



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Μ.Π.Σ.: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)
Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας:
Επιβλέπων καθηγητής: Γιώργος Κύζας
Συν-Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Δήμητρα Χελά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διαχείριση αποβλήτων πλοίων: Επεξεργασία και αξιοποίηση στο
πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΡΟΒΟΛΗ
Α.Μ.: 156232

e-mail: std156232@ac.eap.gr
Ημερομηνία: 30 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το θεσμικό πλαίσιο, τις κατηγορίες παραγόμενων υγρών αποβλήτων των πλοίων καθώς και τις σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας τους, με στόχο την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας στη ναυτιλία.

Αρχικά μελετάται το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο, δίνοντας έμφαση στην οδηγία (ΕΕ) 2019/883 και στη Διεθνή Σύμβαση MARPOL 73/78. Κύριος στόχος της οδηγίας είναι η διασφάλιση τόσο της ασφάλειας όσο και της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τις απορρίψεις των παραγόμενων αποβλήτων από τα πλοία. Η οδηγία συμμορφώνεται πλήρως με τη διεθνή σύμβαση MARPOL, η οποία αποσκοπεί στην πρόληψη αλλά και στην ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, είτε αυτή προκύπτει από συνήθεις λειτουργικές δραστηριότητες είτε από ατυχή περιστατικά.

Η εφαρμογή της MARPOL επιτυγχάνεται μέσω έξι επιμέρους παραρτημάτων, στα οποία καθορίζονται οι βασικές κατηγορίες ρύπων που παράγονται στα πλοία. Οι κατηγορίες αυτές περιλαμβάνουν το πετρέλαιο, τις επιβλαβείς υγρές ουσίες (χύδην και μη), τα λύματα, τα απορρίμματα (όπως τρόφιμα, οικιακά και λειτουργικά απόβλητα) καθώς και τις ατμοσφαιρικές εκπομπές, ενώ παράλληλα προβλέπονται οι κατάλληλοι τρόποι με σκοπό τη σωστή διαχείρισή τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες κατηγορίες υγρών αποβλήτων των πλοίων. Σε αυτές ανήκουν τα γκριζα (grey water) και τα μαύρα ύδατα (black water), στα οποία περιέχονται κυρίως μικροοργανισμοί, μέταλλα και θρεπτικά συστατικά που ευθύνονται για τον ευτροφισμό. Για την επεξεργασία του συγκεκριμένου ρεύματος αποβλήτων χρησιμοποιείται το σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (sewage treatment plant) καθώς και προηγμένες μονάδες επεξεργασίας. Παράλληλά στα υγρά απόβλητα ανήκουν τα πετρελαιοειδή (νερά μηχανοστασίου - bilge water, υπολείμματα καθαρισμού δεξαμενών - slops, υπολείμματα καθαρισμού καυσίμων - sludge), που προέρχονται κυρίως από το μηχανοστάσιο και τις λειτουργίες του πλοίου και περιλαμβάνουν καύσιμα, λιπαντικά έλαια και υδρογονάνθρακες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επεξεργασία πετρελαιοειδών αποβλήτων, καθώς είναι απαραίτητη πριν την απόρριψη τους στο θαλάσσιο περιβάλλον για την αποφυγή ανεπιθύμητων περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Έπειτα αναλύονται οι βασικές διεργασίες επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε φυσικές, χημικές και βιολογικές. Στις φυσικές μεθόδους περιλαμβάνονται ο διαχωρισμός με βαρύτητα, το φιλτράρισμα καθώς και οι υδροκυκλώνες, ενώ στις χημικές ανήκουν οι ηλεκτροχημικές διεργασίες και η προσρόφηση. Οι βιολογικές τεχνολογίες, όπως η μικροβιακή βιοαποδόμηση και οι βιοαντιδραστήρες (MBR και MBBR), αξιοποιούν μικροοργανισμούς για την αποδόμηση των ρύπων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σύστημα διαχωρισμού πετρελαίου – νερού (Oil Water Separator – OWS), το οποίο συνδυάζει μεθόδους από τις παραπάνω τρεις κατηγορίες για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό του πετρελαίου από τα ύδατα σεντίνας (bilge water).

Τέλος, εξετάζεται η έννοια της κυκλικής οικονομίας στη ναυτιλία, η οποία στοχεύει στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων και στην αξιοποίησή τους ως πόρους, με σκοπό την ανάκτηση τους και την παραγωγή καυσίμου ή ενέργειας. Η εφαρμογή καινοτόμων διεργασιών, όπως πυρόλυση, καύση και αεριοποίηση καθώς και η συνεργασία μεταξύ πλοίων, λιμένων και εταιρειών διαχείρισης αποβλήτων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη βιώσιμη ανάπτυξη του ναυτιλιακού κλάδου.

Abstract

This thesis examines the regulatory framework, the categories of ship-generated liquid waste, and modern treatment technologies, aiming at the protection of the marine environment and the promotion of the circular economy in shipping.

Initially, the current legislative framework is analyzed, with emphasis on Directive (EU) 2019/883 and the International Convention MARPOL 73/78. The main objective of the Directive is to ensure both the safety of navigation and the protection of the marine environment from the discharge of waste generated by ships. The Directive is fully aligned with the MARPOL Convention, which aims at preventing and minimizing marine pollution, whether resulting from routine operational activities or accidental events.

The implementation of MARPOL is achieved through six annexes, which define the main categories of pollutants generated by ships. These include oil, noxious liquid substances (in bulk or packaged form), sewage, garbage (such as food waste, domestic and operational waste), and air pollution, along with the appropriate methods for their proper management.

Subsequently, the main categories of ship-generated liquid waste are presented. These include grey water and black water, which contain mainly microorganisms, metals, and nutrients responsible for eutrophication. For the treatment of this waste stream, sewage treatment plants are used, as well as advanced treatment units. In addition, oily wastes are included (bilge water, slops, and sludge), which originate mainly from the engine room and ship operations and contain fuels, lubricating oils, and hydrocarbons. Particular emphasis is placed on the treatment of oily wastes, as it is essential prior to their discharge into the marine environment in order to avoid adverse environmental impacts.

Furthermore, the main treatment processes for oily wastes are analyzed, which are classified into physical, chemical, and biological methods. Physical methods include gravity separation, filtration, and hydrocyclones, while chemical methods include electrochemical processes and adsorption. Biological technologies, such as microbial biodegradation and bioreactors (MBR and MBBR), utilize microorganisms for pollutant degradation. The Oil Water Separator (OWS) system is also presented, which

combines methods from all three categories for the effective separation of oil from bilge water.

Finally, the concept of the circular economy in shipping is examined, which aims to reduce waste generation and utilize waste as a resource for recovery and the production of fuel or energy. The application of innovative processes such as pyrolysis, incineration, and gasification, as well as cooperation between ships, ports, and waste management companies, are key prerequisites for the sustainable development of the maritime sector.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Abstract	3
Κατάλογος Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων.....	7
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	9
1.1 Καινοτομία της Εργασίας.....	10
1.2 Δομή και Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	10
1.3 Σκοπός και στόχος της Διπλωματικής Εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2: Νομοθεσία.....	12
2.1 ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2019/883.....	12
2.2 MARPOL 73/78	13
2.2.1 Παραρτήματα και κατηγορίες παραγόμενων αποβλήτων σύμφωνα με τη Διεθνή Σύμβαση MARPOL.....	13
Κεφάλαιο 3: Κατηγορίες υγρών αποβλήτων.....	21
3.1. Γκρι ύδατα (Grey water)	21
3.2 Μαύρα ύδατα (Black water).....	22
3.3 Πετρελαιοειδή απόβλητα	23
3.3.1. Νερά μηχανοστασίου (Bilge Water)	23
3.3.2. Υπολείμματα καθαρισμού δεξαμενών (slops).....	24
3.3.3 Υπολείμματα καθαρισμού καυσίμων (sludge)	25
Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία λυμάτων.....	26
4.1 Σύστημα επεξεργασίας λυμάτων - (Sewage Treatment Plant).....	26
4.1.1 Διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων.....	27
4.2 Προκλήσεις στην επεξεργασία λυμάτων επί του πλοίου.....	30
4.2.1 Υψηλή αλατότητα	30
4.2.2 Υψηλό οργανικό φορτίο	31
4.2.3 Χαμηλή σταθερότητα	31
4.3 Προηγμένες Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων	32
4.3.1 Βιοαντιδραστήρες με Μεμβράνες (Membrane Bioreactor - MBR)	32
4.3.2 Αντιδραστήρες βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (Moving Bed Biofilm Reactor - MBBR)	34
4.3.3 Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (Sequencing Batch Reactor – SBR).....	35
4.3.2 Υβριδικά Συστήματα	37
Κεφάλαιο 5: Τεχνολογίες επεξεργασίας πετρελαιοειδών.....	39

5.1 Φυσικές μέθοδοι.....	39
5.1.1 Διαχωρισμός με βαρύτητα.....	39
5.1.2 Διαχωρισμός με διήθηση.....	40
5.1.3 Υδρο-κυκλώνες.....	40
5.2 Χημικές μέθοδοι.....	41
5.2.1 Ηλεκτροχημικές Διεργασίες.....	41
5.2.2 Προσρόφηση.....	43
5.3 Βιολογικές μέθοδοι.....	44
5.3.1 Μέθοδος μικροβιακής βιοαποδόμησης.....	44
5.5 Συστήματα επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων - Συνδυασμός τεχνολογιών.....	51
5.5.1 Διαχωρισμός πετρελαίου-νερού (Oil Water Separator – OWS).....	51
Κεφάλαιο 6: Κυκλική Οικονομία και αξιοποίηση των πετρελαιοειδών αποβλήτων.....	56
6.1 Αρχές της κυκλικής οικονομίας στο ναυτιλιακό τομέα.....	56
6.2 Ο ρόλος του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης.....	57
6.3 Εφαρμογή βιωσιμότητας και κυκλικής οικονομίας σε λιμένες.....	61
6.3.1 Λιμένας Σιγκαπούρης.....	61
6.3.2 Λιμένες Ολλανδίας.....	62
6.3.3 Λιμένας Βαρκελώνης.....	66
6.4 Τεχνολογίες αξιοποίησης πετρελαιοειδών αποβλήτων.....	67
6.4.1 Αποτέφρωση (Incineration).....	68
6.4.2 Πυρόλυση (Pyrolysis).....	68
6.4.3 Αεριοποίηση (Gasification).....	70
6.4.4 Συνδυασμός μεθόδων.....	72
6.5 Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της κυκλικής οικονομίας στο κλάδο της ναυτιλίας.....	72
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΗΣ ΣΥΜΒΑΣΗΣ MARPOL 73/78 (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION)	14
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ (SEWAGE TREATMENT PLANT - STP) (MARINE PUBLIC, 2026)	30
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MBR (CHEN K. , 2025)	33
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MBBR (CHEN K. , 2025)	35
ΕΙΚΟΝΑ 5 : ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΠΕΝΤΕ ΣΤΑΔΙΩΝ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΔΙΑΛΕΙΠΟΝΤΟΣ ΕΡΓΟΥ (SBR)	37
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΛΑΔΙΟΥ-ΝΕΡΟΥ (OIL WATER SEPARATOR – OWS) (CHANDRASEKARAN, JAVAID, & SADIQ, 2021)	52
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ (Κ.Ο.)	57
ΕΙΚΟΝΑ 8: 17 ΣΤΟΧΟΙ ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION)	59
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΡΟΕΣ ΕΙΣΡΟΩΝ-ΕΚΡΟΩΝ ΚΑΙ ΚΥΚΛΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΤΗΣ EMR (PORT OF ROTTERDAM, 2026)	64
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΡΟΕΣ ΕΙΣΡΟΩΝ-ΕΚΡΟΩΝ ΚΑΙ ΚΥΚΛΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ (PORT OF ROTTERDAM, 2026)	65
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ REKO (PORT OF ROTTERDAM, 2026)	66

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ, ΧΗΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	50
---	----

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

IMO	International Maritime Organization
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
COD	Chemical Oxygen Demand
BOD	Biochemical Oxygen Demand
TSS	Total Suspended Solids
SS	Suspended Solids
MBR	Membrane Bioreactor
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor
MF	Microfiltration Membrane
UF	Ultrafiltration Membrane
EPS	Extracellular Polymeric Substances

OWS	Oil Water Separator
RO	Reverse Osmosis Membrane
SMP	Soluble Microbial Products
IMDG Code	International Maritime Dangerous Goods Code
TPHs	Total Petroleum Hydrocarbons
KO	Κυκλική Οικονομία
SDGs	Sustainable Development Goals
GHG	Greenhouse Gas
STP	Sewage Treatment Plant
BESS	Battery Energy Storage Systems
EMR	European Metal Recycling
E.E.	Ευρωπαϊκή Ένωση
HDPE	High Density Polyethylene
SBR	Sequencing Batch Reactor
SBBR	Sequencing Batch Biofilm Reactor

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί έναν ιδιαίτερα πολύπλοκο και πολυδιάστατο τομέα, ο οποίος σχετίζεται με τις θαλάσσιες δραστηριότητες όπως την κατασκευή, την επισκευή και την ανακύκλωση των πλοίων, τη μεταφορά και διακίνηση φορτίων, καθώς και ρυθμιστικές, τεχνικές, χρηματοοικονομικές και ασφαλιστικές δραστηριότητες (Agarwala, 2023). Όσον αφορά τη μεταφορά και τη διακίνηση φορτίων, η ναυτιλία έχει καταστεί ένα από τα σημαντικότερα μέσα μεταφοράς παγκοσμίως. Έχει αποδειχθεί ότι περίπου το 90% του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται μέσω πλοίων. Παράλληλα η ναυτιλία θεωρείται ένας από τους πιο φιλικούς προς το περιβάλλον τρόπους μεταφοράς συγκριτικά με άλλα μέσα. Παρ' όλα αυτά τα πλοία εξαιτίας της αυξημένης χρήσης τους, συμβάλλουν και αυτά στη ρύπανση του περιβάλλοντος τόσο στο θαλάσσιο περιβάλλον όσο και στην ατμόσφαιρα. Όσον αφορά το θαλάσσιο περιβάλλον, τα απόβλητα μπορεί να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα σε αυτό, καθώς οι τοξικές ουσίες που εμπεριέχονται στα παραγόμενα απόβλητα επηρεάζουν τους υδρόβιους οργανισμούς όπως επίσης υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού. Οι κυριότεροι ρύποι που ευθύνονται για τη ρύπανση είναι το πετρέλαιο, οι ατμοσφαιρικές εκπομπές, τα οικιακά λύματα καθώς και προϊόντα πλαστικών. Τα παραγόμενα αυτά απόβλητα πλοίων προκύπτουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας, πλοήγησης και ελλιμενισμού των πλοίων. Οι ποσότητες και οι κατηγορίες των αποβλήτων ποικίλλουν κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού όπως επίσης διαφέρουν ανάλογα με το τύπο των φορτίων που μεταφέρεται (Zhang, et al., 2021)..

Με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ελαχιστοποίηση των παραγόμενων αποβλήτων έχει διαμορφωθεί ένα ολοκληρωμένο νομοθετικό πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα έχει θεσπιστεί η Διεθνής Σύμβαση MARPOL 73/78 από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization – IMO) και η Οδηγία (ΕΕ) 2019/883, η οποία εναρμονίζεται με τις αρχές της MARPOL. Το διεθνές και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο, τα οποία αναλύονται στο κεφάλαιο 2, αποσκοπούν στην πρόληψη και στον περιορισμό της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία, μέσω ορθών μεθόδων διαχείρισης και επεξεργασίας τους.

Μέσα σε αυτό το ρυθμιστικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο, η ναυτιλιακή βιομηχανία στρέφεται σταδιακά προς την υιοθέτηση αρχών της κυκλικής οικονομίας,

αξιοποιώντας προσεγγίσεις όπως οικολογική οικονομία (π.χ. ανακύκλωση πλοίων μέσω διάλυσης), περιβαλλοντική οικονομία (απανθρακοποίηση για τον έλεγχο της ρύπανσης) και βιομηχανική οικολογία. Όσον αφορά τη τελευταία βασίζεται κυρίως στη συνεργασία μεταξύ λιμένων και βιομηχανικών μονάδων, ώστε τα απόβλητα να μην αντιμετωπίζονται μόνο ως απορρίμματα αλλά ως πόροι, οι οποίοι μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή νέων προϊόντων (Agarwala, 2023).

1.1 Καινοτομία της Εργασίας

Η καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας είναι ότι τα παραγόμενα απόβλητα των πλοίων και συγκεκριμένα τα πετρελαιοειδή απόβλητα δεν προσεγγίζονται ως ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα. Αντίθετα εξετάζεται το πως αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν με σκοπό να αποτελέσουν πόρους μέσα από τους οποίους να παραχθούν νέα προϊόντα, όπως εναλλακτικά καύσιμα ή ενέργεια.

Αυτό γίνεται με την παρουσίαση συγκεκριμένων τεχνολογιών και προτάσεων που μπορούν να υποστηρίξουν την ενεργειακή αξιοποίηση, την ανάκτηση καυσίμων και γενικότερα τη μετάβαση της ναυτιλίας σε ένα πιο κυκλικό και βιώσιμο μοντέλο λειτουργίας.

1.2 Δομή και Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Διαχείριση αποβλήτων πλοίων: Επεξεργασία και αξιοποίηση στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας» αποτελείται από επτά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό καθώς αναλύεται το αντικείμενο της εργασίας, ο σκοπός της όπως επίσης και η καινοτομία της. Στη συνέχεια περιγράφονται κάποιες σημαντικές νομοθεσίες, οι οποίες είναι η οδηγία (ΕΕ) 2019/883 και η σύμβαση MARPOL 73/78, όπως επίσης κατηγοριοποιούνται τα παραγόμενα απόβλητα των πλοίων όπως ορίζεται από τη σύμβαση MARPOL (Annexes I, II, IV, V and VI). Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τις κατηγορίες των υγρών αποβλήτων. Στο επόμενο κεφάλαιο μελετάται το σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (sewage treatment plant) και οι διεργασίες, οι οποίες πραγματοποιούνται σε αυτό. Στη συνέχεια, περιγράφονται και αναλύονται οι τεχνολογίες επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων, οι οποίες διακρίνονται σε φυσικές, χημικές αλλά και βιολογικές μεθόδους. Επιπλέον γίνεται λόγος για την κυκλική οικονομία και το τρόπο με τον οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στους λιμένες αλλά και στη διαχείριση των πετρελαιοειδών αποβλήτων. Ειδικότερα

παρουσιάζονται συγκεκριμένες πρακτικές που εφαρμόζονται σε διεθνείς λιμένες. Παράλληλα εξετάζονται οι τρόποι αξιοποίησης των αποβλήτων με στόχο την παραγωγή καυσίμων αλλά και την ενεργειακή τους αξιοποίηση. Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τόσο τα περιβαλλοντικά όσο και τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή των πρακτικών της κυκλικής οικονομίας στη ναυτιλία, αναδεικνύοντας τη συμβολή τους στη βιώσιμη ανάπτυξη και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τις προτάσεις που προκύπτουν από τη μελέτη καθώς και με τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.

1.3 Σκοπός και στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Η θαλάσσια ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα της εποχής μας. Διάφοροι ρύποι, όπως πετρέλαιο, λύματα, πλαστικά και επιβλαβείς χημικές ουσίες εισέρχονται στο θαλάσσιο περιβάλλον επηρεάζοντας τους θαλάσσιους οργανισμούς, τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία. Οι πηγές των θαλάσσιων απορριμμάτων είναι τόσο από τη στεριά όσο και από τη θάλασσα, όπως για παράδειγμα η παραγωγή αποβλήτων από πλοία. Για το λόγο αυτό έχει δημιουργηθεί η ανάγκη να γίνεται η διαχείριση των αποβλήτων με βιώσιμο τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι είναι σημαντικό να μειωθεί η παραγωγή των αποβλήτων αλλά να αυξηθεί η επαναχρησιμοποίησή τους, η ανακύκλωσή τους καθώς επίσης η αξιοποίησή τους παράγοντας άλλους πόρους, όπως ενέργεια ή εναλλακτικά καύσιμα (Kotrikla, Zavantias, & Kaloupi, 2021).

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική μελέτη των αποβλήτων που παράγονται στα πλοία. Ειδικότερα στην εργασία θα γίνει αναφορά σε όλες τις κατηγορίες των αποβλήτων που μπορούν να παραχθούν σε ένα πλοίο αλλά θα αναλυθούν κυρίως τα υγρά απόβλητα και συγκεκριμένα τα πετρελαιοειδή (bilge water, sludge, slops). Στη συνέχεια θα δοθεί έμφαση στις υφιστάμενες πρακτικές συλλογής, επεξεργασίας και διάθεσης των αποβλήτων αυτών. Παράλληλα θα εξεταστούν οι σύγχρονες τεχνολογίες με τις οποίες μπορεί να γίνει η επεξεργασία τους, η ανάκτηση τους και η ενεργειακή τους αξιοποίηση στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας. Ο τελικός στόχος της εργασίας θα είναι να αξιολογηθούν οι δυνατότητες μετάβασης από ένα γραμμικό μοντέλο διαχείρισης αποβλήτων σε ένα κυκλικό, με σκοπό να μειωθεί η ρύπανση, όπως επίσης να ενισχυθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα, η οποία θα συμβάλλει στη βιωσιμότητα της ναυτιλίας.

Κεφάλαιο 2: Νομοθεσία

2.1 ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2019/883

Η οδηγία (ΕΕ) 2019/883 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης προσαρμόστηκε στην Ελληνική Νομοθεσία στις 17 Απριλίου 2019 και αφορά τις λιμενικές εγκαταστάσεις παραλαβής αποβλήτων από πλοία. Η συγκεκριμένη οδηγία εφαρμόζεται σε όλα τα πλοία που καταπλέουν ή λειτουργούν σε λιμένες κρατών μελών της Ε.Ε., ανεξαρτήτως σημαίας. Από την οδηγία εξαιρούνται τα πολεμικά και βοηθητικά πλοία όπως επίσης πλοία που χρησιμοποιούνται από το κράτος για κυβερνητικούς μη εμπορικούς σκοπούς. Αντίστοιχα εφαρμόζεται σε όλους τους λιμένες των κρατών μελών, στους οποίους εξυπηρετούνται πλοία που υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας οδηγίας.

Η μελετώμενη οδηγία τροποποίησε την οδηγία 2010/65/ΕΕ και αντικατέστησε πλήρως την Οδηγία 2000/59/ΕΚ. Όσον αφορά την οδηγία 2000/59/ΕΚ, συνέβαλε στην αύξηση των αποβλήτων που παραδίδονταν σε λιμενικές εγκαταστάσεις παραλαβής και κατά συνέπεια στον περιορισμό της απορριπτόμενης ποσότητάς τους στη θάλασσα. Ωστόσο διαπιστώθηκε ότι δεν συμμορφωνόταν πλήρως με τη σύμβαση MARPOL με αποτέλεσμα να καθίσταται ως μη αποτελεσματική. Για το λόγο αυτό προέκυψε η ανάγκη να αντικατασταθεί πλήρως από την οδηγία 2019/883 με σκοπό την πλήρη εναρμόνιση της με την σύμβαση MARPOL.

