



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΥΣΗΣ ΚΑΥΑΣΕΡΙΩΝ
(SCRUBBER) ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΑΝΤΙΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΤΙΣ
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΝΤΗΖΕΛ**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΑΥΔΙΚΟΣ



**Επιβλέπων:
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα Σεπτέμβριος 2020

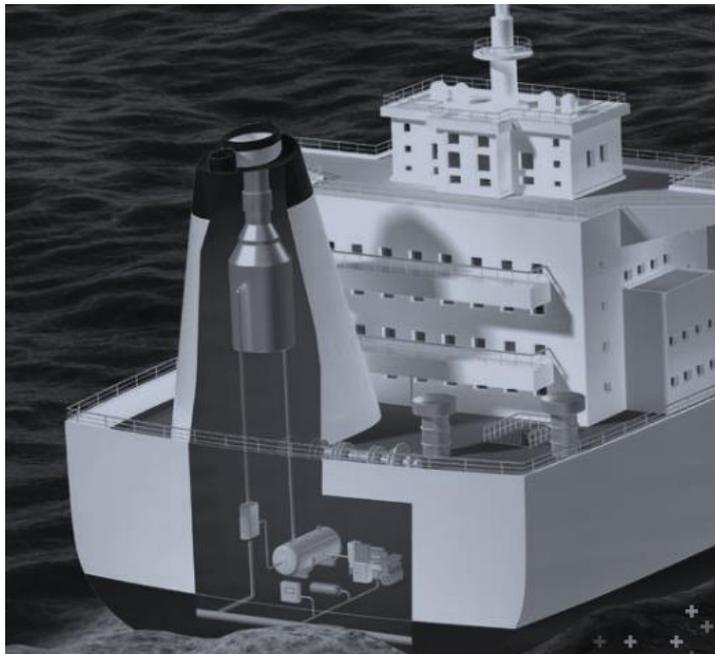


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΥΣΗΣ ΚΑΥΑΣΕΡΙΩΝ
(SCRUBBER) ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΑΝΤΙΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΤΙΣ
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΙΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΝΤΗΖΕΛ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΑΥΔΙΚΟΣ



Επιβλέπων:
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Σεπτέμβριος 2020

Υπογραφή

.....

Γεώργιος Κ. Αυδίκος

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright ©, Γεώργιος Κ. Αυδίκος 2020 - All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, για εκπαιδευτική ή ερευνητική φύση, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	6
Συντομογραφίες.....	9
Λίστα εικόνων.....	10
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	11
ABSTRACT	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ – ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	16
2.1.1 SO _x (οξειδία του θείου).....	19
2.1.2 NO _x (οξειδία του αζώτου).....	19
2.1.3 PM (μικροσωματίδια).....	19
2.2.1 Κανονισμός IMO 2020 και ζητήματα συμμόρφωσης.....	22
2.2.2 Μη συμμόρφωση στους κανονισμούς	23
2.2.3 Μέτρα μείωσης εκπομπών	24
2.3 Προκλήσεις και προοπτικές στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SCRUBBERS ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ	26
3.1 Συστήματα και τύποι scrubbers	26
3.1.1 Ανοικτού βρόχου	28
3.1.2 Κλειστού βρόχου	29
3.1.3 Υβριδικά συστήματα	30
3.2 Υποσυστήματα σε scrubbers	31
3.3 Μετρητικά συστήματα και μέθοδοι.....	33
3.3.1 Επεμβατική μέθοδος με τη χρήση κατάλληλου probe.....	33
3.3.2 Μη επεμβατική μέθοδος 1: Φασματοσκοπία υπέρυθρης ακτινοβολίας	35
3.3.3 Μη επεμβατική μέθοδος 2: Απορρόφηση μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας.....	37
3.3.3 Μη επεμβατική μέθοδος 3: Διαφορική Οπτική Απορρόφηση	38
3.4 Κυριότερα εμπορικά συστήματα scrubber	39
3.5 Χαρακτηριστικά και κριτήρια επιλογής scrubber	46
3.5.1 Βάρος.....	46
3.5.2 Κατανάλωση ισχύος	46
3.5.3 Πίεση αντίθλιψης.....	47
3.5.4 Ευστάθεια πλοίου	47
3.5.5 Διάβρωση υλικών και σωληνώσεων	47
3.5.6 Αφαίρεση σωματιδίων και αιθάλης.....	47

3.5.7 Απόρριψη νερού πλύσης στη θάλασσα	48
3.6 Τύποι και κριτήρια βέλτιστης συντήρησης.....	49
3.7 Υλικά κατασκευής scrubber και σωληνώσεων	51
3.8 Πιστοποίηση σε scrubber.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ SCRUBBER ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΑΝΤΙΘΛΙΨΗΣ – ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ.....	54
4.1 Οδηγία Κατασκευαστή -1: όρια και ενδιάμεσες θέσεις λειτουργίας	54
4.1.1 Αξιολόγηση πριν από την εγκατάσταση scrubber SO _x	55
4.1.2 Ρύθμιση κινητήρα για scrubber SO _x	57
4.2 Οδηγία Κατασκευαστή - 2: έμφαση στην επιθεώρηση	58
4.2.1 Προγραμματισμός για μετασκευή του scrubber	58
4.2.2 Επίδραση στην κύρια μηχανή.....	59
4.2.3 Επισκευή στην κύρια μηχανή ή/και τον υπερπληρωτή.....	60
4.2.4 Επίδραση της αύξησης της πίεσης αντίθλιψης στις εκπομπές NO _x	60
4.3 Οδηγία Κατασκευαστή - 3: εστίαση στο μέγιστο φορτίο.....	60
4.3.1 Πίεση αντίθλιψης λόγω συστήματος καυσαερίων.....	60
4.3.2 Επίδραση στην απόδοση του κινητήρα λόγω συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων και ρύθμιση κινητήρα	61
4.4 Οδηγία Κατασκευαστή - 4: εστίαση στον υπερπληρωτή	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΝΕΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΕ SCRUBBER	64
5.1 Κατηγορίες (νέων) καυσίμων.....	65
5.1.1 ULSFO 0,10% S.....	65
5.1.2 VLSFO 0,50% S.....	65
5.1.3 Βαρύ μαζούτ	66
5.1.4 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο.....	66
5.1.5 Αμμωνία	66
5.1.6 Βιοκαύσιμα και βιοντίζελ	66
5.2 Ιδιότητες και προβλήματα με τη χρήση νέων καυσίμων	67
5.2.1 Ιδιότητες που πρέπει να πληρούν.....	67
5.2.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία το πρώτο εξάμηνο του 2020.....	70
5.3 Επένδυση σε scrubber	72
5.3.1 Περίοδος αποπληρωμής επένδυσης σε scrubber	74
5.3.2 Οι επιλογές της ελληνικής ναυτιλιακής βιομηχανίας.....	76
5.4 Προβλήματα σε scrubbers ανοικτού βρόχου	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	89

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

BN: Base Number

CEMS: Continuous Emissions Monitoring System

DM: Distillate Grades

DOAS: Differential Optical Absorption Spectroscopy

ECA: Emission Control Areas

EGCS: Exhaust Gas Cleaning System

FGD: Flue Gas Desulfurization

GRE: Glass Reinforced Epoxy

HFO: Heavy Fuel Oil

IMO: International Maritime Organization

MCO: Maximum Continuous Output

MCR: Maximum Continuous Rating

MERC: Marine Environmental Resource Center

NDIR: Non-Dispersive Infrared Radiation

NTP: Non-Thermal Plasma

RM: Residual Grades

SCR: Selective Catalytic Reduction

SECA: Sulfur Emission Control Areas

VLSFO: Very Low Sulfur Fuel Oil

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Εκπομπές καυσαερίων από πλοίο.....	17
Εικόνα 2: Περιοχές ECA (Emission Control Areas) [B1]	20
Εικόνα 3: Όρια εκπομπών SOx εντός και εκτός ECA [B2]	21
Εικόνα 4: Όρια εκπομπών NOx σε σχέση με την ονομαστική ταχύτητα μηχανής [B3]	21
Εικόνα 5: Κατηγορίες συστημάτων scrubbers.....	27
Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική συστήματος ανοιχτού βρόχου (open loop).....	28
Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική συστήματος κλειστού βρόχου (closed loop).....	29
Εικόνα 8: Υβριδικό σύστημα σε λειτουργία ανοικτού βρόχου.....	30
Εικόνα 9: Υβριδικό σύστημα σε λειτουργία κλειστού βρόχου	31
Εικόνα 10: Υποσυστήματα σε scrubbers [B4].....	32
Εικόνα 11: Ειδικό probe για δειγματοληψία (αριστερά) και η τοποθέτηση του (δεξιά)	34
Εικόνα 12: Αρχή λειτουργίας μεθόδου NDIR [E2].....	37
Εικόνα 13: Αρχή λειτουργίας μεθόδου MidIR [E2].....	38
Εικόνα 14: Αρχή λειτουργίας μεθόδου DOAS [E2].....	39
Εικόνα 15: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 5 [Γ1]	39
Εικόνα 16: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 6 [Γ4]	40
Εικόνα 17: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 7 [Γ5]	42
Εικόνα 18: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 8 [Γ6]	43
Εικόνα 19: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 9 [Γ7]	43
Εικόνα 20: Σύστημα SOx κατασκευαστή -10 [Γ8]	44
Εικόνα 21: Σύστημα SOx κατασκευαστή -11 [Γ9]	44
Εικόνα 22: Σύστημα SOx κατασκευαστή -12 [Γ10].....	45
Εικόνα 23: Σύστημα SOx κατασκευαστή -13 [Γ11].....	45
Εικόνα 24: Πολιτικές συντήρησης [Γ2].....	51
Εικόνα 25: Σωληνώσεις από υλικό GRE [B8]	52
Εικόνα 26: Διαδικασία πιστοποίησης σε scrubber (Σχήματα A και B) [B7]	53
Εικόνα 27: Πίεση αντίθλιψης (back pressure) σε συνάρτηση με το φορτίο μηχανής για δίχρονο κινητήρα [Δ1].....	56
Εικόνα 28: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσε του φορτίου μηχανής μετά την εγκατάσταση scrubber [Δ1].....	57
Εικόνα 29: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσε του φορτίου μηχανής [Δ2].....	58
Εικόνα 30: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσε της ισχύος μηχανής [Δ3].....	61
Εικόνα 31: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσε του φορτίου [Δ4].....	63
Εικόνα 32: Επιλογή λαδιού κυλίνδρου για 2-Χ μηχανές	68
Εικόνα 33: Ιξώδες συναρτήσε της θερμοκρασίας καυσίμου [Z7]	70
Εικόνα 34: Κόστος επένδυσης σε scrubber [I3]	73
Εικόνα 35: Πρόβλεψη διαφοράς τιμής καυσίμων [Θ1]	75
Εικόνα 36: Return on investment συναρτήσε της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου [Θ2]	76

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δομή, λειτουργία και επίδραση των συστημάτων scrubbers (ή στα ελληνικά «πλυντρίδες αερίων») στα χαρακτηριστικά λειτουργίας ναυτικού κινητήρα εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) ντήζελ και πιο συγκεκριμένα στην πίεση αντίθλιψης αυτής και συνεπακόλουθα στη λειτουργική συμπεριφορά και στους αέριους ρύπους. **Σκοπός** της εργασίας είναι η καταγραφή των (εμπορικά) διαθέσιμων τεχνολογιών και συστημάτων scrubbers και η επίδραση της λειτουργίας τους στις εκπομπές (ρύπους) και την πίεση αντίθλιψης στον υπερπληρωτή ναυτικού κινητήρα.

Ο στόχος της χρήσης των συσκευών αυτών είναι κύρια η μείωση των εκπομπών καυσαερίων διοξειδίου του θείου (SO₂) με στόχο την εναρμόνιση με το νέο κανονισμό IMO 2020 ο οποίος θέτει αυστηρά όρια όσον αφορά τις εκπομπές ναυτικών μηχανών. Η χρήση αυτών εξαρτάται (και εξετάζεται) τόσο από τεχνολογική σκοπιά όσο και από την οικονομική. Η ανάλυση σε αυτή την εργασία γίνεται κλιμακακωτά, εκκινώντας με μια τεχνική ανάλυση επεκτεινόμενη προς ειδικά ζητήματα (όπως η επίδραση που έχουν τα scrubbers στην πίεση αντίθλιψης) ενώ η επιλογή για scrubber αντιπαραβάλλεται με άλλες πιθανές επιλογές όπως είναι η χρήση νέων καυσίμων, χαμηλών σε περιεκτικότητα σε θείο.

Η συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών για την απόκτηση του τίτλου του Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ. Από την θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κύριο Δημήτριο Χουντάλα για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την διπλωματική εργασία, για το ενδιαφέρον, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της μέχρι την διεκπεραίωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του διδάσκοντες (μέλη ΔΕΠ και ερευνητικό προσωπικό) της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά την υλοποίηση των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους και συνάδελφούς μου για την στήριξη και βοήθεια τους μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ABSTRACT

This dissertation examines the structure, operation and effect of scrubbers (or in Greek "gas washes" systems) on the operating characteristics of a naval internal combustion engine (ICE) diesel and more specifically on its back pressure. The **objective** of this thesis is to write down the (commercially) available technologies and scrubber systems and the operation impact they have on emissions and turbocharger of naval marine engine.

The main purpose of using these devices is to reduce sulfur dioxide (SO₂) emissions to harmonize with the new IMO 2020 regulation which sets strict limits on marine engine emissions. Their use depends (and is examined) on both technology and economics. The analysis in this work is done in stages, starting with a technical analysis extending to specific issues (such as the effect of scrubbers on back pressure) while the choice of scrubber is contrasted with other possible options such as the use of new, low sulfur content fuel.

The specific work was carried out within the framework of the undergraduate study program for obtaining the title of NTUA Mechanical Engineer. From this position, I would like to express my gratitude to the Supervising Professor of NTUA, Dr. Dimitrios Hountalas, for the trust he has shown in me by assigning me the diploma thesis, for the interest, guidance and support he has provided me throughout. until it is processed.

I would also like to thank all the teachers (faculty members and research staff) of the School of Mechanical Engineering of NTUA for the knowledge they provided me during the implementation of my studies.

Finally, I would like to thank my family, friends and colleagues for their support and assistance until the end of my studies.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μείωση των εκπομπών καυσαερίων των ναυτικών κινητήρων αποτελεί έναν παράγοντα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος ιδιαίτερα υπό την πίεση των σημερινών αναγκών και περιορισμών. Η απαίτηση αυτή κρίνεται αναγκαία και ζωτικής σημασίας δεδομένου του Κανονισμού IMO 2020 ο οποίος θέτει αυστηρούς περιορισμούς όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων από ναυτικές μηχανές, με έτος έναρξης εφαρμογής του το 2020. Μεταξύ των μέτρων που εφαρμόζουν οι ναυτιλιακές εταιρίες προκειμένου να εναρμονισθούν με τους νέους κανονισμούς είναι η χρήση νέου τύπου καυσίμου μικρότερης περιεκτικότητας σε θείο (Very Low Fuel Sulfur Oxide – VLF SO), η χρήση καυσίμου από αποστάγματα αργού πετρελαίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (το λεγόμενο «marine gas oil») ή η χρήση εναλλακτικών καυσίμων όπως υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas – LNG) ή μεθανόλη καθώς και η εγκατάσταση συστήματος καθαρισμού καυσαερίων συστημάτων (scrubbers ή στα ελληνικά «πλυντρίδες αερίων»).

