



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

«Επιλογή Υφαλοχρωμάτων και Βέλτιστος
Προγραμματισμός Δεξαμενισμού Πλοίων
Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων»

Μπαλής Δ. Ιωάννης

Επιβλέπων: Γρηγόρης
Γρηγορόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Γρηγόρη Γρηγορόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος και τη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Στογιάννο, τεχνικό αντιπρόσωπο της εταιρίας προμήθειας και παραγωγής επιστρωμάτων HEMPEL, για την πολύτιμη παροχή πληροφοριακού υλικού, χωρίς το οποίο θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση της συγκριτικής αποδοτικότητας τεσσάρων διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, αναφορικά με τη δραστικότητα τους έναντι του φαινομένου της βιορύπανσης, την μηχανική φθορά τους με την πάροδο του χρόνου και την απαιτούμενη επένδυση που αντανάκλαται σε κόστος δεξαμενισμού για την εφαρμογή και συντήρησή τους.

Η διπλωματική εργασία διακρίνεται σε δύο μέρη που περιλαμβάνουν συνολικά πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου της βιορύπανσης, των μηχανισμών ανάπτυξης της και των παραγόντων που καθορίζουν τον ρυθμό εξέλιξης του φαινομένου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται θεωρητικά η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας της γάστρας στην αντίσταση τριβής ενός πλοίου και αντίστοιχα στις απαιτήσεις ισχύος πρόωσης του. Συγκεκριμένα, παρατίθενται ορισμένες βασικές υδροδυναμικές αρχές, σχετικές με τα τυρβώδη οριακά στρώματα, τον τρόπο που επιδρά η ανάπτυξη επιφανειακής τραχύτητας στη δομή τους και συνεπακόλουθα στην αντίσταση τριβής και τέλος συσχετίζεται η επίδραση των διαφορετικών βαθμών βιορύπανσης στις απαιτήσεις ισχύος πρόωσης ενός πλοίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των μεθόδων προστασίας από το φαινόμενο της βιορύπανσης και εν συνεχεία αναλύονται οι αρχές λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεσσάρων διαφορετικών τύπων σύγχρονων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων που απασχολούν το υπολογιστικό τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, συσχετίζονται οι περιορισμοί που επιβάλλουν οι διάφοροι κανονισμοί στον ορισμό της συχνότητας δεξαμενισμού ενός πλοίου, με την ανάγκη περιοδικής επανατοποθέτησης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Επιπροσθέτως, περιγράφονται οι βασικές διαδικασίες που ακολουθούνται για την εφαρμογή και συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο εκπονείται το υπολογιστικό τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζοντας αναλυτικά τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκριτική αποδοτικότητα τεσσάρων διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, για διαφορετικά σενάρια περιοδικότητας δεξαμενισμών και ποιότητας εργασιών συντήρησης και εφαρμογής κατά τον δεξαμενισμό, σε ένα υπαρκτό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	10
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΑ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	11
1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΗΡΕΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ	16
1.3.1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	17
1.3.2. ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	17
1.3.3. ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	18
1.3.4. ΤΥΠΟΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	18
1.3.5. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΚΙΝΗΣΙΑΣ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΩΣΗ	20
2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	20
2.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ	22
2.2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ	22
2.2.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	24
2.2.3. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	26
2.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗ.....	31
3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	31
3.1.1. ΠΡΩΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	31
3.1.2. ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΒΤ: ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΕΩΣ ΤΗΝ ΑΠΑΓΟΡΕΥΣΗ ΤΟΥΣ32	
3.2 ΒΙΟΚΤΟΝΑ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ (BIOCIDE ANTIFOULING COATINGS)	35
3.2.1. ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ (CONTROLLED DEPLETION POLYMERS – CDP).....	37
3.2.2. ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΥΤΟΛΕΙΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΥΜΠΟΛΥΜΕΡΩΝ (SELF-POLISHING COPOLYMERS – SPC).....	38
3.2.3. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΑΥΤΟΛΕΙΑΙΝΟΜΕΝΗ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ (HYBRID SELF-POLISHING TECHNOLOGY)	40
3.3 ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΡΥΠΩΝ (FOULING RELEASE COATINGS)	40
3.4 ΠΡΟΣΦΑΤΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.....	44
4.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΩΝ.....	44
4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	45
Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ	50
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	50
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (CASE STUDY)	51
5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	53
5.3.1. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	56
5.3.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	58
5.4 ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	61
5.4.1. ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΩΝ.....	61
5.4.2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ	62
5.4.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ 63	
5.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	66
5.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	68
5.6.1. ΓΕΝΙΚΑ ΚΟΣΤΗ ΧΡΗΣΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.....	68
5.6.2. ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.....	71
5.6.3. ΚΟΣΤΟΣ ΚΤΗΣΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΓΚΟΥ ΒΑΦΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	72
5.6.4. ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	75
5.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	76
5.7.1. ΚΟΣΤΟΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	76
5.7.2. ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	78
5.7.3. ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	79
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 ^ο - ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

Κατάλογος πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΒΑΘΜΟΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (FR) ΚΑΤΑ ΑΥΞΟΥΣΑ ΣΕΙΡΑ ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑΣ	15
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΑΘΜΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (FR) ΜΕ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΑΜΜΟΥ <i>k_s</i> ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΓΑΣΤΡΑΣ <i>R_{t50}</i>	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΒΑΘΜΩΝ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ (FR) ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΙΣΧΥ ΠΡΟΩΣΗΣ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΓΑΣΤΡΑΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ.....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΕΤΗΣΙΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ <i>S_{AHR}</i> , <i>C_{AHR}</i> , <i>I_{AHR}</i> , ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΑΣΤΡΑΣ [30].....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΩΝ	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΤΑΙ ΣΕ ΑΜΜΟΒΟΛΗ ΤΥΠΟΥ SA – 2.0 ΚΑΙ SA – 1.0 ΓΙΑ FULL BLAST ΚΑΙ SPOT BLAST ΣΕΝΑΡΙΑ	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ.....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥ	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥ (ΗΜΕΡΕΣ) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΧΡΕΩΣΗΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΓΕΝΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΧΡΗΣΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΧΡΕΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΚΟΣΤΟΣ ΥΔΡΟΑΜΜΟΒΟΛΗΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΠΑΧΟΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΤΗΣΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΒΑΦΗΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 21: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 22: ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΛΟΓΩ ΑΥΞΗΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 23: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 24: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 25: ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΛΗΡΟΥΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΙΑΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 26: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ HYBRID, SPC ΚΑΙ FOUL RELEASE ΕΝΑΝΤΙ ΤΩΝ CDP ΣΕ ΒΑΘΟΣ 20ΕΤΙΑΣ.....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 27: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (1 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΤΗΤΑΣ).....	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 28: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (5 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΤΗΤΑΣ).....	86

Κατάλογος Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΛΟΓΩ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ [12].....	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ – VERTICAL SIDES [12]	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ – FLAT BOT TOM [12]	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΛΟΓΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (FLAT BOT TOM).....	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΛΟΓΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (VERTICAL SIDES)	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΛΟΓΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ (%) – ΠΛΗΡΕΙΣ ΑΜΜΟΒΟΛΕΣ.....	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ (%) – ΠΛΗΡΗΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗ ΣΤΑ 10 ΕΤΗ ΚΑΙ SPOT ΑΜΜΟΒΟΛΕΣ ΣΤΟΥΣ ΛΟΙΠΟΥΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥΣ	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ (%) – ΚΑΜΙΑ ΑΜΜΟΒΟΛΗ	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ (%) – SPOT ΑΜΜΟΒΟΛΕΣ	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΠΛΗΡΗΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟ).....	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΠΛΗΡΗΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗ ΣΤΑ 10 ΕΤΗ ΚΑΙ SPOT ΑΜΜΟΒΟΛΕΣ ΣΤΟΥΣ ΛΟΙΠΟΥΣ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟΥΣ)	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (SPOT ΑΜΜΟΒΟΛΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟ)	83
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΚΑΜΙΑ ΑΜΜΟΒΟΛΗ).....	83

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ [5]	12
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ: Α) ΔΙΑΔΟΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ Β) ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ [4].....	13
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΡΥΠΟΓΟΝΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ [8]	14
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΤΥΠΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΒΑΘΜΟΥΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ. FR-10 (ΑΝΩ ΑΡΙΣΤΕΡΑ), FR-40 (ΑΝΩ ΔΕΞΙΑ), FR-80 (ΚΑΤΩ ΑΡΙΣΤΕΡΑ), FR-100 (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) [9]	16
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΥΠΩΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ [12].....	20
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΤΥΠΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΡΩΩΣΗΣ [13]	21
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ [13]	26
ΕΙΚΟΝΑ 8: Η ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΟ ΝΟΜΟ [13]	27
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΒΙΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΡΙΒΗΣ ΕΝΟΣ ΠΛΟΙΟΥ [13]....	29
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΒΙΟΚΤΟΝΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΧΡΟΝΟΥ : Α) ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΔΙΑΛΥΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ, Β) ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΔΙΑΛΥΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ, ΟΠΟΥ ΜΕ ● ΣΥΜΒΟΛΙΖΕΤΑΙ ΤΟ ΕΝΕΡΓΟ ΒΙΟΚΤΟΝΟ ΚΑΙ ΜΕ ○ ΤΟ ΕΞΑΝΤΛΗΜΕΝΟ ΒΙΟΚΤΟΝΟ [3].....	32
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ [3].....	34
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΧΑΛΚΟΥ ΑΠΟ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΟ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑ [23]36	
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΒΙΟΚΤΟΝΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ CDP (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΒΙΟΚΤΟΝΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΧΡΟΝΟΥ (ΔΕΞΙΑ) [24]	37
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΒΙΟΚΤΟΝΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ SPC (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΒΙΟΚΤΟΝΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΧΡΟΝΟΥ (ΔΕΞΙΑ) [24]	39
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ FRC [21].....	41
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΠΡΟΣΟΨΗ ΤΟΥ SYNERGY OAKLAND ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΔΕΞΑΜΕΝΙΣΜΟ ΤΟΥ.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΦΥΛΛΟ EXCEL	67

A. Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1^ο : Το πρόβλημα της θαλάσσιας βιορύπανσης

1.1 Εισαγωγή

Οι κατασκευές που βρίσκονται σε επαφή με το θαλάσσιο περιβάλλον, όπως είναι τα πλοία, οι θαλάσσιες πλατφόρμες καθώς και οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις, δέχονται διαρκώς την επίδραση της θαλάσσιας πανίδας. Οποιοδήποτε μη τοξικό υλικό εκτεθεί στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί μία πιθανή επιφάνεια αποικισμού για θαλάσσιους οργανισμούς. Η διαδικασία προσκόλλησης, συσσώρευσης και ανάπτυξης αποικίας φυτικών και ζωικών οργανισμών στις εμβαπτισμένες σε υγρό περιβάλλον επιφάνειες θαλασσίων κατασκευών ονομάζεται βιορύπανση (biofouling).

Το φαινόμενο της θαλάσσιας βιορύπανσης λαμβάνει χώρα σε παγκόσμια κλίμακα, προκαλώντας τον μεγαλύτερο αντίκτυπο σε λιμάνια και παράκτιες περιοχές, αν και πρόσφατα έχουν καταγραφεί σημαντικές επιπτώσεις και στην βιομηχανία των υπεράκτιων εγκαταστάσεων. Η βιορύπανση διαδίδεται ευρέως καθώς θαλάσσιοι οργανισμοί παράγουν σπόρους, ή προνύμφες, που διασφαλίζουν την επιβίωσή τους σε οποιοδήποτε υπόστρωμα αποικούν [1]. Το υδάτινο περιβάλλον προσφέρει ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη ρυπογόνων οργανισμών, μέσω μηχανισμών όπως η ενυδάτωση και τα θαλάσσια ρεύματα που προσφέρουν μια σταθερή ροή θρεπτικών συστατικών και την απομάκρυνση των μεταβολικών απόβλητων.

Η συσσώρευση οργανισμών στις εμβαπτισμένες σε θαλάσσιο περιβάλλον επιφάνειες έχει μεγάλο αντίκτυπο στις δραστηριότητες των πλοίων, αυξάνοντας την τραχύτητα της επιφάνειας τους που οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της υδροδυναμική αντίστασης και μείωσης της ελικτικής ικανότητάς τους. Άμεση συνέπεια τον παραπάνω είναι η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και η αυξημένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gasses – GHG). Ενδεικτικά, μορφές οξείας ασβεστώδους ρύπανσης οδηγούν έως και σε 85% αύξηση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης, ενώ ακόμα και η παρουσία λεπτών βιοφίλμ αντιστοιχούν σε αύξηση της αντίστασης έως και 20% [2]. Περαιτέρω, η ανάπτυξη ρυπογόνων οργανισμών αλλοιώνει τη διεπαφή της μεταλλικής επιφάνειας και του περιβάλλοντος της, οδηγώντας σε ανάπτυξη μικροβιακής διάβρωσης (microbially influenced corrosion – MIC) της γάστρας του πλοίου [3]. Η μεταφορά επεκτατικών αλλοθόνων ειδών (invasive aquatic species) σε ξένα θαλάσσια περιβάλλοντα είναι ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει λόγω της βιορύπανσης με σημαντικές οικολογικές, εξελικτικές οικονομικές και κοινωνικές

επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών διαχείρισης, των επιπτώσεων σχετικά με την ανθρώπινη υγεία, το κόστος εξάλειψης και τα απαιτούμενα μέτρα ελέγχου [2]. Η ναυτιλία δεν αποτελεί ωστόσο τη μοναδική βιομηχανία που επηρεάζεται από τη βιορύπανση· με άλλες κατασκευές όπως υπεράκτιες εγκαταστάσεις, μαρίνες, συστήματα ψύξης θαλασσινού νερού, υποβρύχια ακουστικά όργανα και υποβρύχια καλώδια να αντιμετωπίζουν σοβαρές συνέπειες από την ανάπτυξη της επί των επιφανειών τους.

Οι παραπάνω επιπτώσεις του φαινομένου της βιορύπανσης είναι σαφές πως οδηγούν στην αύξηση του κόστους για την ναυτιλιακή βιομηχανία, μέσω της αυξημένης ανάγκης ανθρωπίνου δυναμικού, καυσίμων, υλικών και χρόνου δεξαμενισμού. Συνεπώς, η κρισιμότητα της αντιμετώπισης της, έχει οδηγήσει στην πραγματοποίηση μεγάλου εύρους έρευνας από την επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες όσον αφορά στην ανάλυση των μηχανισμών ανάπτυξης της καθώς και στην ανάπτυξη τεχνογνωσίας σχετικά με μεθόδους δραστικού περιορισμού της.

1.2 Μηχανισμός ανάπτυξης και στάδια βιορύπανσης

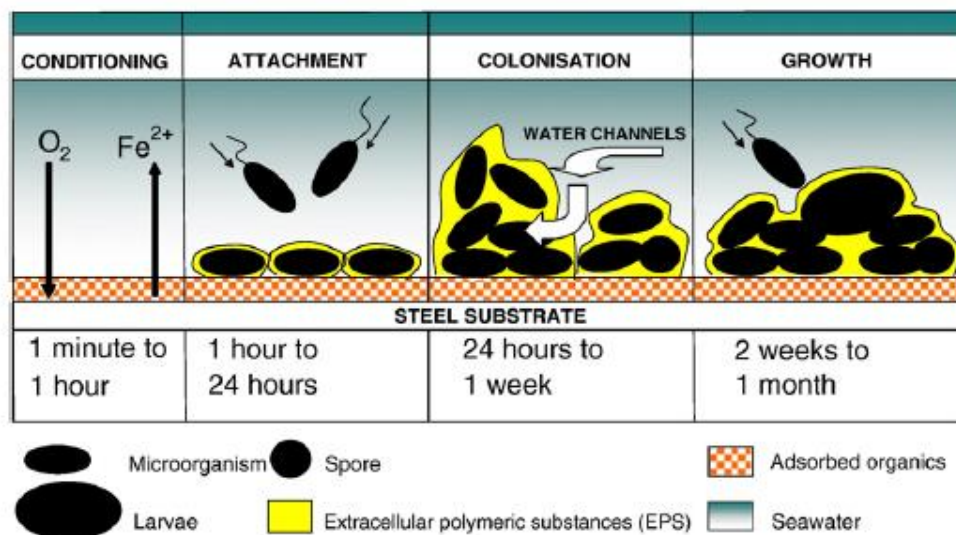
Ο μηχανισμός ανάπτυξης της βιορύπανσης περιλαμβάνει τον αποικισμό (colonization) μικροοργανισμών (microfouling), όπως ιούς, βακτήρια, κυανοβακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και μικροάλγη καθώς και μεγαλύτερους μακροοργανισμούς, όπως μακροασπόνδυλα και μακροάλγη. Η μακρορύπανση (macrofouling) περιλαμβάνει τόσο ασβεστώδεις σκληρούς ρυπογόνους οργανισμούς όπως καρκινοειδή (βαλανόμορφα), μύδια και δακτυλιοσκώληκες όσο και μαλακούς ρυπογόνους οργανισμούς όπως μη ασβεστώδη φύκη, σπόγγους, ανεμώνες, χιτωνοφόρα και υδρόζωα.

Η διαδικασία της βιορύπανσης διακρίνεται κυρίως στην βιβλιογραφία ως διαδοχή μεταξύ τεσσάρων βασικών σταδίων που περιλαμβάνουν μία αρχική συσσώρευση απορροφούμενων οργανικών μορίων, την εγκατάσταση και ανάπτυξη πρωτοποριακών βακτηριών που σχηματίζουν μία βιομεμβράνη (biofilm) και την επακόλουθη ανάπτυξη μικρο και μακρο ρυπογόνων οργανισμών. Τα τέσσερα διαδοχικά στάδια της διαδικασίας αποικισμού αποτυπώνονται ως εξής [4]:

- Όταν ένα χημικά αδρανές υπόστρωμα εμβαπτίζεται σε θαλασσινό νερό λαμβάνει χώρα μία σχεδόν ταυτόχρονη συσσώρευση οργανικών καταλοίπων στη βρεχόμενη επιφάνεια του, όπως γλυκοπρωτεΐνες, προτεογλυκάνες και πολυσακχαρίτες που είναι φυσικά διαλυμένα στο θαλασσινό περιβάλλον. Η τροποποίηση της χημικής

σύστασης της επιφάνειας επιτρέπει την προσκόλληση πρωτοπόρων βακτηρίων επί αυτής, σχηματίζοντας μία βιομεμβράνη.

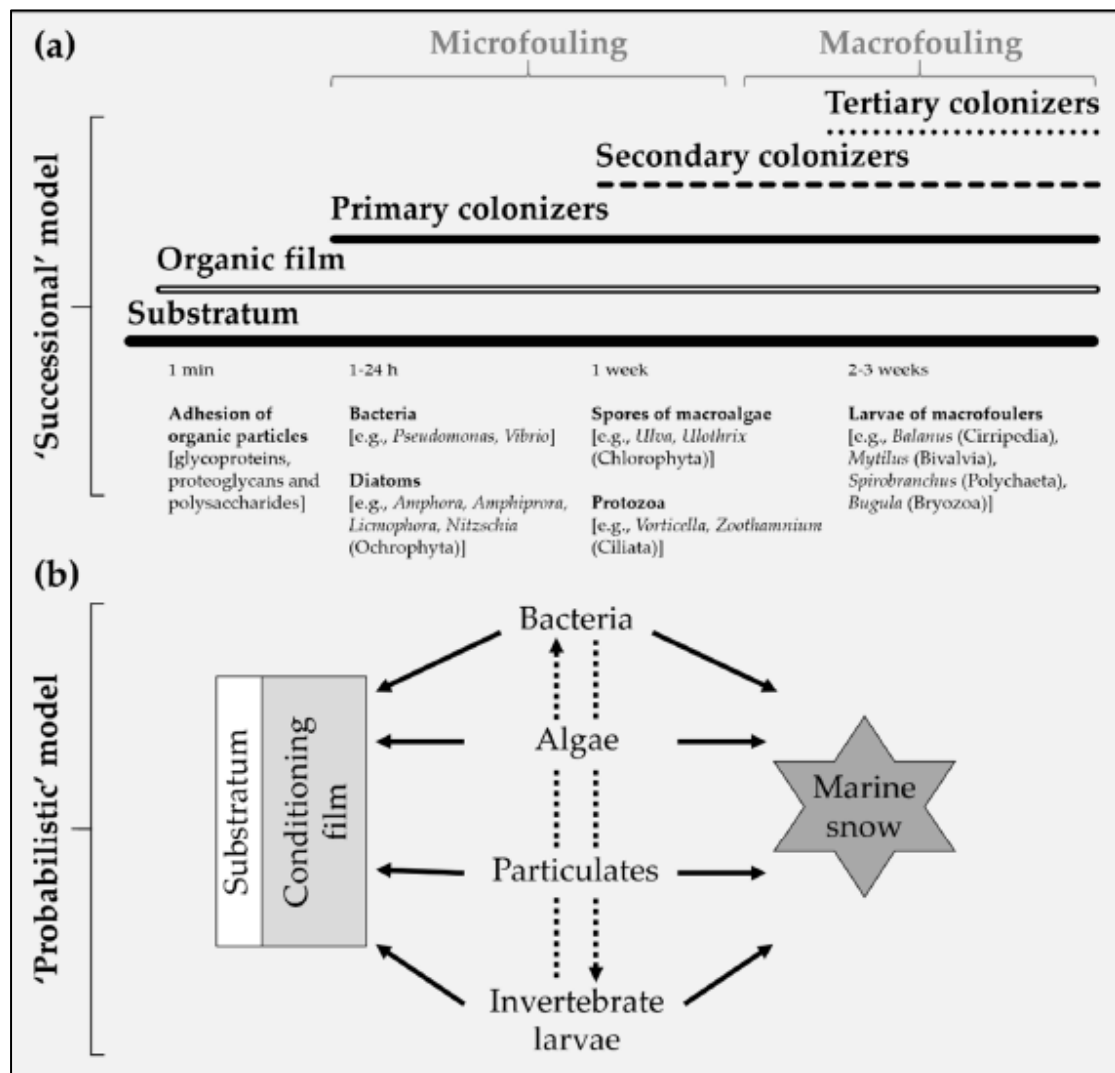
- Εντός ωρών, οι κύριοι άποικοι, συγκροτήματα μονοκυτταρικών οργανισμών (βακτήρια και διάτομα) εκκρίνουν εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (extracellular polymeric substances - EPS) που τους περιβάλλουν ώστε να αγκυρωθούν στο υπόστρωμα, μεταβάλλοντας έτσι την τοπική χημική σύνθεση της επιφάνειας, που ευνοεί την περαιτέρω ανάπτυξη της βιορύπανσης με την εγκατάσταση μακρορυπογόνων οργανισμών.
- Σε διάστημα ημερών έως εβδομάδων, δευτερεύοντες άποικοι που αποτελούνται από στάσιμους ρυπογόνους μακροοργανισμούς, τόσο σκληρούς αλλά και μαλακούς, αναπτύσσονται στην επιφάνεια και ξεπερνούν την υφιστάμενη μικρορύπανση. Καθώς οι μακροοργανισμοί αναπτύσσονται και ενηλικιώνονται δημιουργούν «μικροβιότοπους» οι οποίοι ελκύουν με τη σειρά τους την περαιτέρω εγκατάσταση ρυπογόνων οργανισμών.
- Εντός εβδομάδων έως μηνών, το υπόστρωμα ρυπαίνεται από τριτογενείς ρυπογόνους οργανισμούς οι οποίοι τυπικά κατοικούν εντός της στάσιμης βιορύπανσης. Καθώς οι ρυπογόνες κοινότητες ωριμάζουν εντός μερικών χρόνων, αυξάνεται η ποικιλία και ο πλούτος των ειδών, περιλαμβάνοντας πληθώρα οργανισμών (θαλάσσια ασπόνδυλα, βαλανόμορφα, δακτυλιοσκώληκες κτλ.).



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων σχηματισμού της βιορύπανσης [5]

Στην πραγματικότητα, το παραπάνω διαδοχικό μοντέλο παρότι αντικατοπτρίζει τα κυρίαρχα μοτίβα που εμφανίζονται κατά την ανάπτυξη της βιορύπανσης, υπεραπλουστεύει την διαδικασία αποικισμού, υπονοώντας de facto διαδοχή μεταξύ των διαφορετικών σταδίων.

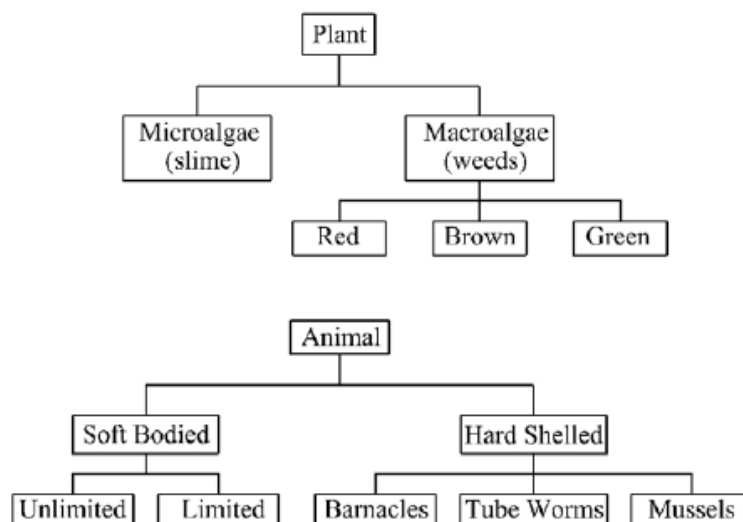
Γίνεται πλέον ευρέως αποδεκτό ότι ο αποικισμός ακολουθεί ένα δυναμικό πιθανολογικό μοντέλο, στο οποίο η απουσία ενός εκ των σταδίων δεν αποκλείει την ανάπτυξη ενός άλλου. Για παράδειγμα, ορισμένα είδη βελανοφόρων και βρυοζών μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα υπόστρωμα χωρίς την παρουσία μίας βιομεμβράνης. Η εξέλιξη του αποικισμού επομένως εξαρτάται από το είδος και το πλήθος των παριστάμενων οργανισμών, η εγκατάσταση των οποίων στο υπόστρωμα είναι ανεξάρτητη από τους άλλους. Κατά την απουσία ενός υποστρώματος ρυπογόνοι οργανισμοί και οργανικά υπολείμματα δύνανται να σχηματίσουν ένα συσσωμάτωμα (θαλάσσιο χιόνι – marine snow) [6], το οποίο παραμένει στο θαλασσινό νερό και εφόσον προσκολληθεί μεταγενέστερα σε κάποιο υπόστρωμα επιτρέπει την πλήρη ανάπτυξη ζωντανών οργανισμών που είναι παγιδευμένοι σε αυτό όπως είναι οι προνύμφες ασπόνδυλων και οι σπόροι άλγης [7].



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση της θαλάσσιας βιορύπανσης: α) διαδοχικό μοντέλο και β) πιθανολογικό μοντέλο [4]

Η βιορύπανση αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία στην οποία συμμετέχουν περισσότερα από 1700 είδη που απαρτίζονται από περισσότερους από 4000 οργανισμούς [2]. Ανάλογα με το είδος των οργανισμών που την απαρτίζουν στα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της, διακρίνεται σε μαλακή, σκληρή και σύνθετη. Στην περίπτωση της μαλακής βιορύπανσης (soft fouling), οι κυρίαρχοι οργανισμοί που παρατηρούνται είναι η γλίτσα και το γρασίδι. Ο σχηματισμός της γλίτσας (slime) αποτελεί το πρώτο στάδιο του μηχανισμού ανάπτυξης της βιορύπανσης και αποτελείται κυρίως από βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και μικροάλγη (φύκια). Το γρασίδι (grass) αποτελεί μία μορφή πολυκυτταρικής πράσινης και καστανής άλγης και σχηματίζεται κυρίως πλησίον της ισάλου γραμμής, όπου υπάρχει επαρκής φωτισμός για την πραγματοποίηση της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης.

Η σκληρή βιορύπανση (hard fouling) απαρτίζεται κυρίως από καρκινοειδή (barnacles) και δακτυλιοσκώληκες (tubeworms). Ορισμένες εκτεθειμένες επιφάνειες δύναται να αντιμετωπίσουν σοβαρά επιβαρυντικές καταστάσεις όπου αναπτύσσεται ταυτόχρονα ένας συνδυασμός σκληρής και μαλακής βιορύπανσης με ασβεστώδεις αποθέσεις (calcareous deposits). Η σύνθετη βιορύπανση (composite fouling) συναντάται σε προηγμένα στάδια της βιορύπανσης, όπου ώριμα καρκινοειδή και δακτυλιοσκώληκες δύναται να συνυπάρχουν ταυτόχρονα με ασβεστώδεις δίθυρους οργανισμούς όπως μύδια ή στρείδια, ή υδρόζωα με ασβεστώδη κυτταρική δομή όπως κοράλλια και ανεμώνες.



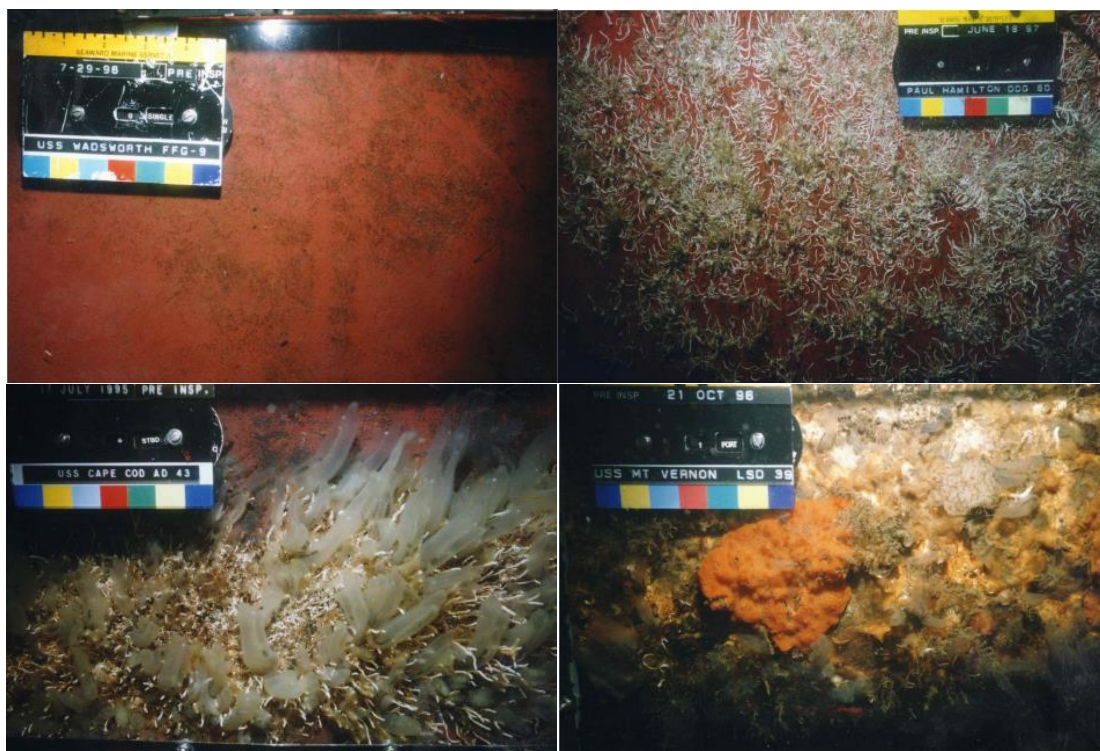
Εικόνα 3: Κατηγοριοποίηση ρυπογόνων οργανισμών [8]

Το Τεχνικό Εγχειρίδιο των Ναυτικών Πλοίων (Naval Ship's Technical Manual – NTSM) του Αμερικανικού Πολεμικού Ναυτικού [9] προδιαγράφει τον Βαθμό Ρύπανσης (Fouling Rating) ως έναν δείκτη του επιπέδου βιορύπανσης μίας επιφάνειας. Ένας βαθμός αντιστοιχείται σε κάθε μία από δέκα τυπικές καταστάσεις ρύπανσης μίας επιφάνειας, σε κλίμακα που

κυμαίνεται από μηδέν έως εκατό με ενδιάμεσο βήμα δέκα. Ο χαμηλότερος βαθμός αντιστοιχεί σε καθαρή γάστρα, ενώ οι υψηλότεροι βαθμοί αντιπροσωπεύουν ρυπογόνους πληθυσμούς οργανισμών αυξανόμενης ποικιλότητας και σοβαρότητας. Οι αντιπροσωπευτικοί βαθμοί ρύπανσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 παρακάτω:

Πίνακας 1: Βαθμός ρύπανσης (FR) κατά αύξουσα σειρά σοβαρότητας

Τύπος Ρύπανσης	Περιγραφή	Βαθμός Ρύπανσης (FR)
Μαλακή	Τυπικά εφαρμοσμένο αντιρρυπαντικό επίστρωμα σε καθαρή, άνευ ρύπανσης γάστρα	0
Μαλακή	Ελαφρά γλίτσα	10 - 20
Μαλακή	Έντονη γλίτσα	20
Μαλακή	Ίνες γρασιδιού ή ελαφρά μαλακή μη ασβεστώδης ρύπανση	30
Σκληρή	Ασβεστώδης ρύπανση υπό τη μορφή δακτυλιοσκώληκων	40
Σκληρή	Ασβεστώδης ρύπανση υπό τη μορφή καρκινοειδών	50
Σκληρή	Συνδυαστική ανάπτυξη δακτυλιοσκώληκων και καρκινοειδών	60-70
Σκληρή	Πυκνή ανάπτυξη δακτυλιοσκώληκων και καρκινοειδών. Ασβεστώδη κελύφη λευκής ή καστανής απόχρωσης (στρείδια και μύδια) ή με επικάλυψη γλίτσας ή γρασιδιού	80 - 90
Σύνθετη	Παρουσία όλων των τύπων ρύπανσης, μαλακής και σκληρής, κυρίως μαλακά χιτωνοφόρα που αναπτύσσονται πάνω σε ποικιλία ειδών σκληρής ρύπανσης	100



Εικόνα 4: Τυπικές επιφάνειες γάστρας με διαφορετικούς βαθμούς ρύπανσης. FR-10 (άνω αριστερά), FR-40 (άνω δεξιά), FR-80 (κάτω αριστερά), FR-100 (κάτω δεξιά) [9]

1.3 Παράγοντες επηρεασμού του ρυθμού ανάπτυξης της βιορύπανσης

Η σύνθεση και η ένταση της συσσώρευσης θαλάσσιων οργανισμών σε ένα βυθισμένο υπόστρωμα ποικίλει σημαντικά γεωγραφικά, εποχικά και τοπικά επηρεαζόμενη από μία πολυάριθμη σειρά βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων [4]. Οι αβιοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ανάπτυξης της βιορύπανσης περιλαμβάνουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού, όπως η θερμοκρασία, το pH, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο, την αλατότητα και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και σε θρεπτικά συστατικά. Επιπλέον αβιοτικοί παράγοντες αποτελούν οι επικρατούσες υδροδυναμικές συνθήκες όπως η ταχύτητα των ρευμάτων, η έκθεση σε κυματισμούς, και το βάθος. Συγκεκριμένες ιδιότητες του εκτιθέμενου υποστρώματος όπως η σύνθεση του υλικού, ο χρωματισμός, η τραχύτητα και η σχετική ταχύτητα του, επηρεάζουν εξίσου τον αποικισμό οργανισμών και την ανάπτυξη της βιορύπανσης.