Κύριος στόχος της ισχύουσας οδηγίας είναι να διασφαλιστεί τόσο η ασφάλεια όσο και η προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τις απορρίψεις των αποβλήτων που παράγονται από τα πλοία. Ειδικότερα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποικιλότητα των θαλάσσιων περιοχών. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου θα πρέπει η οδηγία να συμμορφώνεται με διεθνείς συμβάσεις και κυρίως με τη σύμβαση MARPOL. Επίσης σημαντική είναι η ύπαρξη ομαλής λειτουργίας της θαλάσσιας κυκλοφορίας μέσω της διάθεσης κατάλληλων λιμενικών εγκαταστάσεων, μέσω των οποίων θα πραγματοποιείται η παραλαβή καθώς και η παράδοση των αποβλήτων. Παράλληλα η συγκεκριμένη οδηγία λειτουργεί ως μέσο εφαρμογής τόσο της βασικής περιβαλλοντικής νομοθεσίας όσο και των κύριων περιβαλλοντικών αρχών που αφορούν τη λειτουργία των λιμένων και τη διαχείριση των αποβλήτων από τα πλοία. Στο πλαίσιο αυτό, συναφείς πράξεις είναι οι οδηγίες του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2008/56/ΕΚ, περί πλαισίου κοινοτικής δράσης στο πεδίο της

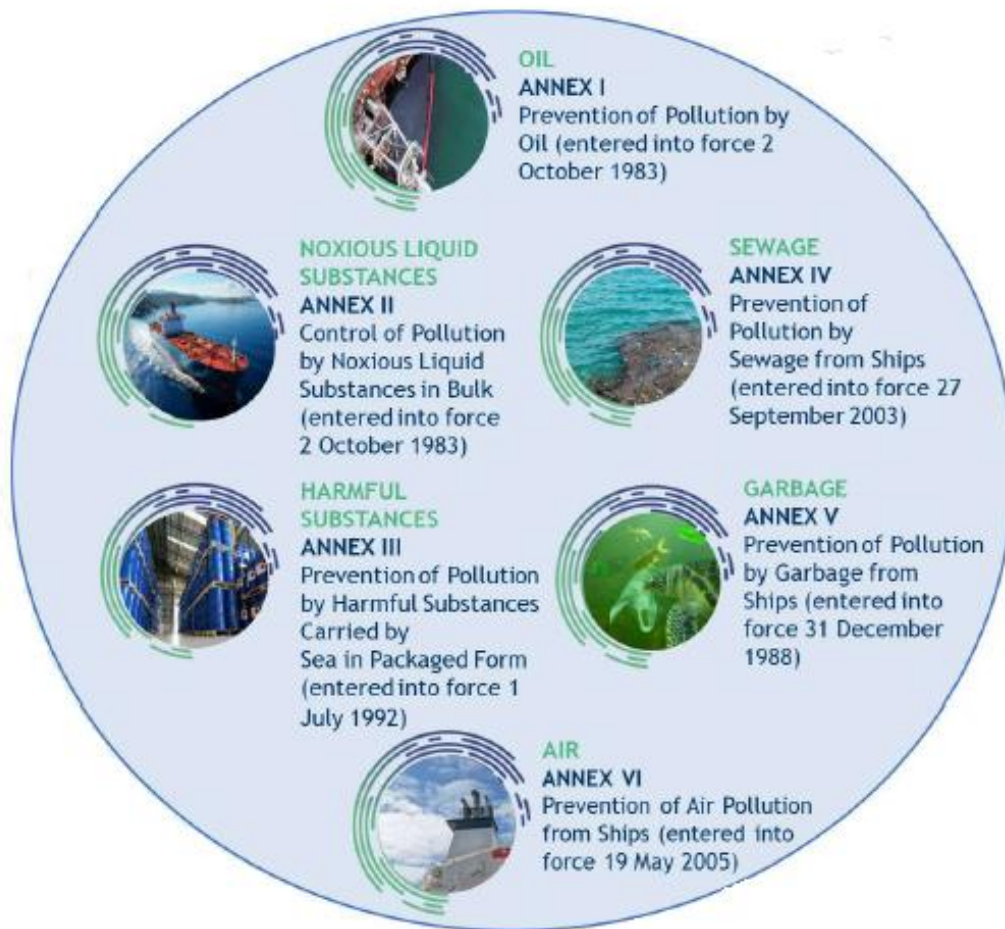
πολιτικής για το θαλάσσιο περιβάλλον και 2008/98/EK, μέσω της οποίας καθορίζονται οι κύριες αρχές για τη διαχείριση των αποβλήτων με σκοπό την προώθηση της βιωσιμότητας. Πιο συγκεκριμένα με βάση την οδηγία αυτή είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων χωριστής συλλογής των αποβλήτων ώστε να καθίσταται δυνατή η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση τους σε άλλες μορφές ανάκτησης. Επίσης εφαρμόζεται η αρχή “ο ρυπαίνων πληρώνει”, σύμφωνα με την οποία οι παραγωγοί φέρουν ευθύνη για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να προκληθούν από τα προϊόντα τους. Ένα ακόμα κίνητρο ώστε να αυξηθεί η παράδοση των αποβλήτων στους λιμένες και να μειωθούν τα θαλάσσια απορρίμματα είναι η επιβολή έμμεσων τελών. Ειδικότερα τα συγκεκριμένα τέλη θα καταβάλλονται ανεξάρτητα με τον αν παραδίδονται ή όχι απόβλητα από τα πλοία. Επομένως είναι ένας τρόπος ενθάρρυνσης να παραδίνουν τα απόβλητα καθώς δεν θα υπάρχει πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση (Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2019) .

2.2 MARPOL 73/78

Η Διεθνής Σύμβαση MARPOL 73/78 αποτελεί την κύρια διεθνή σύμβαση που καλύπτει την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος που προκαλείται από πλοία τόσο από λειτουργικά όσο και από τυχαία αίτια. Η συγκεκριμένη σύμβαση υιοθετήθηκε από τον οργανισμό IMO (International Maritime Organization) στις 2 Νοεμβρίου του 1973. Στη συνέχεια, το 1978 προστέθηκε ένα πρωτόκολλο στη σύμβαση, το οποίο τέθηκε σε ισχύ το 1983. Ο κύριος στόχος του ήταν να γίνει η σύμβαση πιο αυστηρή καθώς είχαν προηγηθεί σοβαρά ατυχήματα με πετρελαιοφόρα πλοία το διάστημα μεταξύ 1976-1977. Τέλος το 1997 εγκρίθηκε ένα ακόμα πρωτόκολλο για τη τροποποίηση της σύμβασης και προστέθηκε ένα νέο παράρτημα (Παράρτημα VI), το οποίο αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση από πλοία και τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου του 2005 (International Maritime Organization) .

2.2.1 Παραρτήματα και κατηγορίες παραγόμενων αποβλήτων σύμφωνα με τη Διεθνή Σύμβαση MARPOL

Η Σύμβαση MARPOL αποτελείται από έξι παραρτήματα (Annex I, Annex II, Annex III, Annex IV, Annex V και Annex VI).



Εικόνα 1: Παρουσίαση των έξι παραρτημάτων της Διεθνούς Σύμβασης MARPOL 73/78 (International Maritime Organization)

Όσον αφορά το πρώτο παράρτημα (Annex I), το οποίο τέθηκε σε ισχύ 2 Οκτωβρίου του 1983 αφορά κανονισμούς για την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο (International Maritime Organization). Με τον όρο πετρέλαιο νοείται το πετρέλαιο σε οποιαδήποτε μορφή όπως είναι το αργό πετρέλαιο, το μαζούτ, της λάσπης (sludge), των αποβλήτων του πετρελαίου (oil refuse) όπως επίσης των διυλισμένων προϊόντων με εξαίρεση των πετροχημικών που υπόκεινται στις διατάξεις του παραρτήματος II της παρούσας σύμβασης (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Ειδικότερα το συγκεκριμένο παράρτημα καλύπτει την πρόληψη της ρύπανσης που μπορεί να προκληθεί κατά τη λειτουργία του πλοίου ή εξαιτίας διαρροών (International Maritime Organization). Σύμφωνα με το Annex I απαγορεύεται αυστηρά η απόρριψη πετρελαίου ή πετρελαιοειδών μειγμάτων από τα πλοία εκτός και αν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Ειδικότερα μια από τις προϋποθέσεις αυτές

είναι να μην βρίσκονται τα πετρελαιοφόρα πλοία εντός ειδικής περιοχής. Ως ειδική περιοχή νοείται μια θαλάσσια περιοχή, η οποία λόγω συγκεκριμένων αναγνωρισμένων τεχνικών λόγων που σχετίζονται με ωκεανογραφικές και οικολογικές συνθήκες της, απαιτείται η εφαρμογή υποχρεωτικών μέτρων για την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο της περιοχής αυτής. Κάποια παραδείγματα ειδικών περιοχών είναι η Μεσόγειος Θάλασσα, η Βαλτική Θάλασσα, η Μαύρη Θάλασσα, η Ερυθρά Θάλασσα, ο Περσικός Κόλπος, ο κόλπος Άντεν, Ανταρκτική Θάλασσα και τα ύδατα της Βορειοδυτικής Ευρώπης (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Επιπλέον το πετρελαιοφόρο θα πρέπει να βρίσκεται εν πλω καθώς και να απέχει περισσότερο από 50 μίλια από την πλησιέστερη ξηρά. Παράλληλα η συνολική απορριπτόμενη ποσότητα πετρελαίου στη θάλασσα, για τα υφιστάμενα πλοία, δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 1/15.000 της συνολικής ποσότητας του συγκεκριμένου φορτίου από το οποίο προέκυψαν τα κατάλοιπα ενώ για τα νέα δεξαμενόπλοια το αντίστοιχο όριο είναι πιο αυστηρό και ανέρχεται στο 1/30.000 της συνολικής ποσότητας. Επίσης ο στιγμιαίος ρυθμός εκροής πετρελαίου ανά ναυτικό μίλι δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 30 λίτρα. (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Επιπλέον τα πλοία ολικής χωρητικότητας 400 GT και άνω αλλά μικρότερης από 10000 GT υποχρεούνται να διαθέτουν σύστημα φιλτραρίσματος πετρελαίου (oil filtering equipment). Το συγκεκριμένο σύστημα διασφαλίζει ότι η περιεκτικότητα του απορριπτόμενου πετρελαιοειδούς μείγματος σε πετρέλαιο δεν υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο, 15 μέρη ανά εκατομμύριο (15ppm). Στην περίπτωση που τα πλοία αυτά μεταφέρουν μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου ως καύσιμο καθώς και όλα τα πλοία μεγαλύτερης χωρητικότητας (> 10000 GT) τότε οι απαιτήσεις είναι αυστηρότερες. Εκτός από το σύστημα φιλτραρίσματος, διαθέτουν σύστημα συναγερμού και αυτόματος σύστημα διακοπής απόρριψης ώστε η εκροή να διακόπτεται αυτομάτως μόλις ανιχνευτεί περιεκτικότητα πετρελαίου στο μείγμα μεγαλύτερη από 15ppm (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Επίσης τα πλοία με χωρητικότητα μεγαλύτερη από 400 GT έχουν την υποχρέωση να διαθέτουν δεξαμενή συλλογής υπολειμμάτων πετρελαίου ή αλλιώς λάσπης (sludge) , που προκύπτουν από τον καθαρισμό καυσίμων και λιπαντικών ελαίων καθώς επίσης και από διαρροές πετρελαίου στους χώρους των μηχανών. Παράλληλα τα πετρελαιοφόρα πλοία χωρητικότητας 150 GT και άνω αλλά και όλα τα πλοία χωρητικότητας μεγαλύτερης των 400 GT, υποχρεούνται να διαθέτουν ένα Βιβλίο

Καταγραφής Πετρελαίου (Oil Record Book). Το συγκεκριμένο βιβλίο διαχωρίζεται σε δύο μέρη , στο μέρος I (Part I) που αφορά τις λειτουργίες του μηχανοστασίου. Ειδικότερα σχετίζεται με τον καθαρισμό δεξαμενών πετρελαίου, απόρριψη βρώμικου έρματος ή νερού από τον καθαρισμό δεξαμενών , απόρριψη πετρελαιοειδών υπολειμμάτων (sludge) και νερού σεντίνας που συσσωρεύεται στο μηχανοστάσιο. Όσο για το μέρος II (Part II) αφορά τις λειτουργίες φορτίου/ έρματος. Πιο συγκεκριμένα τη φόρτωση και εκφόρτωση πετρελαίου, εσωτερική μεταφορά πετρελαίου, απόρριψη νερού από δεξαμενές λάσπης (slop tanks) και διάθεση υπολειμμάτων πετρελαίου, καθαρισμός δεξαμενών, συμπεριλαμβανομένου του πλυσίματος με αργό πετρέλαιο. Το πρώτο μέρος πρέπει να ενημερώνεται τόσο από πετρελαιοφόρα πλοία χωρητικότητας 150 GT και άνω όσο και από όλα τα πλοία χωρητικότητας μεγαλύτερης των 400 GT. Αντίθετα το μέρος II του βιβλίου πρέπει να καταγράφεται μόνο από πετρελαιοφόρα πλοία με χωρητικότητα 150 GT και άνω.

Το συγκεκριμένο παράρτημα υπέστη τροποποίηση το 1992 σύμφωνα με την οποία υποχρεούνται όλα τα νέα πετρελαιοφόρα πλοία με νεκρό βάρος 600 τόνων και άνω (>600 DWT) να διαθέτουν διπλό κύτος (double hull) (International Mairtime Organization). Σύμφωνα με τον κανονισμό 13F του παραρτήματος I της σύμβασης MARPOL η τοποθέτηση διπλού κύτους είχε ως στόχο την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο σε περίπτωση σύγκρουσης ή προσάραξης του πλοίου (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Παράλληλα θεσπίστηκε πρόγραμμα σταδιακής προσαρμογής των υφιστάμενων δεξαμενόπλοιων (International Mairtime Organization).

Στη συνέχεια το δεύτερο παράρτημα (Annex II) τέθηκε σε ισχύ 6 Απριλίου το 1978 και αφορά την πρόληψη της ρύπανσης από επιβλαβείς υγρές ουσίες χύδην. Περιγράφει λεπτομερώς τα κριτήρια απόρριψής και τα μέτρα για τον έλεγχο της ρύπανσης από επιβλαβείς υγρές ουσίες που μεταφέρονται χύδην, από τις οποίες περίπου 250 ουσίες συμπεριλήφθηκαν στον κατάλογο της σύμβασης (International Mairtime Organization). Οι συγκεκριμένες επιβλαβείς υγρές ουσίες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες είναι A, B, C και D. Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται με βάση την επικινδυνότητα που μπορεί να προκαλέσει η κάθε ουσία της κάθε μιας κατηγορίας ξεχωριστά. Ειδικότερα οι ουσίες της κατηγορίας A ενέχουν το μεγαλύτερο κίνδυνο ενώ οι ουσίες της κατηγορίας D το μικρότερο κίνδυνο για το θαλάσσιο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά τις ουσίες που εντάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες (A,

B, C, D) είναι υγρές ουσίες που σε περίπτωση απόρριψης στη θάλασσα κατά τον καθαρισμό δεξαμενών ή την εκκένωση δεξαμενών έρματος ενδέχεται να προκαλέσουν κίνδυνο για τους θαλάσσιους πόρους, την ανθρώπινη υγεία ή ακόμα και βλάβες σε εγκαταστάσεις, υπηρεσίες ή άλλες νόμιμες χρήσεις της θάλασσας. Η σοβαρότητα των επιπτώσεων διαφοροποιείται ανάλογα με την κατηγορία της ουσίας κυμαινόμενη από σημαντικές έως ελάχιστες ή ασήμαντες επιδράσεις, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία εντάσσονται οι ουσίες (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Όσον αφορά τη διαχείριση αυτών των ουσιών που εντάσσονται στην κατηγορία Α απαιτείται η λήψη αυστηρών μέτρων πρόληψης της ρύπανσης. Επομένως σε περίπτωση καθαρισμού δεξαμενών που περιέχουν τέτοιου είδους ουσίες, τότε τα παραγόμενα υπολείμματα θα πρέπει να απορριφθούν σε εγκεκριμένη εγκατάσταση υποδοχής μέχρι η συγκέντρωση της ουσίας στο αντίστοιχο υγρό να είναι 0.1 % κατά βάρος καθώς επίσης η δεξαμενή να αδειάσει πλήρως. Στη συνέχεια όσο για τις ουσίες της κατηγορίας Β μπορούν να απορριφθούν στη θάλασσα υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Ειδικότερα η απόρριψη των ουσιών αυτών θα πρέπει να πραγματοποιηθεί όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω καθώς επίσης η ελάχιστη ταχύτητα του να είναι 7 κόμβων (αν διαθέτει δική του πρόωση) και 4 κόμβων (αν δεν διαθέτει δική του πρόωση). Επιπλέον η διαδικασία απόρριψης της ουσίας στη θάλασσα θα πρέπει να έχει εγκριθεί από τη διοίκηση και να βασίζεται σε πρότυπα που έχουν καθοριστεί από το Διεθνές Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) ώστε η συγκέντρωση της ουσίας στο νερό να μην υπερβαίνει το 1 ppm. Η ποσότητα των υπολειμμάτων που απορρίπτεται δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 1 m³ της δεξαμενής, η εκροή των ουσιών είναι απαραίτητο να γίνεται κάτω από τη γραμμή ύδατος και η απόρριψη των ουσιών αυτών είναι να πραγματοποιείται σε απόσταση μικρότερη των 12 μιλίων από την πλησιέστερη ξηρά και σε βάθος νερού τουλάχιστον 25 μέτρων (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Για τις ουσίες της κατηγορίας C οι προϋποθέσεις είναι παρόμοιες αλλά οι απαιτήσεις είναι πιο ήπιες λόγω του μικρότερου κινδύνου που μπορεί να προκληθεί από αυτές. Ειδικότερα η συγκέντρωση των ουσιών που απορρίπτεται στη θάλασσα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10 ppm ενώ η μέγιστη ποσότητα απορριπτόμενου φορτίου δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 3 m³ ανά δεξαμενή (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Τέλος για τις ουσίες της κατηγορίας D, οι οποίες παρουσιάζουν μικρότερη επικινδυνότητα, η απόρριψη επιτρέπεται υπό ακόμα πιο ήπιες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα το πλοίο θα πρέπει να βρίσκεται εν πλω, και η απόρριψη των ουσιών να πραγματοποιείται σε απόσταση τουλάχιστον 12 μιλίων από τη ξηρά, όπως στις παραπάνω κατηγορίες. Όμως τα μίγματα που απορρίπτονται δεν θα πρέπει έχουν αναλογία ενός μέρους ουσίας προς δέκα μέρη νερού (1:10) (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Το τρίτο παράρτημα σχετίζεται με την πρόληψη της ρύπανσης που προκαλείται από επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται στη θάλασσα σε συσκευασίες και όχι χύδην όπως στο προηγούμενο παράρτημα. Το συγκεκριμένο παράρτημα μπήκε σε ισχύ 1^η Ιουλίου του 1992. Για το παράρτημα III της σύμβασης MARPOL επιβλαβείς ουσίες θεωρούνται οι ουσίες που έχουν ήδη χαρακτηριστεί ως επικίνδυνες από το Διεθνή Κώδικα Επικίνδυνων Εμπορευμάτων (International Maritime Dangerous Goods Code – IMDG Code) ή που πληρούν τα κριτήρια του παραρτήματος III (Annex III). Στο παράρτημα περιέχονται απαιτήσεις για την έκδοση λεπτομερών προτύπων σχετικά με τη συσκευασία, τη σήμανση, την επισήμανση, τη τεκμηρίωση, τη φόρτωση, τους ποσοτικούς περιορισμούς (International Maritime Organization) καθώς και τις εξαιρέσεις για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από επιβλαβείς ουσίες (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Το επόμενο παράρτημα (Annex IV) αναφέρεται στην πρόληψη της ρύπανσης από λύματα πλοίων, το οποίο τέθηκε σε ισχύ 27 Σεπτεμβρίου του 2003 (International Maritime Organization). Ως λύματα ορίζονται οι απορροές και τα απόβλητα από τουαλέτες, από ιατρικές εγκαταστάσεις, από χώρους με ζώα καθώς και άλλα ύδατα που αναμιγνύονται με τις προαναφερόμενες κατηγορίες λυμάτων (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Σύμφωνα με το παράρτημα αυτό η απόρριψη λυμάτων στη θάλασσα απαγορεύεται. Όμως υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις, σε περίπτωση που το πλοίο διαθέτει εγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων ή αν το πλοίο διαθέτει σύστημα που τεμαχίζει η απολυμαίνει τα λύματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα λύματα αυτά ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία επιτρέπονται να απορριφθούν σε απόσταση μεγαλύτερη των τριών μιλίων από την πλησιέστερη ξηρά. Σε αντίθετη περίπτωση που τα λύματα δεν έχουν τεμαχιστεί αλλά ούτε και απολυμαίνει τότε θα πρέπει η απόρριψή να γίνεται σε απόσταση μεγαλύτερη των δώδεκα μιλίων

(International Mairtime Organization). Το συγκεκριμένο παράρτημα εφαρμόζεται σε νέα πλοία με ολική χωρητικότητα 200 GT και άνω καθώς και σε πλοία με ολική χωρητικότητα μικρότερη των 200 GT ή χωρίς καθορισμένη χωρητικότητα, τα οποία μεταφέρουν περισσότερα από 10 άτομα. Παράλληλα εφαρμόζεται σε υφιστάμενα πλοία αντίστοιχων κατηγοριών, τα οποία υποχρεούνται να συμμορφωθούν μέσα σε 10 χρόνια από την ημερομηνία έναρξης ισχύος του παραρτήματος (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Το πέμπτο παράρτημα (Annex V) αφορά τους διάφορους τύπους απορριμμάτων (International Mairtime Organization), στα οποία περιλαμβάνονται όλα τα είδη τροφίμων, οικιακών καθώς και λειτουργικών αποβλήτων (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973). Το συγκεκριμένο παράρτημα τέθηκε σε ισχύ στις 31 Δεκεμβρίου το 1988 και εφαρμόζεται σε όλα τα είδη των πλοίων. Στο παράρτημα αυτό καθορίζονται οι αποστάσεις από τη ξηρά, στις οποίες επιτρέπεται η απόρριψη των αποβλήτων, ανάλογα με την κατηγορία που ανήκουν. Πιο συγκεκριμένα η απόρριψη των αποβλήτων απαγορεύεται αν η απόσταση από την πλησιέστερη ξηρά είναι μικρότερη από 25 ναυτικά μίλια για υλικά στερέωσης, επένδυσης και συσκευασίας και μικρότερη από 13 ναυτικά μίλια για τρόφιμα, χαρτί, γυαλί, μέταλλο και κεραμικά. Ωστόσο η δεύτερη κατηγορία αποβλήτων επιτρέπεται να απορριφθεί σε κοντινότερη απόσταση, τουλάχιστον τριών ναυτικών μιλίων εφόσον έχουν υποβληθεί σε θρυμματισμό ή πέραςμα από μύλο. Όμως ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα πλαστικά των οποίων η απόρριψη απαγορεύεται σε οποιαδήποτε περίπτωση (International Mairtime Organization). Τέλος υποχρεωτικό είναι για κάθε πλοίο να τηρεί αρχείο ή αλλιώς το Βιβλίο Καταγραφής Απορριμμάτων (Garbage Record Book) για κάθε πράξη απόρριψης ή ολοκληρωμένης αποτέφρωσης, είτε αυτή γίνεται στη θάλασσα, σε ειδικές εγκαταστάσεις ή ακόμα και σε άλλα πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Στο τελευταίο παράρτημα (Annex VI) καθορίζονται τα όρια εκπομπών τόσο των οξειδίων του θείου (SOx) όσο και των οξειδίων του αζώτου (NOx) που προκύπτουν από τα καυσάδια των πλοίων (International Mairtime Organization). Όσον αφορά τα οξείδια του θείου η περιεκτικότητα του στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα πλοία δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 4.5% m/m. Παράλληλα η μέση παγκόσμια περιεκτικότητα του θείου στα υπολειμματικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα πλοία θα πρέπει να παρακολουθείται από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) με σκοπό να

εξασφαλίζεται ότι η συγκέντρωση του θείου είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Παράλληλα απαγορεύεται η εκούσια εκπομπή ουσιών που καταστρέφουν τη στοιβάδα του όζοντος. Το παράρτημα αυτό τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου του 2005. Όμως το 2011 στο συγκεκριμένο παράρτημα πραγματοποιήθηκαν κάποιες τροποποιήσεις, οι οποίες σχετίζονταν με υποχρεωτικά μέτρα ενεργειακής απόδοσης έχοντας ως κύριο στόχο τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία (International Maritime Organization).

Κεφάλαιο 3: Κατηγορίες υγρών αποβλήτων

Τα παραγόμενα απόβλητα του πλοίου που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του χωρίζονται σε υγρά και στερεά (Elkaim, Elhad, & Loukili, 2024). Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν μόνο τα υγρά απόβλητα, τα οποία περιλαμβάνουν τα γκρίζα ύδατα (grey water), τα μαύρα ύδατα (black water), τα νερά μηχανοστασίου (bilge water), τα υπολείμματα καθαρισμού δεξαμενών (slops) καθώς και τα υπολείμματα καθαρισμού καυσίμων (sludge). Τα παραγόμενα αυτά απόβλητα μπορούν να βλάψουν το θαλάσσιο περιβάλλον σε περίπτωση απόρριψής τους σε αυτό χωρίς την απαραίτητη επεξεργασία.

3.1. Γκρί ύδατα (Grey water)

Όσον αφορά τα γκρί ύδατα αποτελούν λύματα, τα οποία προέρχονται από το πλύσιμο των πιάτων, το ντους, το πλυντήριο, το μπάνιο καθώς και τους νιπτήρες. Εξαιτίας της προέλευσής τους τα γκρίζα ύδατα περιέχουν συντηρητικά και αντιμικροβιακές ουσίες που απελευθερώνονται από προϊόντα προσωπικής φροντίδας από τα ντους. Παράλληλα στα ύδατα αυτά εντοπίζονται απορρυπαντικά και διάφορες χημικές ουσίες που προκύπτουν από τα πλυντήρια. Οι χημικές ουσίες πολλές φορές βρίσκονται σε μέρη που δεν έπρεπε να βρίσκονται ή σε υψηλότερες συγκεντρώσεις από τις επιτρεπόμενες. Επιπλέον περιέχουν μέταλλα που προκύπτουν από το πλύσιμο σωληνώσεων και επεξεργασία λυμάτων. Παράλληλα συναντώνται σε αυτά θρεπτικά συστατικά, όπως φώσφορο (P) και άζωτο (N) που οδηγούν σε ευτροφισμό, (Ytreberg, et al., 2020) με αποτέλεσμα να παρατηρείται υπερβολική ανάπτυξη των φυκιών, εξάντληση του οξυγόνου και διαταραχή της υδρόβιας βιοποικιλότητας (García-Gomez, και συν., 2025). Επιπλέον στα συγκεκριμένα ύδατα περιέχονται μέταλλα με το ψευδάργυρο (Zn) και το χαλκό (Cu) να έχουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Ειδικότερα υπολογίστηκε ότι ετησίως εισέρχονται στη Βαλτική Θάλασσα 2.8 τόνοι ψευδαργύρου και 1.5 τόνοι χαλκού (Ytreberg, et al., 2020). Εξαιτίας της παραπάνω σύστασης, τα γκρίζα νερά αποτελούν σημαντική απειλή για το περιβάλλον. Ωστόσο η απόρριψή τους δεν ρυθμίζεται από το Διεθνές Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) και συγκεκριμένα η διαχείρισή τους δεν γίνεται με βάση τη Σύμβαση MARPOL 73/78, όπως στις υπόλοιπες κατηγορίες αποβλήτων (Ytreberg, et al., 2020). Ειδικότερα το παράρτημα IV της Σύμβασης επικεντρώνεται στα λύματα χωρίς όμως να εστιάζει στα γκρίζα ύδατα (García-Gomez, et al., 2025). Επομένως τα γκρίζα νερά απορρίπτονται στη θάλασσα χωρίς επεξεργασία, αναμιγνύονται με λύματα και στη συνέχεια οδηγούνται σε

εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων επί του σκάφους πριν την απόρριψη τους ή παραδίδονται σε υποδομή υποδοχής λιμένα στην ακτή (Ytreberg, et al., 2020).