Η χρήση των νέων καυσίμων ήταν δεδομένο πως θα επέφερε αύξηση του λειτουργικού κόστους των πλοίων και την ανάγκη κεφαλαίων για τις απαραίτητες αλλαγές σε αυτά, με δεδομένο πώς τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο κοστίζουν περίπου 30% περισσότερο σε σχέση με τα κλασικά καύσιμα βαρέος τύπου (αυτό μεταβάλλεται ανάλογα και με έκτακτα περιστατικά) και η εγκατάσταση scrubbers σε χιλιάδες (ελληνόκτητα και μη) πλοία απαιτεί επενδύσεις εκατομμυρίων. (Απλά αναφέρουμε σαν διαθέσιμη επιλογή, ότι σύμφωνα με στοιχεία των δύο τελευταίων ετών, αρκετές ελληνικές ναυτιλιακές εταιρίες στράφηκαν στην πρακτική του «slow steaming», δηλαδή στη μείωση της ταχύτητας των πλοίων, με στόχο τη μείωση του κόστους κατανάλωσης καυσίμου ως μια εναλλακτική λύση στην αύξηση της τιμής των καυσίμων, ώστε να μην εξαναγκαστούν να προχωρήσουν στην αύξηση των ναύλων και να χάσουν έτσι ένα από τα ανταγωνιστικά τους πλεονεκτήματα στη διεθνή αγορά. Αυτή η επιλογή δεν θα εξεταστεί σε αυτή την εργασία).

Είναι σαφές λοιπόν ότι για κάθε ναυτιλιακή εταιρία αλλά και για κάθε τύπο πλοίου, υπάρχουν διαφορετικές επιλογές (μέτρα) που θα πρέπει να ληφθούν ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης των εκπομπών με το ελάχιστο δυνατό κόστος τόσο για τα πλοία που είναι εν πλω όσο και για τα νέα υπό κατασκευή. Το πρόβλημα και η επίλυση του πρέπει λοιπόν να γίνει με κριτήρια τεχνοοικονομικά λαμβάνοντας υπόψη και τις υφιστάμενες τεχνολογικές λύσεις. Σε αυτή την εργασία εστιάζουμε κυρίως στο τελευταίο (αναφερθέν) μέτρο δηλαδή τη χρήση συστημάτων scrubbers σε πλοία που χρησιμοποιούν μηχανές με καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Ένας από τους ρύπους οι οποίοι αναφέρονται ρητά στον κανονισμό IMO 2020 είναι το διοξείδιο του θείου SO₂ και αυτός εξετάζεται κύρια σε αυτή την εργασία.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει με λεπτομέρεια και να παρουσιάσει την επίδραση των συστημάτων scrubbers στην πίεση αντίθλιψης (back pressure) ναυτικής μηχανής πλοίου ντήζελ καθώς

και στις εκπομπές της μηχανής (κύρια στο SO₂) με παράλληλη σημαντική αναφορά επίσης (αξιολόγηση με μεθόδους οικονομικής ανάλυσης) σε νέα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

Η εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι εκπομπές των βασικών καυσαερίων και το θεσμικό πλαίσιο ECA, οι αντίστοιχοι κανονισμοί IMO ενώ γίνεται αναφορά και στις προκλήσεις και προοπτικές στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία (λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της πανδημίας COVID-19 που αυτή επέφερε).

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα συστήματα scrubbers με έμφαση στην αρχιτεκτονική και λειτουργία τους (ανοιχτού, κλειστού ή υβριδικού τύπου), η μετρητική διαδικασία με τα ανάλογα συστήματα (επεμβατικά και μη επεμβατικά) ενώ γίνεται αναφορά στα κυριότερα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα scrubbers. Παρουσιάζονται επίσης χαρακτηριστικά, κριτήρια επιλογής και συντήρησης συστημάτων scrubbers, υλικά κατασκευής συστημάτων scrubbers και σωληνώσεων τους καθώς και η διαδικασία πιστοποίησης τους βάσει κανονισμών.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τεχνικές οδηγίες πολύ γνωστών κατασκευαστών οι οποίες εξετάζουν την επίδραση των scrubbers στην πίεση αντίθλιψης των μηχανών. Σε αυτές, προτείνονται έλεγχοι και λύσεις οι οποίες διαφέρουν μεταξύ των κατασκευαστών όσον αφορά το εύρος λειτουργίας καθώς και τον χρόνο πραγματοποίησης ελέγχων (retrofitting, inspection)

Το κεφάλαιο 5 εστιάζει στα (νέα) καύσιμα -με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο- που χρησιμοποιούνται ως μέτρο μείωσης των εκπομπών καυσαερίων εστιάζοντας στις (επιθυμητές) ιδιότητες αλλά και στα προβλήματα που έχουν προκύψει κατά τη χρήση τους το πρώτο εξάμηνο του 2020. Η οικονομική ανάλυση λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες τιμές (και εκτιμήσεις) και εκτιμά την περίοδο αποπληρωμής επένδυσης του πλοιοκτήτη σε scrubber. Γίνεται αναφορά στο ποιες ήταν οι επιλογές των Ελλήνων πλοιοκτητών κατά την τελευταία διετία. Επίσης, αναφέρονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στα συστήματα scrubber ανοιχτού βρόχου σε διεθνές επίπεδο κατά το πρώτο εξάμηνο του 2020.

Τέλος στο κεφάλαιο 6, το οποίο είναι και το τελευταίο της εργασίας, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε και με δύο παραρτήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ – ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην παγκόσμια ναυτιλία, όπως και στους περισσότερους μεταφορικούς κλάδους, το πρόβλημα των εκπομπών πηγάζει από την καύση βαρέων ορυκτών καυσίμων στους κινητήρες εσωτερικής καύσης των πλοίων. Συγκεκριμένα, με την ανάφλεξη του κινητήρα, ένα μείγμα αέρα και καυσίμου απελευθερώνει μηχανική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την ώθηση του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα παράγονται αέρια εκτόνωσης ως παραπροϊόν της διαδικασίας. Σε αυτά τα αέρια περιλαμβάνονται το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), με άμεση, παγκόσμια, και μακρόχρονη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ο μαύρος άνθρακας (BC) ή αιθάλη, επίσης με άμεσες αλλά πιο τοπικές και μικρότερης έντασης επιπτώσεις στην υπερθέρμανση, τα οξειδία του θείου (SO_x) και ειδικά το διοξείδιο (SO_2) που συνιστούν ιδιαίτερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το τοπικό φυσικό περιβάλλον, τα οξειδία του αζώτου (NO_x) που δρουν ως πρόδρομες ουσίες του τροποσφαιρικού όζοντος (O_3) – ενός ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου, το μεθάνιο (CH_4) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) το οποίο συμμετέχει στο σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος και μεθανίου.

Για την αντιμετώπιση των εκπομπών που προέρχονται από τη διεθνή ναυτιλία, κατά καιρούς προτείνονται και εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι και πρακτικές. Περισσότερο από τα υπόλοιπα, αυτά που σήμερα αξιοποιούνται περισσότερο είναι τα τεχνικά μέτρα, τα οποία σχετίζονται κυρίως με την τροποποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των πλοίων, όπως η εισαγωγή κινητήρων εξοικονόμησης ενέργειας, η κατασκευή αποδοτικότερων κυτών και η χρήση συσκευών περιορισμού των εκπεμπόμενων καυσαερίων, καθώς και τα διαχειριστικά μέτρα, με πιο σύνηθες τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ταξιδιών, όπως της ταχύτητας και της επιλεγόμενης διαδρομής. Δύο είναι οι κύριοι παράγοντες δημιουργίας αέριων ρύπων από ένα πλοίο: ο ναυτικός κινητήρας εσωτερικής καύσης πετρελαίου και φυσικά το είδος και η ποιότητα του καυσίμου που τροφοδοτεί τον κινητήρα. Οι εκπομπές καυσαερίων από έναν ναυτικό κινητήρα σε μεγάλο βαθμό αποτελούνται από περίσσεια διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμούς, με μικρότερες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του θείου και του αζώτου και υδρογονανθράκων και σωματιδίων που δεν έχουν καεί πλήρως

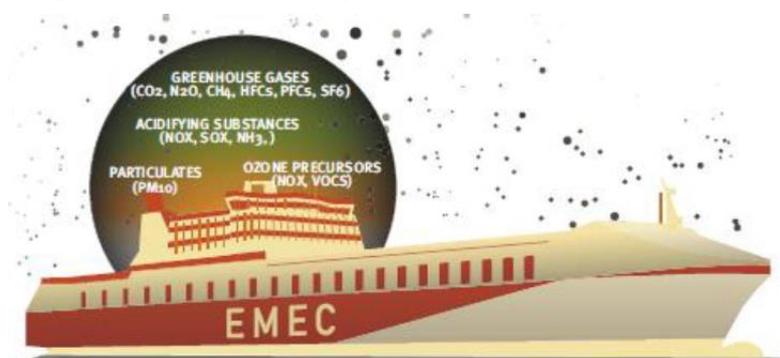
Στα επόμενα υποκεφάλαια του κεφαλαίου περιγράφονται οι εκπομπές των βασικών αερίων και το θεσμικό πλαίσιο σε περιοχές ECA, οι αντίστοιχοι κανονισμοί IMO ενώ γίνεται μια αναφορά και στις προκλήσεις και προοπτικές

στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία ειδικότερα και σε σχέση με τις επιπτώσεις της πανδημίας COVID-19.

2.1 Εκπομπές καυσαερίων

Η ανθρώπινη παρέμβαση στον φυσικό κύκλο του CO₂ τα τελευταία 150 χρόνια έχει υπάρξει καθοριστική καθώς έχει διαταράξει τις ισορροπίες στον κύκλο του CO₂ με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η προσαρμογή των φυσικών συστημάτων στα νέα δεδομένα. Εκτός όμως της αύξησης της συγκέντρωσης του CO₂ ένα πλήθος ενώσεων που αποτελούν παράγωγα της καύσης αποτελεί κίνδυνο για τον άνθρωπο και περιβάλλον. Αυξημένη πίεση ασκείται στη βιομηχανία και τις επιχειρήσεις, συμπεριλαμβανομένων και των διαφόρων τρόπων μεταφοράς, για να επιτευχθεί αειφόρος ανάπτυξη. Ένας από τους σημαντικότερους τομείς που σχετίζεται με τη μεταφορά (εμπορευμάτων, ανθρώπων) αποτελεί η ναυτιλία η οποία κατά μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποιεί ναυτικές μηχανές (δίχρονες κυρίως) οι οποίες χρησιμοποιούν ως καύσιμο το ντίζελ (ή το LNG τελευταία). Η ναυτιλία χρησιμοποιεί την χημική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων ώστε μέσω αυτής να εκτελείται σχεδόν το 90% της παγκόσμιας διακίνησης φορτίων, καθιστώντας το κυριότερο μέσον μεταφοράς προϊόντων, παράγοντας περί το 3% του συνόλου του CO₂ που εκπέμπεται από ανθρώπινη δραστηριότητα. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η εκπομπή CO₂, NO_x και SO₂ από πλοία αντιστοιχεί σε περίπου 2-3%, 10-15% και 4-9% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών, αντίστοιχα.

Οι εκπομπές καυσαερίων (Εικόνα 1) από μια ναυτική μηχανή ντίζελ -η επικρατέστερη μορφή μονάδας ισχύος του παγκόσμιου στόλου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω- σε μεγάλο βαθμό αποτελούνται από διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς, με μικρότερες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του θείου και του αζώτου και υδρογονανθράκων και σωματιδίων που δεν έχουν καεί πλήρως. Τα καυσαέρια εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από τις καμινάδες των πλοίων και αραιώνονται αλληλοεπιδρώντας με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αραιώσης στο πλούμιο του πλοίου, οι δραστικές χημικές ενώσεις μετασχηματίζονται εν μέρει και αποτίθενται στο έδαφος και στην επιφάνεια του νερού. Επιπλέον, κατά τη μεταφορά πετρελαίου και τη διακίνηση φορτίου, η εξάτμιση οδηγεί σε εκπομπές VOCs (Πτητικές Οργανικές Ενώσεις).



Εικόνα 1: Εκπομπές καυσαερίων από πλοίο

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα, πέραν των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄), παράγεται ένα μεγάλο εύρος ρυπαντικών ενώσεων από τη λειτουργία των πλοίων, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι:

- SO_x (οξειδία του θείου)
- NO_x (οξειδία του αζώτου)
- PM (αιωρούμενα σωματίδια όπως σκόνη, καπνός, τέφρα κλπ.)

Οι ρύποι οι οποίοι ελέγχονται από τη νομοθεσία είναι: το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, τα οξειδία του αζώτου (NO_x), οξειδία του θείου (SO_x), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) καθώς και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες.

Πίνακας 1: Ποσοστό εκλυόμενων ρύπων από τη παγκόσμια ναυτιλία

	Estimation (mln tonnes)	Year	Share of total emissions
CO ₂	949	2012	2.7%
	1050	2007	3.3%
	944	2007	-
	695	2006	-
	813	2001	3%
	912	2001	3%
	501	2000	2%
	419	1996	1.5%
SO _x	10	2012	-
	15	2007	-
	14	2005	10%
	12	2001	9%
	13	2001	9%
	6.8	2000	5%
NO _x	16.5	2005	-
	17	2012	-
	25	2007	-
	22	2005	27%
	24.3		-
	21.4	2001	29%
PM ₁₀	22.6	2001	31%
	12	2000	17%
	1.3	2012	-
	1.8	2007	-
	1.9		-
	1.7	2001	-
	2001	-	
	2000	-	

Από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 1) μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το ποσοστό των εκπομπών σε CO₂ διαχρονικά παραμένει σταθερό σ' ένα ποσοστό περί το 3% (επί των συνολικά εκπεμπόμενων ρυπαντών) ενώ σαφέστατα αυξητικές τάσεις παρατηρούμε στα SO_x λόγω της επιλογής φθηνότερων καυσίμων όπως είναι το βαρύ πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil), για λόγους οικονομίας.

Τα παράγωγα της καύσης από τις ναυτικές μηχανές, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, περιέχουν κατά κύριο λόγο διοξείδιο του άνθρακα CO₂ και σε μικρότερο ποσοστό οξειδία του αζώτου (NO_x), οξειδία του θείου (SO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) καθώς και άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιωρούμενα σωματίδια. Η κάθε μία από αυτές τις ουσίες σε διαφορετικό

βαθμό και με διαφορετικό τρόπο είναι επιβλαβής και επικίνδυνη για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

2.1.1 SO_x (οξειδία του θείου)

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα πλοία, κυρίως βαρύ πετρέλαιο, για λόγους οικονομίας καυσίμου περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (S). Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία περιέχουν κατά μέσον όρο 27000ppm τη στιγμή που το ανώτερο θεσπισμένο όριο για το πετρέλαιο κίνησης είναι 10ppm. Αυτές οι εκπομπές όμως επιβαρύνουν άμεσα και σαφώς περισσότερο τις παράκτιες περιοχές των λιμανιών ανά τον κόσμο. Η δημιουργία των ενώσεων SO_x προκαλεί μείωση του pH της βροχής και σε μεγάλες συγκεντρώσεις οδηγεί σε όξινη βροχή.

Σε μια μελέτη σχετικά με τις επιπτώσεις των εκπομπών SO_x στην ανθρώπινη υγεία από τα πλοία, εκτιμάται ότι με τη μη μείωση του ορίου SO_x για τα πλοία από το 2020, η ατμοσφαιρική ρύπανση από πλοία θα συνέβαλε σε περισσότερους από 570.000 επιπλέον πρόωρους θανάτους παγκοσμίως μεταξύ 2020-2025.

