



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ
Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»**

ΤΙΤΛΟΣ

ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ SCRUBBERS

ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ

Technical and economical analysis of SCRUBBERS

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:

ΜΠΑΚΑΤΣΕΛΟΣ ΘΡΑΣΥΒΟΥΛΟΣ

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

ΝΙΚΗΤΑΚΟΣ ΝΙΚΗΤΑΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σεπτέμβριος 2018

ΤΙΤΛΟΣ
ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ SCRUBBERS

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΜΠΑΚΑΤΣΕΛΟΣ ΘΡΑΣΥΒΟΥΛΟΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ.

Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής διατριβής

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος ΜΠΑΚΑΤΣΕΛΟΣ ΘΡΑΣΥΒΟΥΛΟΣ, του ΙΩΑΝΝΗ, με αριθμό μητρώου: 27 φοιτητής του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ, δηλώνω ότι: *«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής διατριβής και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διατριβή. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η διατριβή προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική διατριβή».*

Ο δηλών

Ημερομηνία

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Ρυθμιστικό πλαίσιο	- 10 -
1.1 Εκπομπές Αέριων Ρύπων	- 10 -
1.1.1 Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO)	- 10 -
1.1.2 Ευρωπαϊκή Ένωση (EU).....	- 16 -
1.1.3 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (USA).....	- 17 -
1.1.4 California.....	- 17 -
1.1.5 Η ΚΙΝΑ.....	- 18 -
1.2 Ρυθμίσεις για την εγκατάσταση και λειτουργία scrubbers	- 19 -
1.2.1 Scheme A	- 21 -
1.2.2 Scheme B	- 22 -
1.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια για τη λειτουργία scrubbers	- 22 -
1.3.1 Απορρίψεις νερού (Water Discharges).....	- 22 -
1.3.2 Κριτήριο pH.....	- 23 -
1.3.3 Κριτήριο PAH's.....	- 24 -
1.3.4 Θολότητα (Turbidity)	- 24 -
1.3.5 Νιτρικά άλατα	- 24 -
1.4 Πιθανές εναλλακτικές μέθοδοι	- 26 -
1.4.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	- 27 -
1.4.2 Καύσιμα μειωμένης ρύπανσης.....	- 29 -
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Distillates (MGO/MDO).....	- 31 -
2.1 Χρήση εναλλακτικών καυσίμων.....	- 31 -
2.2 Χαρακτηριστικά MGO/MDO.....	- 32 -
2.3 Προκλήσεις και προβλήματα κατά την εναλλαγή καυσίμου.....	- 33 -
2.4 Τροποποιήσεις στα συστήματα καυσίμου	- 34 -
2.5 Μελλοντική Διαθεσιμότητα και τιμές των αποσταγμάτων.....	- 35 -
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubbers)....	- 36 -
3.1 Τύποι Scrubbers	- 40 -
3.1.1 Open-loop (Seawater) Scrubbers.....	- 42 -
3.1.2 Closed-loop (Freshwater) Scrubbers.....	- 44 -
3.1.3 Hybrid Scrubbers	- 46 -
3.1.4 Συστήματα παρακολούθησης των εκπομπών	- 48 -
3.1.5 Dry Scrubbers.....	- 48 -

3.2	Μέθοδοι αφαίρεσης.....	- 49 -
3.3	Συστήματα μείωσης εκπομπών NOx.....	- 51 -
3.3.1	Επιλεκτική καταλυτική μείωση SCR.....	- 51 -
3.3.2	Ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR)	- 53 -
3.4	Σύγκριση Τεχνολογιών Scrubbers	- 54 -
3.4.1	Λειτουργία σε freshwater.....	- 54 -
3.4.2	Λειτουργία με μηδενικές απορρίψεις νερού έκπλυσης	- 55 -
3.4.3	Βάρος	- 55 -
3.4.4	Κατανάλωση Ενέργειας.....	- 55 -
3.4.5	Συμβατότητα με συστήματα SCR	- 55 -
3.4.6	Εμφάνιση καπνού	- 56 -
3.4.7	Απόσβεση του θορύβου της μηχανής.....	- 56 -
3.5	Προκλήσεις από την εγκατάσταση Scrubbers.....	- 56 -
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Scrubber.....	- 58 -
4.1	Μείωση Καυσαερίων Ρύπων.....	- 59 -
4.2	Απορρίψεις νερού (water discharges)	- 59 -
4.2.1	Ανάλυση Νερού Πλύσης.....	- 59 -
4.2.2	Βαρέα μέταλλα	- 60 -
4.2.3	pH	- 61 -
4.2.4	Νιτρικά άλατα	- 61 -
4.2.5	ΡΑΗ	- 62 -
4.2.6	Η χρήση scrubbers στους λιμένες	- 62 -
4.3	Σύγκριση των πλυντηρίων θαλασσινών και γλυκών υδάτων	- 63 -
4.4	Πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές GHG.....	- 63 -
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	- 65 -
5.1	Περιγραφή του πλοίου υπόδειγμα	- 65 -
5.2	Προφίλ φόρτιου κινητήρα	- 70 -
5.3	Χαρακτηριστικά λειτουργίας πλοίου.....	- 70 -
5.4	Το scrubber	- 71 -
5.4.1	Κόστος scrubber	- 71 -
5.5	Επιλεκτική καταλυτική μείωση.....	- 73 -
5.6	Τα σενάρια	- 73 -
5.7	Μέθοδοι αξιολόγησης.....	- 76 -
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	- 77 -

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 80 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 82 -

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιστορικό της μελέτης

Οι συχνές φυσικές καταστροφές αποτελούν τρέχουσα απειλή για τον άνθρωπο. Ακραίοι τυφώνες, πλημμύρες, ξηρασίες, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και οι απρόβλεπτες μεταβολές του καιρού μπορούν να απειλήσουν την ανθρωπότητα. Ως εκ τούτου, τις τελευταίες δεκαετίες ο κόσμος έχει αρχίσει να δίνει προσοχή σε αυτά τα ζητήματα και έχει λάβει μέτρα για τη μείωση του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η οποία αποτελεί μία από τις κύριες αιτίες αυτής της κατάστασης.

Η ναυτιλιακή βιομηχανία δεν αποτελεί εξαίρεση. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει θεσπίσει αντίμετρα για τη μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου (GHG) και για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως τα οξειδία του αζώτου (NOx) και τα οξειδία του θείου (Sox) από τα πλοία. Έχουν ήδη τεθεί σε ισχύ ορισμένα μέτρα για παράδειγμα κανονισμοί του παραρτήματος VI / κεφάλαια 3 και 4 της διεθνούς σύμβασης για την Πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL). Επιπλέον, τα κριτήρια για τις εκπομπές θα γίνουν αυστηρότερα, επομένως οι ενδιαφερόμενοι, όπως κατασκευαστές εξοπλισμού, ναυπηγεία και πλοιοκτήτες να συνεχίζουν να μελετούν και να ερευνούν για να συμμορφώνονται τα πλοία με τους κανονισμούς. Στο αποτέλεσμα των προσπαθειών των ενδιαφερομένων, μέχρι στιγμής, έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες και λειτουργικές μέθοδοι για να συμμορφωθούν τα πλοία με τους διεθνείς κανονισμούς. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες:

1. βελτίωση της αποδοτικότητας του πλοίου,
2. πρόσθετα συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων
3. και χρήση της εναλλακτικής ενέργειας.

Οι λεπτομέρειες είναι οι ακόλουθες (Fernandez, et al., 2010, IMO 2015, Vogler, et al. 2016):

1. Βελτίωση της αποδοτικότητας του πλοίου:
 - **Μέθοδος λειτουργίας:** Μείωση ταχύτητας, Βελτιωμένος προγραμματισμός ταξιδιού, Συνεχής λειτουργία στροφών άξονα, Η συντήρηση του κύτους και της προπέλας

- **Τεχνική μέθοδος:** Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του πλοίου, Χρήση slide βαλβίδα για την έγχυση καυσίμου στον κινητήρα ,Βελτιστοποιημένη έγχυση καυσίμου (χρονισμός και πίεση), Σύστημα ανάκτησης θερμότητας, Προηγμένο πηδάλιο και προπέλα,
2. Σύστημα μείωσης εκπομπών:
 - Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP), φίλτρο σωματιδίων ντίζελ (DPF), Καταλύτες οξειδωσης ντίζελ (DOC), επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR), Ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR), **Exhaust gas scrubbers (EGS)**
 3. Εναλλακτική ενέργεια
 - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, κυμέλες καυσίμου υδρογόνου
 - Βελτιωμένα καύσιμα (όσον αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση): LNG, MGO / MDO, βιοκαύσιμα

Ενώ χουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για τη μείωση των εκπομπών, ωστόσο, δεν αποτελούν λύση. Οι περισσότερες τεχνολογίες σχετικά με της ανανεώσιμες πηγές ανεργίας δεν επαρκούν για να αντικαταστήσουν τις τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, τα βιοκαύσιμα παρουσιάζουν προβλήματα όσον αφορά την οικονομική τους βιωσιμότητα και παραγωγικότητα (Fernandez, et al., 2010 · IMO 2015; Vogler, et al., 2016). Ως εκ τούτου, προκειμένου να συμμορφωθούν με τους προσεχείς κανονισμούς θα θεωρηθούν οι ακόλουθες τρεις επιλογές ως πιθανές:

καύσιμα / συστήματα προώθησης νέων πλοίων κατασκευής με: LNG, HFO με επιπλέον σύστημα μείωσης εκπομπών NOx και SOx και καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (MGO, MDO,) (Dalaklis et al, 2016).

Δεδομένου ότι η εργασία αυτή εκπονήθηκε μετά την εφαρμογή των νέων κανονισμών, κρίθηκε σκόπιμο από το συγγραφέα να συγκριθούν και να αξιολογηθούν οι δυο λύσεις που μπορούν άμεσα να εφαρμοστούν από τις ναυτιλιακές εταιρίες. Για το λόγο αυτό δεν εξετάστηκε η λύση του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) από τα πλοία.

Ωστόσο, θεωρήθηκε σκόπιμο να αξιολογηθεί από οικονομικής άποψης η επένδυση σε scrubbers για ένα πραγματικό πλοίο (το OOCL Hong Kong). Για το σκοπό

αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πραγματικά δεδομένα του πλοίου, προσθέτοντας τον παράγοντα του ρεαλισμού στο μοντέλο της εργασίας. Ωστόσο, η έλλειψη διαθέσιμων στοιχείων για scrubbers τέτοιου μεγέθους μηχανής, οδήγησε σε ορισμένες παραδοχές από παλαιότερες δημοσιευμένες έρευνες. Το μέσο για την οικονομική αξιολόγηση είναι η ανάλυση σεναρίων (scenario analysis), όπου το επιλεγμένο πλοίο χρησιμοποιείται σε διαφορετικά προφίλ λειτουργίας (έκθεσης σε ζώνη ECA), επηρεάζοντας ανάλογα τα αποτελέσματα. Ακόμα, εξετάζεται ο ρόλος της διαφοράς της τιμής των 2 καυσίμων HFO, MGO στην αξιολόγηση της επένδυσης. Για την αξιολόγηση της επένδυσης χρησιμοποιούνται τρία γνωστά επενδυτικά κριτήρια: η μέθοδος της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV), ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR) και η περίοδος επανείσπραξης (payback period).

Δήλωση προβλημάτων έρευνας

Τα τρία διαφορετικά συστήματα, πιο συγκεκριμένα, LNG, HFO με scrubbers και MGO, θεωρούνται ως τύποι καυσίμων για τα νέα πλοία ώστε να συμμορφωθούν με τους κανονισμούς εκπομπών (Dalaklis et al, 2016). Χρησιμοποιώντας HFO και εναλλάσσοντας καύσιμα από HFO σε MDO / MGO σε Περιοχές Ελέγχου εκπομπών ECA είναι η μόνη πρακτική για να συμμορφωθούν με τους ισχύοντες ελέγχους για το Θείο. Αλλά η μέθοδος αυτή δεν θα είναι αποτελεσματική μετά το 2020, όπου, θα είναι η περίοδος έναρξης του ορίου περιεκτικότητας σε θείο στα καύσιμα από 3,5% σε 0,5%.

Επιπλέον, αναμένεται ότι οι κανονισμοί θα συνεχίσουν να γίνονται αυστηρότεροι και υπάρχει μια μεγάλη πιθανότητα να ρυθμίζονται και άλλοι ατμοσφαιρικοί ρύποι όπως τα σωματίδια στο εγγύς μέλλον (Schinas & Butler, 2016).

Ερευνητικοί στόχοι και ερωτήσεις

Αυτή η διατριβή στοχεύει να βοηθήσει τους πλοιοκτήτες να κατανοήσουν τους διαφορετικούς τύπους των καυσίμων μεταξύ των τριών εναλλακτικών επιλογών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, με έμφαση στη χρήση HFO με scrubbers όταν σχεδιάζουν να κατασκευάσουν νέα πλοία. Ως εκ τούτου, αυτή η διατριβή θα εξετάσει και την κατάσταση μετά την 1η Ιανουαρίου 2020, όταν τεθούν σε ισχύ οι αυστηρότεροι κανονισμοί SO_x από 3,5% m / m σε 0,5% m / m παγκοσμίως.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι, η παρούσα διατριβή θα απαντήσει στις ακόλουθες ερωτήσεις:

- 1) Γιατί τα πλοία πρέπει να αλλάξουν τα συστήματα καυσίμου / κινητήρα τους και ποιες εναλλακτικές λύσεις είναι διαθέσιμες ;
- 2) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριών τύπων καυσίμων σε σύγκριση μεταξύ τους με έμφαση στα HFO με χρήση scrubber;
- 3) Πόσες κεφαλαιουχικές δαπάνες χρειάζονται για την κατασκευή νέων πλοίων χρησιμοποιώντας διαφορετικά καύσιμα;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Ρυθμιστικό πλαίσιο

1.1 Εκπομπές Αέριων Ρύπων

1.1.1 Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO)

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO) αποτελεί έναν οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών του οποίου ο σκοπός είναι (μετάφραση από I.M.O., 2012, σελ.3): *«να παρέχει το μηχανισμό συνεργασίας μεταξύ των κυβερνήσεων στον τομέα των κυβερνητικών ρυθμίσεων και πρακτικών που αφορούν τεχνικά θέματα όλων των ειδών που επηρεάζουν τη ναυτιλία η οποία δραστηριοποιείται στο διεθνές εμπόριο, να ενθαρρύνει και να διευκολύνει τη γενική υιοθέτηση των υψηλότερων πρακτικά προτύπων σε θέματα που αφορούν την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, την αποτελεσματικότητα της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη και τον έλεγχο της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία και να ασχολείται με τα διοικητικά και νομικά ζητήματα που σχετίζονται με τους αντίστοιχους σκοπούς».*

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας εξέδωσε το 1973 τη Διεθνή Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships). Η εν λόγω σύμβαση, όπως τροποποιήθηκε από το Πρωτόκολλο του 1978 (MARPOL 73/78), εφαρμόζεται σε όλα τα πλοία οποιουδήποτε τύπου τα οποία λειτουργούν στη θάλασσα. Καλύπτει όλες τις πτυχές της εσκεμμένης ρύπανσης των πλοίων από πετρέλαιο (Annex I), επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται χύδην (Annex II), ή σε συσκευασμένη μορφή (Annex III), λύματα (Annex IV), και απόβλητα (Annex V) (Edwards & Rymarz, 1990).

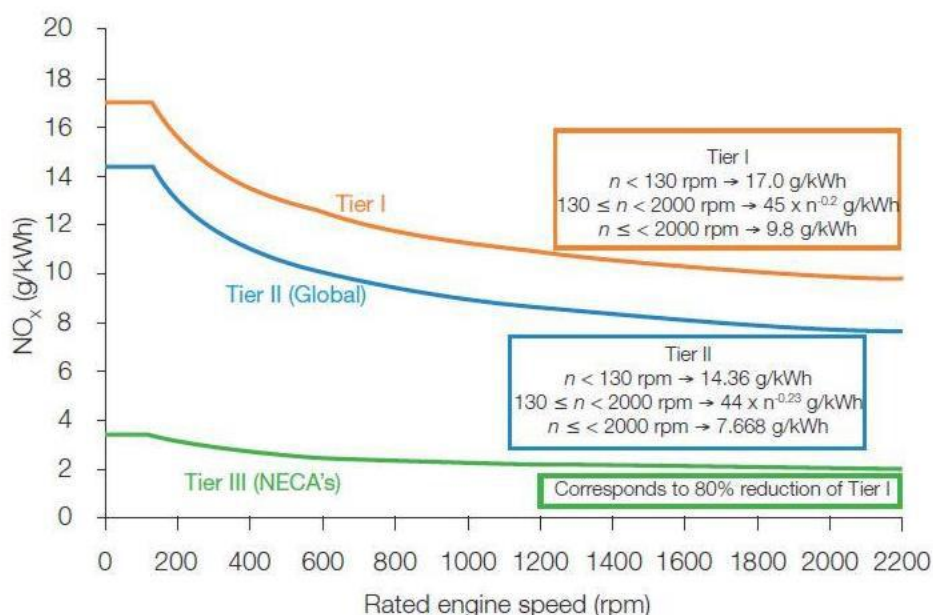
Η σύμβαση MARPOL τροποποιήθηκε από το « Πρωτόκολλο του 1997», το οποίο περιλαμβάνει το Annex VI με τίτλο: «Κανονισμοί για την Πρόληψη της Ρύπανσης του Αέρα από τα Πλοία». Στο παράρτημα αυτό τέθηκαν όρια όσον αφορά στις εκπομπές οξειδίων του Αζώτου (NO_x) και του Θείου (SO_x) από τα καυσαέρια των πλοίων και απαγορεύει κάθε σκόπιμη εκπομπή ουσιών που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος (I.P.I.E.C.A., 2007).

Το MARPOL 93/97 Annex VI επικυρώθηκε το 2004, και τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005. Ο Κανονισμός 13 Annex VI ισχύει για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου, και ο Κανονισμός 14 ισχύει για τις εκπομπές των οξειδίων του θείου. Το τελευταίο ορίζει ένα παγκόσμιο «ανώτατο όριο» περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο (δηλαδή την ποσότητα του θείου που επιτρέπεται στα καύσιμα για χρήση στη ναυτιλία) της τάξεως του 4,5 τοις εκατό m / m και τη δημιουργία κάποιων καθορισμένων περιοχών ελέγχου εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x Emission Control Areas), στις οποίες το αντίστοιχο όριο είναι 1,5 τοις εκατό m / m (I.P.I.E.C.A., 2007).

A. Κανονισμός NO_x (άρθρο 13 του παραρτήματος VI της MARPOL)

Το NO_x αναφέρεται σε οξειδία του αζώτου όπως το NO και το NO₂ και προκαλεί προβλήματα υγείας ειδικά στο αναπνευστικό σύστημα. Αντιδρά με άλλα αέρια και μπορεί να σχηματίσει φαινόμενο νέφους. Θα μπορούσε επίσης να συμβάλει στη δημιουργία όξινης βροχής και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (Icoral-Noxite, n.d.). Συνήθως σχηματίζεται με αντίδραση μεταξύ O₂ και N₂ σε υψηλές θερμοκρασίες.

Βασικά περισσότερα NO_x σχηματίζονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Έτσι στους κινητήρες ντίζελ, ειδικά τους δίχρονους που είναι πιο αποδοτικοί και με περισσότερη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες στους κυλίνδρους εκπέμπουν περισσότερα NO_x. Σε αντίθεση με το SO_x, ο σχηματισμός NO_x εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία καύσης στον κινητήρα. Ως εκ τούτου, είναι δύσκολο για νέους κανονισμούς να ισχύουν για τα υπάρχοντα πλοία αναδρομικά, επομένως ισχύει μόνο για πλοία που κατασκευάζονται μετά την έναρξη ισχύος των κανονισμών. Η Tier I εφαρμόζεται στα πλοία που κατασκευάστηκαν μετά την 1η Ιανουαρίου 2000, η Tier II είναι για πλοία που κατασκευάστηκαν μετά την 1η Ιανουαρίου 2010 και η Tier III είναι για πλοία κατασκευασμένα μετά την 1η Ιανουαρίου 2016 μόνο στην περιοχή ελέγχου εκπομπών NO_x (NECA) και οι λεπτομερείς απαιτήσεις τους φαίνονται στο σχήμα 1.

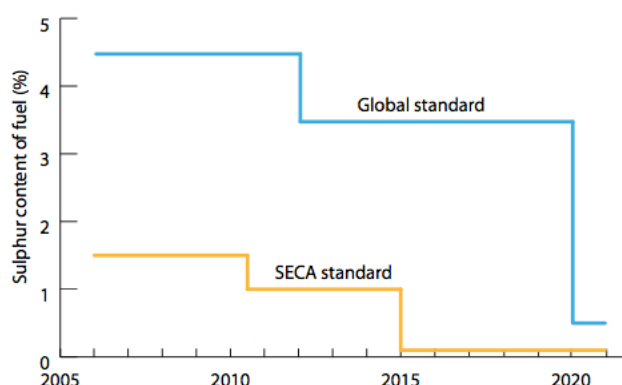


Προς το παρόν, μόνο οι περιοχές της Βόρειας Αμερικής και των ΗΠΑ της Καραϊβικής ορίζονται ως NECA από τον IMO (από την 1η Ιανουαρίου 2016), αλλά η Βαλτική Θάλασσα και η Βόρεια Θάλασσα εγκρίθηκαν ως NECA μετά την 1η Ιανουαρίου 2021. Επιπλέον, αναμένεται να προταθούν περισσότερες περιοχές ως NECA, έτσι ώστε οι πλοιοκτήτες να είναι προσεκτικοί με την ημερομηνία κατασκευής των νέων πλοίων τους.

B. Κανονισμός SOx (άρθρο 14 του παραρτήματος VI της MARPOL)

Το SOx αναφέρεται κανονικά σε S02 και μερικές φορές σε S03. Μπορεί να βλάψει το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και είναι ιδιαίτερα σοβαρό για τα παιδιά, τους ηλικιωμένους και τους ανθρώπους που πάσχουν από άσθμα. Επιπλέον, υψηλές συγκεντρώσεις του αέριου SOx μπορεί να βλάψει τα φυτά και τα δέντρα και μπορεί να προκαλέσει όξινη βροχή (USEPA, n.d.). Παράγεται με οξείδωση του θείου κατά την καύση του κινητήρα. Σε αντίθεση με το NOx, το SOx προέρχεται κυρίως από τα περιεχόμενα των καυσίμων, τα οποία σχετίζονται ελάχιστα με τη διαδικασία καύσης στους κινητήρες. Συνεπώς, ισχύουν πάντα οι κανονισμοί για το SOx σε νέα υπό κατασκευή πλοία και υπάρχοντα πλοία.

Η αλλαγή καυσίμου από HFO σε MGO κοντά στην ECA είναι, μέχρι στιγμής, συνήθης πρακτική για να συμμορφωθεί με τη ρύθμιση SOx, αλλά δεν φαίνεται να είναι σωστή μετά το παγκόσμιο πρότυπο που θα μειωθεί από 3,5% m / m σε 0,5% m / m την 1η Ιανουαρίου 2020, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.

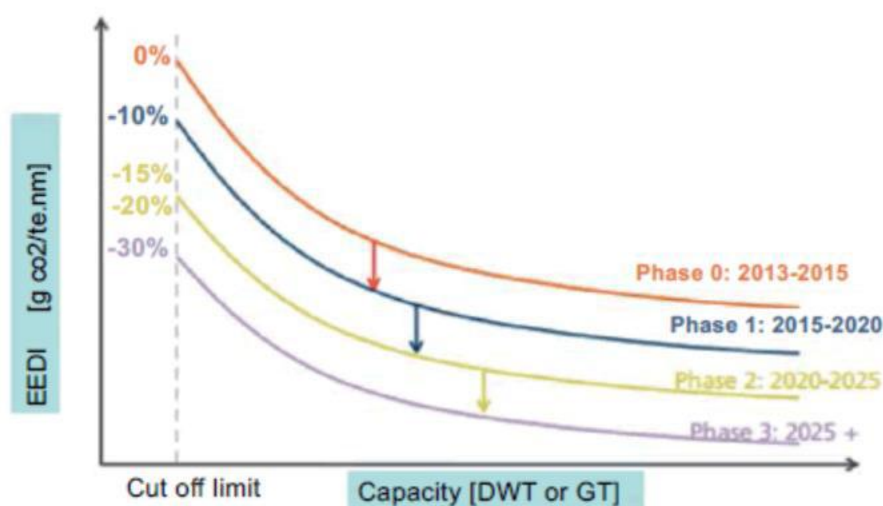


Προς το παρόν υπάρχουν δύο τρόποι για να ελέγξεις του SOx , ο ένας ελέγχει την περιεκτικότητα σε θείο στο καύσιμο και ο άλλος χρησιμοποιεί scrubber συστήματα καθαρισμού αερίων ρύπων . Ο ευκολότερος τρόπος για να πληρούνται τα νέα πρότυπα SOx είναι η εναλλαγή καύσιμου από HFO σε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο όπως MGD / MDO. Αλλά η τιμή του καυσίμου MGO είναι πολύ ακριβή, το IFO380 είναι 374,5 \$ / mt και το MGO είναι 611,5 \$ / mt στο Ρότερνταμ στις 1 Φεβρουαρίου 2018 (World Bunker Price), οπότε είναι ο χειρότερος τρόπος οικονομικής πλευράς. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο κανονισμός δεν ισχύει μόνο για νέας κατασκευής πλοία , αλλά και σε υπάρχοντα πλοία, έτσι τα ήδη υπάρχοντα πλοία να έχουν στενότητα στις επιλογές για την

τήρηση των κανονισμών. Προς το παρόν, θεωρείται ότι τα συστήματα καθαρισμού scrubber όπως το σύστημα καθαρισμού SOx, που είναι τεχνικά εφικτό, είναι πιο ελκυστικό στους υπάρχοντες και νέους ιδιοκτήτες πλοίων και η χρήση άλλων συστημάτων πρόωσης όπως οι κινητήρες αερίου LNG είναι ελκυστικότεροι για τους νέους ιδιοκτήτες.

Γ. Κανονισμός για το CO₂ (άρθρο 19-23 του παραρτήματος VI της MARPOL)

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι γνωστό ως αέριο της υπερθέρμανσης του πλανήτη έχοντας την μεγαλύτερη επίδραση όπως CH₄, N₂O και χλωροφθοράνθρακες. Το CO₂ σχηματίζεται στα πλοία όταν ο άνθρακας (C) στο καύσιμο συναντάται με οξυγόνο. Τα ορυκτά καύσιμα περιέχουν μια ένωση υδρογονανθράκων που αποτελείται από υδρογόνα (H) και άνθρακες (C). Οι αριθμοί των Cs και Hs καθορίζουν διαφορετικά αέρια όπως το μεθάνιο (CH₄), το αιθάνιο (C₂H₆) και το προπάνιο (C₃H₈). Όταν οι άνθρακες αυτοί συναντούν οξυγόνο στον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της καύσης, δημιουργείται το CO₂. Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές CO₂, χρησιμοποιούνται λιγότερα ορυκτά καύσιμα βελτιώνοντας της ενεργειακή απόδοση του πλοίου ή χρησιμοποιούνται καύσιμα που εκπέμπουν λιγότερο CO₂, όπως το LNG. Ο IMO ρυθμίζει τις εκπομπές CO₂ μέσω του (EEDI) και η μονάδα μέτρησης του είναι η ποσότητα των εκπομπών CO₂ / τόνος φορτίου * μιλίων και τα όριά του φαίνονται στο Σχήμα 3.