Όσον αφορά την παραγόμενη ποσότητα και τη σύσταση των γκρίζων υδάτων διαφέρουν σε κάθε πλοίο καθώς εξαρτώνται από τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε αυτό. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της Det Norske Veritas οι όγκοι των εκπομπών γκρίζου νερού ημερησίως ανά άτομο σε πετρελαιοφόρα και χημικά δεξαμενόπλοια (oil and chemical tankers) είναι 105 λίτρα, σε πλοία μεταφοράς φορτίου (cargo ships) 119 λίτρα, σε επιβατικά πλοία (passenger ships) 157 λίτρα, σε αλιευτικά (fishing vessels) 222 λίτρα και σε υπεράκτια πλοία (offshore ships) 153 λίτρα (Ytreberg, et al., 2020). Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στη Βαλτική Θάλασσα εκτιμάται ότι καταλήγουν 5.5 εκατομμύρια m^3 ετησίως. Ο μεγαλύτερος όγκος γκρίζων υδάτων οφείλεται σε πλοία που μεταφέρουν επιβάτες και οχήματα – RoPax (4.25 εκατομμύρια m^3) καθώς και κρουαζιερόπλοια (0.65 εκατομμύρια m^3) (Ytreberg, et al., 2020).

3.2 Μαύρα ύδατα (Black water)

Τα μαύρα ύδατα αναφέρονται κυρίως στα νερά που προκύπτουν τόσο από τουαλέτες όσο και από ιατρικές εγκαταστάσεις (Vaneekhaute & Fazli, 2020). Τα συγκεκριμένα ύδατα είναι αυτά που αποτελούν κυρίως τα λύματα (sewage) (Kotrikla, Zavantias, & Kaloupi, 2021), στα οποία περιέχονται παθογόνοι μικροοργανισμοί, θρεπτικά συστατικά, χημικά και μέταλλα (Kurtela, Koboević, & Koboević, 2018). Ειδικότερα μεγάλο μέρος των λυμάτων αποτελούν τα θρεπτικά συστατικά και συγκεκριμένα ο φώσφορος και το άζωτο, όπως στην περίπτωση των γκρίζων υδάτων, τα οποία ευθύνονται και για τον ευτροφισμό (Vaneekhaute & Fazli, 2020). Το άζωτο θεωρείται από τα σημαντικότερα στοιχεία που μπορούν να καταστρέψουν την ισορροπία του υδρόβιου οικοσυστήματος. Συναντάται με τη μορφή ουρίας (80%), αμμωνίας (7%), κρεατίνης (6%) ενώ τα υπόλοιπα είναι κυρίως ελεύθερα αμινοξέα ή μικρά πεπτίδια (Chen, Wu, Guo, Li, & Wei, 2022). Όσον αφορά τη διαχείριση τους, όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 2 ρυθμίζεται από το παράρτημα IV (Annex IV) της σύμβασης MARPOL (Kotrikla, Zavantias, & Kaloupi, 2021). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο παράρτημα τα ανεπεξέργαστα λύματα θα πρέπει να απορρίπτονται σε καθορισμένες αποστάσεις από την πλησιέστερη ξηρά, ή να υποβάλλονται σε επεξεργασία σε εγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων μειώνοντας έτσι την ποσότητα τόσο του αζώτου όσο και του φωσφόρου κατά 70% και 80% αντίστοιχα ή να παραδίδονται σε

λιμενική υποδομή υποδοχής (Lappalainen, Tapaninen, & Kotta, 2024). Στη τελευταία περίπτωση η αποθήκευση των μαύρων υδάτων μπορεί να γίνει στην ίδια δεξαμενή με τα γκρίζα ύδατα μέχρι την παράδοση τους στην αντίστοιχη υποδομή του λιμένα (Vaneekhaute & Fazli, 2020).

3.3 Πετρελαιοειδή απόβλητα

Τα πετρελαιοειδή απόβλητα που παράγονται στα πλοία διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, στα νερά μηχανοστασίου (bilge water), στα υπολείμματα που προκύπτουν από τον καθαρισμό δεξαμενών (slops) καθώς και στα υπολείμματα που παράγονται κατά τον καθαρισμό καυσίμων (sludge).

3.3.1. Νερά μηχανοστασίου (Bilge Water)

Το νερό σεντίνας (bilge water) είναι νερό που συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του πλοίου και περιέχει ένα μείγμα συστατικών, τα οποία μπορεί να είναι επιβλαβή. Ειδικότερα το συγκεκριμένο μείγμα περιέχει καύσιμα, υδραυλικά λάδια, λιπαντικά λάδια, πτητικές οργανικές ενώσεις, μέταλλα, απορρυπαντικά και άλλα χημικά που προέρχονται από τις δραστηριότητες του πλοίου (Tiselius & Magnusson, 2017). Όσον αφορά τις ομάδες των χημικών ουσιών που περιέχονται σε αυτά είναι οι επιφανειοδραστικές ουσίες. Πρόκειται για επικίνδυνες ουσίες που θεωρούνται αρκετά τοξικές και καθίστανται ακόμα πιο επικίνδυνες όταν αναμιγνύονται με μείγματα πετρελαίου. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε λόγω συνεργιστικών επιδράσεων είτε επειδή αυξάνεται η διάλυση του πετρελαίου, με αποτέλεσμα να γίνεται περισσότερο βιοδιαθέσιμο για τους οργανισμούς που εκτίθενται σε αυτό (Tiselius & Magnusson, 2017). Παράλληλα ανιχνεύονται πολλές φορές σε αυτά και μικροπλαστικά (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024).

Όσον αφορά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, η τιμή του pH των συγκεκριμένων υδάτων κυμαίνεται από 6.8 έως 9, η αλατότητά του είναι μεταξύ 25 και 35 g/L, η περιεκτικότητά του σε πετρέλαιο από 36 έως 2953 mg/L και η χημική απαίτηση οξυγόνου (COD) είναι αρκετά υψηλή (>3–15 g/L) (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024).

Η διαχείριση των υδάτων σεντίνας ρυθμίζεται από τη σύμβαση MARPOL 73/78 και συγκεκριμένα από το παράρτημα I (Annex I) (Magnusson & Winnes, Risk assessment of bilge water discharges in two Baltic shipping lanes, 2018). Ο κανονισμός εστιάζει κυρίως στο πετρέλαιο που περιέχεται στο συγκεκριμένο τύπο υδάτων, καθώς θεωρείται ως το πιο τοξικό συστατικό (Tiselius & Magnusson, 2017). Σύμφωνα με το

συγκεκριμένο παράρτημα δεν επιτρέπεται η απόρριψη τους στη θάλασσα σε περίπτωση που η συγκέντρωση του πετρελαίου είναι μεγαλύτερη ή ίση με 15 mg/L. Με σκοπό να επιτευχθεί η παραπάνω συγκέντρωση πετρελαίου είτε γίνεται επεξεργασία των υδάτων ενώ το πλοίο βρίσκεται εν πλω σε ένα σύστημα επεξεργασίας πετρελαίου και στη συνέχεια απορρίπτεται στη θάλασσα είτε οδηγούνται και αποθηκεύονται σε ειδικές εγκαταστάσεις υποδοχής στη ξηρά (Tiselius & Magnusson, 2017) . Στην πρώτη περίπτωση, όταν τα ύδατα απορρίπτονται στη θάλασσα, αυτό γίνεται μέσω ενός ανοίγματος του κύτους του πλοίου που βρίσκεται πάνω από τη γραμμή του νερού. Με την απόρριψη τους είναι πιθανό να προκληθούν προβλήματα στο θαλάσσιο περιβάλλον μέσω του πετρελαίου, των μετάλλων και άλλων συστατικών που εμπεριέχονται σε αυτά. Ωστόσο οι επιπτώσεις δεν είναι άμεσες όπως συμβαίνει με την απόρριψη μιας πετρελαιοκηλίδας, αλλά προκύπτουν από χρόνια έκθεση των θαλάσσιων οργανισμών σε ελαφρώς αυξημένες συγκεντρώσεις αυτών των ουσιών. Οι συγκεντρώσεις τόσο των βιοαποικοδομήσιμων ενώσεων, όπως το πετρέλαιο όσο και των μη αποικοδομήσιμων ενώσεων, όπως τα μέταλλα αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας της συνεχούς απόρριψης. Επίσης η τοξικότητα των ουσιών αυτών παρατηρείται κυρίως κοντά στο σημείο απόρριψής, καθώς μετά την εκροή τους στη θάλασσα αραιώνονται γρήγορα στο θαλασσινό νερό (Magnusson, και συν., 2018).

Το νερό σεντίνας παρατηρείται σε όλους τους τύπους των πλοίων αλλά η παραγόμενη ποσότητα του ποικίλει από πλοίο σε πλοίο αλλά και μεταξύ πλοίων του ίδιου τύπου. Πιο συγκεκριμένα στα επιβατικά πλοία (passenger ships) οι παραγόμενες ποσότητες των υδάτων αυτών είναι υψηλότερες συγκριτικά με αυτές των πλοίων μεταφοράς εμπορευμάτων (cargo ships) (Magnusson & Winnes, Risk assessment of bilge water discharges in two Baltic shipping lanes, 2018). Επίσης σύμφωνα έρευνα της Det Norske Veritas (DNV), η μέση ημερήσια παραγωγή υδάτων σεντίνας εκτιμήθηκε ότι είναι 7500 λίτρα σε επιβατικά πλοία, 360 λίτρα σε πλοία υπεράκτιων εργασιών και 50 λίτρα σε δεξαμενόπλοια καθώς και σε πλοία μεταφοράς φορτίου (Tiselius & Magnusson, 2017).

3.3.2. Υπολείμματα καθαρισμού δεξαμενών (slops)

Τα ρευστά απόβλητα (slops) αναφέρονται στα υπολείμματα από τα νερά καθαρισμού δεξαμενών που περιέχουν διάφορα υγρά, όπως φυτικά έλαια ή χημικά. Τα συγκεκριμένα ύδατα αποτελούνται από μείγματα νερού, υδρογονανθράκων και ιζημάτων (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024). Ειδικότερα τα υπολείμματα που

προκύπτουν κατά το πλύσιμο των δεξαμενών που μεταφέρουν προϊόντα διύλισης πετρελαίου αποτελούνται από διαλύτες, επιφανειοδραστικές ουσίες, άλατα μετάλλων και λάδια (Corsino, Campo, Bella, & Torregrossa, 2018). Παράλληλα τα υπολείμματα αυτά προκύπτουν κατά την πλύση των κυτών των πλοίων με θαλασσινό νερό με σκοπό να απομακρυνθεί ένα μεγάλο ποσοστό υδρογονανθράκων από τα τοιχώματα του πετρελαιοφόρου. Τα συγκεκριμένα υπολείμματα χαρακτηρίζονται τόσο από υψηλή αλατότητα όσο και από αυξημένη συγκέντρωση υδρογονανθράκων (Campo, Giustra, Marchis, Freni, & Di Bella, 2017). Εξαιτίας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσουν τα ύδατα αυτά αποθηκεύονται σε ειδικές δεξαμενές (slop tanks) (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024).

3.3.3 Υπολείμματα καθαρισμού καυσίμων (sludge)

Όσον αφορά την ιλύ (sludge) ή τα υπολείμματα υδρογονανθράκων ορίζονται τα υπολείμματα που προκύπτουν από τον καθαρισμό καυσίμων και λιπαντικών που χρησιμοποιούνται στο μηχανοστάσιο. Πιο συγκεκριμένα τα υπολείμματα αυτά δημιουργούνται κατά τη φόρτωση καυσίμων, όπως μαζούτ, το οποίο απαιτεί την απομάκρυνση ακαθαρσιών (νερό και ιζήματα), πριν τη χρήση του στους κινητήρες. Υστέρα από το διαχωρισμό και την επεξεργασία, τα ιζήματα και το νερό αποθηκεύονται σε ειδικές δεξαμενές λάσπης (sludge tank) ή δεξαμενές υπολειμμάτων υδρογονανθράκων ύστερα από την επεξεργασία. Παράλληλα δημιουργούνται υπολείμματα υδρογονανθράκων, τα οποία δεν επιτρέπεται να απορριφθούν απευθείας στη θάλασσα καθώς απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024). Σύμφωνα με τη Σύμβαση MARPOL, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, η απόρριψη υδρογονανθράκων στη θάλασσα απαγορεύεται, εκτός και αν η συγκέντρωση των ολικών υδρογονανθράκων πετρελαίου (Total Petroleum Hydrocarbons -TPHs) στα απορριπτόμενα λύματα δεν υπερβαίνει τα 15 ppm (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024). Επίσης το όριο αυτό είναι αυστηρότερο όταν η απόρριψη πρόκειται να γίνει σε ειδικές περιοχές, όπως στη Μεσόγειο Θάλασσα, όπου η συγκέντρωση θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5 ppm. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η επεξεργασία τους πριν την απόρριψη τους στη θάλασσα (Campo, Giustra, Marchis, Freni, & Di Bella, 2017).

Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία λυμάτων

Τα παραγόμενα λύματα (γκρίζα και μαύρα ύδατα) στα πλοία διαχειρίζονται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη επιλογή είναι η αποθήκευση των λυμάτων σε ειδικές δεξαμενές και η μεταφορά τους στη ξηρά. Η δεύτερη επιλογή είναι η επεξεργασία των λυμάτων πάνω στο πλοίο και η απόρριψη τους, με την προϋπόθεση ότι πληρούν τα καθορισμένα πρότυπα (Chen, Wu, Guo , Li, & Wei, 2022) που ορίζει η Διεθνής Σύμβαση MARPOL.

Όσον αφορά την επεξεργασία λυμάτων στα πλοία, εξαιτίας του τρόπου παραγωγής τους και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, είναι δύσκολο να επιτευχθούν τα απαιτούμενα πρότυπα απόρριψης με τη χρήση μιας μόνο μεθόδου. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός ποικίλων διεργασιών (Chen, Wu, Guo , Li, & Wei, 2022). Στη συνέχεια θα αναλυθεί το σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (sewage treatment plant), μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επεξεργασία λυμάτων με τη χρήση διάφορων διεργασιών.

4.1 Σύστημα επεξεργασίας λυμάτων - (Sewage Treatment Plant)

Τα περισσότερα πλοία διαθέτουν σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (Sewage Treatment Plant - STP), το οποίο απομακρύνουν τους ρύπους από τα λύματα (γκρίζα και μαύρα ύδατα) πριν αυτά απορριφθούν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ειδικότερα η επεξεργασία πραγματοποιείται με σκοπό να μειωθεί η συγκέντρωση των ρύπων που εμπεριέχονται στα αντίστοιχα λύματα ώστε να είναι δυνατή η απόρριψη τους σε φυσικά υδάτινα συστήματα χωρίς να προκληθεί πρόβλημα στην ανθρώπινη υγεία όπως επίσης να μην παρατηρηθεί διαταραχή στο φυσικό περιβάλλον. Τα συγκεκριμένα συστήματα καθώς και ο αντίστοιχος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, πρέπει έχει κάποιες καθορισμένες προδιαγραφές. Ειδικότερα θα πρέπει να είναι απλά, μικρού μεγέθους, αξιόπιστα, σχετικά οικονομικά όπως επίσης να πληροί τα πρότυπα πληρότητας της εκροής μετά την επεξεργασία σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς. Το είδος του συστήματος επεξεργασίας λυμάτων που θα εγκατασταθεί σε ένα πλοίο εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Τον αριθμό των ατόμων που διαμένουν στο πλοίο και το χρόνο παραμονής τους
- Την περιοχή στην οποία πλέει το πλοίο
- Το χρόνο παραμονής του πλοίου στο λιμάνι

- Την ποιότητα (καθαρότητα) εκροής, η οποία εξαρτάται από τα πρότυπα που πρέπει να πληροί το επεξεργασμένο λύμα

Οι μικρότερες θαλαμηγοί και τα σκάφη αναψυχής συνήθως δεν είναι εξοπλισμένα με μονάδα επεξεργασίας λυμάτων αλλά διαθέτουν δεξαμενή συλλογής λυμάτων. Τα λύματα που περιέχονται στη δεξαμενή είτε απορρίπτονται στη θάλασσα είτε διέρχονται πρώτα μέσω αντλίας με τεμαχιστή για τη θραύση των στερεών. Αυτά γίνονται με την προϋπόθεση ότι το πλοίο βρίσκεται σε επιτρεπόμενη περιοχή, όπως ορίζεται και στο Παράρτημα IV της διεθνούς Σύμβασης MARPOL. Όσον αφορά τα εμπορικά πλοία διαθέτουν συνήθως μικρότερες μονάδες επεξεργασίας, στις οποίες δεν αποθηκεύονται τα λύματα. Αντίθετα τα επεξεργασμένα αυτά λύματα απορρίπτονται αμέσως μετά την επεξεργασία με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα συστήματα επεξεργασίας να χαρακτηρίζονται ως αυτόματα συστήματα επεξεργασίας. Αντίθετα τα επιβατικά πλοία διαθέτουν πιο πολύπλοκα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων όπως επίσης και δεξαμενές. Στις δεξαμενές αποθηκεύονται τα λύματα μέχρι να είναι δυνατή η απόρριψή τους σε επιτρεπόμενη περιοχή, όπως ορίζεται από τη Διεθνή Σύμβαση MARPOL. Σε περίπτωση που το πλοίο δεν μπορεί να απομακρυνθεί ώστε να πραγματοποιηθεί η απόρριψη τότε χρησιμοποιούνται οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Τέλος τα κρουαζιερόπλοια εξαιτίας τους αυξημένου αριθμού επιβατών παράγουν αυξημένες ποσότητες λυμάτων, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πιο σύνθετα συστήματα (Koboenic, 2020).

4.1.1 Διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων

Η επεξεργασία των λυμάτων ακολουθεί μια σειρά διεργασιών με στόχο την απομάκρυνση των επιπλεόντων υλικών, αιωρούμενων στερεών, διαλυμένων ουσιών και άλλων συστατικών που μεταβάλλουν τις ιδιότητες των αποβλήτων (Koboenic, 2020). Οι διεργασίες που εφαρμόζονται για την επεξεργασία λυμάτων αναλύονται στη συνέχεια και είναι οι ακόλουθες:

- Προ-επεξεργασία
- Πρωτοβάθμια επεξεργασία
- Δευτεροβάθμια επεξεργασία
- Καθίζηση
- Απολύμανση
- Επεξεργασία και διάθεση ιλύος

4.1.1.1 Προεπεξεργασία

Η επεξεργασία των λυμάτων ξεκινά με την προ-επεξεργασία. Πρόκειται για διεργασία μηχανικής φύσεως και αποτελείται από φίλτρα εσχάρωσης και τμήματα καθίζησης (Koboeνιός, 2020). Τα φίλτρα εσχάρωσης είναι τοποθετημένα στην πρώτη δεξαμενή, η οποία βρίσκεται κοντά στην είσοδο των λυμάτων του συστήματος επεξεργασίας λυμάτων (Sewage treatment plant – STP). Τα συγκεκριμένα φίλτρα συμβάλλουν στην απομάκρυνση ξένων υλικών, όπως πλαστικά, χαρτιά και αλλιά στερεά υλικά που εμπεριέχονται στα λύματα, τα οποία μπορεί να φράξουν το σύστημα και να προκαλέσουν προβλήματα στα επόμενα στάδια της διαδικασίας (Raunek, 2024). Επίσης η αποτελεσματική προ-επεξεργασία μπορεί να μειώσει την ανάγκη για οξείδωση. Ωστόσο πολλές φορές είναι απαραίτητο τα λύματα να διέλθουν από μια αντλία τεμαχισμού ώστε να περιοριστεί η παραγωγή ιζημάτων, πριν εισέλθουν στην εσχάρα (Koboeνιός, 2020).

4.1.1.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Στη συνέχεια ακολουθεί η πρωτοβάθμια επεξεργασία. Κατά το στάδιο αυτό απομακρύνονται από τα λύματα κυρίως στερεά σωματίδια μέσω φυσικών διεργασιών (Koboeνιός, 2020). Μέσω της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας απομακρύνονται τα αιωρούμενα στερεά (SS), τα κολλοειδή καθώς και τα διασκορπισμένα σωματίδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση στους δείκτες εκροής, δηλαδή στο COD, BOD₅ και στο SS (Chen, Wu, Guo, Li, & Wei, 2022).

4.1.1.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία χρησιμοποιούνται βακτήρια για την αποδόμηση της οργανικής ύλης (Koboeνιός, 2020). Κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία τα λύματα μεταφέρονται στο θάλαμο αερισμού μέσα στον οποίο τα αερόβια βακτήρια διασπούν τα λύματα. Στο θάλαμο αερισμού είναι τοποθετημένοι φυσητήρες αέρα, μέσω των οποίων οξυγονώνεται και αναδεύεται το μείγμα λυμάτων-βακτηρίων. Με την παροχή οξυγόνου παρεμποδίζεται η καθίζηση των οργανικών σωματιδίων ενώ παράλληλα τα βακτήρια διασπούν τα λύματα και τα μετατρέπουν σε ιλύ. Για την σωστή ανάμειξη και αποδόμηση των λυμάτων, θα πρέπει η πίεση στο θάλαμο να ανέρχεται στα 0.3- 0.4 bar. Σε αντίθετη περίπτωση, η υπερβολική πίεση δεν επιτρέπει την επαρκή ανάμειξη μεταξύ αέρα και λυμάτων και η ανεπαρκής πίεση δεν παρέχει το απαραίτητο οξυγόνο, ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η αποδόμηση των λυμάτων (Marine Public, 2026).

4.1.1.4. Δεξαμενή Καθίζησης

Το μείγμα ρέει από το θάλαμο αερισμού προς τη δεξαμενή καθίζησης, μέσα στην οποία πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της ενεργούς ιλύος από τα επεξεργασμένο νερό. Έτσι το καθαρό νερό συγκεντρώνεται στο επάνω μέρος της δεξαμενής ενώ τα βαρύτερα στερεά καθιζάνουν στον πυθμένα της.

Η συγκεκριμένη δεξαμενή είναι τύπου χοάνης με κεκλιμένα τοιχώματα με σκοπό να αποφεύγεται η προσκόλληση και η συσσώρευση της ιλύος. Σε διαφορετική περίπτωση θα αναπτύσσονταν αναερόβια βακτήρια, τα οποία θα παρήγαγαν δυσάρεστα αέρια. Όσον αφορά την μη επεξεργασμένη ιλύς επιστρέφει στο θάλαμο αερισμού μέσω αεραντλητικού συστήματος (air lift), με σκοπό τα βακτήρια να συνεχίσουν τη διαδικασία αποδόμησης. Με την ανακυκλοφορία της ιλύος, δεν παρατηρείται ανάπτυξη αναερόβιων βακτηρίων ενώ παράλληλα η διαδικασία της αποδόμησης των εισερχόμενων λυμάτων πραγματοποιείται γρηγορότερα (Marine Public, 2026).

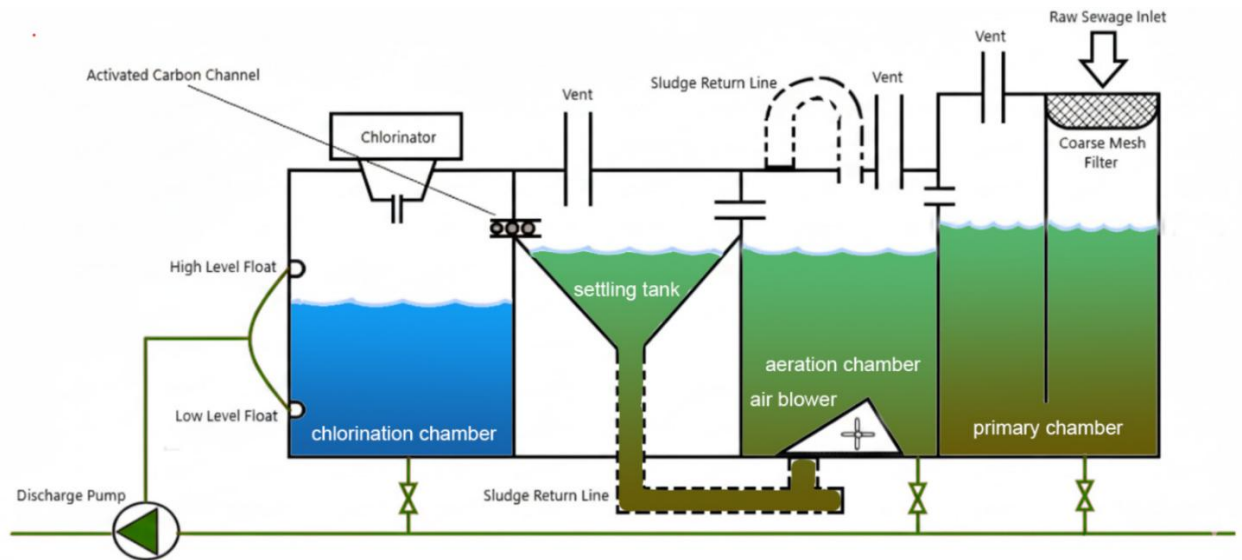
4.1.1.5 Απολύμανση

Το καθαρό νερό ρέει από τη δεξαμενή καθίζησης προς το θάλαμο χλωρίωσης, στον οποίο γίνεται το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας λυμάτων, η απολύμανση (Marine Public, 2026). Με τη διαδικασία της χλωρίωσης μειώνονται τα βακτήρια *E.coli*, καθώς οι παθογόνοι μικροοργανισμοί δεν μπορούν να εξαλειφθούν μόνο με τη βιολογική επεξεργασία. Πολλές φορές πριν από τη δεξαμενή χλωρίωσης τοποθετούνται φίλτρα ενεργού άνθρακα, τα οποία συμβάλλουν στην απομάκρυνση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) και του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD). Το επεξεργασμένο υγρό παραμένει στη δεξαμενή χλωρίωσης για τουλάχιστον 60 λεπτά ώστε να εξασφαλιστεί η επαρκής απολύμανση πριν από τη διάθεση του (Marine Public, 2026).

