primary Industries, New Zealand.

Gewing, M-T & Shenkar, N 2017, ‘Monitoring the magnitude of marine vessel infestation by non-indigenous ascidians in the Mediterranean’, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 121, pp. 52–59.

Gouletquer, P. (2004). Cultured Aquatic Species Information programme. *Ostrea edulis*. Rome: FAO Fisheries Division [online].

Grandison, C, Piola, R & Fletcher, L 2011, *A review of Marine Growth Protection System (MGPS) options for the Royal Australian Navy*, Australian Government Department of Defense. Defense Science and Technology Organization, Victoria, Australia.

Growcott, A, Kluza, D & Georgiades, E 2016, *Literature review: in-water systems to remove or treat biofouling in vessel sea chests and internal pipework*, Ministry for Primary Industries, Wellington, New Zealand.

Haglund A-L, Toˆrnblom E, Bostroˆm B, Tranvik L. 2002. Large differences in the fraction of active bacteria in plankton, sediments, and biofilm. *Microb Ecol* 43:232 – 241.

Hay ME. 1996. Marine chemical ecology: what is known and what is next. *J Exp Mar Biol Ecol* 200:103 – 134.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

- Hay MF, Fenical W. 1988. Marine plant-herbivore interaction: the ecology of chemical defence. *Ann Rev Ecol Syst* 19:111 – 145.
- Hine, P. M. (1996). Southern hemisphere mollusc diseases and an overview of associated risk assessment problems. *Revue Sci. Tech.-Off. Int. des Epizooties* 15, 563–571. doi: 10.20506/rst.15.2.940
- Holmstrøm C, James S, Egan S, Kjelleberg S. 1996. Inhibition of common fouling organisms by marine bacterial isolates with special reference to the role of pigmented bacteria. *Biofouling* 10:251 – 259.
- Holmstrøm C, Egan S, Franks A, McCloy S, Kjelleberg S. 2002. Antifouling activities expressed by marine surface associated *Pseudoalteromonas* species. *FEMS Microbiol Ecol* 41:47 – 58.
- Hotta K, Okami Y, Umezawa H. 1980. Studies on new aminoglycoside antibiotics, istamycins, from an actinomycete isolated from a marine environment. II. Possible involvement of plasmid in istamycin production. *J Antibiot (Tokyo)* 33:1510 – 1514.
- Howard, A. E. (1994). The possibility of long-distance transmission of *Bonamia* by fouling on boat hulls. *Bull. Eur. Assoc. Fish Pathol.* 14, 211–212.
- Imada C. 2005. Enzyme inhibitors and other bioactive compounds from marine actinomycetes. *Antonie van Leeuwenhoek* 87:59 – 63.
- IMO. 2011. *Guidelines for the control and management of ship's biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species*. MEPC 62/24/Add.1, Annex 26, 1-27.
- IMO. 2021. *Review of the 2011 Guidelines for the control and management of ship's biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species*. Report of the Correspondence Group on Review of the Biofouling Guidelines. Submitted by Norway.
- Itoh, N., Komatsu, Y., Maeda, K., Hirase, S., and Yoshinaga, T. (2019). First discovery of *Perkinsus beihaiensis* in Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) in Tokyo Bay, Japan. *J. Invertebr. Pathol.* 166, 107226. doi: 10.1016/j.jip.2019.107226



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

James G, Holmstrøm C, Kjelleberg S. 1996. Purification and characterization of a novel antibacterial protein from the marine bacterium D2. *Appl Env Microb* 62:2783 – 2788.

IMO 2021, Biofouling. The Biofouling Guidelines’ accessed June 18, 2021, from <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Biofouling.aspx>>.

International Maritime Organization [Imo]. (2011). Guidelines for the Control and Management of Ships’ Biofouling to Minimize the Transfer of Invasive Aquatic Species. London: International Maritime Organization.

Inglis, GJ, Floerl, O, Ah Yong, S, Cox, S, Unwin, M, Ponder-Sutton, A, Seaward, K, Kospartov, M, Read, G, Gordon, D, Hosie, A, Nelson W & d’Archino, R 2010, *The biosecurity risks associated with biofouling on international vessels arriving in New Zealand: Summary of the patterns and predictors of fouling (unpublished report)*, Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand.

i-tech 2021, *What is Selektope?* i-tech, accessed March 12, 2021, from <<https://selektope.com/about/>>.