Η φάση 1, η οποία είναι ο 10% μειωμένος δείκτης, επιτυγχάνεται κανονικά με slow steaming (Motorship, 2015). Τα πλοία που θα κατασκευάσουν μετά το 2020, φάση 2, πρέπει να εξετάσουν την επιπλέον μείωση κατά 10% των εκπομπών CO₂.

Η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του IMO ενέκρινε το Πρωτόκολλο του 1997 στην MARPOL Σύμβαση η οποία προσέθεσε το παράρτημα VI, τους κανονισμούς για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία. Το παρόν παράρτημα τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005. Για να μειωθούν οι επιβλαβείς επιπτώσεις των εκπομπών SO_x στην ανθρώπινη υγεία και του περιβάλλοντος, ο κανονισμός 14 του παραρτήματος VI εισήγαγε παγκόσμιο όριο στην περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων των πλοίων 4,5% και ενός ορίου εντός των καθορισμένων περιοχών ελέγχου εκπομπών SO_x (SECA) 1,5%. Η Βαλτική Θάλασσα ήταν η πρώτη SECA που υιοθετήθηκε στο πλαίσιο του παραρτήματος και ακολουθήθηκε από τη SECA της Βόρειας Θάλασσας / της Μάγχης.



SECA της Βόρειας Θάλασσας

Η 58η σύνοδος MEPC του IMO, τον Οκτώβριο του 2008, ενέκρινε σημαντικές αλλαγές στο παράρτημα VI με το ψήφισμα MEPC.176 (58). Ένα παγκόσμιο όριο καυσίμου θείου 3,5 % τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2012, και εισήγαγε περαιτέρω μειώσεις στα όρια θείου στα καύσιμα εντός των ζωνών SECA, με όριο 1,0% που ισχύει από την 1η Ιουλίου 2010 και 0,1% από 1η Ιανουαρίου 2015. Στο MEPC 70, που πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2016, τα κράτη μέλη συμφώνησαν ότι ένα παγκόσμιο όριο του θείου στα καύσιμα πλοίων 0,5% θα

εφαρμοστεί από το 2020 με βάση τις μελέτες που κατέδειξαν τη διαθεσιμότητα συμμορφούμενων καυσίμων (0,5% S). Βλέπε πίνακα 1 για τα όρια θείου.

	GLOBAL	ECA
Initial limits	4.5%	1.5%
1 July 2010	4.5%	1.0%
1 Jan. 2012	3.5%	1.0%
1 Jan. 2015	3.5%	0.1%
1 Jan. 2020	0.5%	0.1%

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η αναθεώρηση του Annex VI επαναπροσδιόρισε τον ορισμό των SECA σε ECA, ώστε να περιλαμβάνει όχι μόνο τη μείωση των SO_x, αλλά και των NO_x και των PM (Particulate Matter) (ABS, 2013).

Το ψήφισμα του IMO MEPC.190 (60) και το ψήφισμα του IMO MEPC.202 (62) πρόσθεσαν δύο νέες ECA, την ECA της Βόρειας Αμερικής και τα ύδατα των Καραϊβικών χωρών, συμπεριλαμβανομένου του Πουέρτο Ρίκο και τους Παρθένους Νήσους .



ECA της Βόρειας Αμερικής



ECA Καραϊβικών χωρών

1.1.2 Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΥ)

Η ΕΕ μέσω των Οδηγιών της Commission ευθυγραμμίστηκε με τις αποφάσεις του IMO σχετικά με την περιεκτικότητα των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο, με απότερο

στόχο τη μείωση των εκπομπών SO_x. Οι Οδηγίες που νομοθέτησε ισχύουν για όλα τα πλοία, όλων των σημαιών, ακόμα και για πλοία που ξεκίνησαν το ταξίδι τους εκτός ΕΕ. Πιο συγκεκριμένα, η ΕΕ νομοθέτησε την Οδηγία 1999/32 EC, η οποία προβλέπει ότι η μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο δε θα πρέπει να ξεπερνά το 3,50%, με εξαίρεση καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε πλοία που έχουν εγκαταστήσει scrubbers.

Αντίστοιχα, η Οδηγία ορίζει ότι η περιεκτικότητα των αποσταγμάτων (distillates) δε θα πρέπει να ξεπερνά το 0.1%. Αναφορικά με τις ζώνες ECA, προβλέπεται η χρήση καυσίμων με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 1% μέχρι τις 31/12/2014 και 0,1% από την 1/1/2015. Ακόμα, ορίζεται σαφώς η χρήση καυσίμων με περιεκτικότητα 0,1% για πλοία που εισέρχονται σε ευρωπαϊκούς λιμένες. Παρέχεται αρκετός χρόνος ώστε να ολοκληρωθεί η εναλλαγή καυσίμου μέχρι και την άφιξη του πλοίου στο λιμένα και μέχρι τον απόπλου του πλοίου από το λιμάνι αντίστοιχα (EU, 2012). Η Οδηγία 1999/32 EC επικαιροποιήθηκε με τις νέες αποφάσεις του IMO και αναθεωρήθηκε με την Οδηγία 2012/33 EC. Σε αυτή προβλέπεται η χρήση καυσίμου μέγιστης περιεκτικότητας σε θείο 0,5% από 1/1/2020 σε όλες τις περιοχές εκτός ECA, ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα της μελέτης του IMO για τη διαθεσιμότητα των καυσίμων (ABS, 2013). Τέλος, η Οδηγία προβλέπει ότι θα παρακολουθεί όλες τις διεθνείς εξελίξεις και τις αποφάσεις του IMO, ώστε να κινείται στην ίδια κατεύθυνση με αυτές μελλοντικά (EU, 2012).

1.1.3 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (USA)

Οι ΗΠΑ υιοθέτησαν το Annex VI της MARPOL με το Title 40 του Κώδικα Ομοσπονδιακών Ρυθμίσεων (Code of Federal Regulations, CFR) Part 1043. Το συγκεκριμένο κομμάτι του Κώδικα έχει στόχο τη μείωση των εκπομπών SO_x, NO_x και των PM από τα πλοία. Η ισχύς του Κώδικα καλύπτει όλα τα πλοία που φέρουν τη σημαία των ΗΠΑ, καθώς και πλοία ξένης σημαίας που πλέουν εντός των υδάτων των ΗΠΑ ή της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης τους (ABS, 2013).

1.1.4 California

Εκτός από τον Ομοσπονδιακό Κώδικα Ρυθμίσεων που αναλύθηκε ανωτέρω, η Πολιτεία της California μέσω του δικού της Ρυθμιστικού Φορέα California Air Resources Board (CARB) θέσπισε τη χρήση distillates σε απόσταση 24 ναυτικών μιλίων από τις ακτές της από τον Ιούλιο του 2009. Η χρήση αποσταγμάτων αφορά

τόσο τις κύριες, όσο και τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου. Επιτρέπονται ωστόσο δύο περιπτώσεις μη-συμμόρφωσης: i) όταν το πλοίο απλά περνά από την περιοχή και ii) σε επείγουσες συνθήκες όπου η συμμόρφωση θα έθετε το πλοίο ή/και τους επιβάτες σε κίνδυνο (Lloyds Register, 2015).

Μετά και την εφαρμογή του κανονισμού από τον Ιούλιο του 2009, το CARB προχωρά σε βαθμιαία μείωση της περιεκτικότητας των αποσταγμάτων σε θείο το 2012 και το 2014. Μάλιστα, η California καθιστά υποχρεωτική τη χρήση distillates με 0,1% περιεκτικότητα σε θείο από 1/1/2014, ένα χρόνο νωρίτερα δηλαδή από τον αντίστοιχο κανονισμό του IMO (Lloyds Register, 2015).



Ο ακόλουθος πίνακας 2 παρουσιάζει τις απαιτήσεις του CARB για την περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο.

Fuel Requirement	Effective Date	CARB's California OGV Fuel Requirement Percent Sulfur Content Limit
Phase I	July 2009	Marine Gas Oil (DMA) at or below 1.5% sulfur; or Marine Diesel Oil (DMB) at or below 0.5% sulfur
	August 2012	Marine Gas Oil (DMA) at or below 1.0% sulfur; or Marine Diesel Oil (DMB) at or below 0.5% sulfur
Phase II	January 2014	Marine Gas Oil (DMA) at or below 0.1% sulfur; or Marine Diesel Oil (DMB) at or below 0.1% sulfur

1.1.5 Η ΚΙΝΑ

Η Κίνα έχει επίσης αναπτύξει έναν τον τοπικό κανονισμό για τις εκπομπές αέριων το Ναυτικό Σχέδιο περιοχής ελέγχου εκπομπών, που είναι εφαρμόσιμο στο Δέλτα του ποταμού Pearl, στο Δέλτα του Yangtze και την περιοχή Bohai Rim (βλ Σχήμα 4) στο πλαίσιο του νόμου “The People’s Republic of China Air Pollution Prevention Law”. Οι κανονισμοί ισχύουν για τα πλοία που ταξιδεύουν, στο λιμάνι και λειτουργούν εντός των ECA που εκτείνεται μέχρι 12 ναυτικά μίλια από τις ακτές. Οι περιοχές του Χονγκ Κονγκ και του Μακάο, αποκλείονται από αυτό σχέδιο, καθώς και στρατιωτικά πλοία, αθλητικά σκάφη και αλιευτικά σκάφη.



Ο κανονισμός εφαρμόζει μια προσέγγιση με βάση την ημερομηνία που αρχικά επικεντρώνεται στην εφαρμογή των διεθνών απαιτήσεων και τον έλεγχο των εκπομπών από πλοία που είναι αγκυροβολημένα για περισσότερο από δύο ώρες. Από την 1η Ιανουαρίου 2017, τα πλοία αυτά πρέπει να χρησιμοποιούν καύσιμα με $\leq 0,5\%$ περιεκτικότητα σε θείο. Από την 1η Ιανουαρίου 2019 αυτό το όριο καυσίμων επίσης ισχύει εντός των θαλάσσιων PRC Marine ECAs. Η χρήση εναλλακτικών λύσεων όπως οι ηλεκτρικές συνδέσεις με την ξηρά ή EGCS είναι επιτρεπόμενες.

1.2 Ρυθμίσεις για την εγκατάσταση και λειτουργία scrubbers

Η εφαρμογή των αυστηρότερων περιβαλλοντικών κανονισμών που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα οδήγησε στην εφαρμογή των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (exhaust gas systems, EGS) ή εν συντομία scrubbers, στα πλοία ως στρατηγική συμμόρφωσης με αυτούς. Αρχικά, η πρόβλεψη για τη χρήση scrubbers στα πλοία είχε ενταχθεί στο Regulation 14, σχετικά με το στόχο μείωσης SOx. Ωστόσο, με την αναθεώρηση του Annex VI το 2008, η πρόβλεψη για scrubbers και οι σχετικές απαιτήσεις μεταφέρθηκαν στο Regulation 4, όπου αναλύονται αντίστοιχες λύσεις για την επίτευξη ισοδύναμων αποτελεσμάτων.

Η έγκριση του συστήματος έκπλυσης καυσαερίων αποτελείται από δύο μέρη: πρώτον, από τη θεσπισμένη διαδικασία έγκρισης βάσει της MARPOL σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση και δεύτερον, από τον αρμόδιο νηογνώμονα με βάσει τους δικούς του κανόνες και διαδικασίες. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν και απαιτήσεις και από το κράτος-σημαίας σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος (ABS, 2013).

Περαιτέρω, ο IMO εξέδωσε οδηγίες σχετικά με το νέο αυτό τρόπο συμμόρφωσης, οι οποίες περιλαμβάνονται στο Resolution MEPC 184(59). Οι οδηγίες αυτές αναφέρουν και το λόγο (ratio) SO₂ προς CO₂ προκειμένου να βρεθεί η αντιστοιχία με τα απαιτούμενα όρια μείωσης των SO_x (ABS, 2013). Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει την αντιστοιχία του λόγου SO₂/ CO₂ για την επίτευξη ισοδύναμης μείωσης της περιεκτικότητας σε θείο.

Fuel Oil Sulfur Content (% m/m)	Ratio Emission SO ₂ (ppm)/CO ₂ (% v/v)
4.5	195.0
3.5	151.7
1.5	65.0
1.0	43.3
0.5	21.7
0.1	4.3

Οι οδηγίες του IMO ορίζουν δύο πιθανά σχέδια για την εγκατάσταση και λειτουργία scrubbers στα πλοία (Lloyds Register, 2015):

- **Scheme A:** Βασίζεται στην πιστοποίηση του scrubber σχετικά με την αποδοτικότητα του στη μείωση SO_x. Περιλαμβάνει επίσης συνεχή παρακολούθηση των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος, αλλά και καθημερινά spot checks της απόδοσης του.
- **Scheme B:** Δεν απαιτείται πιστοποίηση, αλλά συνεχής καταγραφή των εκπομπών από ένα έγκυρο σύστημα. Επίσης, απαιτούνται καθημερινά spot checks των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος.

1.2.1 Scheme A

Στην περίπτωση αυτή πιστοποιείται η απόδοση του scrubber πριν ξεκινήσει η επιχειρησιακή λειτουργία του. Ο κατασκευαστής θα πρέπει να έχει εγκεκριμένο EGC system – Technical Manual (ETM-A) από κάποιο Οργανισμό. Στην περίπτωση που τα υποσυστήματα και οι λειτουργίες του scrubber συμβαδίζουν με το ETM-A του κατασκευαστή, τότε δεν απαιτείται συνεχής καταμέτρηση των εκπομπών του πλοίου (Lloyds Register, 2015).

Ένα άλλο πιστοποιητικό που απαιτείται ειδικά για το Scheme A είναι το SO_x Emissions Compliance Certificate (SECC). Αυτό πιστοποιεί ότι το scrubber επιτυγχάνει το στόχο μείωσης των εκπομπών SO_x σε συνεχή χρήση και με βάση τις παραμέτρους του ETM-A. Ο λόγος SO₂/ CO₂ καθορίζει το στόχο μείωσης, ώστε να επιτυγχάνεται το ισοδύναμο επίπεδο μείωσης SO_x όπως με τα συμβατά καύσιμα (distillates) που περιγράφονται στο Regulation 14 του IMO (Lloyds Register, 2015). Η διαδικασία πιστοποίησης λαμβάνει χώρα πριν ή μετά την εγκατάσταση του scrubber επί του πλοίου. Ο κατασκευαστής δοκιμάζει την απόδοση του scrubber σε χαμηλό, μεσαίο και υψηλό επίπεδο ροής καυσαερίων, με ένα ή περισσότερα καύσιμα και στέλνει τα αποτελέσματα των δοκιμών σε αρμόδιο Οργανισμό (Νηογνώμονας ή Flag State) προς έγκριση. Με τη σύμφωνη γνώμη του Οργανισμού χορηγείται το SECC. Δίνεται μάλιστα η δυνατότητα σε έναν κατασκευαστή να πιστοποιήσει μια ολόκληρη γκάμα scrubbers όταν αυτά παράγονται σε σειρά, έχουν παρόμοια σχεδίαση, αλλά διαφορετική χωρητικότητα (Lloyds Register, 2015).

Μετά την εγκατάσταση πρέπει να γίνει επιθεώρηση του συστήματος, ώστε να εξακριβωθεί ότι η εγκατάσταση έγινε με βάση το ETM-A και το SECC. Για ακόμα καλύτερη συμμόρφωση προτείνεται να γίνεται συνεχής καταγραφή των λειτουργικών παραμέτρων και καθημερινά spot checks. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν λάθη ή παραλείψεις κατά τον έλεγχο του Νηογνώμονα, επαναχορηγείται το International Air Pollution Prevention Certificate, ώστε να περιλαμβάνει την εγκατάσταση του scrubber (ABS, 2013).

Επιπλέον, το πλοίο θα πρέπει να διαθέτει ένα εγκεκριμένο Onboard Monitoring Manual (OMM) που θα καταγράφει πληροφορίες σχετικά με το χρόνο και τη θέση του πλοίου. Οι πληροφορίες αυτές θα πρέπει να μπορούν να αποθηκεύονται για

τουλάχιστον 18 μήνες και να είναι διαθέσιμες σε πιθανούς ελέγχους συμμόρφωσης του πλοίου. Τέλος, επί του πλοίου θα πρέπει να βρίσκεται εγκεκριμένο EGC Record Book, όπου θα αναφέρονται όλες οι τροποποιήσεις, επισκευές και εργασίες συντήρησης του scrubber (Lloyds Register, 2015).

1.2.2 Scheme B

Στην περίπτωση του Scheme B δεν απαιτείται αρχική έγκριση της απόδοσης του scrubber για τη μείωση των SO_x, όπως στο Scheme A. Ωστόσο, απαιτείται η ύπαρξη ενός συστήματος παρακολούθησης των εκπομπών που να αποδεικνύει ότι επιτυγχάνεται ο στόχος του λόγου SO₂/ CO₂. Ο λόγος αυτός θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος, αν όχι μικρότερος από αυτόν που ορίζεται από το Regulation 14 του Annex VI. Το σύστημα παρακολούθησης των εκπομπών θα πρέπει να είναι εγκεκριμένο από αρμόδιο Οργανισμό και ελεγμένο στην αρχική επιθεώρηση (κατά την εγκατάσταση), όσο και σε επόμενες (Lloyds Register, 2015).

Στο Scheme B θα πρέπει να υπάρχει ένα εγκεκριμένο EGC system – Technical Manual (ETM-B) κατ’ αντιστοιχία με το EGC system – Technical Manual (ETM-A) του Scheme A. Το ETM-B θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες για τη μονάδα καύσης στην οποία τοποθετείται, λειτουργικές τιμές και όρια, καθώς και τι θα πρέπει να γίνεται όταν δεν επιτυγχάνεται ο λόγος SO₂/ CO₂. Τέλος, και στο Scheme B απαιτείται η ύπαρξη ενός Onboard Monitoring Manual (OMM) με τις λειτουργίες που περιγράφηκαν ανωτέρω (Lloyds Register, 2015).

Συνολικά, ο πίνακας 4 παρουσιάζει τα απαιτούμενα έγγραφα για τα Schemes A και B.

Document	Scheme A – Parameter Check	Scheme B – Continuous Monitoring
SO _x Emissions Compliance Plan (SECP)	X	X
SO _x Emissions Compliance Certificate (SECC)	X	
EGC Technical Manual, Scheme A (ETM-A)	X	
EGC Technical Manual, Scheme B (ETM-B)		X
Onboard Monitoring Manual (OMM)	X	X
EGC Record Book or Electronic Logging System	X	X

1.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια για τη λειτουργία scrubbers

1.3.1 Απορρίψεις νερού (Water Discharges)

Οι οδηγίες του IMO σχετικά με τα scrubbers περιλαμβάνουν εκτός των υπολοίπων και τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρούνται σχετικά με τις απορρίψεις του νερού έκπλυσης στο περιβάλλον, προκειμένου να αποφευχθεί ζημιά σε αυτό. Ανεξάρτητα από το Scheme λειτουργίας του scrubber, θα πρέπει να παρακολουθείται στενά η κατάσταση του νερού έκπλυσης σε σχέση με τα καταγεγραμμένα δεδομένα (χρόνος και θέση του πλοίου). Η κατάσταση του νερού έκπλυσης αξιολογείται με βάση τέσσερα κριτήρια (Lloyds Register, 2015):

- pH (ως μέτρο οξύτητας)
- Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAH's)
- Θολότητα (ως μέτρο των PM)
- Νιτρικά άλατα

Υπάρχει επίσης η πρόβλεψη για περισσότερα κριτήρια στην περίπτωση που το scrubber χρησιμοποιεί χημικές ουσίες για την έκπλυση (Lloyds Register, 2015). Τέλος, οι οδηγίες καθιστούν σαφές ότι τα υπολείμματα σε μορφή λάσπης (sludge) από την έκπλυση θα πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται επί του πλοίου και να παραδίδεται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις στους λιμένες. Οι οδηγίες ορίζουν ότι δε θα πρέπει να γίνεται καύση ή αποβολή της λάσπης στη θάλασσα για κανένα λόγο, αλλά και ότι οι Οργανισμοί θα πρέπει να φροντίσουν για την ύπαρξη και επάρκεια εγκαταστάσεων υποδοχής κι επεξεργασίας λυμάτων, σύμφωνα με το Regulation 17 του Annex VI του IMO (ABS, 2013).

1.3.2 Κριτήριο pH

Το νερό έκπλυσης που αποβάλλεται στη θάλασσα δε θα πρέπει να έχει τιμή pH χαμηλότερη από 6,5 , με εξαίρεση τις περιπτώσεις που το πλοίο κινείται ή κάνει ελιγμούς, οπότε η διαφορά του pH ανάμεσα στο σημείο εισόδου του νερού και το σημείο απόρριψης του νερού έκπλυσης μπορεί να είναι μέχρι και δύο μονάδες. Επίσης, επιτρέπεται η πρόσμιξη του νερού έκπλυσης με το νερό ψύξης (που επίσης προορίζεται για απόρριψη), προκειμένου να επιτευχθεί η απαραίτητη τιμή του pH. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται χημικές ουσίες για την έκπλυση, το νερό έκπλυσης θα πρέπει να εξετάζεται ακόμα πιο ενδελεχώς, βάσει της MEPC 169(57). Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης του pH του απορριπτόμενου νερού έκπλυσης του κατά την έναρξη λειτουργίας του scrubber. Η μέτρηση του pH

λαμβάνει χώρα τέσσερα μέτρα από το σημείο εξόδου του νερού έκπλυσης από το πλοίο. Η τιμή-στόχος που θα πρέπει να επιτευχθεί είναι η ίδια (μεγαλύτερο ή ίσο του 6,5), η οποία και καταγράφεται από το ETM-A ή ETM-B (ανάλογα με το scheme λειτουργίας του scrubber). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές του pH θα πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς (ABS, 2013).

1.3.3 Κριτήριο PAH's

Το νερό έκπλυσης θα πρέπει να παρακολουθείται στενά και για την περιεκτικότητα σε PAH's. Ανάλογα με το flow rate λειτουργίας του scrubber, ορίζεται και το αντίστοιχο όριο σε PAH_{phe} (ισοδύναμο σε phenanthrene), το οποίο δε θα πρέπει να ξεπερνά τη συγκέντρωση PAH στο σημείο εισόδου του θαλασσινού νερού. Όσον αφορά τη συγκέντρωση PAH στο σημείο εξόδου του νερού έκπλυσης, αυτή θα πρέπει να γίνεται μετά την επεξεργασία από το αντίστοιχο σύστημα, αλλά πριν την πρόσμιξη του νερού έκπλυσης με άλλα υγρά. Η συγκέντρωση PAH's θα πρέπει να ελέγχεται συνεχώς είτε με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας, είτε με φθορισμό (ABS, 2013).

Flow Rate (t/MWh)	Discharge Concentration Limit (µg/L PAH _{phe} equivalents)	Measurement Technology
0-1	2,250	Ultraviolet Light
2.5	900	Ultraviolet Light
5	450	Fluorescence
11.25	200	Fluorescence
22.5	100	Fluorescence
45	50	Fluorescence
90	25	Fluorescence

Πίνακας 5 :Μέθοδοι μέτρησης συγκέντρωσης PAH

1.3.4 Θολότητα (Turbidity)

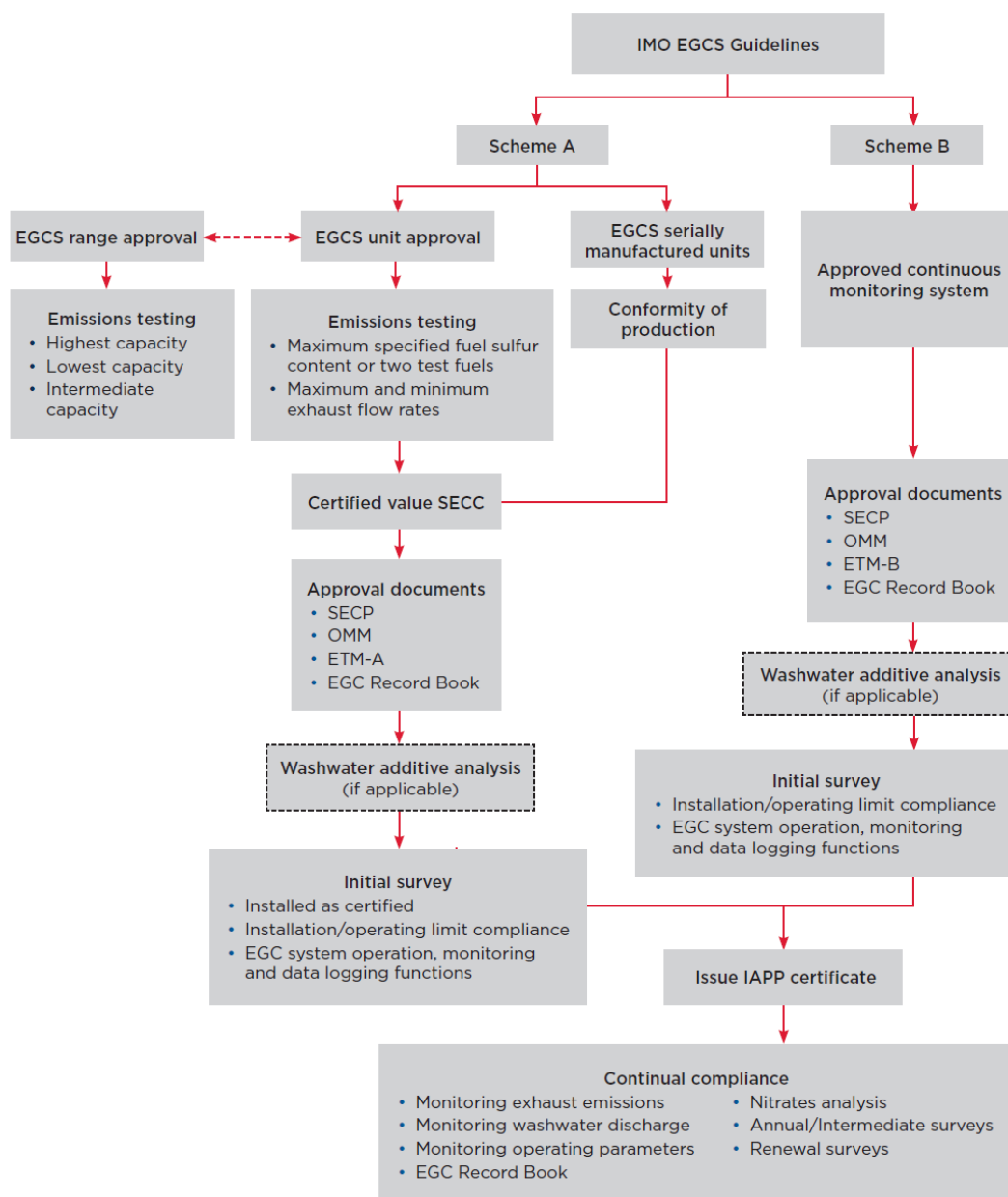
Η θολότητα του νερού έκπλυσης που απορρίπτεται στη θάλασσα δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 25 FNU's ή εναλλακτικά τα 25 NTU's, σε σχέση με τη θολότητα του νερού στο σημείο εισόδου. Όπως και για τη μέτρηση των PAH's, η μέτρηση θα πρέπει να γίνεται μετά την επεξεργασία του νερού έκπλυσης, αλλά πριν την πρόσμιξη του με άλλα υγρά (ABS, 2013).