2.1.2 NO_x (οξειδία του αζώτου)

Όταν η καύση συντελείται σε υψηλές θερμοκρασίες, δημιουργούνται ενώσεις του αζώτου. Οι ενώσεις NO_x συνεισφέρουν στη δημιουργία φωτοχημικού νέφους και της όξινης βροχής. Το όζον, το κύριο συστατικό της αιθαλομίχλης (αστικό νέφος), είναι υπεύθυνο για μερικές από τις χειρότερες επιπτώσεις αέριας ρύπανσης. Η παρουσία του στην ανώτερη ατμόσφαιρα απορροφά την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία. Στην κατώτερη ατμόσφαιρα, εκεί όπου αναπνέουν οι άνθρωποι και αναπτύσσονται τα φυτά, το όζον έχει πολύ βλαβερές συνέπειες στην υγεία και παράλληλα προκαλεί σημαντικές βλάβες στα δάση και στις καλλιέργειες. Σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα από τη χημική αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου, παρουσία ηλιακού φωτός. Οι υψηλές θερμοκρασίες διεγείρουν την αντίδραση, γι' αυτό το καλοκαίρι τα επίπεδα του όζοντος είναι υψηλότερα. Επίσης τα οξειδία του αζώτου δημιουργούν εναποθέσεις, όπως και τα οξειδία του θείου, που μπορεί να είναι επιζήμιες για το φυσικό περιβάλλον, τα μνημεία και τα κτίρια.

2.1.3 PM (μικροσωματίδια)

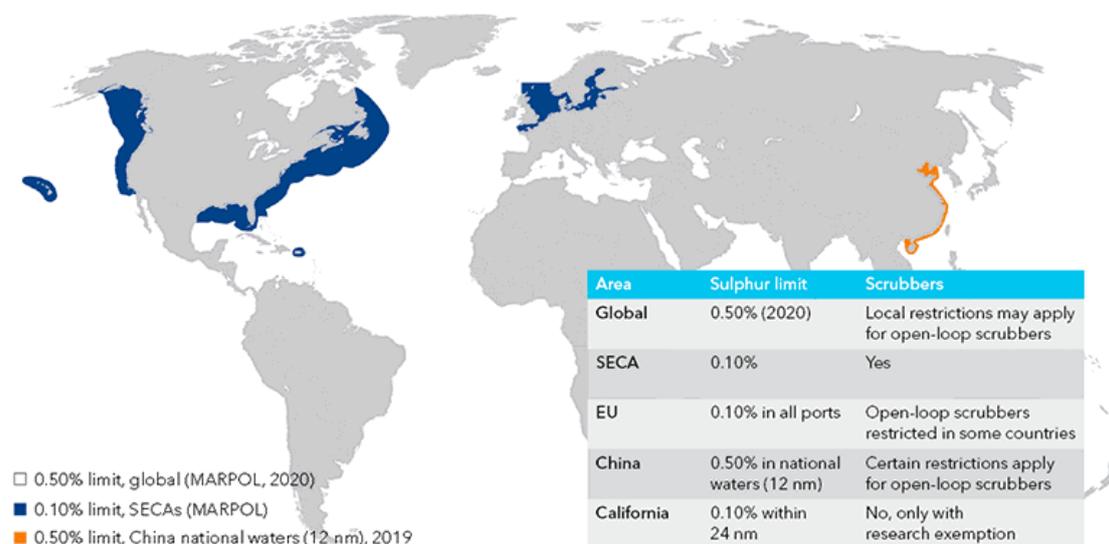
Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών και περιλαμβάνουν ατομικό άνθρακα, αιθάλη, στάχτη, πολύ μικρά σωματίδια καυσίμου που δεν κάηκε ή κάηκε ατελώς, άκαυστο λιπαντικό, θειικά και υγρασία. Η εκπομπή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα συνεπάγεται τη δημιουργία αερολυμάτων τα οποία είναι ικανά να εισέρχονται βαθιά στους πνεύμονες προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα, μεταλλάξεις και καρκίνο. Τα PM σαν μείγμα πολλών ενώσεων (οξειδία, στερεά υπολείμματα, μικροσωματίδια άνθρακα) αποτελούν συνήθη αιτία δημιουργίας νέφους και

χαμηλής ορατότητας. Ιδιαίτερα τα αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2,5μm δημιουργούν σοβαρά προβλήματα στους πνεύμονες.

2.2 Θεσμικό πλαίσιο και όρια εκπομπών σε περιοχές ECA

Η ναυτιλία είναι ένας οικονομικός τομέας που ως χωρική αναφορά έχει την παγκόσμια κλίμακα. Συνεπώς το θεσμικό πλαίσιο δεν μπορεί να περιοριστεί σε εθνικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό ο IMO (International Maritime Organization) καλείται να εισάγει και να προσαρμόζει πολιτικές με άξονα τον παγκόσμιο χαρακτήρα της ναυτιλίας. Χαρακτηριστικά, οι δεσμεύσεις που εξάγονται από τη συνθήκη του Κιότο σε περιβαλλοντικό επίπεδο δεν μπορούν να εφαρμοστούν στη ναυτιλία. Η ανεξαρτητοποίηση του θεσμικού πλαισίου πραγματοποιείται μέσα από μια σειρά κανονισμών που κύριο στόχο έχουν τον περιορισμό και τον έλεγχο των συνεπειών της ναυτιλίας στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

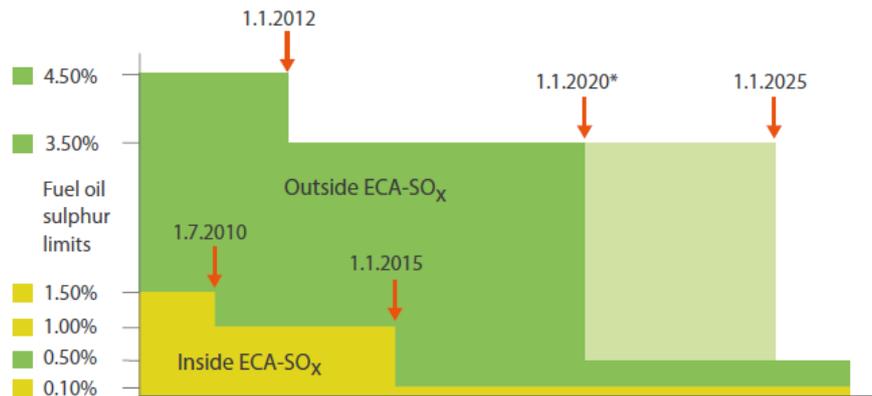
Ο έλεγχος της μόλυνσης του αέρα συζητήθηκε στο πλαίσιο της 1973 MARPOL όμως δεν καθιερώθηκε κανονισμός εξαιτίας μη ώριμων συνθηκών. Η ακαδημαϊκή κοινότητα από το 1980 ανέδειξε το θέμα της τρύπας του όζοντος και του φαινομένου του θερμοκηπίου εισάγοντας στην κοινωνία τη σημασία του ελέγχου των αερίων εκπομπών. Ακολούθως και η IMO διαμέσου της επιτροπής MEPC (Marine Environmental Protection Committee) κατέληξε στη σύνταξη του παραρτήματος VI στην MARPOL 73/78 “Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships” το 1997 με έναρξη εφαρμογής το 2005.



Εικόνα 2: Περιοχές ECA (Emission Control Areas) [B1]

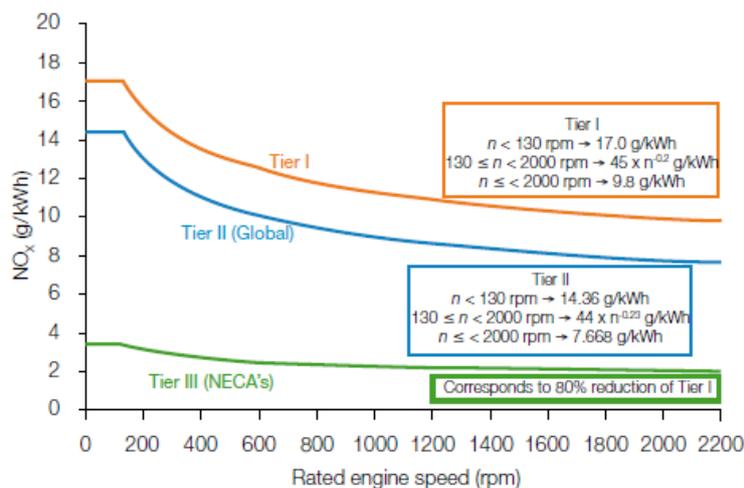
Στις περιοχές SECA (Sulfur Emission Control Areas) επιτρέπεται η χρήση καυσίμων με περιεκτικότητα σε θείο μικρότερη από 1%. Το όριο αυτό έχει

μειωθεί στο 0,5% από το 2015. Αντίστοιχοι περιορισμοί επικρατούν ήδη από το 2020 και παγκοσμίως ώστε η περιεκτικότητα σε θείο να περιοριστεί στο 0,1%. Με την εισαγωγή των SECA ουσιαστικά εισάγεται ένας έλεγχος και στην εκπομπή των PM αφού αυτά είναι σε άμεση συνάρτηση με την παρουσία των οξειδίων του θείου. Πάντως μέχρι στιγμής δεν έχουν θεσπιστεί συγκεκριμένα όρια εκπομπών στα PM αλλά ο IMO εστιάζει πρώτα και στην ακαδημαϊκή καταγραφή τους ώστε αργότερα να οριστούν συγκεκριμένα όρια. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται τα όρια εκπομπών SO_x εντός και εκτός περιοχών ECA.



Εικόνα 3: Όρια εκπομπών SO_x εντός και εκτός ECA [B2]

Οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου ρυθμίζονται βάσει των στροφών λειτουργίας των μηχανών (συνήθως μέχρι τις 2200 rpm) του πλοίου. Τα όρια εφαρμόζονται για μηχανές άνω των 130 KW. Επιπρόσθετα καθιερώνεται ένα τριβάθμιο επίπεδο ελέγχου (Tier I, II, III) το οποίο περιορίζει επιπρόσθετα τις εκπομπές NO_x ανάλογα την περίοδο κατασκευής της μηχανής, ενώ το αυστηρότερο επίπεδο (Tier III) καθιερώνει από το 2016 στις NO_x ECA ιδιαίτερα χαμηλά όρια εκπομπών (3,4gr/KWh). Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα όρια για εκπομπές NO_x συναρτήσει της ονομαστικής ταχύτητας μηχανής και για τα τρία επίπεδα ελέγχου Tier I, Tier II και Tier III.



Εικόνα 4: Όρια εκπομπών NO_x σε σχέση με την ονομαστική ταχύτητα μηχανής [B3]

Πρόσφατα, σχηματοποιήθηκε το θεσμικό πλαίσιο ελέγχου των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα του CO₂ και κατά συνέπεια εισήχθη η έννοια του ελέγχου των αερίων θερμοκηπίου όπως το μεθάνιο. Από τις εργασίες της MEPC εισήχθη το κεφάλαιο 4 στο παράρτημα VI όπου και εισάγονται δύο μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά των πλοίων με έναρξη εφαρμογής από το 2013. Το πρώτο μέγεθος είναι ο Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Επίδοσης (EEDI) για νέα πλοία όπου απαιτείται ένα ελάχιστο επίπεδο ενεργειακής επίδοσης ανά τονομίλι για διάφορα πλοία. Η αυστηροποίηση του πλαισίου θα τονώνει την τεχνολογική ανάπτυξη εφαρμογών που θα εξασφαλίζουν τα όρια. Καθότι η βέλτιστη θέσπιση κανόνων είναι άμεσης προτεραιότητας για τον IMO, έχει καθιερωθεί η χρήση του Λειτουργικού Δείκτη Ενεργειακής επίδοσης (EEOI) σε όλα τα πλοία με σκοπό την ορθή συλλογή δεδομένων ώστε μέσω του σχεδίου Διαχείρισης της Ενεργειακής Επίδοσης πλοίου (SEEMP) να διασφαλίζεται η βιωσιμότητα των μέτρων περιορισμού αερίων εκπομπών θερμοκηπίου κυρίως για το CO₂ και δευτερευόντως για το μεθάνιο.

2.2.1 Κανονισμός IMO 2020 και ζητήματα συμμόρφωσης

Από την 1^η Ιανουαρίου 2020 – με μια δίμηνη μεταβατική περίοδο- τα πλοία χρησιμοποιούν καύσιμο πετρελαίου με περιεκτικότητα σε θείο έως 0,50% σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα (3,50% m/m) στις περιοχές εκτός ελέγχου εκπομπών (ECA-SOx) ενώ στις περιοχές εντός το όριο αντίστοιχα είναι 0,10% σε ισχύ ήδη από το 2015.

Ο βασικός στόχος του νέου κανονισμού του διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (IMO) είναι ο τομέας της παγκόσμιας ναυτιλίας να καταφέρει να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου - όπως το διοξείδιο του θείου, το μεθάνιο, οι χλωρό-φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες, το διοξείδιο του άνθρακα κ.α. – τουλάχιστον κατά 50% ως το 2050.

Σύμφωνα με το Παράρτημα VI και τις Οδηγίες του 2019, οι αρχές των λιμένων θα πρέπει να λάβουν τα κατάλληλα μέτρα για να διασφαλίσουν τη συμμόρφωση. Συγκεκριμένα, οι εποπτικές αρχές των λιμένων θα πρέπει να διεξάγουν αρχικά ελέγχους βάσει εγγράφων συμπεριλαμβανομένων των Bunker Delivery Notes (BDN), και να συμπεριλάβουν τη χρήση τηλεανίχνευσης και φορητών συσκευών. Εάν υπάρχουν «σαφείς ενδείξεις» για τη διεξαγωγή μιας πιο λεπτομερούς επιθεώρησης, η εποπτική αρχή του λιμένα μπορεί να διενεργήσει αναλύσεις δειγμάτων και άλλες λεπτομερείς επιθεωρήσεις ώστε να εξετάσει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Αυτό που συνιστά ακριβώς «σαφείς ενδείξεις» δεν ορίζεται στο Παράρτημα VI ή στις Οδηγίες του 2019.

Όσον αφορά τη χρήση τηλεπισκόπησης και φορητών συσκευών, οι Οδηγίες του 2019 δείχνουν ότι οι πρώτες μπορούν να προκαλέσουν πιο ακριβείς επιθεωρήσεις και οι τδεύτερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τις αρχικές

επιθεωρήσεις, αλλά τα αποτελέσματα και των δύο θα πρέπει να θεωρούνται μόνο ενδεικτικά. Δεν πρέπει να θεωρούνται αποδεικτικά στοιχεία μη συμμόρφωσης, αν και μπορεί να θεωρηθούν σαφείς λόγοι για την επέκταση της επιθεώρησης ώστε να ελεγχθεί (η μη συμμόρφωση).

Οι κατευθυντήριες γραμμές του 2019 προβλέπουν ρητά ότι πρέπει να καταβληθούν όλες οι πιθανές προσπάθειες για να αποφευχθεί η αδικαιολόγητη καθυστέρηση ή κράτηση ενός πλοίου ως αποτέλεσμα των μέτρων που λαμβάνονται για την εφαρμογή του IMO 2020. Συγκεκριμένα, η ανάλυση των δειγμάτων καυσίμου δεν πρέπει να καθυστερεί αδικαιολόγητα τη λειτουργία, την κίνηση ή αναχώρηση πλοίου. Ωστόσο, οι καθυστερήσεις μπορεί να είναι αναπόφευκτες σε λιμάνια όπου υπάρχουν περιορισμένοι ή λιγότερο αποτελεσματικοί μηχανισμοί για τη δοκιμή του μαζούτ και ιδιαίτερα όταν τα πλοία βρίσκονται στο λιμάνι για αρκετές ώρες.

2.2.2 Μη συμμόρφωση στους κανονισμούς

Όταν η αρχή ενός λιμένα εντοπίζει σαφείς λόγους ύποπτης μη συμμόρφωσης ενός πλοίου βάσει των αρχικών επιθεωρήσεών του, τότε μπορεί να απαιτήσει την ανάλυση δειγμάτων μαζούτ. Όταν ένα δείγμα λαμβάνεται από ένα πλοίο, πρέπει να παρέχεται απόδειξη στο πλοίο και το πλοίο θα πρέπει να ενημερώνεται για το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης.