Μεταξύ των βιοτικών παραγόντων, η βιολογία των διαφόρων οργανισμών υπαγορεύει πόσο πιθανός είναι ο αποικισμός σε ένα βυθισμένο υπόστρωμα. Ο τελευταίος με τη σειρά του εξαρτάται από πληθώρα αλληλεπιδράσεων σχετιζόμενων με συγκεκριμένα είδη και διαφέρει επομένως σημαντικά μεταξύ διαφορετικών ειδών σε διαφορετικές περιοχές. Επιπροσθέτως, χημικά στοιχεία που απελευθερώνονται ως αποτέλεσμα του ανταγωνισμού, της αναπαραγωγής, της βοσκής και της θήρευσης μεταξύ των ειδών διαδραματίζουν σημαντικό

ρόλο στην εγκατάσταση διαφορετικών οργανισμών στην επιφάνεια. Πολλοί από τους παράγοντες είναι αλληλένδετοι και όλοι είναι άμεσα ή έμμεσα επηρεαζόμενοι από την εποχικότητα και την τοποθεσία. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύονται οι κυριότεροι αβιοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό ανάπτυξης της βιορύπανσης παρακάτω.

1.3.1. Θερμοκρασία θαλασσινού νερού

Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού αποτελεί καθοριστικής σημασίας παράγοντα για τη σύνθεση της βιορύπανσης, τον αποικισμό, την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή των οργανισμών. Γενικά, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης της βιορύπανσης και συνεπώς περιοχές κοντά σε πολικά κλίματα με χαμηλές θερμοκρασίες νερού ($< 5^{\circ}\text{C}$) αντιμετωπίζουν μικρά προβλήματα από το φαινόμενο της βιορύπανσης. Αντιθέτως, σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές εμφανίζονται υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης της βιορύπανσης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του νερού ($> 20^{\circ}\text{C}$) που επιτρέπει την συνεχή αναπαραγωγή των ρυπογόνων οργανισμών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σε περιοχές εύκρατου κλίματος με μεσαίες θερμοκρασίες νερού, ($5 - 20^{\circ}\text{C}$) η βιορύπανση εμφανίζεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους αλλά επιδεικνύοντας ισχυρή εποχικότητα με τους υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης της να επικρατούν από τα μέσα της Άνοιξης έως και τα μέσα του Φθινοπώρου.

1.3.2. Φυσικοχημική σύνθεση θαλασσινού νερού

Η περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού σε οξυγόνο, αλάτι και θρεπτικά συστατικά επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό ανάπτυξης της βιορύπανσης. Η παρουσία επαρκούς οξυγόνου είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη βιορυπογόνων οργανισμών σε μία επιφάνεια. Η συγκέντρωση οξυγόνου σε μία επιφάνεια μειώνεται με αντίστοιχη μείωση της πίεσης, ενώ η συγκέντρωση γενικά στο θαλασσινό νερό αποτελεί ταυτόχρονα συνάρτηση του βάθους και της επικρατούσας πίεσης. Η αλατότητα του νερού δύναται να διαφέρει σημαντικά μεταξύ του ανοικτού ωκεανού (30-35 PSU), των υφάλμυρων νερών (< 30 PSU) και του φρέσκου νερού (< 0.5 PSU). Η ανεκτικότητα στην αλατότητα του νερού παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τον τύπο των ρυπογόνων οργανισμών, παρατηρώντας ανάπτυξη διαφορετικών ειδών βιορύπανσης, σε νερά διαφορετικής αλατότητας. Αναφορικά με τη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, βασικοί ρυθμιστές του ρυθμού ανάπτυξης της βιορύπανσης αποτελούν το άζωτο και ο σίδηρος, με την υψηλή περιεκτικότητα να συνδέεται με εκρηκτική ανάπτυξη σπόρων άλγης. Παράλληλα, η μόλυνση των νερών δύναται να περιορίσει σημαντικά τα παρόντα θρεπτικά συστατικά και κατ' επέκταση την ανάπτυξη της βιορύπανσης.

1.3.3. Βάθος και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Το βάθος του νερού και η έκθεση στο ηλιακό φως επηρεάζουν σημαντικά τη σύνθεση και το ρυθμό ανάπτυξης της βιορύπανσης. Μακροοργανισμοί, ιδίως φωτοσυνθετικοί όπως η μακροάλγη, είναι συνήθως πολυπληθέστεροι στην ευφωτική ζώνη, σε βάθη που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 40 μέτρων. Η περιοχή αυτή είναι συνήθως θερμότερη, με υψηλότερα επίπεδα έκθεσης στο ηλιακό φως και είναι πλούσια σε φυτοπλαγκτόν, που αποτελεί την κύρια τροφή για πληθώρα μη φωτοσυνθετικών οργανισμών. Ως αποτέλεσμα της μειούμενης έντασης της φωτεινότητας με την αύξηση του βάθους, συγκροτείται η τάση μείωσης του ρυθμού ανάπτυξης της βιορύπανσης και της βιομάζας καθώς το βάθος αυξάνεται. Συνεπώς, στην περίπτωση της γάστρας των πλοίων, τα πλευρικά τμήματα της (vertical sides) που είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζουν υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης της βιορύπανσης συγκριτικά με τον πυθμένα (flat bottom).

1.3.4. Τύπος υποστρώματος

Ο αποικισμός ρυπογόνων οργανισμών επηρεάζεται σημαντικά από τον τύπο του υποστρώματος στο οποίο προσκολλούν. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών επιδρούν στην χημεία της διεπιφάνειας νερού – υποστρώματος, με την επιφανειακή ενέργεια και την υδροφοβικότητα του υποστρώματος να αποτελούν κυριάρχους παράγοντες που ασκούν επιρροή στον αποικισμό και στην αντοχή πρόσφυσης των οργανισμών. Ορισμένα είδη ρυπογόνων οργανισμών προσκολλούν κατά προτίμηση σε υδροφοβικά υποστρώματα (βρυόζωα), ενώ άλλα όπως τα βαλανόμορφα προτιμούν την προσκόλλησή τους σε υδρόφιλα υποστρώματα, ενώ τα υδρόζωα αποικούν τόσο σε υδροφοβικές όσο και υδρόφιλες επιφάνειες. Γενικά, το αλουμίνιο, ο χάλυβας και ο χαλκός είναι πιο ευαίσθητα στη βιορύπανση από ότι ορισμένα μη μεταλλικά υποστρώματα όπως οι ίνες γυαλιού, το πολυαιθυλένιο, το πολυαμίδιο και το καουτσούκ. Ωστόσο, η απόκριση των ρυπογόνων οργανισμών στην υλική σύνθεση δεν είναι καθολική και διαφορετικές ομάδες βιολογικών ρυπαντών ή διαφορετικά είδη εντός της ίδιας ομάδας μπορεί να εμφανίζουν διαφορετικές αποκρίσεις στο ίδιο υλικό, ανάλογα με παράγοντες όπως η θερμοκρασία και το βάθος.

Η τραχύτητα του υποστρώματος διαδραματίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στον αποικισμό ρυπογόνων οργανισμών. Οι επιφανειακές ανωμαλίες που σχηματίζονται αυξάνουν την έκταση της επιφάνειας που δύναται να αποικηθεί. Παράλληλα, οι τοπικές κοιλότητες που σχηματίζονται συνιστούν ένα επαρκές περιβάλλον για την ανάπτυξη βακτηρίων και άλλων θαλάσσιων μικροοργανισμών, καθώς προστατεύονται σε κλειστές περιοχές από εξωτερικές

επιθέσεις, διατμητικές δυνάμεις και τριβές, καθιστώντας την απομάκρυνση τους από υδροδυναμικές δράσεις ιδιαίτερα δύσκολη.

1.3.5. Ταχύτητα λειτουργίας και χρονική περίοδος ακινησίας

Η ταχύτητα που αναπτύσσει η γάστρα ενός πλοίου έχει καθοριστικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη της βιορύπανσης. Συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι για ταχύτητες πλοίων άνω των 6 κόμβων μπορεί να περιοριστεί σημαντικά η δυνατότητα των θαλάσσιων οργανισμών να προσκολλούν στις γάστρες τους [10]. Ο αποικισμός και η ανάπτυξη κοινοτήτων ρυπογόνων οργανισμών λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τις στατικές περιόδους ελλιμενισμού ενός πλοίου, με την έκταση της βιορύπανσης να σχετίζεται άμεσα με τη χρονική διάρκεια παραμονής σε στατική κατάσταση και τις επικρατούσες συνθήκες που διαμορφώνουν τους προαναφερθέντες βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες στον εκάστοτε λιμένα. Σύμφωνα με σχετικές έρευνες [11], η συσσωρευόμενη βιορύπανση που έχει προκύψει μετά από μία στατική περίοδο δύναται να αποκολληθεί εν μέρει υπό την επίδραση ικανής υδροδυναμικής φόρτισης της γάστρας, με το ποσοστό του επιτυγχανόμενου καθαρισμού να σχετίζεται άμεσα με την αναπτυσσόμενη ταχύτητα και τον τύπο της αντιρρυπαντικής επίστρωσης που έχει τοποθετηθεί.

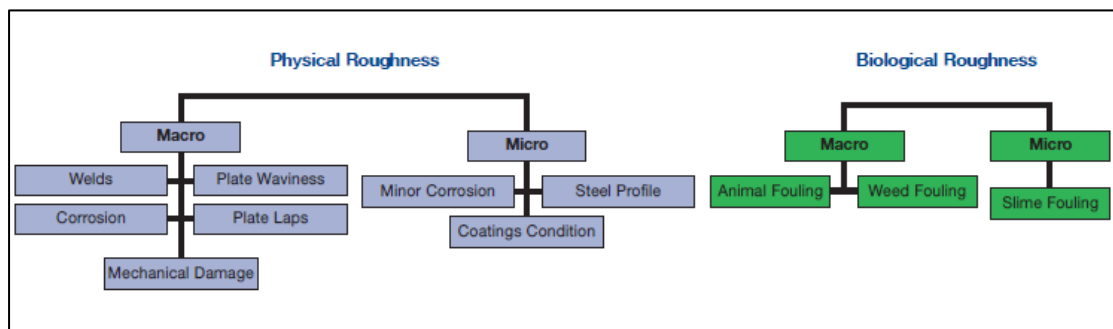
Κεφάλαιο 2^ο : Οι επιπτώσεις της βιορύπανσης και της τραχύτητας στην πρόωση

2.1 Το πρόβλημα της τραχύτητας της γάστρας του πλοίου

Ως τραχύτητα ορίζεται η οποιαδήποτε ανισότητα και ανομοιομορφία του ελάσματος της γάστρας. Η παρουσία τραχύτητας στην επιφάνεια της γάστρας ενός πλοίου έχει αρνητική επίδραση στη συνολική αντίσταση, αυξάνοντας την αντίσταση τριβής και οδηγώντας σε αυξημένες απαιτήσεις ισχύος πρόωσης και λειτουργικό κόστος, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα υπηρεσίας του. Η τραχύτητα της επιφάνειας της γάστρας των πλοίων εκφράζεται ως το μέγιστο ύψος μεταξύ κοιλάδας και κορυφής μίας ανωμαλίας (R_{t50}), σε οποιαδήποτε έκταση 50 χιλιοστών κατά μήκος της γάστρας. Η μέτρηση της τραχύτητας πραγματοποιείται από ειδικά ηλεκτρονικά μετρητικά όργανα (Hull Roughness Analyser), τα οποία σαρώνουν χειροκίνητα μία περιοχή μήκους μεταξύ 750 mm έως 1000 mm προκειμένου να λάβουν 10 έως 15 μετρήσεις της τραχύτητας R_{t50} , εκ των οποίων προκύπτει ο μέσος όρος για την συγκεκριμένη περιοχή. Λαμβάνοντας, για λόγους στατιστικής ακρίβειας, τον μέσο όρο τουλάχιστον 100 περιοχών σε όλη την έκταση της γάστρας, προκύπτει η Μέση Τραχύτητα Γάστρας (Average Hull Roughness – AHR).

Η τραχύτητα της γάστρας των πλοίων διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους, κάθε ένας με τα μικροσκοπικά και μακροσκοπικά του χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα σε:

- Βιολογική τραχύτητα (biological roughness)
- Φυσική τραχύτητα (physical roughness)



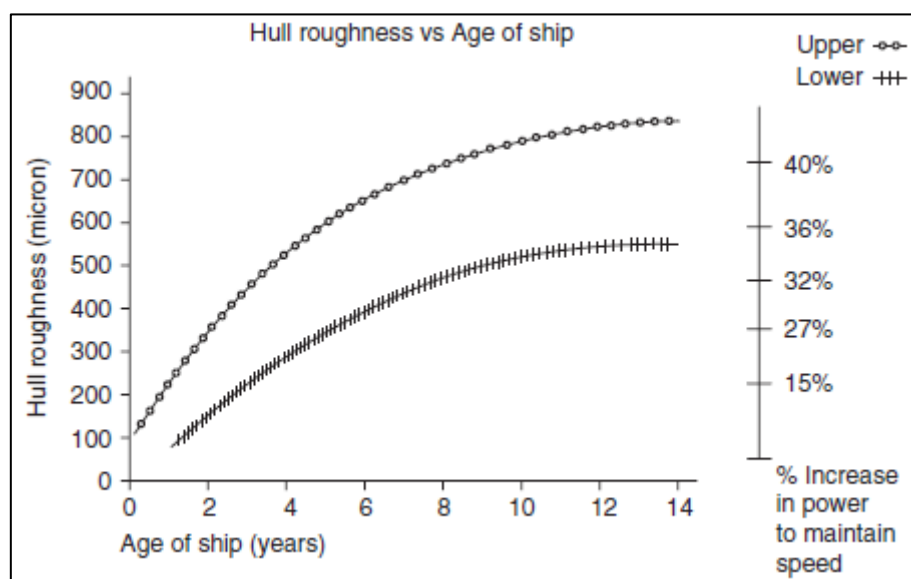
Εικόνα 5: Τυπική διάκριση των δύο τύπων τραχύτητας της γάστρας πλοίου [12]

Η βιολογική τραχύτητα οφείλεται στην συσσώρευση βιορύπανσης στην επιφάνεια της γάστρας του πλοίου. Σε μικροσκοπικό επίπεδο σχετίζεται κυρίως με την ανάπτυξη ενός βιοφίλμ γλίτσας στην επιφάνεια της γάστρας, ενώ αντίστοιχα σε μακροσκοπικό επίπεδο σχετίζεται με την ανάπτυξη φυτικών και ζωικών οργανισμών, σύμφωνα με τους

διαφορετικούς βαθμούς βιορύπανσης που αναλύθηκαν στο 1° Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η φυσική τραχύτητα οφείλεται μακροσκοπικά σε παραμορφώσεις των ελασμάτων της γάστρας (κυματισμοί, διπλώσεις), σε συγκολλήσεις και στην ποιότητα τους, καθώς και σε μηχανική καταπόνηση ή διάβρωση τους, ενώ μικροσκοπικά στο προφίλ του χάλυβα, φαινόμενα τοπικής διάβρωσης καθώς και στην κατάσταση του αντιδιαβρωτικού / αντιρρυπαντικού επιστρώματος που έχει εφαρμοστεί. Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύουν ότι η φυσική τραχύτητα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου καθώς αυξάνει η ηλικία των πλοίων [13]. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στις παρακάτω αιτίες:

- Μηχανική διάβρωση λόγω χτυπημάτων και γδαρσιμάτων της γάστρας από αλυσίδες άγκυρας, σχοινιά, προσεγγίσεις ρυμουλκών, προσαράξεις και προσεγγίσεις σε προβλήτες με συνεπαγόμενη καταστροφή των υφαλοχρωμάτων.
- Σταδιακή αστοχία του αντιδιαβρωτικού / αντιρρυπαντικού επιστρώματος με την εμφάνιση φυσαλίδων (blistering), την τοπική αποκόλληση (detachment) και την επιφανειακή διάβρωση του υφαλοχρώματος (corrosion - pitting).
- Μη σωστή εφαρμογή των υφαλοχρωμάτων κατά τη διαδικασία βαφής ή συσσώρευση πολλαπλών παλαιότερων επιστρώσεων που δημιουργούν ανομοιόμορφη επιφάνεια γάστρας. Το τελευταίο φαινόμενο οφείλεται στη διαχρονική τοπική απομάκρυνση των υφαλοχρωμάτων έναντι καθολικής και ομοιόμορφης αφαίρεσης τους (Κεφάλαιο 4°, Παράγραφος 4.2).



Εικόνα 6: Τυπική αύξηση της μέσης τραχύτητας της γάστρας συναρτήσει του χρόνου και επίδραση στις απαιτήσεις πρόωσης [13]

2.2 Συσχέτιση τραχύτητας επιφάνειας και αντίστασης πλοίου

Ο βασικός ρόλος ενός αντιρρυπαντικού επιστρώματος είναι να περιορίσει την αύξηση της αντίστασης τριβής που συντελείται ως αποτέλεσμα αύξησης της τραχύτητας της επιφάνειας, λόγω αλλοίωσης της επιφάνειας της γάστρας και συσσώρευσης βιορύπανσης. Η αντίσταση τριβής δύναται να αποτελέσει έως και το 90% της συνολικής αντίστασης για ορισμένους τύπους γάστρας, ακόμη και στην περίπτωση καθαρής και σχετικά λείας γάστρας [14]. Προκειμένου να προσδιοριστεί ποσοτικά η επίδραση της τραχύτητας στην αντίσταση τριβής ενός πλοίου είναι απαραίτητο να γίνουν κατανοητές αρχικά, ορισμένες βασικές αρχές της μεθοδολογίας εκτίμησης της αντίστασης των πλοίων και εν συνεχεία των βασικών χαρακτηριστικών της τυρβώδους ροής οριακών στρωμάτων και της επίδρασης της τραχύτητας επί τούτων.

2.2.1. Βασικές αρχές μεθοδολογίας πειραματικής εκτίμησης αντίστασης πλοίου

Η εκτίμηση της συνολικής αντίστασης και των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης πραγματοποιείται τυπικά μέσω πειραματικής διαδικασίας σε μοντέλα υπό κλίμακα. Η συνολική αντίσταση ενός μοντέλου εκφράζεται ως συνάρτηση δύο συνιστωσών, της υπολειπόμενης αντίστασης (R_{Rm}) και της αντίστασης τριβής (R_{Fm}).

$$R_{Tm} = R_{Rm} + R_{Fm} \quad (1)$$

Η υπολειπόμενη αντίσταση οφείλεται κυρίως στην επίδραση των κυματισμών, ενώ η αντίσταση τριβής σχετίζεται με της εφαιπτομενικές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη γάστρα λόγω του ιξώδους του υγρού που την περιβάλλει. Αποτελεί συνήθως πρακτική δε η παρουσίαση της παραπάνω σχέσης, στην αδιάστατη μορφή της, διαιρώντας με την σχέση $\frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot U_m \cdot S_m$, όπου S_m η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας του μοντέλου, ρ_m η πυκνότητα του υγρού και U_m η ταχύτητα του μοντέλου. Συνεπώς, προκύπτει ο συντελεστής συνολικής αντίστασης του μοντέλου (C_{Tm}), ο συντελεστής υπολειπόμενης αντίστασης (C_{Rm}) και ο συντελεστής αντίστασης τριβής (C_{Fm}). Σύμφωνα με την υπόθεση του Froude (1868) ο συντελεστής υπολειπόμενης αντίστασης είναι συνάρτηση του αριθμού Froude, $Fr_m = \frac{U_m}{\sqrt{g \cdot L_m}}$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και L_m το μήκος του μοντέλου, ενώ ο συντελεστής τριβής είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds, $Re_m = \frac{U_m \cdot L_m}{\nu}$, όπου ν το κινηματικό ιξώδες του υγρού. Επομένως η σχέση των συντελεστών αντίστασης λαμβάνει τη μορφή (Gillmer & Johnson, 1982),

$$C_{Tm}(Fr_m, Re_m) = C_{Rm}(Fr_m) + C_{Fm}(Re_m) \quad (2)$$

Προκειμένου να εκτιμηθεί η πραγματική αντίσταση του πλοίου είναι απαραίτητη η επίτευξη δυναμικής ομοιότητας μεταξύ του μοντέλου και του πλοίου, η οποία επιτυγχάνεται λαμβάνοντας ίσους αριθμούς Froude μεταξύ πλοίου και μοντέλου,

$$Fr_m = Fr_s \quad (3)$$

$$\frac{U_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} = \frac{U_s}{\sqrt{g \cdot L_s}} \quad (4)$$

όπου, U_s η ταχύτητα του πλοίου και L_s το μήκος του. Η συνολική αντίσταση του μοντέλου υπολογίζεται εν συνεχεία πειραματικά για την εκάστοτε ταχύτητα του $U_m = U_s \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = \frac{U_s}{\sqrt{\lambda}}$ για λόγο κλίμακας $\lambda = L_s/L_m$.

Ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου, C_{Fm} , λαμβάνεται από τη σχέση της ITTC-1957 ως,

$$C_{Fm} = \frac{0.075}{(\log Re_m - 2)^2} \quad (5)$$

Ο συντελεστής υπολειπόμενης αντίστασης, C_{Rm} , υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2). Εφόσον η υπολειπόμενη αντίσταση αποτελεί συνάρτηση του αριθμού Froude και $Fr_m = Fr_s$, ισχύει ότι $C_{Rm} = C_{Rs}$. Ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου, C_{Fs} , προκύπτει από την σχέση (5) για τον αριθμό Reynolds του πλοίου Re_s . Η συνολική αντίσταση του πλοίου επομένως δίνεται από την παρακάτω σχέση (Gillmer & Johnson, 1982),

$$C_{Ts} = C_{Rs} + C_{Fs} + C_A \quad (6)$$

όπου C_A είναι ο συντελεστής συσχέτισης, που χρησιμοποιείται προκειμένου να ληφθούν υπόψιν οι διαφορές που προκύπτουν συγκριτικά με την πραγματική συνολική αντίσταση του πλοίου, λόγω της επίδρασης της κλίμακας στα χαρακτηριστικά της έλικας, την επίδραση της κλίμακας στον όμορο του πλοίου, την επίδραση του τρισδιάστατου πεδίου στη συνεκτική αντίσταση και την τραχύτητα της γάστρας [14]. Προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της τραχύτητας στην αύξηση της αντίστασης τριβής και κατ' επέκταση στη συνολική αντίσταση η σχέση τροποποιείται διακρίνοντας την πρόσθετη αντίσταση τριβής λόγω τραχύτητας της γάστρας (ΔC_{Fs}) ως παρακάτω,

$$C_{Ts} = C_{Rs} + C_{Fs} + C_A + \Delta C_{Fs} \quad (7)$$

2.2.2. Βασικές αρχές τυρβώδους οριακού στρώματος

Η εκτίμηση της επίδρασης της τραχύτητας επιφάνειας της γάστρας στην αντίσταση τριβής του πλοίου μέσω του πρόσθετου όρου ΔC_{FS} , απαιτεί πρώτα την κατανόηση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών του προφίλ μέσης ταχύτητας ενός τυρβώδους οριακού στρώματος και την επίδραση σ' αυτό της τραχύτητας της επιφάνειας. Το οριακό στρώμα είναι η περιοχή πλησιέστερα στη γάστρα του πλοίου όπου το ρευστό εμποδίζεται ως αποτέλεσμα του ιξώδους του [13]. Πάνω στη γάστρα η σχετική ταχύτητα της επιφάνειας-τοιχώματος και του ρευστού είναι μηδενική (συνθήκη μη ολίσθησης), ενώ σε μία συγκεκριμένη απόσταση μακριά από το τοίχωμα, η ταχύτητα ανακτά την τιμή της ελεύθερης ροής. Λόγω των δύο οριακών καταστάσεων μία περιοχή μεταβαλλόμενων ταχυτήτων παράλληλα προς το τοίχωμα σχηματίζεται η οποία αποτελεί το οριακό στρώμα. Το πάχος του οριακού στρώματος, δ , αυξάνει κατά μήκος της γάστρας του πλοίου και δύναται να ξεπεράσει το ένα μέτρο στην περίπτωση πλοίων μεγάλου μεγέθους [14]. Στο οριακό στρώμα που σχηματίζεται επί μίας επιφάνειας η ροή παραμένει στρωτή σε μία απόσταση κατά τη φορά της. Με την ανάπτυξη της ροής εμφανίζονται ανωμαλίες που οδηγούν στην μετάβαση προς τυρβώδη ροή.

Το οριακό στρώμα αποτελείται από διάφορες περιοχές που χαρακτηρίζονται από το προφίλ ταχύτητας του νερού σε κάθε μία. Οι περιοχές αυτές περιλαμβάνουν το ιξώδες υπόστρωμα (viscous sublayer), την περιοχή του λογαριθμικού νόμου (log-law region) και την εξωτερική περιοχή (outer region) [14].

1. Στη περιοχή του ιξώδους υποστρώματος παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση ταχυτήτων παρ' ότι έχει μικρό πάχος που αντιστοιχεί στο 10-20% του οριακού στρώματος. Η μέση ταχύτητα (mean velocity) στην περιοχή αυτή αποτελεί συνάρτηση της απόστασης από το τοίχωμα, y , της διατμητικής τάσης του τοιχώματος, τ_w , της πυκνότητας του υγρού, ρ , του κινηματικού ιξώδους, ν και του ύψους τραχύτητας, k . Η σχέση αυτή ονομάζεται «νόμος του τοιχώματος» (law of the wall) και λαμβάνεται ως εξής,

$$\frac{U}{U_\tau} = f \left[\frac{y \cdot U_\tau}{\nu}, \frac{k \cdot U_\tau}{\nu} \right] \Rightarrow U^+ = f[y^+, k^+] \quad (8)$$

όπου U_τ είναι η ταχύτητα τριβής (friction velocity) και εκφράζεται ως τετραγωνική ρίζα του λόγου μεταξύ της διατμητικής τάσης του τοιχώματος και της πυκνότητας του υγρού.

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \mu \varepsilon \tau_w = \mu \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (9)$$

Το ιξώδες υπόστρωμα αποτελείται από δύο τμήματα, το γραμμικό υπόστρωμα (linear sublayer) και το μεταβατικό στρώμα (buffer layer):

- Γραμμικό υπόστρωμα: $y^+ \leq 7$, $U^+ = y^+$. Κατά την έκταση αυτού του στρώματος η συνολική διατμητική τάση είναι σχεδόν σταθερή και ίση με διατμητική τάση του τοιχώματος.
 - Μεταβατικό στρώμα: $7 < y^+ < 40$. Το προφίλ της ταχύτητας αποκλίνει από τη γραμμικότητα και επιδεικνύει υψηλή τύρβη.
2. Η περιοχή του λογαριθμικού νόμου αποτελεί ενδιάμεση περιοχή ($y^+ > 40$) μεταξύ του ιξώδους υποστρώματος και του εξωτερικού στρώματος και είναι εξίσου τυρβώδης εκ φύσεως. Για ροές επί λείων ή τραχέων τοιχωμάτων η μέση ταχύτητα δίνεται από τη σχέση,

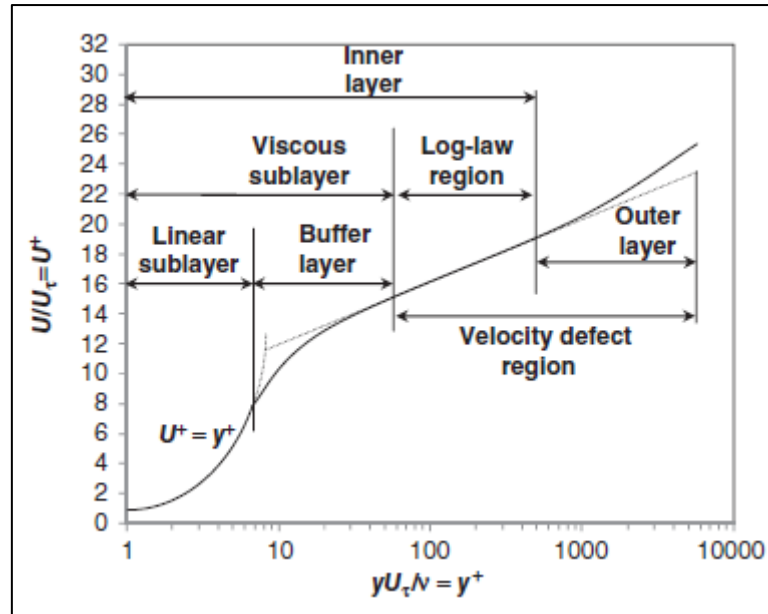
$$U^+ = \left(\frac{1}{\kappa} \right) \cdot \log y^+ + B - \Delta U^+(k^+) \quad (10)$$

όπου, $\kappa = 0.41$ είναι η σταθερά του Von Karman, $B = 5$ σταθερά για την περίπτωση λείων τοίχων και ως ΔU^+ ορίζεται η συνάρτηση τραχύτητας ($\Delta U^+ \equiv 0$ για λείους τοίχους). Επομένως, η επίδραση της τραχύτητας συνίσταται στην πρόκληση μίας προς τα κάτω μετατόπισης του προφίλ ταχύτητας στην περιοχή του λογαριθμικού νόμου, ως αποτέλεσμα της αύξησης της αντίστασης τριβής της επιφάνειας.

3. Στο εξωτερικό στρώμα η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας της ελεύθερης ροής, U_e , και της τοπικής μέσης ταχύτητας για απόσταση, y , από το τοίχωμα καθορίζεται από το πάχος του οριακού στρώματος, δ , και την ταχύτητα τριβής, U_τ , σύμφωνα με το «νόμο ελλείματος ταχύτητας» (velocity - deficit law) ως εξής:

$$\frac{U_e - U}{U_\tau} = g \cdot \left(\frac{y}{\delta} \right) \quad (11)$$

Η περιοχή αυτή είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας του τοιχώματος, εκτός από την επιρροή που η τελευταία ασκεί στον καθορισμό της κλίμακας της ταχύτητας τριβής και του πάχους του οριακού στρώματος.



Εικόνα 7: Αναπαράσταση του νόμου του τοίχου σε ένα τυρβώδες οριακό στρώμα [13]

2.2.3. Η επίδραση της τραχύτητας τοιχώματος

Η τραχύτητα του τοιχώματος οδηγεί σε αυξημένη τύρβη και ανάμιξη του υγρού στο οριακό στρώμα. Το φαινόμενο αυτό αποκρυσταλλώνεται ως αυξημένη διατμητική τάση τοιχώματος. Για τις περισσότερες επιφάνειες η αυξημένη αντίσταση τριβής εξαρτάται από το ύψος της τραχύτητας, k . Για το συγκεκριμένο είδος τραχύτητας, τρία χαρακτηριστικά καθεστώτα ροής διακρίνονται, τα οποία σχετίζονται με την τιμή της τραχύτητας του αριθμού Reynolds, k^+ :

$$k^+ = \frac{k \cdot U_\tau}{\nu} \quad (12)$$

1. Υδροδυναμικά λείο καθεστώς ($k^+ < 3$): Στην περίπτωση αυτή η ροή δεν επηρεάζεται από την τραχύτητα. Τα στοιχεία της τραχύτητας είναι τόσο αμελητέα ώστε οποιαδήποτε διαταραχή προκαλείται από αυτά να βυθίζεται στο γραμμικό υπόστρωμα. Η αντίσταση τριβής αντιστοιχεί σε λεία επιφάνεια με κυρίαρχη την ιξώδη συνιστώσα.