1.3.5 Νιτρικά άλατα

Οι οδηγίες του IMO απαιτούν όλα τα scrubbers να δοκιμάζονται ως προς την ύπαρξη νιτρικών αλάτων στο απορριπτόμενο νερό έκπλυσης. Σε περίπτωση που τα επίπεδα νιτρικών αλάτων ξεπερνούν το 80% των τυποποιημένων τιμών, αυτό θα πρέπει να καταγράφεται στο ETM-A ή το ETM-B. Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται δείγματα του αποβαλλόμενου νερού έκπλυσης κατά την επιθεώρηση ανανέωσης του scrubber και να εκδίδεται το σχετικό πιστοποιητικό. Το πιστοποιητικό αυτό θα εγγυάται ότι το σύστημα επεξεργασίας του νερού έκπλυσης από το scrubber αποτρέπει την αποβολή νιτρικών αλάτων, σύμφωνα με τα όρια που τίθενται από τον IMO. Τέλος, το πιστοποιητικό αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνεται στο EGC Record Book (ABS, 2013).

Η έγκριση του συστήματος έκπλυσης καυσαερίων αποτελείται από δύο μέρη: πρώτον, από τη θεσπισμένη διαδικασία έγκρισης βάσει της MARPOL σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση και δεύτερον, από τον αρμόδιο νηογνώμονα με βάσει τους δικούς του κανόνες και διαδικασίες. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν και απαιτήσεις και από το κράτος-σημαίας σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος (ABS, 2013).

Σχήμα 4: Θεσμοθετημένες κατευθυντήριες γραμμές για τα scrubber από τον IMO



1.4 Πιθανές εναλλακτικές μέθοδοι

Προκειμένου να συμμορφωθούν με όλες τις απαιτήσεις που γίνονται αυστηρότερες, όπως αναφέρεται προηγουμένως, οι πλοιοκτήτες πρέπει να εντοπίζουν λύσεις και να τις εφαρμόζουν στα πλοία τους. Αν η καθαρή και ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλοία και να αντικαταστήσει πλήρως τα ορυκτά καύσιμα, θα ήταν η καλύτερη λύση. Δεν εκπέμπουν καθόλου NO_x, SO_x και CO₂.

1.4.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

A. Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ελπιδοφόρα ενέργεια και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και επιτυχώς σε πολλές βιομηχανίες στη ξηρά. Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ απορροφούν ηλιακό φως και το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα πάνελ 9 m² μπορεί να παράγει 1 Kw ηλεκτρικής ισχύος και 5.400 m² πάνελ θα απαιτηθούν για τη δημιουργία 600 Kw (Fernandez, et al., 2010). Έχει απεριόριστη πηγή ενέργειας, επομένως θεωρείται ιδανικό πόρος.

Ωστόσο, οι ηλιακοί συλλέκτες δεν μπορούν να λειτουργούν τη νύχτα ή στις νεφώσεις. Επιπλέον, τα πάνελ πρέπει να εγκαθίστανται σε εκτεθειμένα καταστρώματα, επομένως δεν ισχύουν για τα πλοία τα οποία έχουν ευρείες οπές ή στοίβες φορτίων σε εκτεθειμένα καταστρώματα, όπως φορηγά πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην και πλοία εμπορευματοκιβωτίων. Επιπλέον, η ικανότητά τους να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι αρκετά υψηλή για να καλύπτουν όλους τις κταναλώσεις σε ένα πλοίο. Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα είναι ότι το αρχικό του κόστος είναι πολύ μεγάλο, περισσότερο από 10 φορές της συμβατικής μέθοδου που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα (Fernandez, et al., 2010).

Συμπερασματικά, λόγω της εξάρτησης από καιρικές συνθήκες και της χαμηλής απόδοσης, η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η κύρια πηγή ενέργειας σε ένα πλοίο.

B. Αιολική ενέργεια

Γενικά, η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή και απεριόριστη ενέργεια, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον καιρό όπως η ηλιακή ενέργεια, έτσι δεν μπορεί να λειτουργήσει όλη την ώρα. Σύμφωνα με την (IWSA), η τεχνολογία πρόωσης αιολικής ενέργειας μπορεί να εξοικονομήσει 10 ~ 30% των καυσίμων στα υπάρχων πλοία και 50% στα νέα πλοία που θα κατασκευαστούν. (Allwright, 2017).

Η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: πανιά, χαρταετούς και ανεμογεννήτριες.

Τα πανιά είναι μια πολύ παραδοσιακή μέθοδος προώθησης του πλοίου. Σύμφωνα με τη σκοπιμότητα (Fernandez, et al., 2010), απαιτούνται 10% του πρόσθετου κόστους

για την εγκατάσταση τους και πιθανώς εξοικονομούν 20-27% του καυσίμου σε ορισμένες διαδρομές. Ωστόσο, δεν μπορεί να εγκατασταθεί σε πλοία με καταπακτές εμπορευματοκιβωτίων μεγάλης χωρητικότητας. Οι χαρταετοί είναι πιο εφικτή λύση από τα πανιά. Ο χαρταετός χρησιμοποιείται σε μεγάλο υψόμετρο που έχει ισχυρότερο άνεμο σε σύγκριση με την επιφάνεια της θάλασσας, επομένως η απόδοσή του είναι υψηλότερη από τα ιστία. Για να ρυμουλκηθεί ένα σκάφος, χρειάζεται χαρταετός 150 ~ 600 m², που σημαίνει ότι μπορεί να παράγει 5 φορές μεγαλύτερη ισχύ από τα πανιά. Επιπλέον, το αρχικό κόστος είναι πολύ χαμηλό σε σύγκριση με άλλες λύσεις και μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε τύπο πλοίου. Επιπλέον, τα κόστη συντήρησης είναι ιδιαίτερα χαμηλά. Μια πιο ελκυστική μέθοδος είναι χρησιμοποιεί μια ανεμογεννήτρια, η οποία μοιάζει σαν έναν ανεμόμυλο. Ωστόσο, το επιπλέον βάρος της έχει αρνητική επίδραση στη σταθερότητα του πλοίου και έχει και προβλήματα στην εγκατάσταση. Η πιο γνωστή μέθοδος στα αιολικά συστήματα είναι οι ρότορες που χρησιμοποιούν το φαινόμενο Magnus. Έχει ήδη εγκατασταθεί σε πολλά πλοία και έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητά του.

Παρόλο που η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας έχει βελτιωθεί σημαντικά και μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων από τα πλοία, δεν είναι μια σωστή λύση για την τήρηση των κανονισμών, διότι, πρώτον, εξαρτάται από τον καιρό και δεύτερον, οι τρέχοντες κανονισμοί για τις εκπομπές NO_x και SO_x δεν περιέχουν την ανανεώσιμη ενέργεια. Για παράδειγμα, εάν ένα πλοίο μπορεί να χρησιμοποιήσει ανανεώσιμη ενέργεια για την πρόωση του πάνω από το 80% της συνολικής λειτουργίας του πλοίου, το σύστημα ισχύος στο πλοίο πρέπει να πληροί τον τελευταίο κανονισμό. Αντικατάσταση 80% της συνολικής ισχύος πρόωσης με ανανεώσιμη και καθαρή ενέργεια σημαίνει ότι το πλοίο μπορεί να μειώσει το 80% των εκπομπών NO_x και SO_x, αλλά δεν υπάρχει παράγοντας μείωσης στις διεθνείς συμβάσεις αυτή τη στιγμή.

Γ. Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Τα κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι μία από τις πιο εφικτές μεθόδους που θεωρούνται ως η επόμενη εναλλακτική ενέργεια στην αυτοκινητοβιομηχανία. Χρησιμοποιεί μια αντίστροφη διαδικασία ηλεκτρόλυσης νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο. Προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα συνεχώς, απαιτεί μόνο το άζωτο

και το οξυγόνο που είναι άφθονα στο πλανήτη.

Τα απόβλητά του είναι μόνο νερό και CO₂ και η ποσότητα του εκπεμπόμενου CO₂ είναι σημαντικά χαμηλότερη από τον κινητήρα ντίζελ. Επιπλέον, το επίπεδο θορύβου του είναι μικρότερο από το ένα τέταρτο του κινητήρα ντίζελ και το μέγεθός του είναι πολύ μικρότερο (Jose, et al., 2016).

Ένα από τα κύρια προβλήματα με τη χρήση του είναι το πολύ υψηλό αρχικό κόστος. Το επενδυτικό κόστος είναι περίπου 6.000 ευρώ ανά kW το οποίο είναι περισσότερο από 10 φορές υψηλότερο από των συμβατικών κινητήρων ντίζελ. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η δυσκολία συνεχούς παροχής υδρογόνου σε ένα πλοίο. (Jose, et al., 2016)

1.4.2 Καύσιμα μειωμένης ρύπανσης

A. Βιοκαύσιμα

Σύμφωνα με το Sustainability Co-Op (DeMates, 2016), «το βιοκαύσιμο είναι ενεργειακά αποδοτικό από ζωντανή ύλη, συνήθως τα φυτά. Η βιοαιθανόλη, το βιοντίζελ και το βιοαέριο είναι τύποι βιοκαύσιμων ". Καθώς ο έλεγχος των εκπομπών γίνεται όλο και πιο αυστηρός, τα βιοκαύσιμα γίνονται ολοένα και περισσότερο δημοφιλή λόγω της ιδιότητάς τους σε χαμηλές εκπομπές. Ένα πλοίο μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ από 80 ~ 90% και τις εκπομπές NO_x κατά 10% και να εξαλείψει τις εκπομπές SO_x όταν χρησιμοποιεί τα βιοκαύσιμα ως κύριο καύσιμο (Konemeijer, 2016). Τα βιοκαύσιμα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τους αέριους ρύπους σταδιακά κατά περίπου 85% σε νερό εντός 14 ημερών (Fernandez, et al., 2010).

Άλλα οφέλη είναι το χαμηλό αρχικό κόστος και η καλή προσαρμογή στους συμβατικούς κινητήρες. Μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα χωρίς τροποποίηση των σημερινών κινητήρων ή με μικρές προσαρμογές. Ως εκ τούτου, η πρώτη κρουαζιέρα με χρήση μεθανόλης σε πλοίο και σε δεξαμενόπλοιο είχε ήδη πραγματοποιηθεί το 2015 και το 2016 και τώρα υπάρχουν περισσότερα πλοία σε λειτουργία.

Ωστόσο, το κόστος παραγωγής του, φυσικά ανάλογα με τον τύπο, είναι γενικά υψηλότερο των ορυκτών καύσιμων και η παραγωγική ικανότητα είναι πολύ χαμηλή

σε σύγκριση με τα τρέχοντα καύσιμα. Δεν είναι διαθέσιμα σε όλο τον κόσμο, επομένως δεν αποτελούν ολοκληρωμένη λύση .

B. LNG

Προς το παρόν, το LNG θεωρείται ελκυστική και εφικτή εναλλακτική λύση στα καύσιμα, ειδικά για νέα πλοία κατασκευής, καθώς ο έλεγχος των εκπομπών γίνεται όλο και πιο αυστηρός. Είναι ήδη γνωστό ότι το LNG παράγει μηδενικό ποσοστό εκπομπής διοξειδίου του θείου και μπορεί να μειώσει το οξείδιο του αζώτου έως και 90 %, τις εκπομπές σωματιδίων κατά 98 % και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 25% σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα πλοίων (όπως αναφέρεται στο Xu et al, 2015). Ένας επιπλέον παράγοντας που κάνει το LNG ακόμη πιο ελκυστικό είναι ότι είναι φθηνότερο από το τρέχον πετρέλαιο. (Είναι πολύ περίπλοκο συγκρίνουν τις δύο τιμές λόγω της μεγάλης διακύμανσης των τιμών ανά περιοχή και της έλλειψης εμπορικών σταθμών ανεφοδιασμού LNG). Το LNG έχει ποσοτικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με άλλους ανταγωνιστές (τα αποθέματα του φυσικού αερίου υπολογίζονται σε περίπου 7.299 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια σε όλο τον κόσμο (EIA, 2013)).

Επιπλέον, τα καλά νέα για την εμπορευματοποίηση του καυσίμου LNG είναι ότι έχουν προγραμματίσει περισσότερες χώρες την κατασκευή μονάδων αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου. Μέχρι το τέλος του 2013, δεν υπήρχαν μονάδες καυσίμων στη Βόρεια Αμερική, αλλά 8 έργα βρίσκονται σε εξέλιξη(IMO, 2016). Στην Ευρώπη υπάρχουν λίγοι σταθμοί ανεφοδιασμού LNG και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC) ενέκρινε σχέδιο κατασκευής σταθμών ανεφοδιασμού σε 139 λιμάνια έως το 2025, το οποίο μπορεί να καλύψει όλους τους σημαντικούς λιμένες της ΕΕ ('EU launches', 2013). Σιγκαπούρη και η Κίνα (Nanjing και Zhoushan) έχουν επίσης σχέδια και πολλά άλλα μεγάλα λιμάνια όπως το Ντουμπάι συζητά την κατασκευή σταθμών (WPCI, 2016).

Αν και το LNG έχει τεράστια οφέλη σε σύγκριση με τους ανταγωνιστές του όσον αφορά στη μείωση εκπομπών, εξακολουθούν να υφίστανται εμπόδια και περιορισμοί για να καταστεί εναλλακτικό καύσιμο. Ο πρώτος περιορισμός είναι τα υψηλά κεφαλαιουχικά έξοδα (CAPEX). Το LNG πρέπει να αποθηκεύεται σε υγρή μορφή, η οποία είναι δυνατή μόνο υπό συνθήκες θερμοκρασίας μικρότερης από - 162°C. Ως εκ

τούτου, προκαλεί υψηλό κόστος για την κατασκευή της δεξαμενής αποθήκευσης πάνω σε ένα πλοίο. Επιπλέον, η έλλειψη γνώσης για τα συστήματα καυσίμου LNG συμπεριλαμβανομένου και του κινητήρα για το προσωπικό επί του σκάφους και της ακτής, αποτελούν φραγμούς στη χρήση του. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Distillates (MGO/MDO)

2.1 Χρήση εναλλακτικών καυσίμων

Μπροστά σε αυτή τη πρόκληση, όπως και την καθιέρωση επιπλέον περιοχών σαν ECAs η ναυτιλία αναζητά νέες λύσεις. Η επικρατέστερη, οικονομικότερη και σχεδόν αποκλειστικά αποδεκτή από κάθε ναυτιλιακή επιχείρηση είναι η χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και άζωτο. Είναι αλήθεια πως η εναλλαγή απλά του καυσίμου υπερτερεί οικονομικά και τουλάχιστον σε βραχυχρόνια βάση έναντι μεγάλων επενδύσεων αξίας εκατομμυρίων όπως η τοποθέτηση scrubber ή η μετατροπή των μηχανών σε διπλού καυσίμου.

Οι έρευνες καθώς και ο γενικότερος προβληματισμός οδηγούν στον «πειραματισμό» και την εξεύρεση καυσίμων τα οποία θα πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν μαζικά, συστηματικά και αποτελεσματικά σαν καύσιμο των πλοίων.

Distillates (MGO/MDO)

Η μια εναλλακτική επιλογή για τη συμμόρφωση με τους νέους αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που έχουν τεθεί σε ισχύ από 1/1/2015 είναι η χρήση αποσταγμάτων (distillates), δηλαδή MGO / MDO από τα πλοία που ταξιδεύουν εντός ζωνών ECA. Η εναλλαγή καυσίμου μπορεί να λαμβάνει χώρα λίγο πριν το πλοίο εισέλθει στη ζώνη και σε όλο το υπόλοιπο ταξίδι να χρησιμοποιεί HFO ή εναλλακτικά να καταναλώνει μόνο distillates καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού. Η δεύτερη επιλογή ωστόσο είναι οικονομικά ασύμφορη στην πράξη για τους πλοιοκτήτες εξαιτίας της σημαντικής διαφοράς μεταξύ των δυο τύπων καυσίμων. Επομένως είναι μια επιλογή που κανένας πλοιοκτήτης δε θα πραγματοποιούσε και γι' αυτό δεν εξετάζεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των distillates, ώστε να γίνει πλήρης διαχωρισμός μεταξύ των δυο τύπων καυσίμων. Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι βασικές προκλήσεις και οι δυσκολίες που προκύπτουν κατά την εναλλαγή καυσίμων πριν την είσοδο και μετά την έξοδο από τη ζώνη ECA. Επιπλέον, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν και οι απαραίτητες τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν στο πλοίο, ώστε αυτό να ταξιδεύει απροβλημάτιστα και με ασφάλεια. Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου θα αναφερθούν οι δημοσιευμένες έρευνες που αναλύουν τη διαθεσιμότητα distillates για τα επόμενα χρόνια και φυσικά τις εκτιμήσεις για τις μελλοντικές διακυμάνσεις των τιμών τους.

2.2 Χαρακτηριστικά MGO/MDO

Τα αποστάγματα (distillates) είναι η κατηγορία καυσίμων με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο. Αν και δεν υπάρχει κάποιος ακριβής ορισμός για αυτά, αποτελούνται κυρίως από το Marine Gas Oil (MGO) και το Marine Diesel Oil (MDO) και χαρακτηρίζονται από την έλλειψη προθέρμανσης για τη χρήση τους λόγω του μικρότερου ιξώδους (viscosity) σε σχέση με το Heavy Fuel Oil (HFO). Αποτελούν το μοναδικό συμβατό καύσιμο εντός ζωνών ECA λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο, ωστόσο συνοδεύονται από σημαντικά υψηλότερη τιμή αγοράς. Σύμφωνα με το ISO:8217 του 2012, το MGO κατατάσσεται ως DMA και DMZ Grade, ενώ το MDO κατατάσσεται ως DMB Grade (Lloyds Register, 2015). Ως DMA κατατάσσονται τα καύσιμα που δεν περιέχουν ίχνη residual oil και χρησιμοποιούνται σε μηχανές κατηγορίας 1 (<5 λίτρα ανά κύλινδρο). Στον αντίποδα, ως DMB κατατάσσονται τα καύσιμα που περιέχουν ίχνη residual oil και χρησιμοποιούνται σε μηχανές κατηγορίας 2 (5-30 λίτρα ανά κύλινδρο) και σε μηχανές κατηγορίας 3 (>30 λίτρα ανά κύλινδρο). Η «μόλυνση» με ίχνη residual oil προκαλείται συνήθως κατά τη διανομή με τα ίδια μέσα που διανέμεται και το residual fuel (Proteux Global Energy, 2015). Ο πίνακας 6 αναλύει τα πλήρη χαρακτηριστικά των distillates DMA και DMB Grade σύμφωνα με το ISO:8217 (2012):

MARINE DISTILLATE FUELS

Parameter	Unit	Limit	DMX	DMA	DMZ	DMB
Viscosity at 40°C	mm ² /s	Max	5.500	6.000	6.000	11.00
Viscosity at 40°C	mm ² /s	Min	1.400	2.000	3.000	2.000
Micro Carbon Residue at 10% Residue	% m/m	Max	0.30	0.30	0.30	-
Density at 15°C	kg/m ³	Max	-	890.0	890.0	900.0
Micro Carbon Residue	% m/m	Max	-	-	-	0.30
Sulphur ^a	% m/m	Max	1.00	1.50	1.50	2.00
Water	% V/V	Max	-	-	-	0.30 ^b
Total sediment by hot filtration	% m/m	Max	-	-	-	0.10 ^b
Ash	% m/m	Max	0.010	0.010	0.010	0.010
Flash point	°C	Min	43.0	60.0	60.0	60.0
Pour point, Summer	°C	Max	-	0	0	6
Pour point, Winter	°C	Max	-	-6	-6	0
Cloud point	°C	Max	-16	-	-	-
Calculated Cetane Index		Min	45	40	40	35
Acid Number	mgKOH/g	Max	0.5	0.5	0.5	0.5
Oxidation stability	g/m ³	Max	25	25	25	25 ^c
Lubricity, corrected wear scar diameter (wsd 1.4 at 60°C ^d)	um	Max	520	520	520	520 ^c
Hydrogen sulphide ^e	mg/kg	Max	2.00	2.00	2.00	2.00
Appearance			Clear & Bright ^f			^{b, c}
^a	A sulphur limit of 1.00% m/m applies in the Emission Control Areas designated by the International Maritime Organization. As there may be local variations, the purchaser shall define the maximum sulphur content according to the relevant statutory requirements, notwithstanding the limits given in this table.					
^b	If the sample is not clear and bright, total sediment by hot filtration and water test shall be required.					
^c	Oxidation stability and lubricity tests are not applicable if the sample is not clear and bright.					
^d	Applicable if sulphur is less than 0.050% m/m.					
^e	Effective only from 1 July 2012.					
^f	If the sample is dyed and not transparent, water test shall be required. The water content shall not exceed 200 mg/kg (0.02% m/m).					

2.3 Προκλήσεις και προβλήματα κατά την εναλλαγή καυσίμου

Μετά την ανάλυση των γενικών χαρακτηριστικών των distillates, είναι χρήσιμο να αναλυθούν τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την εναλλαγή καυσίμων (fuel change-over). Τα προβλήματα αυτά μπορεί να προκύψουν λόγω των πολύ διαφορετικών χαρακτηριστικών των δυο τύπων καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, τα distillates σε σχέση με το HFO/IFO διαφέρουν στα έξι (DNV, 2014):

- Χρώμα (Colour)
- Πυκνότητα (Density)
- Θερμοκρασία (Temperature)

- Ιξώδες (Viscosity)
- Θερμιδική αξία (Calorific Value)
- Οξύτητα (Acidity)

Ως εκ τούτου, όταν αυτά τα τόσο διαφορετικά καύσιμα φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό ανάμιξης, τότε γίνονται ασύμβατα μεταξύ τους, δημιουργώντας προβλήματα στη λειτουργία των μηχανών.

Η αλλαγή στο MGO δε γίνεται χωρίς τις επιπλοκές του, καθώς μπορεί να δημιουργήσει κάποια τεχνικά προβλήματα, π.χ. διαρροές στα μέρη του κινητήρα (λόγω του διαφορετικού ιξώδους και πυκνότητας των HFO και MGO) ή άλλους λειτουργικούς κινδύνους. Ορισμένα σκάφη πρέπει να εκσυγχρονιστούν με ειδικό εξοπλισμό για την ανάμειξη καυσίμων, καθώς και ένα σύστημα διεύθυνσης συμβατό με συστήματα άλλης διαχείρισης κινητήρα. Επιπλέον, το πλήρωμα θα απαιτήσει πρόσθετη εκπαίδευση, καθώς θα οδηγήσει στην ανάγκη να εκτελούν πρόσθετα καθήκοντα.

2.4 Τροποποιήσεις στα συστήματα καυσίμου

Οι τροποποιήσεις στο σύστημα καυσίμων είναι απαραίτητες, ώστε το πλοίο να είναι σε θέση να καταναλώσει distillates ως βασικό καύσιμο στις ζώνες ECA και να αποφευχθούν πολλά από τα προβλήματα .

Για τους σύγχρονους κινητήρες χρειάζονται τα ακόλουθα εξαρτήματα και εξοπλισμός:

- 1. Ψύκτης καυσίμου** για να κρατήσει τη θερμοκρασία του καυσίμου αρκετά χαμηλή και να ενσωματωθεί μεταξύ της κύριας μηχανής και της δεξαμενής (σωλήνωση επιστροφής από τον κινητήρα) ή κατευθείαν προς το σωλήνα παροχής καυσίμου στον κύριο κινητήρα ώστε ο κινητήρας να έχει τη σωστή λιπαντικότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται ένας ειδικός ψύκτης, επειδή η ψύξη είναι ανεπαρκής.
- 2. Αλλαγή της αντλίας καυσίμου** (ή της πρόσθετης) η οποία μπορεί να λειτουργήσει με καύσιμα με χαμηλότερο ιξώδες και πυκνότητα .
- 3. Αναβάθμιση της ποσότητας καυσίμου** για να εξασφαλιστεί η σωστή ανάφλεξη καυσίμου στον κινητήρα (ρύθμιση της τροφοδοσίας καυσίμου)
- 4. Αλλαγή στο λάδι κυλίνδρου BN40-50**

5. Διαφορετικές πρόσθετες δεξαμενές ή τροποποίηση των δεξαμενών HFO (δεξαμενές συντήρησης και ρύθμισης)

6. Καθαρισμός σωλήνων και συστήματος δεξαμενής καθώς και ρύθμιση ολόκληρου του συστήματος

7. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι λέβητες πρέπει να ρυθμιστούν στο νέο καύσιμο (προθέρμανση του καυσίμου)

Για τα πλοία εκείνα όπου η αλλαγή καυσίμου οδηγεί στη χρήση νέων ή επιπρόσθετων τύπων καυσίμων, αυτό θα σημαίνει τη μετατροπή μιας ή περισσότερων δεξαμενών σε MGO και μια πρόσθετη αναγκαιότητα για τη διεξαγωγή περισσότερων δειγμάτων καυσίμων για δοκιμές και αξιολόγηση. Αυτό απαιτεί επίσης αύξηση παρακολούθησης και αναφοράς καυσίμων.

Όπως φαίνεται λοιπόν, η χρήση των distillates ως καύσιμο στις ζώνες ECA, φέρνει νέες προκλήσεις και προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά δεν είναι αξεπέραστα, θα πρέπει όμως να ληφθούν υπ' όψιν προκειμένου να αποφευχθούν ζημιές στο μηχανολογικό εξοπλισμό.

2.5 Μελλοντική Διαθεσιμότητα και τιμές των αποσταγμάτων

Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των distillates, αναφερόμαστε στην ύπαρξη ή μη επαρκούς ποσότητας καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες των πλοίων που πλέουν εντός ζωνών ECA

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον οργανισμό CONCAWE το 2009, εκτιμήθηκε ότι θα απαιτηθούν περί τα \$50 δις τα επόμενα χρόνια, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες επενδύσεις από τα διυλιστήρια που θα τους επιτρέψουν να παράγουν τις απαιτούμενες ποσότητες distillates για τις ανάγκες της βιομηχανίας και της αυτοκινητοβιομηχανίας (CONCAWE, 2009). Επιπρόσθετα, θα απαιτηθούν άλλα \$17,5 δις για τις αυξανόμενες ανάγκες της ναυτιλίας (Lloyds Register, 2015). Αλλά και σε άλλη έρευνα του 2012 από τη συμβουλευτική εταιρία Robin Meech-Marine and Energy Consulting Ltd, εκτιμήθηκε ότι υπάρχουν επαρκείς ποσότητες distillates για χρήση εντός ζωνών ECA από το 2015 μέχρι το 2025, με την προϋπόθεση να μην ανακηρυχθούν νέες ECA στο μεσοδιάστημα. Ωστόσο, με την εφαρμογή του

0,5% global sulphur cap το 2025, οι ποσότητες distillates δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών (ABS, 2013).

Ένα άλλο ακανθώδες ζήτημα σχετικά με τα distillates είναι η τιμή τους και η διαφορά της σε σχέση με αυτήν του HFO/IFO. Διαχρονικά υπάρχει μια σημαντική διαφορά τιμής ανάμεσα στους δυο τύπους καυσίμων εξαιτίας του υψηλότερου κόστους παραγωγής των διυλιστηρίων. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος των distillates και η διαφορά του με το HFO είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Αυτό που είναι βέβαιο είναι ότι θα αυξηθούν σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) των ναυτιλιακών εταιριών αν επιλέξουν το MGO ως μέσο συμμόρφωσης με τους κανόνες του IMO. Αυτό κάνει ακόμα πιο σοβαρό το δίλημμα των εταιριών για το ποια είναι η καλύτερη επιλογή για αυτές (distillates ή scrubbers), χωρίς ωστόσο να υπάρχει κάποιος χρυσός κανόνας.