Εάν η μη συμμόρφωση με το IMO 2020 διαπιστωθεί και αποδειχθεί από την αρχή του λιμένα, αυτό μπορεί να εμποδίσει το πλοίο να πλεύσει έως ότου το πλοίο λάβει τα κατάλληλα μέτρα για την επίτευξη συμμόρφωσης, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει αποδιοχέτευση όλων των μη συμμορφούμενων καυσίμων. Ωστόσο, οι δεξαμενές του πλοίου έχουν σχεδιαστεί για να λαμβάνουν μαζούτ και όχι για να το αντλούν, γεγονός που καθιστά την αποδέσμευση (από τα καύσιμα αυτά) πολύ δύσκολη και χρονοβόρα.

Επιπλέον, η εποπτική αρχή κάθε λιμένα θα πρέπει να αναφέρει τυχόν μη συμμόρφωση προς το κράτος στο οποίο ανήκει η σημαία. Θα πρέπει επίσης να ενημερώσει το κράτος στην δικαιοδοσία του οποίου εκδόθηκε το δελτίο παράδοσης καυσίμων για μη συμμορφούμενο μαζούτ.

Κατά τον καθορισμό της ποινής που πρέπει να επιβληθεί σε μη συμμορφούμενο πλοίο, ένα συμβαλλόμενο κράτος πρέπει να λάβει υπόψη όλες τις σχετικές περιστάσεις και τα αποδεικτικά στοιχεία που παρουσιάζονται, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν τη μη λήψη μέτρων κατά του μη συμμορφούμενου πλοίου. Οι αρχές ελέγχου του κράτους (στο οποίο ανήκει η σημαία του πλοίου) και του λιμένα μπορούν να λαμβάνουν υπόψη το σχέδιο εφαρμογής του πλοίου κατά τον καθορισμό της συμμόρφωσης με την απαίτηση ορίου θείου 0,5%.

2.2.3 Μέτρα μείωσης εκπομπών

Όπως αναφέρθηκε, το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται στις εκπομπές SO_x. Μεταξύ των μέτρων που λαμβάνουν οι κατασκευαστές ναυτικών μηχανών προκειμένου να εναρμονισθούν με τους νέους κανονισμούς (με στόχο τη μείωση των εκπομπών SO_x) είναι:

- ο η χρήση νέου τύπου καυσίμου μικρότερης περιεκτικότητας σε θείο (Very Low Fuel Sulfur Oxide – VLFSO),
- ο η χρήση καυσίμου από αποστάγματα αργού πετρελαίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (το λεγόμενο «marine gas oil»),
- ο η χρήση εναλλακτικών καυσίμων όπως υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquified Natural Gas – LNG) ή μεθανόλη καθώς
- ο και η εγκατάσταση συστήματος καθαρισμού καυσαερίων συστημάτων (scrubbers ή στα ελληνικά «πλυντρίδες αερίων»).

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται αναλυτικά τα συστήματα scrubbers (που αποτελούν και το κύριο αντικείμενο της εργασίας) και ειδικά θέματα σχετικά με αυτά ενώ στο κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά (καθώς και μια απλή οικονομική ανάλυση για την περίοδο αποπληρωμής επένδυσης σε scrubbers) σχετικά με τη χρήση νέων καυσίμων με λιγότερη περιεκτικότητα σε θείο και των ιδιοτήτων τους. Πριν από αυτό όμως, στην επόμενη παράγραφο αναφερόμαστε στο ποιες είναι οι προκλήσεις και οι προοπτικές για τη ναυτιλία ιδιαίτερα δεδομένης της κατάστασης που επήλθε λόγω της πανδημίας του COVID-19.

2.3 Προκλήσεις και προοπτικές στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία

Ο τομέας της ναυτιλίας αποτελεί διαχρονικά την πηγή ζωής για την παγκόσμια οικονομία. Χωρίς την ποντοπόρο ναυτιλία, το διεθνές εμπόριο όπως και η μεταφορά πρώτων υλών και καυσίμων καθώς και οι εξαγωγές προϊόντων και αγαθών είναι καταδικασμένες να συρρικνωθούν δραματικά αφού οι αερομεταφορές (και δευτερευόντως οι σιδηροδρομικές) δεν έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν την παγκόσμια ζήτηση αλλά απλώς τις βασικές απαιτήσεις σε αγαθά πρώτης ανάγκης. Τα τελευταία 120 χρόνια οι θαλάσσιες μεταφορές υποστήριξαν την παγκοσμιοποίηση της οικονομίας και αποτέλεσαν τον βασικό παράγοντα ανάπτυξης, σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες της Παγκόσμιας Τράπεζας, του Παγκόσμιου Οργανισμού Εμπορίου και της συμβουλευτικής εταιρίας Deloitte (Φεβρουάριος 2020). Σχεδόν 50.000 εμπορικά πλοία με σημαίες από 150 διαφορετικές χώρες μεταφέρουν διεθνώς κάθε είδους περιεχόμενο, εκπροσωπώντας πάνω από ένα εκατομμύριο ναυτιλιακές εταιρίες. Πάνω από όλα όμως η ναυτιλία είναι ένας επιχειρηματικός τομέας συνυφασμένος με την πρωτοπορία και την καινοτομία σε πολλούς

τομείς, από τη διαχείριση φορτίων μέχρι την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε παραδοσιακές διαδικασίες.

Η υγειονομική κρίση της πανδημίας του κορονοϊού απέδειξε πως η παγκόσμια οικονομία είναι πλήρως εξαρτώμενη από τη ναυτιλία και οι περιορισμοί στις θαλάσσιες μεταφορές προκαλούν εθνική, περιφερειακή και διεθνή ύφεση. Ύστερα από μια μεταβατική περίοδο στην παγκόσμια ναυτιλία, η εφετινή χρονιά είναι γεμάτη προκλήσεις, κινδύνους αλλά και ευκαιρίες για την ελληνόκτητη ναυτιλία. Διεθνείς και Εθνικοί Κανονισμοί, εμπορικοί πόλεμοι, ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης, χρηματοδότηση και περιβαλλοντική προσαρμογή (λόγω νέου κανονισμού IMO) συνθέτουν ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον στο οποίο επιχειρεί καθημερινά ο πλοιοκτήτης ή ο διαχειριστής. Η ναυλαγορά βρέθηκε σε δεινή θέση την εβδομάδα μεταξύ 24^{ης} Απριλίου και 1^{ης} Μαΐου 2020 η οποία μετατράπηκε σε ευκαιρία με την αξιοποίηση των πλοίων (δεξαμενόπλοια) ως αποθήκες πετρελαίου, fuel oil, βενζίνης κτλ.

Σε όλα τα παραπάνω, αν προστεθεί και η απαίτηση συμμόρφωσης στον κανονισμό IMO 2020, είναι καίριας σημασίας η επιλογή της κατάλληλης λύσης κατά περίπτωση, μια από τις οποίες αποτελεί και το σύστημα scrubber. Τα συστήματα αυτά καθώς και ειδικά θέματα τους περιγράφονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SCRUBBERS ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

Όπως ειπώθηκε σχετικά με τα μέτρα συμμόρφωσης προς το νέο κανονισμό IMO 2020, μια επιλογή είναι η διατήρηση καυσίμου υψηλού σε περιεκτικότητα σε θείο παράλληλα με τη χρήση συσκευών πλύσης καυσαερίων τα οποία ονομάζονται scrubbers. Το scrubber είναι ένα σύστημα ελέγχου (τελικά) της μόλυνσης του περιβάλλοντος το οποίο χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει μεγάλο μέρος των σωματιδίων ή και των αερίων που προκαλούν μόλυνση του περιβάλλοντος ή ανθρώπινες ασθένειες, από τα καυσαέρια των εργοστασίων, των ναυτικών μηχανών και όχι μόνο. Η απομάκρυνση αυτή γίνεται είτε με φυσικό, είτε με χημικό τρόπο. Παραδοσιακά, ο όρος scrubber αναφέρεται στις συσκευές που χρησιμοποιούν υγρό για να καθαρίσουν ανεπιθύμητα αέρια από τα καυσαέρια των μηχανών. Τα τελευταία χρόνια ο όρος χρησιμοποιείται επίσης και για την περιγραφή συστημάτων που εμβάλλουν στερεό ή μεγάλης πυκνότητας υγρό υλικό το οποίο αντιδρά με τα αέρια αυτά και δεν επιτρέπει σε αυτά να διοχετευτούν στην ατμόσφαιρα. Τα scrubbers είναι από τα βασικά συστήματα μείωσης της εκπομπής επιβλαβών καυσαερίων, ιδιαίτερα όξινων, στο περιβάλλον. Ο κυριότερος ρόλος που επιτελούν σχετίζεται με την απομάκρυνση του διοξειδίου του θείου από τα καυσαέρια κατά πολύ μεγάλο ποσοστό. Σε αυτήν την περίπτωση τα scrubbers συχνά καλούνται και συσκευές αποθείωσης καυσαερίων (Flue Gas Desulfurization-FGD)

Στα επόμενα υποκεφάλαια του κεφαλαίου περιγράφονται και αναλύονται: τα βασικά συστήματα και οι τύποι των scrubbers (πιο συγκεκριμένα, αυτών για την απομάκρυνση του SO₂ από τα καυσαέρια), διάφορα υποσυστήματα που απαρτίζουν το συνολικό scrubber, εμπορικά scrubbers, κριτήρια επιλογής κατάλληλου συστήματος, στρατηγικές συντήρησης του, η διαδικασία πιστοποίησης τους καθώς και υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα. Επίσης, περιγράφονται τα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση SO₂ εν μέσω λειτουργίας του scrubber.

3.1 Συστήματα και τύποι scrubbers

Όπως έχει αναφερθεί, οι χειριστές (operators) μπορούν να χρησιμοποιούν συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων ως εναλλακτικό τρόπο συμμόρφωσης με τα όρια εκπομπών SO_x, εάν χρησιμοποιείται καύσιμο με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Επί του παρόντος, η αγορά της τεχνολογίας καθαρισμού καυσαερίων

στη ναυτιλία κυριαρχείται από scrubbers SO_x. Μια λιγότερο ώριμη τεχνολογία αποτελεί το μη θερμικό πλάσμα (NTP).

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι scrubber SO_x:

- υγρές πλυντρίδες (wet scrubbers) που χρησιμοποιούν νερό (θαλασσινό νερό ή γλυκό νερό) ως μέσο καθαρισμού και
- ξηρές πλυντρίδες (dry scrubbers) που χρησιμοποιούν (και) ξηρή χημική ουσία.

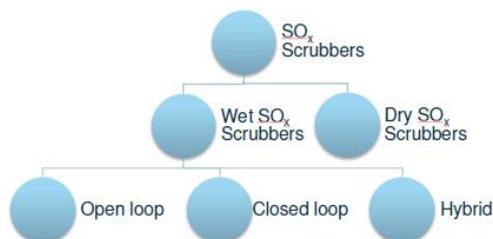
Τόσο οι υγρές όσο και οι ξηρές πλυντρίδες έχουν καθιερωθεί και ωριμάσει τεχνολογικά και έχουν χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανίες όπως η ηλεκτρική ενέργεια για πολλά χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, το wet scrubbing (υγρός καθαρισμός) αποτελεί μια απλή, στιβαρή και αποτελεσματική τεχνική με πλήθος εφαρμογών. Η πρώτη εφαρμογή έχει καταγραφεί στον σταθμό παραγωγής ενέργειας Battersea τη δεκαετία του 1930.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι υγρού καθαρισμού:

- Συστήματα «ανοιχτού βρόχου» (open loop), τα οποία χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό για την επεξεργασία των καυσαερίων
- Συστήματα «κλειστού βρόχου» (closed loop), τα οποία χρησιμοποιούν γλυκό νερό με την προσθήκη αλκαλικής χημικής ουσίας για την επεξεργασία των καυσαερίων · και
- «υβριδικά» συστήματα (hybrid), τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου και κλειστού βρόχου ανάλογα τις εκάστοτε συνθήκες.

Όλοι οι υγροί καθαριστές παράγουν «νερό πλύσης» Αυτό είναι το θαλασσινό νερό ή το γλυκό νερό που αναμιγνύεται με τα καυσαέρια στον καθαριστή (θάλαμος). Οι απαιτήσεις για την επεξεργασία, την παρακολούθηση και την απόρριψη των υδάτων πλύσης περιλαμβάνονται στον κανονισμό IMO MEPC.184.

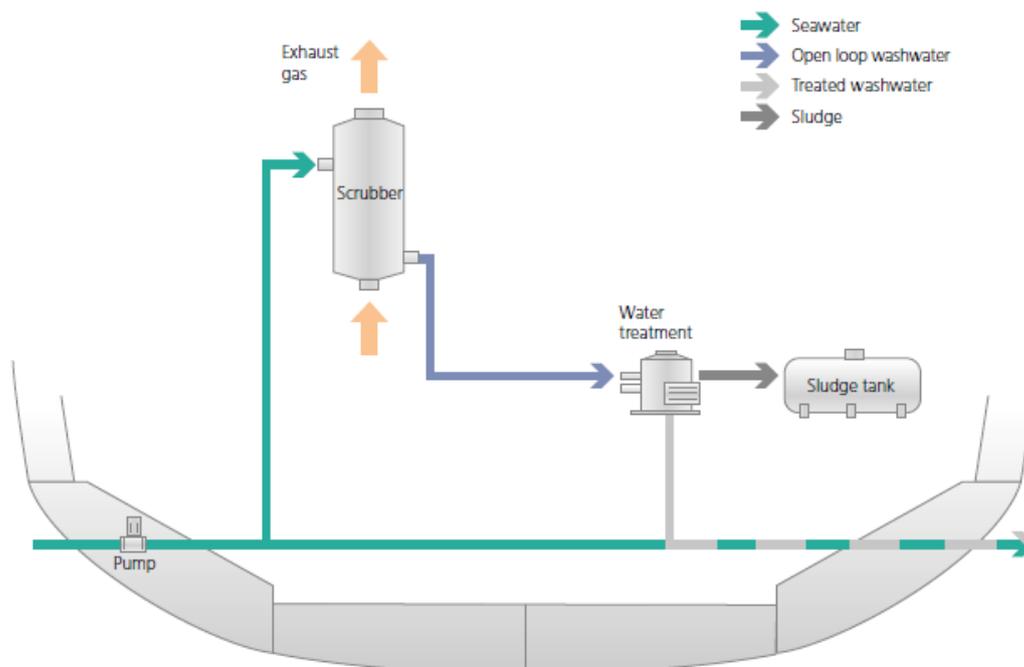
Μια τέταρτη επιλογή είναι να λειτουργεί ταυτόχρονα σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου και κλειστού βρόχου. Σχηματικά λοιπόν έχουμε την παρακάτω διάκριση:



Εικόνα 5: Κατηγορίες συστημάτων scrubbers

Στη συνέχεια περιγράφουμε τις τρεις βασικές κατηγορίες (αρχιτεκτονικές) των wet scrubbers: Ανοικτού βρόχου (Open loop), κλειστού βρόχου (closed loop) καθώς και υβριδικά (hybrid).

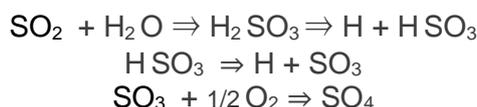
3.1.1 Ανοικτού βρόχου



Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική συστήματος ανοικτού βρόχου (open loop)

Σε συστήματα υγρού ανοικτού βρόχου SO_x (συμπεριλαμβανομένων των υβριδικών συστημάτων που λειτουργούν σε λειτουργία ανοικτού βρόχου), το θαλασσινό νερό αντλείται από τη θάλασσα μέσω του scrubber, καθαρίζεται και μετά εκφορτώνεται πίσω στη θάλασσα. Το νερό πλύσης δεν ανακυκλώνεται. Ο ρυθμός ροής του νερού πλυσίματος στα συστήματα ανοικτού βρόχου είναι περίπου 45m³/MWh.