2. Ενδιάμεσο καθεστώς ($3 < k^+ < 25$): Η αντίσταση τριβής αυξάνεται, και διατμητική τάση του τοιχώματος εξαρτάται τόσο από τα ιξώδη όσο και από τυρβώδη στοιχεία. Το καθεστώς αυτό αντικατοπτρίζει τη συνηθέστερη κατάσταση για ένα πλοίο.

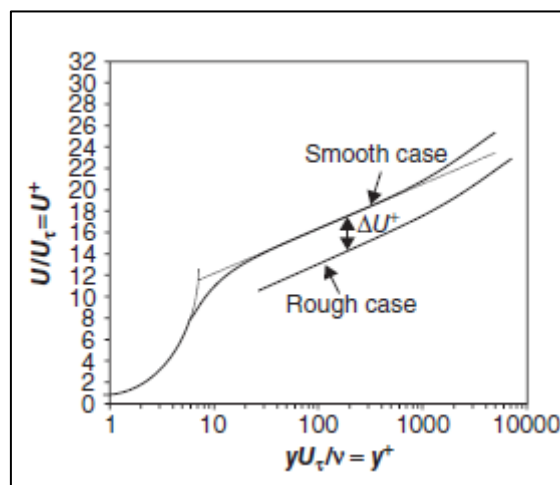
3. Πλήρως τραχύ καθεστώς ($k^+ \geq 25$): Το γραμμικό υπόστρωμα καταστρέφεται εντελώς και η διατμητική τάση τοιχώματος κυριαρχείται από τις τυρβώδεις συνιστώσες.

Μέσω της συσχέτισης της συνάρτησης τραχύτητας, ΔU^+ , με άμεσα μετρήσιμες παραμέτρους όπως η τραχύτητα του αριθμού Reynolds, k^+ , δύναται να εκτιμηθεί έμμεσα η επίπτωση της τραχύτητας στο συντελεστή συνολικής αντίστασης μέσω του υπολογισμού του συντελεστή πρόσθετης αντίστασης τριβής, ΔC_F . Η γενικευμένη συσχέτιση των παραπάνω έως σήμερα δεν έχει επιτευχθεί, ωστόσο αποτελεί άξια αναφοράς η έρευνα του Townsin, όπου ανέλυσε μέσω πειραματικών διατάξεων τη ροή του υγρού σε μία σειρά επιφανειών βαμμένων με επιστρώματα διαφορετικής τραχύτητας και υπολόγισε τη συνάρτηση τραχύτητας για ένα εύρος τραχυτήτων $h = R_{t50}$. Η φόρμουλα που προέκυψε [15] συσχετίζει τον συντελεστή αντίστασης τριβής με την μέση τραχύτητα της γάστρας, AHR , το μήκος της ισάλου γραμμής, L_{WL} και τον αριθμό Reynolds, R_n , ως εξής:

$$\Delta C_F = 0.044 \cdot \left[\left(\frac{AHR}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot R_n^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.000125 \quad (13)$$

Η παραπάνω εξίσωση υιοθετήθηκε από το 19° συνέδριο της ITTC (International Towing Tank Conference), η οποία διαχώρισε την επίδραση της τραχύτητας στην συνολική αντίσταση από το συντελεστή συσχέτισεως και την απέδωσε στην ανοχή τραχύτητας (roughness allowance) ή εναλλακτικά πρόσθετη αντίσταση τριβής, ΔC_F . Η εναλλακτική, ισοδύναμη διατύπωση της παραπάνω εξίσωσης δόθηκε από τον ίδιο τον Townsin [16], ως εξής:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta C_F}{C_T} = 0.044 \cdot \left[\left(\frac{k_2}{L_{BP}} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{k_1}{L_{BP}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] / C_T \quad (14)$$



Εικόνα 8: Η επίπτωση της τραχύτητας στο λογαριθμικό νόμο [13]

2.3 Η επίδραση της βιορύπανσης στην αντίσταση και πρόωση

Η εκτίμηση του αντίκτυπου διαφορετικών βαθμών βιορύπανσης στην αντίσταση και συνεπώς στις απαιτήσεις ισχύος πρόωσης ενός πλοίου αποτελεί μία ιδιαίτερως σύνθετη διαδικασία. Η ευρεία διακύμανση της ποικιλότητας και της πολυπλοκότητας των ρυπογόνων κοινοτήτων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της γάστρας των πλοίων καθιστούν δύσκολη την γενική συσχέτιση της συνάρτησης τραχύτητας ΔU^+ με την τραχύτητα της γάστρας για κάθε διαφορετικό βαθμό βιορύπανσης της γάστρας.

Ο Townsin [15] παρουσίασε μία σύνοψη μετρήσεων από πειραματικά δεδομένα του ποσοστού αύξησης της αντίστασης τριβής για τρεις βασικούς τύπους βιορύπανσης (γλίτσα, ασβεστώδης ρύπανση και γρασίδι). Στην περίπτωση σχηματισμού ενός βιοφίλμ γλίτσας στην επιφάνεια της γάστρας, οι μετρήσεις υπέδειξαν αύξηση της αντίστασης τριβής που κυμαινόταν από 5% έως 25%, ωστόσο βασικές παράμετροι των υπό μελέτη πλοίων διέφεραν σημαντικά (χρόνος ακινησίας, ταχύτητα, αντιρρυπαντικό επίστρωμα, πάχος του σχηματιζόμενου βιοφίλμ κτλ.). Σύμφωνα με τον Townsin, δεν υπάρχει τρόπος να προβλεφθεί πως θα αναπτυχθεί ένα βιοφίλμ γλίτσας για ένα πλοίο, συγκεκριμένου εμπορικού προφίλ και αντιρρυπαντικού επιστρώματος.

Η εκτίμηση της επίδρασης της ασβεστώδους ρύπανσης στη αντίσταση τριβής του πλοίου είναι σχετικά απλούστερη ως διαδικασία, λόγω των ευδιάκριτων χαρακτηριστικών διαμέτρου, ύψους και κατανομής της πυκνότητας της ασβεστώδους ρύπανσης που μπορούν να μετρηθούν με σχετική ευκολία. Πειραματικές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι η μέγιστη προστιθέμενη αντίσταση τριβής εμφανίζεται για κάλυψη με ασβεστώδη ρύπανση στο 75% της επιφάνειας με την πρώτη να εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 85%.

Αντιθέτως, η εκτίμηση της επίδρασης της ρύπανσης που οφείλεται στην ανάπτυξη στην επιφάνεια της γάστρας αποτέλεσε ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα, καθώς ήταν απαραίτητο να προσδιοριστεί μία παράμετρος ικανή να συσχετισθεί με την αύξηση της αντίστασης. Το μέσο ύψος των εύκαμπτων νημάτων άλγης που είναι προσκολλημένα κάθετα σε μία επιφάνεια, σε συνδυασμό με ένα μέτρο της πυκνότητας της κατανομής τους, χρησιμοποιήθηκε ως χαρακτηριστική παράμετρος για τη διερεύνηση της μεταβολής στη δομή του τυρβώδους οριακού στρώματος και συνεπώς για την εκτίμηση της προκύπτουσας αύξησης της αντίστασης τριβής. Πρωτοποριακή έρευνα στον τομέα αυτό συντέλεσαν οι Lewkowicz και Das [17], ακολουθούμενοι από τους Swain και Schultz [18].

Slime	5%	Conn <i>et al.</i> (1953)
	8–14%	Watanabe <i>et al.</i> (1969)
	18%	Lewkowicz and Das (1986)
	10–20%	Loeb <i>et al.</i> (1984)
	25%*	Lewthwaite <i>et al.</i> (1985)
Shell and Weed	8–18%*	Bohlander (1991)
	85%	Kempf (1937) 75% coverage shell 4.5 mm.

* Also some hard fouling and/or macroalgae.

Εικόνα 9: Επίδραση διαφορετικών τύπων βιορύπανσης στην αντίσταση τριβής ενός πλοίου [13]

Ο Schultz [14], συγκεφαλαιώνοντας σημαντικό μέρος του ερευνητικού έργου σχετιζόμενου με την αύξηση της αντίστασης για διαφορετικά είδη βιορύπανσης, επιχείρησε να συσχετίσει το ισοδύναμο ύψος τραχύτητας άμμου k_s και τη μέση τραχύτητα γάστρας R_{t50} με την τραχύτητα του αντιρρυπαντικού επιστρώματος και τους διαφορετικούς βαθμούς ρύπανσης που ορίζει το Τεχνικό Εγχειρίδιο Ναυτικών Πλοίων (NSTM) του Αμερικανικού Πολεμικού Ναυτικού (Κεφάλαιο 1°, Παράγραφος 1.2).

Πίνακας 2: Συσχέτιση Βαθμών Ρύπανσης (FR) με ισοδύναμη τραχύτητα άμμου k_s και μέση τραχύτητα γάστρας R_{t50}

Περιγραφή κατάστασης	Βαθμός Ρύπανσης NSTM	k_s (μm)	R_{t50} (μm)
Υδραυλικά λεία επιφάνεια	0	0	0
Τυπικά εφαρμοσμένο αντιρρυπαντικό επίστρωμα	0	30	150
Αλλοιωμένο επίστρωμα ή ελαφρά γλίτσα	10-20	100	300
Έντονη γλίτσα	30	300	600
Ελαφρώς ασβεστώδης ρύπανση ή γρασίδι	40-60	1000	1000
Μέτρια ασβεστώδης ρύπανση	70-80	3000	3000
Οξεία ασβεστώδης ρύπανση	90-100	10000	10000

Εν συνεχεία, βασιζόμενος σε πειραματικά αποτελέσματα μοντέλου υπό κλίμακα, στις συναρτήσεις τραχύτητας που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών [19], [20] και χρησιμοποιώντας τον νόμο ομοιότητας του Granville για τυρβώδη οριακά στρώματα, προχώρησε στην εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης τριβής και της αύξησης των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης μίας φρεγάτας κλάσης Navy Oliver Hazard Perry για τους

παραπάνω βαθμούς ρύπανσης (Πίνακας 3). Σύμφωνα με τα ευρήματα της έρευνας του Schultz, ένα τυπικό, όπως εφαρμόζεται, αντιρρυπαντικό επίστρωμα επιφέρει πολύ μικρές αρνητικές συνέπειες στην απαιτούμενη αξονική ισχύ. Η αλλοίωση του αντιρρυπαντικού επιστρώματος είτε ο σχηματισμός ενός λεπτού βιοφίλμ γλίτσας είναι ικανό να επιφέρει σημαντική αύξηση στις απαιτήσεις αξονικής ισχύος (11%), ενώ η παρουσία οξείας ασβεστώδους ρύπανσης εκτιμάται ότι οδηγεί σε αύξηση της ισχύος κατά 86% σχετικά με την υδραυλικά λεία γάστρα στη συγκεκριμένη ταχύτητα πλεύσης.

Πίνακας 3: Επίδραση των διαφορετικών Βαθμών Βιορύπανσης (FR) στη συνολική αντίσταση και στην απαιτούμενη αξονική ισχύ πρόωσης

Περιγραφή κατάστασης	ΔR_t (%)	ΔSP (%)
Υδραυλικά λεία επιφάνεια	-	-
Τυπικά εφαρμοσμένο αντιρρυπαντικό επίστρωμα	2	2
Αλλοιωμένο επίστρωμα ή ελαφρά γλίτσα	11	11
Έντονη γλίτσα	20	21
Ελαφρώς ασβεστώδης ρύπανση ή γρασίδι	34	35
Μέτρια ασβεστώδης ρύπανση	52	54
Οξεία ασβεστώδης ρύπανση	80	86

Κεφάλαιο 3^ο : Μέθοδοι προστασίας από τη θαλάσσια βιορύπανση

3.1 Ιστορική εξέλιξη των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

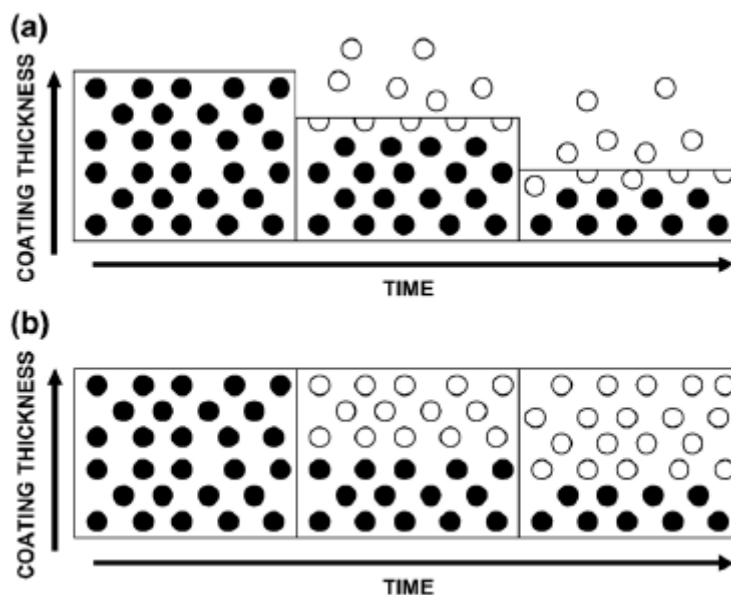
Η προσπάθεια ελέγχου του φαινομένου της βιορύπανσης, μέσω της ανάπτυξης αντιρρυπαντικών εφαρμογών, χρονολογείται από τους προϊστορικούς χρόνους και την πρώτη περίοδο ανάπτυξης των θαλασσιών μεταφορών ανθρώπων και εμπορευμάτων. Οι πρώτες τεκμηριωμένες πηγές τοξικών αντιρρυπαντικών εφαρμογών αποδίδονται στον πρώιμο Φοινικικό πολιτισμό (1500 – 300 π.Χ.) με τη χρήση φύλλων χαλκού και μόλυβδου για την προστασία των ξύλινων πλοίων τους από τη βιορύπανση [21]. Αντίστοιχες αναφορές υπάρχουν τόσο για τον αρχαίο ελληνικό όσο και τον ρωμαϊκό πολιτισμό, ενώ η αντιρρυπαντικές εφαρμογές περιλάμβαναν και άλλες μεθόδους όπως χρήση επιστρώσεων γράσου και καυτής πίσσας [1].

3.1.1. Πρώτες εφαρμογές αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Με την είσοδο στο προσκήνιο των πρώτων πλοίων κατασκευασμένων από σίδηρο και χάλυβα εκκίνησε η ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων (υφαλοχρωμάτων). Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, εμφανίζονται τα πρώτα αντιρρυπαντικά οργανικά επιστρώματα που βασίζονταν στη διασπορά βαρέων μετάλλων (χαλκός, υδράργυρος, αρσενικό) μέσα σε πολυμερή συνδετικά [21]. Περαιτέρω εφαρμογές σχετίζονταν με συνδετικά βασισμένα σε ασφαλτικά προϊόντα (bituminous products) και φυσικές ρητίνες, επιστρώματα με φυσικά συνδετικά μέσα και χαλκό (hot plastic paints) και τέλος συνθετικές ρητίνες ή φυσικά προϊόντα μεμονωμένα ή σε μίγματα (cold plastic paints) [10]. Η χρήση του χαλκού ως βιοκτόνου, κρίθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική και χρησιμοποιήθηκε ευρέως, ωστόσο η δραστηριότητα του ήταν σχετικά βραχυχρόνια (έως 18 μήνες) και συνεπώς απαιτούνταν τακτικός δεξαμενισμός των πλοίων προκειμένου να πραγματοποιηθεί καθαρισμός της γάστρας και επανατοποθέτηση του επιστρώματος.

Τα πρώιμα αντιρρυπαντικά επιστρώματα ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τα χημικά χαρακτηριστικά των συνδετικών τους μέσων και της διαλυτότητας τους στο νερό. Τα επιστρώματα αδιάλυτης μήτρας (insoluble matrix paints) ενσωματώνουν μεγάλες ποσότητες βιοκτόνων σε μήτρα (ακρυλική, βυνιλική, εποξειδική) που λειτουργεί ως συνδετικό μέσο και παραμένει αδιάλυτη κατά την διεπαφή της με το θαλασσινό νερό [10]. Μέσω της σταδιακής απελευθέρωσης των βιοκτόνων, δημιουργούνται πόροι στο επίστρωμα στους οποίους εισέρχεται το νερό προκειμένου να αντιδράσει περαιτέρω με τα

ενσωματωμένα βιοκτόνα και να τα απελευθερώσει. Η αποτελεσματικότητα ωστόσο, αυτής της κατηγορίας επιστρωμάτων, φθίνει σημαντικά με τη πάροδο του χρόνου, καθώς η πορώδης επιφάνεια της μήτρας που σχηματίζεται με την αρχική απελευθέρωση των βιοκτόνων οδηγεί σε σχηματισμό επικαλύψεων αυξανόμενης τραχύτητας, που οδηγούν σε σταδιακή συσσώρευση ρύπων και συνεπαγόμενη μείωση του ρυθμού απελευθέρωσης περαιτέρω βιοκτόνων ουσιών. Η ενεργός διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται μεταξύ 12 έως 24 μήνες.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού απελευθέρωσης βιοκτόνου συναρτήσει χρόνου : α) επιστρωμάτων διαλυτής μήτρας, β) επιστρωμάτων αδιάλυτης μήτρας, όπου με ● συμβολίζεται το ενεργό βιοκτόνο και με ○ το εξαντλημένο βιοκτόνο [3]

Τα επιστρώματα διαλυτής μήτρας (soluble matrix paints) χρησιμοποιούν ως συνδετικό μέσο φυσική ρητίνη (κολοφώνιο) που διαλύεται στο θαλασσινό νερό, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα τη βιοκτόνα ουσία [10]. Ο σταθερός ρυθμός διάλυσης της μήτρας εξασφαλίζεται με την προσθήκη πλαστικοποιητών ή άλλων συνδετικών υλικών ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες. Σημαντικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων αποκαλύψεων αποτελεί η ελάττωση της αποτελεσματικότητας κατά περιόδους ακινησίας, όπου άλατα δύναται να φράξουν τους πόρους των επιστρωμάτων, εμποδίζοντας την απελευθέρωση των βιοκτόνων ουσιών, ενώ η διάρκεια ζωής τους δεν ξεπερνά τους 15 μήνες.

3.1.2. Αντιρρυπαντικά επιστρώματα TBT: Από την ανακάλυψη έως την απαγόρευση τους

Η ουσιαστική επανάσταση στη βιομηχανία υφαλοχρωμάτων πραγματοποιήθηκε από τις αρχές του 1960 με την ανάπτυξη των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων με προσθήκες παραγώγων οργανοκασσιτερικών ενώσεων. Οι οργανοκασσιτερικές ενώσεις περιλαμβάνουν

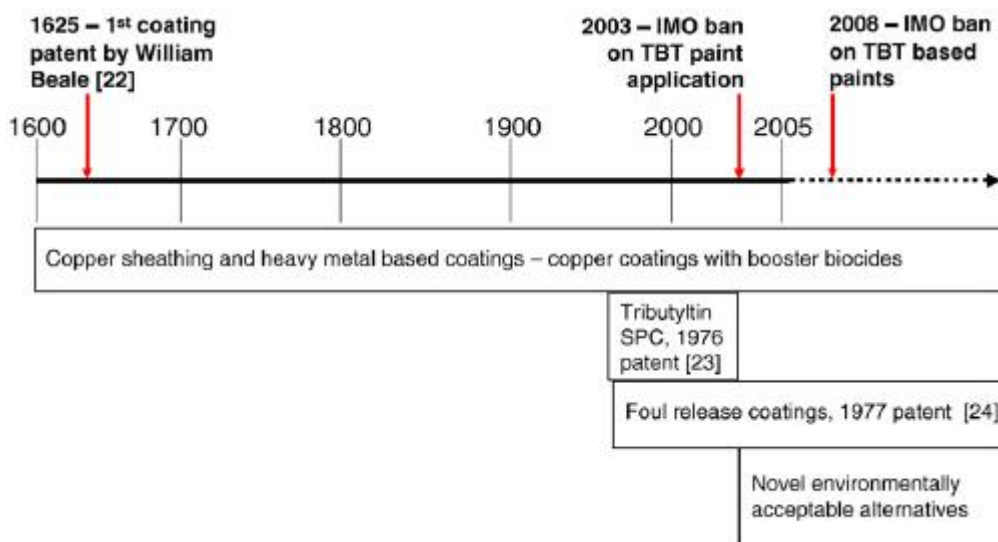
το παράγωγο, μεταξύ άλλων, του τριβουτυλοκασιτιέρου (tributyltin - TBT), και ανακαλύφθηκαν ήδη από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ωστόσο οι ισχυρά βιοκτόνες ιδιότητες τους αναδείχθηκαν στην δεκαετία του 1950. Τα πρώτα αντιρρυπαντικά επιστρώματα με παράγωγα του τριβουτυλοκασιτιέρου (TBT) εισήχθησαν στην αγορά της Ευρώπης μεταξύ του 1959 και 1961.

Αρχικά, τα παράγωγα TBT ενσωματώθηκαν ως βιοκτόνα σε συμβατικά αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου διαλυτής μήτρας. Τα συμβατικά επιστρώματα είχαν, ωστόσο, περιορισμένη διάρκεια ζωής (έως και 2 έτη), ενώ αδυνατούσαν να διατηρήσουν σταθερούς ρυθμούς απελευθέρωσης του βιοκτόνου και αντικαταστάθηκαν μέσα στη δεκαετία του 1970 από τα αυτολειαινόμενα συμπολυμερή επιστρώματα (TBT Self-Polishing Copolymers). Τα τελευταία εξασφάλισαν ελεγχόμενο ρυθμό απελευθέρωσης του βιοκτόνου, ενώ η ενεργός διάρκεια ζωής τους ξεπερνούσε τα 5 έτη. Η εντυπωσιακή αποτελεσματικότητα των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων με παράγωγα TBT, λόγω της ισχυρούς τοξικότητας των οργανοκασιτεριικών ενώσεων έναντι των βιορυπογόνων οργανισμών, σε συνδυασμό με τη μεγάλη ενεργό διάρκεια ζωής τους και το χαμηλό κόστος εφαρμογής, οδήγησε στην υιοθέτηση του παραπάνω επιστρώματος από τη πλειοψηφία του παγκόσμιου ναυτιλιακού στόλου έως το τέλος της δεκαετίας του 1970 (προσεγγιστικά 75% του συνολικού παγκόσμιου στόλου) [22]. Η διατήρηση καθαρής γάστρας, άνευ βιορύπανσης, για μεγάλες χρονικές περιόδους προσέδωσε την εντύπωση στον κλάδο ότι το φαινόμενο της βιορύπανσης αποτελούσε πλέον πρόβλημα του παρελθόντος.

Σε σύντομο χρονικό διάστημα, ωστόσο, έγινε εμφανές ότι τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα με παράγωγα TBT είχαν μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Οι πρώτες επιστημονικές ενδείξεις για τους περιβαλλοντικούς κινδύνους των οργανοκασιτεριικών ενώσεων εμφανίστηκαν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, ωστόσο αγνοήθηκαν συστηματικά από τη ναυτιλιακό κλάδο, συνεχίζοντας την καθολική εφαρμογή τους στις γάστρες των πλοίων. Οι πρώτες καταστροφικές επιπτώσεις της γενικευμένης χρήσης ενώσεων TBT σε αντιρρυπαντικά επιστρώματα εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980, όταν εντοπίστηκαν ισχυρές συγκεντρώσεις TBT σε οστρακοειδή των ακτών της Γαλλίας, οδηγώντας σε κατάρρευση των τοπικών εμπορικών ιχθυοκαλλιεργειών οστρακοειδών. Οι γαλλικές Αρχές αναγκάστηκαν να προχωρήσουν σε μερική απαγόρευση της χρήσης των παράγωγων TBT σε σκάφη αναψυχής μήκους κάτω των 25 μέτρων. Πληθώρα περιβαλλοντολογικών μελετών απέδειξε ότι, οι απελευθερωμένες οργανοκασιτεριικές ενώσεις αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων παραμένουν αδιάλυτες τόσο στο νερό όσο και σε επικαθίσεις, σκοτώνοντας θαλάσσιους οργανισμούς που δεν έχουν προσκολληθεί στη γάστρα ενός πλοίου και πιθανώς

εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα. Συγκεκριμένα, τα παράγωγα TBT συσχετίστηκαν με παραμορφώσεις του κελύφους των οστρακοειδών, αλλαγές σεξουαλικού φύλλου (imposex) σε θαλάσσια γαστερόποδα καθώς και πληθώρα νευρωτικών και γενετικών μεταβολών σε άλλα θαλάσσια είδη [21]. Τα τελευταία ευρήματα οδήγησαν σε αλυσιδωτή απαγόρευση της χρήσης των παραγώγων TBT σε μικρά πλοία στο Ηνωμένο Βασίλειο, τις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Αυστραλία και την Ευρωπαϊκή Ένωση μεταξύ της περιόδου 1986 έως 1989. Τα εμπορικά πλοία, ωστόσο, συνέχισαν να χρησιμοποιούν παράγωγα TBT, αν και η χρήση τους περιορίστηκε σε αυτολειαινόμενα συστήματα περιορισμένης απελευθέρωσης.

Το ζήτημα εισάχθηκε το 1988 στην ημερήσια διάταξη της Επιτροπής Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), οδηγώντας τον τελευταίο στην υιοθέτηση ψηφίσματος που συνιστούσε στις κυβερνήσεις να λάβουν μέτρα για την εξάλειψη των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων που περιέχουν παράγωγα TBT. Τον Νοέμβριο του 2001, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός υιοθέτησε τη Διεθνή Σύμβαση για τον Έλεγχο των Επικίνδυνων Αντιρρυπαντικών Επιστρωμάτων σε Πλοία (ICAFS), απαγορεύοντας την εφαρμογή αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων με προσθήκες οργανοκασσιτερικών ενώσεων σε όλα τα πλοία μετά την 1η Ιανουαρίου 2003 και απαιτώντας την πλήρη εξάλειψη τους ως ενεργά επιστρώματα από την 1^η Ιανουαρίου 2008. Η σύμβαση τέθηκε τελικώς σε ισχύ στις 17 Σεπτεμβρίου του 2008.



Εικόνα 11: Ιστορική εξέλιξη των σύγχρονων αντιρρυπαντικών εφαρμογών [3]

Η απαγόρευση της χρήσης παραγώγων TBT στα αντιρρυπαντικά επιστρώματα δημιούργησε ένα μεγάλο κενό στην αγορά των υφαλοχρωμάτων, οδηγώντας στην πραγματοποίηση συστηματικής έρευνας για την εύρεση εναλλακτικών, περιβαλλοντικά αποδεκτών λύσεων. Κυρίαρχη συνιστώσα της έρευνας της βιομηχανίας υφαλοχρωμάτων αποτέλεσε η ανάπτυξη

σύγχρονων βιοκτόνων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, που αντικαθιστούν την προσθήκη TBT παραγώγων με διαφορετικά τοξικά μέταλλα, μικρότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Οι ολοένα και αυξανόμενοι περιορισμοί στην χρήση βιοκτόνων ουσιών έδωσαν περαιτέρω ώθηση στην ταχεία ανάπτυξη μίας δεύτερης κατηγορίας, μη τοξικών αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Στις παρακάτω ενότητες γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών και των διαφορετικών τύπων για τις δύο κατηγορίες αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.

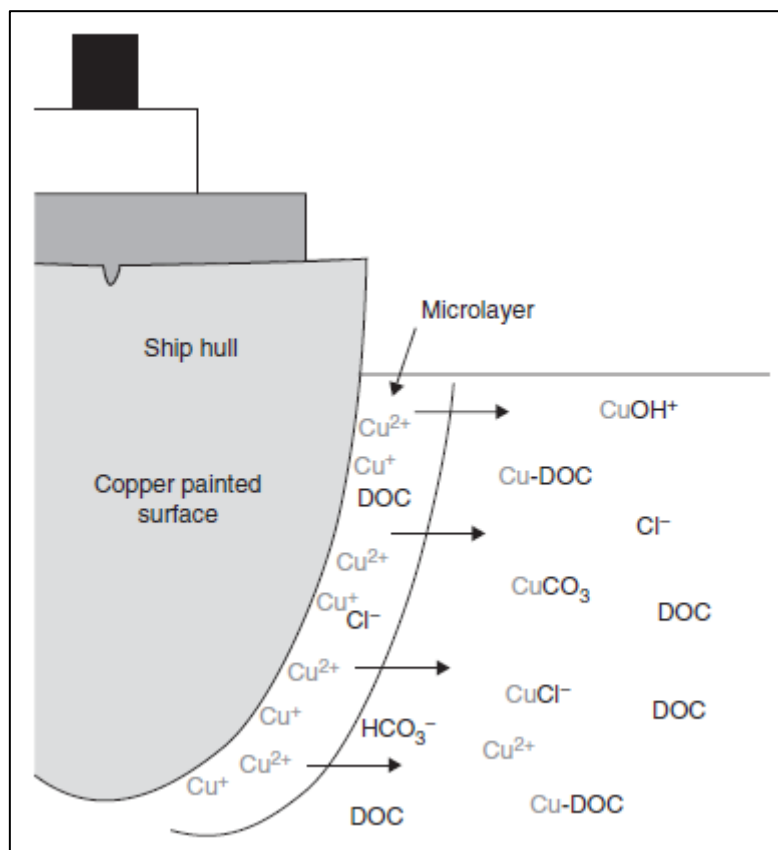
3.2 Βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιστρώματα (Biocide antifouling coatings)

Τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιστρώματα βασίζονται στην απελευθέρωση ενεργών στοιχείων (βιοκτόνων), με ελεγχόμενο ρυθμό, προκειμένου να αποτρέψουν τον αποικισμό ρυπογόνων οργανισμών στην επιφάνεια της γάστρας του πλοίου. Τα περισσότερα χημικά ενεργά επιστρώματα βασίζονται σήμερα στη χρήση του υδατοδιαλυτού πηγμένου οξειδίου του χαλκού (Cu_2O), σε συνδυασμό με περισσότερα οργανικά ενισχυτικά βιοκτόνα (booster biocides). Ο χαλκός χρησιμοποιείται ως βιοκτόνο πολύ πριν την προσθήκη των παραγώγων TBT, ωστόσο αντικαταστάθηκε σε μεγάλο βαθμό από τα τελευταία μετά την ανακάλυψη τους. Η απαγόρευση τους ωστόσο, επανάφερε στο προσκήνιο τον χαλκό και τα διάφορα ενισχυτικά βιοκτόνα, με εκτιμήσεις [20] ότι το 90% του παγκόσμιου στόλου χρησιμοποιούσε αντιρρυπαντικά βιοκτόνα επιστρώματα, χωρίς παράγωγα TBT, βασισμένα στον χαλκό το 2011.

Ο μηχανισμός απελευθέρωσης του χαλκού από το αντιρρυπαντικό επίστρωμα συνίσταται στην έκπλυση ποσότητας χαλκού από την επιφάνεια στο θαλασσινό νερό ως ασταθή ιόντα Cu^+ , τα οποία γρήγορα οξειδώνονται για να σχηματίσουν τα πιο σταθερά ιόντα Cu^{2+} . Μερικά μικρόμετρα από την επιφάνεια λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις συμπλοκοποίησης μεταξύ του Cu^{2+} και οργανικών και ανόργανων προσδεμάτων (ligands). Συνεπώς, η υψηλή τοξικότητα του χαλκού στην επιφάνεια της γάστρας αποτρέπει την ανάπτυξη της βιορύπανσης, ενώ παράλληλα η τοξικότητα του χαλκού περιορίζεται σημαντικά σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια της γάστρας λόγω των αλληλεπιδράσεων του με τα προσδέματα, μειώνοντας έτσι την επίδραση του σε μη στοχοποιημένους οργανισμούς.

Ο χαλκός είναι ένα απαραίτητο μεταλλικό στοιχείο που απαιτείται από όλους τους οργανισμούς για τις ενδοκυτταρικές τους διεργασίες. Οι περισσότεροι οργανισμοί έχουν αναπτύξει μηχανισμούς τόσο για τη δέσμευση χαλκού σε περιβάλλοντα φτωχά σε θρεπτικά συστατικά, όσο και μηχανισμούς αποβολής του χαλκού σε κυτταρικό επίπεδο όταν

υπερβαίνει τα όρια ανοχής. Επομένως, η τοξικότητα του χαλκού σχετίζεται με ισχυρές συγκεντρώσεις του, οι οποίες ξεπερνούν τις μεταβολικές δυνατότητες των ζωντανών οργανισμών. Αναφορικά με τις εκκρίσεις χαλκού στο θαλάσσιο περιβάλλον που οφείλονται στη λειτουργία αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, εκτιμώνται σε 3000 τόνους ετησίως, ποσότητα αμελητέα συγκριτικά με την έκκριση χαλκού που οφείλεται σε φυσικά αίτια και εκτιμάται σε 250000 τόνους ετησίως. Ωστόσο, οι τοπικά υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού σε κλειστά θαλάσσια περιβάλλοντα, υψηλής μεταφορικής δραστηριότητας όπως οι λιμένες και οι μαρίνες, μπορούν πράγματι να καταστούν τοξικές για την βιοποικιλότητα της περιοχής. Το παραπάνω γεγονός έχει οδηγήσει σε ολοένα και μεγαλύτερο σκεπτικισμό σχετικά με τη χρήση του χαλκού στα αντιρρυπαντικά επιστρώματα, με μία σειρά χωρών [21] να έχουν ήδη προβεί σε περιορισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων ρυθμών απελευθέρωσης του από τις επιφάνειες των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.