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubbers)

Exhaust Gas Cleaning Systems (Scrubbers)

Τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) αποτελούν συστήματα ελέγχου / αποτροπής της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, τα οποία χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν μια σημαντική ποσότητα των σωματιδίων ή / και των αερίων που προκαλούν ρύπανση του περιβάλλοντος ή ανθρώπινες ασθένειες. Η αφαίρεση αυτή πραγματοποιείται είτε με φυσικό είτε με χημικό τρόπο. Ο διεθνής όρος που χρησιμοποιείται για τα συστήματα αυτά είναι ο όρος «Scrubber», ο οποίος προέρχεται από την αγγλική λέξη «Scrub» που σημαίνει «Τρίβω» (Κουγιουμτζόγλου, 2013).

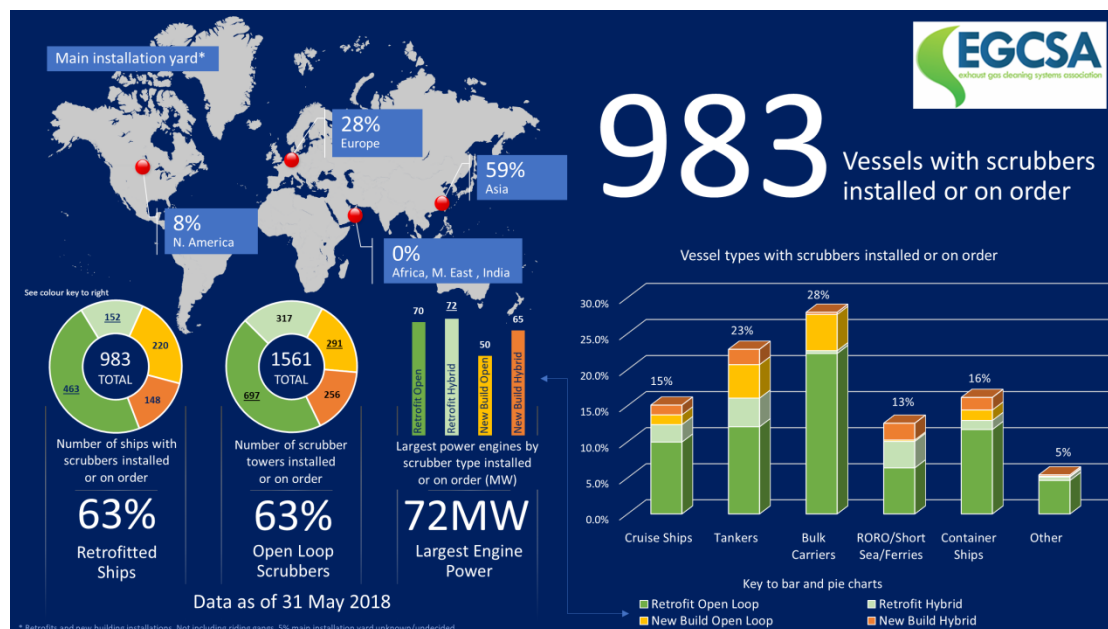
Με τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) υπάρχει δυνατότητα μείωσης των εκπομπών θείου κατά 98%, δηλαδή σε ένα επίπεδο τόσο χαμηλό όπως εάν χρησιμοποιηθεί καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο φρέσκο νερό αναμεμιγμένο με καυστική σόδα (NaOH) όσο και θαλασινό νερό (Kristensen, 2012).

Τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές SOX και αιωρούμενων σωματιδίων με μικρή αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως για τις αντλίες που χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του νερού (Kristensen, 2012).

Στην πράξη, η διαδικασία καθαρισμού μπορεί να περιέχει διάφορα στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, μειώνεται η θερμότητα των καυσαερίων στους 160 – 180 °C σε ένα εξοικονομητή καυσαερίων. Στο δεύτερο βήμα, το καυσαέριο κατεργάζεται με ένα ειδικό εκτοξευτήρα όπου ψύχεται περαιτέρω με έγχυση νερού και απομακρύνονται η πλειονότητα των σωματιδίων αιθάλης στα καυσαέρια. Κατά το τρίτο στάδιο, το καυσαέριο οδηγείται μέσω ενός αγωγού απορρόφησης, όπου ψεκάζεται με νερό και ως εκ τούτου, καθαρίζεται από το υπόλοιπο διοξείδιο του θείου. Νερό και θείο αντιδρούν για να σχηματίσουν θειικό οξύ, το οποίο εξουδετερώνεται από αλκαλικά συστατικά που βρίσκονται στο θαλασσινό νερό. Στη συνέχεια ειδικά φίλτρα διαχωρίζουν τα σωματίδια από το μίγμα, πριν να οδηγηθεί το καθαρισμένο νερό πίσω στη θάλασσα. Τα στερεά σωματίδια απομακρύνονται από τα αέρια που είναι παγιδευμένα σε μια δεξαμενή καθίζησης ή λάσπης και συλλέγονται για διάθεση στην ξηρά (Kristensen, 2012).

ΑΓΟΡΑ των scrubbers

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα που ακολουθεί, ο αριθμός των εγκατεστημένων scrubbers αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Οι αιτίες εντοπίζονται κυρίως στο διαρκώς αυστηρότερο περιβαλλοντικό ρυθμιστικό πλαίσιο, αλλά και την ωρίμανση της συγκεκριμένης τεχνολογίας από τις αυξανόμενες εγκαταστάσεις



Διάγραμμα 1: Εξελίξεις στην αγορά των scrubbers

Μια σειρά από πρόσφατες αναφορές δείχνει ότι οι μεγάλοι πλοιοκτήτες, συμπεριλαμβανομένων των Spliethoff, Frontline, DHT και Star Bulk έχουν επιλέξει scrubber. Μία από τις «μεγάλες» εταιρίες εμπορευματοκιβωτίων επιβεβαίωσε ότι θα χρησιμοποιήσει τα scrubbers για συμμόρφωση ως προς τους κανονισμούς του 2020 και υπάρχουν φήμες ότι και άλλοι θα κάνουν το ίδιο.

Μέχρι πρόσφατα η μεγαλύτερη εγκατεστημένη χωρητικότητα με scrubber ήταν για κινητήρες ισχύος 25 έως 30MW. Ωστόσο, τα πιο πρόσφατα δεδομένα δείχνουν ότι αυτό έχει ξεπεραστεί και έχει τοποθετηθεί ένα αναβαθμισμένο υβριδικό σύστημα για κινητήρα εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 72MW.

Σχεδόν το 60% όλων των μετασκευών και των νέων εγκαταστάσεων πραγματοποιούνται σε ασιατικά ναυπηγεία.

Περιττό να πούμε ότι η πλειοψηφία των μελών της EGCSA εξακολουθεί να λαμβάνει

παραγγελίες, ενώ αρκετοί θέλουν να εξασφαλίσουν θέση στο χρονοδιάγραμμα εγκατάστασης έως το 2023.

Πίσω στο 2015 όταν ήταν έτοιμη η μετάβαση στο 0.10% των εκπομπών του θείου, ένας αριθμός επιχειρήσεων με πλοία RORO και FERRIES οδήγησαν με επιτυχία στο δρόμο της επιλογής των scrubbers ως μέσο συμμόρφωσης των κανονισμών.

Τώρα καθώς το 2020 πλησιάζει τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου έχουν πάρει την πρώτη θέση στους τύπους πλοίων που υιοθετούν τα scrubber για συμμόρφωση, με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τα δεξαμενόπλοια να ακολουθούν.

Οι εγκαταστάσεις scrubber open loop επικρατούν σε καθέναν από τους παραπάνω τύπους πλοίων.

Η έρευνα δείχνει ότι το 63% όλων των πλοίων έχουν εγκαταστήσει ή πρόκειται να εγκαταστήσουν εκ νέου scrubbers, ενώ το 37% είναι νέες για εγκαταστάσεις σε νέα πλοία. 988 από τα 1561 εγκατεστημένα ή κατόπιν παραγγελίας scrubbers είναι τύπου ανοικτού βρόχου (open loop) επιβεβαιώνοντας το ως το πιο δημοφιλές σύστημα καθαρισμού καυσαερίων.

Δεν εκπλήσσει το γεγονός ότι προτιμάται ο καθαρισμός με ανοικτό βρόχο. Είναι το απλούστερο σύστημα καθαρισμού και ευνοείται από τα πληρώματα των πλοίων.

Παρόλο που πολλοί υιοθετούν τα υβριδικά συστήματα στις Βόρεια Θάλασσα και τη Βαλτική, λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε ανοικτό βρόχο.

Ο καθαρισμός με ανοικτό βρόχο χρησιμοποιήθηκε επίσης εδώ και χρόνια και από παράκτιους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από συστήματα αδρανούς αερίου (IG) πετρελαιοφόρων πλοίων όταν βρίσκονται σε λιμάνια χωρίς περιβαλλοντικά ζητήματα.

Ενώ είναι διαθέσιμα τα συστήματα κλειστού βρόχου και τα υβριδικά συστήματα για κλειστούς χώρους νερού ή όπου οι απορρίψεις περιορίζονται από τους τοπικούς κανονισμούς, το EGCSA προτείνει την εναλλακτική λύση για τη μετάβαση σε καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο για τη διαμονή στο λιμένα όπου δεν είναι δυνατή η λειτουργία ανοικτού βρόχου. Ο αντίκτυπος στο κόστος είναι πιθανόν να είναι περιορισμένος, καθώς πάνω από το 90% της κατανάλωσης καυσίμων είναι κατά τη διάρκεια της πλήρους απομάκρυνσής του στη θάλασσα, όπου συμβαίνουν πραγματικά τα οικονομικά οφέλη.

3.1 Τύποι Scrubbers

Τα scrubbers- ή αλλιώς EGS(Exhaust Gas System) αποτελούν συστήματα καθαρισμού και απομάκρυνσης των εκπομπών διοξειδίου του θείου, οι οποίοι παράγονται από τις κύριες μηχανές του πλοίου, τις βοηθητικές αλλά και τους λέβητες (boilers), το βασικό μέσο το οποίο χρησιμοποιούν σε αυτή τη διαδικασία είναι το νερό, που λειτουργεί ως μέσο απορρόφησης του θείου.

Υφίστανται 5 μέρη τα οποία συνθέτουν ένα σύστημα καθαρισμού scrubber:

1. Αρχικά είναι δεδομένο ότι είναι απαραίτητη μια πηγή νερού, είτε πρόκειται για θαλασσινό νερό είτε μια δεξαμενή με γλυκό νερό.
2. Στη συνέχεια πρέπει να υπάρχουν αντλίες, η οποίες θα δώσουν μία συγκεκριμένη πίεση/ ώθηση στο νερό έτσι ώστε να υπάρχει η παροχή του στις κατάλληλες συνθήκες στα συστήματα ψεκασμού καθώς η διαδικασία λαμβάνει χώρα στο υψηλότερο επίπεδο του πλοίου (καπνοδόχος πλοίου).
3. Επόμενο μέρος αποτελεί ο πύργος καθαρισμού (scrubber tower), στον οποίο αναγνωρίζονται 3 διαφορετικά τμήματα.
 - Αρχικά υπάρχει το τμήμα σβέσης, όπου λαμβάνει χώρα η μείωση της θερμοκρασίας των αερίων.
 - Ακολουθεί το τμήμα απορρόφησης, στο οποίο γίνεται η αντίδραση και το θείο απορροφάται από το νερό.
 - Ενώ στο 3ο τμήμα, το διαχωριστή σταγονιδίων, διαχωρίζεται το νερό από τα καυσαέρια.
4. Έπεται η μονάδα επεξεργασίας για το νερό πλύσης.
5. Τελευταίο μέρος είναι το σύστημα παρακολούθησης.

Τι είναι το σύστημα καθαρισμού καυσαερίων;

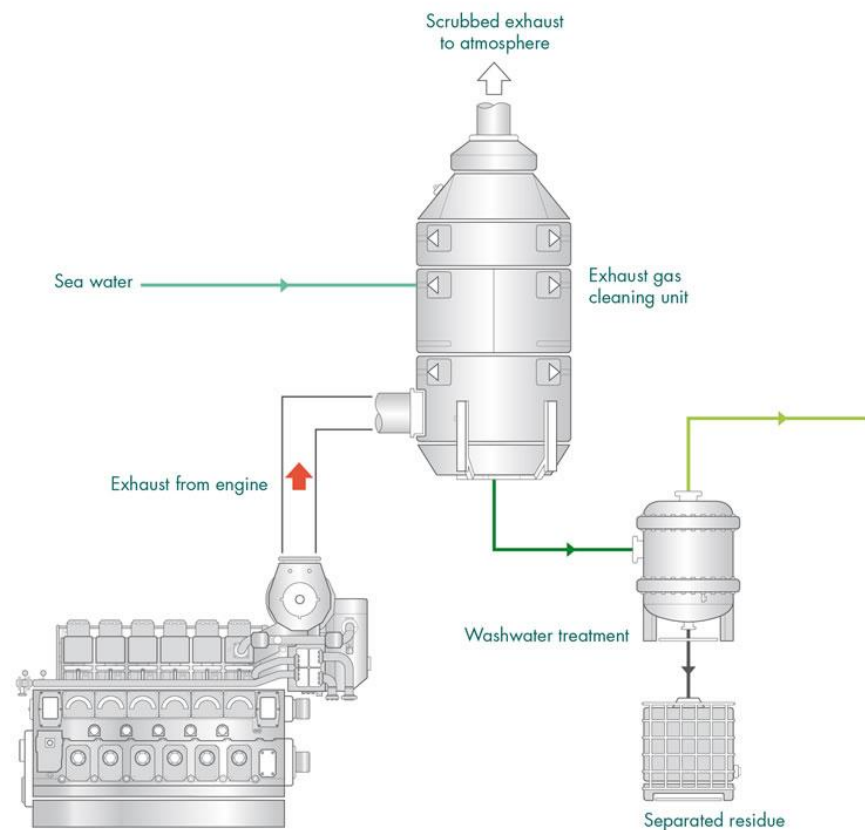
Υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχέδια θαλάσσιων συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (που συχνά αναφέρονται ως πλυντρίδες) που αφαιρούν τα οξείδια του θείου από τον κινητήρα του πλοίου και τα καυσαέρια του λέβητα.

Ωστόσο, η πλειοψηφία των συστημάτων "υγρών" έχουν 3 βασικά συστατικά:

1. Ένα δοχείο το οποίο επιτρέπει στην αναρρόφηση του ρεύματος καυσαερίων από κινητήρα ή λέβητα με νερό - είτε με θαλασσινό νερό είτε με γλυκό νερό

(ή και τα δύο). Για λόγους διαθέσιμου χώρου και πρόσβασης στις μονάδες καθαρισμού καυσαερίων τείνουν να είναι ψηλά στο πλοίο μέσα ή γύρω από την περιοχή χοάνης.

2. Μονάδα επεξεργασίας για την απομάκρυνση ρύπων από το νερό "πλύσης" μετά τη διαδικασία καθαρισμού.
3. Εγκαταστάσεις διαχείρισης λάσπης - η ιλύς που αφαιρείται από τη μονάδα επεξεργασίας νερού πλύσης πρέπει να διατηρείται επί του σκάφους για απόρριψη στην ξηρά και να μην μπορεί να καεί στους αποτεφρωτήρες του πλοίου.



Σχήμα 5 : Βασικά εξαρτήματα του συστήματος καθαρισμού καυσαερίων (EGCSA Handbook 2012)

Οι τύποι των scrubbers που βρίσκουν ναυτιλιακή εφαρμογή αυτήν τη στιγμή είναι οι εξής τέσσερις:

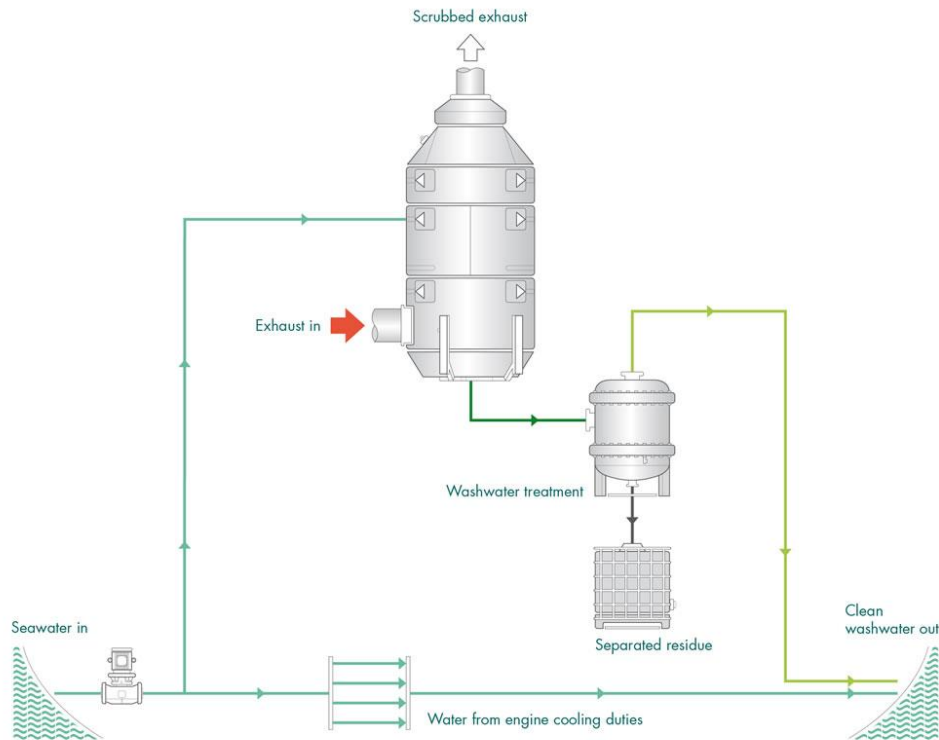
1. Open-loop (ή Seawater) scrubbers
2. Closed-loop (ή Freshwater) scrubbers
3. Hybrid scrubbers
4. Dry scrubbers

Η λειτουργία και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τύπου αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

3.1.1 Open-loop (Seawater) Scrubbers

Οι Open-loop scrubbers χρησιμοποιούν το θαλασσινό νερό ως μέσο έκπλυσης των καυσαερίων. Η διαδικασία του scrubbing λαμβάνει χώρα στο scrubber tower, όπου το μίγμα των καυσαερίων περνά μέσα από ένα διαχωριστή νερού. Ο διαχωριστής αυτός απομακρύνει τα σωματίδια του νερού από τα αέρια. Το μίγμα νερού που προκύπτει από τη διαδικασία της έκπλυσης καταλήγει στον πάτο του scrubber. Το νερό έκπλυσης υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία, είτε μέσω διαχωριστή, είτε μέσω φυγοκέντρισης, ώστε να απομακρυνθούν τα υπολείμματα της διαδικασίας. Τα υπολείμματα (residues) αυτά, που είναι σε μορφή λάσπης (sludge) συνήθως περιέχουν βαρέα μέταλλα, PM κλπ και αποθηκεύονται σε ειδική δεξαμενή επί του πλοίου. Με βάση τους κανόνες του IMO, απαγορεύεται η καύση ή η απόρριψη τους στο περιβάλλον, αλλά πρέπει να φυλάσσονται επί του πλοίου και να παραδίδονται σε ειδικές μονάδες επεξεργασίας υπολειμμάτων στους λιμένες.

Το νερό έκπλυσης, εφ' όσον καθαριστεί από τα υπολείμματα, μπορεί να απορριφθεί στο υδάτινο περιβάλλον. Με βάση τους κανόνες του IMO για τις απορρίψεις νερού (water discharges), το νερό έκπλυσης μπορεί να διαλυθεί με το νερό που χρησιμοποιείται για ψύξη προκειμένου να μειωθεί το pH του, πριν απορριφθεί στη θάλασσα (ABS, 2013).



Σχήμα 6 : open-loop scrubber (EGCSA Handbook 2012)

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των open-loop scrubbers, αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αλκαλικότητα του νερού στην περιοχή λειτουργίας. Αυτός ο παράγοντας αποκλείει τη χρήση των open-loop scrubbers σε περιοχές ποταμών ή λιμνών, όπου η αλκαλικότητα είναι εξ' ορισμού χαμηλή. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η χρήση distillates ως μέσο συμμόρφωσης στους κανονισμούς του IMO (ABS, 2013). Επομένως ο πλοιοκτήτης θα πρέπει να λάβει υπ' όψιν του το προφίλ λειτουργίας του πλοίου του, πριν επιλέξει την εγκατάσταση του συγκεκριμένου τύπου scrubber.

Στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου συστημάτων συμπεριλαμβάνονται το χαμηλότερο κόστος αυτών σε σχέση με τις άλλες 2 μορφές, η μη ανάγκη προσθήκης πρόσθετων ουσιών στο νερό καθώς και η δυνατότητα απόρριψης του νερού στη θάλασσα χωρίς να υφίσταται επεξεργασία, αποθήκευση ή υποχρέωση παράδοσής του σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Βέβαια από την άλλη πλευρά η αλκαλικότητα του νερού δεν είναι η ίδια σε όλα τα μήκη και πλάτη των θαλασσών επομένως εμπεριέχονται ζητήματα μερικής αποτελεσματικότητας, ενώ παράλληλα υπάρχει ο παράγοντας της

μόλυνσης του περιβάλλοντος και είναι αμφίβολο το κατά πόσο αναμένεται να επιτραπεί αυτή η μέθοδος στο μέλλον.

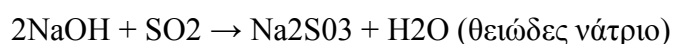
3.1.2 Closed-loop (Freshwater) Scrubbers

Σε ένα scrubber τύπου κλειστού βρόχου, επεξεργασμένο νερό κυκλοφορεί μέσω του μηχανήματος καθαρισμού για να διατηρηθεί η διαδικασία καθαρισμού ανεξάρτητα από την χημεία των υδάτων μέσω των οποίων το σκάφος ταξιδεύει. Μια αλκαλική χημική ουσία, συνήθως υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ή σπάνια οξείδιο του μαγνησίου (MgO) χρησιμοποιείται σε θαλάσσια EGCS για τον έλεγχο του νερού σε αλκαλικότητα, η οποία μπορεί επίσης να παραχθεί με ηλεκτρόλυση θαλασσινού νερού.

Τα εσωτερικά στοιχεία του μηχανισμού καθαρισμού με κλειστό κύκλωμα είναι παρόμοια με εκείνα ενός μηχανήματος καθαρισμού με ανοικτό βρόχο και οι χημικές διεργασίες που είναι σε λειτουργία απομάκρυνση των εκπομπών SO_x είναι παρόμοιες. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι ότι αντί να πηγαίνει πάνω από το πλοίο, το μεγαλύτερο μέρος του κυκλοφορούντος ύδατος επεξεργάζεται αφού φύγει από τον πύργο πλύσης για να το καταστήσει κατάλληλο για ανακύκλωση ως μέσο καθαρισμού του νερού. Το νερό πλύσης μπορεί να είναι γλυκό ή αλμυρό νερό ανάλογα με το σχεδιασμό πλύσης. Σε αυτή τη διαδικασία επεξεργασίας, τα υπολείμματα απομακρύνονται από το νερό έκπλυσης και το νερό δοσολογείται με αλκαλική χημική ουσία για να αποκαταστήσει την αλκαλικότητα του πριν επιστρέψει στον πύργο καθαρισμού.

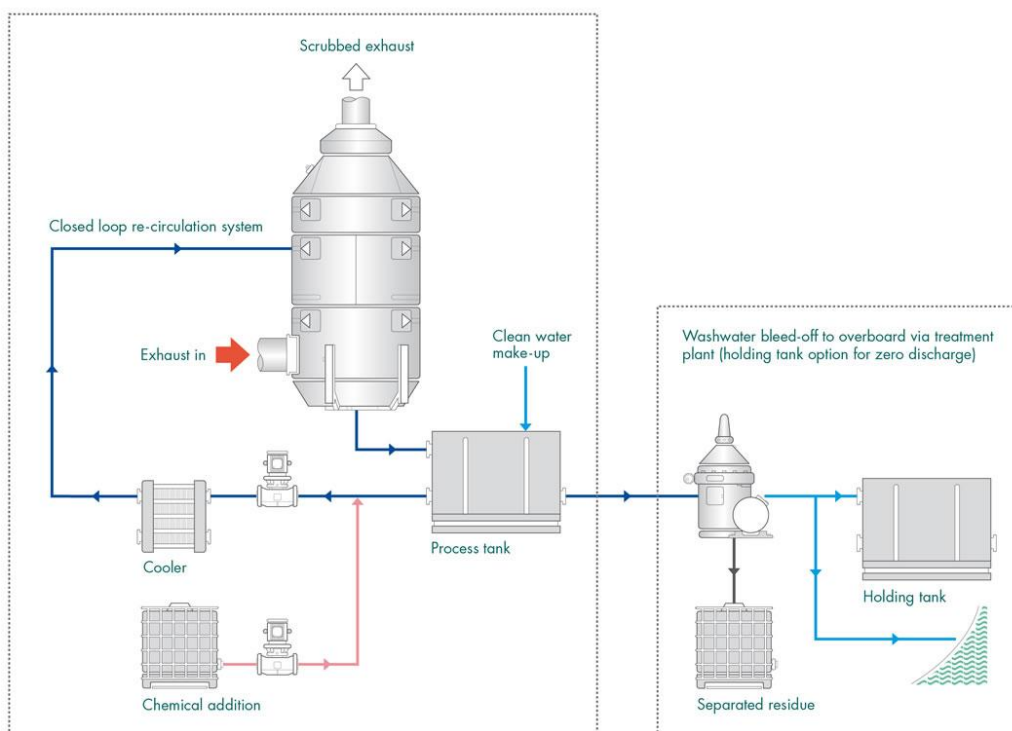
Οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι ένα scrubber κλειστού βρόχου απαιτεί περίπου το μισό ή λιγότερο της ροής του νερού πλύσης από ένα ανοιχτού, για να επιτευχθεί η ίδια απόδοση καθαρισμού. Ο λόγος για αυτό είναι ότι τα υψηλότερα επίπεδα αλκαλικότητας εξασφαλίζονται με τον άμεσο έλεγχο του επιπέδου του pH με τη μέθοδο της αλκαλικής χημικής έγχυσης.

Σε scrubber γλυκού νερού, το SO₂ συνδυάζεται με ένα άλας και συνεπώς δεν αντιδρά με το φυσικό άλας του θαλασσινού νερού και δεν απελευθερώνεται CO₂.





Σε ένα σύστημα κλειστού βρόγχου, το βρώμικο νερό που βγαίνει από τον καθαριστή πηγαίνει σε μια δεξαμενή κυκλοφορίας που παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα νερού για να καθαριστεί. Το καθαρισμένο νερό απομάκρυνσης απορρίπτεται είτε στη θάλασσα είτε σε δεξαμενή συγκράτησης, ανάλογα με την τοποθεσία του πλοίου και τους τοπικούς κανονισμούς. Η υπολειμματική λάσπη που απομακρύνεται από το νερό πλύσης πηγαίνει σε μια δεξαμενή ιλύος για απόρριψη στην ξηρά. Αυτό το νερό προστίθεται στη δεξαμενή επεξεργασίας για να αντικαταστήσει το νερό πλύσης που χάθηκε στη διαδικασία επεξεργασίας σωματιδίων και εξάτμισης καθώς και στην εξάτμιση κατά τη διάρκεια της διεργασίας καθαρισμού. Μια αντλία κυκλοφορεί το καθαρό νερό από τη δεξαμενή επεξεργασίας πίσω στο scrubber. Το νερό περνά μέσα από ένα ψυγείο νερού πριν την επανέγχυση στο scrubber. Μια μονάδα προσθέτει την καυστική σόδα πίσω στο νερό καθαρισμού, είτε κατά την επεξεργασία στη δεξαμενή ή στο νερό καθώς φεύγει από τη δεξαμενή, με την ποσότητα να ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις αλκαλικότητας για το νερό.