Η διαδικασία της απολύμανσης πέρα από τη χλωρίωση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση όζοντος. Στην περίπτωση που τα λύματα παρουσιάζουν υψηλή θολότητα, τότε προτιμώνται οι δύο παραπάνω μέθοδοι. Επίσης και οι δύο αποτελούν αρκετά αποτελεσματικές μεθόδους καθαρισμού (Koboeniό, 2020).

Ένας ακόμα τρόπος για να επιτευχθεί η απολύμανση είναι η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται στην περίπτωση που προηγουμένως είχαν χρησιμοποιηθεί διεργασίες διαύγασης και διήθησης με μεμβράνες (Koboeniό, 2020). Επίσης πλεονέκτημα των συστημάτων UV, αποτελεί η αποφυγή της

χρήσης χλωρίου και αντίστοιχα η επεξεργασία του υπολειμματικού χλωρίου στην εκροή. Ωστόσο πρόκειται για συστήματα σύνθετου εξοπλισμού και υψηλής κατανάλωσης ενέργειας (Marine Public, 2026).



Εικόνα 2: Σύστημα Επεξεργασίας Λυμάτων (Sewage Treatment Plant - STP) (Marine Public, 2026)

4.2 Προκλήσεις στην επεξεργασία λυμάτων επί του πλοίου

Πολλές φορές η επεξεργασία λυμάτων στα πλοία παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Αυτό οφείλεται κυρίως στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λυμάτων, όπως η υψηλή αλατότητα, το αυξημένο οργανικό φορτίο και η χαμηλή σταθερότητα, τα οποία επηρεάζουν την αποδοτικότητα των συστημάτων επεξεργασίας.

4.2.1 Υψηλή αλατότητα

Στα πλοία κάποιες φορές χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό ως νερό έκπλυσης στις τουαλέτες, με σκοπό την αποφυγή της χρήσης γλυκού νερού. Δεδομένου ότι το θαλασσινό νερό παρουσιάζει υψηλές τιμές αλατότητας, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 25g/L και 35 g/L, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την επεξεργασία των λυμάτων του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, όταν η συγκέντρωση της αλατότητας υπερβαίνει περίπου το 2% κατά βάρος, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών και η απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων επηρεάζονται αρνητικά. Παράλληλα η υψηλή αλατότητα μπορεί να επιδεινώσει τη ρύπανση των μεμβρανών (membrane fouling).

Σε αυτές τις περιπτώσεις συνήθως χρησιμοποιούνται φυσικοχημικές μέθοδοι, όπως μεμβρανικές διεργασίες, προσρόφηση ή ιοντοανταλλαγή. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες τεχνολογίες παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όπως υψηλό κόστος, περιορισμένη εφαρμογή και δευτερογενή ρύπανση. Για το λόγο αυτό, προτιμώνται οι βιολογικές μέθοδοι καθώς θεωρούνται πιο οικονομικά αποδοτικές και επιτυγχάνουν πλήρη αποδόμηση των ρύπων (Chen, Wu, Guo, Li, & Wei, 2022).

4.2.2 Υψηλό οργανικό φορτίο

Τα παραγόμενα λύματα χαρακτηρίζονται και από υψηλό οργανικό φορτίο. Ειδικότερα στα μαύρα ύδατα τόσο το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) όσο και το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) κυμαίνονται μεταξύ 3000-8000 mg/L (Chen, Wu, Guo, Li, & Wei, 2022). Όσον αφορά τα γκρίζα ύδατα το COD μπορεί να φτάσει έως και 1500 mg/L, ενώ το BOD εμφανίζει επίσης σημαντικές τιμές, χαμηλότερες όμως από αυτές που συναντώνται στα μαύρα ύδατα (Chen, Wu, Guo, Li, & Wei, 2022).

Επιπλέον παρατηρείται υψηλή παραγωγή λυμάτων στα πλοία, το οποίο αποτελεί επίσης δυσκολία στην επεξεργασία τους στα πλοία. Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι στα κρουαζιερόπλοια με 2000–3000 επιβάτες, η παραγωγή γκρίζων υδάτων ανέρχεται σε περίπου 550–800 τόνους ημερησίως, ενώ των μαύρων υδάτων σε περίπου 100–115 τόνου. Επομένως, τόσο το υψηλό οργανικό φορτίο όσο και η μεγάλη ποσότητα παραγωγής αποβλήτων αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για την επεξεργασία λυμάτων στα πλοία (Chen, Wu, Guo, Li, & Wei, 2022).

4.2.3 Χαμηλή σταθερότητα

Μια ακόμα δυσκολία που συναντάται κατά την επεξεργασία των λυμάτων στα πλοία είναι η μειωμένη λειτουργική σταθερότητα των συστημάτων επεξεργασίας. Ειδικότερα η σταθερότητα της επεξεργασίας των λυμάτων μπορεί να επηρεαστεί και να διαταραχθεί τόσο από τις μεταβολές που παρουσιάζονται στο ρυπαντικό φορτίο όσο και στον ασταθή λόγο άνθρακα προς άζωτο (C/N).

Παράλληλα, σημαντικό παράγοντα για την επεξεργασία των λυμάτων αποτελούν οι αναπόφευκτοι κραδασμοί και οι ταλαντώσεις των πλοίων που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τις φυσικοχημικές μεθόδους επεξεργασίας, όπως τη καθίζηση και τη κροκίδωση, οδηγώντας σε υποβάθμιση της ποιότητας της εκροής. Συνεπώς, η σταθερότητα της μεθόδου και του εξοπλισμού επεξεργασίας υπό συνθήκες κραδασμών του πλοίου αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό

παράγοντα για την αποτελεσματική διαχείριση των λυμάτων. Ορισμένα συστήματα δεν έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να ανταποκρίνονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ποσότητας και της ποιότητας των λυμάτων των πλοίων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν χαμηλή προσαρμοστικότητα σε απότομες μεταβολές του οργανικού φορτίου. Ως συνέπεια, η ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής ενδέχεται να είναι ασταθής και να μην συμμορφώνεται με τα απαιτούμενα όρια απόρριψης.

4.3 Προηγμένες Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων

Σε ορισμένα πλοία έχουν εγκατασταθεί προηγμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (Advanced Treatment System – AWT). Πρόκειται για συστήματα μέσω των οποίων προκύπτουν επεξεργασμένα λύματα σε αρκετά υψηλότερη ποιότητα και καθαρότητα, συγκριτικά με τα παραδοσιακά συστήματα. Τα συγκεκριμένα συστήματα βρίσκονται ακόμα σε εξέλιξη. Ωστόσο έχουν εγκατασταθεί σε ορισμένα κρουαζιερόπλοια εξαιτίας των αυξημένων επιβατών και απαιτήσεων αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούν αερόβια χώνευση σε συνδυασμό με φυσική διήθηση, με σκοπό να επιτευχθεί η απαραίτητη επεξεργασία λυμάτων. Ένα παράδειγμα προηγμένων συστημάτων αποτελεί ο βιοαντιδραστήρας με μεμβράνες (MBR), ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου (Chen, Wu, Guo , Li, & Wei, 2022).

4.3.1 Βιοαντιδραστήρες με Μεμβράνες (Membrane Bioreactor - MBR)

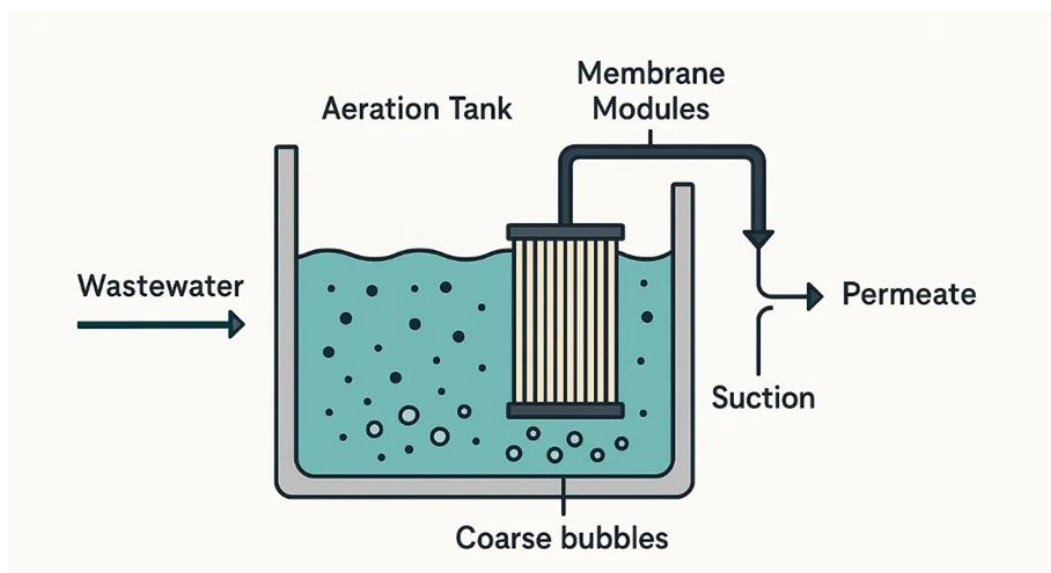
Ο βιοαντιδραστήρας με μεμβράνες (Membrane Bioreactor - MBR) αποτελεί ένα σύστημα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων επί του σκάφους, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε γκρι ύδατα (grey water) και μαύρα ύδατα (black water) (Vyrides, et al., 2018).

Το σύστημα MBR συνδυάζει τη βιοχημική αποδόμηση και το μεμβρανικό διαχωρισμό (Chen, Wu, Guo , Li, & Wei, 2022). Πιο συγκεκριμένα μέσω του συστήματος αυτού συνδυάζεται η μέθοδος της ενεργού ιλύος με μονάδες υπερδιήθησης με μεμβράνες (UF) (Zielińska & Trzcíński, 2021). Το σύστημα θεωρείται αρκετά αποδοτικό καθώς ο βιοαντιδραστήρας και το σύστημα υπερδιήθησης (Koboević, 2020) με μεμβράνες (UF) (Zielińska & Trzcíński, 2021) βελτιώνουν την αερόβια αποδόμηση και τη διήθηση φίλτρων μεμβράνης χαμηλής πίεσης (Koboević, 2020).

Ειδικότερα οι μεμβράνες είναι βυθισμένες στο μίγμα υγρού (επεξεργασμένα λύματα – βιομάζα) (Enflow Engineering, 2022). Οι μεμβράνες του συστήματος MBR

αντικαθιστούν τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησής που διαθέτει ένα συμβατικό σύστημα ενεργούς ιλύος. Τα προς επεξεργασία λύματα διέρχονται από το φίλτρα υπερδιήθησης με αποτέλεσμα να προκύπτει διήθημα (permeate), το οποίο οδηγείται στη δεξαμενή επεξεργασμένων λυμάτων. Παράλληλα προκύπτει συμπύκνωμα, δηλαδή η παχυμένη ενεργός ιλύς, η οποία ανακυκλοφορεί στο θάλαμο ενεργούς ιλύος (Zielińska & Trzcinski, 2021). Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας, επιτυγχάνεται υψηλή διάσπαση της οργανικής ιλύς (μικρή ποσότητα πλεονάζουσα ιλύς) και νιτροποίηση μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας (Enflow Engineering, 2022).

Το συγκεκριμένο σύστημα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Ένα βασικό πλεονέκτημα αποτελεί ο μικρός χώρος που καταλαμβάνει. Παράλληλα χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα εκροής, χαμηλό ρυθμό παραγωγής ιλύος (Bella, et al., 2015), όπως επίσης χαρακτηρίζονται από αυξημένη ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων (Bhattacharyya, Liu , Walsh, & Lee , 2023). Επιπλέον το επενδυτικό κόστος είναι χαμηλό, η κατανάλωση ενέργειας είναι χαμηλή και η απαίτηση για ανθρώπινο δυναμικό περιορισμένη (Chen, Wu, Guo , Li, & Wei, 2022). Ωστόσο κατά την επεξεργασία των λυμάτων παράγεται και ιλύ, με αποτέλεσμα να παρατηρείται ρύπανση (fouling) των μεμβρανών (Koboević, 2020). Αυτό έχει ως συνέπεια, τον περιορισμό της ευρείας εφαρμογής του συστήματος (Bella, et al., 2015).



Εικόνα 3: Απεικόνιση του συστήματος MBR (Chen K. , 2025)

4.3.2 Αντιδραστήρες βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (Moving Bed Biofilm Reactor - MBBR)

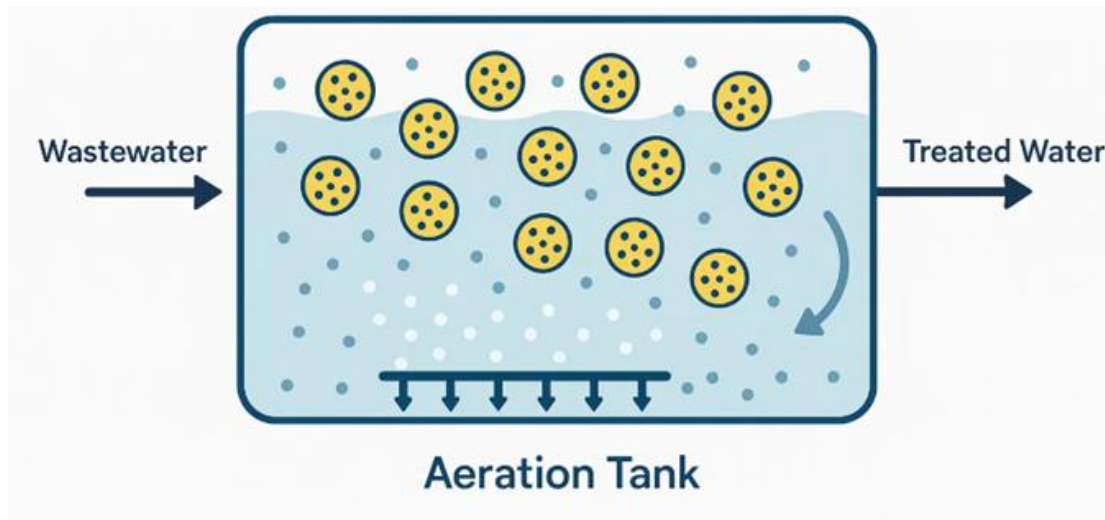
Ο αντιδραστήρας βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (MBBR), αποτελεί μια συμπαγής και ευέλικτη τεχνολογία για διεργασίες υψηλού ρυθμού και σταθερής απόδοσης. Ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας χρησιμοποιείται υπό συνθήκες αλατότητας, όπως για νιτροποίηση και απονιτροποίηση καθώς παρουσιάζει αρκετά υψηλή απόδοση συγκριτικά με αντιδραστήρες αιωρούμενης βιομάζας. Παράλληλα με τη χρήση των συγκεκριμένων αντιδραστήρων έχουν παρατηρηθεί υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) (D'Aquino, Tirola, Puhakka , Palmroth, & Andreottola, 2025).

Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για έναν αντιδραστήρα, ο οποίος αποτελείται είτε από αερόβια είτε από αναερόβια/ανοξική δεξαμενή. Στο εσωτερικό της δεξαμενής περιέχονται ειδικά σχεδιασμένα πλαστικά μέσα ή αλλιώς φορείς βιοφίλμ. Οι συγκεκριμένοι φορείς είναι κατασκευασμένοι συνήθως από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density Polyethylene - HDPE) ή πολυπροπυλένιο και συναντώνται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη (Chen K. , 2025). Η απόδοση του συστήματος καθορίζεται σημαντικά από το σχήμα και από τις επιφανειακές ιδιότητες των πλαστικών φορέων καθώς και από το πάχος και την επιφάνεια του αναπτυσσόμενου βιοφίλμ (D'Aquino, Tirola, Puhakka , Palmroth, & Andreottola, 2025). Οι πλαστικοί φορείς βιοφίλμ λειτουργούν ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Με αυτό το τρόπο, καθώς τα λύματα διέρχονται μέσα από τον αντιδραστήρα, οι οργανικοί ρύποι και τα θρεπτικά συστατικά διέρχονται μέσα στο βιοφίλμ, όπου καταναλώνονται από τους μικροοργανισμούς. Οι συγκριμένοι φορείς παρουσιάζουν τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά (Chen K. , 2025):

- Υψηλή ειδική επιφάνεια
- Ουδέτερη πλευστότητα
- Ανθεκτικότητα
- Αυτοκαθαρισμό

Ειδικότερα, μέσω της υψηλής ειδικής επιφάνειας, επιτυγχάνεται αυξημένη συγκέντρωση βιομάζας. Όσον αφορά την ουδέτερη πλευστότητα, οι πλαστικοί φορείς έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε η πυκνότητά τους να είναι σχεδόν ίση με αυτή του νερού, με αποτέλεσμα να αιωρούνται και να κινούνται ελεύθερα μέσα στον αντιδραστήρα

κατά τον αερισμό ή την ανάδευση. Παράλληλα εξαιτίας της κατασκευής τους από ανθεκτικά πλαστικά υλικά, παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα τόσο σε χημική όσο και σε βιολογική αποδόμηση, γεγονός που προσδίδει μεγάλη διάρκεια λειτουργίας. Τέλος, το χαρακτηριστικό του αυτοκαθαρισμού, συμβάλλει στη διατήρηση του βιοφιλμ σε βέλτιστο πάχος, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω των συνεχών κινήσεων και συγκρούσεων των φορέων μέσα στον αντιδραστήρα (Chen K. , 2025).



Εικόνα 4:Απεικόνιση του συστήματος MBBR (Chen K. , 2025)

4.3.3 Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (Sequencing Batch Reactor – SBR)

Ο αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (SBR) είναι γνωστό ως ένα ευέλικτο και αποτελεσματικό σύστημα για τη βιολογική επεξεργασία λυμάτων, ακόμη και όταν αυτά περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών ουσιών. Ειδικότερα ο SBR αποτελείται από μια μόνο μονάδα ενός μόνου δοχείου τύπου «πλήρωσης και εκκένωσης» (fill and draw), η οποία χρησιμοποιεί την ίδια δεξαμενή για αερισμό, καθίζηση και απομάκρυνση της εκροής (Adel, Ibrahim, Fayed, & Aly, 2020). Επομένως ο SBR αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στη τεχνολογία της ενεργούς ιλύος καθώς όλα τα βασικά στάδια επεξεργασίας πραγματοποιούνται διαδοχικά σε μια μόνο δεξαμενή και όχι σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες συνεχούς ροής (Chen K. , 2025).

Ένας τυπικός κύκλος λειτουργίας του SBR αποτελείται από πέντε διακριτές φάσεις:

1. Πλήρωση (Fill)

Τα ακατέργαστα ή τα προς επεξεργασία λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή SBR και αναμιγνύονται με την ενεργό ιλύ που παραμένει από τον προηγούμενο κύκλο.

Η συγκεκριμένη διεργασία διακρίνεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους:

- Στατική πλήρωση (Static Fill): χωρίς αερισμό ή ανάδευση, με αποτέλεσμα να ευνοούνται οι συνθήκες απονιτροποίησης ή οι αναερόβιες συνθήκες
- Αναμειγμένη πλήρωση (Mixed Fill): ανάδευση χωρίς αερισμό, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανοξικές ή αναερόβιες συνθήκες
- Αεριζόμενη πλήρωση (Aerated Fill): ταυτόχρονη ανάδευση και αερισμός, έτσι ώστε να ευνοούνται οι αερόβιες συνθήκες και η άμεση απομάκρυνση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD).

2. Αερισμός/ Βιολογική αντίδραση (React)

Με την ολοκλήρωση της πλήρωσης, η δεξαμενή αερίζεται ή αναδεύεται έντονα. Στο συγκεκριμένο στάδιο επικρατούν κυρίως αερόβιες συνθήκες, ώστε οι μικροοργανισμοί να αποδομούν οργανικές ενώσεις (BOD/COD) και να πραγματοποιείται παράλληλα νιτροποίηση της αμμωνίας. Η συγκεκριμένη διεργασία πραγματοποιείται και σε ανοξικές ή αναερόβιες περιόδους με σκοπό την απομάκρυνση θρεπτικών (φώσφορος και άζωτο).

3. Καθίζηση (Settle)

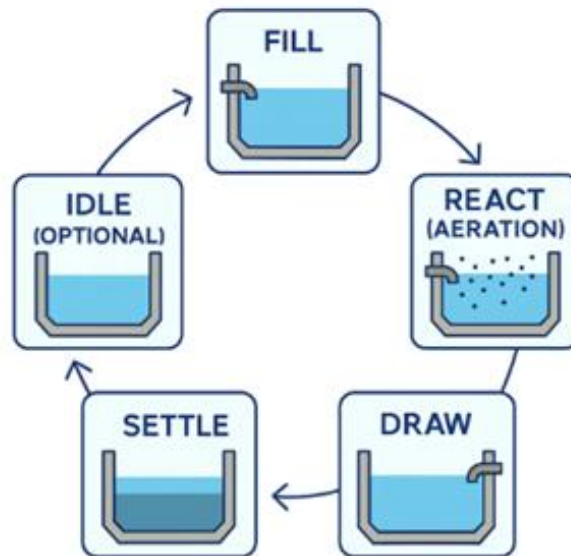
Κατά το στάδιο της καθίζησης, ο αερισμός και η ανάδευση σταματούν και η ενεργός ιλύς καθιζάνει. Στη συνέχεια οι βιολογικές κροκίδες (flocs) καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής, ενώ στο ανώτερο τμήμα σχηματίζεται καθαρό υπερκείμενο υγρό. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται διαχωρισμός του επεξεργασμένου νερού από τη βιομάζα μέσω της βαρύτητας.

4. Απομάκρυνση εκροής/ εκκένωση (Draw)

Με την ολοκλήρωση της καθίζησης το επεξεργασμένο υπερκείμενο υγρό απομακρύνεται από το πάνω μέρος της δεξαμενής, είτε μέσω κινητού υπερχειλιστή είτε με τη χρήση υποβρύχιας αντλίας, ώστε να αποφεύγεται η διατάραξη της καθιζάνουσας ιλύος.

5. Αναμονή ή απομάκρυνση ιλύος (Idle)

Το συγκεκριμένο στάδιο είναι προαιρετικό και πραγματοποιείται μεταξύ της απομάκρυνσης της εκροής (draw) και της επόμενης φάσης πλήρωσης (fill). Κατά τη φάση αυτή μπορεί να απομακρυνθεί η περίσσεια ενεργούς ιλύος (Waste Activated Sludge – WAS), προκειμένου να διατηρηθούν τα επιθυμητά επίπεδα συγκέντρωσης και ηλικίας της ιλύος. Τέλος η δεξαμενή μπορεί να παραμείνει προσωρινά σε κατάσταση αναμονής με σκοπό να προετοιμαστεί για τον επόμενο κύκλο πλήρωσης.



Εικόνα 5 :Απεικόνιση των πέντε σταδίων ενός αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (SBR)

4.3.2 Υβριδικά Συστήματα

Καθώς οι τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων εξελίσσονται, παρατηρείται μια αυξανόμενη τάση προς το συνδυασμό διαφορετικών συστημάτων, με σκοπό την ανάπτυξη πιο αποδοτικών, ανθεκτικών και αποδοτικά βιώσιμων λύσεων. Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα αποτελεί ο αντιδραστήρας διαδοχικών διακοπτόμενων φάσεων βιοφίλμ (Sequencing Batch Biofilm Reactor – SBBR), μέσω του οποίου συνδυάζονται οι αρχές τόσο του αντιδραστήρα διαδοχικών διακοπτόμενων φάσεων (SBR) όσο και του αντιδραστήρα κινούμενης βιοκλίνης (Moving Bed Bioreactor – MBBR) (Chen K., 2025).