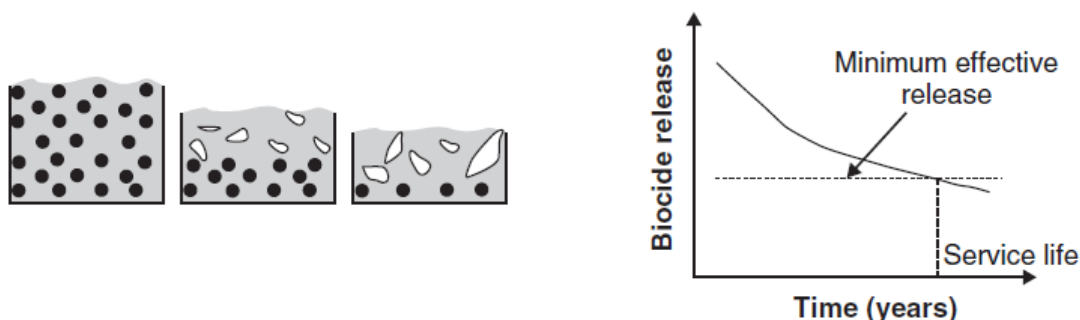


Εικόνα 12: Θεωρητικός μηχανισμός απελευθέρωσης χαλκού από αντιρρυπαντικό επίστρωμα [23]

Η αποτελεσματικότητα ενός βιοκτόνου αντιρρυπαντικού επιστρώματος σχετίζεται άμεσα με τον τύπο του μηχανισμού απελευθέρωσης του βιοκτόνου καθώς και τις λειαντικές ικανότητες της επιφάνειας του. Οι βασικές τεχνολογίες που συναντώνται σήμερα σε ευρεία εμπορική χρήση περιγράφονται στις παρακάτω υποενότητες.

3.2.1. Αντιρρυπαντικά επιστρώματα με πολυμερή ελεγχόμενης απελευθέρωσης (Controlled Depletion Polymers – CDP)

Τα αντιρρυπαντικά πολυμερών ελεγχόμενης απελευθέρωσης προκύπτουν από συνδεδετικά μέσα, ενισχυμένα με φυσική ή συνθετική ρητίνη ή παραγώγων αυτής στα οποία ενσωματώνεται το βιοκτόνο. Το νερό διεισδύει στην επικάλυψη διαλύοντας τη ρητινική μήτρα μέσω του μηχανισμού της εφίδρωσης (hydration) και απελευθερώνοντας το ενσωματωμένο βιοκτόνο στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα στοιχεία της μήτρας που παραμένουν αδιάλυτα σχηματίζουν διαβρωμένες στρώσεις, μειώνοντας τον ρυθμό διάλυσης της μήτρας. Με την πάροδο του χρόνου, το πάχος των διαβρωμένων στρώσεων αυξάνεται, έως ότου η διείσδυση του νερού στο επιστρώμα καταστεί πλέον αδύνατη. Ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός διάλυσης της μήτρας ακολουθεί εκθετική πορεία, με απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας βιοκτόνου το πρώτο χρονικό διάστημα από την εμβάπτιση, που μειώνεται ραγδαία, έως ένα επίπεδο που πλέον είναι ανεπαρκής ώστε να αποτρέψει την ανάπτυξη βιορύπανσης.



Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού απελευθέρωσης βιοκτόνου επιστρωμάτων τύπου CDP (αριστερά) και διάγραμμα ρυθμού απελευθέρωσης βιοκτόνου συναρτήσει χρόνου (δεξιά) [24]

Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα CDP αποτελούν ουσιαστικά εξέλιξη της τεχνολογίας επικαλύψεων διαλυτής μήτρας. Η ενίσχυση των συνδεδετικών μέσων με ρητίνες επιτυγχάνει τον εν μέρει έλεγχο του ρυθμού διάλυσης της μήτρας, αυξάνοντας την ενεργό διάρκεια ζωής τους στους 36 μήνες στα πλευρικά τοιχώματα του πλοίου και έως 60 μήνες στον πυθμένα. Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα CDP χαρακτηρίζονται από υψηλό όγκο στερεών (55-60%) και εξασφαλίζουν το χαμηλότερο κόστος τοποθέτησης και συντήρησης ανά τετραγωνικό μέτρο συγκριτικά με τις υπόλοιπες σύγχρονες τεχνολογίες επιστρωμάτων. Το γεγονός αυτό τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε θαλάσσια περιβάλλοντα χαμηλού ρίσκου βιορύπανσης και για πλοία με μικρά χρονικά διαστήματα μεταξύ των δεξαμενισμών τους. Εξίσου, βασικό πλεονέκτημα αποτελεί ο μικρός χρόνος σκλήρυνσης της βαφής κατά την τοποθέτηση της και

η ευελιξία όσον αφορά τις καιρικές συνθήκες, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για τοποθέτηση σε πλοία με εξαιρετικά περιορισμένο χρονικό περιθώριο δεξαμενισμού.

Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα CDP αντιμετωπίζουν, ωστόσο, μία σειρά σημαντικών μειονεκτημάτων. Η αποτελεσματικότητά τους είναι συγκριτικά χαμηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες σύγχρονες τεχνολογίες επιστρωμάτων. Οι διαβρωμένες στρώσεις μεγάλου πάχους που σχηματίζονται και οι φτωχές ιδιότητες αυτολείανσης του επιστρώματος, αυξάνουν σημαντικά την τραχύτητα της επιφάνειας, περιορίζοντας σημαντικά την απόδοση σε κατάσταση ακινησίας. Οι ρητίνες που αξιοποιούνται αποτελούν ψαθυρά υλικά και ελλοχεύουν τον κίνδυνο εμφάνισης ρωγματώσεων και αποκολλήσεων στην επιφάνεια της βαφής. Τέλος, προκειμένου να καταστεί δυνατή η επανατοποθέτηση του επιστρώματος απαιτείται η προσεκτική αφαίρεση όσο το δυνατό περισσότερων διαβρωμένων στρώσεων κατά το δεξαμενισμό του πλοίου, με πλήρη αμμοβολή της γάστρας να είναι τυπικά απαραίτητη μετά από 10 χρόνια υπηρεσίας.

3.2.2. Αντιρρυπαντικά επιστρώματα αυτολειαινόμενων συμπολυμερών (Self-polishing Copolymers – SPC)

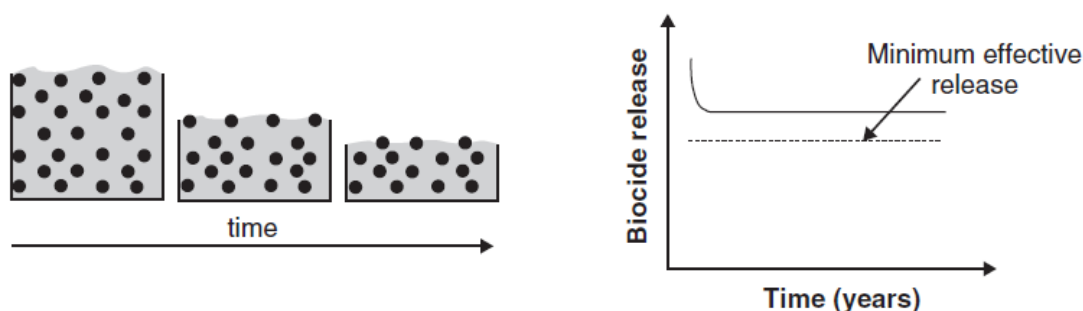
Στα αντιρρυπαντικά επιστρώματα αυτολειαινόμενων συμπολυμερών, το βιοκτόνο προσδένεται χημικά στο πολυμερές, το οποίο αντιδράει κατά την επαφή του με το νερό, σχηματίζοντας ένα ασταθές επιφανειακό στρώμα το οποίο σταδιακά διαβρώνεται μέσω του μηχανισμού της υδρόλυσης (hydrolysis). Το ασταθές επιφανειακό στρώμα, μέσω της διάβρωσης του, διαλύεται και μία νέα στρώση του συμπολυμερούς εκτίθεται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η αντίδραση επαναλαμβάνεται διαρκώς, όσο παράλληλα το πάχος του επιστρώματος μειώνεται μέσω της διάβρωσης του.

Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα SPC χαρακτηρίζονται από τρεις κύριες ιδιότητες που καθορίζουν την αποδοτικότητά τους:

- Ελεγχόμενη απελευθέρωση βιοκτόνου που επιτρέπει σταθερό ρυθμό διάβρωσης του επιστρώματος με την πάροδο του χρόνου.
- Ο ρυθμός διάβρωσης του επιστρώματος αυξάνει γραμμικά συναρτήσει της ταχύτητας υπηρεσίας. Σε στατικές καταστάσεις, η ανανεωμένη τοξική επιφάνεια επιτρέπει την προστασία από τη βιορύπανση.

- Το πάχος του διαβρωμένου στρώματος παραμένει σταθερό (10-20 μm), οριζόμενο ως η διαφορά μεταξύ του διαλυόμενου ασταθούς στρώματος και του άθικτου υποστρώματος της αντιρρυπαντικής βαφής που αναδύεται.

Ο ρυθμός διάβρωσης του επιστρώματος αποκτά αρχικά, για σύντομο χρονικό διάστημα, υψηλές τιμές που εν συνεχεία μειώνεται και σταθεροποιείται σε μία συγκεκριμένη τιμή. Η ενεργός διάρκεια ζωής του επιστρώματος είναι επομένως άμεση συνάρτηση του συνολικού πάχους του και συνήθως εξασφαλίζει χρονικά διαστήματα μεταξύ δεξαμενισμών έως 60 μήνες. Εκτός των παραπάνω ιδιοτήτων, παρατηρήθηκε ότι η αρχική τραχύτητα που οφείλεται στην εφαρμογή του επιστρώματος, μειώνεται όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω. Ο όρος «αυτολειαινόμενα» επικράτησε επομένως στη βιομηχανία προκειμένου να αναδειχθούν οι λειαντικές ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου επιστρωμάτων, αν και παρόλο που η τραχύτητα του επιστρώματος μειώνεται, η συνολική τραχύτητα της γάστρας συνήθως αυξάνεται λόγω μηχανικής καταπόνησης.



Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού απελευθέρωσης βιοκτόνου επιστρωμάτων τύπου SPC (αριστερά) και διάγραμμα ρυθμού απελευθέρωσης βιοκτόνου συναρτήσει χρόνου (δεξιά) [24]

Οι βασικές τεχνολογίες αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων SPC, σύμφωνα με την υλική σύνθεση τους είναι τρεις, ακρυλικού χαλκού (copper acrylate), ακρυλικού ψευδάργυρου (zinc acrylate) και ακρυλικού συλιλίου (silyl acrylate). Η αντιρρυπαντική τεχνολογία SPC θεωρείται σήμερα ως η πιο αποδοτική κατηγορία βιοκτόνων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, αν και έχει υψηλότερο κόστος εφαρμογής συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Ο άριστα ελεγχόμενος ρυθμός διάβρωσης του επιστρώματος δίνει τη δυνατότητα εξατομίκευσης των προδιαγραφών της βαφής για συγκεκριμένους τύπους πλοίων και εμπορικά προφίλ λειτουργίας. Τέλος, οι μικρού πάχους διαβρωμένες στρώσεις εξασφαλίζουν απλές διαδικασίες καθαρισμού της γάστρας και επανατοποθέτησης του επιστρώματος κατά το δεξαμενισμό του πλοίου.

3.2.3. Υβριδική αυτολειαινόμενη αντιρρυπαντική τεχνολογία (Hybrid self-polishing technology)

Η υβριδική αυτολειαινόμενη αντιρρυπαντική τεχνολογία λειτουργεί μέσω ενός μείγματος των μηχανισμών εφίδρωσης και υδρόλυσης, συνδυάζοντας αυτολειαινόμενα ακρυλικά πολυμερή με μία ποσότητα ρητίνης. Η απόδοση και το κόστος της συγκεκριμένης τεχνολογίας συναντάται περίπου στο μέσο μεταξύ των αντίστοιχων παραμέτρων των CDP και SPC προϊόντων, με τη συνήθη ενεργό διάρκεια ζωής τους να ανέρχεται σε 36 μήνες και τη μέγιστη δυνατή που μπορεί να επιτευχθεί σε 5 έτη.

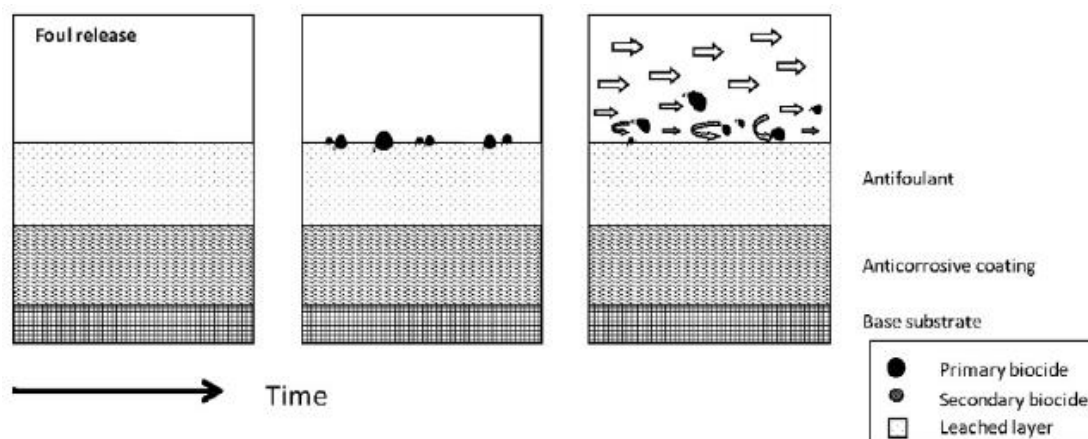
3.3 Επιστρώματα απελευθέρωσης ρύπων (Fouling release coatings)

Τα επιστρώματα απελευθέρωσης ρύπων (FRCs) αποτελούν μία μη τοξική, φιλική προς το περιβάλλον, λύση στο πρόβλημα της βιορύπανσης. Η βασική αρχή λειτουργίας τους σχετίζεται με τη δημιουργία μίας επιφάνειας, τα χαρακτηριστικά της οποίας, δεν επιτρέπουν την ισχυρή προσκόλληση ρυπογόνων μακροοργανισμών. Η συσσώρευση μακροοργανισμών σε μία εμβαπτισμένη επιφάνεια λαμβάνει χώρα τυπικά μετά τον σχηματισμό ενός βιοφίλμ και των επακόλουθων στρωμάτων γλίτσας ή άλγης (Κεφάλαιο 1°, Παράγραφος 1.2). Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι οι ιδιότητες της επιφάνειας του υποστρώματος αποτελούν παράγοντα - κλειδί στον καθορισμό της αντοχής πρόσφυσης των συσσωρευόμενων μακροοργανισμών [25].

Τα επιστρώματα απελευθέρωσης ρύπων δεν αποτρέπουν τον αποικισμό οργανισμών στην επιφάνεια, αλλά καταστούν το δεσμό διεπαφής μεταξύ των οργανισμών και της επιστρωμένης επιφάνειας αδύναμο, λόγω της χαμηλής επιφανειακής ενέργειας της. Η επιφανειακή ενέργεια (free surface energy) αντιπροσωπεύει την ικανότητα μίας επιφάνειας να αλληλοεπιδρά αυθόρμητα με άλλα υλικά. Η χαμηλή επιφανειακή ενέργεια επιτρέπει την εύκολη αποκόλληση των αποικισθέντων οργανισμών, είτε υπό την επίδραση υδροδυναμικών διατμητικών δυνάμεων που ασκεί το νερό κατά τη πρόωση του πλοίου, είτε κατά τη διάρκεια μηχανικού καθαρισμού. Εκτός από τη χαμηλή ενεργειακή επιφάνεια των επιστρωμάτων FRC, σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα τους διαδραματίζει το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας τους, καθώς επιτρέπει την αποκόλληση σκληρών ρυπογόνων οργανισμών όπως τα βαλανόμορφα. Μάλιστα, η ελαστικότητα καταστεί την επιφάνεια παραμορφώσιμη ή δυναμική αποτρέποντας επίσης τον εύκολο αποικισμό μικροοργανισμών στην επιφάνεια.

Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στα επιστρώματα FRC είναι δύο τύπων, φθοροπολυμερή (fluoropolymers) και ελαστομερή σιλικόνης (silicone elastomers). Τα

περισσότερο ευρέως διαδεδομένα επιστρώματα FRC σήμερα κατασκευάζονται από ελαστομερή σιλικόνης και κυρίως από ελαστομερή πολυδιμεθυλοσιλοξάνης (PDMS). Οι ρυπογόνοι μακροοργανισμοί, έχει αποδειχθεί, ότι προσκολλώνται με πιο αδύναμους δεσμούς στα PDMS συγκριτικά με άλλα υλικά, με την αντοχή πρόσφυσης να είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του επιστρώματος. Η ταχύτητα στην οποία οι οργανισμοί απελευθερώνονται, έχει μετρηθεί ότι εκκινεί από τους 12 κόμβους, ενώ για ταχύτητες άνω των 15 κόμβων η ανάπτυξη των περισσότερων τύπων βιορύπανσης αποτρέπεται για πλοία επικαλυμμένα με επιστρώματα FRC [26].



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού λειτουργίας επιστρωμάτων τύπου FRC [21]

Τα επιστρώματα FRC επιδεικνύουν καλή αντιρρυπαντική συμπεριφορά για πλοία με μικρά χρονικά διαστήματα ελλειμνισμών και σχετικά υψηλότερες ταχύτητες υπηρεσίας. Η φιλικότητα τους προς το περιβάλλον σε συνδυασμό με τη δυνατότητα επίτευξης υψηλής αντιρρυπαντικής απόδοσης, αποτελεί κομβικό πλεονέκτημα των σιλικονούχων FRC, ιδίως σε μία περίοδο που τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιστρώματα δέχονται ολοένα και περισσότερους περιορισμούς, ως προς τη σύνθεσή τους, μέσω νέων περιβαλλοντικών κανονισμών. Περαιτέρω, εκτός από τη χαμηλή επιφανειακή ενέργεια και την υψηλή ελαστικότητα, τα επιστρώματα FRC έχουν χαμηλή επιφανειακή τραχύτητα, επιτυγχάνοντας μείωση της αρχικής αντίστασης τριβής που κυμαίνεται μεταξύ 2 έως 23% συγκριτικά με όλους τους υπόλοιπους σύγχρονους τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, ανάλογα με τον τρόπο και την ποιότητα της εφαρμογής τους [27]. Η παραπάνω διαφορά στην αρχική τραχύτητα του σιλικονούχου επιστρώματος, δύναται να μεταφραστεί σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων για πλοία με χαρακτηριστικά και εμπορικό προφίλ λειτουργίας, κατάλληλα για επικάλυψη με επιστρώσεις FRC.

Παρόλα τα παραπάνω σημαντικά οφέλη, η χρήση των επιστρωμάτων FRC στη ναυτιλία μετριάζεται από μία σειρά μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Η χαμηλή επιφανειακή

ενέργεια, παρότι δομικά απαραίτητη για την αποδοτική λειτουργία τους, μειώνει εξίσου την αντοχή πρόσφυσης μεταξύ του επιστρώματος και του υποστρώματος της γάστρας του πλοίου. Προκειμένου να ισχυροποιηθεί ο δεσμός επιστρώματος-υποστρώματος, απαιτείται ένα ενδιάμεσο στρώμα συνδετικής βαφής (tie coat) το οποίο αυξάνει τα λειτουργικά κόσθη και το χρόνο δεξαμενισμού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, το συνολικό κόστος εφαρμογής και συντήρησης των σιλικονούχων επιστρωμάτων είναι σημαντικά υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος των βιοκτόνων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων, παράγοντας καθοριστικός στον περιορισμό της χρήσης των πρώτων. Επιπλέον, τα σιλικονούχα επιστρώματα έχουν φτωχές μηχανικές ιδιότητες που τα καθιστούν ευεπίφορα σε μηχανική καταπόνηση όπως κοψίματα, σχισίματα και διατρήσεις που μειώνουν δραστικά την ενεργό διάρκεια ζωής τους καθώς αλλοιώνουν, τα κρίσιμα για τη λειτουργία τους, χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Τα επιστρώματα FRC έχουν πολύ χαμηλή απόδοση σε στατικές συνθήκες, όπου αδυνατούν να εμποδίσουν την ανάπτυξη ενός στρώματος γλίτσας που αποτελείται από διάτομα και βακτήρια στην επιφάνεια. Τα διάτομα έχουν την ικανότητα να προσκολλούν με πολύ ισχυρούς δεσμούς στα ελαστομερή σιλικόνης, με αποτέλεσμα το σχηματιζόμενο στρώμα γλίτσας να είναι αδύνατο να απελευθερωθεί υδροδυναμικά, ακόμη και σε υψηλές ταχύτητες που ξεπερνούν του 30 κόμβους. Η ανάπτυξη γλίτσας στην επιφάνεια των επιστρωμάτων FRC αποτελεί το χαρακτηριστικότερο πρόβλημα τους δεδομένου ότι ο αντίκτυπος της στην αντίσταση τριβής ανέρχεται σε αύξηση έως και 20% (Κεφάλαιο 2^ο, Παράγραφος 2.3).

Τα τελευταία χρόνια σημαντικό ερευνητικό έργο έχει πραγματοποιηθεί προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα των σιλικονούχων επιστρωμάτων. Συγκεκριμένα, αναφορικά με τις μηχανικές τους ιδιότητες, η φυσική πρόσμειξη με νανοπληρωτές (nanofillers) είτε η χημική τροποποίηση με εποξικά ή πολυουρεθανικά στοιχεία αυξάνουν σημαντικά την εφελκυστική αντοχή και την αντοχή πρόσφυσης τους, ωστόσο μειώνουν την ελαστικότητα τους και συνεπώς την αντιρρυπαντική τους ικανότητα. Η προσθήκη υγρών όπως αμφιφιλικών και σιλικονούχων ελαίων βελτιώνουν την αντιρρυπαντική συμπεριφορά τους, μειώνοντας όμως τη μηχανική τους αντοχή. Η οργανική-ανόργανη υβριδική σιλικόνη αποτελεί συνδυασμό ελαστομερών σιλικόνης και ανόργανων στοιχείων με αντιρρυπαντικές ιδιότητες και αποτελεί πιθανώς τη νέα προηγμένη γενιά επιστρωμάτων FRC. Τα παραπάνω συνδυάζουν ταυτόχρονα υψηλές αντιρρυπαντικές επιδόσεις και καλές μηχανικές ιδιότητες [28].

3.4 Πρόσφατη έρευνα

Ο διαρκής σκεπτικισμός γύρω από τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των βιοκτόνων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων δίνει διαρκή ώθηση στην ανάπτυξη εναλλακτικών, περιβαλλοντικά φιλικών εφαρμογών. Η βιομετρική προσέγγιση (biometrics approach) [3] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα έρευνας αιχμής, αν και βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Σκοπός της παραπάνω προσέγγισης είναι η ανάπτυξη αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων που υιοθετούν αντιρρυπαντικές τεχνικές που χρησιμοποιούν οι ίδιοι οι θαλάσσιοι οργανισμοί για την προστασία των επιφανειών τους από το φαινόμενο της βιορύπανσης.

Οι θαλάσσιοι οργανισμοί χρησιμοποιούν πληθώρα φυσικών και χημικών μηχανισμών για να προστατεύσουν τις επιφάνειες τους. Ο βασικός χημικός μηχανισμός αντιρρυπαντικής προστασίας των θαλάσσιων οργανισμών σχετίζεται με την παραγωγή δευτερευόντων μεταβολιτών, η πλειοψηφία των οποίων παράγεται από σπόγγους, άλγη και κνιδόζωα. Η προσθήκη των παραπάνω στοιχείων σε ένα αντιρρυπαντικό επίστρωμα δύναται θεωρητικά να διαταράξει την αρχική ανάπτυξη ενός βιοφίλμ στη επιφάνεια και επομένως να περιορίσει τη δυνατότητα αποικισμού μακροοργανισμών. Οι φυσικοί μηχανισμοί προστασίας σχετίζονται με τις αντιρρυπαντικές ιδιότητες που οφείλονται στην μορφολογία των επιφανειών των θαλασσίων οργανισμών (κύτη, εχινόδερμα). Η ανάπτυξη επιστρωμάτων που υιοθετούν τοπογραφικά χαρακτηριστικά επιφάνειας των παραπάνω θαλάσσιων οργανισμών αποτελεί ένα εξίσου αναπτυσσόμενο πεδίο της έρευνας.

Η βιομετρική προσέγγιση, ωστόσο, υφίσταται σε μία σειρά περιορισμών που δυσχεραίνουν σημαντικά την έως σήμερα ανάπτυξη της. Η ταυτοποίηση χημικών στοιχείων οργανισμών, ικανών να παρουσιάζουν ευρεία αντιρρυπαντική δραστικότητα έναντι πληθώρας βιορρυπαντικών οργανισμών ταυτόχρονα, αποτελεί ένα εξαιρετικά δύσκολο ζήτημα. Παράλληλα, καθώς οι ρυπογόνοι οργανισμοί διαθέτουν μεγάλο εύρος μεγεθών και εμφανίζουν πληθώρα κριτηρίων όσον αφορά τα είδη επιφανειών στις οποίες προσκολλούν κατά προτίμηση, η ανάπτυξη μίας επιφάνειας με συγκεκριμένη μικρο-αρχιτεκτονική δεν προβλέπεται να καταστεί κατά μόνας αποτελεσματική έναντι του συνόλου των διαφορετικών τύπων βιορύπανσης. Οι παραπάνω περιορισμοί έχουν στρέψει πλέον τις ερευνητικές προσπάθειες σε μία ολιστική βιομετρική προσέγγιση παραγωγής επιστρωμάτων που συνδυάζουν τόσο φυσικές όσο και χημικές αντιρρυπαντικές ιδιότητες θαλασσίων οργανισμών.

Κεφάλαιο 4^ο : Δεξαμενισμός πλοίου και αντιρρυπαντική προστασία

4.1 Το πρόβλημα της συχνότητας των δεξαμενισμών

Ο δεξαμενισμός ενός πλοίου (dry docking) είναι μια διαδικασία απαραίτητη για τη συντήρηση του, κατά την οποία εισέρχεται, ανά ορισμένα τακτά χρονικά διαστήματα, σε μία μόνιμη ή πλωτή δεξαμενή, προκειμένου να διενεργηθούν οι απαραίτητες επισκευές και οι απαιτούμενες επιθεωρήσεις. Το σύνολο των πλοίων υπόκειται σε περιοδικές επιθεωρήσεις (periodical surveys) της γάστρας, του μηχανολογικού εξοπλισμού και των συστημάτων τους, προκειμένου να διατηρήσουν εν ισχύ τα διάφορα πιστοποιητικά τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις των επιμέρους Διεθνών Συμβάσεων του IMO και των κανονισμών των νηογνωμόνων. Οι βασικές περιοδικές επιθεωρήσεις διακρίνονται σε:

- Ετήσιες επιθεωρήσεις (annual surveys)
- Ενδιάμεσες επιθεωρήσεις (intermediate surveys)
- Επιθεωρήσεις ανανέωσης (renewal surveys)

Δυο διαδοχικές περιοδικές επιθεωρήσεις, ίδιου τύπου, πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μεταξύ τους, εντός ενός χρονικού περιθωρίου από την καταληκτική ημερομηνία τους. Μεγάλο τμήμα των απαιτούμενων επιθεωρήσεων δύναται να πραγματοποιηθεί, εφόσον τηρούνται οι προϋποθέσεις, εν πλω (In-water surveys) μειώνοντας σημαντικά τον αριθμό των απαιτούμενων δεξαμενισμών. Ωστόσο, η εξωτερική επιθεώρηση του πυθμένα των εμπορικών πλοίων (bottom survey) απαιτεί, κατά κανόνα, τον δεξαμενισμό του πλοίου προκειμένου να πραγματοποιηθεί.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς της Διεθνούς Ένωσης Νηογνωμόνων (IACS) και της Διεθνούς Σύμβασης SOLAS, δύο εξωτερικές επιθεωρήσεις πυθμένα απαιτούνται εντός μίας πενταετίας, με το μέγιστο δυνατό χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών να μην ξεπερνάει τους 36 μήνες. Ωστόσο, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιούνται εν πλω εναλλάξ, απαιτώντας ουσιαστικά το δεξαμενισμό του πλοίου ανά 5 έτη. Εξαιρέση στα παραπάνω, αποτελούν τα πλοία που συμμετέχουν, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, στο Πρόγραμμα Επέκτασης Δεξαμενισμών (Extended Dry Dock Program) στα οποία δίνεται η δυνατότητα πραγματοποίησης δύο διαδοχικών επιθεωρήσεων εν πλω, αυξάνοντας το μέγιστο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών δεξαμενισμών στα 7.5 έτη. Αντίστοιχα, για bulk carriers και tankers ηλικίας άνω των 15 ετών, που συμμετέχουν στο Ενισχυμένο Πρόγραμμα Επιθεωρήσεων (Enhanced Survey Program – ESP), η εξωτερική

επιθεώρηση του πυθμένα πραγματοποιείται υποχρεωτικά με το πλοίο σε δεξαμενισμό και συνεπώς με μέγιστη χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών δεξαμενισμών τους 36 μήνες.

Το πρόβλημα της συχνότητας των δεξαμενισμών είναι μείζονος σημασίας για κάθε πλοιοκτήτη. Ο δεξαμενισμός ως διεργασία είναι εν γένει ιδιαίτερα δαπανηρή, ενώ παράλληλα το πλοίο παύει την εμπορική του δραστηριότητα με αποτέλεσμα την απώλεια χρηματικών εισροών μέσω διαφυγόντων κερδών. Ο ορθός προγραμματισμός της συχνότητας των δεξαμενισμών, επομένως, αποτελεί κομβικής σημασίας ζήτημα για την βιωσιμότητα της εμπορικής εκμετάλλευσης ενός πλοίου. Η κυρίαρχη τάση που έχει διαμορφωθεί κινείται στη κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της συχνότητας των δεξαμενισμών από τους πλοιοκτήτες. Οι βασικοί περιορισμοί στον καθορισμό του προγραμματισμού δεξαμενισμών είναι οι εξής:

- Οι απαιτήσεις για διεξαγωγή επιθεωρήσεων που προϋποθέτουν de facto τον δεξαμενισμό του πλοίου, όπως προαναφέρθηκαν παραπάνω.
- Ο καθαρισμός της γάστρας και η αντικατάσταση των αντιδιαβρωτικών / αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, που συνδυάζεται ιδανικά με τη διεξαγωγή των παραπάνω επιθεωρήσεων.

Ο προγραμματισμός που προκύπτει, ωστόσο, δύναται να διαταραχθεί σημαντικά από την αναγκαιότητα διεξαγωγής εκτάκτων δεξαμενισμών. Η συχνότερη αιτία που θέτει την αναγκαιότητα για ένα πλοίο να εισέλθει εκτάκτως για δεξαμενισμό, εκτός των περιπτώσεων που αφορούν ατυχήματα ή βλάβες, σχετίζεται με την κακή κατάσταση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.

4.2 Διαδικασίες συντήρησης και εφαρμογής των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Η αλλοίωση του αντιρρυπαντικού επιστρώματος, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, δύναται να έχει οδυνηρές οικονομικές συνέπειες για ένα πλοίο μέσω της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου που οφείλεται στην αυξημένη επιφανειακή τραχύτητα και την ανάπτυξη βιορύπανσης. Γενικά, οι εταιρίες παραγωγής αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων εναρμονίζουν τη σχεδίαση των προϊόντων τους, με τις απαιτήσεις των νηογνωμόνων και συνεπώς παρέχουν αντιρρυπαντικές λύσεις των οποίων οι προδιαγραφές είναι ικανές να καλύψουν το σύνολο του επιτρεπόμενου εύρους χρονικών διαστημάτων μεταξύ δύο διαδοχικών δεξαμενισμών. Η πρώτη αλλοίωση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, εκτός από λειτουργικούς παράγοντες (μηχανική καταπόνηση), σχετίζεται άμεσα με τον τύπο του αντιρρυπαντικού επιστρώματος που επιλέγεται, την ποιότητα του

υποστρώματος στον οποίο εφαρμόζονται και τις διαδικασίες εφαρμογής που ακολουθούνται κατά τον δεξαμενισμό.

Η λειτουργία ενός αντιρρυπαντικού επιστρώματος συντελεί στην αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας της γάστρας με την πάροδο του χρόνου. Τόσο τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιστρώματα όσο και τα σιλικονούχα επιστρώματα απελευθέρωσης ρύπων συνιστούν συστήματα πολλαπλών ανομοιογενών επιστρώσεων (4 με 7 ή και παραπάνω) οι οποίες έχουν μικρό συνολικό πάχος (4-600 μm) και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε μηχανική καταπόνηση. Παράλληλα, τα βιοκτόνα αντιρρυπαντικά επιστρώματα λόγω της σχεδιαστικής αρχής λειτουργίας τους, διαβρώνονται σταδιακά συντελώντας σε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της τραχύτητας. Οι διεργασίες συντήρησης της επιφάνειας που λαμβάνουν χώρα κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου αποτελούν επομένως καθοριστικό παράγοντα στη μείωση της συσσωρευόμενης τραχύτητας αλλά και στην μελλοντική αποδοτικότητα του νέου αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται.