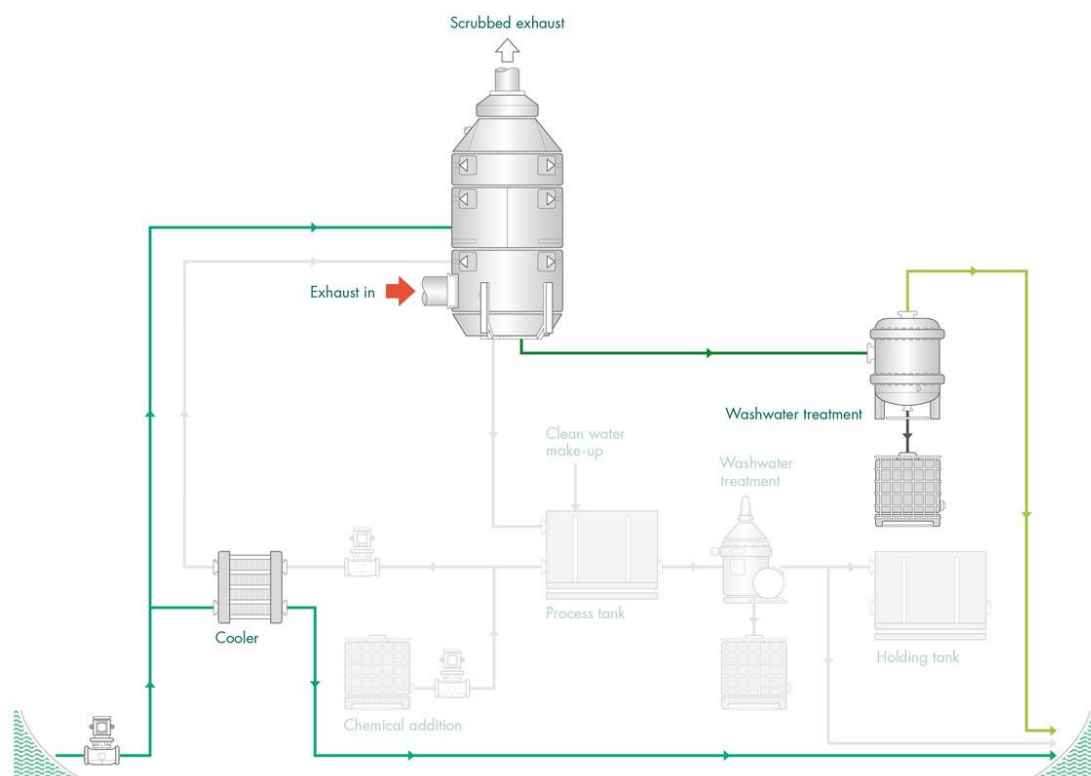
Σχήμα 7 : close-loop scrubber (EGCSA Handbook 2012)

Όσο αναφορά το close loop σύστημα, πλεονεκτεί έναντι του open loop από περιβαλλοντικής απόψεως καθώς απορρίπτεται στη θάλασσα πολύ μικρή συγκριτικά

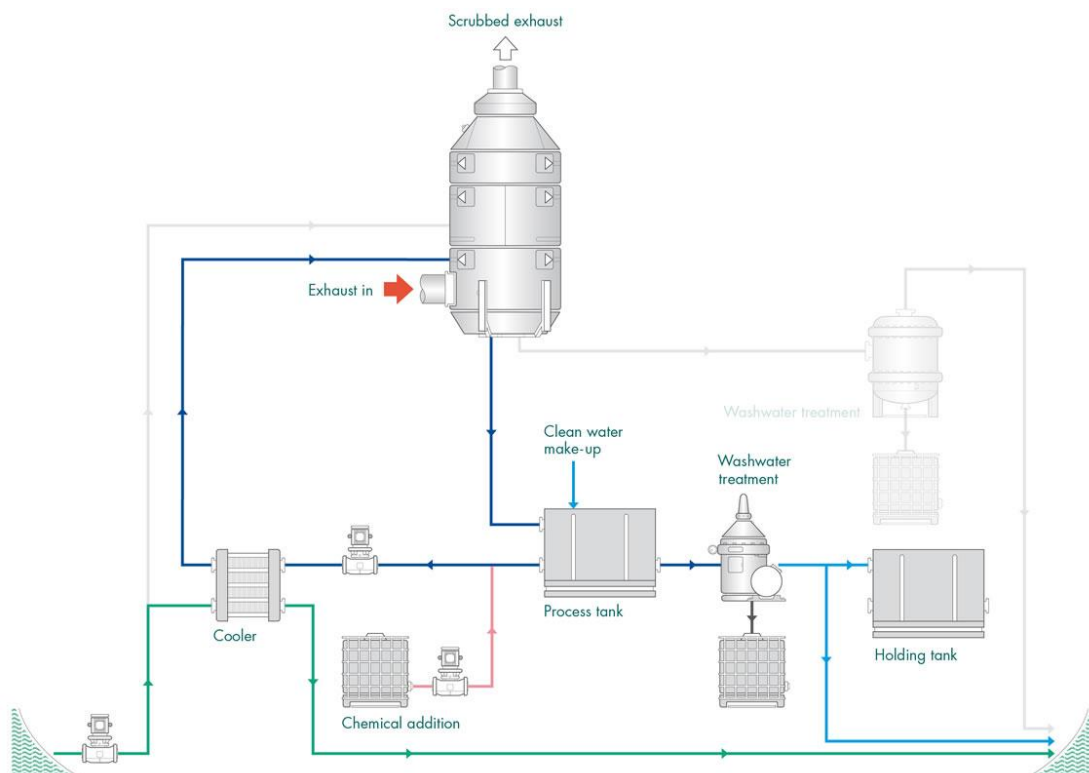
ποσότητα νερού ως απόβλητο της διαδικασίας καθαρισμού των εκπομπών. Όμως έχει αυξημένο κόστος εγκατάστασης και μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος (όπως το κόστος των ουσιών οι οποίες προστίθεται).

3.1.3 Hybrid Scrubbers

Όπως υποδηλώνει το όνομα το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει μια υβριδική λύση, καθώς αποτελεί ένα συνδυασμό των close και open loop συστημάτων. Το scrubber αυτής της μορφής έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει και με τους δύο τρόπους, παρέχοντας επιχειρησιακή ευελιξία σε όσα πλοία δραστηριοποιούνται σε περιοχές με υψηλή και χαμηλή αλκαλικότητα στο νερό. Η εναλλαγή από open-loop mode σε closed-loop mode γίνεται μέσω της διαφορετικής λειτουργίας της αντλίας κυκλοφορίας από seawater σε freshwater (που περιέχει χημικά πρόσθετα). Η δεύτερη μετατροπή αφορά τη μη-απόρριψη του νερού έκπλυσης αλλά τη συγκέντρωσή του σε κατάλληλη δεξαμενή (circulating tank) και την επανακυκλοφορία του στο σύστημα (ABS, 2013).



Σχήμα 8 : Hybrid scrubber σε λειτουργία open-loop (EGCSA Handbook 2012)



Σχήμα 9 : Hybrid scrubber σε λειτουργία close-loop (EGCSA Handbook 2012)

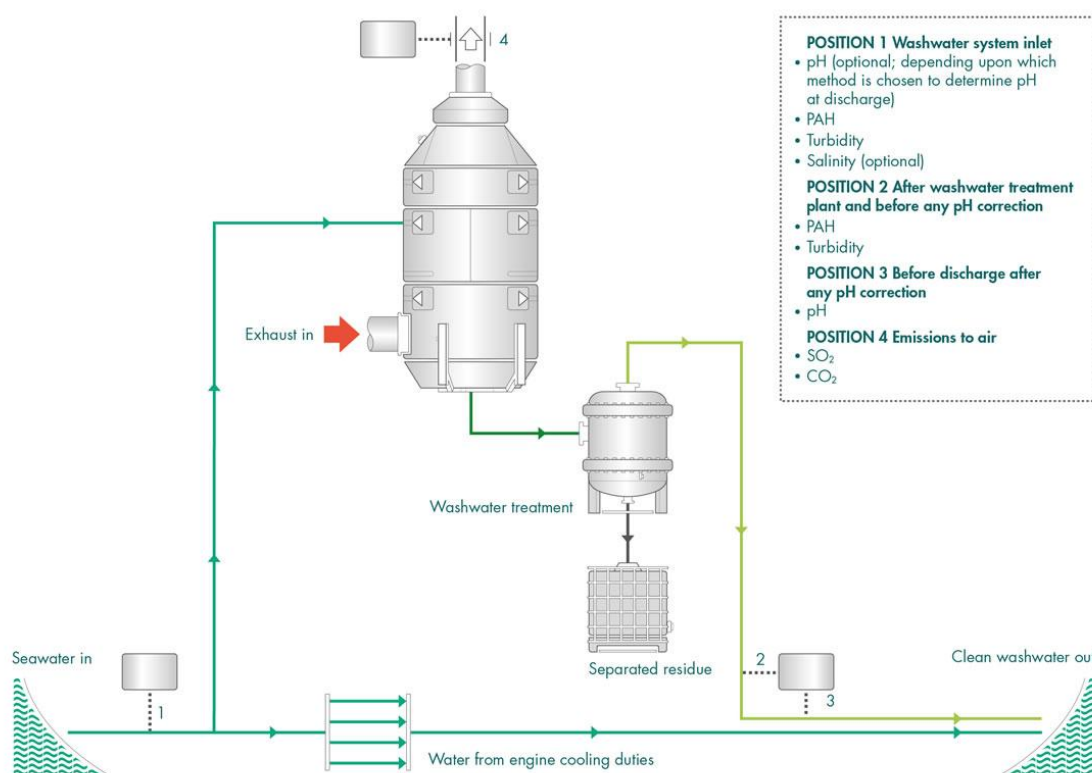
Αν και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των open-loop και των closed-loop scrubbers, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των hybrid scrubbers, είναι η ευελιξία που προσφέρουν για λειτουργία ανεξάρτητα της αλκαλικότητας των υδάτων της περιοχής. Έτσι όταν το πλοίο βρίσκεται σε θαλάσσιο περιβάλλον με υψηλή αλκαλικότητα, τότε λειτουργεί σε open-loop mode, χωρίς να γίνεται χρήση χημικών πρόσθετων. Αντίθετα, σε περιοχές με μειωμένη αλκαλικότητα λειτουργεί σε closed-loop mode με τα αντίστοιχα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής υποθέτουμε την πιθανή εγκατάσταση ενός closed-loop (freshwater) scrubber πάνω στο πλοίο-υπόδειγμα για τη μείωση των εκπομπών SO_x.

Η συγκεκριμένη κατηγορία επελέγη και ως μέσο συμμόρφωσης στους νέους κανονισμούς για το πλοίο υπόδειγμα της μελέτης αυτής (OOCL Hong Kong πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων), που θεωρείται πιο πιθανό να εγκατασταθεί μαζικά σε πλοία αυτών τύπων.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα όμως των hybrid scrubbers είναι το αυξημένο κόστος σε σχέση με τα open-loop και τα closed-loop scrubbers (Lloyds Register, 2015).

3.1.4 Συστήματα παρακολούθησης των εκπομπών

Στην περίπτωση του Scheme B δεν απαιτείται αρχική έγκριση της απόδοσης του scrubber για τη μείωση των SO_x, όπως στο Scheme A. Ωστόσο, απαιτείται η ύπαρξη ενός συστήματος παρακολούθησης των εκπομπών που να αποδεικνύει ότι επιτυγχάνεται ο στόχος του λόγου SO₂/ CO₂. Ο λόγος αυτός θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος, αν όχι μικρότερος από αυτόν που ορίζεται από το Regulation 14 του Annex VI. Το σύστημα παρακολούθησης των εκπομπών θα πρέπει να είναι εγκεκριμένο από αρμόδιο Οργανισμό και ελεγμένο στην αρχική επιθεώρηση (κατά την εγκατάσταση), όσο και σε επόμενες (Lloyds Register, 2015).



Σχήμα 10 : Όργανα παρακολούθησης των εκπομπών και της ποιότητας του νερού (EGCSA Handbook 2012)

3.1.5 Dry Scrubbers

Τα dry scrubbers εφαρμόζονται ευρέως στις χερσαίες βιομηχανίες πριν ξεκινήσει η εφαρμογή τους και στα πλοία. Η διαδικασία της έκπλυσης περιλαμβάνει την έκθεση των καυσαερίων σε υδροξείδια του ασβεστίου (calcium hydroxide) τα οποία παραδίδονται στο πλοίο σε μορφή pellets (ABS, 2013). Τα pellets αυτά

τροφοδοτούνται μέσω ενός μίαντα μεταφοράς σε έναν ξηρό αντιδραστήρα (absorber) μέσα από τον οποίο περνούν τα καυσαέρια. Από τη χημική αντίδραση που δημιουργείται ανάμεσα στα SO_x και τα pellets, προκύπτουν παραπροϊόντα όπως γύψος (gypsum) και νερό. Ο γύψος είναι ακίνδυνο υλικό, το οποίο αποθηκεύεται επί του πλοίου και στη συνέχεια εκφορτώνεται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις στους λιμένες (Reynolds, 2011).

Στα πλεονεκτήματα των dry scrubbers περιλαμβάνεται ότι δεν υπάρχει η ανάγκη για συστήματα επεξεργασίας του νερού έκπλυσης και ότι δεν υπάρχουν απορρίψεις νερού στη θάλασσα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για περιοχές που υπάρχουν οι αντίστοιχοι περιορισμοί για τις απορρίψεις νερού έκπλυσης στη θάλασσα (Lloyds Register, 2015). Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα SCR για τη μείωση των εκπομπών NO_x. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι ιδανικές για τη συνδυαστική χρήση με SCR που συνήθως απαιτούν θερμοκρασίες άνω των 350°C για να λειτουργήσουν σωστά (ABS, 2013).

Τα μειονεκτήματα των dry scrubbers περιλαμβάνουν την ανάγκη επαρκούς χώρου επί του πλοίου για την αποθήκευση των pellets calcium hydroxide, όσο και του γύψου καθώς και τη απομάκρυνση τους από τα πλοία. Όλα αυτά δημιουργούν σημαντικό κόστος (Lloyds Register, 2015).

3.2 Μέθοδοι αφαίρεσης

Αέριοι ρύποι

Οι αέριοι ρύποι από τις εξατμίσεις του κινητήρα ντίζελ των πλοίων περιλαμβάνουν SO₂, SO₃, CO, NO, NO₂. Αυτά μπορούν να απομακρυνθούν με προσρόφηση σε κατάλληλο υπόστρωμα, απορρόφηση σε υγρό (συνήθως νερό) ή από μετατροπή σε άλλες ενώσεις (για παράδειγμα μέσω SCR).

Πρωτογενή σωματίδια: Αυτά μπορούν να απομακρυνθούν με διήθηση, διαχωρισμό μέσω της βαρύτητας, φυγοκεντρικός διαχωρισμός, διαχωρισμός με ηλεκτρονικό φορτίο ή παγίδευση σε υγρό μέσο (κανονικά νερό).

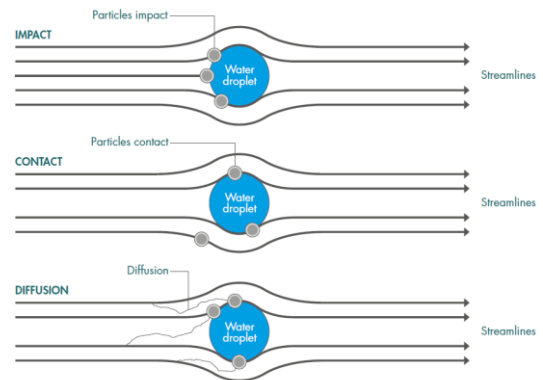
Από τις αναφερόμενες μεθόδους χρησιμοποιούνται τα εξής για τον καθαρισμό καυσαερίων στο πλοίο.

1. Υγρό πλύσιμο με απορρόφηση
2. Ξηρός καθαρισμός με προσρόφηση
3. Καταλύτες εξάτμισης

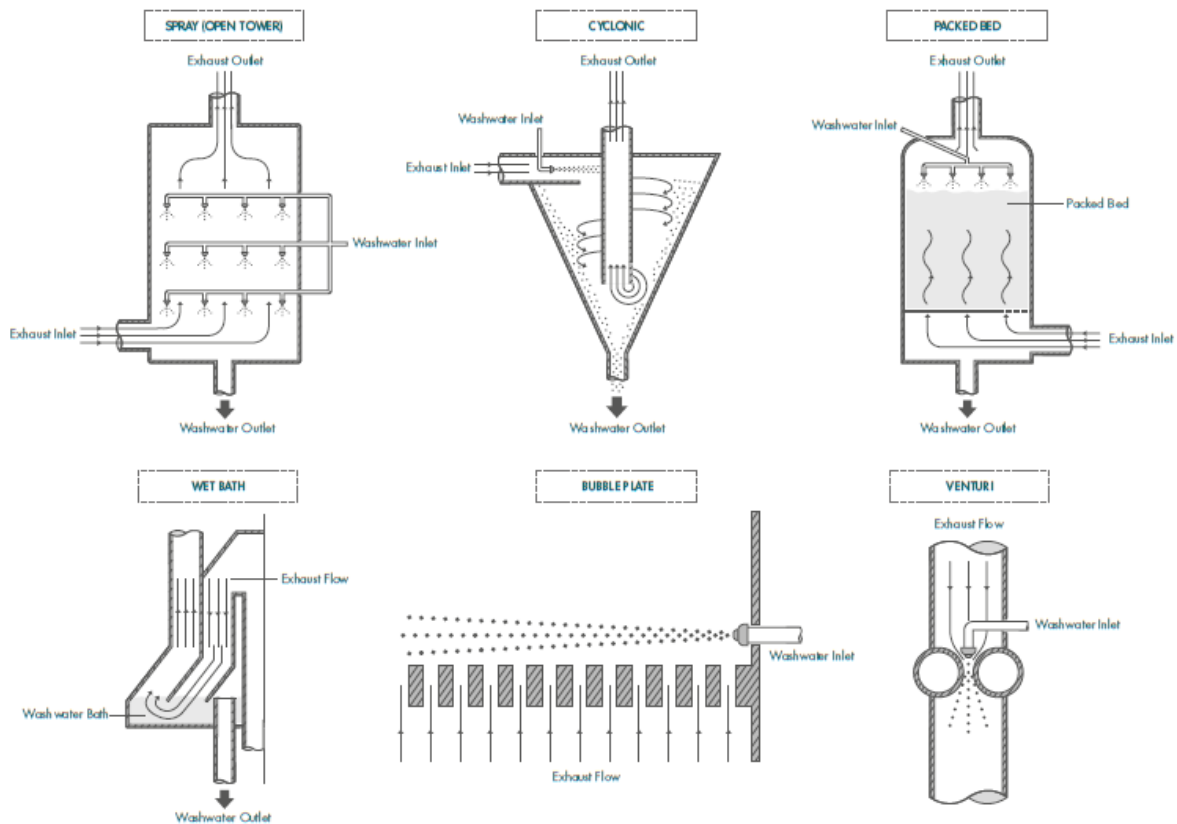
Οι κύριοι μηχανισμοί σύλληψης των σωματιδίων στα σταγονίδια είναι η πρόσκρουση, η ανάσχεση και η διάχυση.

Τύποι scrubber ανάλογα με τον μηχανισμό επαφής (σχήμα 12), όπως:

- Ακροφύσια ψεκασμού
- Επιφάνειες πρόσκρουσης
- Πλάκες
- Ανακλαστήρες (Baffles)
- «Καπάκια» (Bubble caps)
- Πληρωτικό υλικό (Packing)
- Στενώσεις Venturi
- Στόμια καταιονισμού (Spray inducing orifices)
- Μηχανικοί στροφείς (Mechanically driven rotors)



Σχήμα 11: μηχανισμοί σύλληψης των σωματιδίων στα σταγονίδια



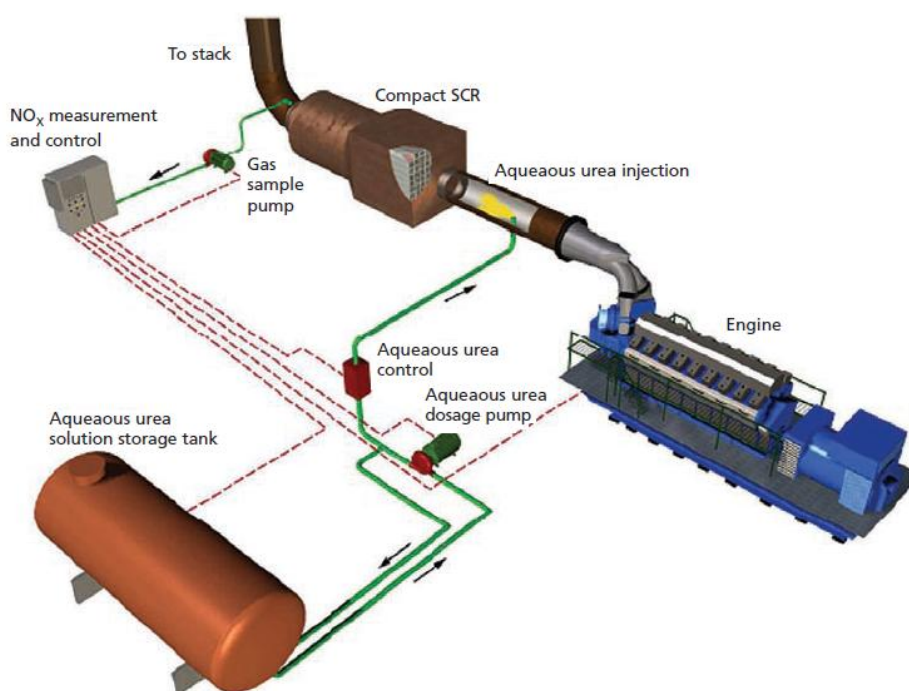
Σχήμα 12

3.3 Συστήματα μείωσης εκπομπών NOx

3.3.1 Επιλεκτική καταλυτική μείωση SCR

Ένα σύστημα EGS scrubber δεν καλύπτει εξ ολοκλήρου τη νέα νομοθεσία της MARPOL καθώς αν και περιορίζει τις εκπομπές των οξειδίων του θείου δεν είναι αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση του διοξειδίου του αζώτου. Επομένως απαιτείται η προσθήκη ενός επιπλέον συστήματος το οποίο θα λειτουργεί παράλληλα, αυτό το έργο επιτελεί το σύστημα SCR- Selective Catalytic Reduction. Σαν SCR ορίζεται ένα προηγμένο σύστημα ελέγχου των εκπομπών, το οποίο στην ουσία εγχείει ένα αναγωγικό αέριο στις αέριες εκπομπές των ντίζελ κινητήρων με αποτέλεσμα να αλλοιώνει τη μορφή των εκπομπών και ειδικότερα να διασπάει τα διοξείδια του αζώτου- στα οποία στοχεύει ειδικά το Annex VI. Το αέριο το οποίο παρέχεται – υψηλό σε ουρία- προκαλεί χημική αντίδραση η οποία μετατρέπει τα οξείδια του αζώτου σε άζωτο, νερό και μικρές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή τα φυσικά συστατικά του αέρα τα οποία αναπνέει ο άνθρωπος.

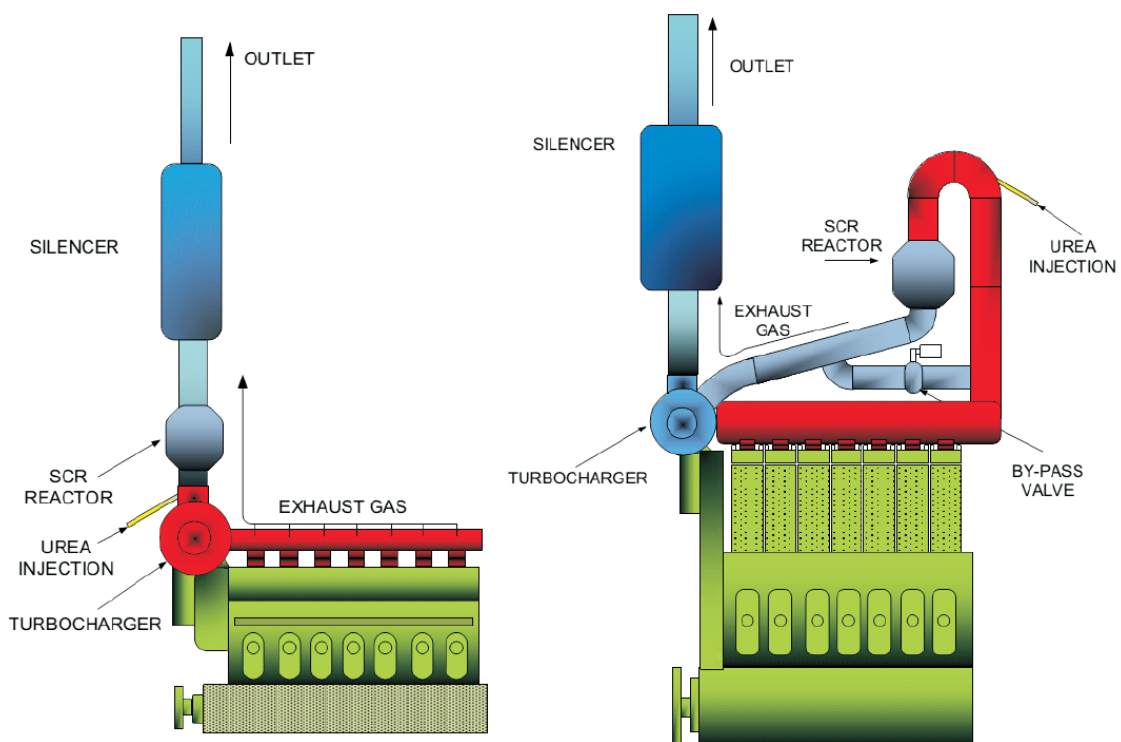
Σήμερα, τα συστήματα SCR είναι μια καλά δοκιμασμένη τεχνολογία με πάνω από 500 πλοία να έχουν εγκαταστημένα επί αυτών σε παγκόσμια κλίμακα (Dan Rutherford, et al. 2014).



Σχήμα 13: Διευθέτηση ενός συστήματος SCR (Wartsila)

Όπως φαίνεται και στην εικόνα υπάρχει στην ουσία επεξεργασία των αέριων εκπομπών της μηχανής του πλοίου. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με το scrubber. Στο χώρο όπου λαμβάνει χώρα η χημική αντίδραση διοχετεύεται το αέριο με υψηλή ουρία και αναμειγνύεται με τα αέρια παράγωγα της μηχανής ντίζελ. Η ουρία έχει δική της δεξαμενή, ενώ προφανώς και υπάρχει και σύστημα παρακολούθησης της διαδικασίας και ανάλυσης των επιπέδων διοξειδίων του αζώτου. Στη συνέχεια απελευθερώνονται μέσω της τσιμινιέρας του πλοίου τα ακίνδυνα πλέον και παράγωγα των αντιδράσεων αέρια στην ατμόσφαιρα.

Η τεχνολογία επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης (SCR) βασίζεται στη μείωση του αζώτου οξειδία μέσω ενός αναγωγικού στην επιφάνεια ενός καταλύτη. Τα καυσαέρια αναμειγνύονται με αμμωνία ή ουρία πριν περάσει από ένα στρώμα καταλύτη σε θερμοκρασία μεταξύ 3200C και 4000C, όπου το NOx μειώνεται σε N2 και H2O.