Kauano, RV, Roper, JJ & Rocha, RM 2017, Small boats as vectors of marine invasion: experimental test of velocity and dedication as limits’, *Marine Biology*, vol. 164:27.

Keeling, S. E., Brosnahan, C. L., Williams, R., Gias, E., Hannah, M., Bueno, R., et al. (2014). New Zealand juvenile oyster mortality associated with ostreid herpesvirus 1 - An opportunistic longitudinal study. *Dis. Aquat. Organ.* 109, 231–239. doi: 10.3354/dao02735

Kemp, W. M., Boynton, W. R., Adolf, J. E., Boesch, D. F., Boicourt, W. C., Brush, G., et al. (2005). Eutrophication of Chesapeake Bay: Historical trends and ecological interactions. *Mar. Ecol. Prog. Series* 303, 1–29. doi: 10.3354/meps303001

Lacoursière-Roussel, A 2013, *Testing propagule pressure theory: maritime transport and invasion by fouling species*, PhD Thesis. McGill University, Department of Biology, Montreal, Quebec, Canada.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Lane, H. S., and Jones, J. B. (2020). Low internal transcribed spacer rDNA variation in New Zealand *Bonamia ostreae*: Evidence for a recent arrival. *Dis. Aquat. Organ.* 139, 121–130.

Lane, H. S., Jones, B., and Poulin, R. (2018). Comparative population genetic study of an important marine parasite from New Zealand flat oysters. *Mar. Biol.* 165:9.

Lane, H. S., Webb, S. C., and Duncan, J. (2016). *Bonamia ostreae* in the New Zealand oyster *Ostrea chilensis*: A new host and geographic record for this haplosporidian parasite. *Dis. Aquat. Organ.* 118, 55–63. doi: 10.3354/dao 02960

Lejars, M, Margailan, A & Bressy, C 2012, 'Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings', *Chemical Reviews*, vol. 112, pp. 4347–4390.

Lewis, J. A. 2020. Chemical contaminant risks are associated with in-water cleaning of vessels. *Department of Agriculture, Water and the Environment, Canberra, September, CC BY 4.0.*

Lindholdt, A, Dam-Johansen, K, Olsen, SM, Yebra, DM & Kiil, S 2015, 'Effects of biofouling development on drag forces of hull coatings for ocean-going ships: a review', *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 12, no. 3, pp. 415–444.

Lockwood, J. L., Cassey, P., and Blackburn, T. (2005). The role of propagule pressure in explaining species invasions. *Trends Ecol. Evol.* 20, 223–228. doi: 10.1016/j.tree.2005.02.004

Long RA, Qureshi A, Faulkner DJ, Azam F. 2003. 2-n-pentyl-4-quinolinol produced by a marine *Alteromonas* sp. and its potential ecological and biogeochemical roles. *Appl Environ Microbiol* 69:568 – 576.

Martins, SE, Fillmann, G, Lillicrap, A & Thomas, KV 2018, 'Review: ecotoxicity of organic and organo-metallic antifouling co-biocides and implications for environmental hazard and risk assessments in aquatic ecosystems', *Biofouling*, vol. 34, no. 1, pp. 34–52.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

McCarthy SA, Johnson RM, Kakimoto D. 1994. Characterization of an antibiotic produced by *Alteromonas luteoviolacea* Gauthier 1982, isolated from Kinko Bay. *Japan J Appl Bacteriol* 77:426 – 432.

McElroy, DJ, Hochuli, DF, Doblin, MA, Murphy, RJ, Blackburn, RJ & Coleman, RA 2017, ‘Effect of copper on multiple successional stages of a marine fouling assemblage’, *Biofouling*, vol. 33, no. 10, pp. 904–916.

McLean RJC, Pierson LS, Fuqua C. 2004. A simple screening protocol for the identification of quorum sensing signal antagonists. *J Microbiol Methods* 58:351 – 360.

Ministry for Primary Industries New Zealand [Mpi]. (2018). Craft Risk Management Standard: Biofouling on Vessels Arriving to New Zealand. CRMS- BIOFOUL. Wellington: Ministry for Primary Industries.