Η συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων κατά τη διάρκεια ενός δεξαμενισμού κρίνεται κυρίως από δύο καθοριστικές παραμέτρους:

- Ποιότητα προετοιμασίας επιφάνειας υποστρώματος
- Διαδικασίες εφαρμογής επιστρωμάτων

Η ποιότητα προετοιμασίας της επιφάνειας του υποστρώματος σχετίζεται με τις μεθόδους απομάκρυνσης των προγενέστερων επιστρωμάτων κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου. Οι αλλοιωμένες επιστρώσεις σχηματίζουν φυσαλίδες, αποκολλήσεις, τοπικές διαβρώσεις και ρωγματώσεις και αφαιρούνται μέσω της πραγματοποίησης αμμοβολής στην επιφάνεια. Η αμμοβολή (abrasive blasting) αποτελεί μέθοδο μηχανικού καθαρισμού τραχειών επιφανειών χάλυβα μέσω της εκτόξευσης σωματιδίων άμμου υπό τη μορφή πίδακα με πεπιεσμένο αέρα ή φυγοκεντρικά στροφέα. Οι βαθμοί καθαρισμού μίας επιφάνειας καθορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 8501-1 έως εξής:

- SA 1.0 – Ελαφρός καθαρισμός αμμοβολής
- SA 2.0 – Σχολαστικός καθαρισμός αμμοβολής
- SA 2.5 – Πολύ σχολαστικός καθαρισμός αμμοβολής
- SA 3.0 – Καθαρισμός αμμοβολής έως οπτικά καθαρό χάλυβα

Η ναυτιλιακή βιομηχανία κατά κανόνα αξιοποιεί συνδυαστικά αμμοβολές τύπου SA - 1.0 έως SA - 2.5 σε διαφορετικούς βαθμούς για τον καθαρισμό της επιφάνειας της γάστρας. Ανάλογα με την έκταση την οποία καταλαμβάνουν οι διεργασίες καθαρισμού κατά τον δεξαμενισμό,

διακρίνεται η πλήρης αμμοβολή (full blasting) και η αποσπασματική αμμοβολή (spot blasting). Κατά την πλήρη αμμοβολή αξιοποιούνται συνήθως υψηλότερης ποιότητας πρότυπα (SA – 2.0 και SA – 2.5) στο σύνολο της επικαλυμμένης επιφάνειας της γάστρας, προκειμένου να αφαιρεθούν πλήρως οι προγενέστερες αλλοιωμένες επιστρώσεις, με αποτέλεσμα ένα οπτικά καθαρό υπόστρωμα χάλυβα της γάστρας. Αντιθέτως κατά την αποσπασματική αμμοβολή, πραγματοποιείται επιλεκτικά καθαρισμός μόνο σε ένα τμήμα της επικαλυμμένης επιφάνειας της γάστρας, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συσσώρευση αστοχιών των προγενέστερων επιστρωμάτων και αξιοποιούνται συνήθως συνδυαστικά πρότυπα SA - 1.0 και SA – 2.0 προκειμένου να μειωθεί το συνολικό κόστος του καθαρισμού.

Η συμβατικού τύπου αμμοβολή επιδέχεται ολοένα και περισσότερων περιορισμών τα τελευταία χρόνια, λόγω του σημαντικού περιβαλλοντικού αντίκτυπου που ελλοχεύει, μέσω της εκπομπής τοξικών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα κατά εκτέλεση της. Κατά συνέπεια μεγάλος αριθμός λιμένων παγκοσμίως έχει απαγορεύσει την εκτέλεση συμβατικής αμμοβολής κατά τον δεξαμενισμό πλοίων και επομένως η πρακτική συντείνει στην υιοθέτηση παραλλαγών της, με μικρότερες εκπομπές τοξικών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Η περίπτωση της υδροαμμοβολής (wet abrasive blasting - WAB) χρησιμοποιεί ως μέσο μεταφοράς της άμμου, το νερό έναντι του αέρα, με αποτέλεσμα τα αφαιρούμενα σωματίδια σκουριάς και των προηγούμενων επικαλύψεων να εγκλωβίζονται σε αυτό, ενώ παράλληλα η ίδια η επιφάνεια λιπαίνεται. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με τον όρο αμμοβολή εφεξής θεωρείται ότι αξιοποιείται η παραπάνω παραλλαγή της. Τα πρότυπα της υδροαμμοβολής αντιστοιχούνται με το πρότυπο BS EN ISO 8501-1, αξιοποιώντας συνδυαστικά τα πρότυπα SSPC και NACE ως εξής:

- SSPC-SP 7 (WAB)/NACE WAB-4: SA – 1.0
- SSPC-SP 6 (WAB)/NACE WAB-3: SA – 2.0
- SSPC-SP 10 (WAB)/NACE WAB-2 : SA – 2.5
- SSPC-SP 5 (WAB)/NACE WAB-1: SA – 3.0

Ο τρόπος προετοιμασίας της επιφάνειας του υποστρώματος, προτού επανατοποθετηθεί ένα σύστημα αντιρρυπαντικής προστασίας, έχει καθοριστική επίδραση στην πρόσθετη αντίσταση τριβής. Η πραγματοποίηση πλήρους αμμοβολής προτού επανατοποθετηθεί ένα αντιρρυπαντικό σύστημα οδηγεί σε πρόσθετη αντίσταση τριβής μεταξύ 0% έως 4%, συγκριτικά με την αντίστοιχη αντίσταση του νεότευκτου πλοίου. Αντίστοιχα η εφαρμογή αποσπασματικής αμμοβολής οδηγεί σε πρόσθετη αντίσταση μεταξύ 5% έως 20%, ενώ στις χειρότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει κανένα όφελος κατά την τοποθέτηση του νέου

επιστρώματος, με την αντίσταση να παραμένει στα ίδια υψηλά επίπεδα πριν από τον δεξαμενισμό [13].

Μολονότι τα οφέλη από την υψηλής ποιότητας προετοιμασία του υποστρώματος είναι εμφανή, αποτελεί συνήθης πρακτική για τους πλοιοκτήτες να επιλέγουν τον τμηματικό μόνο καθαρισμό της επιφάνειας, καθώς το κόστος της αποσπασματικής αμμοβολής είναι συγκριτικά χαμηλότερο και μειώνει τις άμεσες απαιτούμενες δαπάνες για την ολοκλήρωση ενός δεξαμενισμού. Η πρακτική τοποθέτησης του νέου αντιρρυπαντικού συστήματος επί των προγενέστερων αλλοιωμένων επιστρωμάτων, οδηγεί στο σχηματισμό πληθώρας τοπικών ανωμαλιών της επιφάνειας που αυξάνουν την τραχύτητα της γάστρας, με αποτέλεσμα μετά από 2 ή 3 διαδοχικούς δεξαμενισμούς ο αντίκτυπος στην αντίσταση τριβής να είναι τόσο μεγάλος, ώστε να απαιτείται υποχρεωτικά η πλήρης αμμοβολή της επιφάνειας.

Η διαδικασία εφαρμογής των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων είναι εξίσου σημαντική όσον αφορά την ενεργό διάρκεια ζωής και την αποδοτικότητα τους. Η φτωχή διαχείριση από τους τεχνίτες βαφής της δεξαμενής, με αστοχίες κατά την εφαρμογή όπως το στάξιμο (dripping), το δάκρυσμα (sagging), ο πλεονάζων ψεκασμός (overspray) και η παγίδευση ακαθαρσιών οδηγεί σε υδροδυναμική τραχεία επιφάνεια που επιδρά καθοριστικά στην αποδοτική λειτουργία των επιστρωμάτων και την αρχική πρόσθετη αντίσταση τριβής.

Ανάλογα με τον τύπο του αντιρρυπαντικού επιστρώματος προδιαγράφονται συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι αποδεκτή η πραγματοποίηση της διαδικασίας βαφής. Η υψηλή υγρασία και η βροχή αποτελούν συνήθως απαγορευτικό παράγοντα για την εκκίνηση της διαδικασίας. Η εφαρμογή των τυπικών βιοκτόνων αντιρρυπαντικών τεχνολογιών δύναται να διακοπεί εφόσον οι παραπάνω παράμετροι είναι απαγορευτικές και να συνεχιστεί όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν εκ νέου, ενώ αντιθέτως τα σιλικονούχα επιστρώματα απαιτούν την αδιάκοπη πραγματοποίηση της διαδικασίας, οδηγώντας σε περισσότερες περιοριστικές παραμέτρους κατά τον προγραμματισμό ενός δεξαμενισμού. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τον απαιτούμενο χρόνο σκλήρυνσης μίας επίστρωσης προτού είναι επιτρεπτή η επικάλυψη της με την επόμενη καθώς και τον χρόνο που απαιτείται από τη χρονική στιγμή εφαρμογής έως ότου το πλοίο έρθει σε επαφή με το θαλάσσιο περιβάλλον, με διακύμανση ιδιαίτερα μεγάλη ανάλογα με τον τύπο του αντιρρυπαντικού επιστρώματος. Οι πλοιοκτήτες επιλέγουν συχνά την πρόχειρη εφαρμογή των αντιρρυπαντικών συστημάτων προκειμένου να μειώσουν τον συνολικό χρόνο δεξαμενισμού και τα διαφεύγοντα κέρδη από την ακινησία του πλοίου.

Οι παραπάνω πρακτικές οδηγούν στην δημιουργία μίας «ψευδο-οικονομίας» για τις ναυτιλιακές εταιρείες, όπου τα οποιαδήποτε αποκομίζοντα βραχυχρόνια οφέλη από τη μείωση των δαπανών συντήρησης, ανατρέπονται από την σημαντική αύξηση κατανάλωσης καυσίμου του πλοίου λόγω της αυξημένης επιφανειακής τραχύτητας, συνδυαστικά με το πρόσθετο κόστος υλοποίησης έκτακτων εργασιών καθαρισμού της γάστρας από τη βιορύπανση που συσσωρεύεται, ως αποτέλεσμα της πρώιμης αλλοίωσης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Ο προβληματισμός αυτός θα διερευνηθεί αναλυτικά στο Μέρος Β' της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

B. Υπολογιστικό Μέρος

Κεφάλαιο 5^ο : Μελέτη συγκριτικής απόδοσης διαφορετικών αντιρρυπαντικών τεχνολογιών

5.1 Εισαγωγή

Ο επιλογή του κατάλληλου τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος ως συνάρτηση του συνολικού λειτουργικού κόστους για ένα πλοίο, αποτελεί σύνθετο πρόβλημα για τις ναυτιλιακές εταιρίες. Ο τύπος του πλοίου, το επίπεδο δραστηριότητας, η γεωγραφική περιοχή δραστηριοποίησης, η ταχύτητα υπηρεσίας, το κόστος συντήρησης του αντιρρυπαντικού επιστρώματος και η επιθυμητή συχνότητα δεξαμενισμού αποτελούν μόνο μερικές από τις παραμέτρους που καλείται να λάβει υπόψιν ένας πλοιοκτήτης για τη λήψη της ορθούς απόφασης.

Η επιδίωξη των πλοιοκτητών για μείωση των άμεσων λειτουργικών δαπανών δύναται να οδηγήσει στη λήψη αποφάσεων που έχουν αντίστροφα οικονομικά αποτελέσματα. Η επιλογή αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων χαμηλότερου κόστους εφαρμογής, είτε η πραγματοποίηση χαμηλότερης ποιότητας εργασιών συντήρησης τους με παράλληλη μεγιστοποίηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ των δεξαμενισμών, μειώνει βραχυπρόθεσμα το λειτουργικό κόστος λόγω μικρότερου κόστους συντήρησης. Ωστόσο, η χαμηλότερη αντιρρυπαντική απόδοση σε συνδυασμό με την πρώιμη αλλοίωση των επιστρωμάτων ενδέχεται να οδηγήσει μακροπρόθεσμα σε υψηλότερο αθροιστικό λειτουργικό κόστος, λόγω αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου και των πρόσθετων απαιτούμενων εργασιών συντήρησης, αναιρώντας τα οποιαδήποτε βραχυπρόθεσμα οφέλη της συγκεκριμένης πρακτικής.

Τα παραπάνω καταδεικνύουν την αναγκαιότητα διερεύνησης του αντίκτυπου στο λειτουργικό κόστος ενός πλοίου από την εφαρμογή διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, συναρτήσει της συχνότητας μεταξύ διαδοχικών δεξαμενισμών και της ποιότητας των εργασιών συντήρησης και εφαρμογής τους.

5.2 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης (case study)

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη περίπτωσης του συνολικού λειτουργικού κόστους από την εφαρμογή και λειτουργία τεσσάρων διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων σε υπαρκτό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, σε αντιδιαστολή με το απαιτούμενο κόστος δεξαμενισμού για τη συντήρησή τους. Μεταβλητές παράμετροι της μελέτης αποτελούν η συχνότητα δεξαμενισμών και η ποιότητα εργασιών συντήρησης και εφαρμογής των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Οι τέσσερις τύποι αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων που διερευνώνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι εξής παρακάτω:

- Αντιρρυπαντικά επιστρώματα με πολυμερή ελεγχόμενης απελευθέρωσης (Controlled Depletion Polymers - CDP)
- Υβριδική αυτολειαινόμενη αντιρρυπαντική τεχνολογία (Hybrid Self-Polishing Technology)
- Αντιρρυπαντικά επιστρώματα αυτολειαινόμενων συμπολυμερών (Self-Polishing Copolymers - SPC)
- Αντιρρυπαντικά επιστρώματα απελευθέρωσης ρύπων (Fouling Release - FR)

Η υλοποίηση του υπολογιστικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε σε υπολογιστικό φύλλο excel που αναπτύχθηκε για τον παραπάνω λόγο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει συνοπτικά τα εξής στάδια:

- Εκτίμηση της σχετικής απόδοσης των τεσσάρων τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων συναρτήσει της ενεργούς διάρκειας ζωής τους.
- Ορισμός διαφορετικών σεναρίων περιοδικότητας μεταξύ των δεξαμενισμών και διαφορετικών σεναρίων ποιότητας εκτελούμενων εργασιών συντήρησης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων κατά τη διάρκεια των δεξαμενισμών.
- Εκτίμηση του προστιθέμενου λειτουργικού κόστους λόγω αύξησης της κατανάλωσης καυσίμων για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων ανά σενάριο.
- Εκτίμηση του αθροιστικού κόστους δεξαμενισμών για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων ανά σενάριο.
- Σύγκριση του συνολικού αθροιστικού λειτουργικού κόστους μεταξύ των διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων για όλα τα παραπάνω σενάρια.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε υπαρκτό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και έχει χρονικό ορίζοντα 20 ετών, θεωρώντας ως σημείο εκκίνησης τη στιγμή

καθέλκυσης του νεότευκτου πλοίου. Τα βασικά στοιχεία του υπό μελέτη πλοίου παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4: Γενικά χαρακτηριστικά υπό μελέτης πλοίου

Όνομα	SYNERGY OAKLAND
Τύπος	Container Ship (Fully Cellular)
DWT	50500
GT	40030
TEU	4253
Ολικό Μήκος (LOA)	259.8 μ.
Μήκος μεταξύ καθέτων (LBP)	244.8 μ.
Μέγιστο Πλάτος (B)	32.25 μ.
Κοίλο (D)	19.3 μ.
Μέγιστο Βύθισμα (T _D)	12.6 μ.
MCR	35650 kW
NCR	31076 kW
Ονομαστική Ταχύτητα	23.3 κόμβοι
Ημερήσια Κατανάλωση Κ.Μ. [NCR]	145.3 μ.τ./ημέρα

Πίνακας 5: Εμβαδόν επιμέρους επιφανειών γάστρας υπό μελέτης πλοίου

Vertical sides	4200 m ²
Flat bottom	8045 m ²
Topsides	4554 m ²



Εικόνα 16: Πρόσωση του SYNERGY OAKLAND κατά τον δεξαμενισμό του

Το εμπορικό προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου προέκυψε από ανάλυση των διαθέσιμων ημερησίων αναφορών (Noon Reports) και συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6: Εμπορικό προφίλ λειτουργίας υπό μελέτης πλοίου

Επίπεδο Ετήσιας Δραστηριότητας	69%
Ετήσιες ημέρες εν πλω	252
Ετήσιες ημέρες ακινησίας	113
Γεωγραφική Περιοχή Δραστηριότητας	Αυστραλία – Ν. Ζηλανδία- Δυτικές Ακτές ΗΠΑ

Η εξεύρεση των απαιτούμενων στοιχείων για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίστηκε σε σχετικό ερωτηματολόγιο που συγκροτήθηκε για το σκοπό αυτό, το οποίο προωθήθηκε σε σειρά εταιρειών παραγωγής και προμήθειας αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Το εύρος των στοιχείων που συλλέχθηκαν περιορίστηκε σημαντικά από την μικρή ανταπόκριση των ανωτέρω εταιρειών, οδηγώντας στην πραγματοποίηση ορισμένων παραδοχών προκειμένου να εκπονηθεί το υπολογιστικό μέρος, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στις παρακάτω ενότητες. Το σχετικό ερωτηματολόγιο περιλαμβάνεται στο Παράρτημα 1^ο - Ερωτηματολόγιο.

5.3 Εκτίμηση απόδοσης αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Η λειτουργία των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων συνοδεύεται από σταδιακή αύξηση των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης με την πάροδο του χρόνου συγκριτικά την αρχική κατάσταση ενός νεότευκτου πλοίου. Ο βαθμός της σχετικής ποσοστιαίας αύξησης των απαιτήσεων ισχύος συναρτήσει του χρόνου αποτελεί ένα μέτρο συγκριτικής αποδοτικότητας των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων και οφείλεται σε δύο παράγοντες (Κεφάλαιο 2^ο, Παράγραφος 2.1):

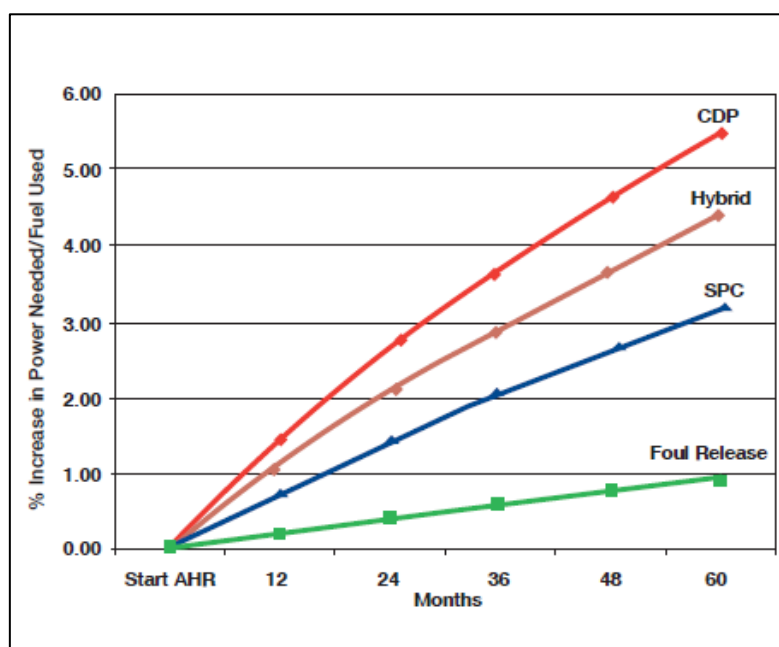
- Φυσική τραχύτητα (αλλοίωση αντιρρυπαντικού επιστρώματος)
- Βιολογική τραχύτητα (βιορύπανση)

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η χρονική εξέλιξη της αποδοτικότητας των τεσσάρων τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων βασίστηκε στα αποτελέσματα και τη μεθοδολογία της έρευνας που πραγματοποίησε η εταιρία παραγωγής υφαλοχρωμάτων International [12]. Αναφορικά με τη φυσική τραχύτητα, η εταιρεία βασιζόμενη σε προγενέστερη έρευνα του Townsin [29] σε πλοία την περίοδο 1976 έως 1986, υποδεικνύει ότι η Μέση Τραχύτητα Γάστρας (AHR) αυξάνει με την πάροδο του χρόνου, με το ρυθμό της αύξησης να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του αντιρρυπαντικού επιστρώματος. Ο μέσος ρυθμός αύξησης που παρατηρήθηκε προσεγγίζει τα 20 μm ανά έτος ενώ οι τιμές του για κάθε τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7: Ετήσιος ρυθμός αύξησης Μέσης Τραχύτητας Γάστρας για τους διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Ετήσιος ρυθμός αύξησης AHR [μm/έτος]
CDP	40
Hybrid	30
SPC	20
Fouling Release	5

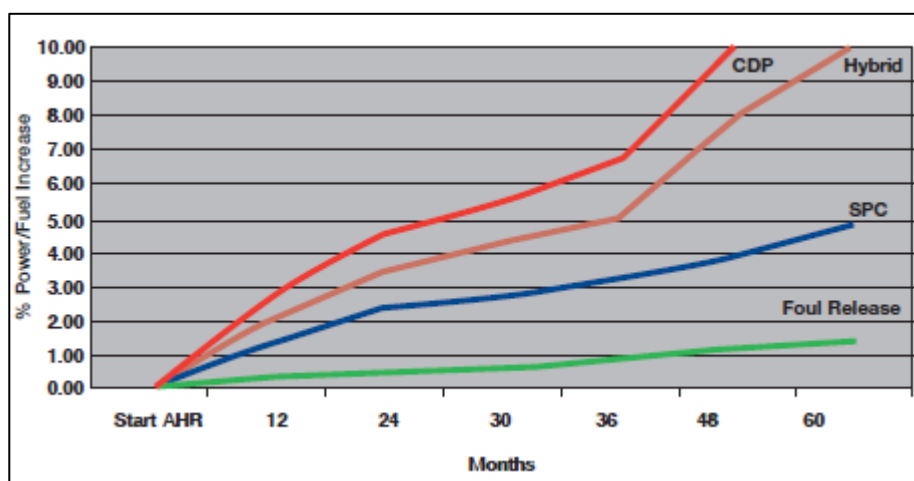
Η εκτιμώμενη ποσοστιαία αύξηση των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων λόγω της αύξησης της φυσικής τραχύτητας της γάστρας με την πάροδο του χρόνου αποτυπώνεται παρακάτω στο Διάγραμμα 1.



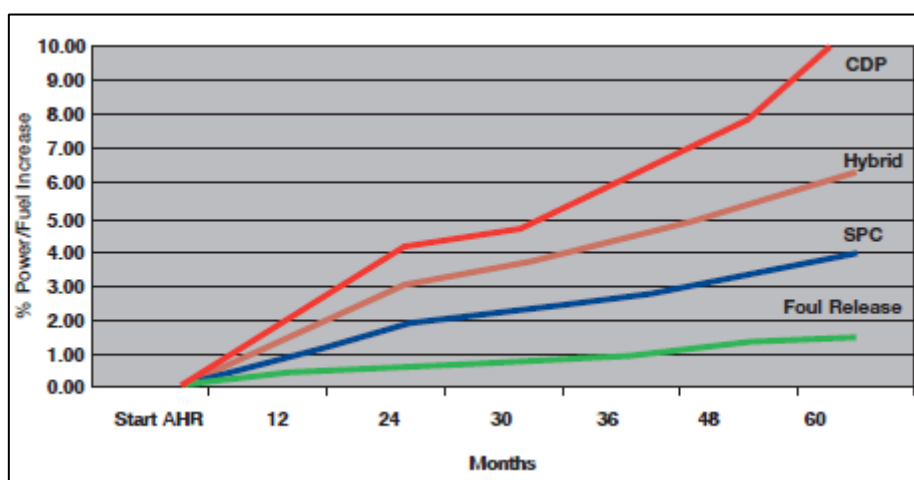
Διάγραμμα 1: Ποσοστιαία αύξηση απαιτήσεων ισχύος με την πάροδο του χρόνου λόγω αύξησης της φυσικής τραχύτητας για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων [12]

Αναφορικά με τη βιορύπανση, η εταιρία παρακολούθησε την αποδοτικότητα των διαφορετικών αντιρρυπαντικών τεχνολογιών που διαθέτει στην αγορά, επιθεωρώντας την κατάσταση της γάστρας περισσότερων από 70,000 πλοίων, διαφόρων τύπων και εμπορικών προφίλ. Όταν ένα πλοίο εισέρχονταν για δεξαμενισμό, η εταιρία κατέγραφε αναλυτικά τον τύπο, την σοβαρότητα και την έκταση της βιορύπανσης στις πλευρές (vertical sides), στον πυθμένα (flat bottom) και στην περιοχή γύρω από την ίσαλο γραμμή (boottop). Διαθέτοντας έναν αρκετά μεγάλο αριθμό δειγμάτων, ο μέσος βαθμός ρύπανσης με την πάροδο του χρόνου, ο οποίος είναι ένα μέτρο του κινδύνου βιορύπανσης για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, μπόρεσε να αξιολογηθεί με υψηλό βαθμό βεβαιότητας.

Στα παρακάτω διαγράμματα, στη βάση όσων προαναφέρθηκαν, παρουσιάζεται η συνολική αύξηση των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης για ένα τυπικό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με την πάροδο του χρόνου. Επισημαίνεται ότι η αύξηση των απαιτήσεων ισχύος διαφέρει μεταξύ πλευρικών τοιχωμάτων και πυθμένα για ένα πλοίο. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τους παρατηρούμενους μικρότερους βαθμούς ρύπανσης στον πυθμένα των πλοίων, ως αποτέλεσμα της μη έκθεσης τους στην ηλιακή ακτινοβολία.



Διάγραμμα 2: Συνολική ποσοστιαία αύξηση απαιτήσεων ισχύος με την πάροδο του χρόνου για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων – vertical sides [12]



Διάγραμμα 3: Συνολική ποσοστιαία αύξηση απαιτήσεων ισχύος με την πάροδο του χρόνου για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων – flat bottom [12]

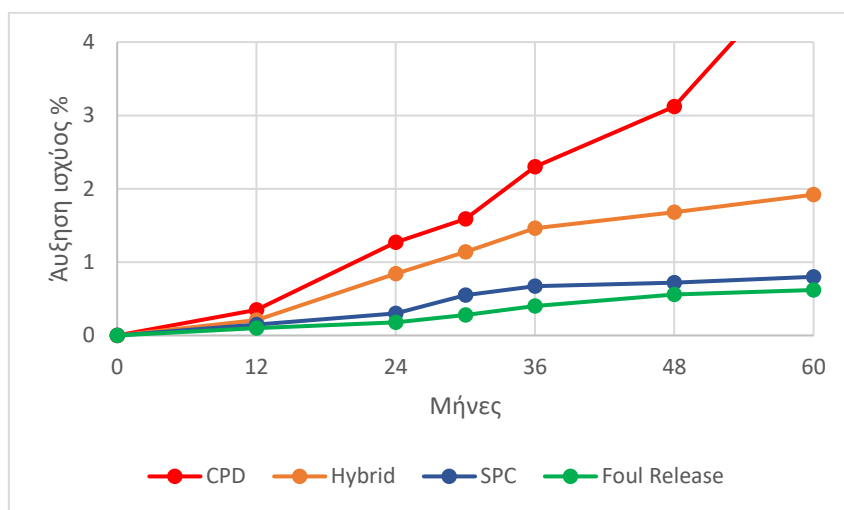
Η επιλογή των παραπάνω διαγραμμάτων ως μέτρο αναφοράς της αποδοτικότητας των διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων συναρτήσει του χρόνου βασίστηκε σε δύο βασικές παραδοχές:

1. Οι βασικές παράμετροι του εμπορικού προφίλ του υπό μελέτη πλοίου θεωρούνται σταθερές (υπηρεσιακή ταχύτητα, επίπεδο ετήσιας δραστηριότητας και γεωγραφικό πεδίο δραστηριότητας).

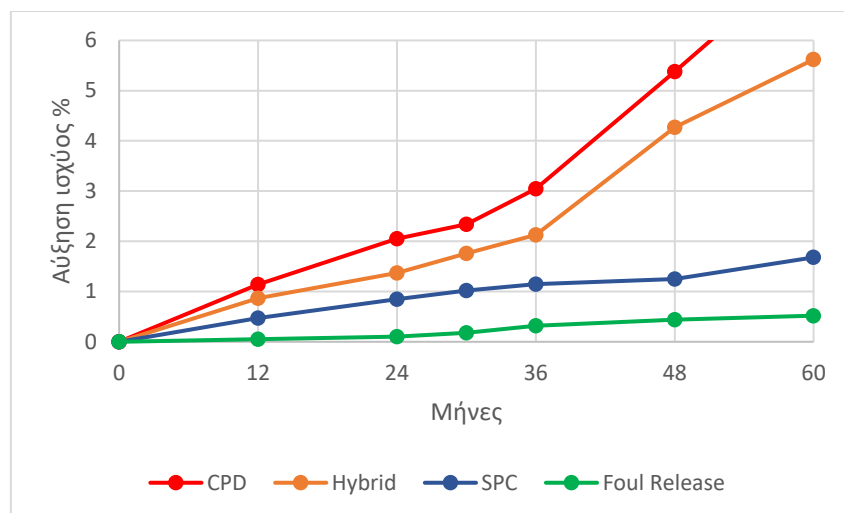
2. Διατηρώντας σταθερές τις παραπάνω παραμέτρους, που επηρεάζουν το ρυθμό της βιορύπανσης και εφόσον η μελέτη περιορίζεται σε ένα μοναδικό πλοίο συγκεκριμένου τύπου, δύναται να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που αντιπροσωπεύουν την ιστορική μέση αποδοτικότητα των τεσσάρων τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων στο συγκεκριμένο τύπο πλοίων, χωρίς να επηρεάζονται ουσιαστικά τα αποτελέσματα της μεταξύ τους σύγκρισης.

5.3.1. Αποδοτικότητα των διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων έναντι βιορύπανσης

Προκειμένου να εκτιμηθεί το πρόσθετο λειτουργικό κόστος από την εφαρμογή διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων για τα διάφορα σενάρια, απαιτήθηκε πρωταρχικά η ανάλυση των παραπάνω διαγραμμάτων στις δύο συνιστώσες που τα συνθέτουν, την ανάπτυξη βιορύπανσης και την αύξηση της φυσικής τραχύτητας. Με τη βοήθεια του λογισμικού AUTOCAD® εξήχθησαν οι συντεταγμένες των Διαγραμμάτων 1, 2 και 3. Αφαιρώντας τις συντεταγμένες του Διαγράμματος 1 από τα Διαγράμματα 2 και 3 προέκυψαν τα αντίστοιχα διαγράμματα ποσοστιαίας αύξησης των απαιτήσεων ισχύος με την πάροδο του χρόνου που σχετίζονται μόνο με την ανάπτυξη βιορύπανσης τόσο για τον πυθμένα όσο και για τα πλευρικά τοιχώματα.

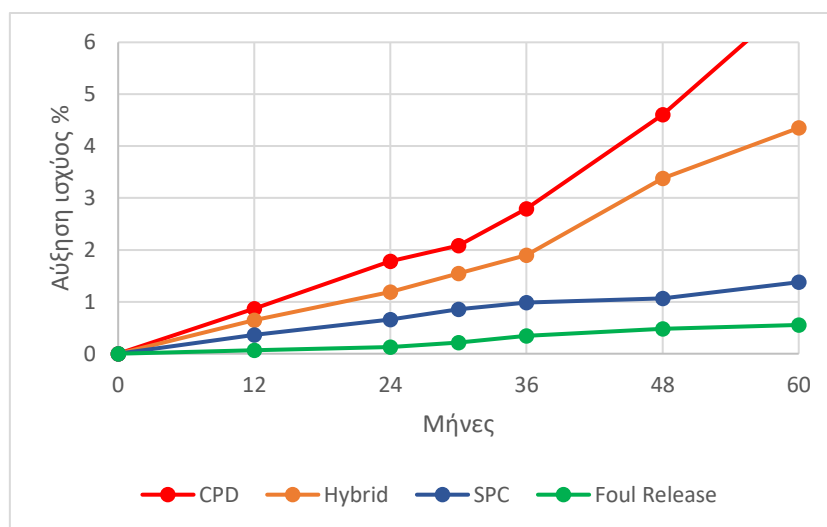


Διάγραμμα 4: Ποσοστιαία αύξηση ισχύος με την πάροδο του χρόνου λόγω ανάπτυξης βιορύπανσης για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων (flat bottom)



Διάγραμμα 5: Ποσοστιαία αύξηση ισχύος με την πάροδο του χρόνου λόγω ανάπτυξης βιορύπανσης για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων (vertical sides)

Το Διάγραμμα 6 προκύπτει ως ο σταθμισμένος μέσος όρος του ρυθμού ανάπτυξης της βιορύπανσης στα πλευρικά τοιχώματα και στον πυθμένα, με βάση το εμβαδόν των αντίστοιχων επιφανειών.