Σχήμα14: Πιθανή θέση του SCR ανάλογα με τον κινητήρα(Myskow J.)

Η θέση της μονάδας SCR εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα. Στην περίπτωση ενός μέσου ή υψηλής ταχύτητας τετράχρονου κινητήρα, η μονάδα SCR βρίσκεται, κάτω από τον στρόβιλο του στροβιλοσυμπιεστή στην εξαγωγή. Για μεγάλο κινητήρα

χαμηλής ταχύτητας δηλαδή δίχρονους κινητήρες, η μονάδα SCR βρίσκεται μεταξύ της εξάτμισης και του στροβιλοσυμπιεστή.

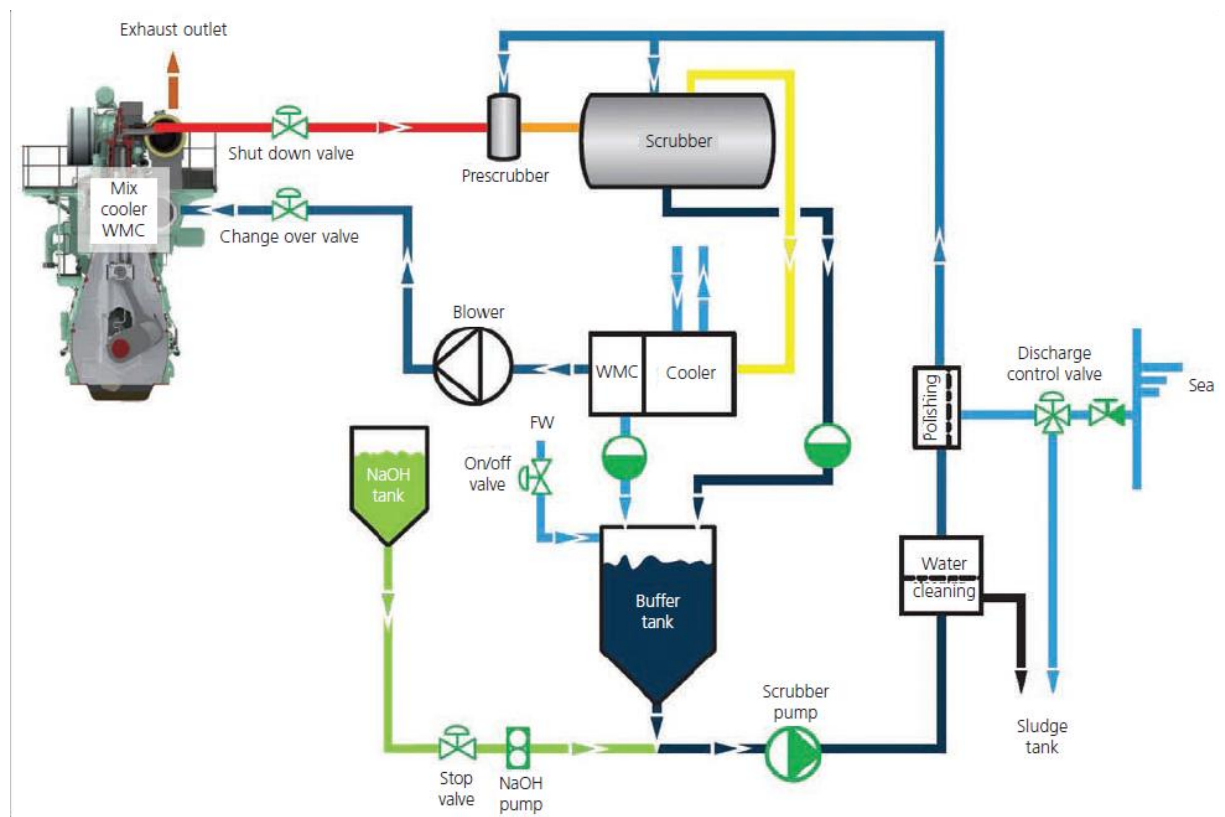
Αυτό που είναι σημαντικό είναι ότι η εγκατάσταση SCR απαιτεί αυξημένες επενδύσεις για προμήθειες, αποθηκευτικό χώρο και μεγάλες ποσότητες αμμωνίας ή ουρίας που χρειάζονται. Σαν αποτέλεσμα, η ετήσια δαπάνη για τη χρήση του SCR αυξάνεται κατά περίπου 5% του ΑΕΠ από το συνηθισμένο κόστος καυσίμων.

3.3.2 Ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR)

Τα συστήματα EGR- Exhaust Gas Recirculation αποτελούν μια εναλλακτική λύση των SCR στην μείωση των εκπομπών NOx από τις μηχανές ντίζελ.

Τα συγκεκριμένα συστήματα επιστρέφουν στην ουσία ένα τμήμα των καυσαερίων τα οποία παράγονται από τη μηχανή στους κυλίνδρους του κινητήρα ύστερα από μια διαδικασία μερικής ψύξεως και καθαρισμού τους. Αυτή η ανακύκλωση των αερίων έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το οξυγόνο στο εσωτερικό της μηχανής με αποτέλεσμα να λειτουργεί σαν καταστολέας της καύσης και να μειώνονται οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κινητήρα. Η γενικότερη μείωση της θερμοκρασίας περιορίζει την παραγωγή των οξειδίων του αζώτου

Βασικότατο μειονέκτημα των EGR συστημάτων αποτελεί το γεγονός ότι επηρεάζουν τη διαδικασία της καύσεως και κατ'επέκταση τη λειτουργία του κινητήρα. Από τη μείωση των θερμοκρασιών απορρέει και αντίστοιχα μειωμένη απόδοση της μηχανής. Η τεχνολογία EGR δεν είναι κάτι τόσο σύγχρονο και καινοτόμο, αντιθέτως χρησιμοποιείται από την αυτοκινητοβιομηχανία (κυρίως σε τετράχρονους ντίζελ κινητήρες) και μάλιστα από τις αρχές της δεκαετίας του 1970.



Σχήμα 15: Σύστημα EGR(MAN Diesel & Turbo)

Τα κύρια τμήματα συστήματος EGR περιλαμβάνουν:

- ένα scrubber τοποθετημένο πριν τον υπερσυμπιεστή του κινητήρα
- ψυγείο για περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του ανακυκλωμένο αέρα
- ένα σύστημα συλλήψεως νερού (WMC)
- ανεμιστήρα υψηλής πίεσης για την αύξηση της επανακυκλοφορίας πριν από την επανεισαγωγή στον κινητήρα
- αυτοματοποιημένες βαλβίδες για την απομόνωση του συστήματος.

3.4 Σύγκριση Τεχνολογιών Scrubbers

3.4.1 Λειτουργία σε freshwater

Η αλκαλικότητα του υδάτινου περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί το scrubber, είναι σημαντικός παράγοντας μόνο για τα open-loop scrubbers. Η λειτουργία τους σε freshwater όπως αυτά των ποταμών και λιμνών είναι αδύνατη και απαιτείται η χρήση distillates. Αντίθετα, τα closed-loop και τα dry scrubbers δεν επηρεάζονται από την

αλκαλικότητα του περιβάλλοντος, γιατί βασίζονται στη χρήση χημικών πρόσθετων (Lloyds Register, 2015).

3.4.2 Λειτουργία με μηδενικές απορρίψεις νερού έκπλυσης

Τα open-loop scrubbers απαιτούν συνεχείς απορρίψεις του νερού έκπλυσης.

Αντίθετα, τα closed-loop (και τα hybrid scrubbers όταν λειτουργούν σε closed-loop mode) μπορούν να αποθηκεύσουν το νερό έκπλυσης για κάποιο χρονικό διάστημα σε ειδικές δεξαμενές επί του πλοίου και να λειτουργούν με μηδενικές απορρίψεις. Τα dry scrubbers δεν έχουν καθόλου απορρίψεις νερού (Lloyds Register, 2015).

3.4.3 Βάρος

Τα dry scrubbers είναι κατά πολύ βαρύτερα από τα αντίστοιχα wet scrubbers (open/closed scrubbers). Το βάρος ενός dry scrubber μπορεί να φτάνει και τους 200 τόνους, σε σχέση με τα wet scrubbers που ζυγίζουν περίπου 30-55 τόνους. Επιπλέον, στα dry scrubbers το μεγαλύτερο μέρος του βάρους εδράζεται στο υψηλότερο μέρος του πλοίου, σε σχέση με τα wet scrubbers, όπου τα περισσότερα μέρη του συστήματος βρίσκονται χαμηλότερα. Ως εκ τούτου, μπορεί να προκύψουν ζητήματα ευστάθειας του πλοίου (Lloyds Register, 2015).

3.4.4 Κατανάλωση Ενέργειας

Τα open-loop scrubbers απαιτούν μεγαλύτερες αντλίες σε σχέση με τα closed-loop scrubbers. Ο λόγος είναι ότι η αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού είναι χαμηλότερη από αυτήν του νερού που έχει προστεθεί καυστική σόδα. Έτσι, απαιτείται συνεχής ροή θαλασσινού νερού και άρα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Όσον αφορά στα dry scrubbers, η ενεργειακή απαίτηση εξαρτάται κυρίως από τον μίαντα μεταφοράς των pellets στο σύστημα έκπλυσης (absorber). Ως εκ τούτου, οι απαιτήσεις σε ενέργεια είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές των wet scrubbers (Lloyds Register, 2015).

3.4.5 Συμβατότητα με συστήματα SCR

Τα wet scrubbers ψύχουν τα καυσαέρια και ως εκ τούτου δεν μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα SCR για τη μείωση των εκπομπών NOx. Σε διαφορετική περίπτωση απαιτείται η εγκατάσταση reheater που θα αυξάνει τη θερμοκρασία των καυσαερίων στο απαραίτητο επίπεδο λειτουργίας των SCR. Στον αντίποδα, τα

dryscrubbers δεν ψύχουν τα καυσαέρια και έτσι μπορούν να συνδυαστούν με SCR συστήματα (Lloyds Register, 2015).

3.4.6 Εμφάνιση καπνού

Παρ' ότι όλα τα scrubbers ανεξαρτήτως κατηγορίας μειώνουν το black carbon και τη στάχτη (ash) από το φουγάρο του πλοίου, τα wet scrubbers αυξάνουν τους υδρατμούς στα καυσαέρια που βγαίνουν από το φουγάρο του πλοίου. Οι υδρατμοί εμφανίζουν το φαινόμενο του λευκού καπνού, το οποίο μπορεί να αντίκειται σε «smoke controls» ορισμένων περιοχών γιατί μειώνει την ορατότητα. Οι κατασκευαστές των scrubbers μπορούν να παρέχουν εξοπλισμό που καταπολεμά το φαινόμενο του λευκού καπνού, ωστόσο πωλείται ξεχωριστά ανεβάζοντας το κόστος της εγκατάστασης (Lloyds Register, 2015).

3.4.7 Απόσβεση του θορύβου της μηχανής

Συνήθως τα scrubbers εγκαθίστανται στο σημείο που βρίσκεται ο κατασιγαστής (silencer) της μηχανής, το οποίο οδηγεί σε αύξηση του θορύβου από τη λειτουργία της μηχανής. Για τα wet scrubbers, η απόσβεση του θορύβου εξαρτάται από τη λειτουργία ή όχι του scrubber. Η απόσβεση του θορύβου είναι ιδιαίτερα σημαντική για κρουαζιερόπλοια και RoPax πλοία και γι' αυτό πολλοί operators επιζητούν το συνδυασμό των scrubbers με κάποιο silencer (Lloyds Register, 2015).

3.5 Προκλήσεις από την εγκατάσταση Scrubbers

Η εγκατάσταση των scrubbers συνοδεύεται από μια σειρά προκλήσεων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ώστε να αποφευχθούν δυσάρεστες καταστάσεις και δυσλειτουργίες κατά τη χρήση. Οι συνήθεις προκλήσεις που αναφέρονται από τους νηογνώμονες είναι οι εξής:

Διαστάσεις: καθώς οι scrubbers είναι μεγάλες κατασκευές, απαιτείται η ύπαρξη των κατάλληλων χώρων επί του πλοίου για την εγκατάστασή τους. Οι απαιτήσεις για διαθέσιμο χώρο είναι ακόμα μεγαλύτερες για τα dry scrubbers καθώς πρέπει να εξοικονομηθεί επαρκής χώρος τόσο για τα pellets, όσο και για το γύψο ως παραπροϊόν της έκπλυσης (ABS, 2013).

Ευστάθεια του πλοίου: Η εγκατάσταση ενός scrubber προσθέτει σημαντικό βάρος πάνω στο πλοίο, το οποίο μπορεί να επηρεάσει το lightship displacement (LTD). Αν η

διαφορά στο LTD ξεπερνά το 2% σε σχέση με το LTD πριν την εγκατάσταση του scrubber, τότε προτείνεται η εκτέλεση δοκιμών σχετικά με την ευστάθεια του πλοίου. Επιπλέον, οποιεσδήποτε αλλαγές στους υπολογισμούς της ευστάθειας θα πρέπει να καταγράφονται στο Stability Booklet επί του πλοίου (ABS, 2013).

Επιλογή κατάλληλων υλικών: Τα χαμηλότερα τμήματα ενός scrubber εκτίθενται σε οξέα και χλωριούχα, καθώς και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Απαιτείται λοιπόν να γίνεται επιλογή υλικών που να αντέχουν σε αυτές τις συνθήκες. Συνήθως επιλέγεται κράμα νικελίου ή διπλό ανοξείδωτο ατσάλι ως υλικό κατασκευής. Αντίθετα, στα υψηλότερα σημεία του scrubber επικρατούν ηπιότερες συνθήκες και γι' αυτό επιλέγονται λιγότερο ανθεκτικά υλικά (ABS, 2013).

Backpressure: Τα scrubbers μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς τη λειτουργία της μηχανής του πλοίου, αν προκαλούν υπερβολικό backpressure. Ο κατασκευαστής θα πρέπει να θέτει τα όρια backpressure, τα οποία θα πρέπει να περιλαμβάνονται στο Technical File και δε θα πρέπει να ξεπερνώνονται ποτέ. Σε αυτήν την κατεύθυνση βοηθά και η εγκατάσταση fans που μειώνουν την πίεση στο scrubber και αποτρέπουν την εμφάνιση backpressure στη μηχανή (ABS, 2013).

Πλημμύριση Scrubber: Υπάρχει περίπτωση πλημμύρισης στο scrubber αν σταματήσουν ή βουλώσουν οι αντλίες που μεταφέρουν το νερό έκπλυσης. Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο μπορεί να προκληθεί ζημιά στη μηχανή ή στο boiler. Η εγκατάσταση αυτοματοποιημένων συστημάτων και συναγερμών αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό τέτοιου είδους περιστατικά (ABS, 2013).

Exhaust Gas Bypass: Σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται η χρήση scrubber, δηλαδή εκτός ζωνών ECA, θα πρέπει να υπάρχει κάποιου είδους bypass που θα επιτρέπει στα καυσαέρια να εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα χωρίς έκπλυση. Κάτι τέτοιο εξοικονομεί σημαντικά ποσά ενέργειας στο πλοίο από τη μη-χρήση του scrubber. Ωστόσο, πρόβλημα μπορεί να προκύψει στα wet scrubbers που δεν έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν αφήνοντας τα καυσαέρια να περνούν χωρίς έκπλυση. Ο λόγος είναι ότι δεν έχουν κατασκευαστεί από επαρκώς ανθεκτικά υλικά στις υψηλότερες θερμοκρασίες των καυσαερίων, Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η πρόβλεψη για την ύπαρξη κατάλληλα κατασκευασμένων σωληνώσεων που θα επιτρέπουν το bypass (ABS, 2013).

Ηλεκτρικά συστήματα και Αυτοματισμοί: Η εγκατάσταση scrubbers δημιουργεί όπως ειπώθηκε νωρίτερα υψηλές ενεργειακές ανάγκες. Οι ανάγκες αυτές σχετίζονται στους μεν wet scrubbers με τις αντλίες του νερού έκπλυσης, στους δε dry scrubbers με τη μεταφορά pellets και γύψου από και προς το scrubber αντίστοιχα. Γι' αυτό ενδεχομένως να απαιτηθεί η εγκατάσταση περισσότερων γεννητριών στο πλοίο. Επίσης, απαιτείται η εγκατάσταση control panels που θα ελέγχουν τη λειτουργία του scrubber στο μηχανοστάσιο και η ενοποίηση τους με τα κεντρικά συστήματα συναγερμών και παρακολούθησης του πλοίου. Επιπλέον, αυτοματοποιημένα συστήματα απαιτούνται για την παρακολούθηση και καταγραφή των επίπεδων καυσαερίων και των απορρίψεων νερού έκπλυσης στο περιβάλλον (ABS, 2013).

Εκπαίδευση πληρώματος και φόρτος εργασίας: Είναι μείζονος σημασίας η ύπαρξη και παροχή του κατάλληλου προστατευτικού εξοπλισμού στο πλήρωμα κατά τη χρήση επικινδύνων χημικών υλικών όπως η καυστική σόδα. Εξίσου σημαντική είναι και η ενημέρωση του πληρώματος σχετικά με τη λειτουργία του scrubber και τους κινδύνους που ελλοχεύουν. Τέλος, το πλήρωμα πρέπει να είναι εξοικειωμένο με τις διαδικασίες συντήρησης του scrubber, αλλά και αυτές που θα πρέπει να ακολουθηθούν σε περίπτωση βλάβης (Lloyds Register, 2015).

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Scrubber

Η ουσία όλων των περιβαλλοντικών κανονισμών που αναλύθηκαν ανωτέρω είναι η μείωση των εκπομπών SOx. Ως εκ τούτου είναι πολύ σημαντική η περιβαλλοντική αξιολόγηση των στρατηγικών συμμόρφωσης ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση είναι αφ' ενός η μείωση των αέριων εκπομπών, αφ' ετέρου οι επιδράσεις στο υδάτινο περιβάλλον από την απόρριψη του νερού έκπλυσης των καυσαερίων. Με βάση όσα έχουν ειπωθεί μέχρι τώρα είναι προφανές ότι το δεύτερο κριτήριο αφορά την εφαρμογή των scrubbers και κυρίως τους open-loop και τους hybrid scrubbers.

4.1 Μείωση Καυσαερίων Ρύπων

Η βασική λειτουργία ενός scrubber αφορά στην δέσμευση και απόπλυση πρωτίστως των οξειδίων του θείου SOX, και δευτερευόντως σημαντικών ποσοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων (PM) από τα καυσαέρια καύσης. Η συμβολή της τεχνολογίας στην απομάκρυνση οξειδίων του Αζώτου και ρύπων CO₂ είναι μάλλον περιορισμένη. Ο Πίνακας 4.1. παρέχει μια σύνοψη της απόδοσης των scrubber με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Η ένταση των επιπτώσεων των προκαλούμενων καυσαερίων συνδέεται κυρίως με τον αριθμός τους και λιγότερο με τη μάζα τους καθώς τα scrubber απομακρύνουν σωματίδια σχετικά μεγάλου μεγέθους (Køcks, et al., 2012)

Scrubber exhaust gas cleaning performance

Pollutant	Reduction
SO _x	>90%
PM	60-90%
NO _x	<10%

Source: summarised from (COWI, 2012).

4.2 Απορρίψεις νερού (water discharges)

Οι απορρίψεις νερού έκπλυσης από πλοία που χρησιμοποιούν scrubbers μπορούν να υποβαθμίσουν το θαλάσσιο περιβάλλον. Οι Οδηγίες του IMO (MEPC 184(59)) έθεσαν τα κριτήρια βάσει των οποίων θα αξιολογείται η επίδραση του νερού έκπλυσης στο υδάτινο περιβάλλον. Οι Hasselov et al (2013) υποστηρίζουν ότι οι απορρίψεις του νερού έκπλυσης στη θάλασσα, μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην οξύνιση των ωκεανών. Όσον αφορά τα νιτρικά άλατα, η περιεκτικότητα του νερού έκπλυσης σε άζωτο είναι χαμηλή και σημαντικά χαμηλότερη από τις απαιτήσεις των Οδηγιών του IMO. Τέλος, οι μετρήσεις έχουν δείξει ότι η περιεκτικότητα του νερού έκπλυσης σε PAH's είναι εντός των ορίων που έχουν τεθεί από τον IMO (Delft, 2015).

4.2.1 Ανάλυση Νερού Πλύσης

Λόγω της σχετικά πρόσφατης εφαρμογής της τεχνολογίας των scrubber και του καινούργιου κανονισμού για την καταγραφή και παρακολούθηση της περιεκτικότητας των δεσμευμένων συστατικών και της σύστασης του νερού πλύσης, υπάρχουν

ελάχιστες βιβλιογραφικές αναφορές και τεχνικές μελέτες που να παρέχουν επαρκή δεδομένα. Οι κύριες και περισσότερο πλήρης εκθέσεις καταγραφής είναι οι ακόλουθες τέσσερις:

1. COWI (2012). Πλοίο: MV Ficaria Seaways, 2-stroke main engine. Scrubber: Υβριδικός.
2. EPA (2011). Πλοίο: MS Zaandam, Auxiliary Engine. Scrubber: Sea Water Scrubber.
3. Wartsila (2010). Πλοίο: MT Suula, Auxiliary Engine. Scrubber: Fresh Water Scrubber.
4. Hufnagl, *et.al* (2005). Πλοίο: Pride of Kent, Auxiliary Engine. Scrubber: Sea Water Scrubber.

Τα δεδομένα και οι καταγραφές από τις προαναφερόμενες μελέτες θα αποτελέσουν την βάση για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του νερού απόπλυσης.

Επικίνδυνες ουσίες, όπως τα βαρέα μέταλλα και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH), απελευθερώνονται μαζί με το νερό πλύσης καθαρισμού. Οι διαθέσιμες εκθέσεις παρακολούθησης υποστηρίζουν ότι εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις, τα πλοία ήταν συμβατά με τις κατευθυντήριες γραμμές του IMO. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι η απόρριψη του νερού πλύσης δεν μπορεί να έχει αντίκτυπο στα τοπικά οικοσυστήματα, ειδικά εάν η τεχνολογία των scrubber χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα.

4.2.2 Βαρέα μέταλλα

Εστιάζοντας επιμέρους σε συγκεκριμένες ενώσεις, οι εκθέσεις καταγράφουν στο νερό πλύσης την ύπαρξη βαρέων μετάλλων όπως Hg, Cd, Cr, Cu, Ni και Zn τα οποία μπορεί να είναι τοξικά τόσο για τα φυτά όσο και την ανθρώπινη ζωή. Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι σε αρκετές περιπτώσεις μέταλλα που ανιχνεύθηκαν στα δείγματα νερού απορροής δεν είχαν εντοπιστεί ούτε στο καύσιμο αλλά ούτε και στο νερό εισόδου (Hufnagl, *et al.*, 2005),(Buhaug, *et al.*, 2006). Η έκθεση της COWI (2012) για το Ro-Ro πλοίο Ficaria Seaways, αναφέρει ως μάλλον περιορισμένη την ικανότητα των scrubber να δεσμεύουν τα μέταλλα νικελίου και βαναδίου από τα καυσαέρια. Οι καταγραφές αναφέρουν ποσοστά δέσμευσης των συγκεκριμένων

ουσιών της τάξης του 1 - 39%, αναλόγως της αρχικής περιεκτικότητάς τους στο καύσιμο, της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο και την ισχύ του κινητήρα. Υψηλές συγκεντρώσεις καταγράφηκαν για τα μέταλλα του χαλκού και του ψευδαργύρου, οι οποίες δεν μπορούν να δικαιολογηθούν από τις σημαντικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις τους στο καύσιμο και το νερό εισόδου. Κατά τους ειδικούς, το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία των συγκεκριμένων μετάλλων σε εξαρτήματα του κινητήρα και το λιπαντικό. Όπως προαναφέρθηκε, οι οδηγίες του IMO δεν περιέχουν κανένα όριο για τη συγκέντρωση των μετάλλων στο νερό πλύσης, αλλά εστιάζουν στην ιδιότητα της θολότητας ως δείκτη για τη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών σωματιδίων. Ελλείπει αναλυτικότερων δεδομένων και μετρήσεων για τη θολότητα δεν μπορούν να εξαχθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα από καμία μελέτη.

4.2.3 pH

Αναφορικά με τα επίπεδα pH, η μελέτη για το πλοίο “Pride of Kent” υποστηρίζει ότι το νερό απόπλυσης διαλύεται γρήγορα και περιορίζεται σε διαφοροποιήσεις μικρότερες του 0,2 (σε σχέση με την τιμή του νερού εισόδου), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ασφαλές στις περιπτώσεις που το πλοίο βρίσκεται εν πλω σε ανοιχτή θάλασσα (Buhaug *et al.*, 2006). Από την άλλη όμως πλευρά, η έκθεση του COWI (2012), επισημαίνει ότι σε μια περιοχή με σημαντική κίνηση πλοίων όπως π.χ. το Kattegat, ο αντίκτυπος απορροών τέτοιου μεγέθους θα μπορούσε να αποτελέσει πρόβλημα. Η ίδια έκθεση επισημαίνει επίσης ότι για πυκνές διαδρομές, η αύξηση του pH και η κατά συνέπεια η μείωση της αλκαλικότητας είναι ιδιαίτερα χαμηλή (λιγότερο από 0,01 μονάδες pH), ακόμη και σε περιοχές με φυσικά χαμηλή αλκαλικότητα, όπως ο κόλπος της Βοθνίας. Οι πλέον πρόσφατη μελέτη επί του θέματος (Hassellön, *et al.*, 2013) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η απορροή των νερών πλύσης από την χρήση scrubber μπορεί να συμβάλει ιδιαίτερα στην οξίνιση των παράκτιων υδάτων, και να ενισχύσει το φαινόμενο που προκαλείται ήδη από τις εκπομπές του CO₂ επηρεάζοντας σημαντικά θαλάσσια είδη όπως τα κοράλλια και τα φύκια, καθώς και εμπορικά είδη υδατοκαλλιέργειας, όπως είναι τα οστρακοειδή.

4.2.4 Νιτρικά άλατα

Υψηλές περιεκτικότητες νιτρικών οξειδίων στο νερό απορροής συμβάλλουν σε φαινόμενα ευτροφισμού του θαλασσινού νερού και σε υπερανάπτυξη των φυκιών που

οδηγεί σε μειωμένη διαύγεια του νερού. Το φαινόμενο του ευτροφισμού είναι γνωστό περιβαλλοντικό πρόβλημα στη Βαλτική και τη Βόρεια Θάλασσα. Σύμφωνα με τη μελέτη της Wartisila (2010), η ποσότητα αζωτούχων ενώσεων που εκβάλλεται μέσω των νερών απορροής στην τεχνολογία των scrubber είναι περιορισμένη και σε τιμές πολύ χαμηλότερες των αποδεκτών ορίων του IMO δεδομένου ότι μόνο το NO₂ είναι διαλυτό στο νερό, ενώ το NO παραμένει αδιάλυτο. Σημαντικότερες επιπτώσεις προκαλούνται από τις εκπομπές NO_x του κινητήρα οι οποίες αποτελούν κατά κανόνα περισσότερο από το 90-95% του NO. Παρα ταυτα, αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι μέρος των εκπομπών καυσαερίων NO_x τελικά καταλήγουν στη θάλασσα ανεξαρτήτως της χρήσης ή όχι scrubber.