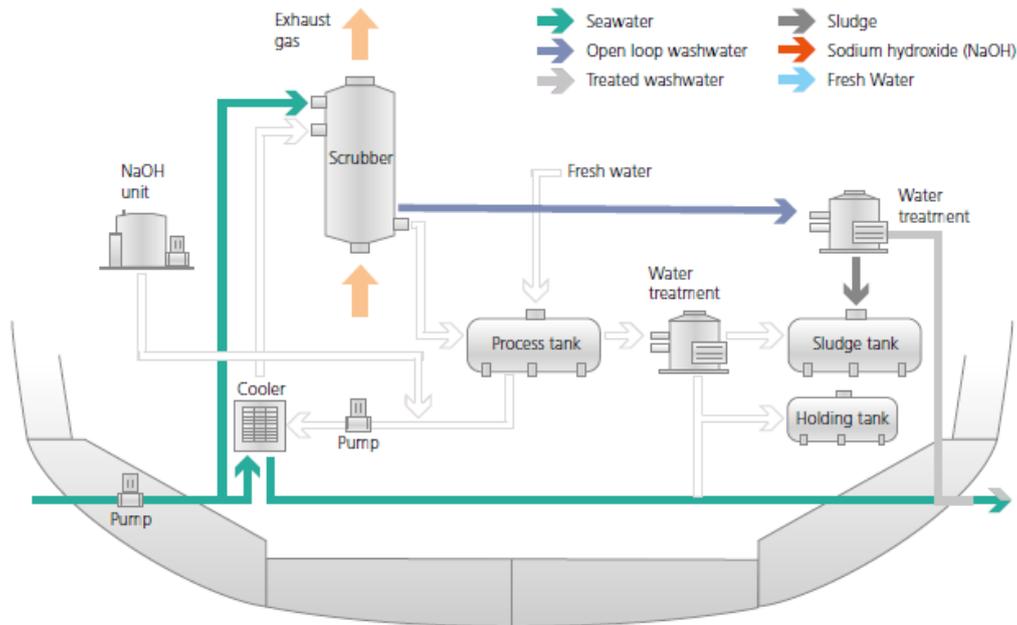
Η χημεία στα συστήματα ανοικτού βρόχου περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:



Ένας ρυθμός αφαίρεσης SO_x κοντά στο 98% με πλήρης αλκαλικότητας θαλασσινό νερό μπορεί να επιτευχθεί, δηλαδή εκτομπές από ένα καύσιμο θείου 3,50% θα είναι αντίστοιχες αυτών από καύσιμο θείου 0,10% μετά τον καθαρισμό. Στη διαδικασία σχεδιασμού η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη καθώς η διαλυτότητα του SO₂ μειώνεται σε θαλασσινό νερό υψηλότερης θερμοκρασίας. Οι κατασκευαστές τέτοιου

εξοπλισμού πρέπει να παρέχουν οδηγίες σχετικά με τη μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο καύσιμο που μπορεί να καταναλωθεί από κινητήρα ή λέβητα με μια καθαρισμένη εξάτμιση, έτσι ώστε οι εκπομπές να παραμένουν εντός επιτρεπτών ορίων, μαζί με αντίστοιχους περιορισμούς στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού που ενδέχεται να ισχύουν.

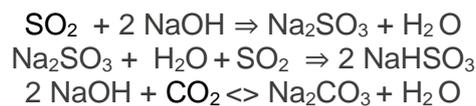
3.1.2 Κλειστού βρόχου



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική συστήματος κλειστού βρόχου (closed loop)

Όλοι οι scrubbers κλειστού βρόχου SO_x (συμπεριλαμβανομένου του υβριδικού κατά τη λειτουργία σε λειτουργία κλειστού βρόχου) χρησιμοποιούν γλυκό νερό επεξεργασμένο (αναμειγνυόμενο) με υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ως μέσο καθαρισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση του SO_x από το ρεύμα καυσαερίων ως θειικό νάτριο.

Η χημεία στα συστήματα κλειστού βρόχου περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:



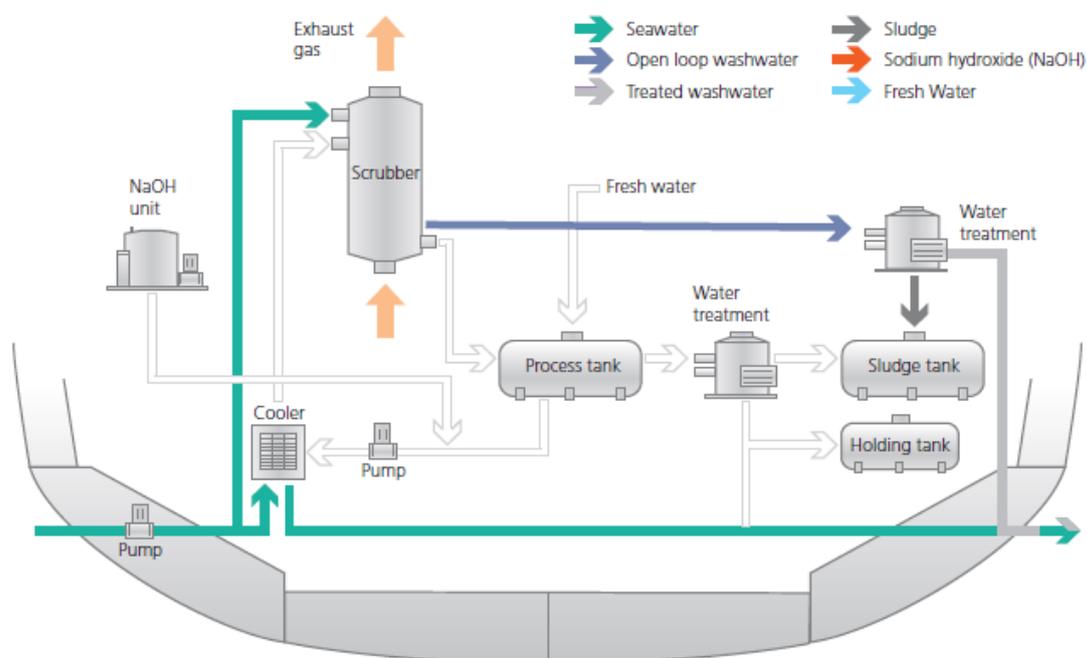
Αντί για την απλή ροή που έχουμε στον ανοιχτό βρόχο, το νερό πλύσης κυκλοφορεί σε κλειστό βρόχο από τον scrubber και περνά σε μια δεξαμενή επεξεργασίας όπου καθαρίζεται πριν ανακυκλωθεί. Ο έλεγχος του pH του υδροξείδιου του νατρίου επηρεάζει τον ρυθμό κυκλοφορίας του νερού πλύσης (και συνεπώς την ισχύ) με αποτέλεσμα η κατανάλωση να είναι περίπου η μισή

από εκείνη των συστημάτων ανοιχτού βρόχου, δηλαδή περίπου $20\text{m}^3/\text{MWh}$ και μεταξύ 0,5 - 1% της ισχύος του κινητήρα που καθαρίζεται. Τα συστήματα κλειστού βρόχου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν όταν το πλοίο λειτουργεί σε «κλειστά νερά» όπου η αλκαλικότητα θα είναι πολύ χαμηλή (άρα ακατάλληλη για λειτουργία ανοιχτού βρόχου).

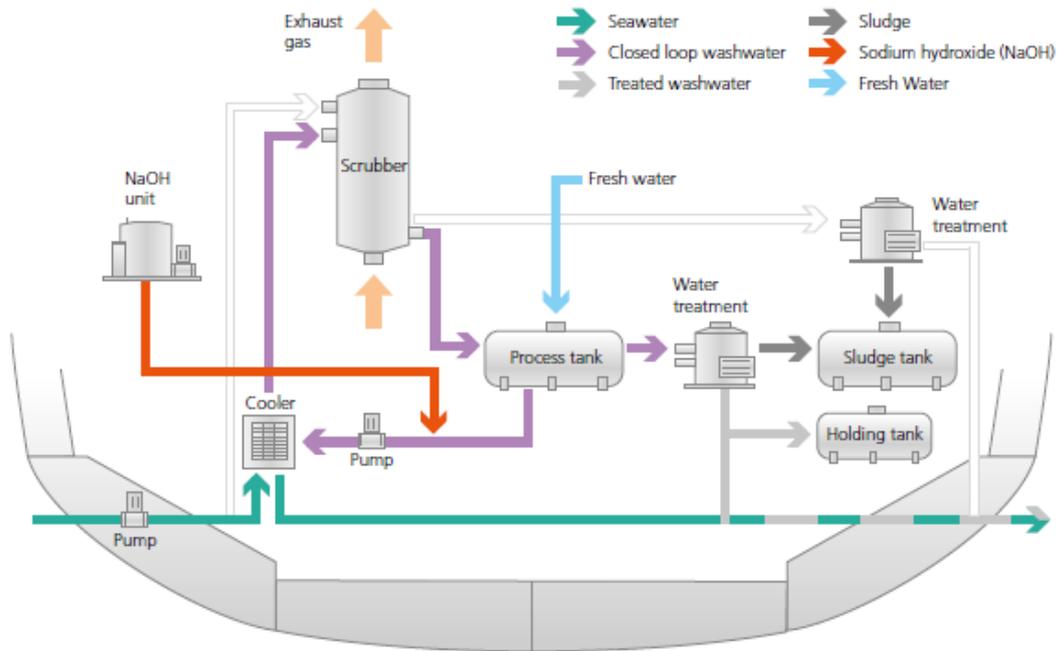
3.1.3 Υβριδικά συστήματα

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου λειτουργία ή λειτουργία κλειστού βρόχου. Αυτό παρέχει την ευελιξία σε λειτουργία κλειστού βρόχου (συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας μηδενικής εκφόρτισης) όπου η αλκαλικότητα του νερού ή ρύθμιση της απόρριψης των υδάτων πλύσης είναι ανεπαρκής, και σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου (δίχως δηλαδή την κατανάλωση υδροξειδίου του νατρίου για όλες τις υπόλοιπες ώρες).

Αυτή η διαμόρφωση προσφέρει το κύριο πλεονέκτημα ότι το υδροξείδιο του νατρίου χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητο, μειώνοντας τις ανάγκες για αποθήκευση, άρα και το σχετικό κόστος. Μειώνεται επίσης η κατανάλωση φρέσκου νερού. Οι υβριδικοί scrubbers είναι, ωστόσο, πιο περίπλοκες συσκευές σε σχέση με αυτές ανοιχτού βρόχου ή κλειστού βρόχου για μείωση των SO_x . Οι Εικόνες 9 και 10 δείχνουν τη διάταξη ενός τυπικού υβριδικού συστήματος, σε λειτουργίες ανοιχτού και κλειστού βρόχου αντίστοιχα.



Εικόνα 8: Υβριδικό σύστημα σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου



Εικόνα 9: Υβριδικό σύστημα σε λειτουργία κλειστού βρόχου

3.2 Υποσυστήματα σε scrubbers

Μελετάμε βασικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στα scrubbers για την ομαλή ροή των ρευστών. Υπάρχουν βασικά τέσσερις τύποι υποσυστημάτων: Κύριο σύστημα ροής, ολοκληρωμένο σύστημα, μονά συστήματα Venturi και πολλαπλά συστήματα Venturi. Όλες αυτές οι διαμορφώσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως ανοικτού βρόχου, κλειστού βρόχου ή υβριδικών συστημάτων, και όλες μπορούν να τοποθετηθούν τόσο σε νέα κτίρια όσο και σε μετασκευές εγκαταστάσεων.

Κύριο σύστημα ροής: Τα κύρια συστήματα ροής έχουν σχεδιαστεί για εγκατάσταση στο κύριο ρεύμα καυσαερίων ενός κινητήρα ντήζελ ή λέβητα. Η λύση είναι επωφελής για μια σειρά διαμορφώσεων, όπως για παράδειγμα μεμονωμένους κύριους κινητήρες σε πλοία όπου γεννήτριες και λέβητες χρησιμοποιούν συμβατικό καύσιμο. Επίσης, οι γεννήτριες μπορούν να εξοπλιστούν με scrubber ροής.

Ολοκληρωμένο σύστημα: Τα ολοκληρωμένα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για τον καθαρισμό των καυσαερίων πολλών μονάδων καύσης με μία μονάδα καθαρισμού. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετούς κινητήρες ή λέβητες με λάδι. Εάν χρειαστεί, είναι δυνατό να παρέχεται ανεμιστήρας καυσαερίων για την εξάλειψη τυχόν αυξημένης πίεσης καυσαερίων. Το ολοκληρωμένο σύστημα είναι κατάλληλο για όλους τους τύπους πλοίων, και ιδίως για πλοία με αρκετούς κύριους κινητήρες, πλοία με έναν κύριο κινητήρα καθώς και κινητήρες γεννήτριας βαρύ μαζούτ, και πλοία-ηλεκτρικά ντήζελ. Κινητήρες και λέβητες

μπορούν να προστεθούν στην ίδια μονάδα καθαρισμού, αλλά πρέπει να ληφθούν ορισμένες προφυλάξεις για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία. Η ενσωμάτωση του λέβητα απαιτεί επαρκή ρύθμιση και κατάλληλους ανεμιστήρες σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος αντίθλιψης.



Εικόνα 10: Υποσυστήματα σε scrubbers [B4]

Μονή είσοδος με βεντούρι: Τα συστήματα V-SOx μίας εισόδου έχουν μία είσοδο καυσαερίων από μια μεμονωμένη μονάδα καύσης και παρέχουν την πιο ευέλικτη λύση για τις περισσότερες ρυθμίσεις μηχανημάτων. Για κινητήρα με πολύ υψηλή ισχύ εξόδου (όπου η ισχύς υπερβαίνει το μέγιστο διαθέσιμο μέγεθος του scrubber), μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί scrubbers για να μοιραστούν την έξοδο καυσαερίων από τέτοια μηχανήματα.

Πολλαπλή είσοδος με βεντούρι: Για τον καθαρισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα πολλαπλών εισόδων με έως τέσσερις συνδέσεις καυσαερίων για καυσαέρια πολλαπλών μονάδων καύσης μαζούτ. Εάν απαιτείται, αυτός ο τύπος scrubber μπορεί να είναι εφοδιασμένος με έναν ανεμιστήρα για να βοηθήσει στον έλεγχο της αντίθλιψης καυσαερίων και ιδίως για τον έλεγχο της αντίθλιψης καυσαερίων οποιουδήποτε συνδεδεμένου καυστήρα λαδιού. Ο scrubber πολλαπλών εισόδων V-SOx έχει ιδιαίτερο πλεονέκτημα όταν χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των καυσαερίων από μια σειρά μονάδων καύσης παρόμοιου μεγέθους μαζούτ. Αυτά τα scrubbers μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για μετασκευές όσο και για νέα έργα.

Μονή είσοδος χωρίς βεντούρι: Η Wärtsilä ανέπτυξε το scrubber I-SOx με μικρότερο όγκο (form factor), και έτσι έδωσε την ευκαιρία σε μικρότερα σκάφη να εγκαταστήσουν ένα σύστημα καθαρισμού. Ο καθαριστής Wärtsilä I-SOx δεν διαθέτει βεντούρι (που σημαίνει ότι εξοικονομεί χώρο), αλλά επίσης αφαιρεί λιγότερα σωματίδια από την εξάτμιση αέριο. Η μονάδα καθαρισμού έχει μικρότερη διάμετρο και είναι ελαφρώς υψηλότερη από τη συμβατική μονάδα καθαρισμού V-SOx. Το μικρότερο μέγεθος επιτρέπει ευκολότερη εγκατάσταση και συχνά επιτρέπει την εγκατάσταση σε μετασκευές χωρίς προσαρμογές στην χοάνη καυσαερίων. Παρακάτω δείχνουμε την ικανότητα μείωσης SOx για καύσιμα με θείο σε περιεκτικότητα 2.5 και 3.5%.