Διάγραμμα 6: Σταθμισμένος μέσος όρος ποσοστιαίας αύξησης ισχύος με την πάροδο του χρόνου λόγω ανάπτυξης βιορύπανσης για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Η αποδοτικότητα έναντι βιορύπανσης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων SPC και Fouling Release, σε βάθος πενταετίας, είναι εμφανώς υψηλότερη συγκριτικά με τις τεχνολογίες CDP και Hybrid. Η αύξηση των απαιτήσεων ισχύος για τις δύο τελευταίες τεχνολογίες αυξάνει ραγδαία μετά την πάροδο 30 μηνών, γεγονός που οφείλεται στην μικρότερη ενεργό διάρκεια ζωής τους, που τυπικά δεν ξεπερνάει τους 36 μήνες.

5.3.2. Επίδραση φυσικής τραχύτητας στην αποδοτικότητα των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Ο Stenson [30], βασιζόμενος στην προαναφερθείσα έρευνα της International [12], παρουσίασε ένα ανανεωμένο μοντέλο εκτίμησης του ρυθμού αύξησης της φυσικής τραχύτητας σύμφωνα με τα στοιχεία 845 επιθεωρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 2003 και 2014. Τα αποτελέσματα της έρευνας επέδειξαν συγκριτικά εμφανώς μικρότερους ρυθμούς αύξησης της φυσικής τραχύτητας με την πάροδο του χρόνου για όλους τους τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, με το μέσο ρυθμό αύξησης να προσεγγίζει τα 10 μm ανά έτος. Το γεγονός αυτό αποδίδεται τόσο στη βελτίωση των προδιαγραφών των υπαρχουσών αντιρρυπαντικών τεχνολογιών όσο και στη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στη σχεδίαση πλοίων, τη λειτουργία και τις πρακτικές των σύγχρονων ναυπηγείων.

Ο Stenson κατέληξε σε ένα νέο μοντέλο εκτίμησης της Μέσης Τραχύτητας Γάστρας (AHR) εντός ενός κύκλου μεταξύ δύο διαδοχικών δεξαμενισμών, εισάγοντας επιπλέον την παράμετρο της ποιότητας της επιφάνειας του υποστρώματος, αναφορικά με το είδος των εργασιών συντήρησης που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το δεξαμενισμό (αποσπασματική ή πλήρης αμμοβολή της γάστρας), προτού τοποθετηθεί το αντιρρυπαντικό επίστρωμα. Το μοντέλο που προέκυψε αποτελείται από την εξής εξίσωση:

$$AHR = S_{AHR} + C_{AHR} + t \cdot I_{AHR} \quad (15)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, με S_{AHR} συμβολίζεται η αρχική τραχύτητα του υποστρώματος της γάστρας, με C_{AHR} συμβολίζεται ο διορθωτικός όρος που εισάγεται λόγω της διαφορετικής αρχικής επιφανειακής τραχύτητας της γάστρας για επικάλυψη με διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, με t συμβολίζονται οι μήνες που έχουν παρέλθει από τον τελευταίο δεξαμενισμό και με I_{AHR} συμβολίζεται ο μηνιαίος ρυθμός αύξησης της μέσης τραχύτητας γάστρας.

Η επίδραση της φυσικής τραχύτητας στην αποδοτικότητα των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, όπως παρουσιάστηκε στο **Διάγραμμα 2**: Συνολική ποσοστιαία αύξηση απαιτήσεων ισχύος με την πάροδο του χρόνου για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων – vertical sides Διάγραμμα 1, διορθώθηκε με βάση την παραπάνω μεθοδολογία που ανέπτυξε ο Stenson. Ο νέος ρυθμός αύξησης της φυσικής τραχύτητας με την πάροδο του χρόνου πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας τις τιμές του Πίνακα 8. Η επίδραση της τραχύτητας στην αντίσταση τριβής του πλοίου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη φόρμουλα του Townsin [16] και δίνεται από τη σχέση (Εξίσωση 14):

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta C_F}{C_T} = 0.044 \cdot \left[\left(\frac{k_2}{L_{BP}} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{k_1}{L_{BP}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] / C_T$$

Η τιμή της συνολικής αντίστασης C_T στην παραπάνω σχέση λήφθηκε σύμφωνα με το εγχειρίδιο των αποτελεσμάτων των Sea Trials του πλοίου αναφοράς για την συγκεκριμένη υπηρεσιακή ταχύτητα του, με τιμή $C_T = 1,76 \cdot 10^6 [N]$. Η τιμή της αρχικής τραχύτητας του υποστρώματος λήφθηκε θεωρώντας ότι το νεότευκτο πλοίο έχει υποστεί πλήρη αμμοβολή της γάστρας του προτού εφαρμοστεί το αντιρρυπαντικό επίστρωμα. Ως k_1 λαμβάνεται η τραχύτητα της γάστρας μία χρονική στιγμή t_1 , ενώ ως k_2 λαμβάνεται η τραχύτητα μία μεταγενέστερη χρονική στιγμή t_2 . Αντίστοιχα, η πρόσθετη ισχύς πρόωσης λόγω αύξησης της τραχύτητας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\Delta P}{P} = \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^{-1} - 1 \quad (16)$$

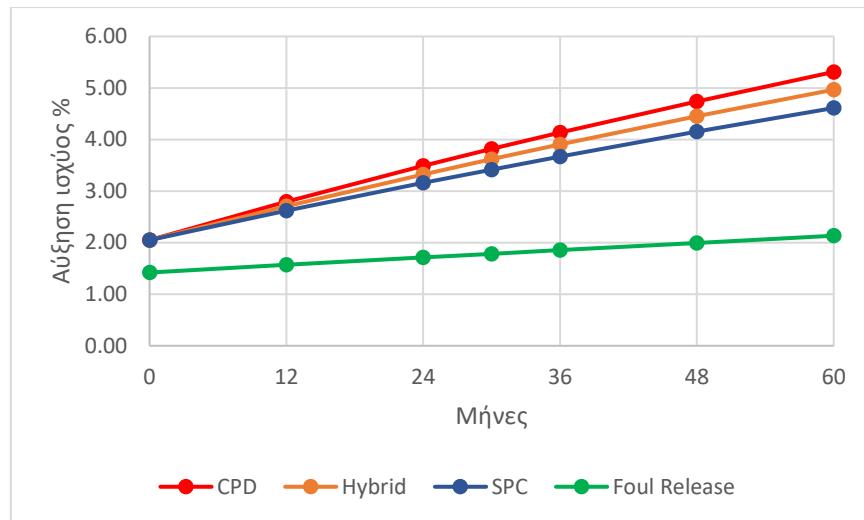
Με P συμβολίζεται η αξονική ισχύς ενώ με η συμβολίζεται ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή. Η παρακάτω σχέση ισχύει για πλοία τύπου Ro-Ro και χρησιμοποιείται προσεγγιστικά, καθώς οι γραμμές των εν λόγω πλοίων είναι παρόμοιες με εκείνες των container ships.

$$\left(1 + \frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^{-1} = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right) + 0.83 \quad (17)$$

Πίνακας 8: Ενδεικτικές τιμές S_{AHR} , C_{AHR} , I_{AHR} , που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση της μέσης τραχύτητας γάστρας [30]

Coating Technology	Substrate Preparation	S_{AHR} (μm)	C_{AHR} (μm)	I_{AHR} (μm)
FR	Full Blast	90	-5	0.19
SPC	Full Blast	90	5	0.81
CDP	Full Blast	90	5	1.07
FR	Spot/No Blast	135	-25	0.19
SPC	Spot/No Blast	135	25	0.81
CDP	Spot/No Blast	135	25	1.07

Το Διάγραμμα 7 παρουσιάζει την εξέλιξη της αύξησης των απαιτήσεων ισχύος λόγω αύξησης της φυσικής τραχύτητας, για χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών δεξαμενισμών 60 μηνών, όπως προέκυψε αξιοποιώντας τη μεθοδολογία του Stenson.



Διάγραμμα 7: Διορθωμένη ποσοστιαία αύξηση των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης λόγω αύξησης της φυσικής τραχύτητας για διαφορετικούς τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

5.4 Σενάρια περιοδικότητας δεξαμενισμών και εργασιών συντήρησης αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Η εκτίμηση της αύξησης των απαιτήσεων ισχύος συναρτήσει του χρόνου, λόγω λειτουργίας των διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, πραγματοποιείται συναρτήσει διαφορετικών σεναρίων συχνότητας δεξαμενισμών και κατεργασιών προετοιμασίας της επιφάνειας της γάστρας κατά τον δεξαμενισμό.

5.4.1. Σενάρια περιοδικότητας δεξαμενισμών

Ο καθορισμός της συχνότητας των δεξαμενισμών, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.1, υπόκειται σε μία σειρά περιορισμών μέσω των κανονισμών που θέτουν οι νηογνώμονες και η διεθνής σύμβαση SOLAS για επιθεώρηση του πυθμένα της γάστρας των πλοίων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο δεξαμενισμός για τη συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων πραγματοποιείται κατά κανόνα, για λόγους οικονομικής βιωσιμότητας εξαιτίας του υψηλού κόστους δεξαμενισμού, παράλληλα με την πραγματοποίηση των σχετικών υποχρεωτικών επιθεωρήσεων, τα διαφορετικά σενάρια συχνότητας δεξαμενισμών οριοθετούνται ως εξής:

- Η μέγιστη χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών δεξαμενισμών ορίζεται στα 5 έτη.
- Η δυνατότητα επέκτασης της μέγιστης χρονικής διάρκειας μεταξύ δεξαμενισμών στα 7.5 έτη για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μέσω του Προγράμματος Επέκτασης Δεξαμενισμών (EDD), δε λαμβάνεται υπόψη στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ελλείψει στοιχείων για την αποδοτικότητα των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων άνω των 5 ετών λειτουργίας.
- Παράλληλα, διερευνάται ο αντίκτυπος πραγματοποίησης ενός επιπλέον δεξαμενισμού στο μεσοδιάστημα των 5 ετών, δηλαδή στα 2.5 έτη, που δύναται να πραγματοποιηθεί συνδυαστικά με τις απαιτούμενες ενδιάμεσες επιθεωρήσεις (intermediate surveys).

Στη παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται επί της ουσίας η συγκριτική αποδοτικότητα των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων είτε για πραγματοποίηση προληπτικής συντήρησης τους με τακτικούς δεξαμενισμούς είτε για επιμήκυνση της λειτουργίας τους στο μέγιστο επιτρεπτό χρονικό διάστημα μεταξύ των δεξαμενισμών. Τα τελικά σενάρια που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 9 και αποτελούν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς περιοδικότητας των δεξαμενισμών μεταξύ 5 και 2.5 ετών αντίστοιχα για τη διάρκεια ζωής του πλοίου.

Πίνακας 9: Σενάρια περιοδικότητας δεξαμενισμών

Σενάριο Δεξαμενισμών	Μήνες						
	30	60	90	120	150	180	210
1	OXI	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	OXI
2	OXI	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	ΝΑΙ
3	OXI	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
4	OXI	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
5	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

Επισημαίνεται ότι στον παραπάνω πίνακα, με πράσινο χρώμα αποτυπώνεται η είσοδος του πλοίου για δεξαμενισμό σε ένα δεδομένο μήνα από την έναρξη ζωής του πλοίου και με κόκκινο χρώμα η μη πραγματοποίηση δεξαμενισμού.

5.4.2. Σενάρια αμμοβολής γάστρας

Η δεύτερη βασική παράμετρος που εισάγεται, αναφορικά με την αποδοτικότητα των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, σχετίζεται με την ποιότητα προετοιμασίας της επιφάνειας της γάστρας κατά τον δεξαμενισμό. Συγκεκριμένα, διερευνάται ο αντίκτυπος της πραγματοποίησης διαφορετικών σεναρίων αμμοβολής της γάστρας, προτού τοποθετηθούν τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα σε κάθε δεξαμενισμό, στην αύξηση των απαιτήσεων ισχύος σε βάθος χρόνου. Οι εργασίες αμμοβολής ποικίλουν ως προς την έκταση τους και την ποιότητα τους, με μεγάλη διακύμανση κόστους. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκαν τέσσερα βασικά σενάρια αμμοβολής με κλιμακωτή ποιότητα κατεργασίας της επιφάνειας της γάστρας:

- Πλήρης αμμοβολή (full blast) στην επιφάνεια της γάστρας σε κάθε δεξαμενισμό
- Τυπική αποσπασματική αμμοβολή (spot blast) σε κάθε δεξαμενισμό, με πραγματοποίηση πλήρους αμμοβολής κατά τον δεξαμενισμό του 10^{ου} έτους της ζωής του πλοίου
- Τυπική αποσπασματική αμμοβολή σε κάθε δεξαμενισμό
- Καμία αμμοβολή

Ο τύπος αμμοβολής και η έκταση στην οποία πραγματοποιείται επί της επιφάνειας της γάστρας για την περίπτωση πλήρους ή αποσπασματικής αμμοβολής, βασίστηκε σε πραγματικά στοιχεία από δεξαμενισμούς του υπό μελέτη πλοίου και των αδελφών του πλοίων.

Πίνακας 10: Ποσοστό επιφάνειας της γάστρας που υπόκειται σε αμμοβολή τύπου SA – 2.0 και SA – 1.0 για full blast και spot blast σενάρια

Είδος αμμοβολής	SA – 2.0	SA – 1.0
Full	100%	0%
Spot	10%	30%

Η Μέση Τραχύτητα Γάστρας (AHR) αποτελεί συνάρτηση των παρακάτω επιμέρους όρων τραχύτητας (R_{t50} ή Mean Average Amplitude – MAA):

$$AHR_{TOTAL} = MAA_{STEEL PLATE} + MAA_{COATING PLATE} + MAA_{CORROSION \text{ of } AC/AF} + MAA_{CORROSION \text{ of } steel} + MAA_{CORROSION \text{ permanent}} + MAA_{FOULING}$$

- Το άθροισμα των όρων της τραχύτητας του χάλυβα της γάστρας ($MAA_{STEEL PLATE}$) και της τραχύτητας των αντιδιαβρωτικών / αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων ($MAA_{COATING PLATE}$) αποτελεί την αρχική τραχύτητα ενός νεότευκτου πλοίου με τιμές που λαμβάνονται από τον Πίνακα 8.
- Η εκτέλεση αμμοβολής μειώνει τη συσσωρευμένη τραχύτητα της γάστρας, μέσω της αφαίρεσης των προηγούμενων αλλοιωμένων αντιρρυπαντικών επιστρώσεων και της απομάκρυνσης τοπικών διαβρώσεων εξαλείφοντας επομένως τους όρους $MAA_{CORROSION \text{ of } AC/AF}$ και $MAA_{CORROSION \text{ of } steel}$.
- Η τραχύτητα που οφείλεται σε μακροχρόνια διάβρωση των ελασμάτων ($MAA_{CORROSION \text{ permanent}}$) είναι μόνιμη, δεν μπορεί να αφαιρεθεί μέσω αμμοβολής και έχει αθροιστική επίδραση στη συνολική τραχύτητα της γάστρας με το πέρασμα των χρόνων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η συνιστώσα $MAA_{CORROSION \text{ permanent}}$ λαμβάνεται ίση με 26.8% της συνολικής τραχύτητας που έχει συσσωρεύσει το πλοίο κατά την είσοδο του για δεξαμενισμό, σύμφωνα με στοιχεία από προηγούμενες εργασίες [31].

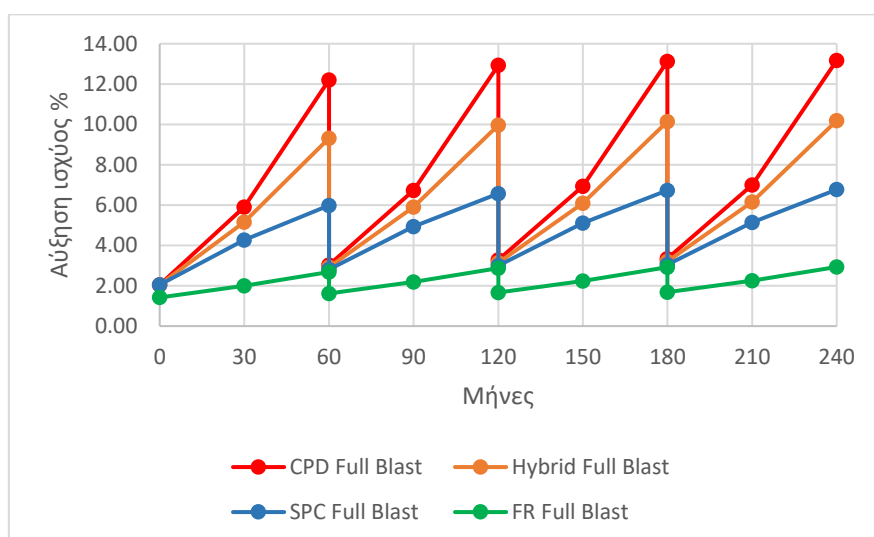
5.4.3. Μεθοδολογία εκτίμησης αποδοτικότητας αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων ανά σενάριο

Η αποδοτικότητα κάθε τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος ανά σενάριο περιοδικότητας δεξαμενισμών και εργασιών συντήρησης πραγματοποιείται στο υπολογιστικό φύλλο excel για τη διάρκεια ζωής του πλοίου (240 μήνες), εκφραζόμενη ως πρόσθετη απαίτηση ισχύος με την πάροδο του χρόνου σύμφωνα με την παρακάτω μεθοδολογία:

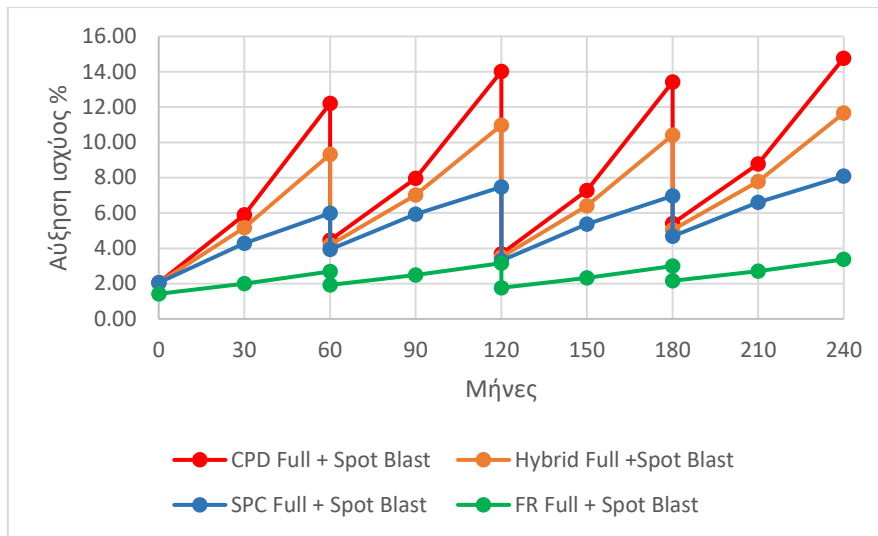
1. Υπολογισμός της αύξησης της φυσικής τραχύτητας της γάστρας με την πάροδο του χρόνου σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Stenson και τις τιμές του Πίνακα 8.

2. Σε κάθε δεξαμενισμό εφόσον πραγματοποιηθεί πλήρης αμμοβολή εξαλείφεται η συσσωρευόμενη φυσική τραχύτητα πλην της μόνιμης συνιστώσας της. Αντίστοιχα, στην περίπτωση spot αμμοβολής εξαλείφεται η συσσωρευόμενη τραχύτητα μονάχα στο τμήμα της επιφάνειας της γάστρας που αμμοβολείται, ενώ εφόσον δεν πραγματοποιηθεί αμμοβολή η συσσωρευόμενη τραχύτητα παραμένει άθικτη και συνεχίζει να αυξάνει χρονικά μετά το πέρας του δεξαμενισμού.
3. Εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης τριβής λόγω φυσικής τραχύτητας και εν συνεχεία της πρόσθετης απαίτησης ισχύος πρόωσης λόγω φυσικής τραχύτητας σύμφωνα με τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.3.2.
4. Για κάθε χρονική στιγμή αθροίζεται η συνιστώσα αύξησης των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης λόγω φυσικής τραχύτητας με την αντίστοιχη συνιστώσα που οφείλεται στην ανάπτυξη βιορύπανσης στη γάστρα, σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.1. Επισημαίνεται ότι σε κάθε δεξαμενισμό θεωρείται ότι η επίδραση της βιορύπανσης μηδενίζεται λόγω καθαρισμού της γάστρας με jet νερού υψηλής πίεσης.

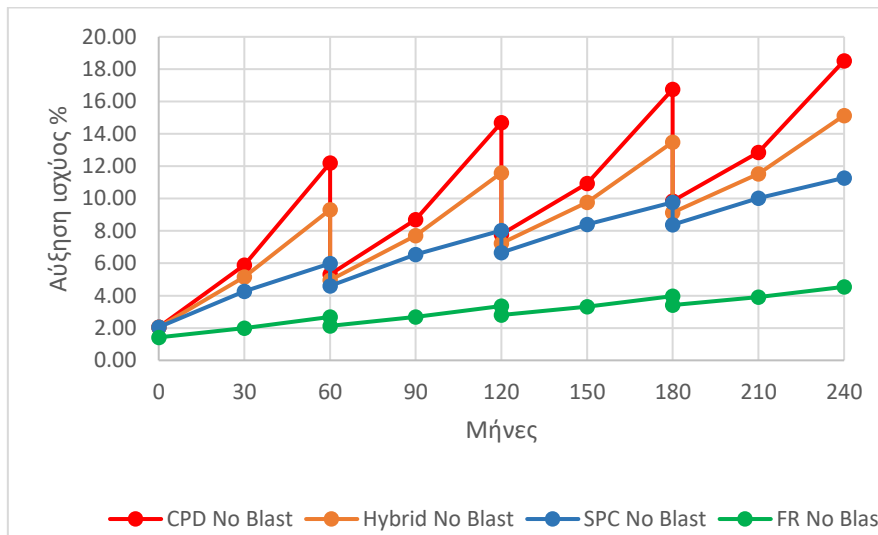
Στα διαγράμματα 8 έως 11 παρουσιάζεται ενδεικτικά το υπολογιστικό μοντέλο εκτίμησης της συνολικής αύξησης απαιτήσεων ισχύος πρόωσης για τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια αμμοβολών με περιοδικότητα δεξαμενισμών ανά 5 έτη (1° Σενάριο Περιοδικότητας). Με αντίστοιχο τρόπο προέκυψαν τα διαγράμματα για τα υπόλοιπα σενάρια περιοδικότητας δεξαμενισμών και αμμοβολής της γάστρας του πλοίου.



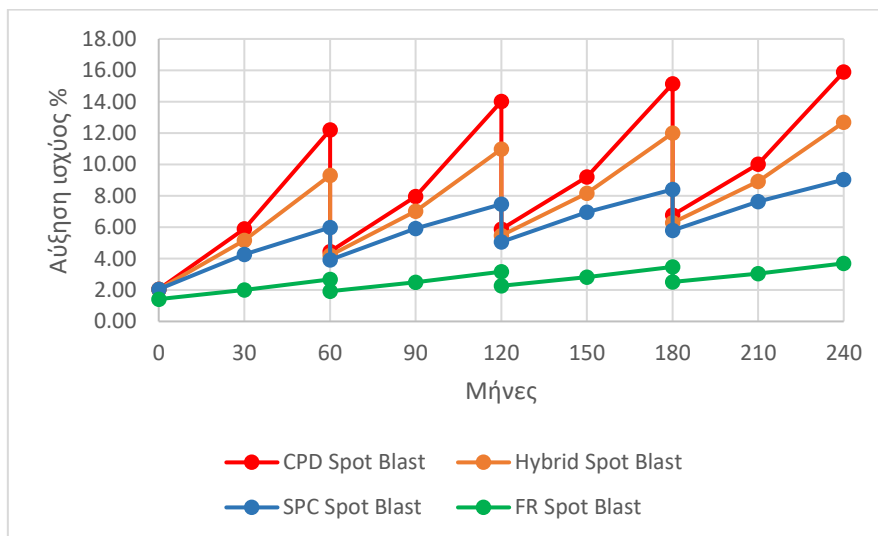
Διάγραμμα 8: Αθροιστική αύξηση απαιτήσεων ισχύος πρόωσης (%) – Πλήρεις αμμοβολές



Διάγραμμα 9: Αθροιστική αύξηση απαιτήσεων ισχύος πρόωσης (%) – Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη και spot αμμοβολές στους λοιπούς δεξαμενισμούς



Διάγραμμα 10: Αθροιστική αύξηση απαιτήσεων ισχύος πρόωσης (%) – Καμία αμμοβολή



Διάγραμμα 11: Αθροιστική αύξηση απαιτήσεων ισχύος πρόωσης (%) – Spot αμμοβολές

5.5 Εκτίμηση προστιθέμενης κατανάλωσης καυσίμου ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Ο προσδιορισμός της αποδοτικότητας των διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης του προστιθέμενου λειτουργικού κόστους, λόγω αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου για κάθε αντιρρυπαντικό επίστρωμα. Το κόστος από τη λειτουργία των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων έχει αθροιστικό χαρακτήρα, καθώς το ποσοστό αύξησης των απαιτήσεων ισχύος αυξάνει διαρκώς με την πάροδο του χρόνου. Η διαδικασία εκτίμησης του αθροιστικού κόστους που ακολουθήθηκε στο υπολογιστικό φύλλο excel παρουσιάζεται παρακάτω.

1. Αρχικά, εκτιμήθηκε, ως βάση αναφοράς, η μέση ετήσια κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής του υπό μελέτη πλοίου, για την ιδανική περίπτωση όπου οι απαιτήσεις ισχύος δεν αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου από τη λειτουργία των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Η μέση ετήσια κατανάλωση προέκυψε σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$mcons_{yearly} = mcons_{daily} \cdot Days_{underway}$$

όπου, $mcons_{daily}$, η μέση ημερήσια κατανάλωση θεωρώντας σταθερή λειτουργία του υπό μελέτη πλοίου στην υπηρεσιακή του ταχύτητα και $Days_{underway}$, οι ετήσιες ημέρες λειτουργίας εν πλω που υπολογίστηκαν για επίπεδο δραστηριότητας, σύμφωνα με το εμπορικό προφίλ του πλοίου. Η προκύπτουσα μέση ετήσια κατανάλωση καυσίμου δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 11: Ετήσια μέση κατανάλωση υπό μελέτη πλοίου

$mcons_{daily}$	145.3 τόνοι/ημέρα
$Days_{underway}$	252 ημέρες
$mcons_{yearly}$	36,616 τόνοι/ετησίως

2. Εν συνεχεία, για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων και για κάθε συνδυασμό σεναρίων περιοδικότητας δεξαμενισμών και βαθμού προετοιμασίας της επιφάνειας της γάστρας, υπολογίστηκε η αθροιστική επιπλέον κατανάλωση καυσίμου με βάση τα παραχθέντα διαγράμματα αύξησης των απαιτήσεων ισχύος της προηγούμενης παραγράφου. Ο υπολογισμός της αθροιστικής επιπλέον κατανάλωσης καυσίμου για ένα δεδομένο χρονικό σημείο (n) πραγματοποιείται θεωρώντας ότι η αύξηση των απαιτήσεων ισχύος από το αμέσως προηγούμενο χρονικό σημείο (n-1) είναι γραμμική και επομένως λαμβάνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$mcons_n = mcons_{n-1} + mcons_{yearly} \cdot \frac{(added_power\%_{n-1} + added_power\%_n)}{2}$$

Η πρόσθετη κατανάλωση μεταξύ των χρονικών στιγμών n-1 και n προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τη μέση ετήσια κατανάλωση καυσίμου, $mcons_{yearly}$, με τον μέσο όρο της αύξησης των απαιτήσεων ισχύος στις δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές, $added_power\%_{n-1}$, και $added_power\%_n$. Προσθέτοντας τον παραπάνω όρο στην αθροιστική κατανάλωση της χρονικής στιγμής n-1, $mcons_{n-1}$, προκύπτει η νέα αθροιστική κατανάλωση καυσίμου τη χρονική στιγμή n.

	A	B	C	D	E	F	G
1	General Particulars						
2	VLSFO Price (\$/mton)	\$ 354.0					
3	Baseline Consumption (mtons/year)	36,616					
4	Baseline Fuel Cost (\$/year)	\$ 12,961,922.4					
5							
6	Added Fuel Consumption						
7	CDP	Full Blast					
8	DD Scenario No.	0	12	24	30	30	36
9	1	-	1,046.5	2,682.8	3,705.3	3,705.3	4,879.3
10	2	-	1,046.5	2,682.8	3,705.3	3,705.3	4,879.3
11	3	-	1,046.5	2,682.8	3,705.3	3,705.3	4,879.3
12	4	-	1,046.5	2,682.8	3,705.3	3,705.3	4,879.3
13	5	-	1,046.5	2,682.8	3,705.3	3,705.3	4,286.1
14	Hybrid						
15	1	-	989.2	2,429.5	3,315.5	3,315.5	4,319.6
16	2	-	989.2	2,429.5	3,315.5	3,315.5	4,319.6
17	3	-	989.2	2,429.5	3,315.5	3,315.5	4,319.6
18	4	-	989.2	2,429.5	3,315.5	3,315.5	4,319.6
19	5	-	989.2	2,429.5	3,315.5	3,315.5	3,860.9

Εικόνα 17: Παράδειγμα υπολογισμού αθροιστικής κατανάλωσης σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή στο υπολογιστικό φύλλο excel

3. Το αθροιστικό κόστος λειτουργίας λόγω αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου για κάθε τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος, προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την επιπλέον κατανάλωση καυσίμου με μία δεδομένη τιμή του καυσίμου. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε ως καύσιμο το ναυτιλιακό μαζούτ μέγιστης περιεκτικότητας 0.5% σε θείο (Very Low Sulfur Fuel Oil - VLSFO). Λόγω της μεγάλης διακύμανσης που παρουσιάζουν οι τιμές των ναυτιλιακών καυσίμων, ως τιμή αναφοράς λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών του τελευταίου εξαμήνου στους σημαντικότερους λιμένες της Αυστραλίας και των Δυτικών Ακτών των ΗΠΑ, με βάση τη γεωγραφική περιοχή εμπορικής δραστηριότητας του υπό μελέτη πλοίου σύμφωνα με τα δεδομένα της ιστοσελίδας Ship & Bunker [32]. Η τιμή αναφοράς διαμορφώθηκε σε 354 USD/τόνο.

5.6 Εκτίμηση κόστους δεξαμενισμού ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Το κόστος του δεξαμενισμού που σχετίζεται με τη συντήρηση και αντικατάσταση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων αποτελεί αντισταθμιστικό παράγοντα στην αποδοτικότητα τους. Τα πιθανά οικονομικά οφέλη ενός συγκεκριμένου τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος, όσον αφορά στην εξοικονόμηση καυσίμου συγκριτικά με τις υπόλοιπες αντιρρυπαντικές τεχνολογίες, είναι απαραίτητο να αντιδιασταλούν με το απαιτούμενο κόστος δεξαμενισμού που σχετίζεται με τη συντήρησή τους. Η ορθή συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων απαιτεί μία σειρά διαδικασιών που ποικίλουν όσον αφορά την απαιτούμενη χρονική διάρκεια και το κόστος τους, ανάλογα με την επιλεγείσα αντιρρυπαντική τεχνολογία, το είδος και την ποιότητα των εκτελούμενων εργασιών.

Ο δεξαμενισμός ενός πλοίου αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία κατά την οποία εκτελούνται ταυτόχρονα πολλαπλών ειδών εργασίες συντήρησης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωσή του. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η εκτίμηση του συνολικού κόστους δεξαμενισμού περιορίζεται μόνο στον προσδιορισμό του κόστους εκείνων των εργασιών, που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τη συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Το κόστος ενός δεξαμενισμού, όσον αφορά την συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Γενικά κόστη χρήσης δεξαμενής
2. Εργατικά κόστη δεξαμενής
3. Κόστος κτήσης απαιτούμενου όγκου βαφής αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Το είδος των απαιτούμενων εργασιών βασίστηκε σε πραγματικά στοιχεία που προέκυψαν από εκθέσεις προηγούμενων δεξαμενισμών του υπό μελέτη πλοίου και ορισμένων αδελφών του πλοίων. Αντίστοιχα, οι τυπικές χρεώσεις για τις παραπάνω κατηγορίες εργασιών ελήφθησαν ως μέσος όρος πραγματικών στοιχείων χρεώσεων, από προηγούμενους δεξαμενισμούς του υπό μελέτη πλοίου και ορισμένων αδελφών του πλοίων.

5.6.1. Γενικά κόστη χρήσης δεξαμενής

Κάθε δεξαμενή επιβάλλει μία σειρά γενικών χρεώσεων που αφορούν την είσοδο, την ημερήσια χρήση και την έξοδο ενός πλοίου από αυτήν. Το κόστος εισόδου και εξόδου από τη δεξαμενή δεν εξαρτάται από τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται, ωστόσο αποτελεί αναπόφευκτη χρέωση για τη χρήση μίας δεξαμενής, ανεξαρτήτως του είδους εργασιών που εκτελούνται και επομένως λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του

συνολικού κόστους του δεξαμενισμού. Αντιθέτως, το κόστος λόγω ημερήσιας χρέωσης για την χρήση μίας δεξαμενής, αποτελεί συνάρτηση της συνολικής απαιτούμενης διάρκειας ενός δεξαμενισμού και εξαρτάται άμεσα από τον τύπο του αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται και το είδος των εργασιών συντήρησης που εκτελούνται.