Molino, PJ, Childs, S, Hubbard, MRE, Carey, JM, Burgman, MA & Wetherbee, R 2009, ‘Development of the primary bacterial microfouling layer on antifouling and fouling release coatings in temperate and tropical environments in Eastern Australia’, vol. 25, no. 2, pp. 149–162.

Morrisey, D., & Woods, C. 2015. In-water cleaning technologies: review of information. *MPI Technical Paper No: 2015/38, Wellington New Zealand*.  
<http://www.mpi.govt.nz/news-and-resources/publications/>

Moser, CS, Wier, TP, First, MR, Grant, JF, Riley, SR, Robbins-Wamsley, SH, Tamburri, MN, Ruiz, GM, Miller, AW & Drake, LA 2017, ‘Quantifying the extent of niche areas in the global fleet of commercial ships: the potential for “super-hot spots” of biofouling’, *Biological Invasions*, vol. 19, pp. 1745–1759.

Nendza, M 2007, ‘Hazard assessment of silicone oils (polydimethylsiloxanes, PDMS) used in antifouling-/foul-release-products in the marine environment’, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 54, pp. 1190–1106.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Nurioglu, A. G., Esteves, A. C. C., & De With, G. (2015). Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 3(32), 6547–6570. <https://doi.org/10.1039/c5tb00232j>

Oclarit JM, Okada H, Ohta S, Kaminura K, Yamaoka Y, Iizuka T, Miyashiro S, Ikegami S. 1994. Anti-bacillus substance in the marine sponge, Hyatella species, produced by an associated Vibrio species bacterium. *Microbios* 78:7 – 16.

Pagenkopp-Lohan, K. M., Hill-Spanik, K. M., Torchin, M. E., Fleischer, R. C., Carnegie, R. B., Reece, K. S., et al. (2018). Phylogeography and connectivity of molluscan parasites: Perkinsus spp. in Panama and beyond. *Int. J. Parasitol.* 48, 135–144. doi: 10.1016/j.ijpara.2017.08.014

Paul-Pont, I., Evans, O., Dhand, N. K., Rubio, A., Coad, P., and Whittington, R. J. (2014). Descriptive epidemiology of mass mortality due to ostreid herpesvirus-1 (OshV-1) in commercially farmed Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in the Hawkesbury River estuary. Australia. *Aquaculture* 422, 146–159. doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.12.009

PPG Industries 2020, *Antifouling and fouling release products*, PPG Industries, accessed May 31, 2020, from <<https://www.ppgpmc.com/marine/antifouling-and-fouling-release>>.

Pelletier-Rosseau, M, Bernier, R, Clarke Murray, C, Drolet, D, Lacoursière-Roussel, A, Locke, A, Martin, JL, McKenzie, CH, McKindsey, CW, Therriault, TW & Simard, N 2019, ‘Assessment of recreational boating as a vector for marine non-indigenous species on the Atlantic coast of Canada’, *Biological Invasions*, vol. 21, pp. 2447–2470.

Piola, R & Conwell, C 2010, *Vessel biofouling as a vector for the introduction of non-indigenous marine species to New Zealand: Fishing vessels*, Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand.

Raeid, MMA, Al Fahdi, D & Muthukrishnan, T 2019, ‘Short-term succession of marine microbial fouling communities and the identification of primary and secondary colonizers’, *Biofouling*, vol. 35, no. 5, pp. 526–540.



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

Rao D, Webb JS, Kjelleberg S. 2005. Competitive interactions in mixed-species biofilms containing the marine bacterium *Pseudoalteromonas tunicata*. *Appl Environ Microb* 71:1729 – 1736.

Rittschof, D 2009, ‘Trends in marine biofouling research’, in C Hellio & D Yebra (eds), *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 725–748.