SBBR - Sequencing Batch Biofilm Reactor

Ο αντιδραστήρας διαδοχικών διακοπτόμενων φάσεων βιοφίλμ (SBBR), λειτουργεί όπως ο SBR αλλά στο εσωτερικό του ενσωματώνονται φορείς βιοφίλμ, παρόμοιους με αυτούς που χρησιμοποιούνται στον MBBR. Μέσω αυτού του συστήματος

συνδυάζονται δυο βιολογικά συστήματα στην ίδια δεξαμενή. Το σύστημα επωφελείται τόσο από την αιωρούμενη ανάπτυξη μικροοργανισμών (ενεργός ιλύς) όσο και από την προσκολλημένη ανάπτυξη (βιοφίλμ πάνω στους πλαστικούς φορείς). Πιο συγκεκριμένα, οι πλαστικοί κινούμενοι φορείς που βρίσκονται στο σύστημα διατηρούνται σε αιώρηση μέσω αερισμού ή ανάδευσης. Παράλληλα πραγματοποιούνται τα τέσσερα βασικά στάδια (πλήρωση, αερισμός/ βιολογική αντίδραση, καθίζηση και απομάκρυνση εκροής/ εκκένωση) που εφαρμόζονται και στον SBR. Κατά τη φάση της καθίζησης η αιωρούμενη βιομάζα καθιζάνει ενώ το βιοφίλμ που είναι προσκολλημένο στους πλαστικούς φορείς παραμένει στον αντιδραστήρα. Με αυτό το τρόπο το επεξεργασμένο νερό διαχωρίζεται από την καθιζάνουσα αιωρούμενη ιλύ (Chen K. , 2025).

Το σύστημα SBBR, προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Ένα από τα σημαντικότερα είναι η επίτευξη υψηλής απόδοσης επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD), χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), αζώτου (N) καθώς και φωσφόρου (P). Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στην ύπαρξη τόσο της αιωρούμενης όσο και της προσκολλημένης βιομάζας. Παράλληλα η υψηλή συγκέντρωση ενεργής βιομάζας στους φορείς επιτρέπει στο SBBR να διαχειρίζεται υψηλότερα οργανικά και υδραυλικά φορτία σε μικρότερο όγκο αντιδραστήρα, κάτι το οποίο θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί σε ένα συμβατικό SBR ή σε ένα σύστημα ενεργούς ιλύος. Επίσης η παραγόμενη ιλύς παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά, κάτι το οποίο οφείλεται στην παρουσία του βιοφίλμ. Ειδικότερα συμβάλλει στη δημιουργία πιο σταθερής ιλύος, με αποτέλεσμα να βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά καθίζησης των κροκίδων (Chen K. , 2025).

Κεφάλαιο 5: Τεχνολογίες επεξεργασίας πετρελαιοειδών

Τα ύδατα που περιέχουν υπολείμματα πετρελαίου, όπως ορίζεται και από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization – IMO) είναι απαραίτητο να υποστούν επεξεργασία πριν απορριφθούν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με φυσικές, χημικές ή βιολογικές μεθόδους .

5.1 Φυσικές μέθοδοι

Οι φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας των υδρογονανθράκων των πετρελαιοειδών αποβλήτων περιλαμβάνει την καθίζηση για το διαχωρισμό των ακαθαρσιών μέσω βαρύτητας, το φιλτράρισμα καθώς και τους υδρο-κυκλώνες για την περαιτέρω απομάκρυνσή τους (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024). Ωστόσο εξαιτίας της παρουσίας του πετρελαίου σε μορφή γαλακτώματος, οι φυσικές μέθοδοι πολλές φορές δεν επαρκούν για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Επίσης τα συγκεκριμένα σταγονίδια πετρελαίου έχουν πολύ μικρή διάμετρο ($<20\text{ mm}$), με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο διαχωρισμός τους με τη βοήθεια συμβατικών συστημάτων διαχωρισμού πετρελαίου - νερού (Vyrides, et al., 2018).

5.1.1 Διαχωρισμός με βαρύτητα

Η μέθοδος διαχωρισμού με βαρύτητα αποτελεί μια από τις πιο βασικότερες φυσικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων στη ναυτιλία. Πρόκειται για μια διεργασία που συνήθως χρησιμοποιείται ως προ – επεξεργασία ή πρωτοβάθμια επεξεργασία λυμάτων (Han, Zhang , Chu , Chen, & Zhou, 2019). Θεωρείται ως μέθοδος χαμηλού κόστους και απλής δομής (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024), η οποία βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας που υπάρχει μεταξύ μείγματος πετρελαίου - νερού. Έχει αποδειχθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πυκνότητας τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα διαχωρισμού (Han, Zhang , Chu , Chen, & Zhou, 2019). Ο σκοπός της συγκεκριμένης διεργασίας είναι να απομακρυνθούν τόσο τα σταγονίδια πετρελαίου όσο και μεγάλα σωματίδια μεγέθους 5mm έως 15 mm. Όσον αφορά τα σταγονίδια του πετρελαίου, εξαιτίας του ότι η πυκνότητά τους είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή του νερού, ανέρχονται στην επιφάνεια της δεξαμενής σχηματίζοντας ένα στρώμα πετρελαίου με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί (Muvel, Jinda, Tewari, & Anand, 2025).

Ωστόσο η μελετώμενη διεργασία παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα τόσο η λειτουργία όσο και η διαχείριση της είναι πολύπλοκες. Παράλληλα χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ικανότητα διαχωρισμού, καθώς δεν

είναι αποτελεσματική για το διαχωρισμό γαλακτοματοποιημένου πετρελαίου, κολλοειδών μετάλλων και διαλυμένων ενώσεων. Τέλος χαρακτηρίζεται ως χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί μεγάλο χώρο εγκατάστασης (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024).

5.1.2 Διαχωρισμός με διήθηση

Ο διαχωρισμός με διήθηση είναι μια διεργασία απλής λειτουργίας (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024), η οποία πραγματοποιείται μέσω ενός πορώδους μέσου. Τα πορώδη αυτά μέσα μπορεί να είναι μεμβράνες και ο διαχωρισμός μέσω αυτών πραγματοποιείται λόγω της μικροπορώδους δομής τους (Han, Zhang, Chu, Chen, & Zhou, 2019). Οι μεμβράνες ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διάμετρο των πόρων τους: μικροδιήθησης (Microfiltration Membrane –MF), υπερδιήθησης (Ultrafiltration Membrane – UF), νανοδιήθησης (Nanofiltration Membrane) και αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis Membrane – RO).

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν διεξαχθεί, έχει αποδειχθεί ότι ο συνδυασμός φίλτρων υπερδιήθησης και φίλτρων αντίστροφης ώσμωσης, UF/RO, έχουν υψηλή αποδοτικότητα στην επεξεργασία υδάτων σεντίνας. Ειδικότερα συμβάλλουν αρκετά στην συγκράτηση τόσο οργανικών όσο και ανόργανων ενώσεων, (Han, Zhang, Chu, Chen, & Zhou, 2019).

Για να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός μέσω της διήθησης, το πετρέλαιο διέρχεται μέσα από το πορώδες στρώμα με αποτέλεσμα να συγκρατούνται τα σταγονίδια του όπως επίσης και άλλα σωματίδια που εμπεριέχονται στα λύματα. Με αυτό το τρόπο απομακρύνεται το νερό και έτσι πραγματοποιείται ο διαχωρισμός μεταξύ πετρελαίου - νερού (Han, Zhang, Chu, Chen, & Zhou, 2019).

Ωστόσο και αυτή η μέθοδος παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, καθώς θεωρείται ως μια ακριβή διεργασία ως προς τη συντήρηση της όπως επίσης τα φίλτρα χρειάζονται συχνό καθαρισμό (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024).

5.1.3 Υδρο-κυκλώνες

Οι υδρο-κυκλώνες (hydro-cyclones) είναι διαχωριστές, οι οποίοι αξιοποιούν τη φυγόκεντρο δύναμη για το διαχωρισμό του πετρελαίου από τα αντίστοιχα λύματα και εντάσσεται στις μεθόδους προ-επεξεργασίας. Οι υδρο-κυκλώνες αποτελούνται από έναν κυλινδρικό θάλαμο συνδεδεμένο με ένα κωνικό τμήμα, το οποίο καταλήγει σε μια έξοδο στο κάτω μέρος. Κατά την επεξεργασία πετρελαιοειδών αποβλήτων, το

πετρέλαιο απομακρύνεται από την έξοδο μέσω της υπερχειλίσης ενώ τα στερεά σωματίδια αφαιρούνται μέσω της υποχειλίσης (Muvel, Jinda, Tewari, & Anand, 2025).

Οι συγκεκριμένοι διαχωριστές είναι αρκετά αποτελεσματικοί και μπορούν να μειώσουν τη συγκέντρωση πετρελαίου από 200-2000 ppm σε 20-100 ppm, ειδικά όταν πρόκειται για σταγονίδια πετρελαίου μεγαλύτερα από 50 mm. Αντίθετα, όταν το μέγεθος των σωματιδίων είναι αρκετά μικρό, κάτω από 5 mm τότε η απόδοση τους μειώνεται αρκετά. Επίσης στα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο μικρός χώρος που καταλαμβάνουν, τα χαμηλά έξοδα συντήρησης και η μικρή κατανάλωση ενέργειας (Muvel, Jinda, Tewari, & Anand, 2025).

5.2 Χημικές μέθοδοι

Οι χημικές διεργασίες κατατάσσονται επίσης στις πιο διαδεδομένες κατηγορίες επεξεργασίας θαλάσσιων πετρελαιοειδών αποβλήτων. Μέσω αυτών αξιοποιούνται χημικές αντιδράσεις με σκοπό την απομάκρυνση των σταγονιδίων πετρελαίου, αιωρούμενων στερεών (Suspended Solids – SS) καθώς και τη μείωση της χημικής απαίτησης οξυγόνου (COD). Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα μελετηθούν δυο βασικές κατηγορίες χημικών μεθόδων, οι ηλεκτροχημικές διεργασίες και η προσρόφηση. (Han, Zhang, Chu, Chen, & Zhou, 2019).

5.2.1 Ηλεκτροχημικές Διεργασίες

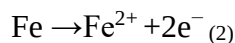
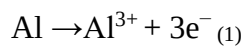
Οι ηλεκτροχημικές διεργασίες αποτελούν μια κατηγορία χημικών μεθόδων επεξεργασίας λυμάτων, στις οποίες ανήκουν η ηλεκτροσυσσώματωση, η ηλεκτροεπίπλευση και οι διεργασίες άμεσης και έμμεσης ηλεκτροοξείδωσης ή ηλεκτροχημική διεργασία Fenton. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί σε οικιακά λύματα, σε βιομηχανικά λύματα αλλά και σε πετρελαιοειδή απόβλητα πλοίων (Ulucan & Kurt, 2015).

Πρόκειται για διεργασίες που προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα. Ειδικότερα πρόκειται για φιλικές μεθόδους προς το περιβάλλον και η λειτουργία τους είναι σχετικά απλή. Επιπλέον χαρακτηρίζονται από ενεργειακή αποδοτικότητα, απαιτούν ελάχιστη χρήση χημικών και είναι ικανές να απομακρύνουν αρκετά κολλοειδή (Yeh & Hsu, 2025). Ωστόσο το κόστος τους θεωρείται μέτριο έως υψηλό λόγω του ακριβού αρχικού εξοπλισμού και της συνεχούς συντήρησης που απαιτείται εξαιτίας της ρύπανσης των ηλεκτροδίων (Dube, J. Malode, Alshehri, & Shetti, 2025). Παρόλα αυτά

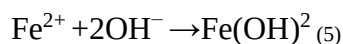
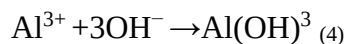
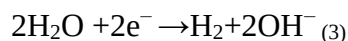
η συγκεκριμένη διεργασία χαρακτηρίζεται ως οικονομικά αποδοτική (Yeh & Hsu, 2025).

Κατά τη διεργασία της ηλεκτροσυσσωμάτωσης, τα ηλεκτρόδια ανόδου (ηλεκτρόδια αλουμινίου και σιδήρου) διαλύονται σε ιόντα (ιόντα αλουμινίου Al^{+3} και ιόντα σιδήρου Fe^{+2}), όπως φαίνεται στις παρακάτω χημικές αντιδράσεις ⁽¹⁾, ⁽²⁾. Όσον αφορά τα ηλεκτρόδια αλουμινίου και σιδήρου, έχει αποδειχθεί ότι η επεξεργασία λυμάτων με τη χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου είναι πιο αποτελεσματική συγκριτικά με τη χρήση ηλεκτροδίων σιδήρου. Στη συνέχεια μέσω των αντιδράσεων ⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾ σχηματίζονται υδροξείδια μετάλλων, δηλαδή $Al(OH)^3$ $Fe(OH)^2$, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή ικανότητα προσρόφησης στο νερό. Έπειτα τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα μετάλλων μπορούν να σχηματίσουν συσσωματώματα υψηλής πυκνότητας, τα οποία έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν γαλακτοποιημένα υλικά, αιωρούμενα στερεά και κolloειδή. Παράλληλα το αέριο H_2 που παράγεται στην κάθοδο (χημική αντίδραση ⁽³⁾) δημιουργεί μεγάλες επιφάνειες για την προσρόφηση ιζημάτων και σωματιδίων και τα απομακρύνει μέσω επίπλευσης, δηλαδή με τη διαδικασία της ηλεκτροεπίπλευσης (Ulucan & Kurt, 2015).

Αντιδράσεις στην άνοδο (Anode Reactions):

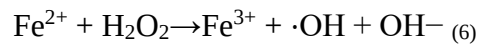


Αντιδράσεις στην κάθοδο (Cathode Reactions):



Όσον αφορά τη τρίτη μέθοδο που ανήκει στις ηλεκτροχημικές διεργασίες, τη λεγόμενη ηλεκτροχημική οξείδωση, πρόκειται για μια διεργασία οξείδωσης που επιτυγχάνεται μέσω του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) και των ριζών υδροξυλίου (OH), οι οποίες δημιουργούνται μέσω των παραγόμενων αερίων (H_2 και O_2) με τη βοήθεια αδιάλυτων ηλεκτροδίων. Στην πρώτη κατηγορία ηλεκτροοξείδωσης, στην άμεση, οι ρίζες υδροξειδίου σχηματίζονται πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ενώ στην δεύτερη κατηγορία, στην έμμεση (ηλεκτροχημική διεργασία Fenton), σχηματίζονται

ύστερα από την προσθήκη ενός οξειδωτικού χημικού στο σύστημα (Ulucan & Kurt, 2015).



5.2.1.1. Σύγκριση μεθόδων

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, διαπιστώθηκαν διαφορές μεταξύ των παραπάνω μελετώμενων μεθόδων ως προς την αποτελεσματικότητά τους στην επεξεργασία λυμάτων. Η επεξεργασία λυμάτων τόσο με ηλεκτροσυσσωμάτωση όσο και με ηλεκτροεπίπλευση με τη χρήση ηλεκτροδίων σιδήρου παρουσίασαν χαμηλά ποσοστά απομάκρυνσης της χημικής απαίτησης οξυγόνου (COD) και ελαίων-λιπών. Παράλληλα αποδείχθηκε ότι τόσο τα επίπεδα θολότητας όσο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) ήταν αρκετά υψηλά, το οποίο οφείλεται στην οξείδωση του Fe(II) μετά το πέρας της διεργασίας.

Αντίθετα η επεξεργασία λυμάτων μέσω της έμμεσης ηλεκτροοξείδωσης (ηλεκτροχημική διεργασία Fenton) παρουσίασε υψηλότερες αποδόσεις. Ειδικότερα παρατηρήθηκε αύξηση της απομάκρυνσης ελαίων-λιπών, όπως επίσης του COD. Παράλληλα η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) απομακρύνθηκε πλήρως, κάτι το οποίο δείχνει και απομάκρυνση όλων των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ρύπων. Τέλος όσον αφορά την παραγόμενη ιλύ μέσω της ηλεκτροχημικής διεργασίας Fenton είναι λιγότερη αλλά πιο σταθερή συγκριτικά με αυτή που προκύπτει από τις άλλες δύο διεργασίες (Ulucan & Kurt, 2015). Ωστόσο οι διεργασίες της ηλεκτροοξείδωσης, παρά την υψηλή αποδοτικότητά τους, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Ειδικότερα, ένα από τα βασικότερα είναι η υψηλή απαίτηση κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα σε περίπτωση ανεπαρκούς ρύθμισης του pH, μπορεί να παρατηρηθεί σχηματισμός χλωριωμένων παραπροϊόντων ή σταθερών χλωρικών ενώσεων. Τέλος κατά τη συγκεκριμένη διεργασία είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτροδίων υψηλών προδιαγραφών (πχ λευκόχρυσος), τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή ανθεκτικότητα στη διάβρωση (Leonard, et al., 2026).

5.2.2 Προσρόφηση

Η προσρόφηση αποτελεί μια μέθοδο που χρησιμοποιεί στερεά προσροφητικά υλικά, τα οποία διαθέτουν καλό πορώδες καθώς και μεγάλη επιφάνεια. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, συμβάλλουν στο να μπορούν να προσροφούν τόσο μικρά όσο και μεσαίου μεγέθους μόρια πετρελαίου στην επιφάνειά τους με σκοπό το διαχωρισμό τους

από το νερό. Το προσροφητικό υλικό, όταν χρησιμοποιείται για την επεξεργασία πετρελαιοειδών λυμάτων δεν προσροφά μόνο τις μη αποικοδομήσιμες υδρογονανθρακικές οργανικές ενώσεις και μειώνει το COD, αλλά παράλληλα απομακρύνει τόσο το χρώμα όσο και τις οσμές των αντίστοιχων λυμάτων (Han, Zhang , Chu , Chen, & Zhou, 2019).

Δυο χαρακτηριστικά παραδείγματα προσροφητικών υλικών είναι ο ζεόλιθος και ενεργός άνθρακας. Ωστόσο και τα δυο παρουσιάζουν το μειονέκτημα της περιορισμένης προσροφητικής ικανότητας, του μεγάλου χρόνου προσρόφησης, και του υψηλού κόστους (Han, Zhang , Chu , Chen, & Zhou, 2019).

5.3 Βιολογικές μέθοδοι

Οι φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων που μελετήθηκαν παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία όσον αφορά την παραγωγή εκροών που συμμορφώνονται με τα όρια διάθεσης (Piazzese, et al., 2018). Ωστόσο, πολλές φορές δημιουργούν προβλήματα εξαιτίας της χρήσης χημικών ουσιών, υψηλής ενεργειακής απαίτησης και παραγωγής δευτερογενούς ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο, κυρίως σε λύματα που χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες και υδρογονάνθρακες πετρελαίου (Bella, et al., 2015).

Στις βιολογικές μεθόδους επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων ανήκουν η μικροβιακή βιοαποδόμηση, οι βιοαντιδραστήρες με μεμβράνες (MBR) και οι βιοαντιδραστήρες βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (MBBR), οι οποίες θα μελετηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.

5.3.1 Μέθοδος μικροβιακής βιοαποδόμησης

Η βιοαποδόμηση πετρελαίου και υδρογονανθράκων πραγματοποιείται μέσω μικροοργανισμών (Piazzese, et al., 2018). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοαποικοδόμηση των υδρογονανθράκων από τους μικροοργανισμούς ποικίλουν. Ειδικότερα με σκοπό τη διέγερση των μικροοργανισμών εφαρμόζονται τεχνολογίες βιοδιέγερσης, οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν με προσθήκη θρεπτικών ουσιών, συν-υποστρωμάτων, βελτιωτικών ουσιών καθώς και μέσω της αύξησης της συγκέντρωσης οξυγόνου (Piazzese, et al., 2018).

Η μελετώμενη μέθοδος παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της, ένα από αυτά είναι ότι με τη χρήση μικροοργανισμών παράγονται διάφορες ενώσεις, όπως βιοεπιφανειοδραστικές ουσίες, οι οποίες συμβάλλουν στην αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας των υδρογονανθράκων και κατ' επέκταση στην επιτάχυνση των διεργασιών αποδόμησης. Παράλληλα με τη μέθοδο αυτή αποφεύγεται η χρήση χημικών ουσιών (Piazzese, et al., 2018). Επιπλέον η αποδόμηση των οργανικών ρύπων μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμη και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Επίσης μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου πραγματοποιείται επεξεργασία των γαλακτοποιημένων διαλυμάτων, κάτι το οποίο πολλές φορές δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω των φυσικοχημικών διεργασιών. Τέλος, πλεονέκτημα της διεργασίας, αποτελούν το χαμηλό λειτουργικό κόστος καθώς και η απλή συντήρηση και διαχείριση της (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024).

Από την άλλη πλευρά ένα από τα μειονεκτήματα της είναι η απαίτησή για προσθήκη θρεπτικών συστατικών καθώς και η ρύθμιση του pH. Επίσης το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό, ενώ παράλληλα απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για τη λειτουργία και την παρακολούθηση της διεργασίας (Pinar & Rodríguez-Couto, 2024).

5.3.2 Βιοαντιδραστήρες με Μembrάνες (MBR) και Βιοαντιδραστήρες Βιοφίλμ Κινούμενης Κλίνης (MBBR)

Σε ορισμένες ερευνητικές εφαρμογές έχει μελετηθεί η χρήση του συστήματος MBR και στην επεξεργασία νερών μηχανοστασίου (bilge water), πέρα από την ευρεία εφαρμογή του σε γκρίζα και μαύρα ύδατα (Vyrídes, et al., 2018).

Το μελετώμενο σύστημα λειτουργεί τόσο με ανακυκλοφορία (recycle side-stream) όσο και χωρίς αυτήν (dead-end side-stream). Παρατηρήθηκε ότι και στις δυο περιπτώσεις επιτυγχάνεται συγκέντρωση πετρελαίου μικρότερη από 5 mg/ L. Όμως στην περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί χωρίς ανακυκλοφορία και με υψηλό ποσοστό ανάκτησης της μονάδας διήθησης (93%), τότε παρατηρείται έντονη ρύπανση της μεμβράνης του συστήματος (Vyrídes, et al., 2018). Η ρύπανση μπορεί να επιδεινωθεί κατά την επεξεργασία των αποβλήτων, καθώς αυτά χαρακτηρίζονται τόσο από υψηλά επίπεδα αλατότητας όσο και από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες με αποτέλεσμα να παρατηρείται υποβάθμιση του μικτού υγρού. Ειδικότερα σημαντικές είναι οι μεταβολές στο ιξώδες, στην ποσότητα των νηματοειδών βακτηρίων, στα εξωκυτταρικά

πολυμερικά συστατικά (EPS) καθώς και στα διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (Soluble Microbial Products - SMP). Με σκοπό να βελτιωθεί η απόδοση του συνολικού συστήματος, όσον αφορά την απομάκρυνση των ρύπων και τη διήθηση μέσω μεμβράνης έχει προταθεί το σύστημα MBR να συνδυαστεί με αντιδραστήρες βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (Moving Bed Biofilm Reactor - MBBR), ώστε να αναπτυχθεί βιοφίλμ. Το συγκεκριμένο σύστημα βασίζεται στη χρήση ελεύθερα κινούμενων πλαστικών φορέων, τα οποία έχουν ελαφρώς μικρότερη πυκνότητα από αυτή του νερού και πάνω σε αυτά οι μικροοργανισμοί σχηματίζουν βιοφίλμ. Παράλληλα σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί ότι μέσω αυτής της διεργασίας η βιομάζα που έχει προσκολληθεί στα ελεύθερα κινούμενα πλαστικά έχει υψηλότερη ικανότητα να βιοαποικοδομεί οργανικές ενώσεις σε σύγκριση με τη διαδικασία της ενεργούς ιλύος (Bella, et al., 2015).

5.4 Σύγκριση μεθόδων επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων

Οι μέθοδοι επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων διαφέρουν σημαντικά ως προς την βασική αρχή λειτουργίας, την αποτελεσματικότητα, το κόστος, την ενεργειακή απαίτηση, την πολυπλοκότητα λειτουργίας και το είδος των ρύπων που μπορούν να απομακρύνουν.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα⁽¹⁾ ο διαχωρισμός πετρελαίου – νερού βασίζεται σε διαφορετική αρχή λειτουργίας σε κάθε περίπτωση. Οι φυσικές διεργασίες βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα, όπως στη βαρύτητα, στη διήθηση ή στη φυγόκεντρο δύναμη. Οι χημικές διεργασίες βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις και σε ηλεκτροχημικά φαινόμενα. Όσον αφορά τις βιολογικές διεργασίες πραγματοποιούνται μέσω μικροοργανισμών που αποδομούν τόσο τους υδρογονάνθρακες όσο και τους οργανικούς ρύπους. Εξαιτίας της χρήσης μικροοργανισμών οι βιολογικές διεργασίες ξεχωρίζουν καθώς θεωρούνται ως πιο φιλικές προς το περιβάλλον, συγκριτικά με τις φυσικές και χημικές διεργασίες.

Επίσης οι βιολογικές μέθοδοι παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση γαλακτοματοποιημένου πετρελαίου, κάτι το οποίο δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω φυσικών διεργασιών. Αντίθετα οι φυσικές διεργασίες, εφαρμόζονται κυρίως ως πρώτο στάδιο επεξεργασίας των πετρελαιοειδών αποβλήτων, καθώς είναι περισσότερο αποτελεσματικές στην αφαίρεση μεγάλων σωματιδίων πετρελαίου.

Όσον αφορά το κόστος και την πολυπλοκότητα λειτουργίας, τόσο οι φυσικές όσο και οι βιολογικές διεργασίες θεωρούνται ως πιο οικονομικές καθώς πρόκειται για πιο απλές λειτουργίες. Αντίθετα οι χημικές αποτελούνται από υψηλότερου κόστους εξοπλισμό, όπως επίσης απαιτούν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο οι χημικές διεργασίες έχουν αποδειχθεί αρκετά αποδοτικές ως προς την απομάκρυνση ρύπων.