4.2.5 PAH

Στο υδάτινο περιβάλλον, οι PAH είναι συνήθως συνδεδεμένοι με επικίνδυνα ιζηματοειδή σωματίδια. Συνήθως συσσωρεύονται σε ασπόνδυλους οργανισμούς, αυγά ψαριών και γόνου τα οποία υπό έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να υποστούν μετάλλαξη του DNA τους, αιμορραγία, μειωμένη ανάπτυξη και αυξημένη θνησιμότητα. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές που καταγράφηκαν στις τέσσερις μελέτες βρίσκονται εντός των ορίων αποδεκτών ορίων που επιβάλει ο IMO, υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των καταγεγραμμένων τιμών στο νερό εισόδου και στο νερό απορροής (UBA, 2014).

4.2.6 Η χρήση scrubbers στους λιμένες

Τα λιμάνια ως κλειστές περιοχές είναι περισσότερο ευάλωτα στη ρύπανση σε σχέση με τις ανοιχτές θάλασσες. Είναι αναμενόμενο λοιπόν ότι οι επιδράσεις του νερού έκπλυσης των scrubbers θα είναι μεγαλύτερες στους λιμένες παρά στις ανοιχτές θάλασσες (Delft, 2015).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το θεσμικό πλαίσιο για την απόρριψη του νερού έκπλυσης από scrubbers βρίσκεται ακόμα υπό συζήτηση. Ωστόσο, κάποιες χώρες έχουν θέσει όρια συγκεντρώσεων επιβλαβών ουσιών σε συνάρτηση με το Water Framework Directive ή και ακόμα χαμηλότερα. Για παράδειγμα, η Γερμανία έχει απαγορεύσει την απόρριψη νερού έκπλυσης σε ποταμούς και κλειστές περιοχές, όπως το κανάλι του Κιέλου. Επίσης, το Βέλγιο έχει απαγορεύσει τις απορρίψεις σε απόσταση τριών ναυτικών μιλίων από τις ακτές του (Delft, 2015).

Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περισσότερη έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις του νερού έκπλυσης στο υδάτινο περιβάλλον. Οι μέχρι τώρα έρευνες είναι περιορισμένες σε αριθμό και απαιτείται η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων τους και από άλλους ερευνητές. Αυτό ισχύει ακόμα περισσότερο για τους λιμένες και τις παράκτιες περιοχές, όπου και οι επιπτώσεις είναι μεγαλύτερες και διακρίνεται ένα έλλειμμα ερευνητικών μελετών (Delft, 2015). Τέλος, οι έρευνες αυτές θα πρέπει να επιταχυνθούν λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μαζική υιοθέτηση scrubbers από όλο και περισσότερα πλοία στο εγγύς μέλλον ως συνέπεια των νέων κανονισμών

4.3 Σύγκριση των πλυντηρίων θαλασσινών και γλυκών υδάτων

Προκειμένου να αποτυπώσει τη σύγκριση μεταξύ του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των διαφορετικών τυπολογιών scrubber, η UBA (2014) συνόψισε τη διεθνή βιβλιογραφία για τα scrubber γλυκού και θαλάσσιου νερού. Συνολικά, η μελέτη καταλήγει ότι τα sea water scrubber έχουν μεγαλύτερη επίπτωση στην ποιότητα του νερού έναντι των fresh water scrubbers. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη

Η επίδραση των πλυντηρίων θαλασσινού νερού στην ποιότητα των υδάτων είναι σημαντικά υψηλότερη από την επίδραση του καθαριστή γλυκού νερού. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το υψηλότερο ροής επικίνδυνων ουσιών. Αυτή η διαφορά στην απόρριψη των επικίνδυνων (UBA, 2014) με βάση τη διαθέσιμη παρακολούθηση (COWI, 2012). Η απόρριψη βαρέων μετάλλων και οργανικών ουσιών από τους καθαριστές θαλασσινού νερού είναι σημαντικά υψηλότεροι.

4.4 Πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές GHG

Πέραν των βασικών απαιτήσεων ενέργειας που συνεπάγεται η λειτουργία ενός πλοίου, η εφαρμογή και χρήση της τεχνολογίας των scrubber αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Υπολογίζεται ότι στην περίπτωση του Sea Water Scrubber αυτό αντιστοιχεί σε μια αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 3%, ενώ στην περίπτωση του Fresh Water Scrubber μόλις κατά 1% (CE Delft, 2015). Η εταιρία Wärtisilä (2010) έχει εκτιμήσει τις απαιτήσεις σε ενέργεια για την περίπτωση του Fresh Water Scrubber κατασκευής της μόλις σε περίπου 0,3%, χωρίς όμως να

συνεκτιμά την απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή χημικών ουσιών (Wärtisilä, 2010).

Στην εναλλακτική περίπτωση της χρήσης των scrubber, δηλαδή στην επιλογή χρήσης καυσίμου χαμηλής συγκέντρωσης σε οξείδια του θείου οι Corbett & Winebrake (2008) υπολόγισαν μια συνεπακόλουθη αύξηση των εκπομπών CO₂ της τάξης του 1-2%. Η εκτίμηση στηρίχθηκε στην ανάλυση του κύκλου ζωής παραγωγής του καυσίμου, δηλαδή, στις ενεργειακές απαιτήσεις πρόσθετης κατανάλωσης για την παραγωγή του αποστάγματος καυσίμου. Στην ίδια συλλογιστική, η Concawe (2009) υποστήριξε ότι η αυξημένη παραγωγή MGO (για την κάλυψη χρήση εντός SECA) από τα Ευρωπαϊκά διυλιστήρια θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) σε ένα ποσοστό της τάξης του 10%. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί, ότι η αρχική συγκέντρωση άνθρακα στο απόσταγμα καυσίμου MGO είναι χαμηλότερη κατά 4% της αντίστοιχης του μαζούτ (HFO), λόγω του υψηλότερου ποσοστού δεσμών άνθρακα και υδρογόνου στο καύσιμο. Η διαφοροποίηση αυτή θα πρέπει να συνεκτιμηθεί κατά την συνολική αξιολόγηση (well-to-wake WtW) των επιπτώσεων που συνεπάγεται η χρήση των δύο εναλλακτικών.

Αντίστοιχη well-to-wake αξιολόγηση πραγματοποίησαν και οι Ma, *et al.*, (2012) αναφορικά με την συμμετοχή των εκπομπών SO_x του κλάδου της ναυτιλίας στο σύνολο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο της κατανάλωσης ενέργειας κατά τον κύκλο ζωής των διαφόρων καυσίμων και χημικών ουσιών. Ο Πίνακας 4.4. συνοψίζει την αύξηση (%) στις ποσότητες των εκλυόμενων αέριων ρύπων για μια σειρά από σενάρια που αφορούν και τη χρήση διαφορετικών τυπολογιών scrubber σε σχέση με την βασική χρήση καυσίμου HFO.

WtW GHG emissions increase for different scenario's (%)

Scenario	WtW GHG emissions
HFO	Baseline
Seawater scrubber	4.0-4.9
Freshwater scrubber	2.5-2.9
Dry scrubber	4.9-5.5
50% conversion to MGO	6.5
100% conversion to MGO	15.8

Source: Ma *et. al.*, 2012.

Από την συγκριτική αξιολόγηση του πίνακα διαπιστώνεται ότι χαμηλότερες πρόσθετες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καταγράφονται αρχικά στην περίπτωση των freshwater scrubbers και δευτερευόντως για τους seawater scrubbers. Στην

έκθεση του COWI (2012) για το MV Ficaria Seaways καταγράφηκαν μετρήσεις πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστά της τάξης του 1,4 %, συγκεκριμένα 1% επιπλέον κατανάλωση ενέργειας και επιπλέον 0,4 % για την επιστροφή πίεσης. Ειδικότερα, η ενέργεια που σχετίζεται με την κατανάλωση Sodium hydroxide (NaOH) εκτιμήθηκε στο 2,1% της ενέργειας που παράγεται από το καύσιμο μαζούτ. Συναθροίζοντας τα παραπάνω δεδομένα, οι απαιτήσεις για πρόσθετη ενέργεια στην περίπτωση των fresh water scrubbers ανέρχεται στο 3,5%. Από την άλλη πλευρά, οι απαιτήσεις που προϋποθέτει η χρήση MGO υπερβαίνουν το βασικό σενάριο εκπομπών (HFO) κατά 6,5%, υπό τη συνθήκη ότι τα Ευρωπαϊκά διυλιστήρια μετατρέπουν κατά 50 % της παραγωγής τους σε MGO και σε συνδυασμό με ότι λοιπές ενεργειακές απαιτήσεις μπορεί να συνεπάγεται αυτό. Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί η απουσία συγκριτικών δεδομένων για την περίπτωση του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) καθώς και των διαφορετικών μεθόδων παραγωγής του.

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθούν οι υποθέσεις και οι παραδοχές που είναι απαραίτητες για την οικονομική ανάλυση της επένδυσης σε scrubber. Οι υποθέσεις και τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν προέρχονται από δημοσιευμένες μελέτες, καθώς και πραγματικά δεδομένα. Αναλυτικότερα, θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά του πλοίου-υποδείγματος στο οποίο θα εγκατασταθεί το scrubber, τα χαρακτηριστικά του scrubber, οι διαδρομές και ο χρόνος εντός ζωνών ECA, και τέλος, θα εξεταστεί αν η επένδυση σε scrubbers είναι οικονομικά συμφέρουσα.

5.1 Περιγραφή του πλοίου υπόδειγμα

Το OOCL Hong Kong είναι το νεότερο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στον κόσμο, βαφτισμένο στις αρχές Μαΐου 2017 και κατασκευάστηκε στο ναυπηγείο της




Samsung Heavy Industries (SHI) στο νησί Geoje της Νότιας Κορέας. Ξεπερνά το όριο των 21.000 TEU στα μεγαλύτερα containerships και εφαρμόζει τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες στη ναυτική μηχανική, ακολουθώντας τα τελευταία πρότυπα του ΔΝΟ για την ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές λειτουργίες.

Το OOCL Χονγκ Κονγκ έχει συνολικό μήκος 399,87 μ., πλάτος 58,80 μ., βάθος 32,50 μ. και μέγιστο βύθισμα 16,00 μ. Επιπλέον, για να φανταστεί κανείς το γιγαντιαίο μέγεθος του σκάφους, πρέπει να θεωρήσουμε ότι η δεξαμενή του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι 73,50 μέτρα. Το συνολικό κόστος κατασκευής του σκάφους είναι περίπου 950 εκατομμύρια δολάρια και ο φορέας εκμετάλλευσης της εταιρείας θέτει ήδη εντολή για 5 αδελφικά πλοία, τα οποία θα είναι ναυαρχίδα στο στόλο του Orient Overseas Container Line.

Ο κύριος κινητήρας είναι ο 1 × [MAN B&W 11G95ME-C](#), ο οποίος έχει μέγιστη ισχύ εξόδου 75,570 kW. Το σύστημα έγχυσης καυσίμου διανέμει το πετρέλαιο ντίζελ στους κυλίνδρους υπό υψηλή πίεση και έχει υψηλότερη θερμοκρασία, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση του κινητήρα και βελτιώνει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του. Το OOCL Hong Kong εξυπηρετεί την ζώνη εμπορίου Ασία-Ευρώπη με στάσεις στη Σαγκάη, το Νινγκμπο, το Χιαμεν, το Υαντιαν και τη Σιγκαπούρη και μέσω της διώρυγας του Suez στο Felixstowe, το Ρότερνταμ, το Γκντανσκ και το Wilhelmshaven.



OOCL Hong Kong

Hong Kong	General characteristics
Name: <i>OOCL Hong Kong</i>	Tonnage: 210,890 GT
Owner: Orient Overseas Container Line Ltd.	NT
Operator: OOCL	197,317 DWT
Port of registry:  Hong Kong	Length: 399.87 m (1,311.9 ft)
Ordered: 31 March 2015	Beam: 58.80 m (192.9 ft)
Builder: Samsung Heavy Industries, Geoje	Draught: 16.00 m (52.49 ft)
Yard number: SN2172	Depth: 32.50 m (106.6 ft) (deck edge to keel)
Laid down: 24 December 2015	Installed power: 1 × MAN B&W 11G95ME-C (1 × 75,570 kW)
Launched: 31 December 2016 ^[1]	Propulsion: Diesel engine
Christened: 12 May 2017	Two shafts, fixed pitch propellers
Acquired: May 2017	Capacity: 21,413 TEU
Identification: Call sign: VRQL9	Notes: [2]
IMO number: 9776171 	
MMSI number: 477333500 	

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά OOCL Hong Kong

Αναλυτικά οι πίνακες 7 και 8 παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά των κύριων και βοηθητικών μηχανών του πλοίου.

Propulsion System

Propeller

Manufacturer Name :	NAKASHIMA PROPELLER CO., LTD.
Propeller Material (ABS Grade) :	Bronze-ABS-Type 4 Ni-Al Bronze

Main Diesel Engine

Manufacturer Name :	DOOSAN ENGINE CO., LTD.	Model Number :	11G95ME-C9.5 Tier II
Manufacture Number :	DML0105947		
Cylinder Bore :	950 mm	Maximum Continuous Rating :	61530 kW
Number of Cylinders :	11	Piston Stroke :	3460 mm
Revolutions at MCR :	78.5 rpm		

Main Power Distribution System

Generator No.01

Manufacturer Name :	NISHISHIBA ELECTRIC CO., LTD.	Model Number :	NTAKL-RCP
Rated Power :	4300 kW		

Shaft Generator

Manufacturer Name :	NISHISHIBA ELECTRIC CO., LTD.	Model Number :	NTABS-RCM
Rated Power :	6000kW		

Generator No.02

Manufacturer Name :	NISHISHIBA ELECTRIC CO., LTD.	Model Number :	NTAKL-RCP
Rated Power :	4300 kW		

Generator No.03

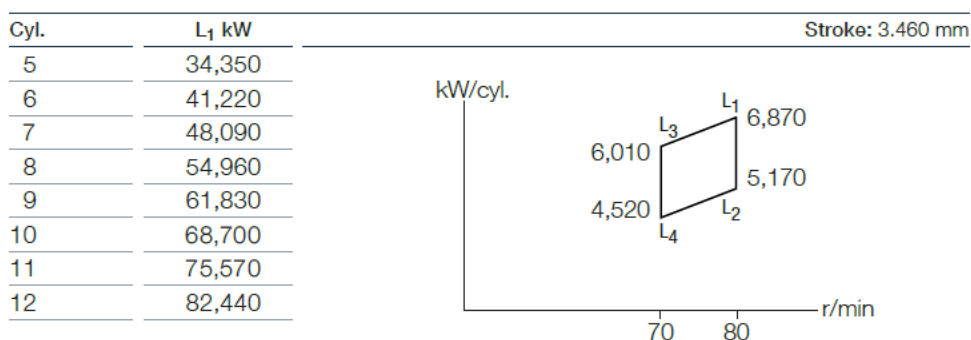
Manufacturer Name :	NISHISHIBA ELECTRIC CO., LTD.	Model Number :	NTAKL-RCP
Rated Power :	4300 kW		

Generator No.04

Manufacturer Name :	NISHISHIBA ELECTRIC CO., LTD.	Model Number :	NTAKL-RCP
Rated Power :	4300 kW		

Πίνακας 7

MAN B&W G95ME-C9.5-TII



SFOC for engines with layout on L ₁ - L ₃ line [g/kWh]		L ₁ /L ₃ MEP: 21.0 bar		
SFOC optimised load range	Tuning	50%	75%	100%
High load (85%-100%)	-	164.5	162.0	166.0
	ECT	163.5	161.0	169.0
Part load (50%-85%)	VT	161.5	160.5	166.5
	EGB/HPT	161.5	160.5	167.5
	ECT	162.0	161.5	167.5
Low load (25%-70%)	VT	159.5	161.5	166.5
	EGB/HPT	159.5	161.5	167.5

SFOC for engines with layout on L ₂ - L ₄ line [g/kWh]		L ₂ /L ₄ MEP: 15.8 bar		
SFOC optimised load range	Tuning	50%	75%	100%
High load (85%-100%)	-	160.5	156.0	159.0
	ECT	159.5	155.0	162.0
Part load (50%-85%)	VT	157.5	154.5	159.5
	EGB/HPT	157.5	154.5	160.5
	ECT	158.0	155.5	160.5
Low load (25%-70%)	VT	155.5	155.5	159.5
	EGB/HPT	155.5	155.5	160.5

Πίνακας 8

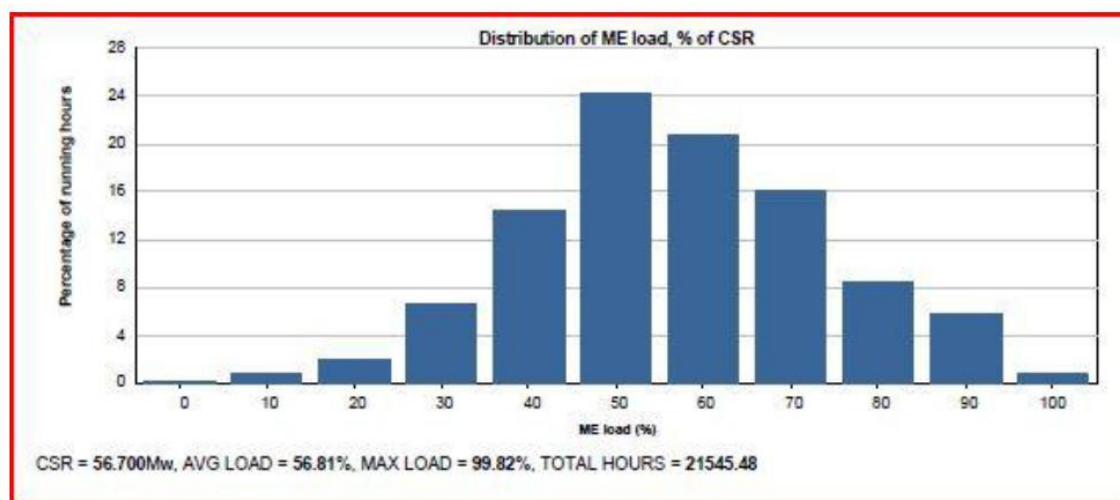
Ηλεκτρική ενέργεια (πίνακας 7)

Οι εγκατεστημένες γεννήτριες ντίζελ βοηθητικής ισχύος, για το βασικό πλοίο είναι

$$4 * 4300 = 17200 \text{ kW}(\epsilon).$$

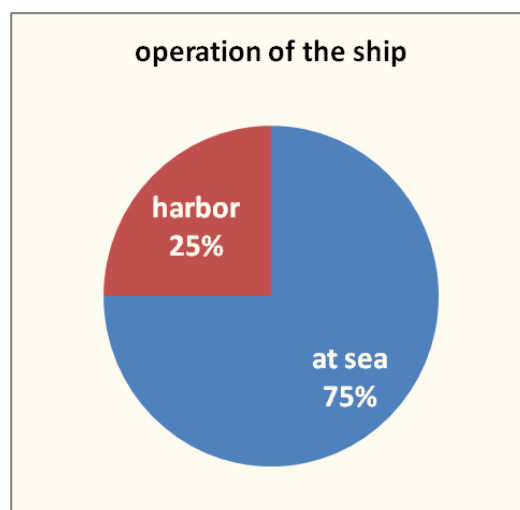
5.2 Προφίλ φόρτιου κινητήρα

Για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αυτού του μεγέθους παρουσιάζεται ένα τυπικό προφίλ φορτίου κινητήρα στο σχήμα 16:



Σχήμα 16: Τυπικό φορτίο κινητήρα για container ship

Αυτό το προφίλ φόρτωσης ισχύει για το 75% του έτους σε ταξίδι στη θάλασσα και το υπόλοιπο 25% σε λιμένα. Η (CSR) που περιγράφεται στο σχήμα ισούται με 75% MCR.



5.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας πλοίου

Οι κύριες μηχανές λειτουργούν στο 75% του MCR (maximum continuous rating) και οι βοηθητικές μηχανές στο 25% του MCR, με απώτερο στόχο τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και συνεπώς του κόστους. Όσο το πλοίο βρίσκεται σε λιμένα, οι βοηθητικές μηχανές λειτουργούν στο 95% του MCR.

Για να πετύχει, το πλοίο την υπηρεσιακή ταχύτητα των 19 κόμβων θα πρέπει ο κύριος κινητήρας του να λειτουργεί στα 56677,5kW και οι βοηθητικοί στα 4128 kW .

HFO

At sea $(56677,5 \times 161 \times 1,08 + (6000+4128) \times 188 \times 1,08) \times 24 / 1000000$
tons/ day =

ME: 236,5 tons HFO/24 hours + AE: 49,4 HFO/24 hours

At harbor $((6000+16340) \times 188 \times 1,08) \times 24 / 1000000$ tons/ day = **AE: 108,9 HFO/24 hours**

MGO

At sea $(56677,5 \times 161 + (6000+4128) \times 188) \times 24 / 1000000$ tons/ day =

ME: 219 tons HFO/24 hours + AE: 45,7 HFO/24 hours

At harbor $((6000+16340) \times 188) \times 24 / 1000000$ tons/ day = **AE: 100,8 HFO/24 hours**

5.4 To scrubber

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής υποθέτουμε την πιθανή εγκατάσταση hybrid scrubber πάνω στο πλοίο-υπόδειγμα για τη μείωση των εκπομπών SOx. Η συγκεκριμένη κατηγορία επελέγη ως αυτή που θεωρείται πιο πιθανό να εγκατασταθεί μαζικά σε πλοία διαφόρων τύπων ως μέσο συμμόρφωσης στους νέους κανονισμούς σύμφωνα και με τις τελευταίες έρευνες.

5.4.1 Κόστος scrubber

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται κάποιες λεπτομέρειες σχετικά με το κόστος και τις λειτουργικές επιδόσεις του scrubber. Η χωρητικότητα και το μέγεθός του βασίζονται συνήθως στον κύριο κινητήρα. Ωστόσο οι εκπομπές από τους βοηθητικούς κινητήρες ίσως χρειαστεί να "καθαριστούν" επίσης.

Μια από τις έρευνες που υπολόγισαν το κόστος ενός scrubber και την εγκατάστασή του πραγματοποιήθηκε από την Entec. Βασίστηκαν σε έναν κινητήρα 27MW και κατέληξαν στο ότι το κόστος και η εγκατάσταση scrubber είναι περίπου 168 € / kW σε υπάρχουσα πλοία και 118 € / kW σε ένα νέο πλοίο (Ritchie, Jonge, Hugi, & Cooper, 2005). Τα νούμερα αυτά αναφέρθηκαν το 2005 και θα πρέπει να διορθωθούν σύμφωνα με τον πληθωρισμό.

Με βάση τον δείκτη τιμών στη ζώνη του ευρώ, ο συντελεστής διόρθωσης για τη

μετατροπή του 2005 είναι 1,1768 (Eurostat, 2013). Με αποτέλεσμα το κόστος να γίνεται € 198 / kW και € 139 / kW για το 2009 σε ανακατασκευές και εγκατάσταση σε νέο πλοίο αντίστοιχα.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά έτος ενός scrubber αναμένεται να είναι περίπου 1% για τα μεγάλα πλοία και 3% για τα μικρότερα (Ritchie, Jonge, Hugl, & Cooper, 2005). Εκτιμάται στην ίδια έκθεση η διάρκεια ζωής ενός scrubber να είναι **15 έτη.**

Στη μελέτη Greenship αναφέρεται ένα κόστος μετατροπής scrubber σε πλοίο με κύριο κινητήρα 9480kW \$ 2,6 εκατ. με πρόσθετα \$ 2,4 εκατ. για τροποποιήσεις (Klimt-Møllenbach, Schack, Eefsen, & Kat, 2012). Οι δαπάνες αυτές βασίστηκαν σε πληροφορίες από πολλά ναυπηγεία στη Δανία, τη Γερμανία και την Κίνα. Τα αριθμητικά στοιχεία πρέπει να διορθωθούν με συντελεστή 1,025 για τον πληθωρισμό το 2012 βάσει της ζώνης του ευρώ (Eurostat, 2013).

Η Wärtsilä, ένας πολύ γνωστός κατασκευαστής μηχανών και ναυτιλιακών μηχανών, παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το κόστος ενός scrubber. Μια εγκατάσταση scrubber κοστίζει περίπου 1,6 εκατ. Ευρώ και επιπλέον € 70 ανά kW. Αυτή η τιμή δεν περιλαμβάνει τα επιπλέον 50-75% κόστη για την εγκατάσταση scrubber (van der Klip, 2013). Μια σειρά περιπτώσεων διάφορων κινητήρων που υπολογίστηκαν από την Wärtsilä παρουσιάζονται στον Πίνακα 61.

Number of engines & Power (kW)	Power (kW)	Scrubber (Million €)
1* 3.500	3.500	1,8
2* 5.000	10.000	2,3
4* 5.000	20.000	3,0
1*20.000	20.000	3,0
1*40.000	40.000	4,4

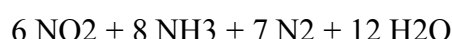
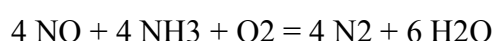
Πίνακας 7: Κόστος scrubber για συγκεκριμένης ισχύος μηχανές

Τα στοιχεία της Wärtsilä είναι τα πιο πρόσφατα και αρκετά λεπτομερή για να χρησιμοποιηθούν. Οι τιμές είναι συγκρίσιμες με την τιμή που εκτιμάται από την Entec. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα της Wärtsilä για την μελέτη περίπτωσης.

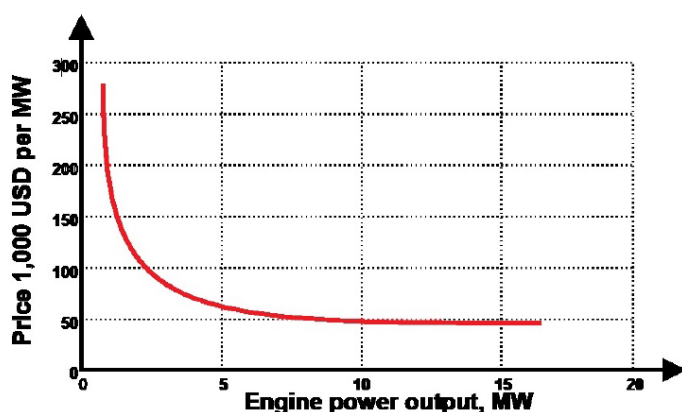
5.5 Επιλεκτική καταλυτική μείωση

Η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) είναι, όπως και το scrubber, πρόσθετος εξοπλισμός που έχει σχεδιαστεί για να μειώνει τις εκπομπές NOx με την μετεπεξεργασία στην εξάτμιση των πλοίων. Μπορεί να τοποθετηθεί ένα σύστημα SCR σε υπάρχον σύστημα εξάτμισης πλοίων και είναι ανεξάρτητο από την κατασκευή του κινητήρα. Χρησιμοποιεί καταλυτικό μετατροπέα και ουρία ή αμμωνία για τη μετατροπή του NOx σε N₂ και H₂O.

Η χημική αντίδραση είναι



Με τον εξοπλισμό SCR, μειώσεις NOx έχουν αναφερθεί μεταξύ 80 έως 99% (Wahlström, Karvosenoja & Porvari, 2006). Το σύστημα δεν επηρεάζει την καύση του κύριου κινητήρα ή την αποδοτικότητα. Ωστόσο, το λειτουργικό κόστος του συστήματος μπορεί να είναι σημαντικό. Εκτιμώμενη με τις τιμές του 1998 περίπου το 7 έως 10% του κόστους καυσίμου πρέπει να προστεθεί ως πρόσθετο κόστος (Trozzi & Vaccaro, 1998). Όπως και το scrubber, μια εγκατάσταση SCR αποτελεί σημαντική επένδυση. Ωστόσο, η τιμή ανά kW μειώνεται για μεγαλύτερους κινητήρες όπως δείχνει το Σχήμα 17.