Sulphur in fuel (%)	SOx reduced in scrubber to correspond to Sulphur in fuel (%)
2.5	0.1
3.5	0.5
3.5	0.1 with alkali injection

Το scrubber I-SOx είναι ιδανικό για μετασκευές και σκάφη όταν εντοπίζεται πρόβλημα. Το I-SOx μπορεί να λειτουργήσει ως ανοιχτός βρόχος, κλειστός βρόχος ή υβριδικό σύστημα.

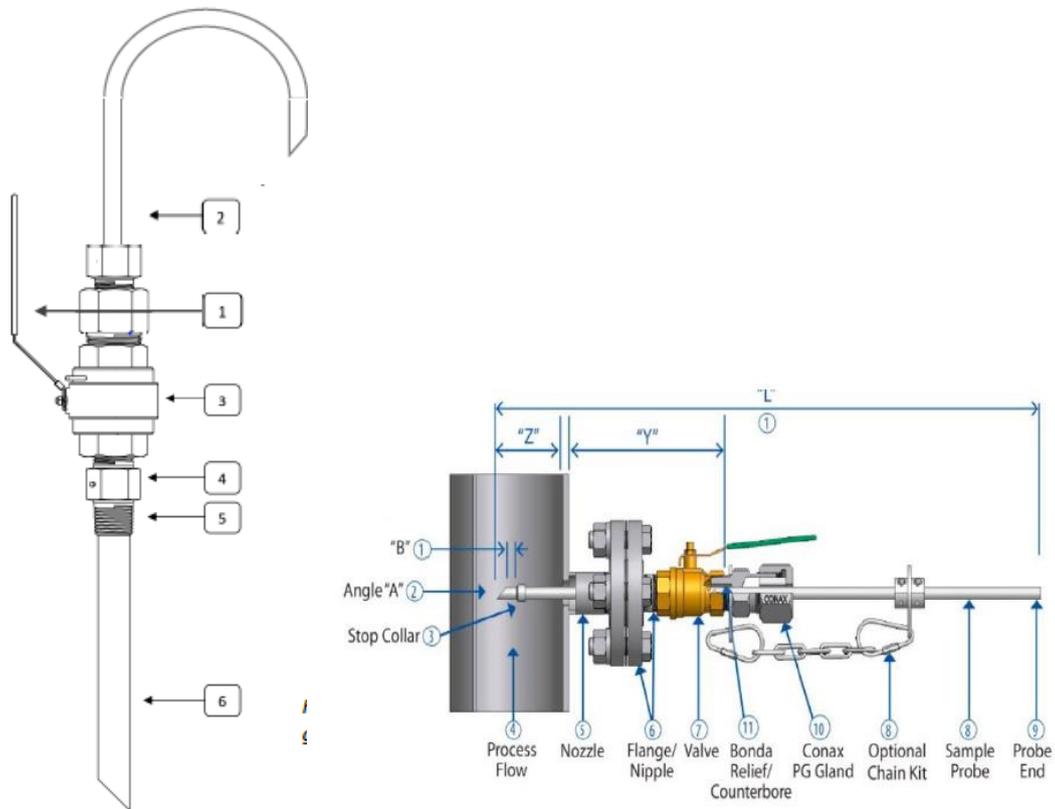
3.3 Μετρητικά συστήματα και μέθοδοι

Είναι σημαντικό να μελετήσει κανείς τις τεχνολογίες (αισθητήρων) καθώς και τα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του SOx κατά τη λειτουργία του scrubber.

Οι μέθοδοι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στις επεμβατικές και στις μη επεμβατικές. Την καθεμία τη μελετάμε ξεχωριστά, ξεκινώντας από τις επεμβατικές κατά τις οποίες γίνεται χρήση κατάλληλου probe (sampling module).

3.3.1 Επεμβατική μέθοδος με τη χρήση κατάλληλου probe

Στις επεμβατικές μεθόδους χρησιμοποιούνται ειδικά probes κάθετα στη ροή του αερίου μείγματος με στόχο την απορρόφηση αυτού και την εξαγωγή (υπολογισμό) μεγεθών όπως η συγκέντρωση σε SO₂. Παρακάτω δείχνουμε ένα τέτοιο probe καθώς και την τοποθέτησή του σε σχέση με τη ροή του αερίου μείγματος.



Εικόνα 11: Ειδικό probe για δειγματοληψία (αριστερά) και η τοποθέτηση του (δεξιά)

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνονται έξι διαφορετικές θέσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στα παρακάτω υποσυστήματα:

1. Sample handle valve
2. Sample outlet
3. Isolation ball valve
4. Installation hex
5. Main connection thread
6. Sample quill

Η τοποθέτηση και η σωστή χρήση τους περιγράφεται σε διάφορους κανονισμούς, αν και επισημαίνουμε ότι η περιγραφή τους είναι αρκετά γενική χωρίς να δίνονται ακριβείς πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά σωστής λειτουργίας τους. Παρακάτω παραθέτουμε ενδεικτικά κάποιους.

IMO Resolution MEPC.259(68), 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems,

Appendix 3, 2 ... shipowners in conjunction with the EGC manufacturer are requested to sample and analyse samples of:

- *inlet water (for background);*
- *water after the scrubber (but before any treatment system); and*
- *discharge water*

US EPA 2013 Vessel General Permit for Discharges Incidental to the Normal Operation of Vessels (VGP)

2.2.26.2.2 [Exhaust Gas Scrubber] Analytical Monitoring ...Samples must be collected for *inlet water (for background), water after the scrubber (but before any treatment system), and discharge water.*

Scrubber Water Survey conducted by the German Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH)

- inlet water (for background);
- water after the scrubber (but before any treatment system); and
- discharge water

EGCSA/Euroshore sampling programmes for the EC's European Sustainable Shipping Forum (ESSF)

- inlet water (for background);
- before any washwater treatment system; and
- *scrubber overboard but before dilution or chemical addition for adjustment of discharge pH*

Στη συνέχεια εξετάζουμε τις μη επεμβατικές τεχνικές. Σε αυτές, η τεχνολογία αισθητήρα SO_x μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες: in-situ, extractive και cross-stack. Αυτές οι τρεις κατηγορίες αισθητήρων βασίζονται σε διαφορετικές αρχές, μετρούν σε διαφορετικές περιοχές και πρέπει να τοποθετηθούν σε διαφορετικές θέσεις του οχετού εξαγωγής (exhaust stack). Αυτές οι τεχνολογίες αισθητήρων προσφέρονται από μια σειρά εταιρειών για συνεχή παρακολούθηση των εκπομπών και έχουν εγκριθεί από επίσημους φορείς πιστοποίησης όπως η ABS και η DNV - GL.

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες αισθητήρων, οι οποίες προσφέρουν διαφορετικές δυνατότητες των συστημάτων παρακολούθησης εκπομπών στα οποία είναι εγκατεστημένα. Αυτές οι τεχνολογίες αισθητήρων είναι:

- Φασματοσκοπία υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR)
- Φασματοσκοπία απορρόφησης μεσαίας υπέρυθρης ακτινοβολίας (Mid-IR)
- Φασματοσκοπία διαφορικής οπτικής απορρόφησης (DOAS)

3.3.2 Μη επεμβατική μέθοδος 1: Φασματοσκοπία υπέρυθρης ακτινοβολίας

Αυτή η τεχνολογία αισθητήρων (Non Dispersive Infrared Radiation – NDIR) είναι ευρέως γνωστή και είναι μία από τις τεχνολογίες που αναφέρονται στο MEPC 184 (59) για τη μέτρηση του SO₂. Τα τυπικά συστατικά ενός αναλυτή αερίου με βάση την τεχνολογία NDIR είναι:

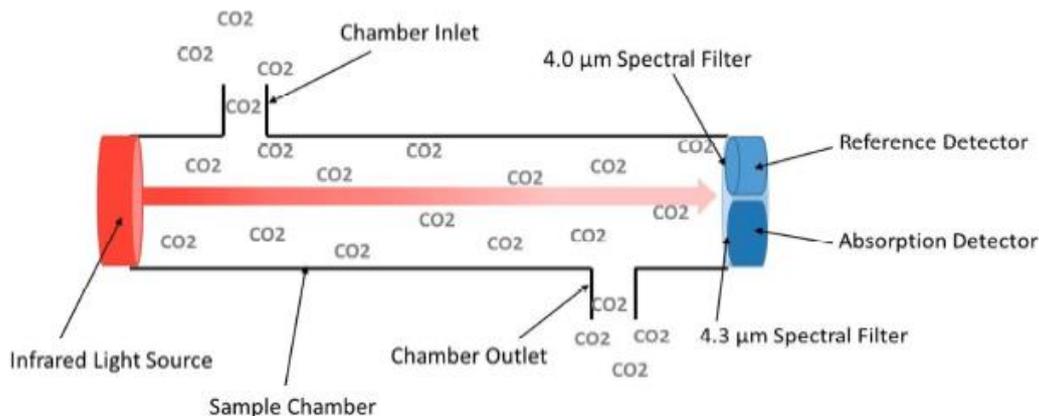
- Υπέρυθρη πηγή φωτός
- Θάλαμος δειγμάτων
- Φως φίλτρου
- Ανιχνευτής υπερύθρων

Αρχή λειτουργίας των αναλυτών αερίου NDIR: Ο θάλαμος δείγματος είναι εκεί όπου το αέριο δείγμα αναλύεται, οδηγείται και εκτίθεται στο υπέρυθρο φως. Το υπέρυθρο φως είναι ένας συγκεκριμένος τύπος (NDIR). Αυτό σημαίνει ότι η συσκευή ανάλυσης εκπέμπει μια δέσμη υπέρυθρου φωτός, η οποία δεν διασκορπίζεται ή διασκορπίζεται μεταξύ της πηγής φωτός και του ανιχνευτή. Όπως πολλά άλλα αέρια, έτσι και τα CO₂, SO₂ απορροφούν υπέρυθρο φως σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το πόσο υπέρυθρο φως απορροφάται είναι ανάλογο των συγκεντρώσεων CO₂ και SO₂ στο δείγμα αερίου. Δηλαδή μια μειωμένη ποσότητα φωτός φτάνει στον αισθητήρα υπέρυθρων στο τέλος του θαλάμου με το δείγμα. Ειδικά μετρώντας τις συγκεντρώσεις π.χ. SO₂ με ένα φίλτρο (που επιτρέπει μόνο φως με το μήκος κύματος SO₂ να απορροφά), τοποθετείται μπροστά από τον υπέρυθρο αισθητήρα φωτός.

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τις συγκεντρώσεις των SO₂ και CO₂ στο υπό ανάλυση αέριο, σαν αέριο αναφοράς συνήθως χρησιμοποιείται άζωτο. Αυτό το αέριο αναφοράς υποβάλλεται στο ίδιο υπέρυθρο φως όπως το δείγμα αερίου, ταυτόχρονα. Μετρείται η ποσότητα του φωτός που απορροφάται από το άζωτο με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή υπέρυθρου φωτός αναφοράς. Η απορροφητικότητα που μετράται στο δείγμα και το αέριο αναφοράς είναι συγκρίσιμα και από αυτό μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση SO₂ και CO₂.

Καθώς το περιβάλλον στον οχετό (stack) είναι αρκετά βεβαρημένο λόγω των ουσιών που περιέχονται στα καυσαέρια, ενδέχεται να προκύψουν ζητήματα εάν χρησιμοποιούνται ακατάλληλα υλικά στο CEMS. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα είναι επίσης απαραίτητο να γίνεται με το πρότυπο που υπαγορεύεται στο MEPC 184 (59) που αναφέρεται στον τεχνικό κώδικα NO_x (2008). Για να αποφύγουμε μια μη σωστή βαθμονόμηση και για να βεβαιωθούμε ότι οι μετρήσεις είναι σωστές, έχουν καθορισθεί πιο ακριβή βήματα:

- Εκχύλιση: Το δείγμα αερίου εξάγεται από τον οχετό σε υψηλή θερμοκρασία και είναι κορεσμένο με υδρατμούς. Για να αποφευχθεί η συσσώρευση νερού στους σωλήνες δειγματοληψίας, αυτοί θερμαίνονται παραπάνω από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου.
- Νερό: Σημαντικό για αυτήν την τεχνολογία είναι η ύπαρξη νερού στο αέριο (υγρό αέριο), η ανάλυση του οποίου μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της μέτρησης των συγκεντρώσεων CO₂. Τα περισσότερα συστήματα επιλύουν αυτό το ζήτημα με στέγνωμα του δείγματος αερίου πριν πραγματοποιηθεί η ανάλυση.



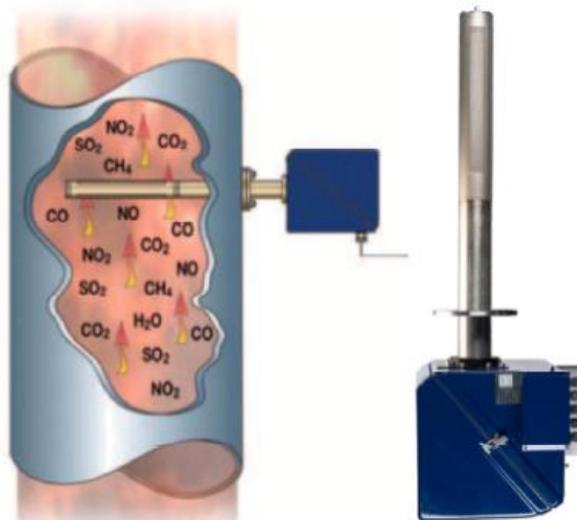
Εικόνα 12: Αρχή λειτουργίας μεθόδου NDIR [E2]

3.3.3 Μη επεμβατική μέθοδος 2: Απορρόφηση μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η τεχνολογία μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι σχετικά νέα σε σύγκριση με την τεχνολογία NDIR. Η αρχή βασίζεται στον τρόπο μέτρησης των συγκεντρώσεων των αερίων που παράγεται από υπέρυθρο φως σε πολύ συγκεκριμένο μήκος κύματος. Ανάλογα με τον κατασκευαστή, αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαφορετικών μεθόδων και συσκευών, που μπορεί να είναι είτε Nichrome Filament (NF) ή Quantum Cascade Laser (QCL).

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός από το Nichrome Filament μπορεί να ελεγχθεί μέσω της θερμοκρασίας που ένα ηλεκτρικό ρεύμα το θερμαίνει. Αυτό χρησιμοποιείται για την εκπομπή φωτός το οποίο απορροφάται από τα αέρια που μετρώνται. Συνήθως, τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα λέιζερ παράγουν διαφορετικό εκπεμπόμενο μήκος κύματος. Πιο συγκεκριμένα, στα QCL, το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται καθορίζεται από τη δομή του ημιαγωγού υλικού από το οποίο αποτελείται.

Η μέθοδος ανάλυσης των συγκεντρώσεων SO₂ και CO₂ αναφέρεται συνήθως ως αρχή υπέρυθρου διπλού μήκους κύματος (dual wavelength IR principle). Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε δύο ώθησεις (impulses) υπέρυθρου φωτός. Μια ώθηση, η οποία έχει πολύ συγκεκριμένο μήκος κύματος το οποίο βρίσκεται στο εύρος απορροφήσεων του μετρούμενου αερίου, και μια ώθηση φωτός υπέρυθρων με μήκος κύματος που βρίσκεται εκτός της περιοχής απορρόφησης. Αυτοί οι παλμοί υπέρυθρου φωτός εκπέμπονται διαδοχικά με ένα μικρό χρονικό διάστημα ανάμεσα τους. Η ώθηση εντός του εύρους απορρόφησης απορροφάται σε κάποιο βαθμό λόγω των υπέρυθρων ιδιοτήτων των αερίων που μετρώνται, αλλά και λόγω των σωματιδίων που υπάρχουν στο καυσαέριο. Ο παλμός εκτός της περιοχής απορρόφησης χάνει την ένταση μόνο λόγω παραγόντων που δεν συσχετίζονται με τις συγκεντρώσεις του αερίου που μετράται. Αυτό παρέχει επομένως ένα σημείο αναφοράς που καθιστά δυνατό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του μετρούμενου αερίου.