Όλες οι μελετώμενες διεργασίες χαρακτηρίζονται τόσο από πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Συνεπώς, καμία από αυτές τις μεθόδους δεν μπορεί να θεωρηθεί από μόνη της επαρκής για την πλήρη επεξεργασία πετρελαιοειδών αποβλήτων. Ειδικότερα αποδείχθηκε ότι οι φυσικές διεργασίες εφαρμόζονται κυρίως ως αρχικό στάδιο επεξεργασίας, οι χημικές διεργασίες επιτυγχάνουν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων, ενώ οι βιολογικές μέθοδοι θεωρούνται ως περισσότερο βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές η βέλτιστη λύση είναι ο συνδυασμός αυτών των διεργασιών, με σκοπό να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση επεξεργασίας.

	Μέθοδος	Βασική αρχή λειτουργίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Φυσικές διεργασίες	Διαχωρισμός με βαρύτητα	• Πρωτοβάθμια επεξεργασία λυμάτων • Διαχωρισμός πετρελαίου – νερού λόγω διαφοράς πυκνότητας	• Χαμηλό κόστος • Στάδιο προ-επεξεργασίας • Απλή λειτουργία • Απομάκρυνση σταγονιδίων και μεγάλων σωματιδίων πετρελαίου (5mm-15mm)	• Λειτουργία και διαχείριση πολύπλοκες • Μη αποτελεσματική διεργασία για διαχωρισμό γαλακτοματοποιημένου πετρελαίου, κολλοειδών μετάλλων και διαλυμένων ενώσεων • Χρονοβόρα • Απαίτηση μεγάλου χώρου εγκατάστασης
	Διαχωρισμός με διήθηση	• Διαχωρισμός πετρελαίου-νερού μέσω πορώδους μέσου • Χρήση ποικίλων φίλτρων: 1. Μικροδιήθησης (MF) 2. Υπερδιήθησης (UF) 3. Νανοδιήθησης 4. Αντίστροφης όσμωσης (RO)	• Απλή λειτουργία • Συνδυασμός φίλτρων (UF/RO) 1. Υψηλή αποδοτικότητα σε ύδατα σεντίνας 2. Συγκράτηση οργανικών και ανόργανων ενώσεων	• Υψηλό κόστος συντήρησης • Απαίτηση συχνού καθαρισμού φίλτρων
	Υδρο-κυκλώνες	• Πρωτοβάθμια επεξεργασία λυμάτων • Αξιοποίηση φυγόκεντρου δύναμης	• Αποτελεσματική διεργασία για σωματίδια μεγέθους μεγαλύτερα από 50mm • Απαίτηση μικρού χώρου • Χαμηλά έξοδα συντήρησης • Μικρή κατανάλωση ενέργειας	• Μη αποτελεσματική διεργασία για σωματίδια μικρού μεγέθους (< 5mm)

	Μέθοδος	Βασική αρχή λειτουργίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χημικές διεργασίες	Ηλεκτροσυσσωμάτωση	Χρήση ηλεκτροδίων (αλουμινίου και σιδήρου)	• Ενεργειακή αποδοτικότητα • Ελάχιστη χρήση χημικών • Απομάκρυνση κολλοειδών	• Μη αποδοτική για απομάκρυνση COD και ελαίων-λίπων (μέσω ηλεκτροδίων σιδήρου) • Υψηλή τιμή θολότητας και αιωρούμενων στερεών (TSS)
	Ηλεκτροεπίπλευση	Σχηματισμός συσσωματωμάτων υψηλής πυκνότητας		• Μη αποδοτική για απομάκρυνση COD και ελαίων-λίπων (μέσω ηλεκτροδίων σιδήρου) • Υψηλή τιμή θολότητας και αιωρούμενων στερεών (TSS)
	Ηλεκτροχημική οξείδωση	Διεργασία οξείδωσης μέσω σχηματισμού του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) και των ριζών υδροξυλίου ($OH\cdot$),	• Αποτελεσματική απομάκρυνση: 1. Χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) 2. Βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) 3. Ελαίων-λίπων 4. Βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ρύπων • Λιγότερη ποσότητα παραγόμενης ιλύς • Σταθερότερη ιλύς	• Υψηλή κατανάλωση ενέργειας • Ρύθμιση pH • Χρήση ηλεκτροδίων υψηλών προδιαγραφών
	Προσρόφηση	Χρήση στερεών προσροφητικών υλικών	• Απομάκρυνση μικρών και μεσαίου μεγέθους μορίων πετρελαίου • Προσρόφηση μη αποικοδομήσιμων υδρογονανθρακικών οργανικών ενώσεων • Μείωση COD, χρώματος και θολότητας	• Υψηλό κόστος • Αυξημένος χρόνος προσρόφησης • Περιορισμένη προσροφητική ικανότητα

	Μέθοδος	Βασική αρχή λειτουργίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Βιολογικές διεργασίες	Μικροβιακή βιοαποδόμηση	Αποδόμηση υδρογονανθράκων μέσω μικροοργανισμών	• Φιλική προς το περιβάλλον • Αυξημένη βιοδιαθεσιμότητα • Αποδόμηση οργανικών ρύπων σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις • Επεξεργασία γαλακτοματοποιημένων διαλυμάτων • Χαμηλό λειτουργικό κόστος • Απλή συντήρηση και διαχείριση	• Απαραίτητη η προσθήκη θρεπτικών συστατικών • Ρύθμιση pH • Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης
	MBR / MBBR	Συνδυασμός βιολογικής επεξεργασίας και μεμβρανών ή βιοφίλμ	• Υψηλή απομάκρυνση πετρελαίου και οργανικών ενώσεων	• Ρύπανση μεμβρανών

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων

5.5 Συστήματα επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων - Συνδυασμός τεχνολογιών

Πολλές φορές η χρήση μόνο μιας διεργασίας για τα πετρελαιοειδή απόβλητα των πλοίων δεν επαρκεί ώστε να αφαιρεθεί το πετρέλαιο από τα λύματα καθώς συναντάται σε διάφορες μορφές. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να είναι γαλακτοματοποιημένο, επιπλέον, διαλυμένο ή διασκορπισμένο. Επίσης στα λύματα περιέχονται και αιωρούμενα στερεά (SS), χημικό οξυγόνο (COD) και ενδεχομένως επικίνδυνα μέταλλα. Επομένως ο συνδυασμός ποικίλων διεργασιών επεξεργασίας θεωρείται αρκετές φορές απαραίτητος για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων (Han, Zhang , Chu , Chen, & Zhou, 2019). Στη συνέχεια αναλύεται το σύστημα με το οποίο πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του μείγματος λαδιού-νερού (Oil Water Separator – OWS), το οποίο αποτελεί παράδειγμα συνδυασμού διεργασιών.

5.5.1 Διαχωρισμός πετρελαίου-νερού (Oil Water Separator – OWS)

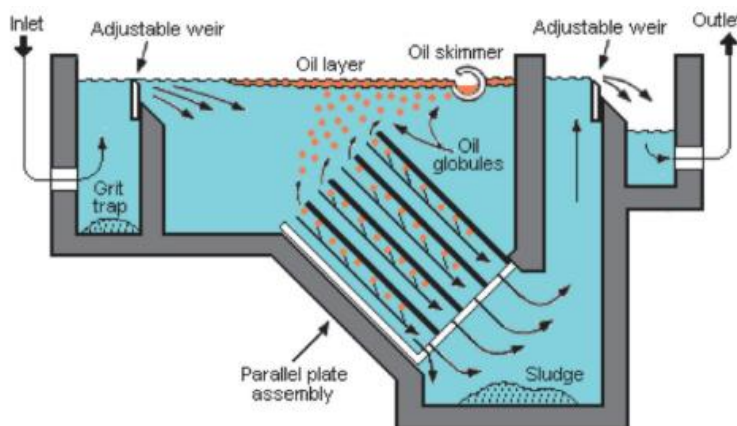
Το σύστημα διαχωρισμού πετρελαίου- νερού (OWS) χαρακτηρίζεται ως ένα σύστημα επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων, το οποίο συνδυάζει όλους τους τύπους διεργασιών που μελετήθηκαν, φυσικές, χημικές καθώς και βιολογικές.

Πιο συγκεκριμένα το σύστημα αυτό αποτελείται από τρία βασικά τμήματα, τη μονάδα διαχωρισμού, τη μονάδα φίλτρου, τον ελεγκτή περιεκτικότητας σε πετρέλαιο και τη μονάδα ελέγχου. Όσον αφορά τη μονάδα διαχωρισμού, σε αυτή εντάσσονται τόσο οι διαχωριστές βαρύτητας όσο και οι φυγοκεντρικοί διαχωριστές, οι οποίοι αποτελούν το πρώτο στάδιο επεξεργασίας. Στη συνέχεια ακολουθούν άλλες τεχνικές διαχωρισμού, όπως επίπλευση, συσσωμάτωση, κροκίδωση, διήθηση, βιολογική επεξεργασία, απορρόφηση και προσρόφηση (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

5.5.1.1 Μέθοδος βαρύτητας

Η επεξεργασία των υδάτων σεντίνας (bilge water) ξεκινά με τη μέθοδο βαρύτητας, με σκοπό να αφαιρεθούν τα βαρύτερα και τα ελαφρύτερα κλάσματα με βάση τη διαφορά πυκνότητας. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική για τα συγκεκριμένα ύδατα εξαιτίας του γαλακτοματοποιημένου πετρελαίου που μπορεί να εμπεριέχεται σε αυτά, το οποίο οφείλεται σε χημικούς γαλακτοματοποιητές, όπως διαλύτες και καθαριστικά.

Στη συγκεκριμένη διεργασία χρησιμοποιούνται υλικά συνένωσης (coalescing materials), τα οποία είναι ελαιόφιλα πολυμερή. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ελαιόφιλων πολυμερών είναι το πολυαιθυλένιο, το νάιλον και οι ίνες βάλου. Τα συγκεκριμένα πολυμερή εμφανίζονται είτε υπό μορφή χαλαρής κλίνης είτε παράλληλων πλακών, τα οποία προσελκύουν τα σταγονίδια πετρελαίου (oil globules) με σκοπό να προσκολληθούν στην επιφάνεια τους σχηματίζοντας ένα στρώμα πετρελαίου (oil layer). Στη συνέχεια αποκολλώνται από τις πλάκες και τότε ανεβαίνουν στην επιφάνεια της δεξαμενής. Έπειτα με τη βοήθεια αισθητήρων ανιχνεύεται η παρουσία του πετρελαίου και τότε ενεργοποιείται αυτόματα το σύστημα διαχωρισμού πετρελαίου- νερού ώστε το συλλεγμένο πετρέλαιο να μεταφερθεί σε ειδική δεξαμενή αποβλήτων. Για την απομάκρυνση του στρώματος πετρελαίου χρησιμοποιείται μια ειδική συσκευή απομάκρυνσης πετρελαίου (oil skimmer) που βρίσκεται στην επιφάνεια της δεξαμενής. Τέλος ανοίγουν οι βαλβίδες εκκένωσης και καθαρισμού με σκοπό την απομάκρυνση του διαχωρισμένου πετρελαίου από το σύστημα (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).



Εικόνα 6: Διαχωρισμός λαδιού-νερού (Oil Water Separator – OWS) (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021)

5.5.1.2 Μέθοδος φυγοκέντρισης

Όσον αφορά τους διαχωριστές της φυγοκέντρισης βασίζονται στην ίδια αρχή με αυτή των διαχωριστών της βαρύτητας, καθώς ο διαχωρισμός νερού- πετρελαίου οφείλεται στη διαφορετική τους πυκνότητα. Η φυγοκέντριση ενισχύει το διαχωρισμό αυξάνοντας την επίδραση της βαρύτητας, με αποτέλεσμα να ενισχύονται οι διεργασίες της πήξης και της κροκίδωσης. Κατά τη συγκεκριμένη διεργασία το νερό σεντίνας

εισέρχεται στο διαχωριστή όπου πραγματοποιείται η συνένωση (coalesce) των σταγονιδίων λαδιού εξαιτίας της φυγοκεντρικής δύναμης. Με το τρόπο αυτό δημιουργούνται συσσωματώματα, κάτι το οποίο συμβάλλει στην απομάκρυνση τους. Για το λόγο αυτό η μέθοδος της φυγοκέντρισης είναι πιο αποτελεσματική καθώς μέσω αυτής επιτυγχάνεται και η επεξεργασία ακόμα και γαλακτοματοποιημένου πετρελαίου, το οποίο δεν ήταν εφικτό να διαχωριστεί με τους διαχωριστές βαρύτητας. (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

Επομένως με τη συγκεκριμένη διεργασία απομακρύνεται μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου, ακόμη και όταν αυτό βρίσκεται σε γαλακτοματοποιημένη μορφή, όπως επίσης μέσω αυτής της μεθόδου μεταφέρεται χαμηλότερη συγκέντρωση αυτού στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Ωστόσο τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων διαχωριστών είναι ότι απαιτούν υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος, τακτική συντήρηση όπως επίσης κατά τη λειτουργία τους χρησιμοποιούνται κινητήρες υψηλής ισχύος (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

5.5.1.3 Επίπλευση

Το πετρέλαιο μπορεί να διαχωριστεί από το νερό μέσω της διεργασίας της επίπλευσης, το οποίο βασίζεται στη διαφορετική πυκνότητα που έχει το πετρέλαιο από το νερό. Η πυκνότητα του πετρελαίου είναι μικρότερη με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένα στρώμα στην επιφάνεια του νερού, το οποίο εύκολα μπορεί να αφαιρεθεί.

Η τεχνική της επίπλευσης χωρίζεται σε τρεις βασικές μεθόδους, στην ηλεκτροεπίπλευση, επίπλευση με αφρό καθώς και με διαλυμένο αέρα (DAF). Όσον αφορά την ηλεκτροεπίπλευση, το πετρέλαιο διαχωρίζεται από το νερό μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων με ηλεκτρόλυση. Κατά την ηλεκτρόλυση παράγονται φυσαλίδες, οι οποίες προκαλούν την άνοδο των ρύπων στην επιφάνεια του νερού. Στην επίπλευση με αφρό, εισέρχεται αέρας στο σύστημα με αποτέλεσμα να σχηματίζονται φυσαλίδες πάνω στις οποίες προσκολλώνται τα σταγονίδια λαδιού. Παράλληλα στο σύστημα προστίθενται επιφανειοδραστικές ουσίες, οι οποίες προσροφώνται στην επιφάνεια νερού ή αέρα των φυσαλίδων, με το υδρόφιλο μέρος στο νερό και το υδρόφοβο στο πετρέλαιο. Στη συνέχεια οι φυσαλίδες ανέρχονται στο διάλυμα, το πετρέλαιο συγκεντρώνεται στην επιφάνεια και σχηματίζεται ο αφρός. Η επίπλευση με διαλυμένο αέρα πραγματοποιείται όταν το νερό κορεστεί με αέριο υπό πίεση και τότε σχηματίζονται μικροφυσαλίδες αερίου. Στη συνέχεια οι φυσαλίδες προσκολλώνται στα

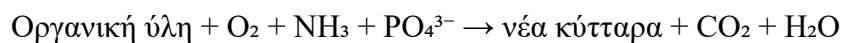
σταγονίδια πετρελαίου σχηματίζοντας συσσωματώματα, τα οποία ανέρχονται στην επιφάνεια του υγρού (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

5.5.1.4 Πήξη και κροκίδωση

Η πήξη αποτελεί μια ακόμη μέθοδο διαχωρισμού πετρελαίου – νερού, η οποία μπορεί να αφαιρέσει αποτελεσματικά τόσο διαλυμένο όσο και γαλακτοματοποιημένο πετρέλαιο. Κατά τη διεργασία της πήξης προστίθεται μια χημική ουσία στα λύματα (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021), κυρίως πηκτικά όπως θειικό αλουμίνιο, χλωριούχο σίδηρο, θειικό σίδηρο ή διάφορα (Muvel, Jinda, Tewari, & Anand, 2025) πολυμερή με σκοπό να αποσταθεροποιηθεί το φορτίο των κολλοειδών σωματιδίων, τα οποία λόγω του μικρού μεγέθους τους δεν είναι εφικτό να καθιζάνουν με τη βαρύτητα. Στη συνέχεια τα αποσταθεροποιημένα σωματίδια σχηματίζουν κροκίδες, δηλαδή μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία καθιζάνουν ευκολότερα και καθίσταται εφικτή η αφαίρεση τους (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

5.5.1.5 Βιολογική επεξεργασία

Ορισμένα συστήματα επεξεργασίας υδάτων σεντίνας περιλαμβάνουν βιολογική επεξεργασία, η οποία λειτουργεί ως βιοαντιδραστήρας. Κατά τη συγκεκριμένη διεργασία χρησιμοποιούνται μικροοργανισμοί, οι οποίοι μειώνουν ή απομακρύνουν τόσο οργανικές όσο και ανόργανες ενώσεις πριν την απόρριψη των επεξεργασμένων λυμάτων σε συστήματα συλλογής ή στη θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω χημική εξίσωση, κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία, την οξείδωση, οι μικροοργανισμοί μετατρέπουν την οργανική ύλη, συμπεριλαμβανομένου και του πετρελαίου, με παρουσία οξυγόνου (O_2), αζώτου που περιέχεται στην αμμωνία (NH_3) και φωσφόρου που περιέχεται στα φωσφορικά (PO_4^{3-}) σε νέα κυτταρική μάζα, διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O) (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).



Μερικά από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διεργασίας είναι η απλή συντήρηση και διαχείριση της όπως επίσης το χαμηλό της κόστος. Παράλληλα πραγματοποιείται αποικοδόμηση του γαλακτοματοποιημένου πετρελαίου μέσω των βακτηρίων, κάτι το οποίο καθίσταται δύσκολο μέσω χημικών και φυσικών διεργασιών (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

Ωστόσο η διεργασία έχει και κάποια μειονεκτήματα, όπως είναι η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά την οξείδωση, κάτι το οποίο συμβάλλει στην

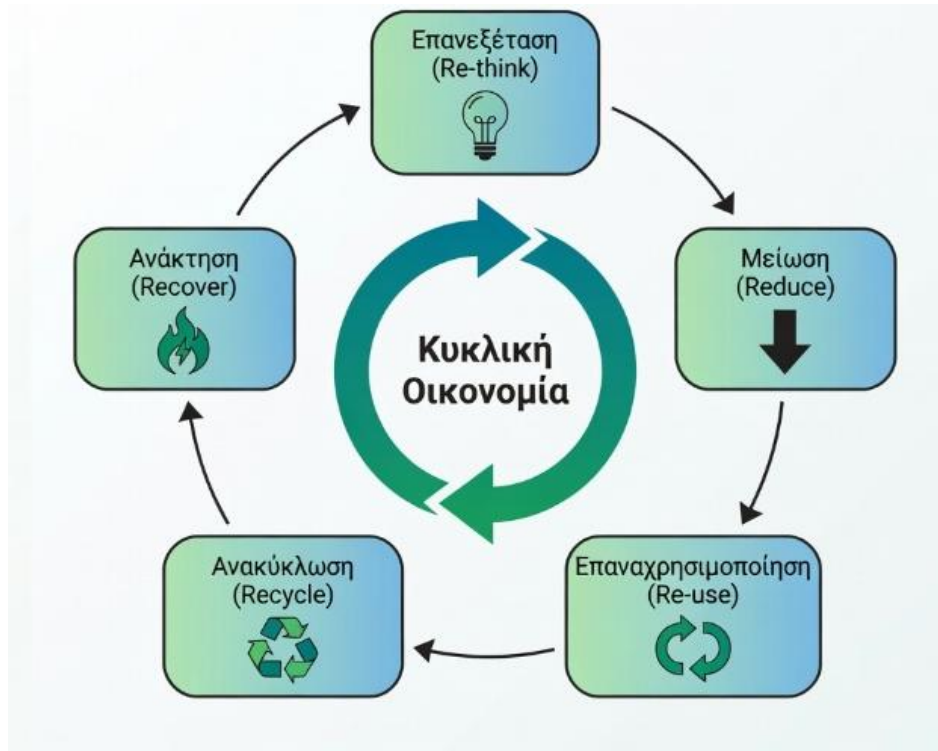
αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό
όπως επίσης απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό ώστε να διασφαλιστεί η σωστή
επεξεργασία των λυμάτων (Chandrasekaran, Javaid, & Sadiq, 2021).

Κεφάλαιο 6: Κυκλική Οικονομία και αξιοποίηση των πετρελαιοειδών αποβλήτων

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί αυξημένη ζήτηση για θαλάσσιες μεταφορές φορτίων, κυρίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Για το λόγο αυτό η Ε.Ε. κάνει προσπάθειες για την ανάπτυξη της θαλάσσιας οικονομίας, έχοντας ως κύριο στόχο την προώθηση φιλικών λύσεων προς το περιβάλλον. Ειδικότερα μέσω της εφαρμογής περιβαλλοντικών μέτρων επιδιώκεται η μετάβαση προς ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας. Η τήρηση υψηλών περιβαλλοντικών προτύπων είναι σημαντικό τόσο για τα πλοία όσο και για τους λιμένες. Ειδικότερα θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής των αποβλήτων που προκύπτουν από τα πλοία και από στους λιμένες αντίστοιχα. Παράλληλα είναι αναγκαία η ανάπτυξη τεχνολογιών μέσω των οποίων τα απόβλητα θα μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά σε περίπτωση παραγωγής τους, σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Για να πραγματοποιηθεί όμως αυτό θα πρέπει στο τομέα της ναυτιλίας να αναπτυχθούν βέλτιστες τεχνολογίες και οργανωτικές λύσεις όπως επίσης να υπάρξει η απαραίτητη πληροφόρηση μεταξύ λιμένων, πλοίων αλλά και εταιρειών διαχείρισης αποβλήτων (Deja, Weichbtoth , & Ślaczka, 2023).

6.1 Αρχές της κυκλικής οικονομίας στο ναυτιλιακό τομέα

Η κυκλική οικονομία αποτελεί ένα μοντέλο, το οποίο δίνει προτεραιότητα στην αποδοτική χρήση των πόρων και στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων. Για το λόγο αυτό πολλά λιμάνια παγκοσμίως αναγνωρίζουν την ανάγκη μετάβασης από το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο ακολουθεί το πρότυπο «λήψη – παραγωγή – απόρριψη» , όπου οι πόροι εξάγονται από τη Γη, χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια απορρίπτονται ως απόβλητα, προς ένα κυκλικό μοντέλο. Στο πλαίσιο αυτό η ΚΟ έχει ως κύριο στόχο την εξάλειψη των αποβλήτων ώστε η διάρκεια της ζωής των πόρων να παραμένει για όσο το δυνατόν περισσότερο, όπως επίσης να μειωθεί η κλιματική αλλαγή. Για την επίτευξη των στόχων της ΚΟ θα πρέπει να τηρούνται οι βασικές αρχές της ΚΟ, οι οποίες είναι η επανεξέταση, η μείωση, η επαναχρησιμοποίηση, η επισκευή, η ανακαίνιση, η ανακύκλωση, η ανακατασκευή, η ανάκτηση (Geers, Rose, Bell, & Schulz, 2025).



Εικόνα 7: Παρουσίαση βασικών αρχών της Κυκλικής Οικονομίας (Κ.Ο.)

Με σκοπό να εφαρμοστούν οι βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας, ιδιαίτερη σημασία έχει η βελτίωση της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων καυσίμων, η καλή τεχνική κατάσταση των μηχανών και του εξοπλισμού, καθώς και η κατάρτιση του πληρώματος στη σωστή λειτουργία των ναυτικών συστημάτων. Εξίσου σημαντική είναι η κατασκευή ασφαλέστερων δεξαμενόπλοιων και πλοίων, ώστε να περιορίζονται οι πιθανότητες διαρροών πετρελαίου. Μέσω των παραπάνω μέτρων επιτυγχάνεται η μείωση της συνολικής ποσότητας πετρελαϊκών αποβλήτων και διαρροών (Izaddoust, et al., 2022).

6.2 Ο ρόλος του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης

Το 2015 εγκρίθηκε η Ατζέντα 2030 για τη βιώσιμη ανάπτυξη μαζί με τους 17 στόχους (Sustainable Development Goals – SDGs) της. Η συγκεκριμένη ατζέντα έχει υιοθετηθεί από 193 χώρες, οι οποίες καλούνται να αναλάβουν δράση με σκοπό να επιτευχθεί η βιώσιμη ανάπτυξη έως το 2030. Στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών των συμμετέχει ενεργά και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – IMO). Ο IMO αποτελεί οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών, ο οποίος είναι αρμόδιος για την ασφάλεια και την προστασία της

ναυσιπλοΐας καθώς και για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία (International Maritime Organization).