5.6 Τα σενάρια

Η κατανάλωση ενέργειας από το scrubber εκτιμάται από την Wärtsilä ότι είναι 0,4 - 0,6% με μέγιστο αριθμό 1% στην μέγιστη ταχύτητα του πλοίου. Θα χρησιμοποιηθεί το 0,6% κατανάλωση ισχύος (Wärtsilä, 2012).

Το επενδυτικό κόστος του scrubber βασίζεται στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

προηγούμενως στις πληροφορίες που παρείχε η Wärtsilä. Η Wärtsilä υπολογίζει ένα κόστος εκκίνησης στα € 1,6 εκατ. και επιπλέον € 70 / kW. Το κόστος εγκατάστασης εκτιμάται επιπλέον 50-75%, επιλέγεται το 62,2% .

Με βάση τους προηγούμενους υπολογισμούς που υπολογίζουν τη συνολική ζήτηση ισχύος, το scrubber θα πρέπει να αντεπεξέρθει σε 72677,5kW. Ένα scrubber αυτού του μεγέθους θα κοστίσει με βάση τα δεδομένα της Wärtsilä:

$$€ 1,6M + 72677,5 * € 70 = 6,7M$$

$$€ 6,7M * 1,622 = \mathbf{10,9M}$$

Μια εκτίμηση του κόστους scrubber με βάση τα δεδομένα Entec θα ήταν :

$$72677,5 \text{ kW} * 139€/Kw = \mathbf{10,1 M}. \text{ Και οι δύο τιμές βρίσκονται στο ίδιο εύρος.}$$

Το κόστος της επένδυσης scrubber ,σύμφωνα με την ισοτιμία ευρώ δολαρίου (1,156 Ιούνιος 18) είναι **12,6 M \$**

Η μέση ημερήσια κατανάλωση καυσίμου του κύριου κινητήρα και των βοηθητικών κινητήρων όταν χρησιμοποιούν HFO ή MGO παρουσιάζετε παρακάτω.

ME consumption at sea	
HFO	236,5 t/day
MGO	219 t/day
AE consumption at sea	
HFO	49,4 t/day
MGO	45,7 t/day
AE consumption, harbour	
HFO	108,9 t/day
MGO	100,8 t/day

Πίνακας 8: Πίνακας κατανάλωσης

Το πλοίο μπορεί να λειτουργήσει και με τα δύο, MGO καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και HFO.

Στο παρουσιαζόμενο σενάριο, τα αποτελέσματα που αποδίδονται θα δοθούν για διαφορετικά ποσοστά δραστηριότητας σε ζώνη ECA και για διαφορετικό χάσμα στις τιμές των HFO και MGO. Έτσι, από τις 365 ημέρες του έτους υποθέτουμε ότι το πλοίο μας θα ταξιδέψει στη θάλασσα για 274 ημέρες(75%) και θα παραμείνει σε λιμάνι για 91ημέρες(25%).

Κάνοντας όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς μπορούμε να υποθέσουμε ότι η συνάρτηση κέρδους έχει δύο μεταβλητές, το ποσοστό του ταξιδιού και παραμονής σε μια ζώνη ECA και τη διαφορά στις τιμές των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο MGO και HFO .

Η συνάρτηση κέρδους δίνεται παρακάτω:

$$PF = x(c_{MGO} * (HFOprice + g) - c_{HFO} * HFOprice)$$

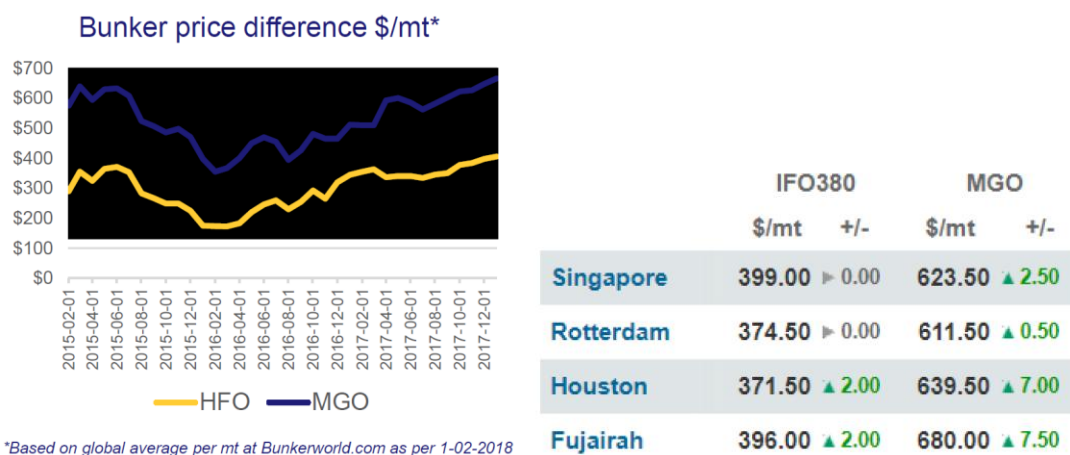
Όπου:

$$C_{HFO} = (274[d] * (236,5 + 49,4)[tn/d]) + (91[d] * 108,9[tn/d]) = \mathbf{88246,5}$$

$$C_{MGO} = (274[d] * (219 + 45,7)[tn/d]) + (91[d] * 100,8[tn/d]) = \mathbf{81700,6}$$

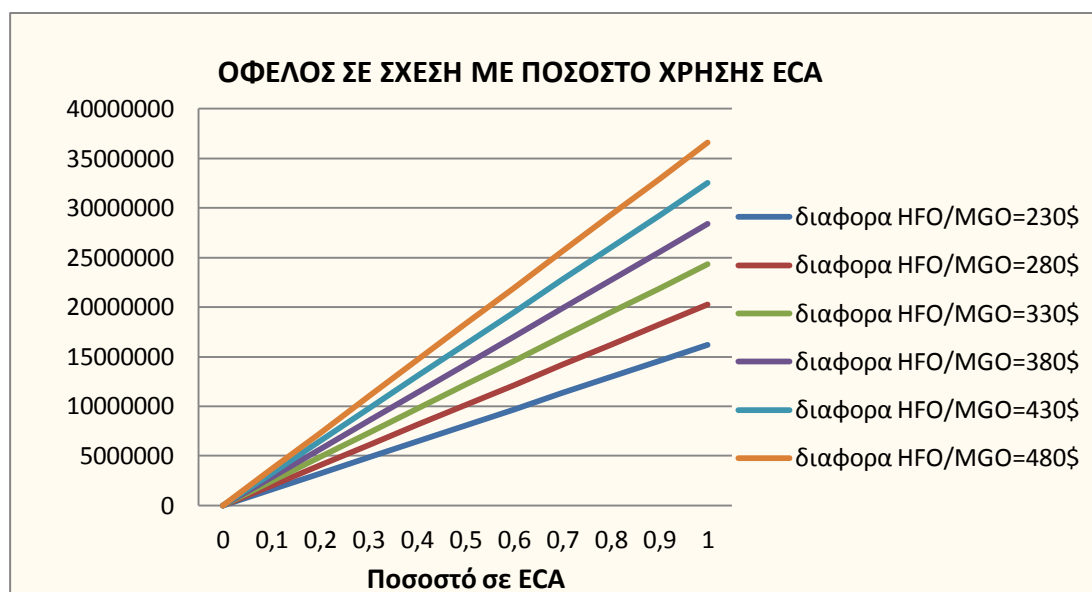
χ: Ποσοστό ταξιδιού σε Ζώνες ECA, (10%)

g: η διαφορά μεταξύ της τιμής του HFO και του MGO



Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα η διαφορά τιμών ανάμεσα στα HFO και MGO στα 4 αυτά λιμάνια κυμαίνεται από \$225,00 – 285,00/mt.

Για τους υπολογισμούς της εργασίας αυτής η τιμή που χρησιμοποιήθηκε για τα καύσιμα HFO είναι 399\$ (τιμή στο λιμάνι της Σιγκαπούρης).



Το αποτέλεσμα από το παραπάνω διάγραμμα δείχνει τη λογική σχέση ανάμεσα στη διαφορά τιμών του HFO και του MGO σε συνάρτηση με τα έσοδα.

Καθώς αυξάνεται η διαφορά τιμών μεταξύ των καυσίμων, αυξάνονται και τα έσοδα πάρα πολύ.

Η διαφορά τιμών που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη για τον υπολογισμό των παραπάνω είναι από 230 έως 480USD, με αύξηση δηλαδή 50USD ανά υπολογισμό.

Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που αυξάνουμε τη δραστηριότητα του πλοίου σε ζώνη ECA δηλαδή αυξάνονται αναλόγως και τα έσοδα.

Στην περίπτωση μας το ποσοστό της δραστηριότητας των containerships σε ECA είναι περίπου 10% -15%.

5.7 Μέθοδοι αξιολόγησης

Για να αξιολογηθεί από οικονομικής άποψης η επένδυση σε scrubber χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV), ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης και η Περίοδος Επανεξίσπραξης (Payback Period).

Για τον υπολογισμό της NPV θα εισαγάγουμε 3 τιμές για τη δραστηριότητα σε ζώνη ECA δηλαδή 10%, 20% και 30%.

Αυτό το ποσοστό σε ECA χρησιμοποιείτε για την υπόθεση ότι θα προστεθούν νέες ζώνες ECA όπως η Μεσόγειος Θάλασσα, η Θάλασσα της Ινδονησίας κ.λπ. Έτσι, η δραστηριότητα των πλοίων σε ECA τείνει να αυξάνεται μετά 2020.



Σχήμα 18: Ζώνες ECA

Η διάρκεια της επένδυσης είναι 15 χρόνια, και για να θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα θα πρέπει η NPV να είναι θετική.

Υποθέτουμε ότι το κόστος εγκατάστασης δεν έχει τη μορφή δανείου και καταβάλλεται εξ ολοκλήρου κατά το πρώτο έτος.

Έτσι, η NPV θα δοθεί από τον ακόλουθο τύπο.

$$NPV = -12600000 + \sum_{i=0}^n \frac{x(c_{MGO} * (HFOprice + g) - c_{HFO} * HFOprice)}{(1 + r)^i}$$

r: inflation rate 3% το χρόνο ακολουθώντας το επίπεδο του πληθωρισμού.

i: years (15 χρόνια επένδυση scrubber)

n: up to 15 years

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ξεκινώντας από το βασικό σενάριο της έρευνας, το πλοίο δαπανά περίπου το 10% του χρόνου του σε ζώνη ECA και η τρέχουσα διαφορά των 2 τύπων καυσίμου είναι

230\$. Ο πίνακας 9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της μελέτης.

pv	6.714.771,85 \$
NPV	19.314.771,85 \$
IRR	9,59%
pay back	8,10 γ

Πίνακας 9: Οικονομική Αξιολόγηση κατά το βασικό σενάριο

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 9, η επένδυση σε scrubber «παράγει» θετική NPV, επομένως είναι οικονομικά συμφέρουσα. Αντίστοιχα και ο IRR (9,59%) είναι μεγαλύτερος από το συντελεστή προεξόφλησης (3%), επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα της NPV. Ωστόσο, το πραγματικό πρόβλημα, φαίνεται ότι είναι η περίοδος επανείσπραξης. Τα 8,1 χρόνια που απαιτούνται για να καλυφθεί το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι πολλά, ειδικά αν ληφθεί υπ' όψιν ότι η διάρκεια της επένδυσης είναι τα 15 χρόνια. Ο χρόνος επανείσπραξης προκύπτει από το υψηλό κόστος αγοράς κι εγκατάστασης του scrubber από τη μια πλευρά και από την άλλη οι εξοικονομήσεις που προκύπτουν είναι αρκετά μικρές για να δικαιολογήσουν μια τόσο δαπανηρή επένδυση.

Στο δεύτερο σενάριο, εξετάζεται όπως και στο πρώτο το πλοίο δαπανά περίπου το 10% του χρόνου του σε ζώνη ECA αλλά η τρέχουσα διαφορά των 2 τύπων καυσίμου αυξάνεται. Υπολογίστηκε με βήμα 100\$ δηλαδή από 230\$ σε 330\$ και σε 430\$.

MGO-HFO	330\$	MGO-HFO	430\$
pv	16.468.136,44 \$	pv	26.221.501,03 €\$
NPV	29.068.136,44 \$	NPV	38.821.501,03 \$
IRR	17,63%	IRR	24,89%
pay back	5,11	pay back	4,03

Πίνακας 10: Οικονομική Αξιολόγηση για το δεύτερο σενάριο

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 10, οι επενδύσεις σε scrubber «παράγουν» θετική NPV, επομένως είναι οικονομικά συμφέρουσες. Όπως φαίνεται όσο μεγαλώνει η διαφορά τιμής των 2 καυσίμων ενώ παραμένει σταθερή η παραμονή του πλοίου σε ζώνη ECA τόσο συμφέρουσα γίνεται η επένδυση και ο χρόνος επανείσπραξης μειώνεται αρκετά 5,11 χρόνια και 4 χρόνια αντίστοιχα.

Το σενάριο αυτό είναι πολύ πιθανόν να συμβεί λόγω των αυστηρότερων κανονισμών που θα ισχύσουν από το 2020. Η ζήτηση για καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο θα είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να αυξηθεί η τιμή τους άρα και η διαφορά με τα ΗFO.

Στο τρίτο σενάριο, εξετάζεται ότι θα προστεθούν νέες ζώνες ECA όπως η Μεσόγειος Θάλασσα, η Θάλασσα της Ινδονησίας κ.λπ. Έτσι, η δραστηριότητα του πλοίου σε ECA θα αυξηθεί. Υπό το σενάριο αυτό το πλοίο περνά περίπου το 30% του χρόνου του σε ζώνες ECA. Η διαφορά των 2 καυσίμων θα μείνει σταθερή στα 230\$. Η αύξηση του χρόνου εντός ECA παράγει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, όπως δείχνει ο πίνακας 11.

pn	45.344.315,54 \$
NPV	57.944.315,54 \$
IRR	38,22%
pay back	2,24

Πίνακας 11: Οικονομική Αξιολόγηση για το τρίτο σενάριο

Και σε αυτήν την περίπτωση η επένδυση σε scrubber παράγει θετική NPV, άρα είναι οικονομικά συμφέρουσα. Εντύπωση προκαλεί ο πολύ υψηλός IRR (38,22%), πολύ παραπάνω από το συντελεστή προεξόφλησης. ο πολύ μικρός χρόνος επανείσπραξης – μόλις 2,24 χρόνια κάνει την επένδυση πραγματικά ελκυστική. Τα παραπάνω προκύπτουν από τις σημαντικές εξοικονομήσεις στο κόστος καυσίμων λόγω του αυξημένου χρόνου σε ζώνη ECA.

Στο τελευταίο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση αύξησης κα των 2 παραγόντων δηλαδή αύξηση σε ζώνη ECA και αύξηση της διαφοράς τιμών των 2 καυσίμων. Η αύξηση των 2 παραγόντων δίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα συγκριτικά με τα προηγούμενα 2 σενάρια., όπως δείχνει ο πίνακας 12.

pn	103.864.503,10 \$
NPV	116.464.503,10 \$
IRR	77,41%
pay back	1,17

Πίνακας 21: Οικονομική Αξιολόγηση για το τέταρτο σενάριο

Ως εκ τούτου, παράγεται πολύ υψηλή NPV κι ένας σχεδόν εξωπραγματικός IRR 77,4%, δείχνοντας ξεκάθαρα ότι η επένδυση είναι οικονομικά βιώσιμη και πρέπει να αναληφθεί. Η άποψη αυτή ενισχύεται και από την πολύ μικρή περίοδο επανείσπραξης περίπου ένα έτος είναι αρκετά για να υπέρ-καλυφθεί το αρχικό κόστος της επένδυσης σε scrubber.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα και η ανάλυση που προηγήθηκε δείχνουν τους αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς οι οποίοι έχουν ήδη αρχίσει να διαμορφώνονται τα προηγούμενα χρόνια και έχουν να κάνουν με τη μείωση των εκπομπών SOx στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα. Η ναυτιλιακή επιχείρηση δεν έχει παρά να επιλέξει με ποιο τρόπο θα συμμορφωθεί στους κανονισμούς αυτούς και στους αυστηρότερους μελλοντικούς

Μέσα από την έρευνα αυτή αναλύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τρόπου συμμόρφωσης μέσω της περιβαλλοντικής και της οικονομικής τους αξιολόγησης. Ο καθένας από τους δυο τρόπους συμμόρφωσης έχει τα δικά του πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα. Επομένως είναι στο χέρι της κάθε ναυτιλιακής επιχείρησης να αναλύσει τις οικονομικές και λειτουργικές παραμέτρους της και να αποφασίσει ανάλογα.

Ως προς τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία αυτή, επιβεβαιώθηκε ο ρόλος-κλειδί που παίζει στην αξιολόγηση της επένδυσης σε scrubbers τόσο ο χρόνος έκθεσης σε ζώνες ECA, όσο και η διαφορά τιμών ανάμεσα σε HFO και distillates. Όσον αφορά το χρόνο έκθεσης, μέσα από τα 4 διαφορετικά σενάρια που εξεταστήκαν, δόθηκε η ευκαιρία της αξιολόγησης της επένδυσης υπό διαφορετικές συνθήκες. Τα επενδυτικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν (NPV, IRR και payback period) έδειξαν ότι η επένδυση σε scrubbers είναι συμφέρουσα από οικονομικής άποψης και στις 4 περιπτώσεις και άρα θα πρέπει να αναληφθεί. Μάλιστα, καθώς αυξανόταν ο χρόνος έκθεσης σε ECA από 10% σε 30% αντίστοιχα για κάθε σενάριο, τόσο πιο πολύ αυξανόταν η NPV και ο IRR, αλλά και μειωνόταν ο χρόνος επανείσπραξης της αρχικής επένδυσης. Η αρνητική αυτή σχέση μεταξύ του χρόνου έκθεσης και της περιόδου επανείσπραξης, αλλά και η θετική σχέση ανάμεσα στην

NPV και στο χρόνο έκθεσης, είχαν καταφανεί και από τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία και επιβεβαιώνονται και από την έρευνα αυτή.

Δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι οι μελλοντικές διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων είναι δύσκολο να προβλεφθούν ή έστω να εκτιμηθούν. Αυτό εισάγει έναν επιπλέον αστάθμητο παράγοντα που δυσκολεύει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και χάραξης στρατηγικής για τη ναυτιλιακή επιχείρηση. Αναγκαστικά θα πρέπει να βασιστεί σε κάποιες υποθέσεις σε σχέση με τις μελλοντικές τιμές των καυσίμων και το γενικότερο ρυθμιστικό πλαίσιο βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα.

Είναι πιθανόν ότι πλοία μεγαλύτερου μεγέθους, με μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και περισσότερες πλεύσιμες ώρες η οικονομοτεχνική αξιολόγηση της εγκατάστασης scrubber να είναι περισσότερο ευνοϊκή. Ωστόσο, επί του παρόντος τα πλοία μεγάλου μεγέθους πλέουν κατά το μεγαλύτερο μερίδιο του χρόνου εκτός ECAs. Πιθανότατα όμως, η εφαρμογή του ορίου 0,5% για την περιεκτικότητα θείου σε όλες τις περιοχές μετά το 2020, να προωθήσει την εγκατάσταση της τεχνολογίας και σε πλοία μεγαλύτερου μεγέθους .

Λόγω του πρόσθετου κόστους που συνεπάγεται η κατανάλωση της καυστικής σόδας, είναι πιθανό ότι οι υβριδικές τεχνολογίες θα περιορίσουν, όπου είναι δυνατόν, τη χρήση τους μόνο ως σύστημα ανοιχτού βρόχου open loop και κατά συνέπεια η ζήτηση για fresh water close loop scrubbers θα παραμείνει μάλλον περιορισμένη.

Κλείνοντας την εργασία αυτή, θεωρείται σκόπιμο κάποιες πτυχές του θέματος που δεν έχουν μελετηθεί στην πλήρη έκταση τους στην παρούσα μελέτη ή στην υπάρχουσα βιβλιογραφία να ερευνηθούν. Από περιβαλλοντικής άποψης, θα ήταν χρήσιμο να μελετηθούν οι αθροιστικές επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον τα επόμενα έτη, καθώς ο αριθμός των εγκαταστάσεων αυξάνεται ήδη αρκετά. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις συνέπειες από τη χρήση των scrubbers σε κλειστές περιοχές και οικοσυστήματα γιατί αυτά είναι περισσότερο ευάλωτα συγκριτικά με την ανοιχτή θάλασσα. Από οικονομικής άποψης, θα ήταν επίσης χρήσιμο να συγκριθούν οι δυο τρόποι συμμόρφωσης που παρουσιάστηκαν στη μελέτη αυτή, με την επιλογή του LNG. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η δημιουργία κι εξάπλωση των

απαραίτητων υποδομών (όπως σταθμών ανεφοδιασμού και δίκτυα μεταφοράς), ώστε το LNG να είναι μια πραγματικά και πρακτικά εφαρμόσιμη εναλλακτική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Fernandez Soto, J.L., Garay Seijo, R., Fraguera Formoso, J.A., Gregorio Iglesias, G., & Carral Couce, L. (2010). Alternative Sources of Energy in Shipping. THE JOURNAL OF NAVIGATION, 63, 435-448

Vogler F. & Sattler G. (2016). Compendium of Hydrogen Energy; Volume 4: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy, Woodhead Publishing, 35-66

Dalakis D, Olcher A., Balini F. & Dewitz L. J. (2016). Protecting the Arctic Environment: Challenges and Opportunities for Liquefied Natural Gas. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309264253_Protecting_the_Arctic_Environment_Challenges_and_Opportunities_for_Liquefied_Natural_Gas

Schinas O. & Butler M.. (2016). Feasibility and commercial consideration of LNG-fueled ships, Ocean Engineering, 112, 84-96

Edwards, D.T. & Rymarz, E. (1990), International Regulations for the Prevention and Control of Pollution by Debris From Ships, In R. S. Shomura and M. L. Godfrey (editors), Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris, 2-7 April 1989, Honolulu, Hawaii. U.S. Dep. Comer., NOM Tech. Memo. NMFS, NOM-TM-NMFS-SWFSC-154, pp 956 – 988.

I.P.I.E.C.A., (2007), Maritime air emissions and MARPOL Annex VI, Strategies and consequences, International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (I.P.I.E.C.A.), Ηλεκτρονικά Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.world-petroleum.org/docs/docs/socialres/marpol.pdf>

Icopal-Noxite. (n.d.). Nitrogen Oxide (NOx) Pollution. Icopal-Noxite. Retrieved from <http://www.icopal-noxite.co.uk/nox-problem/nox-pollution.aspx>

USEPA. (n.d.). Sulphur Dioxide Basics. United State Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulphur-dioxidebasics#Effects>

Motorship. (2015). Meeting the EEDI challenge. Motorship. Retrieved from <http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/eedi-andpropulsion-power>

ABS (2013), Exhaust Gas Scrubber Systems: Status and Guidance, Available at: http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2013/Scrubber_Advisory.pdf

EU (2012), Directive 2012/33/EU of the European Parliament and of the Council of 21 November 2012, Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal>

Reynolds K. (2011), Exhaust Gas Cleaning Systems Selection Guide, Prepared for Ship Operations Cooperative Program (SOCP), Available at: http://www.procal.com/docs/Exhaust_Gas_Cleaning_Systems_Guide.pdf

Allwright Gavin. (2017). Commercial Wind Propulsion Solutions: Putting the “Sail” Back into Sailing, MARINER217 Conference

Jose J.D., Carlos A., Carlos F.G., & Luis C. (2016). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. International Journal of Hydrogen Energy. 2853-2866

DeMates Lauren. (2016). What are the differences between Biofuels, Bioethanol, Biodiesel and Biogas?. The Sustainability Co-Op. Retrieved from <https://thesustainabilitycooperative.net/2013/12/26/the-difference-between56-biofuel-bioethanol-biodiesel-and-biogas/>

Kronemeijer Dirk. (2016). Bring on the Biofuels. Shipping & Marine. Retrieved from <http://www.shipping-and-marine.com/2016/05/11/bring-on-the-biofuels/>

Xu Jingjing, Testa David & Mukherjee roshanto Kinter. (2015). The Use of LNG as a Marine Fuel: The International Regulatory Framework, Ocean Deveopment & International Law, 43:3, 225-240

EIA (U.S. Energy Information Administration). (2013). Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 countries Outside of United States. 2

‘EU launches clean fuel strategy’. (2013). European Commission. Retrieved from http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-40_en.htm

WPCI. (2016). *World Ports Climate Initiative*. Retrieved from <http://www.lngbunkering.org/lng/map/node>

DNV (2014), *Sulfur Limits 2015 – Guidelines to ensure compliance*, Available at: <https://www.dnvgl.com/maritime/low-sulphur-operation.html>

CONCAWE (2009), *Impact of marine fuels quality legislation on EU refineries at the 2020 horizon*, Available at: https://www.concawe.eu/uploads/Modules/Publications/rpt_09-3-2009-01906-01-e-2.pdf

Kristensen, H.O. (2012), *Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines*, Technical University of Denmark, Project no. 2010-56, *Emissionsbeslutningsstøttesystem, Work Package 2, Report No. 05, September*.

Κουγιουμπζόγλου, Γ. (2013), *Νέοι Κανονισμοί Εκπομπών Οξειδίων του Θείου από τη Ναυτιλία: Οικονομική Σύγκριση Χρήσης Αποσταγματικών Καυσίμων και Συστημάτων Καθαρισμού των Καυσίμων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα*.

EGCSA Handbook 2012 A practical guide to exhaust gas cleaning systems for the maritime industry

Dan Rutherford, Azzara Alyson, Haifeng Wang, 2014 *Feasibility of IMO Annex VI Tier III implementation using Selective Catalytic Reduction*,

Køcks, M. et al., 2012. *Shipboard characterization of a wet scrubber system: Influence on particle number concentration, particle size distribution and chemical composition*.

Hassellöv, I.-M., Turner, D. R., Lauer, A. & Corbett, J. J., (2013), *Shipping contributes to ocean acidification*, *Geophysical Research Letters*, Volume 40, pp. 2731-2736, Available online at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50521/pdf>

Buhaug, Halvard and Jan Ketil Rød. 2006. *Local determinants of African civil wars, 1970–2001*. *Political Geography* 25(3): 315–335.

UBA, 2014. *Auswirkungen von Abgasnachbehandlungsanlagen (Scrubbern) auf die Umweltsituation in Häfen und Küstengewässern*, TEXTE 83/2014., Bremen: Umweltbundesamt (UBA).

Ma, H., Steernberg, K., Riera-Palou, X. & Tait, N., 2012. *Well-to-wake energy and greenhouse gas analysis of SOX abatement options for the marine industry*. *Transportation Research*, 17(Part D), pp. 301-308.
["ABS Record: OOCL Hong Kong"](#). Retrieved 2017-06-07.

["OOCL reaches milestone with the christening of the OOCL Hong Kong".](#) OOCL. 12 May 2017. Retrieved 16 May 2017.

Klimt-Møllenbach, C., Schack, C., Eefsen, T., & Kat, J. D. (2012). *ECA Retrofit Technology. Green Ship of theFuture*. Retrieved from <http://www.greenship.org/fpublic/greenship/dokumenter/Downloads%20-%20maga/ECA%20study/GSF%20ECA%20Technical%20report.pdf>
Wahlström, J., Karvosenoja, N., & Porvari, P. (2006). *Ship emissions and technical emission reduction potential in the Northern Baltic Sea*. Helsinki: Finnish Environment Institute.

Trozzi, C., & Vaccaro, R. (1998). *Methodologies for Estimating Future Air Pollutant Emissions from Ships*. MEET Project.