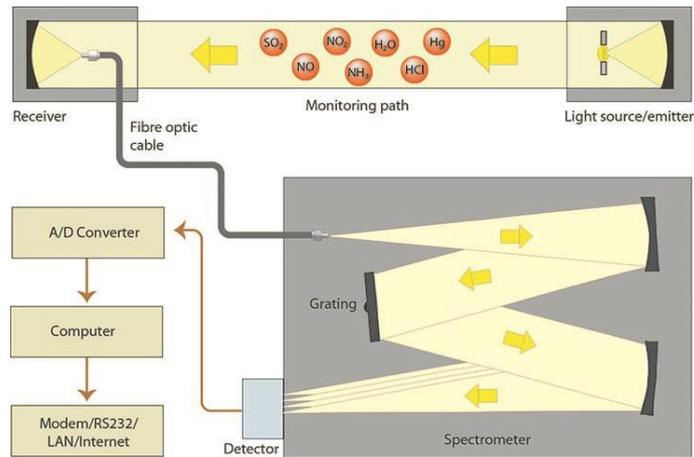
Εικόνα 13: Αρχή λειτουργίας μεθόδου MidIR [E2]

3.3.3 Μη επεμβατική μέθοδος 3: Διαφορική Οπτική Απορρόφηση

Η αρχή του DOAS εφαρμόζεται σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα στην ανάλυση της συγκέντρωσης από ίχνη αερίων στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, η αρχή μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε πολύ μικρότερη κλίμακα στους οχετούς εξαγωγής (exhaust stacks).

Όπως και με τα προαναφερθέντα συστήματα, αυτό το σύστημα μετρά επίσης την απορρόφηση του φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος. Σε αυτήν την περίπτωση, το φως, που παράγεται από μια λάμπα xenon υψηλής πίεσης, μεταδίδεται μέσα στον οχετό, με αποτέλεσμα μερικά από τα μήκη κύματος να απορροφώνται σε ποσότητα που μπορεί να σχετίζεται με τις συγκεντρώσεις SOx και CO₂ στα καυσαέρια. Το εκπεμπόμενο φως, μειούμενο κατά το απορροφούμενο φως, παραλαμβάνεται στην άλλη πλευρά του οχετού και μεταδίδεται μέσω καλωδίου οπτικών ινών στη μονάδα ανάλυσης.

Η μονάδα ανάλυσης περιέχει ένα φασματόμετρο (spectrometer) το οποίο αρχικά διαχωρίζει το φως σε μήκη κύματος μέσω ενός οπτικού στοιχείου που ονομάζεται grating (optical grating). Στη συνέχεια αναλύονται τα μήκη κύματος για να μετρηθεί το ποσό που έχει απορροφηθεί στον αγωγό. Αυτό σχετίζεται με γνωστά φάσματα αναφοράς που επιτρέπουν τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων διαφόρων αερίων στα καυσαέρια. Η αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Αρχή λειτουργίας μεθόδου DOAS [E2]

3.4 Κυριότερα εμπορικά συστήματα scrubber

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα εμπορικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία και κατασκευάζονται από γνωστούς οίκους. Στο Παράρτημα Α μπορεί κανείς να βρει την αντιστοίχιση των κατασκευαστών (όπως παρουσιάζονται παρακάτω) με τις εταιρίες.

- Κατασκευαστής - 5:



Εικόνα 15: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 5 [Γ1]

Με πάνω από 75 συστήματα σε λειτουργία σήμερα, η εταιρία αποτελεί τη ναυτιλιακή βιομηχανία με την πιο εκτεταμένη λίστα εγκαταστάσεων αναφοράς για οποιαδήποτε τεχνολογία scrubber SOx. Αυτό αντιπροσωπεύει κάθε σύστημα που έχει τεθεί σε λειτουργία από την πρώτη εγκατάσταση, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που βρίσκονται επί του πλοίου, ενώ μια άλλη σειρά από τέτοια πλοία είναι μέλη ενός στόλου υπό το όνομα DFDS. Η ναυτιλιακή εταιρεία έχει σήμερα συνολικά 16 πλοία. Δεκατρία από αυτά είναι εφοδιασμένα με scrubbers [Γ2].

Κατά την τελευταία δεκαετία, πολλές αλλαγές στην περιβαλλοντική νομοθεσία έχουν τεθεί σε ισχύ, απαιτώντας από τους πλοιοκτήτες να επενδύσουν σε εξοπλισμό επί των πλοίων τους. Ο κατασκευαστής εξασφαλίζει ευελιξία για τους πελάτες τέτοιων συστημάτων, παρέχοντας τα ανοιχτού βρόχου συστήματα σε μια υβριδικού τύπου διαμόρφωση.

Στο μέλλον, το παραπάνω σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί για να χειρίζεται καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο πάνω από 3,5%. Αυτό θα είναι χρήσιμο εάν τα καύσιμα με υψηλότερο θείο είναι εύκολα διαθέσιμα στην αγορά, για παράδειγμα ως αποτέλεσμα αλλαγής της παραγωγής των διυλιστηρίων μετά το 2020 [Γ3].

- Κατασκευαστής - 6:



Εικόνα 16: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 6 [Γ4]

Ο κατασκευαστής αυτός έχει αναπτύξει την τεχνολογία SeaSOx, η οποία αποτελεί λύση για τον καθαρισμό των καυσαερίων, προκειμένου να ανταποκριθεί στις νέες απαιτήσεις που ισχύουν από την 01.01.2020. Τα συγκεκριμένα scrubbers SOx για τη ναυτιλιακή βιομηχανία διατίθενται σε ανοικτή, κλειστή και υβριδική λειτουργία και μπορούν να εγκατασταθούν σε όλους τους τύπους πλοίων, είτε σε νέα κατασκευή είτε σε μετασκευή, χάρη στην ευελιξία τους. Σχεδιασμένα με βάση περισσότερα από 35 χρόνια εμπειρίας στη σχεδίαση scrubbers και χρησιμοποιώντας τα πιο ανεπτυγμένα μοντέλα CFD για προσομοίωση και βελτιστοποίηση της κατανομής ροής και της μεταφοράς μάζας, οι ναυτικοί scrubbers SOx προσφέρουν σημαντικά οφέλη.

- Κατασκευαστής - 7: (για μηχανές ισχύος 50 – 70 MW)

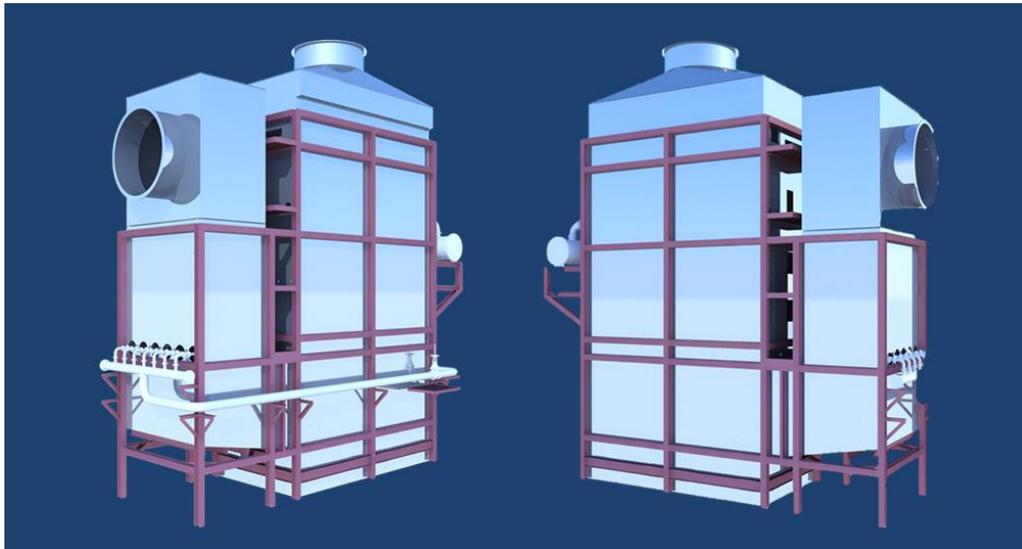
Ο κατασκευαστής κατασκευάζει και παραδίδει υβριδικά συστήματα scrubbers για μηχανές με ισχύ 50 MW, 60 MW και 70 MW τα οποία εγκαθίστανται σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Πρόκειται για λύσεις που έχουν την ευελιξία να λειτουργούν τόσο σε ανοιχτό όσο και σε κλειστό βρόχο. Όταν βρίσκεται σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου το σύστημα χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό, ενώ σε λειτουργία κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό μαζί με ένα πρόσθετο χημικό στοιχείο για την απομάκρυνση των SOx από τα καυσαέρια, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών σε παράκτιες και θαλάσσιες περιοχές. Η εταιρία παρέχει επίσης συμβουλευτικές υπηρεσίες για τα εν λόγω πλοία.





Εικόνα 17: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 7 [Γ5]

- Κατασκευαστής - 8 (για μηχανές ισχύος 13 MW – 55 MW)





Εικόνα 18: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 8 [Γ6]

Η εταιρία κατασκευάζει και προσφέρει δύο ειδών scrubbers: R-type για μηχανές υψηλής ισχύος, περίπου ως 55 MW (πιο περίπλοκη σχεδίαση), και C-type για χαμηλότερης ισχύος περίπου 13 MW. Ο R-type είναι ένας ιδιαίτερος ορθογώνιος πύργος ο οποίος προσφέρει ανώτερη απόδοση (όσον αφορά τον χώρο) και ειδικά σε εξαιρετικά μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση "μηδέν" στον αριθμό των φορτωμένων εμπορευματοκιβωτίων λόγω της εγκατάστασης ενός scrubber. Ο C-type αποτελεί απλό κυλινδρικό πύργο με ενσωματωμένη δεξαμενή κάρτερ για υβριδικό σύστημα και έναν πύργο με την έξοδο στο πλάι και μειωμένο ύψος.

- Κατασκευαστής - 9:



Εικόνα 19: Σύστημα SOx κατασκευαστή - 9 [Γ7]

Οι κανονισμοί του IMO για τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου (SOx) από πλοία έχουν σταδιακά ενισχυθεί με την πάροδο των ετών. Η εταιρία δημιούργησε για πρώτη φορά ένα συμπαγές σύνολο νέων προϊόντων (portfolio) εγκαθιστώντας συστήματα scrubbers κλειστού βρόχου σε πλοία. Αυτά τα πλοία ταξιδεύουν σε παράκτιες περιοχές όπου οι κανονισμοί τέθηκαν σε ισχύ νωρίτερα και όπου δεν επιτρέπεται η απόρριψη στη θάλασσα. Από την 1η Ιανουαρίου 2020, η εκπομπή θείου στον αέρα είναι περιορισμένη για όλα τα σκάφη παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων που λειτουργούν σε ανοιχτή θάλασσα.

Η εταιρία έχει πλέον εγκαταστήσει περισσότερα από 100 συστήματα scrubbers, ανοιχτού, κλειστού και υβριδικού βρόχου, για διάφορους τύπους σκαφών, συμπεριλαμβανομένων των φορηγών, των βυτιοφόρων και των πορθμείων.

Η εταιρία στο Αϊντχόβεν έλαβε μια σημαντική παραγγελία (Νοέμβριος 2019) για την παράδοση επτά συστημάτων καθαρισμού από μια μεγάλη εταιρεία διαχείρισης πλοίων που εδρεύει στην Ελλάδα. Με αυτήν την παραγγελία η εταιρία ενισχύει σταθερά τη θέση της στην Ελλάδα. Αυτά τα συστήματα καθαρισμού παραδόθηκαν πριν από το τέλος Μαρτίου 2020.

- Κατασκευαστής - 10:



Εικόνα 20: Σύστημα SOx κατασκευαστή -10 [Γ8]

- Κατασκευαστής - 11:



Εικόνα 21: Σύστημα SOx κατασκευαστή -11 [Γ9]

- Κατασκευαστής - 12:



Εικόνα 22: Σύστημα SOx κατασκευαστή -12 [Γ10]

- Κατασκευαστής - 13:



Εικόνα 23: Σύστημα SOx κατασκευαστή -13 [Γ11]

3.5 Χαρακτηριστικά και κριτήρια επιλογής scrubber

Η επιλογή ενός scrubber αποτελεί οικονομικό παράγοντα και τρόπο για να ικανοποιηθούν τα όρια εκπομπών SO_x. Ο χρονικός ορίζοντας της επιλογής αυτής συνήθως είναι μακροπρόθεσμος (βάθος χρόνου συνήθως πάνω από 7 έτη), και υπάρχουν διαφορές μεταξύ των προτεινόμενων επιλογών. Σίγουρα, οι προτεραιότητες καθώς και το προφίλ ιστιοπλοΐας (κάθε ναυτιλιακής εταιρίας) είναι σημαντικά στοιχεία και πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Τα scrubbers, όπως έχουμε αναφέρει σχετικά, είναι συσκευές ελέγχου εκπομπών που αφαιρούν ανεπιθύμητο SO_x και σωματίδια από καυσαέρια, αποτρέποντάς τα να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις (όπως φαίνεται και από το όνομα), οι ρύποι κυριολεκτικά «πλένονται» από τα καυσαέρια. Ενώ τα scrubbers έχουν βασικά (και ιστορικά) χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές στην ξηρά, δεν είναι καινούργια στη ναυτική βιομηχανία.

Όπως έχει αναφερθεί, δύο γενικές κατηγορίες scrubbers υπάρχουν: υγροί και ξηροί. Και οι δύο φαίνεται να πληρούν τις απαιτήσεις του παραρτήματος VI της MARPOL, αλλά οι υγροί καθαριστές (πλυντρίδες) παραμένουν η κυρίαρχη κατηγορία στη ναυτική βιομηχανία.

Τα κριτήρια επιλογής υγρής πλυντρίδας (wet scrubber) σχετίζονται κύρια τόσο με την κατασκευή (δομικά χαρακτηριστικά) όσο και με την απόδοση (λειτουργικά χαρακτηριστικά), τα οποία (πιο σημαντικά) είναι:

3.5.1 Βάρος

Η πλήρης ξηρή μονάδα καθαρισμού SO_x για έναν κινητήρα 20 MW είναι βαρύτερη (≈200 τόνοι) από την αντίστοιχη υγρή (30-55 τόνοι). Ωστόσο, το συνολικό βάρος των υγρών και ξηρών συστημάτων μπορεί να είναι παρόμοιο όταν τα συστήματα του νερού πλύσης, όπως η δεξαμενή επεξεργασίας, η δεξαμενή συγκράτησης και η αποθήκευση χημικών, ληφθούν υπόψη. Καθώς το μεγαλύτερο μέρος του βάρους του ξηρού scrubber είναι εγκατεστημένο σχετικά ψηλά στο πλοίο, η επίδραση του συστήματος στο κατακόρυφο κέντρο βάρους (VCG) του πλοίου είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερο από ό, τι για τους υγρούς scrubber SO_x, όπου πολλά από τα εξαρτήματα ενδέχεται να είναι τοποθετημένα σε χαμηλότερα ύψη.

3.5.2 Κατανάλωση ισχύος

Ο ρυθμός ροής του νερού πλυσίματος σε έναν scrubber SO_x ανοικτού βρόχου είναι υψηλότερος (≈45m³/MWh) από τον καθαριστή SO_x κλειστού βρόχου (≈20 m³/MWh) επειδή η ικανότητα αποθήκευσης (buffering capacity) του θαλασσινού νερού είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του γλυκού νερού που περιέχει υδροξείδιο του νατρίου δόση. Κατά συνέπεια, οι scrubber SO_x ανοικτού βρόχου απαιτούν μεγαλύτερες αντλίες και έχουν υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Η απαίτηση ισχύος των ξηρών συστημάτων scrubber SO_x

συνδέεται κυρίως με έναν κοχλία μεταφοράς που κινεί την ποσότητα υδροξειδίου του ασβεστίου μέσω μιας μονάδας γνωστή και ως απορροφητήρας (absorber). Η απαιτούμενη ισχύς είναι επομένως σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τους υγρούς scrubber SOx.