Η συνολική διάρκεια του δεξαμενισμού συνδέεται άμεσα με την απαιτούμενη διάρκεια τοποθέτησης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, η οποία εξαρτάται από τις ειδικές προδιαγραφές που προβλέπουν οι κατασκευαστές τους. Οι βασικές χρονικές παράμετροι που προσδιορίζουν την συνολική διάρκεια τοποθέτησης των εν λόγω επιστρωμάτων είναι οι εξής:

- Ο χρόνος σκλήρυνσης της βαφής (hard drying)
- Ο χρόνος αναμονής μεταξύ της επικάλυψης μίας στρώσης με μία άλλη (overcoating interval)
- Ο χρόνος αναμονής προτού έρθουν σε επαφή με το θαλάσσιο περιβάλλον (before flooding)

Η απαιτούμενη χρονική διάρκεια των παραπάνω παραμέτρων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του αντιρρυπαντικού επιστρώματος και αποτελεί συνάρτηση της καιρικών συνθηκών που επικρατούν. Παράλληλα, το είδος των εργασιών συντήρησης που λαμβάνουν χώρα προτού εφαρμοστούν τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα επηρεάζει εξίσου τον συνολικό χρόνο δεξαμενισμού, καθώς η πραγματοποίηση μίας αμμοβολής και η έκταση της στην επιφάνεια της γάστρας μεταβάλλουν σημαντικά τον προγραμματισμό του δεξαμενισμού.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο χρονικός προσδιορισμός των παραμέτρων του προγραμματισμού του δεξαμενισμού βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα από προηγούμενες εκθέσεις δεξαμενισμών (dry dock reports) του υπό μελέτη πλοίου. Η χρονική διάρκεια εκτέλεσης των προπαρασκευαστικών εργασιών και ο χρόνος εφαρμογής των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, βασίστηκε στην παραδοχή ότι δεν θα διαφέρει σημαντικά μεταξύ διαφορετικών δεξαμενισμών. Η χρονική διάρκεια σκλήρυνσης της βαφής και ο απαιτούμενος χρόνος προτού έρθει σε επαφή με το θαλασσινό νερό διαφέρει σημαντικά ανάλογα τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται και λήφθηκε σύμφωνα με όσα προδιαγράφονται στα αντίστοιχα Τεχνικά Εγχειρίδια του κατασκευαστή [33]. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι βασικές χρονικές παράμετροι του προγραμματισμού, ανάλογα με τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος. Επισημαίνεται ότι στην εκτίμηση των χρονικών παραμέτρων θεωρήθηκε ατμοσφαιρική θερμοκρασία 10 °C, αντίστοιχα με τις υπάρχουσες Εκθέσεις Δεξαμενισμών.

Πίνακας 12: Προγραμματισμός Δεξαμενισμού

Δραστηριότητα	Τύπος προϊόντος	Διάρκεια [ημέρες]
Είσοδος		0.25
Καθαρισμός υψηλής πίεσης νερού		0.33
Πλήρης αμμοβολή		2.94
Καθαρισμός χαμηλής πίεσης νερού		0.08
Χρόνος εφαρμογής αντιδιαβρωτικών / αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων	Primer	0.23
	A/C Coating	0.21
	A/F 1st Coating	0.21
	A/F 2nd Coating	0.13
Απαιτούμενος χρόνος σκλήρυνσης βαφής	Primer	0.67
	A/C Coating	0.96
	CDP	0.5
	Hybrid	0.5
	SPC	0.25
	Foul Release	0.92
Απαιτούμενος χρόνος προτού τα επιστρώματα έρθουν σε επαφή με το θαλασσινό νερό	CDP	0.5
	Hybrid	0.5
	SPC	0.75
	Foul Release	1.83
Έξοδος		0.08

Στη βάση του παραπάνω προγραμματισμού προέκυψε η εκτίμηση του συνολικού απαιτούμενου χρόνου δεξαμενισμού για κάθε τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος, ανάλογα με την πραγματοποίηση ή μη αμμοβολής στην επιφάνεια της γάστρας. Στην περίπτωση αποσπασματικής αμμοβολής λήφθηκε κατά προσέγγιση ότι η χρονική διάρκεια της διεργασίας αντιστοιχεί στο 40% μίας πλήρους αμμοβολής αναλογικά με το ποσοστό της επιφάνειας που αμμοβολείται.

Πίνακας 13: Χρονική διάρκεια δεξαμενισμού (ημέρες) συναρτήσει της αντιρρυπαντικής τεχνολογίας και των εργασιών αμμοβολής

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Διάρκεια – Καμία Αμμοβολή	Διάρκεια - Spot Αμμοβολή	Διάρκεια - Πλήρης Αμμοβολή
CDP	5	6	8
Hybrid	5	6	8
SPC	5	6	8
Foul Release	6	8	9

Οι γενικές τιμές χρεώσεων χρήσης της δεξαμενής προέκυψαν ως μέσοι όροι από πραγματικούς δεξαμενισμούς του υπό μελέτη πλοίου και ορισμένων αδελφών του και συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 14: Τυπικές τιμές χρέωσης για χρήση δεξαμενής

Πρώτη ημέρα χρήσης	Λοιπές ημέρες χρήσης	Κόστος εισόδου - εξόδου
\$ 17,566.67	\$ 4,856.00	\$ 13,146.67

Το συνολικό γενικό κόστος χρήσης δεξαμενής ανάλογα με τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος και την πραγματοποίηση ή μη αμμοβολής στην επιφάνεια της γάστρας, σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 15: Γενικό κόστος χρήσης δεξαμενής

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Γενικό Κόστος – Καμία Αμμοβολή	Γενικό Κόστος – Spot Αμμοβολή	Γενικό Κόστος – Πλήρης Αμμοβολή
CDP	\$ 50,137.33	\$ 54,993.33	\$ 64,705.33
Hybrid	\$ 50,137.33	\$ 54,993.33	\$ 64,705.33
SPC	\$ 50,137.33	\$ 54,993.33	\$ 64,705.33
Foul Release	\$ 54,993.33	\$ 64,705.33	\$ 69,561.33

5.6.2. Εργατικά κόστη δεξαμενής

Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει της χρεώσεις της δεξαμενής για την διεξαγωγή όλων των εργασιών που σχετίζονται με την τοποθέτηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων σε έναν δεξαμενισμό. Οι βασικές εργασίες που λαμβάνονται υπόψιν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι εξής:

- Καθαρισμός της γάστρας με τζετ υψηλής πίεσης νερού (έως 250 bar) για απομάκρυνση της βιορύπανσης και καθαρισμός με τζετ χαμηλής πίεσης νερού για απομάκρυνση λοιπών ακαθαρσιών (άλατα).
- Αμμοβολή γάστρας συγκεκριμένου τύπου και έκτασης στην οποία εφαρμόζεται.
- Τοποθέτηση επιμέρους στρώσεων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.

Οι παρακάτω εργασίες, αποτελούν προαπαιτούμενο για την εφαρμογή των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων σε έναν δεξαμενισμό, ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν λαμβάνονται υπόψη, θεωρώντας προσεγγιστικά ότι το κόστος τους παραμένει αμετάβλητο, ανεξαρτήτως του τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται στη γάστρα του υπό μελέτη πλοίου:

- Επικάλυψη καθοδικής προστασίας και προπέλας, προκειμένου να προστατευτούν οι επιφάνειες τους από τις εργασίες τοποθέτησης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.
- Τοποθέτηση επιμέρους στρώσεων του primer και των αντιδιαβρωτικών επιστρωμάτων.

Η συνήθης πρακτική των δεξαμενών συνίσταται στην επιβολή διαφορετικής χρέωσης ανάλογα με τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται. Οι χρεώσεις εργατικών τυπικά κοστολογούνται ανά μονάδα επιφάνειας και συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα για το υπό μελέτη πλοίο, εξαιρουμένων των χρεώσεων για τη διεξαγωγή αμμοβολής.

Πίνακας 16: Χρεώσεις εργατικών ανά μονάδα επιφάνειας

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Χρέωση ανά μονάδα επιφάνειας	Συνολικό κόστος
CDP	\$1.61	\$20,514.45
Hybrid	\$1.61	\$20,514.45
SPC	\$1.73	\$21,922.63
Foul Release	\$1.80	\$22,841.00

Οι τυπικές χρεώσεις ανά μονάδα επιφάνειας και το συνολικό κόστος κάθε τύπου αμμοβολής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 17: Κόστος αμμοβολής ανά μονάδα επιφάνειας

Τύπος	Κόστος SA - 1.0 (\$/m ²)	Κόστος SA - 2.0 (\$/m ²)	Συνολικό κόστος αμμοβολής
Πλήρης	\$ 4.50	\$ 10.00	\$ 122,450.00
Spot			\$ 28,775.75

5.6.3. Κόστος κτήσης απαιτούμενου όγκου βαφής αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων

Η κτήση της απαιτούμενης ποσότητας βαφής για την τοποθέτηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, αποτελεί την κυρίαρχη συνιστώσα του συνολικού κόστους δεξαμενισμού. Βασική προϋπόθεση για την εκτίμηση του κόστους κτήσης αποτελεί πρωταρχικά ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας βαφής, η οποία αποτελεί συνάρτηση του πάχους, και του αριθμού επιστρώσεων του αντιρρυπαντικού επιστρώματος που τοποθετείται.

Το πάχος και ο αριθμός των επιστρώσεων διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος, την επιδιωκόμενη ενεργό διάρκεια ζωής της επικάλυψης, την περιοχή εφαρμογής επί της γάστρας (vertical sides ή flat bottom) καθώς και το εμπορικό προφίλ του

πλοίου. Μετά από επικοινωνία με τεχνικό εκπρόσωπο της εταιρίας HEMPEL προέκυψαν οι τελικές τιμές του πάχους και του αριθμού επιστρώσεων για κάθε τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος, για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου. Επισημαίνεται ότι, τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα αντιστοιχούν σε ενεργό διάρκεια ζωής 36 μηνών για τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα CDP και Hybrid, και σε 60 μήνες στην περίπτωση των SPC και Fouling Release, προκειμένου να διατηρηθεί αντιστοιχία με τα διαθέσιμα διαγράμματα αποδοτικότητας που έχουν χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της πρόσθετης κατανάλωσης καυσίμου στην παράγραφο 5.3.

Πίνακας 18: Πάχος και αριθμός στρώσεων για κάθε τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος.

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Flat Bottom	Vertical Sides
CDP	1 x 100 μm	1 x 80 μm 1 x 80 μm
Hybrid	1 x 100 μm	1 x 80 μm 1x 80 μm
SPC	1 x 80 μm 1 x 80 μm	1 x 130 μm 1 x 140 μm
Fouling Release tie coat	1 x 100 μm	1 x 100 μm
Fouling Release	1 x 150 μm	1 x 150 μm

Με βάση το ξηρό πάχος κάθε επίστρωσης (dry film thickness - DFT) και τον όγκο στερεών (volume solids - VS) κάθε τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος είναι δυνατό να υπολογιστεί η θεωρητική τους επικαλυπτικότητα (theoretical spreading rate – TSR), η οποία εκφράζει την έκταση επιφάνειας που καλύπτεται ανά μονάδα όγκου βαφής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$TSR = \frac{10 \cdot VS}{SF \cdot DFT} \left[\frac{m^2}{lt} \right]$$

Η παραπάνω σχέση περιλαμβάνει συντελεστή ασφαλείας (safety factor – SF) για τυχόν απώλειες ποσότητας βαφής κατά τη διαδικασία τοποθέτησης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, που οφείλεται στις μη ιδανικές (εργαστηριακές) συνθήκες βαφής της δεξαμενής. Ο συντελεστής ασφαλείας έχει προκύψει εμπειρικά και λαμβάνεται ίσος με 0.7 από όλες τις εταιρίες παραγωγής και προμήθειας αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.

Πίνακας 19: Θεωρητική επικαλυπτικότητα ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Flat Bottom TSR [m ² /lt]	Vertical Sides TSR [m ² /lt]
CDP	4.48	5.60
Hybrid	4.06	5.08
SPC	5.08	3.01
Foul Release Tie Coat	3.99	3.99
Foul Release	3.27	3.27

Γνωρίζοντας την έκταση της επιφάνειας των flat bottom και vertical sides, προκύπτουν οι τελικές απαιτούμενες ποσότητες βαφής, πολλαπλασιάζοντας τις με τη θεωρητική επικαλυπτικότητα κάθε αντιρρυπαντικού επιστρώματος. Επισημαίνεται ότι στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρείται ότι σε κάθε δεξαμενισμό γίνεται πλήρης επανατοποθέτηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Το γεγονός αυτό δεν είναι πάντοτε αληθές, καθώς πολλές φορές απαιτείται μόνο η μερική πλήρωση τους (topping up), ιδίως στην περίπτωση των επιστρωμάτων τύπου SPC και Foul Release. Ωστόσο, ελλείψει στοιχείων για τους τυπικούς βαθμούς πλήρωσης που απαιτούνται συναρτήσει του χρόνου μεταξύ των δεξαμενισμών, πραγματοποιήθηκε η ανωτέρω παραδοχή.

Οι τιμές ανά μονάδα όγκου κάθε διαφορετικής αντιρρυπαντικής τεχνολογίας λήφθηκαν με αντίστοιχα στοιχεία που παρείχε ο τεχνικός αντιπρόσωπος της εταιρίας HEMPEL, για προμήθεια από την μεγαλύτερη παγκόσμια αγορά της Κίνας. Θεωρείται ότι στα πλαίσια του ανταγωνισμού οι τιμές ανά μονάδα όγκου δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών προμηθευτών σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Τέλος, επισημαίνεται ότι το παρακάτω αναφερόμενο κόστος κτήσης ανά μονάδα όγκου, αφορά τιμές καταλόγου και όχι ειδική προσφορά στα πλαίσια συνεργασίας του προμηθευτή υφαλοχρωμάτων με την πλοιοκτήτρια εταιρεία του υπό μελέτη πλοίου.

Πίνακας 20: Συνολικό κόστος κτήσης απαιτούμενης βαφής ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Όγκος βαφής [lt]	Κόστος κτήσης ανά μονάδα [\$ /lt]	Συνολικό κόστος κτήσης βαφής [\$]
CDP	3623.21	\$ 15.00	\$ 54,348.21
Hybrid	3998.03	\$ 19.00	\$ 75,962.56
SPC	6674.26	\$ 25.00	\$ 166,856.53
Foul Release Tie Coat	2858.40	\$ 35.00	\$ 100,043.86
Foul Release	3491.33	\$ 65.00	\$ 226,936.22

5.6.4. Συνολικό κόστος δεξαμενισμού ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Ο Πίνακας 21 συνοψίζει το συνολικό κόστος δεξαμενισμού που σχετίζεται με τη συντήρηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, για τις τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες και τα τρία σενάρια αμμοβολής που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 21: Συνολικό κόστος δεξαμενισμού ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Καμία αμμοβολή	Spot αμμοβολή	Πλήρης αμμοβολή
CDP	\$ 125,000.00	\$ 158,631.75	\$ 262,018.00
Hybrid	\$ 146,614.34	\$ 180,246.09	\$ 283,632.34
SPC	\$ 238,916.49	\$ 272,548.24	\$ 375,934.49
Foul Release	\$ 404,814.42	\$ 443,302.17	\$ 541,832.42

Παραπάνω παρατηρείται η σημαντική επίδραση που ενέχει η εκτέλεση αμμοβολής στο συνολικό κόστος ενός δεξαμενισμού, με τη διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων σεναρίων, πλήρους και μη εκτέλεσης αμμοβολής, να εκτιμάται περίπου σε 137 χιλ. \$.

5.7 Αποτελέσματα

Ο προσδιορισμός της σχετικής αποδοτικότητας των επιμέρους αντιρρυπαντικών τεχνολογιών συνδέεται με τη σύγκριση του πρόσθετου λειτουργικού κόστους που προκύπτει από την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και του πρόσθετου κόστους από την εφαρμογή και τη συντήρησή τους κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου.

Το συνολικό πρόσθετο λειτουργικό κόστος από την εφαρμογή κάθε τύπου αντιρρυπαντικού επιστρώματος προέκυψε μέσω του υπολογισμού και της άθροισης των δύο παραπάνω παραγόντων, για χρονική διάρκεια ίση με τη θεωρούμενη ενεργό ζωή του υπό μελέτη πλοίου. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των σχετικών υπολογισμών που έλαβαν χώρα στο υπολογιστικό φύλλο.

5.7.1. Κόστος πρόσθετης κατανάλωσης καυσίμου

Η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου έχει αθροιστικό αντίκτυπο στο λειτουργικό κόστος του πλοίου, καθώς οι απαιτήσεις ισχύος αυξάνουν διαρκώς με την πάροδο του χρόνου, λόγω της ανάπτυξης βιορύπανσης και φυσικής τραχύτητας στην επιφάνεια της γάστρας.

Τα οικονομικά αποτελέσματα ανά σενάριο περιοδικότητας δεξαμενισμών και εργασιών αμμοβολής της επιφάνειας της γάστρας αφορούν χρονικό διάστημα λειτουργίας 20 ετών (240 μηνών) και παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα για κάθε τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος. Με πράσινο χρώμα επισημαίνεται ο συνδυασμός σεναρίων που επιφέρει το μικρότερο δυνατό κόστος πρόσθετης κατανάλωσης καυσίμου για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.

Πίνακας 22: Πρόσθετο κόστος λόγω αύξησης κατανάλωσης καυσίμου ανά τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας

Τεχνολογία	Σενάριο	Πλήρης αμμοβολή	Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη	Spot αμμοβολή	Καμία αμμοβολή
CDP	1	\$ 18.666.441	\$ 20.854.234	\$ 22.915.845	\$ 26.378.699
	2	\$ 17.131.240	\$ 19.567.488	\$ 21.547.227	\$ 25.447.338
	3	\$ 15.389.370	\$ 18.096.960	\$ 19.759.108	\$ 24.515.978
	4	\$ 13.694.423	\$ 16.639.561	\$ 18.000.376	\$ 23.584.618
	5	\$ 12.244.912	\$ 15.354.225	\$ 16.650.331	\$ 22.653.257

Hybrid	1	\$ 15.888.942	\$ 17.875.167	\$ 19.760.010	\$ 22.954.603
	2	\$ 14.704.279	\$ 16.910.199	\$ 18.717.938	\$ 22.315.049
	3	\$ 13.334.623	\$ 15.780.096	\$ 17.292.847	\$ 21.675.495
	4	\$ 12.007.910	\$ 14.662.554	\$ 15.898.109	\$ 21.035.941
	5	\$ 10.903.689	\$ 13.703.094	\$ 14.879.271	\$ 20.396.387
SPC	1	\$ 12.262.983	\$ 14.035.115	\$ 15.730.062	\$ 18.632.877
	2	\$ 11.607.709	\$ 13.570.032	\$ 15.193.298	\$ 18.460.908
	3	\$ 10.789.914	\$ 12.959.387	\$ 14.312.700	\$ 18.288.939
	4	\$ 10.010.753	\$ 12.360.555	\$ 13.462.968	\$ 18.116.969
	5	\$ 9.429.734	\$ 11.904.607	\$ 12.953.424	\$ 17.945.000
Foul Release	1	\$ 5.743.774	\$ 6.286.102	\$ 6.833.404	\$ 7.850.370
	2	\$ 5.499.911	\$ 6.088.703	\$ 6.606.958	\$ 7.748.478
	3	\$ 5.210.858	\$ 5.850.894	\$ 6.271.606	\$ 7.646.586
	4	\$ 4.934.131	\$ 5.617.707	\$ 5.954.532	\$ 7.544.694
	5	\$ 4.717.040	\$ 5.431.800	\$ 5.751.050	\$ 7.442.802

Η χειρότερη επίδοση, όσον αφορά τον τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας, σχετίζεται με τα επιστρώματα τύπου CDP, ενώ το χαμηλότερο πρόσθετο κόστος κατανάλωσης καυσίμου αποδίδεται στα επιστρώματα τύπου Foul Release. Αναφορικά με την περιοδικότητα των δεξαμενισμών, για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων παρατηρείται εμφανής μείωση του κόστους κατανάλωσης καυσίμου, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των δεξαμενισμών υψηλότερης συχνότητας (30 μηνών). Ο τακτικότερος καθαρισμός της γάστρας από την συσσωρευόμενη βιορύπανση συνεπάγεται, ως επακόλουθο, μικρότερες ποσοστιαίες αυξήσεις των απαιτήσεων ισχύος, ως αποτέλεσμα των μικρότερων βαθμών βιορύπανσης που επιτυγχάνονται σε βάθος χρόνου. Τα μεγαλύτερα ποσοστιαία οικονομικά οφέλη από τη μετάβαση σε τακτικότερους δεξαμενισμούς, παρουσιάζουν τα επιστρώματα τύπου CDP και Hybrid. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στην μικρότερη ενεργό διάρκεια ζωής τους, που οδηγεί σε ραγδαία αύξηση της συσσωρευόμενης βιορύπανσης μετά το πέρας χρονικού διαστήματος λειτουργίας 36 μηνών.

Ο βαθμός προετοιμασίας της επιφάνειας της γάστρας, προτού γίνει η επανατοποθέτηση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, μεταβάλλει σημαντικά τα πιθανά αποκομίζοντα οικονομικά οφέλη από τη διεξαγωγή τακτικότερων δεξαμενισμών. Ενδεικτικά, στην περίπτωση πλήρους αμμοβολής της γάστρας, η ποσοστιαία μείωση του κόστους κυμαίνεται από 21,8 % έως 52,4% για μετάβαση από το 1^ο στο 5^ο σενάριο περιοδικότητας δεξαμενισμών, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση μη πραγματοποίησης αμμοβολής κυμαίνεται από 3,8% έως 16,5%, ανάλογα με τον τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αθροιστική επίδραση της αυξημένης φυσικής τραχύτητας, που προκύπτει από την φτωχότερη προετοιμασία της επιφάνειας της γάστρας.

5.7.2. Συνολικό κόστος συντήρησης ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Το συνολικό κόστος συντήρησης κάθε αντιρρυπαντικού επιστρώματος προέκυψε με προβολή του υπολογισθέντος κόστους δεξαμενισμού κάθε αντιρρυπαντικής τεχνολογίας στο σύνολο της διάρκειας ζωής του υπό μελέτης πλοίου, σύμφωνα με τον απαιτούμενο αριθμό δεξαμενισμών που απαιτεί κάθε σενάριο περιοδικότητας. Η μελλοντική προβολή του κόστους ενός δεξαμενισμού πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ετήσιο ποσοστό πληθωρισμού ίσο με 3%. Επισημαίνεται ότι, το αρχικό κόστος εφαρμογής των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων κατά τη ναυπήγηση του πλοίου δεν λαμβάνεται υπόψη, θεωρώντας ότι απορροφάται από το αρχικό κόστος ναυπήγησης.

Το συνολικό κόστος συντήρησης, συναρτήσει των διαφορετικών σεναρίων περιοδικότητας δεξαμενισμών και των διαφορετικών εργασιών προετοιμασίας της επιφάνειας, κάθε αντιρρυπαντικής τεχνολογίας παρουσιάζεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα. Με πράσινο χρώμα επισημαίνεται ο συνδυασμός σεναρίων που επιφέρει το μικρότερο δυνατό κόστος συντήρησης για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.

Πίνακας 23: Συνολικό κόστος δεξαμενισμών ανά τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας

Τεχνολογία	Σενάριο	Πλήρης αμμοβολή	Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη	Spot αμμοβολή	Καμία αμμοβολή
CDP	1	\$ 1.118.445	\$ 837.519	\$ 698.577	\$ 561.993
	2	\$ 1.557.969	\$ 1.103.617	\$ 964.675	\$ 771.675
	3	\$ 1.937.106	\$ 1.333.156	\$ 1.194.213	\$ 952.549
	4	\$ 2.264.153	\$ 1.531.158	\$ 1.392.215	\$ 1.108.572

	5	\$ 2.546.267	\$ 1.701.956	\$ 1.563.013	\$ 1.243.159
Hybrid	1	\$ 1.227.838	\$ 946.913	\$ 807.970	\$ 671.387
	2	\$ 1.703.619	\$ 1.249.268	\$ 1.110.326	\$ 917.326
	3	\$ 2.114.032	\$ 1.510.082	\$ 1.371.140	\$ 1.129.475
	4	\$ 2.468.058	\$ 1.735.063	\$ 1.596.120	\$ 1.312.477
	5	\$ 2.773.444	\$ 1.929.133	\$ 1.790.190	\$ 1.470.336
SPC	1	\$ 1.693.586	\$ 1.412.660	\$ 1.273.718	\$ 1.137.134
	2	\$ 2.324.200	\$ 1.869.848	\$ 1.730.906	\$ 1.537.906
	3	\$ 2.868.173	\$ 2.264.223	\$ 2.125.280	\$ 1.883.616
	4	\$ 3.337.409	\$ 2.604.414	\$ 2.465.471	\$ 2.181.828
	5	\$ 3.742.176	\$ 2.897.865	\$ 2.758.923	\$ 2.439.068
Foul Release	1	\$ 2.427.403	\$ 2.159.673	\$ 2.027.256	\$ 1.870.951
	2	\$ 3.336.304	\$ 2.903.293	\$ 2.770.877	\$ 2.550.010
	3	\$ 4.120.330	\$ 3.544.747	\$ 3.412.330	\$ 3.135.772
	4	\$ 4.796.637	\$ 4.098.070	\$ 3.965.654	\$ 3.641.056
	5	\$ 5.380.026	\$ 4.575.372	\$ 4.442.955	\$ 4.076.918

Αντιστρόφως με την προηγούμενη ενότητα, τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου CDP ενέχουν, συγκριτικά, το μικρότερο δυνατό κόστος συντήρησης (από 0.56 εκ. \$ έως 2.5 εκ. \$), ενώ αντίστοιχα το μεγαλύτερο κόστος εμφανίζεται στην περίπτωση εφαρμογής των επιστρωμάτων τύπου Foul Release (1.87 εκ. \$ έως 5.38 εκ. \$), με τις περιπτώσεις των Hybrid και SPC να ενέχουν ενδιάμεσο κόστος. Ο συχνότερος δεξαμενισμός έχει ως φυσικό επακόλουθο την αύξηση του κόστους συντήρησης, ενώ σε αντίστοιχο αποτέλεσμα οδηγεί επίσης η εκτέλεση υψηλότερης ποιότητας εργασιών αμμοβολής της επιφάνειας της γάστρας.

5.7.3. Συνολικό λειτουργικό κόστος ανά τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος

Το συνολικό λειτουργικό κόστος προκύπτει αθροίζοντας το πρόσθετο κόστος λόγω αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου με το κόστος συντήρησης για κάθε τύπο αντιρρυπαντικού επιστρώματος και παρουσιάζεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα, συναρτήσεως των

διαφορετικών σεναρίων περιοδικότητας δεξαμενισμών και αμμοβολής της επιφάνειας της γάστρας. Με πράσινο χρώμα επισημαίνεται ο συνδυασμός σεναρίων που επιφέρει το μικρότερο δυνατό συνολικό λειτουργικό κόστος για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.

Πίνακας 24: Συνολικό λειτουργικό κόστος ανά τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας

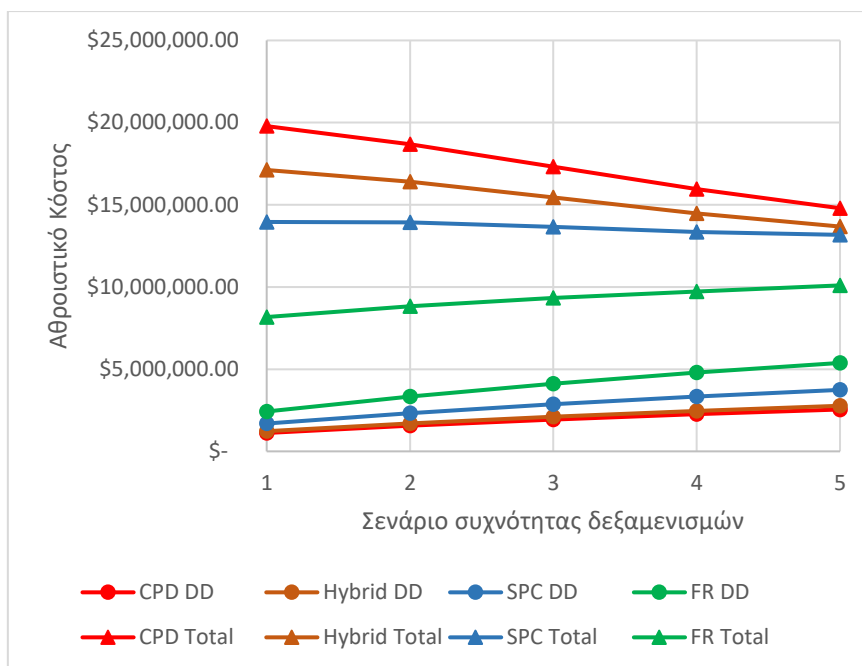
Τεχνολογία	Σενάριο Αμμοβολής	Σενάριο περιοδικότητας δεξαμενισμών				
		1	2	3	4	5
CDP	Πλήρης αμμοβολή	\$ 19.784.886	\$ 18.689.209	\$ 17.326.475	\$ 15.958.576	\$ 14.791.179
	Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη	\$ 21.691.754	\$ 20.671.106	\$ 19.430.116	\$ 18.170.719	\$ 17.056.181
	Spot αμμοβολή	\$ 23.614.422	\$ 22.511.901	\$ 20.953.321	\$ 19.392.591	\$ 18.213.345
	Καμία αμμοβολή	\$ 26.940.692	\$ 26.219.014	\$ 25.468.527	\$ 24.693.189	\$ 23.896.416
Hybrid	Πλήρης αμμοβολή	\$ 17.116.780	\$ 16.407.899	\$ 15.448.656	\$ 14.475.968	\$ 13.677.133
	Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη	\$ 18.822.080	\$ 18.159.467	\$ 17.290.178	\$ 16.397.616	\$ 15.632.227
	Spot αμμοβολή	\$ 20.567.981	\$ 19.828.263	\$ 18.663.987	\$ 17.494.229	\$ 16.669.462
	Καμία αμμοβολή	\$ 23.625.990	\$ 23.232.375	\$ 22.804.970	\$ 22.348.418	\$ 21.866.723
SPC	Πλήρης αμμοβολή	\$ 13.956.569	\$ 13.931.908	\$ 13.658.087	\$ 13.348.162	\$ 13.171.910
	Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη	\$ 15.447.776	\$ 15.439.881	\$ 15.223.610	\$ 14.964.969	\$ 14.802.472
	Spot αμμοβολή	\$ 17.003.780	\$ 16.924.203	\$ 16.437.981	\$ 15.928.439	\$ 15.712.346
	Καμία αμμοβολή	\$ 19.770.011	\$ 19.998.814	\$ 20.172.554	\$ 20.298.797	\$ 20.384.069
Foul Release	Πλήρης αμμοβολή	\$ 8.171.178	\$ 8.836.215	\$ 9.331.188	\$ 9.730.768	\$ 10.097.066
	Πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη	\$ 8.445.775	\$ 8.991.997	\$ 9.395.640	\$ 9.715.777	\$ 10.007.172
	Spot αμμοβολή	\$ 8.860.660	\$ 9.377.835	\$ 9.683.936	\$ 9.920.186	\$ 10.194.005
	Καμία αμμοβολή	\$ 9.721.322	\$ 10.298.488	\$ 10.782.358	\$ 11.185.750	\$ 11.519.720

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε βάθος 20ετίας δύναται να επιτευχθεί με εφαρμογή των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου Foul Release (8.17 εκ. \$), τα οποία παρότι έχουν το μεγαλύτερο κόστος συντήρησης, συγκριτικά με τα υπόλοιπα, μέσω της περιορισμένης φθοράς τους και της εξασφάλισης χαμηλών βαθμών βιορύπανσης, οδηγούν σε χαμηλότερη ποσοστιαία αύξηση των απαιτήσεων ισχύος πρόωσης, που τελικά αντισταθμίζει το υψηλότερο κόστος δεξαμενισμών. Η αύξηση της συχνότητας δεξαμενισμών, με μετάβαση σε ολοένα και μεγαλύτερο αριθμό δεξαμενισμών ανά 2.5 έτη, οδηγεί σε αύξηση του συνολικού λειτουργικού κόστους για κάθε σενάριο αμμοβολής. Η τεχνολογία Foul Release έχει ενεργό διάρκεια ζωής 5 ετών και το υψηλό κόστος επανατοποθέτησης του επιστρώματος δεν ενδείκνυται για τακτικότερους δεξαμενισμούς. Ωστόσο, στην περίπτωση πλήρωσης (topping-up) του συγκεκριμένου τύπου επιστρωμάτων, τα οικονομικά αποτελέσματα ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά για διεξαγωγή συχνότερων δεξαμενισμών, αν και το παραπάνω σενάριο δεν λαμβάνεται υπόψη στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

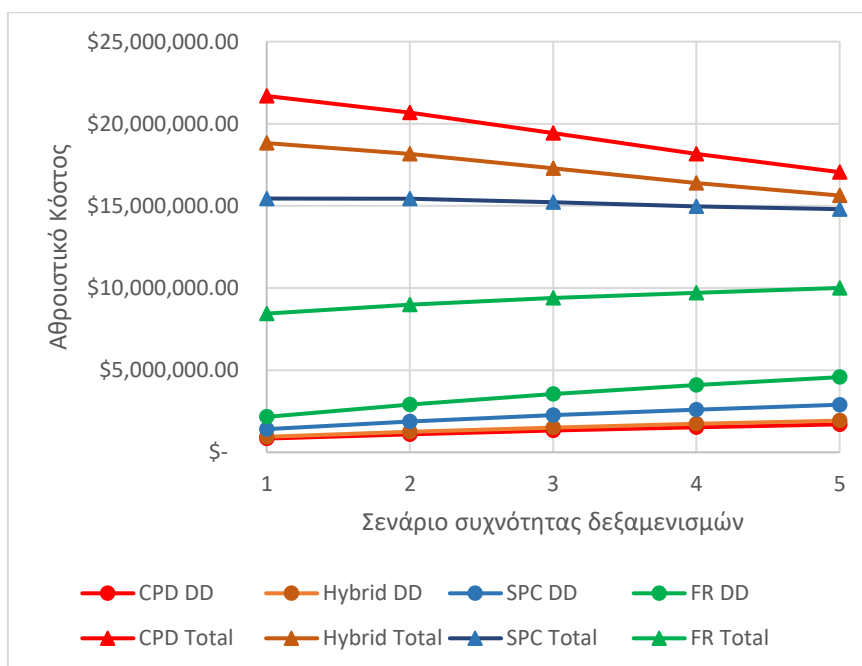
Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου SPC, επιτυγχάνουν το αμέσως επόμενο χαμηλότερο συνολικό λειτουργικό κόστος (13.17 εκ. \$). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η καμπύλη του συνολικού λειτουργικού κόστους παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στη μεταβολή της συχνότητας των δεξαμενισμών. Η τάση διαμορφώνεται σε μικρή μείωση του λειτουργικού κόστους καθώς αυξάνει η συχνότητα των δεξαμενισμών, με τη διαφορά μεταξύ των ακραίων σεναρίων να παραμένει ωστόσο πολύ μικρή. Το παραπάνω φαινόμενο αποδίδεται κυρίως στον υψηλότερο ρυθμό αύξησης της επιφανειακής τραχύτητας, συγκριτικά με τα επιστρώματα τύπου Foul Release, που οδηγεί σε μείωση του λειτουργικού κόστους, από την έστω και αποσπασματική αφαίρεση της σε τακτικότερα χρονικά διαστήματα, παρότι η ενεργός διάρκεια ζωής τους ορίζεται στα 5 έτη. Ο παραπάνω ισχυρισμός ενισχύεται περαιτέρω, παρατηρώντας ότι στην περίπτωση μη πραγματοποίησης αμμοβολής στην επιφάνεια της γάστρας, παρατηρείται αντίστροφη συμπεριφορά και μικρή αύξηση του λειτουργικού κόστους για αντίστοιχη αύξηση της συχνότητας δεξαμενισμών.