Όσον αφορά τους 17 στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, οι οποίοι παρουσιάζονται και στην παρακάτω εικόνα παρέχουν ένα σχέδιο δράσης μέσω του οποίου να επιτευχθούν τα εξής:

1. Μηδενική φτώχεια
2. Μηδενική πείνα
3. Καλή υγεία
4. Ποιοτική εκπαίδευση
5. Ισότητα των φύλων
6. Καθαρό νερό και αποχέτευση
7. Φθηνή και καθαρή ενέργεια
8. Αξιοπρεπής εργασία και οικονομική ανάπτυξη
9. Βιομηχανία, καινοτομία και υποδομές
10. Λιγότερες ανισότητες
11. Βιώσιμες πόλεις και κοινότητες
12. Υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή
13. Δράση για το κλίμα
14. Ζωή στο νερό
15. Ζωή στη στεριά
16. Ειρήνη, δικαιοσύνη και ισχυροί θεσμοί
17. Συνεργασία για τους στόχους



Εικόνα 8: 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (International Maritime Organization).

Από τους παραπάνω 17 Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τέσσερις από αυτούς που σχετίζονται άμεσα με το μελετώμενο θέμα της παρούσας εργασίας. Οι κυριότεροι στόχοι που θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, είναι ο στόχος 7 για τη φθηνή και καθαρή ενέργεια, ο στόχος 12 για την υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή, ο στόχος 13 για την κλιματική αλλαγή καθώς και ο στόχος 14 για τη ζωή στο νερό.

Όσον αφορά το στόχο 7 (SDG 7), ο IMO συμβάλλει στην επίτευξή του μέσω της προώθησης επενδύσεων σε ενεργειακές υποδομές και τεχνολογίες καθαρής ενέργειας στο ναυτιλιακό τομέα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων, καθώς και στην ανάπτυξη και υιοθέτηση προηγμένων, καθαρότερων τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών ρύπων (International Maritime Organization).

Όσον για το στόχο 12 (SDG 12), ο IMO συμβάλλει στην επίτευξή του μέσω της μείωσης της παραγωγής αποβλήτων. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω της Σύμβασης MARPOL, η οποία ρυθμίζει την απόρριψη των παραγόμενων αποβλήτων από τα πλοία, όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 2. Παράλληλα η MARPOL απαιτεί

από τους λιμένες να διαθέτουν επαρκείς εγκαταστάσεις υποδοχής για την ασφαλή και ορθή διαχείριση των αποβλήτων που παραλαμβάνουν. Επίσης ο IMO καταβάλλει προσπάθειες ώστε να βελτιωθούν η τεχνογνωσία και ο εξοπλισμός που απαιτούνται για τη σωστή διαχείριση των λυμάτων επί των πλοίων και στους λιμένες. Επιπλέον μέσω του συγκεκριμένου στόχου προωθείται η ανακύκλωση, υιοθετούνται καθαρότερες τεχνολογίες παραγωγής και γίνεται μετάβαση σε πιο βιώσιμα πρότυπα κατανάλωσης (International Maritime Organization).

Ένας ακόμα σημαντικός στόχος είναι ο 13 (SDG 13), ο οποίος αποσκοπεί στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων της. Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της εποχής μας. Για το λόγο αυτό ο IMO, ως παγκόσμιος ρυθμιστικός οργανισμός της διεθνούς ναυτιλίας, προσπαθεί μέσω της λήψης των απαραίτητων μέτρων να την αντιμετωπίσει. Πιο συγκεκριμένα έχει αναπτύξει ένα ευρύ φάσμα μέτρων, μέσω των οποίων να περιοριστούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions – GHG Emissions), που απελευθερώνονται από τα πλοία. Με σκοπό να επιτευχθεί αυτό, τα κράτη μέλη του IMO υιοθέτησαν τον Ιούλιο του 2023 τη Στρατηγική IMO 2023. Η συγκεκριμένη στρατηγική αναθεώρησε την αρχική στρατηγική του 2018, θεσπίζοντας ενισχυμένους στόχους με σκοπό να αντιμετωπιστούν οι επιβλαβείς εκπομπές. Οι εκπομπές αυτές ρυθμίζονται από το Παράρτημα VI (Annex VI) της Σύμβασης MARPOL του IMO, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2. Οι κανονισμοί του συγκεκριμένου παραρτήματος αποσκοπούν στην αποφυγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στην ενεργειακή απόδοση και στη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου (International Maritime Organization).

Ένας τελευταίος βασικός στόχος για τη ναυτιλία είναι ο στόχος 14 (SDG 14), ο οποίος αποσκοπεί στη διατήρηση και βιώσιμη χρήση των ωκεανών, των θαλασσών και των θαλάσσιων πόρων με σκοπό να υπάρξει βιώσιμη ανάπτυξη. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, θα πρέπει οι ανθρώπινες δραστηριότητες να πραγματοποιούνται με τέτοιο τρόπο που να μην διαταράσσεται η ισορροπία των ωκεανών αλλά αντίθετα να εξακολουθούν να παραμένουν υγιείς και βιοπικίλοι. Ειδικότερα ο IMO για να πετύχει το παραπάνω και να διατηρεί το τομέα της ναυτιλίας ασφαλή και ενεργειακά αποδοτικό, λαμβάνει μέτρα που αφορούν το σχεδιασμό, την κατασκευή, τον εξοπλισμό, τη λειτουργία καθώς και τη διάλυση των πλοίων. Παράλληλα με σκοπό την προστασία της άγριας θαλάσσιας ζωής, ο IMO έχει

απαγορεύσει την απόρριψη επικίνδυνων αποβλήτων (International Maritime Organization).

6.3 Εφαρμογή βιωσιμότητας και κυκλικής οικονομίας σε λιμένες

Στο πλαίσιο της μετάβασης προς πιο βιώσιμα μοντέλα ανάπτυξης, αρκετοί λιμένες έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και καινοτόμες τεχνολογίες αξιοποίησής τους, με στόχο τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης των πόρων. Στους λιμένες συγκεντρώνονται και διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες αποβλήτων που προέρχονται τόσο από πλοία όσο και από χερσαίες δραστηριότητες.

Στη συνέχεια της ενότητας παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα λιμένων, όπως της Σιγκαπούρης, του Άμστερνταμ, του Ρότερνταμ καθώς και της Βαρκελώνης, οι οποίοι έχουν αναπτύξει προηγμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και ενεργειακής αξιοποίησης. Η εξέταση επιλεγμένων διεθνών λιμένων παρέχει χρήσιμα παραδείγματα καλών πρακτικών και αναδεικνύει διαφορετικές προσεγγίσεις εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας.

6.3.1 Λιμένας Σιγκαπούρης

Ο λιμένας της Σιγκαπούρης αποτελεί έναν από τους πιο τεχνολογικά προηγμένους λιμένες παγκοσμίως και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αρχών κυκλικής οικονομίας. Ειδικότερα πρόκειται για ένα «έξυπνο βιώσιμο λιμάνι» που στοχεύει στην απανθρακοποίηση και στην αποδοτική χρήση των πόρων (Interreg Baltic Sea Region,

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, πέρα από τις βιώσιμες πρακτικές που έχουν αναπτυχθεί στο λιμένα και αναλύονται στη συνέχεια της ενότητας, εφαρμόζονται παράλληλα αρχές της κυκλικής οικονομίας τόσο στις υποδομές όσο και στις κατασκευές του λιμανιού. Οι προβλήτες και οι χερσαίοι χώροι του λιμανιού κατασκευάζονται από φιλικό προς το περιβάλλον σκυρόδεμα, το οποίο αποτελεί παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα. Με αυτό το τρόπο έχει παρατηρηθεί μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος που αποδίδεται σε κατασκευαστικές δραστηριότητες κατά

Συνδυασμός μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων και μονάδας επεξεργασίας νερού

Ένα από τα βασικότερα έργα που έχει αναπτυχθεί στο συγκεκριμένο λιμένα είναι το Tuas Nexus. Πρόκειται για μια ολοκληρωμένη εγκατάσταση που συνδυάζει τη μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων (waste to energy) με μονάδα επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης νερού. Με τη συγκεκριμένη διαδικασία παράγεται ανακυκλωμένο νερό υψηλής ποιότητας, το οποίο χρησιμοποιείται για τεχνικές εφαρμογές, περιορίζοντας σημαντικά την κατανάλωση πόσιμου νερού (περισσότερα από 37.000 m³ πόσιμου νερού ετησίως). Επομένως, ο συνδυασμός αυτός των μονάδων συμβάλλει στην ανάκτηση ενέργειας, νερού και υλικών μειώνοντας τη χρήση γης και τις ενεργειακές απαιτήσεις (Interreg Baltic Sea Region, 2026).

Ηλεκτροποίηση και ενεργειακή αποδοτικότητα

Πέρα από το Tuas Nexus, στο Λιμένα της Σιγκαπούρης εφαρμόζεται πλήρη ηλεκτροποίηση των λιμενικών λειτουργιών ως κεντρικό στοιχείο της στρατηγικής βιωσιμότητάς του. Το Tuas Port αναπτύσσεται ως πλήρως ηλεκτροποιημένος λιμένας, ενσωματώνοντας αυτόνομα ηλεκτροκίνητα οχήματα μεταφοράς (AGVs), ηλεκτρικό εξοπλισμό διαχείρισης εμπορευματοκιβωτίων και έξυπνα συστήματα δικτύου ενέργειας που υποστηρίζονται από συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες παρατηρηθεί μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), περίπου κατά 50%, καθώς επίσης βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Interreg Baltic Sea

6.3.2 Λιμένες Ολλανδίας

Η Ολλανδία έχει ως βασικό στόχο να πετύχει στην κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 αλλά παράλληλα να μεταβεί στην κυκλική οικονομία. Τα δύο βασικά λιμάνια της Ολλανδίας, τα οποία εφαρμόζουν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας μέσω καλών πρακτικών είναι του Άμστερνταμ και του Ρότερνταμ.

6.3.2.1 Λιμένας Άμστερνταμ

Στο λιμένα του Άμστερνταμ έχουν αναπτυχθεί διάφορες επιχειρήσεις, οι οποίες συμβάλλουν στη διαχείριση και αξιοποίηση των αποβλήτων με βάση τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Ένας από τους βασικότερους στόχους του είναι η μετάβαση του στην κυκλική οικονομία έως το 2050. Με σκοπό να επιτευχθεί αυτό, τα απόβλητα που

καταλήγουν στον λιμένα, όπως πλαστικό, γυαλί, μέταλλο και ξύλο συλλέγονται, διαχειρίζονται και στη συνέχεια ανακυκλώνονται (Port of Amsterdam, 2026).

Παραγωγή βιοκαυσίμων

Στο του Άμστερνταμ καταλήγουν αρκετά αστικά απόβλητα που προκύπτουν από νοικοκυριά, από το κλάδο της εστίασης και τις επιχειρήσεις, τα οποία επεξεργάζονται και ανακυκλώνονται στο λιμένα. Ένα από τα κυριότερα ρεύματα αποβλήτων είναι αυτό των οργανικών αποβλήτων, τα οποία προφέρουν υψηλό δυναμικό αξιοποίησης. Στο λιμάνι έχουν αναπτυχθεί αρκετές εταιρείες που μετατρέπουν τα συγκεκριμένα απόβλητα σε βιοκαύσιμα. Παράλληλα κατά την επεξεργασία των αστικών αποβλήτων, ύστερά από τη διαδικασία διήθησης παρατηρείται περίσσεια ιλύς, η οποία μέσω κατάλληλης επεξεργασίας μετατρέπεται σε «πράσινο αέριο» (green gas).

Πλαστικά

Το λιμάνι του Άμστερνταμ συμβάλλει στη «δεύτερη ζωή» στα πλαστικά, μετατρέποντας τα σε δευτερογενείς πρώτες ύλες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω εταιρειών που δραστηριοποιούνται εντός του λιμένα. Ειδικότερα η εταιρεία Plastic Recycling Amsterdam, συλλέγει πλαστικά και τα μετατρέπει σε νέα πλαστικά υλικά, τα οποία καθίστανται έτοιμα για επαναχρησιμοποίηση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί τη τεχνολογία μαγνητική πυκνότητα (Magnetic Density Separation Technology), μέσω της οποίας τα διαφορετικά είδη πλαστικών διαχωρίζονται.

6.3.2.2 Λιμένας Ρότερνταμ

Το λιμάνι του Ρότερνταμ εφαρμόζει συγκεκριμένες τεχνικές με σκοπό τη μετάβαση στην κυκλική οικονομία. Ειδικότερα το λιμάνι συνεργάζεται με διάφορες εταιρείες για την ανάπτυξη νέων κυκλικών αλυσίδων αξίας. Μερικά παραδείγματα αποτελούν η ανακύκλωση μετάλλων και ο θερμικός καθαρισμός ασφάλτου που περιέχει πίσσα.

Εταιρεία EMR (European Metal Recycling)

Στο λιμάνι του Ρότερνταμ βρίσκεται η εταιρεία EMR (European Metal Recycling), η οποία αποτελεί και τη μοναδική εταιρεία ανακύκλωσης μετάλλων. Η συγκεκριμένη εταιρεία διαθέτει πιστοποιητικό τέλους αποβλήτου (End of Waste – EoW). Πρόκειται για ένα πιστοποιητικό, μέσω του οποίου δίνεται στην εταιρεία το δικαίωμα να

χρησιμοποιεί ανακυκλωμένα υλικά όπως σίδηρο, χάλυβα αλουμίνιο ως πρώτες ύλες για την παραγωγή νέων μετάλλων.

Η χρήση ανακυκλωμένων υλικών αντί για πρωτογενείς ύλες έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένου του CO₂. Παράλληλα μειώνονται αρνητικά περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την εξόρυξη νέων πρώτων υλών. Επομένως, με αυτό το τρόπο η εταιρεία EMR διαχειρίζεται τα μέταλλα με βιώσιμο τρόπο, στοχεύοντας σε μηδενικές εκπομπές (Port of Rotterdam, 2026).



Εικόνα 9: Ροές εισροών-εκροών και κυκλικοί δείκτες της διαδικασίας ανακύκλωσης μετάλλων της EMR (Port of Rotterdam, 2026)

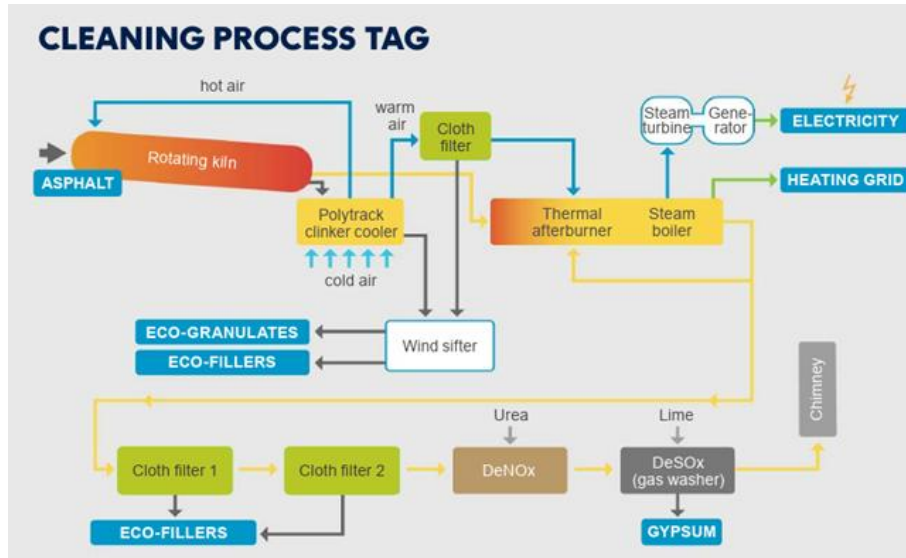
Θερμικός καθαρισμός ασφάλτου που περιέχει πίσσα

Στο λιμένα του Ρότερνταμ λειτουργεί μια μονάδα θερμικού καθαρισμού, REKO - Recycling Kombinate, η οποία μετατρέπει την ασφαλτο που περιέχει πίσσα σε νέες πρώτες ύλες (πχ άμμο, χαλίκι και συνδετικά υλικά) για τον κατασκευαστικό κλάδο. Η πρώτη μονάδα θερμικού καθαρισμού τέθηκε σε λειτουργία το 2006 καθώς έως τότε δεν υπήρχαν αναντιστοιχίες μονάδες παγκόσμιες. Το 2021 η εταιρία ανέπτυξε τη δεύτερη μονάδα, η οποία αποδείχθηκε ότι ήταν έξι φορές πιο αποδοτική από την πρώτη (Port of Rotterdam, 2026). Οι μονάδες θερμικού καθαρισμού θεωρούνται αρκετά σημαντικές, στην Ευρώπη παρατηρείται αυξημένη παραγωγή ασφάλτου, η οποία δεν επιτρέπεται να επαναχρησιμοποιηθεί απευθείας ή να αποτίθεται σε χώρους ταφής (Interreg Baltic Sea Region, 2026).



Εικόνα 10: Ροές εισροών-εκροών και κυκλικοί δείκτες (Port of Rotterdam, 2026)

Όσον αφορά τη διαδικασία θερμικού καθαρισμού, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω διάγραμμα, η άσφαλτος (tar-bearing asphalt) εισέρχεται στη μονάδα για θερμική επεξεργασία μέσω περιστροφικού κλιβάνου (rotating kiln) και φίλτρων σκόνης. Στη συνέχεια παράγονται οικο-κοκκώδη υλικά (eco-granulates) και οικο-πληρωτικά υλικά (eco-fillers), τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην παραγωγή νέου σκυροδέματος και ασφάλτου (Interreg Baltic Sea Region, 2026). Παράλληλα με τη διαδικασία της θερμικής ανακύκλωσης παράγεται και θερμότητα, η οποία αξιοποιείται καθώς μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης που χρησιμοποιείται από άλλες εταιρείες ή σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ανεμογεννήτριας (Port of Rotterdam, 2026). Τέλος, τα αέρια της διεργασίας υποβάλλονται σε συστήματα καθαρισμού (π.χ. φίλτρα και μονάδες αποθείωσης), ώστε να μειώνονται οι εκπομπές ρύπων, ενώ παράγεται και γύψος ως παραπροϊόν (Interreg Baltic Sea Region, 2026).



Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής της διεργασίας της τεχνολογίας θερμικού καθαρισμού της REKO (Port of Rotterdam, 2026)

6.3.3 Λιμένας Βαρκελώνης

Το λιμάνι της Βαρκελώνης προωθεί ενεργά τις αρχές της κυκλικής οικονομίας μέσω της εφαρμογής καινοτόμων έργων, τα οποία αφορούν την επαναχρησιμοποίηση υλικών, την αποδοτική διαχείριση πόρων καθώς και την ανάκτηση ενέργειας.

Ανάκτηση υπολειπόμενης ψύξης

Ένα από τα σημαντικότερα έργα που πραγματοποιείται στο συγκεκριμένο λιμάνι είναι η αξιοποίηση της υπολειπόμενης ψύξης. Ειδικότερα, κατά τη διαδικασία αεριοποίησης του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, προκύπτει περίσσεια ψυκτικής ενέργειας. Πολλές φορές η ενέργεια αυτή διαχέεται στο περιβάλλον με αποτέλεσμα να χάνει την ενεργειακή της αξία. Αντίθετα, στο λιμάνι της Βαρκελώνης αξιοποιείται ως βιώσιμη πηγή ενέργειας για βιομηχανικές, τριτογενείς και οικιακές εφαρμογές, με σκοπό την κάλυψή των αναγκών κλιματισμού και ψύξης. Με το καινοτόμο αυτό τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), κατά περίπου 42000 τόνων ετησίως (Interreg Baltic Sea Region, 2026).

Μετασχηματισμός και αξιοποίηση πλαστικών αποβλήτων

Το λιμάνι της Βαρκελώνης, όπως και το λιμάνι του Άμστερνταμ, έχει αναπτύξει ένα ακόμα έργο που ακολουθεί τις βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας. Πιο συγκεκριμένα, έχει υλοποιήσει το Πρόγραμμα Μετασχηματισμού και Αξιοποίησης Πλαστικών Αποβλήτων, μέσω του οποίου στοχεύει στη μείωση των πλαστικών αποβλήτων που παράγονται εντός λιμενικής κοινότητας. Μέσω του συγκεκριμένου

προγράμματος, τα παραγόμενα πλαστικά συλλέγονται, καθαρίζονται και τεμαχίζονται σε μικρά κομμάτια ώστε να καθίσταται δυνατή η επαναχρησιμοποίηση τους. Με το μετασχηματισμό και την αξιοποίηση των πλαστικών αποβλήτων πέρα από τη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων, περιορίζονται και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η θαλάσσια ρύπανση. (Interreg Baltic Sea Region, 2026).

6.4 Τεχνολογίες αξιοποίησης πετρελαιοειδών αποβλήτων

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται οι τεχνολογίες αξιοποίησης των πετρελαιοειδών αποβλήτων και συγκεκριμένα των υπολειμμάτων των υδρογονανθράκων που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των πλοίων. Η σωστή αξιοποίηση τους έχει κρίσιμη σημασία για τη διατήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος καθώς τα απόβλητα αυτά μπορούν να έχουν επιβλαβείς συνέπειες στην ποιότητα των υδάτων και στα θαλάσσια οικοσυστήματα αν δεν υποστούν την απαραίτητη επεξεργασία. Μέσω κατάλληλων διεργασιών ανάκτησης και επεξεργασίας, τα υπολείμματα αυτά μπορούν να μετατραπούν σε χρήσιμα προϊόντα, όπως καύσιμα, λιπαντικά, ή αέριο μειώνοντας με αυτό το τρόπο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αξιοποίηση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε με θερμική είτε με υλική αξιοποίηση (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024).

Όσον αφορά τη θερμική αξιοποίηση των υπολειμμάτων των υδρογονανθράκων, περιλαμβάνει την καύση τους για παραγωγή ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας ή ατμού. Όσον αφορά την αξιοποίηση υλικών, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες, όπως αποτέφρωση, πυρόλυση και αεριοποίηση μέσω των οποίων παράγονται συνθετικά αέρια, λιπαντικά καθώς και υγρά καύσιμα. Τέλος μπορεί να πραγματοποιηθεί ενεργειακή αξιοποίηση των υπολειμμάτων, μέσω της οποίας τα υπολείμματα χρησιμοποιούνται ως καύσιμα με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κυρίως μέσω θερμικής αξιοποίησης (άμεση καύση) (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024).

Οι παραπάνω διεργασίες λαμβάνουν χώρα είτε επί των πλοίων είτε τα πετρελαιοειδή απόβλητα μεταφέρονται και επεξεργάζονται σε διυλιστήρια, με σκοπό την αξιοποίηση τους (Izaddoust, et al., 2022).

6.4.1 Αποτέφρωση (Incineration)

Η αποθήκευση αποβλήτων σε πλοίο και η καύση τους σε αποτεφρωτήρες αποτελεί μια συνήθη πρακτική διαχείρισης αποβλήτων στα πλοία (Robert & Cezary, 2019). Ειδικότερα σύμφωνα με τον κανονισμό 16 του Παραρτήματος VI της MARPOL η καύση της ιλύος λυμάτων και της ελαιώδους ιλύος που παράγονται κατά τη συνήθη λειτουργία ενός πλοίου μπορεί να πραγματοποιηθεί όχι μόνο σε ειδικούς αποτεφρωτήρες αλλά ακόμα και σε κύριες ή βοηθητικές μηχανές καθώς και λέβητες. Όμως βασική προϋπόθεση αποτελεί η καύση να μην λάβει χώρα εντός λιμένων, λιμενικών εγκαταστάσεων και εκβολών ποταμών (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

Η αποτέφρωση αποτελεί μια μέθοδο θερμικής επεξεργασίας (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026). Πρόκειται για μια εξώθερμη διεργασία, κατά την οποία απαιτείται οξυγόνο όπως επίσης περίσσεια αέρα, με σκοπό να πραγματοποιηθεί τέλεια καύση (Kári-Horváth, Lantos, & Sztancsek, 2024).

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, υπολείμματα καίγονται σε λέβητα για την παραγωγή ατμού (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024). Ειδικότερα τα οργανικά συστατικά αντιδρούν με το οξυγόνο, σχηματίζοντας αέρια και υδρατμούς, τα οποία στη συνέχεια εξέρχονται ως καυσαέρια. Αντίθετα τα άκαυστα ανόργανα υλικά συνήθως παραμένουν σε στερεή μορφή (Kári-Horváth, Lantos, & Sztancsek, 2024).

Με σκοπό να πραγματοποιηθεί η αποτέφρωση θα πρέπει πρώτα η ελαιώδης ιλύς να υποστεί προ-επεξεργασία μέσω των διαδικασιών αφυδάτωσης. Η καύση πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες (800-850 °C) με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά ο όγκος της ιλύος.

Ωστόσο κατά τη διεργασία της αποτέφρωσης απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα επικίνδυνοι ρύποι όπως κάδμιο (Cd), υδράργυρος (Hg), μόλυβδος (Pb) καθώς και διοξίνες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση προηγμένων συστημάτων ελέγχου εκπομπών για τη δέσμευση λεπτών σωματιδίων και πτητικών ενώσεων, κάτι το οποίο την καθιστά ως αρκετά δαπανηρή διεργασία (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026).

6.4.2 Πυρόλυση (Pyrolysis)

Η πυρόλυση αποτελεί μια θερμοχημική μέθοδο (Sasidhar, Arkin, Gowtham, Somasundaram, & Vuppaladadiyam, 2023), μέσω της οποίας γίνεται η επεξεργασία

των πετρελαιοειδών αποβλήτων που προκύπτουν από τα πλοία. Όσον αφορά τις θερμοχημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία πρώτων υλών με σκοπό την παραγωγή χρήσιμων παραπροϊόντων, όπως βίο-έλαιο (bio-fuel), συνθετικό αέριο (syngas) και βίο-άνθρακα (bio-char) (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026).