Ruiz, G. M., Rawlings, T. K., Dobbs, F. C., Drake, L. A., Mullady, T., Huq, A., et al. (2000a). Global spread of micro-organisms by ships. *Nature* 408, 49–50. doi: 10.1038/35040695

Ruiz, G. M., Carlton, J. T., Grosholz, E. D., and Hines, A. H. (1997). Global invasions of marine and estuarine habitats by non-indigenous species: mechanisms, extent, and consequences. *Am. Zool.* 37, 621–632. doi: 10.1093/icb/37.6.621

Salminen, E., Hansen, J. H., Nielsen, C. W., & Wuokko, P. (2016). Nordic Shipyards Best Available Techniques (BAT). *Nordisk Minister Råd TemaNord*, 548.

Scardino, AJ 2009, ‘Surface modification approaches to control marine biofouling’, in C Hellio & D Yebra (eds), *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 664–692.

Scianni, C., & Georgiades, E. 2019. Vessel in-water cleaning or treatment: Identification of environmental risks and science needs for evidence-based decision making. *Frontiers in Marine Science*, 6(JUL), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00467>

Schumacher RW. 2003. Isolation and structure determination of an antimicrobial ester from a marine sediment-derived bacterium *J Nat Prod* 66:1291 – 1293.

Seebens, H, Gastner, MT & Blasius, B 2013, ‘The risk of marine bioinvasion caused by global shipping’, *Ecology Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 782–790.

Ségarra, A., Pépin, J. F., Arzul, I., Morga, B., Faury, N., and Renault, T. (2010). Detection and description of a particular ostreid herpesvirus 1 genotype associated with massive



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

mortality outbreaks of Pacific oysters, *Crassostrea gigas*, in France in 2008. *Virus Res.* 153, 92–99. doi: 10.1016/j.virusres.2010.07.011

Selim, MS, Shenashen, MA, El-Safty, SA, Higazy, SA, Selim, MM, Isago, H & Elmarakbi, A 2017, ‘Recent progress in marine foul-release polymeric nanocomposite coatings’, *Progress in Materials Science*, vol. 87, pp. 1–32.

Shikuma, N. J., and Hadfield, M. G. (2010). Marine biofilms on submerged surfaces are a reservoir for *Escherichia coli* and *Vibrio cholerae*. *Biofouling* 26, 39–46. doi: 10.1080/08927010903282814

Strydom, C., Robertson, A., & Andersen, M. J. 2020. Cloud-based vessel biosecurity management to mitigate the transfer of NIS. *PortPIC’20*.

Tamburri, M. N., Davidson, I. C., First, M. R., Scianni, C., Newcomer, K., Inglis, G. J., Georgiades, E. T., Barnes, J. M., & Ruiz, G. M. 2020. In-Water Cleaning and Capture to Remove Ship Biofouling: An Initial Evaluation of Efficacy and Environmental Safety. *Frontiers in Marine Science*, 7(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00437>

Tamburri, M. N., Luckenbach, M. W., Breitburg, D. L., and Bonniwell, S. M. (2008). Settlement of *Crassostrea ariakensis* larvae: Effects of substrate, biofilms, sediment and adult chemical cues. *J. Shellfish Res.* 27, 601–608. doi: 10.2983/0730-8000(2008)27[601: socale]2.0.co;2

Tech Law 2017, *Washington State antifouling boat paint alternatives assessment report. Final report*, Tech Law Inc. and Northwest Green Chemistry, Washington, DC.

UNCTAD 2019, *Review of maritime transport 2019*, United Nations Conference on Trade and Development, Geneva.

US Environmental Protection Agency. 1999. *Nature of discharge for the “Phase I Final Rule and Technical Development Document of Uniform National Discharge Standards (UNDS).”*

Field Code Changed



“Αριάδνη Χριστοπούλου”,

“Έλεγχος και διαχείριση της βιορύπανσης των υφάλων των πλοίων”

URS 2007, *Review and evaluation of the biofouling protocol for vessels less than 25 m in length. General review prepared for the Australian Quarantine and Inspection Service*, URS Australia Pty Ltd, Western Australia.

Ware, CS, Smith-Palmer, T, Peppou-Chapman, S, Scarratt, LRJ, Humphries, EM, Balzer, D & Neto, C 2018, ‘Marine antifouling behavior of lubricant-infused nanowrinkled polymeric surfaces’, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 10, no. 4, pp. 4173–4182.

Yonemitsu, M. A., Giersch, R. M., Polo-Prieto, M., Hammel, M., Simon, A., Cremonte, F., et al. (2019).