Αναφορικά με την περίπτωση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου CDP και Hybrid, εμφανίζεται το μεγαλύτερο συνολικό λειτουργικό κόστος (14.79 εκ. \$ και 13.67 εκ. \$ αντίστοιχα). Παρότι οι παραπάνω αντιρρυπαντικές τεχνολογίες έχουν σημαντικά μικρότερο κόστος συντήρησης από τα επιστρώματα SPC και Foul Release, ο υψηλός ρυθμός φθοράς τους σε συνδυασμό με τη χαμηλή αποδοτικότητα τους έναντι της βιορύπανσης αντισταθμίζουν τα πιθανά οικονομικά οφέλη των φθηνότερων δεξαμενισμών. Ωστόσο, παρατηρείται σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους καθώς αυξάνει η συχνότητα των

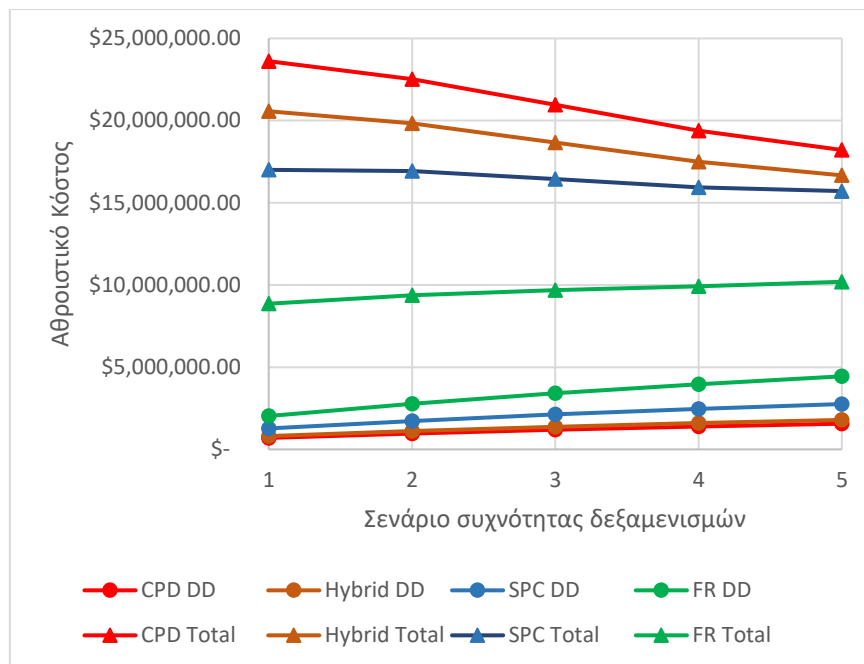
δεξαμενισμών, με την περίπτωση χρονικών διαστημάτων 2.5 ετών μεταξύ κάθε δεξαμενισμού να διαφέρει σημαντικά λιγότερα με τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου SPC, όσον αφορά στα οικονομικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό σχετίζεται κυρίως με την προαναφερθείσα χαμηλή ενεργό διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων επιστρωμάτων, που τα καταστούν ακατάλληλα για χρονικό διάστημα μεταξύ δεξαμενισμών άνω των 36 μηνών.



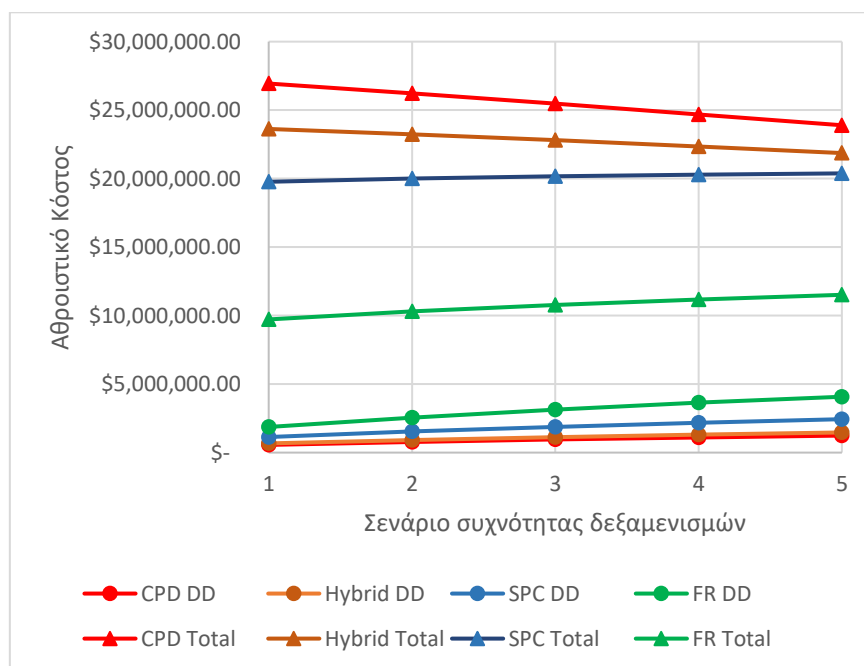
Διάγραμμα 12: Σύγκριση συνολικού λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (πλήρης αμμοβολή σε κάθε δεξαμενισμό)



Διάγραμμα 13: Σύγκριση συνολικού λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (πλήρης αμμοβολή στα 10 έτη και spot αμμοβολές στους λοιπούς δεξαμενισμούς)



Διάγραμμα 14: Σύγκριση συνολικού λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (spot αμμοβολή σε κάθε δεξαμενισμό)



Διάγραμμα 15: Σύγκριση συνολικού λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης για κάθε τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (Καμία αμμοβολή)

Στα παραπάνω διαγράμματα διακρίνεται η εξέλιξη του συνολικού λειτουργικού κόστους και του κόστους συντήρησης, συναρτήσει της συχνότητας δεξαμενισμών κάθε τύπου αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων για τα διαφορετικά σενάρια αμμοβολής στη γάστρα του πλοίου. Η εκτέλεση αμμοβολής αυξάνει σημαντικά το κόστος ενός δεξαμενισμού, που κυμαίνεται από 33.6 χιλ. \$ στην περίπτωση αποσπασματικής αμμοβολής έως 137 χιλ.\$ για την περίπτωση πλήρους αμμοβολής. Ωστόσο, όπως παρατηρείται από την ανάλυση των

παραπάνω διαγραμμάτων, ο αντίκτυπος της εκτέλεσης αμμοβολής στο συνολικό λειτουργικό κόστος, μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου από τον περιορισμό της επίδρασης της φυσικής τραχύτητας, αντισταθμίζει κατά πολύ το πρόσθετο κόστος που επιβάλλεται κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου. Ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ελάχιστη διαφορά του πρόσθετου λειτουργικού κόστους και του κόστους συντήρησης για τα δύο ακραία σενάρια, πλήρους αμμοβολής της γάστρας σε κάθε δεξαμενισμό και μη εκτέλεσης αμμοβολής.

Πίνακας 25: Διαφορά συνολικού λειτουργικού κόστους και συνολικού κόστους συντήρησης μεταξύ των σεναρίων πλήρους αμμοβολής και καμίας αμμοβολής

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Διαφορά λειτουργικού κόστους (Full blast – No blast)	Διαφορά κόστους συντήρησης (Full blast – No blast)
CDP	\$ 9,105,237	\$ 1,303,108
Hybrid	\$ 8,189,590	\$ 1,303,108
SPC	\$ 6,610,212	\$ 1,303,108
Foul Release	\$ 1,550,144	\$ 556,452

Ο Πίνακας 26 παρουσιάζει τη διαφορά στο συνολικό κόστος λειτουργίας και στο κόστος συντήρησης για τον βέλτιστο συνδυασμό σεναρίων περιοδικότητας δεξαμενισμών και εργασιών αμμοβολής των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου Hybrid, SPC και Foul Release, συγκριτικά με την αντιρρυπαντική τεχνολογία CDP, που έχει την χειρότερη επίδοση και ορίζεται ως βάση αναφοράς. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι σε βάθος 20ετίας η εξοικονόμηση πόρων δύναται να ανέλθει έως και 44,76% με την εφαρμογή αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου Foul Release έναντι CDP, ενώ επιτυγχάνεται και αντίστοιχη μείωση του συνολικού κόστους συντήρησης κατά 4.67%, αφού στην περίπτωση των Foul Release έχουμε ελάχιστο κόστος για δεξαμενισμό ανά 5 έτη (1° Σενάριο Περιοδικότητας), σε αντίθεση με τα CDP που ελαχιστοποιούν το κόστος τους για δεξαμενισμό ανά 2.5 έτη (5° Σενάριο Περιοδικότητας).

Πίνακας 26: Συγκριτική απόδοση αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων Hybrid, SPC και Foul Release έναντι των CDP σε βάθος 20ετίας

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Διαφορά λειτουργικού κόστους (έναντι CDP)	Διαφορά κόστους συντήρησης (έναντι CDP)
Hybrid	-7,53%	8,92%
SPC	-10,95%	46,97%
Foul Release	-44,76%	-4,67%

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού τμήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας υποδεικνύουν ότι τα οφέλη από την εφαρμογή των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου Foul Release για ένα τυπικό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι σημαντικά

μεγαλύτερα συγκριτικά με τις υπόλοιπες αντιρρυπαντικές τεχνολογίες. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, τα Fouling Release καταλαμβάνουν αρκετά μικρότερο μερίδιο της αγοράς (προσεγγιστικά 20% σύμφωνα με τεχνικό αντιπρόσωπο της εταιρίας HEMPEL), ιδίως σε σύγκριση με την περίπτωση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου SPC. Οι παράγοντες που οδηγούν σε περιορισμό της χρήσης των επιστρωμάτων τύπου Foul Release είναι κυρίως οι εξής:

- Ο λόγος των απαιτούμενων δαπανών δεξαμενισμού προς το συνολικό λειτουργικό κόστος, είναι συγκριτικά ο υψηλότερος και κυμαίνεται από 30% έως 56% ανάλογα με τη συχνότητα των δεξαμενισμών (Πίνακας 27 και Πίνακας 28). Οι δαπάνες για την πραγματοποίηση ενός δεξαμενισμού είναι άμεσες και απαιτούν μεγάλη ρευστότητα, σε αντίθεση με το κόστος λόγω αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου που επιμερίζεται σε βάθος χρόνου. Η τάση πολλών ναυτιλιακών εταιριών διαμορφώνεται στην αποφυγή δαπάνης μεγάλου μέρους της ρευστότητας τους σε σύντομο χρονικό διάστημα και επομένως πολλές φορές προτιμάται η μείωση του κόστους των δεξαμενισμών, ακόμη και αν κάτι τέτοιο δύναται μακροπρόθεσμα να έχει αρνητικό αντίκτυπο στα λειτουργικά έξοδα ενός πλοίου.
- Η ναυλαγορά των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ενέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, καθώς παρουσιάζει σημαντική αστάθεια με την πάροδο του χρόνου. Η αβεβαιότητα αυτή μεταφράζεται σε σημαντικό ρίσκο για τις ναυτιλιακές εταιρείες, όπου η πιθανή επένδυση σε αντιρρυπαντικά επιστρώματα υψηλού κόστους συντήρησης, ενδεχομένως να μην αποδώσει μακροπρόθεσμα τα προσδοκώμενα οικονομικά οφέλη στην διαμορφούμενη τιμή των ναύλων του πλοίου, ώστε να αντισταθμιστεί το επιπλέον κόστος των δεξαμενισμών. Παράλληλα, το ρίσκο μίας μεγάλης επένδυσης αυξάνει σημαντικά λόγω μελλοντικού κινδύνου το πλοίο να παραμείνει άνευ ναύλου (off-hire), καταστρέφοντας την σχετική επένδυση. Σε αντιδιαστολή, ωστόσο, ένα πλοίο με υψηλότερης ποιότητας αντιρρυπαντικά επιστρώματα αναμένεται να ναυλωθεί συγκριτικά ευκολότερα.
- Η ηλικία του πλοίου διαδραματίζει εξίσου καθοριστικό παράγοντα, καθώς νεότευκτα πλοία με υψηλής ποιότητας αντιρρυπαντικά επιστρώματα διαθέτουν μειωμένο ρίσκο όσον αφορά την εισαγωγή τους στη ναυλαγορά.
- Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τυπικά ελλιμενίζονται σε πολύ τακτικά χρονικά διαστήματα. Το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά τη πιθανότητα μηχανικής καταπόνησης της γάστρας από απρόοπτα χτυπήματα ρυμουλκών, σχοινιών, άγκυρας κτλ. που δύνανται να καταστρέψουν την επιφάνεια των αντιρρυπαντικών

επιστρωμάτων, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ζημία στην περίπτωση εφαρμογής επιστρωμάτων τύπου Foul Release, που ενέχουν το μεγαλύτερο ύψος επένδυσης.

Πίνακας 27: Σύγκριση κόστους συντήρησης ως ποσοστό του συνολικού λειτουργικού κόστους για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων (1° Σενάριο Περιοδικότητας)

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Συνολικό Λειτουργικό Κόστος	Επένδυση σε κόστος συντήρησης	Λόγος
CDP	\$ 19.784.886	\$ 1.118.445	6%
Hybrid	\$ 17.116.780	\$ 1.227.838	7%
SPC	\$ 13.956.569	\$ 1.693.586	12%
Foul Release	\$ 8.171.178	\$ 2.427.403	30%

Πίνακας 28: Σύγκριση κόστους συντήρησης ως ποσοστό του συνολικού λειτουργικού κόστους για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων (5° Σενάριο Περιοδικότητας)

Αντιρρυπαντική Τεχνολογία	Συνολικό Λειτουργικό Κόστος	Επένδυση σε κόστος συντήρησης	Λόγος
CDP	\$ 14.791.179	\$ 2.546.267	17%
Hybrid	\$ 13.677.133	\$ 2.773.444	20%
SPC	\$ 13.171.910	\$ 3.742.176	28%
Foul Release	\$ 10.097.066	\$ 5.380.026	53%

Οι παραπάνω παράγοντες συντελούν στον μετριασμό της χρήσης των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου Foul Release, αν και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις προσδίδουν τα μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη, όσον αφορά το συνολικό λειτουργικό κόστος.

Η περίπτωση των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου SPC, προκρίνεται έως σήμερα από τη ναυτιλιακή αγορά, ως η μέση λύση που συνδυάζει υψηλή αξιοπιστία, ισχυρή αντιρρυπαντική επίδοση, ενδιάμεσο κόστος δεξαμενισμών και χαμηλότερο, συγκριτικά, ρίσκο, καταλαμβάνοντας το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς. Οι περιπτώσεις των τεχνολογιών CDP και Hybrid εμφανίζουν περιορισμένη χρήση, κυρίως σε περιβάλλοντα χαμηλού ρίσκου βιορύπανσης και για πλοία μεγαλύτερης ηλικίας που συνήθως δεξαμενίζονται τακτικότερα.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε τη διερεύνηση της συγκριτικής αποδοτικότητας τεσσάρων διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων ενός υπαρκτού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, για τη θεωρούμενη ενεργό διάρκεια ζωής του υπό μελέτη πλοίου.

Η μελέτη βασίστηκε στη σύγκριση του συνολικού πρόσθετου λειτουργικού κόστους που προκύπτει από την εφαρμογή των διαφορετικών τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, για διαφορετικά σενάρια περιοδικότητας δεξαμενισμών και εργασιών αμμοβολής της γάστρας κατά τον δεξαμενισμό. Το συνολικό πρόσθετο λειτουργικό κόστος αποτέλεσε συνάρτηση δύο παραγόντων. Ο πρώτος, αφορά την συγκριτική αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, ως αποτέλεσμα των διαφορετικών βαθμών βιορύπανσης και μηχανικής φθοράς που εμφανίζουν οι διαφορετικές αντιρρυπαντικές τεχνολογίες σε βάθος χρόνου. Ο δεύτερος, αφορά το διαφορετικό κόστος εφαρμογής και συντήρησης κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου κάθε τύπου αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανωτέρω διαδικασία συνοψίζονται παρακάτω:

- Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου CDP και Hybrid εμφανίζουν την μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου σε βάθος χρόνου, ειδικά μετά από 36 μήνες συνεχόμενης λειτουργίας που υπερβαίνει τη μέγιστη ενεργό διάρκεια ζωής τους. Ενδιάμεση κατάσταση αποτελεί η τεχνολογία SPC, ενώ η ποσοστιαία αύξηση κατανάλωσης καυσίμου ελαχιστοποιείται για εφαρμογή των επιστρωμάτων τύπου Foul Release.
- Αναφορικά με το κόστος συντήρησης, τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου Foul Release απαιτούν την υψηλότερη επένδυση ανά δεξαμενισμό, με κλιμακωτή μείωση του αντίστοιχου κόστους για τους τύπους SPC, Hybrid και CDP.
- Η αύξηση της συχνότητας δεξαμενισμών, με μετάβαση από 5ετή περιοδικότητα σε δεξαμενισμό ανά 2.5 έτη, οδηγεί σε σημαντική μείωση του πρόσθετου λειτουργικού κόστους των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου CDP και Hybrid. Το πρόσθετο λειτουργικό κόστος των αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων τύπου SPC, εμφανίζει μικρή ευαισθησία στη μεταβολή της συχνότητας δεξαμενισμών, ενώ αντιθέτως στην περίπτωση των Foul Release το πρόσθετο λειτουργικό κόστος αυξάνει σημαντικά με μείωση της συχνότητας των δεξαμενισμών.
- Η εκτέλεση εργασιών υψηλότερης ποιότητας προετοιμασίας της γάστρας κατά τον δεξαμενισμό, έχει θετικό αντίκτυπο στο πρόσθετο λειτουργικό κόστος για όλους τους

τύπους αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων. Συγκεκριμένα, η εκτέλεση πλήρους αμμοβολής επιτυγχάνει το ελάχιστο πρόσθετο λειτουργικό κόστος, με τη μετάβαση από τα ενδιάμεσα σενάρια προς στην ακραία περίπτωση μη εκτέλεσης αμμοβολής, να οδηγεί σε κλιμακωτή αύξηση του πρόσθετου λειτουργικού κόστους. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το υψηλό κόστος εκτέλεσης μίας πλήρους αμμοβολής, αντισταθμίζεται από τη δραστική μείωση της φυσικής τραχύτητας της επιφάνειας και της αθροιστικής επίδρασης που έχει αυτή στην κατανάλωση καυσίμου σε βάθος χρόνου.

- Το μικρότερο συνολικό πρόσθετο λειτουργικό κόστος σε βάθος 20ετίας εμφανίζουν τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα Foul Release (8.17 εκ. \$), για πλήρη αμμοβολή της γάστρας και συχνότητα δεξαμενισμών ανά 5 έτη. Ακολουθούν με σειρά αποδοτικότητας, τα SPC (13.17 εκ. \$), τα Hybrid (13.63 εκ. \$) και τελευταία τα CDP (14.78 εκ. \$) για πλήρη αμμοβολή της γάστρας και συχνότητα δεξαμενισμών ανά 2.5 έτη.
- Παρότι τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου Foul Release εμφανίζουν την υψηλότερη συγκριτική αποδοτικότητα, ταυτόχρονα ενέχουν και το μεγαλύτερο ρίσκο εφαρμογής. Το υψηλό κόστος επένδυσης που απαιτούν, αυξάνει σημαντικά το ρίσκο και περιορίζει σημαντικά τη χρήση τους, για λόγους ρευστότητας των ναυτιλιακών εταιριών, αβεβαιότητας της ναυλαγοράς των containerships και πιθανής πρώιμης φθοράς τους λόγω μηχανικής καταπόνησης, που ενδεχομένως να καταστρέψει την επένδυση.
- Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου SPC εμφανίζουν ενδιάμεσο λειτουργικό κόστος (13.17 εκ. \$), υψηλή αποδοτικότητα και αξιοπιστία και καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.
- Τα αντιρρυπαντικά επιστρώματα τύπου CDP και Hybrid ενδείκνυνται κυρίως για πλοία που δραστηριοποιούνται σε περιβάλλοντα χαμηλού ρίσκου βιορύπανσης, είτε για πλοία μεγαλύτερης ηλικίας που τείνουν να ελαχιστοποιήσουν το απαιτούμενο κόστος επένδυσης.
- Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επισημαίνεται ότι ελλείπει περαιτέρω στοιχεία, η εκτίμηση της αποδοτικότητας των τεσσάρων τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων έχει στηριχθεί σε στοιχεία ενός μόνο προμηθευτή (International Paints Ltd.), γεγονός που περιορίζει την πληρότητα των αποτελεσμάτων.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη βάση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ως πεδία περαιτέρω έρευνας προτείνονται τα εξής:

- Διερεύνηση της συγκριτικής αποδοτικότητας των τεσσάρων παραπάνω τύπων αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων για πλοία διαφορετικού τύπου, μεγέθους, εμπορικού προφίλ και γεωγραφικού πεδίου δραστηριότητας, αξιοποιώντας στοιχεία από το σύνολο των προμηθευτών αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων.
- Εκπόνηση μελέτης εκτίμησης ρίσκου (risk assessment) για κάθε τύπο αντιρρυπαντικών επιστρωμάτων, αναφορικά με το ύψος της απαιτούμενης επένδυσης για εφαρμογή και συντήρηση τους και τον κίνδυνο από την αβεβαιότητα της ναυλαγοράς ή την πιθανότητα πρόωμης αλλοίωσης τους λόγω μηχανικής καταπόνησης.

Παραρτήματα

Παράρτημα 1^ο - Ερωτηματολόγιο

- Ποιοι είναι οι κύριοι τύποι υφαλοχρωμάτων αυτή την εποχή;
.....
.....
- Ποια είναι τα βασικά κριτήρια επιλογής χρώματος;
.....
.....
- Ποιες είναι οι αρχές λειτουργίας κάθε τύπου;
.....
.....
- Πώς έχουν επηρεάσει οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί την αγορά και πώς προβλέπετε να εξελίσσεται αυτό το φαινόμενο;
.....
.....
- Πώς διαφοροποιούνται οι τύποι βαφών ανάλογα με τους τύπους πλοίων (χωρητικότητα, ταχύτητα, εμπόρευμα);
.....
.....
- Ποιες οι κύριες αιτίες ανάπτυξης ρύπανσης στη γάστρα ενώ το χρώμα είναι ακόμα "ενεργό";
.....
.....
- Πώς κινείται η αγορά στα υφαλοχρώματα έλικας;
.....
.....
- Η συνήθης τακτική του καθαρισμού της έλικας στα λιμάνια και η αποφυγή βαφής της, οικονομοτεχνικά πιστεύετε πως είναι λιγότερο αποδοτική;
.....
.....

- Ποιο σύστημα προστασίας της εταιρείας σας έχει τη μεγαλύτερη ζήτηση και ποιο είναι το μερίδιο ανά τύπο στην αγορά;

.....
.....

- Υπάρχουν διαφοροποιήσεις στον τύπο βαφής ανάλογα με τις κλιματικές ζώνες που κινείται το πλοίο;

.....
.....

- Εάν ένα πλοίο έχει ναύλους τέτοιους ώστε να προκύπτει διαδρομή από ποικίλες κλιματικές ζώνες, τι τύπο βαφής προτιμάτε;

.....
.....

- Ποιος είναι ο απαιτούμενος χρόνος εγκατάστασης καθενός συστήματος προστασίας σε ένα δεξαμενισμό ανά τετραγωνικό στρέμμα;

.....
.....

- Μπορεί να επηρεάσει ο χρόνος που απαιτείται για την τοποθέτηση ενός υφαλοχρώματος στο δεξαμενισμό, τον τύπο υφαλοχρώματος που θα χρησιμοποιηθεί;

.....
.....

- Από τα δεδομένα σας πιστεύετε ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο δεξαμενισμών επηρεάζεται από τη λήξη λειτουργίας της προηγούμενης βαφής (ή κυρίως από τους διεθνείς κανονισμούς που αφορούν άλλους παράγοντες);

.....
.....

- Ενδεικτικές τιμές κύριων υφαλοχρωμάτων, βαφών έλικας, απλών και ειδικών βαφών για χώρους ενδιαίτησης, δεξαμενών και αμπαριών καθώς και βαφών εξάλλων ανά τετραγωνικό στρέμμα.

.....
.....

Βιβλιογραφία

- [1] G. Jones, «The battle against marine biofouling: a historical review,» σε *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, 2009, pp. 19-45.
- [2] C. Bressy και M. Lejars, «Marine Fouling: An Overview,» *Journal of Ocean Technology*, τόμ. 9, αρ. 4, pp. 19-28, 2014.
- [3] L. D. Chambers, K. R. Stokes, F. C. Walsh και R. K. Wood, «Modern approaches to marine antifouling coatings,» *Surface & Coatings Technology*, August 2006.
- [4] P. A. Vinagre, T. Simas, E. Cruz, E. Pinori και J. Svenson, «Marine biofouling: A European Database for the Marine Renewable Energy Sector,» *Journal of Marine Science and Engineering*, αρ. 8, 2020.
- [5] S. A. Alghamdi και R. A. Quijada Cordova, «The impact of biofouling on marine environment : a qualitative review of the current antifouling technologies,» *World Maritime University Dissertations*, αρ. 1201, 2019.
- [6] A. Clare, D. Rittschof, D. Gerhart και J. Maki, «Molecular approaches to nontoxic antifouling,» *Invertebrate Reproduction & Development*, αρ. 22, pp. 67-76, 1992.
- [7] D. Rittschof, «Research on practical environmentally benign antifouling coatings,» *Biofouling*, pp. 396-409, 2010.
- [8] M. Atlar, «An update on marine antifouling,» σε *25th ITTC Group Discussions 3 - Global Warming and Impact on ITTC Activities*, Fukuoka, 2008.
- [9] Naval Ships' Technical Manual , *Waterborne Underwater Hull Cleaning of Navy Ships*, Naval Sea Systems Command, 2006.
- [10] Ε. Πρίονας, «Μελέτη αντιρρυπαντικών συστημάτων επίστρωσης σε υπόστρωμα ναυπηγικού χάλυβα έπειτα από εφαρμογή δοκιμών γήρανσης,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2015.
- [11] G. W. Swain, B. Kovach, A. Touzot, F. Casse και C. J. Kavanagh, «Measuring the performance of today's antifouling coatings,» 2006.
- [12] International Marine Coatings, «Hull Roughness Penalty Calculator,» Akzo Nobel, 2004.
- [13] T. Munk , D. Kane και D. M. Yebra, «The effects of corrosion and fouling on the performance of ocean-going vessels: a naval architecture perspective,» *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, pp. 148-176, 2009.
- [14] M. P. Schultz, «Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering,» *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, τόμ. 23, αρ. 5, pp. 331-341, 2007.

- [15] R. L. Townsin, «The Ship Hull Fouling Penalty,» *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, αρ. 19, pp. 9-15, 2003.
- [16] R. L. Townsin, «Workshop - Calculating the Cost of Marine Surface Roughness on Ship Performance,» σε *WEGEMT School on Marine Coating at the University of Plymouth, UK*, 2000.
- [17] A. Lewkowicz και D. K. Das, «Turbulent boundary layers on rough surfaces with and without a pliable overlay: a simulation of marine fouling,» *Shipbuilding Prog*, αρ. 33, pp. 174-185, 1986.
- [18] M. P. Schultz, «Turbulent boundary layers on surfaces covered with filamentous algae,» *Fluids Eng*, αρ. 122, pp. 357-363, 2000.
- [19] M. P. Schultz και K. A. Flack, «The rough-wall turbulent boundary layer from the hydraulically smooth to the fully rough regime,» *Fluid Mech*, αρ. 580, pp. 381-405, 2007.
- [20] M. A. Schockling, J. J. Allen και A. J. Smits, «Roughness effects in turbulent pipe flow,» *Fluid Mech*, αρ. 564, pp. 267-285, 2006.
- [21] K. A. Dafforn, J. A. Lewis και E. L. Johnston, «Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation,» *Marine Pollution Bulletin*, αρ. 62, pp. 453-465, 2011.
- [22] Hydrex Group, «Comparing the progress of legislation and restriction regarding copper and other biocides with the TBT cycle,» *Quarterly Journal of Ship Hull Performance*, τόμ. 1, αρ. 4, pp. 18-22, 2011.
- [23] S. Brooks και M. Waldock, «The use of copper as a biocide in marine antifouling paints,» σε *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, 2009, pp. 492-521.
- [24] C. Bressy, A. Margailan, F. Fay, I. Linossier και K. Rehel, «Tin-free self-polishing marine antifouling coatings,» *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, pp. 445-491, 2009.
- [25] J. Jones-Meehan, J. Cella, J. Montemarano, G. Swain, D. Wiebe, A. Meyer και R. E. Baier, «Advanced Nontoxic Fouling Release Coatings,» Naval Research Laboratory, Washington, DC, 1999.
- [26] M. Candries και C. D. Anderson, «Foul Release Systems and Drag,» σε *Proceedings of the PCE Conference*, Antwerp, 2001.
- [27] M. Candries και C. D. Anderson, «Estimating the impact of new-generation antifouling on ship performance: the presence of slime,» *Journal of Marine Engineering and Technology*, αρ. 2, pp. 13-22, 2003.
- [28] H. Peng, X. Qingyi, M. Chunfeng και Z. Guangzhao, «Silicone-Based Fouling-Release Coatings for Marine Antifouling,» *Langmuir*, τόμ. 36, pp. 2170-2183, 2020.

- [29] R. L. Townsin, D. Byrne, T. E. Svensen και A. Milne, «Fuel Economy due to improvements in Ships Hull Surface Condition 1976-1986,» *International Shipbuilding Progress*, αρ. 33, 1986.
- [30] P. A. Stenson, B. Kidd, H. L. Chen, A. A. Finnie και R. Ramsden, «Predicting the impact of hull roughness on the frictional resistance of ships,» σε *Advances in Computational and Experimental Marine Hydrodynamics*, 2014, pp. 44-51.
- [31] Δ. Μ. Απεσάκης, «Παρακολούθηση και βέλτιστοποίηση οικονομικής εκμετάλλευσης των bulk carriers,» Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- [32] Ship & Bunker, «World Bunker Prices,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://shipandbunker.com/prices>. [Πρόσβαση 2021].
- [33] International, «Underwater Hull | Marine Coatings,» AkzoNobel, 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.international-marine.com/vessel/underwater-hull>.
- [34] E. Almeida, T. C. Diamantino και O. De Sousa, «Marine paints: The particular case of antifouling paints,» *Progress in Organic Coatings*, pp. 2-20, 2007.