Ειδικότερα κατά τη διεργασία της πυρόλυσης οι οργανικές πρώτες ύλες υποβάλλονται σε υψηλές θερμοκρασίες συνήθως 400-800 °C, χωρίς παρουσία οξυγόνου (Marotta, 2023). Χαρακτηρίζεται ως βιώσιμη προσέγγιση τόσο για την προστασία του περιβάλλοντος όσο για την ανάκτηση ενέργειας. Μέσω αυτής παράγονται από πετρελαιοειδή απόβλητα πλοίων καύσιμα πλούσια σε υδρογονάνθρακες, τα οποία παρουσιάζουν χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του ντίζελ (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αποικοδόμησης πολυμερών ενώσεων μακράς αλυσίδας σε ενώσεις βραχείας αλυσίδας που παρουσιάζουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των συμβατικών καυσίμων (Sasidhar, Arkin, Gowtham, Somasundaram, & Vuppaladadiyam, 2023).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της πυρόλυσης αποτελεί η λάσπη από πετρελαιοειδή απόβλητα (waste ship oil sludge – WSOS). Η λάσπη έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί έναν από τους βασικότερους ρύπους του θαλάσσιου οικοσυστήματος, ενώ παράλληλα μπορεί να αξιοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την ανάκτηση πόρων μέσω επεξεργασίας. Στο πλαίσιο των κανονισμών του παραρτήματος V της MARPOL, οι οποίοι περιορίζουν την απόρριψη πετρελαιοειδών αποβλήτων στη θάλασσα, η διαχείριση της λάσπης μέσω της πυρόλυσης αποτελεί έναν κατάλληλο και βιώσιμο τρόπο αξιοποίησης αυτού του υπολείμματος (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026).

Όσον αφορά τη διαδικασία της πυρόλυσης σε λάσπη πετρελαιοειδών αποβλήτων εκτελείται μέσω των παρακάτω σταδίων. Αρχικά πριν ξεκινήσει η διεργασία της πυρόλυσης, η ιλύς μεταφέρεται σε διαχωριστήρα (decanter) με σκοπό την απομάκρυνση του νερού από την ιλύ. Στη συνέχεια, η αφυδατωμένη ιλύς εισέρχεται σε εναλλάκτη θερμότητας (heater), με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας της αντίδρασης. Έπειτα η ιλύς μεταφέρεται σε αντιδραστήρα, όπου μετατρέπεται σε τρία βασικά κλάσματα, σε υγρό, στερεό και αέριο. Όσον αφορά το στερεό υπόλειμμα απομακρύνεται από τον πυθμένα του αντιδραστήρα και οδηγείται σε αποτεφρωτήρα. Όσον αφορά τα αέρια και τα υγρά ψύχονται και στη συνέχεια οδηγούνται σε ένα συμπυκνωτή για την απομάκρυνσή του νερού. Στο επόμενο στάδιο μεταφέρονται σε

ένα δοχείο εκτόνωσης, με σκοπό να διαχωριστούν τα συμπυκνώσιμα συστατικά (oil) από τα μη συμπυκνώσιμα (gas) (Mazzocchi, Altosole, Vigna, Bosio, & Arato, 2020). Το αέριο τροφοδοτείται σε λέβητα ενώ το έλαιο πυρόλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως καύσιμο (Marotta, 2023).

Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης η ύλη, όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω, μετατρέπεται σε τρεις φάσεις: σε στερεή φάση (ανόργανα ορυκτά και υπολειμματικός άνθρακας), υγρή φάση (καύσιμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και νερό) και αέρια φάση (πχ CH_4 , H_2). Τα παραγόμενα προϊόντα της πυρόλυσης εξαρτώνται από το ρυθμό θέρμανσης, το χρόνο παραμονής και τη μέγιστη θερμοκρασία αντίδρασης (Marotta, 2023).

6.4.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της πυρόλυσης

Η διαδικασία της πυρόλυσης παρουσιάζει αρκετά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τη συμβατική διαχείριση αποβλήτων. Ειδικότερα θεωρείται ως πιο αποδοτική ως προς τον έλεγχο εκπομπών και ως προς την ανάκτηση πόρων. Παράλληλα μέσω αυτής περιορίζεται σημαντικά η κλιματική αλλαγή (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026), όπως επίσης κατά την επεξεργασία της λάσπης με πυρόλυση μειώνεται το ανθρακικό αποτύπωμα (Gowtham, et al., 2025). Επίσης συγκριτικά με την αποτέφρωση αποτρέπεται ο σχηματισμός δευτερογενών ρύπων, όπως διοξίνες, φουράνια και άλλες πολυχλωριωμένες ενώσεις. Παράλληλα μέσω της πυρόλυσης ο άνθρακας μετατρέπεται σε ανακυκλώσιμο άνθρακα και κλάσματα ελαίου, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται στη διεργασία της αποτέφρωσης (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026).

Ωστόσο, ένα από τα πιο χαρακτηριστικά μειονεκτήματά της είναι η υψηλή ενεργειακή της απαίτησή. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μελλοντικά με την καλύτερη σχεδίαση αντιδραστήρων, οδηγώντας σε μια πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον διεργασία (K, Kumar R, & Murugavelh, 2026). Τέλος, δύο ακόμα σημαντικά μειονεκτήματα της συγκεκριμένης διεργασίας, είναι το υψηλό κεφαλαιουχικό καθώς και λειτουργικό κόστος των μονάδων πυρόλυσης (Tawo & Martin Ifeanyi Mbamalu, 2026).

6.4.3 Αεριοποίηση (Gasification)

Η αεριοποίηση είναι ακόμα μια διεργασία, η οποία ανήκει στις θερμοχημικές μεθόδους (Alavi-Borazjani, Adeel, Chkoniya, & Tarelho, 2025). Ένα παράδειγμα εφαρμογής της

διεργασίας αυτής είναι στα υπολείμματα υδρογονανθράκων από πετρελαιοειδή απόβλητα με σκοπό την αξιοποίηση τους (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024). Κατά τη συγκεκριμένη διεργασία τα υπολείμματά θερμαίνονται σε περιβάλλον με περιορισμένη παρουσία οξυγόνου ή ακόμα και χωρίς παρουσία αυτού για την παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas) (Alavi-Borazjani, Adeel, Chkoniya, & Tarelho, 2025). Το παραγόμενο αέριο (syngas) αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H_2), και μονοξείδιο του άνθρακα (CO), καθώς και από μικρότερες συγκεντρώσεις μεθανίου (CH_4), υδρατμών (H_2O) και μικρών ποσοτήτων άλλων υδρογονανθράκων και αδρανών αερίων. Παράλληλα παράγονται και στερεά προϊόντα, τα οποία είναι άνθρακας (C) και τέφρα. Τα χαρακτηριστικά και των δύο εξαρτώνται τόσο από την πρώτη ύλη όσο και από τις συνθήκες αεριοποίησης (Alavi-Borazjani, Adeel, Chkoniya, & Tarelho, 2025).

Η διαδικασία της αεριοποίησης πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια. Στο πρώτο στάδιο απομακρύνεται η υγρασία. Αυτό επιτυγχάνεται με την έκθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων σε θερμοκρασίες $100 - 200\text{ }^{\circ}C$. Στη συνέχεια ακολουθεί η διεργασία πυρόλυσης, η οποία μελετήθηκε προηγουμένως, κατά την οποία πραγματοποιείται αποσύνθεση σε στερεό άνθρακα (char) και πτητικά. Έπειτα λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις οξειδώσεις (εξώθερμες), μέσω των οποίων παράγονται μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O). Παράλληλα πραγματοποιούνται αντιδράσεις αναγωγής (ενδόθερμες), μέσω των οποίων ο στερεός άνθρακας (char), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O), μετατρέπονται σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογόνο (H_2) και άλλες ενώσεις, όπως μεθάνιο (CH_4), τα οποία αποτελούν το πρόδρομο αέριο του syngas. Το παραγόμενο αυτό αέριο (producer gas) στη συνέχεια υποβάλλεται σε διεργασίες καθαρισμού και αναβάθμισης, ώστε να προκύψει το αέριο σύνθεσης (syngas), το οποίο χρησιμοποιείται σε ενεργειακές και χημικές εφαρμογές (Alavi-Borazjani, Adeel, Chkoniya, & Tarelho, 2025).

6.4.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αεριοποίησης

Η διεργασία της αεριοποίησης παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας αποβλήτων. Ένα από τα σημαντικότερα είναι ότι μέσω αυτής επιτυγχάνονται υψηλά ποσοστά ανάκτησης ενέργειας μετατρέποντας τα υπολείμματα πετρελαιοειδών αποβλήτων σε συνθετικό αέριο (syngas) (Tawo & Martin Ifeanyi Mbamalu, 2026).

Ωστόσο παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Ειδικότερα τόσο τα επενδυτικά όσο και τα λειτουργικά έξοδα της είναι αρκετά υψηλά, με αποτέλεσμα να αποτελούν εμπόδια για την εφαρμογή της. Επίσης σε περίπτωση παρουσίας βαρέων μετάλλων μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά η απόδοση διεργασίας όπως επίσης να προκληθεί δευτερογενή ρύπανση (Tawo & Martin Ifeanyi Mbamalu, 2026).

6.4.4 Συνδυασμός μεθόδων

Οι παραπάνω μελετώμενες διεργασίες αξιοποίησης των υπολειμμάτων των υδρογονανθράκων μπορούν να συνδυαστούν ώστε να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση των υπολειμμάτων και να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Δύο παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι η συν-αποτέφρωση και η πυρόλυση-αεριοποίηση. Ειδικότερα όσον αφορά τη συν-αποτέφρωση συνδυάζει τη θερμική και την υλική αξιοποίηση. Μέσω της διεργασίας αυτής αποτεφρώνονται τα υπολείμματα υδρογονανθράκων μαζί με άλλα καύσιμα για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, ενώ η τέφρα που προκύπτει χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για δομικά υλικά. Όσο για το συνδυασμό πυρόλυσης-αεριοποίησης συνδυάζεται η θερμική και η χημική αξιοποίηση. Με αυτό το τρόπο θερμαίνονται πρώτα τα υπολείμματα για την παραγωγή ενεργού άνθρακα και βίο - άνθρακα και, στη συνέχεια, αεριοποιώντας το αέριο πυρόλυσης για την παραγωγή συνθετικού αερίου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή χημικών προϊόντων (Elkaime, Elhad, & Loukili, 2024).

6.5 Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της κυκλικής οικονομίας στο κλάδο της ναυτιλίας

Η εφαρμογή των βασικών αρχών της κυκλικής οικονομίας στο ναυτιλιακό κλάδο παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά οφέλη. Ειδικότερα η αξιοποίηση αποβλήτων και η ανάκτηση ενέργειας και καυσίμων από αυτά συμβάλλουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την έλλειψη πόρων αλλά και την κλιματική αλλαγή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της εξόρυξης πρωτογενών υλικών με αποτέλεσμα να περιορίζεται η οικολογική διαταραχή και να διατηρούνται οι φυσικοί πόροι (Tawo & Martin Ifeanyi Mbamalu, 2026).

Όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη, η αξιοποίηση αποβλήτων δημιουργεί νέες ευκαιρίες εσόδων για τις βιομηχανίες. Επίσης η παραγωγή βίο - καυσίμων, ενέργειας και άλλων

παραπροϊόντων αποτελεί νέα πηγή εσόδων ενώ παράλληλα ενισχύεται η καινοτομία
στο τομέα των πράσινων τεχνολογιών (Tawo & Martin Ifeanyi Mbamalu, 2026).

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε ότι η διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων από τα πλοία, αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και τη βιώσιμη ανάπτυξη της ναυτιλίας. Ειδικότερα, τα πετρελαιοειδή απόβλητα, που αποτέλεσαν και το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάζουν σύνθετη σύσταση και απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία πριν από τη τελική τους διάθεση, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή ορθών τεχνολογιών διαχείρισης.

Ωστόσο, ο τομέας της ναυτιλίας προσεγγίζει με ένα διαφορετικό τρόπο τη διαχείριση των παραγόμενων πετρελαιοειδών αποβλήτων, καταβάλλοντας προσπάθειες για την επίτευξη της μετάβασης προς ένα βιώσιμο μοντέλο, βασισμένο στις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η εφαρμογή των αρχών της ΚΟ, και ειδικότερα η ανάκτηση (recover), αποδείχθηκε ότι αποτελεί μια από τις πλέον αποτελεσματικές επιλογές στο τομέα της ναυτιλίας. Μέσω κατάλληλων διεργασιών (αποτέφρωση, πυρόλυση και αεριοποίηση), τα πετρελαιοειδή απόβλητα μετατρέπονται σε δευτερογενείς πόρους, συμβάλλοντας στην παραγωγή καυσίμων και ενέργειας, με αποτέλεσμα να μην αντιμετωπίζονται μόνο ως απορρίμματα.

Σημαντική προϋπόθεση τόσο για τη μείωση της ποσότητας των πετρελαιοειδών αποβλήτων όσο και των διαρροών, καθώς και για τη μετάβαση από ένα γραμμικό σε ένα κυκλικό μοντέλο διαχείρισης, αποτελεί η πρόληψη της παραγωγής μεγάλου όγκου αποβλήτων εξ' αρχής. Με σκοπό την επίτευξη αυτού του στόχου είναι σημαντική η άρτια συντήρηση των μηχανών και του εξοπλισμού, καθώς και η κατάλληλη κατάρτιση του πληρώματος σχετικά με τη σωστή λειτουργία των ναυτικών συστημάτων. Τέλος, κρίνεται απαραίτητη η συνεχής ενημέρωση των λιμένων, των πλοίων αλλά και των εταιρειών διαχείρισης αποβλήτων, καθώς και η μεταξύ τους συνεργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adel, S., Ibrahim, W., Fayed, M., & Aly, S. (2020, December). Evaluation the performance of sequencing batch reactor and bio-film sequencing batch reactor for pulp and paper wastewater treatment. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26479>
- Agarwala, N. (2023, November 12). Promoting Circular Economy in the shipping industry. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1080/25725084.2023.2276984>
- Alavi-Borazjani, S. A., Adeel, S., Chkoniya, V., & Tarelho, L. (2025, March 17). Sustainability-Oriented Port Management: Biomass Gasification as a Strategic Tool for Green and Circular Maritime Logistics. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su17062634>
- Bella, G. D., Di Prima, N., Di Trapani, D., Freni, G., Giustra, M., Viviani, G., & Torregrossa, M. (2015, December 30). Performance of membrane bioreactor (MBR) systems for the treatment of shipboard slops: Assessment of hydrocarbon biodegradation and biomass activity under salinity variation. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.021>
- Bhattacharyya, A., Liu, L., Walsh, M., & Lee, K. (2023, September). Membrane technology for treating decanted oily wastewater from marine oil spill operations: Comparison between membrane filtration and membrane bioreactor. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115397>
- Campo, R., Giustra, M., Marchis, M., Freni, G., & Di Bella, G. (2017, August 4). Characterization and Treatment Proposals of Shipboard Slop Wastewater Contaminated by Hydrocarbons. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/w9080581>
- Chandrasekaran, P. T., Javaid, M., & Sadiq, A. (2021). *Resources of Water*. IntechOpen. Ανάκτηση από https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=GmwteEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA147&dq=gravity+based+oil+water+separation+FROM+SHIPS&ots=ILyoGj9GP2&sig=y83mhQeETxX7_NKXT_fopKnBaTY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Chen, K. (2025, June 19). MBBR vs MBR vs SBR vs SBBR vs ASP: A Comprehensive Guide to Wastewater Treatment Technologies. Ανάκτηση από https://www.nihaowater.com/news/mbbr-vs-mbr-vs-sbr-vs-sbbr-vs-asp-a-comprehensive-guide-to-wastewater-treatment-technologies.html?campaign_id=PMBBR&gad_source=1&gad_campaignid=23684428047&gbraid=0AAAABCyzlQeDr941wZfKQt68sb5go6-Uo&gclid=EAlaIqobChMlot7_msP
- Chen, Q., Wu, W., Guo, Y., Li, J., & Wei, F. (2022, March 10). Environmental impact, treatment technology and monitoring system of ship domestic sewage: A review. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151410>
- Corsino, S. F., Campo, R., Bella, G., & Torregrossa, M. (2018, February). Aerobic granular sludge treating shipboard slop: Analysis of total petroleum hydrocarbons loading rates on performances and stability. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.11.005>
- D'Aquino, A., Tirola, M., Puhakka, J., Palmroth, M., & Andreottola, G. (2025, November). Inhibition-level-based carrier selection and kinetic insights for optimised

- denitrification of saline wastewaters in MBBR. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127288>
- Deja, A., Weichbtoth , P., & Ślaczka, W. (2023). Sustainable Waste Management for Implementation of a Circular Economy Model in a Port. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.257>
- Dube, A., J. Malode, S., Alshehri, M., & Shetti , N. (2025, January). Electrochemical water treatment: Review of different approaches. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123911>
- Elkaime, H., Elhad, S., & Loukili, A. (2024). A Review and Current Practices on the Valorization of Ship-Generated Oily Waste. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.583>
- Enflow Engineering. (2022). Τεχνολογία MBR. Ανάκτηση από <https://engineering.enflow.gr/#mbr-systems>
- García-Gomez, E., Gil-Solsona, R., Mikkolainen , E., Hytti, M., Ytreberg, E., Gago-Ferrero, P., . . . Gros, M. (2025, February 01). Identification of emerging contaminants in greywater emitted from ships by a comprehensive LC-HRMS target and suspect screening approach. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125524>
- Geers, D. G., Rose, J., Bell, M., & Schulz, V. (2025, July). From fossil fuels to biofuels: Circular economy diversification for fossil fuel ports. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104796>
- Gowtham, G., Arkin, G., Sasidhar, K., Balasubramanian, S., Somasundaram, M., & Antunes, E. (2025, December). Sailing towards sustainability: Waste ship oil sludge as diesel alternative. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107960>
- Han, M., Zhang , J., Chu , W., Chen, J., & Zhou, G. (2019, November 28). Research Progress and Prospects of Marine Oily Wastewater Treatment: A Review. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/w11122517>
- International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973. (n.d.). Ανάκτηση από <https://portalcip.org/wp-content/uploads/2024/05/MARPOL-INGLES.pdf>
- International Mairtime Organization . (n.d.). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Ανάκτηση από [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx)
- International Maritime Organization. (n.d.). IMO and the Sustainable Development Goals. Ανάκτηση από <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sustainabledevelopmentgoals.aspx>
- Interreg Baltic Sea Region. (2026, February 18). Circular economy in port environments – learning from international best practices. Ανάκτηση από <https://interreg-baltic.eu/project-posts/circular-ports/circular-economy-in-port-environments-learning-from-international-best-practices/>

- Izaddoust, S., Hita, I., Zambrano, N., Trueba, D., Palos, R., Zhang, W., . . . Castaño, P. (2022, October 1). Fuel production via catalytic cracking of pre-hydrotreated heavy-fuel oil generated by marine-transport operations. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124765>
- K, S., Kumar R, K., & Murugavelh, S. (2026, May). Life cycle insights into the pyrolytic conversion of waste ship oil sludge in a circular economy framework. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2026.101106>
- Kári-Horváth, A., Lantos, Z., & Sztancsek, Á. (2024, January). OVERVIEW OF THE UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE FROM. Ανάκτηση από [10.17676/HAE.2024.43.37](https://doi.org/10.17676/HAE.2024.43.37)
- Koboević, Ž. (2020, 08 17). SUSTAINABLE DEVICES FOR SEWAGE WATER MANAGEMENT ON SHIPS. Ανάκτηση από https://www.academia.edu/114843675/Sustainable_Devices_for_Sewage_Water_Management_on_Ships?sm=b
- Kotrikla, A. M., Zavantias, A., & Kaloupi, M. (2021, October 15). Waste generation and management onboard a cruise ship: A case study. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105850>
- Kurtela, Z., Koboević, Ž., & Koboević, N. (2018, December). RISK ASSESSMENT MODEL OF COASTAL SEA POLLUTION BY BLACK(SEWAGE) WATERS FROM VESSELS. Ανάκτηση από [10.3940/rina.ijme.2018.a4.496](https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2018.a4.496)
- Lappalainen, S.-T., Tapaninen, U., & Kotta, J. (2024, August 2024). Nitrogen and Phosphorus Discharges from Cargo Ships' Black and Grey Waters—A Case Study of a Baltic Sea Port. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/oceans5030032>
- Leonard, J., Ahmedullah, M., Brown, M., Brundin, I., Fallowfield, H., Johansson, M., . . . Whiley, H. (2026, March 27). Bilgewater management in marine vessels: a systematic literature review of marine vessel bilgewater and treatment options. Ανάκτηση από <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-026-37673-4>
- Magnusson, K., Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Smailys, V., Telemo, P., & Winnes, H. (2018, January). Risk assessment of bilge water discharges in two Baltic shipping lanes. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.035>
- Magnusson, K., & Winnes, H. (2018, January). Risk assessment of bilge water discharges in two Baltic shipping lanes. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.035>
- Marine Public. (2026, January). Marine Sewage Treatment Plants & MARPOL Annex IV Guide. Ανάκτηση από <https://marinepublic.com/blogs/marine-law/214626-marine-sewage-treatment-plants-marpol-annex-iv-guide>
- Marotta, V. (2023, January 10). Implementation of impact mitigation measures for maritime transport: an analysis of alternative waste management practices, air emissions monitoring and GHG reduction. Ανάκτηση από <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/66724>
- Mazzocoli, M., Altosole, M., Vigna, V., Bosio, B., & Arato, E. (2020, December 18). Regulations, Marine Pollution Mitigation by Waste Oils Recycling Onboard Ships:

- Technical Feasibility and Need for New Policy and. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.566363>
- Muvel, H., Jinda, M., Tewari, P., & Anand, V. (2025, August 6). Minimizing oil pollution: a review of current status and its treatment options. Ανάκτηση από <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/su/d5su00403a>
- Piazzese, D., Corsino, S., Torregrossa, M., Bongiorno, D., Indelicato, S., & Viviani, G. (2018, December 15). Effect of a co-substrate supply in a MBR treating shipboard slop: Analysis of hydrocarbon removal, biomass activity and membrane fouling tendency. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.10.003>
- Pinar, O., & Rodríguez-Couto, S. (2024, November 15). Advancements in bilge wastewater treatment: A review for current and future trends. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175587>
- Port of Amsterdam. (2026). Circular Economy. Ανάκτηση από <https://www.portofamsterdam.com/en/discover/sustainable-port/circular-economy>
- Port of Rotterdam. (2026). Ανάκτηση από <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/ongoing-projects/circular-port>
- Raunek. (2024, 03 29). Sewage Treatment Plant on Ships Explained. Ανάκτηση από <https://www.marineinsight.com/sewage-treatment-plant/>
- Robert, J., & Cezary, B. (2019, August). Specification of Waste Oil Generated at Ships in Terms of its Use as Fuels. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/335505561_Specification_of_Waste_Oil_Generated_at_Ships_in_Terms_of_its_Use_as_Fuels
- Sasidhar, K., Arkin, G., Gowtham, G., Somasundaram, M., & Vuppaladadiyam, A. (2023, November 15). Conversion of waste ship-oil sludge into renewable fuel: Assessment of fuel properties and techno-economic viability of supplementing and substituting commercial fuels. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139362>
- Tawo, O. E., & Martin Ifeanyi Mbamalu. (2026, April). Advancing waste valorization techniques for sustainable industrial operations and improved environmental safety. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.2.0334>
- Tiselius, P., & Magnusson, K. (2017, January 30). Toxicity of treated bilge water: The need for revised regulatory control. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.010>
- Ulucan, K., & Kurt, U. (2015, June 15). Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.04.005>
- Vaneekhaute, C., & Fazli, A. (2020, February 1). Management of ship-generated food waste and sewage on the Baltic Sea: A review. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19306609>
- Vyrides, I., Drakou, E.-M., Ioannou, S., Michael, F., Gatidou, G., & Stasinakis, A. (2018, July 2018). Biodegradation of bilge water: Batch test under anaerobic and aerobic

conditions and performance of three pilot aerobic Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs) at different filling fractions. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.086>

Yeh, C.-K., & Hsu, H.-C. (2025, December). Research and comparison of efficient electrochemical purification methods for bilge water using lead, aluminum, copper, and iron electrodes. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.wri.2025.100306>

Ytreberg, E., Eriksson, M., Maljutenko, I., Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Hassellöva, I.-M., & Granhaga, L. (2020, March). Environmental impacts of grey water discharge from ships in the Baltic Sea. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110891>

Zhang, S., Chen, J., Wan, Z., Yu, M., Shu, Y., Tan, Z., & Liu, J. (2021, November 1). Challenges and countermeasures for international ship waste management: IMO, China, United States, and EU. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105836>

Zielińska, M., & Trzcíński, K. (2021). Challenges and development directions of membrane bioreactors operated on passenger ships in international shipping. Ανάκτηση από https://psjd.icm.edu.pl/psjd/element/bwmeta1.element.ojs-doi-10_18778_1730-2366_16_13

Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2019, 06 07). ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2019/883 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 17ης Απριλίου 2019 σχετικά με τις λιμενικές εγκαταστάσεις παραλαβής για την παράδοση αποβλήτων από πλοία, για την τροποποίηση της οδηγίας 2010/65/ΕΕ και την κατάργηση της οδηγίας 2000. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/883/oj/eng>