3.5.3 Πίεση αντίθλιψης

Ο υγρός καθαριστής προκαλεί υψηλότερη πίεση αντίθλιψης των καυσαερίων, συνήθως 2000 - 3000Pa. Η αντίστροφη ροή του νερού μπορεί να πλημμυρίσει τον κινητήρα και τον λέβητα. Τα καυσαέρια αφήνουν τον καθαριστή στους περίπου 60°C, έτσι συστήματα ανάκτησης θερμότητας και μονάδες καταλυτικής επιλεκτικής μείωσης (SCR) πρέπει να τοποθετηθούν πριν από τον scrubber για να είναι αποτελεσματικά. Μονάδες ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων ήδη λειτουργούν σε όξινα καυσαέρια και η θερμοκρασία είναι πάνω από το σημείο δρόσου κατά τη λειτουργία. Ωστόσο, εάν έχει τοποθετηθεί μονάδα SCR, τα καταλυτικά υλικά και η γεωμετρία πρέπει να είναι κατάλληλη για τέτοια καυσαέρια ή να χρησιμοποιείται SCR υψηλής πίεσης.

3.5.4 Ευστάθεια πλοίου

Οι πύργοι των scrubbers προσθέτουν σημαντικό βάρος, επηρεάζοντας την ευστάθεια του πλοίου. Απαιτούνται επιπλέον δεξαμενές, καταναλώνοντας όγκο στο κύτος και αυξάνουν το νεκρό βάρος, μειώνοντας τελικά τη συνολική απόδοση του πλοίου. Το μηχανοστάσιο ενδέχεται να πλημμυρίσει εάν κάποιος σωλήνας σπάσει ή έχει διαρροή. Οι υγροί καθαριστές μπορούν να δημιουργήσουν ένα ορατό σύννεφο (plume) από υδρατμούς στη χοάνη και προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν από σωματίδια που εκπέμπονται από τη χοάνη και εναποτίθενται πάνω σε καταστρώματα του πλοίου. Το νερό πλύσης αερίζεται αφού ψεκαστεί μέσω ακροφυσίων και αναμειγνύεται με καυσαέρια. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αφρισμό στην επιφάνεια της θάλασσας εάν το νερό πλύσης απορρίπτεται στη θάλασσα.

3.5.5 Διάβρωση υλικών και σωληνώσεων

Το νερό πλυσίματος σε υγρούς scrubbers SOx είναι πολύ διαβρωτικό και τα εξαρτήματα πλυσίματος που έρχονται σε επαφή με αυτό πρέπει να κατασκευάζονται από κατάλληλα ανθεκτικά (στη διάβρωση υλικά). Γυάλινη ενισχυμένη εποξική σωλήνωση (GRE) έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλές εγκαταστάσεις. Οι σωληνώσεις GRE είναι ελαφριές, γεγονός που καθιστά ευκολότερο τον χειρισμό κατά τη διάρκεια των μετασκευών, αλλά η μειωμένη ακαμψία του καθιστά απαραίτητη την εγκατάσταση κατάλληλου bracketing (σε σχέση με αυτό που απαιτείται για σωλήνωση από ασάλι). Οι σωληνώσεις GRE κοντά στον scrubber πρέπει επίσης να προστατεύονται από την έκθεση σε καυτά καυσαέρια.

3.5.6 Αφαίρεση σωματιδίων και αιθάλης

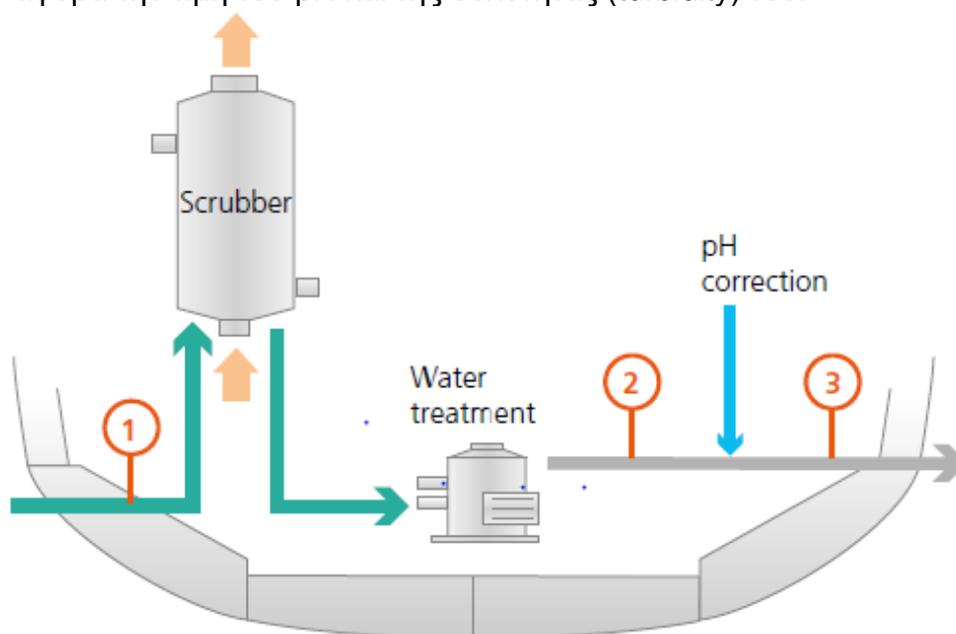
Ορισμένα συστήματα χρησιμοποιούν συσκευές αφαίρεσης σωματιδίων και αιθάλης πριν από τον πύργο καθαρισμού για απλοποίηση στην προετοιμασία του νερού πλύσης και την ελάττωση των πολυκυκλικών αρωματικών

υδρογονανθράκων (ΡΑΗ). Αυτό μπορεί να αναιρέσει την ανάγκη για ένα σύστημα επεξεργασίας νερού πλυσίματος, καθιστώντας το μια ελκυστική επιλογή. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές προσθέτουν πολυπλοκότητα και ο χειρισμός και η απόρριψη αιθάλης μπορεί να είναι προβληματικά. Η απόρριψή τους (ως επικίνδυνα βιομηχανικά απόβλητα) κοστίζει σημαντικά και απαιτούνται αυστηροί έλεγχοι για την ασφάλεια της εργασίας και για την προστασία του πληρώματος λόγω της μακροχρόνιας έκθεσης σε επιβλαβείς ουσίες. Εάν μια τέτοια συσκευή αφαίρεσης αιθάλης παρουσιάσει βλάβη, το πλοίο θα χρειαστεί ένα συμβατικό σύστημα επεξεργασίας υδάτων πλυσίματος για λειτουργία σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου. Εάν υπάρχει τέτοιο σύστημα για συμβατική επεξεργασία του νερού πλυσίματος, αυτό αναιρεί τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης μιας συσκευής απομάκρυνσης αιθάλης.

3.5.7 Απόρριψη νερού πλύσης στη θάλασσα

Μία από τις κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με τον υγρό καθαρισμό είναι ο τρόπος της εκκένωσης του νερού πλύσης. Οι υγροί καθαριστές καθαρίζουν ένα ευρύ φάσμα ρύπων από τα καυσαέρια, επιπρόσθετα του SO_x, που επηρεάζουν τη σύνθεση του νερού πλύσης. Εκτός αν υπάρχουν έλεγχοι για τη ρύθμιση της απόρριψης του νερού πλυσίματος στη θάλασσα, υπάρχει η πιθανότητα ρύπανσης από τον αέρα σε νερό, αναιρώντας τα περιβαλλοντικά οφέλη από τον καθαρισμό καυσαερίων.

Στην Εικόνα 24 φαίνονται τα σημεία στα οποία απαιτείται έλεγχος του νερού όσον αφορά την τιμή του pH και της θολότητας (turbidity) του.



Εικόνα 24: Σημεία ελέγχου νερού πλύσης

3.6 Τύποι και κριτήρια βέλτιστης συντήρησης

Όταν ένας scrubber SOx αποτελεί την επιλογή και τη στρατηγική για την αντιμετώπιση των θαλάσσιων ορίων εκπομπών ιδιαίτερα στις περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECAs), αυτό αποτελεί το κλειδί για τη συμμόρφωση (με τους κανονισμούς) και την οικονομία του πλοίου. Αν και η τεχνολογία, ο σχεδιασμός και η ποιότητα του scrubber είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του, εξίσου σημαντικά είναι η λειτουργία και συντήρηση του τα οποία με τη σειρά τους θα έχουν καθοριστικό αντίκτυπο στην απόδοση κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Έχοντας αυτό κατά νου, είναι σημαντικό να υιοθετηθεί μια σωστή πολιτική συντήρησης και να επιλεγεί ο κατάλληλος πάροχος (υπηρεσιών) που θα την εφαρμόσει. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την πιο αξιόπιστη λειτουργία και βελτιστοποιημένη απόδοση, η οποία με τη σειρά της θα εξασφαλίσει τη συμμόρφωση, διατήρηση του κόστους σε χαμηλά επίπεδα καθιστώντας τα και προβλέψιμα και διαχειρίσιμα.

Φυσικά, δεν υπάρχει μια λύση που να ταιριάζει στη συντήρηση για όλους τους scrubbers SOx. Μεταξύ των επιλογών ανάθεσης και εκτέλεσης όλης της συντήρησης (σε πάροχο υπηρεσιών), υπάρχει μια σειρά ενδιάμεσων δυνατοτήτων και επιλογών.

Ποια λύση είναι βέλτιστη για ένα δεδομένο σκάφος ή στόλο θα εξαρτηθεί από μια ποικιλία εκτιμήσεων και αποφάσεων, όπως είναι:

- Η συντήρηση που ορίζεται από τον προμηθευτή του scrubber
- Το επίπεδο ικανότητας του πληρώματος
- Το επιχειρησιακό προφίλ του πλοίου και οι διαδρομές ιστιοπλοΐας
- Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός
- Η προθυμία για ανάληψη κινδύνου

Όλα τα παραπάνω θα επηρεάσουν τον τύπο και τη συχνότητα της συντήρησης που απαιτείται, καθώς και τη σημασία παραγόντων που σχετίζονται με τον προμηθευτή, ως προς τη διαθεσιμότητα ανταλλακτικών και πρόσβαση σε απομακρυσμένη υποστήριξη. Ωστόσο, ένα από αυτά τα σημεία που συχνά παραβλέπεται, αν και είναι σημαντικό, είναι η προθυμία για ανάληψη κινδύνου.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ορισμού της συντήρησης, που μπορεί κανείς να συναντήσει (βιβλιογραφικά) υπό διαφορετικό τύπο ονομάτων και ορισμών. Ωστόσο, η συντήρηση μπορεί να χωριστεί κύρια σε τρεις τύπους:

1. Διορθωτική συντήρηση (CM)

Η διορθωτική συντήρηση, που αναφέρεται επίσης ως σφάλμα κατά την εκτέλεση, χρησιμοποιείται για την επισκευή ή αντικατάσταση εξαρτημάτων μόνο όταν αυτά πραγματικά αποτυγχάνουν. Συνήθως εφαρμόζεται σε λιγότερο κρίσιμα περιουσιακά στοιχεία, όπου υποθέτει ότι η αποτυχία είναι αποδεκτή και δεν είναι δυνατή η πρόληψη. Η διορθωτική συντήρηση είναι μια κοινή και

ενδεδειγμένη επιλογή που υιοθετείται από πολλές εταιρίες. Απαιτεί τη μικρότερη δυνατή σκέψη, προγραμματισμό και προσωπικό, και ως εκ τούτου κοστίζει λίγο ως στρατηγική. Ωστόσο, δεδομένου ότι η αποτυχία είναι απρόβλεπτη, το κόστος της στην πράξη μπορεί να είναι πολύ υψηλό, ειδικά εάν το πλοίο δεν συμμορφώνεται τελικά με τους κανονισμούς.

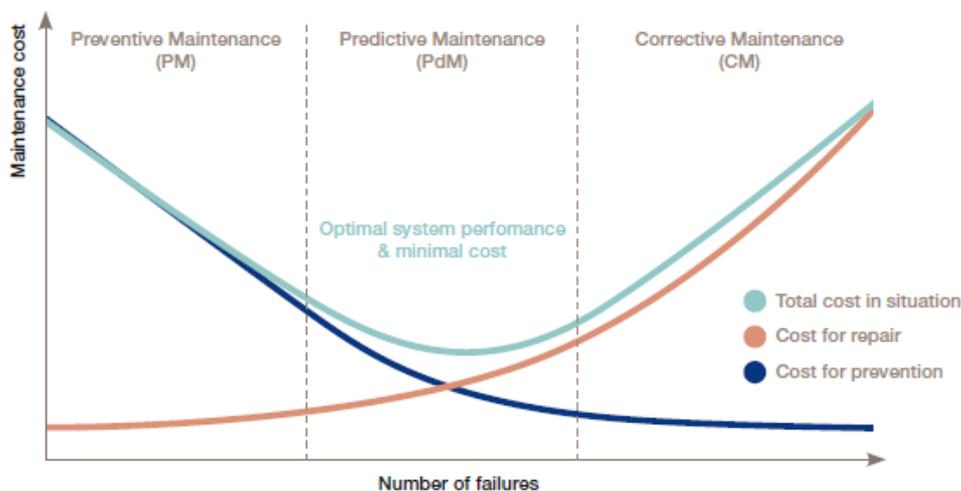
2. Προληπτική συντήρηση (Preventive Maintenance)

Αυτή αναφέρεται επίσης ως προγραμματισμένη ή χρονική συντήρηση και επικεντρώνεται στην αντικατάσταση εξαρτημάτων σε καθορισμένο χρόνο, διάστημα ή χρήση, ανεξάρτητα από την κατάστασή τους. Ο εξοπλισμός ελέγχεται ακόμη και αν δεν έχει παρουσιάσει δυσλειτουργίες ή δεν έχει προκαλέσει προβλήματα. Με ένα πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης σε ισχύ, μειώνεται ο κίνδυνος για απροσδόκητο χρόνο διακοπής. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα μέρη αντικαθίστανται με βάση ένα πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης και όχι την πραγματική τους κατάσταση, κατά ένα ποσοστό το κόστος υπολογίζεται μέσω της αντικατάστασης ανταλλακτικών πριν από το τέλος της χρήσιμη ζωή τους.

3. Προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance)

Η προγνωστική συντήρηση στοχεύει να προβλέψει πότε μπορεί να συμβεί μια αστοχία καθώς και τη λήψη προληπτικών μέτρων για να αποτραπεί αυτή η αστοχία. Εφόσον γίνεται με βάση την πραγματική κατάσταση του εξοπλισμού και όχι σε καθορισμένα διαστήματα ή βάσει ηλικίας εξοπλισμού, μερικές φορές αναφέρεται ως συντήρηση βάσει συνθηκών ή just-in-time. Η προληπτική συντήρηση απαιτεί προηγμένη τεχνική λύση παρακολούθησης της κατάστασης και την απόδοση του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο, με ενσωματωμένους μαθηματικούς αλγορίθμους και συστήματα (embedded systems and algorithms) που προσδιορίζουν τις τάσεις και προβλέπουν με ακρίβεια την αποτυχία. Ενώ η ίδια η στρατηγική είναι πιο περίπλοκη, το γεγονός ότι η αποτυχία αποφεύγεται χωρίς πρόωρη ανταλλαγή ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος. Η βλάβη του εξοπλισμού είναι διαφορετική για καθέναν από τους τύπους συντήρησης.

Οι περισσότεροι ιδιοκτήτες scrubber SOx πραγματοποιούν έναν συνδυασμό προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης. Ωστόσο, η προγνωστική συντήρηση προσφέρει την ιδανική ισορροπία, όπως φαίνεται στο Σχήμα παρακάτω.



Εικόνα 24: Πολιτικές συντήρησης [Γ2]

3.7 Υλικά κατασκευής scrubber και σωληνώσεων

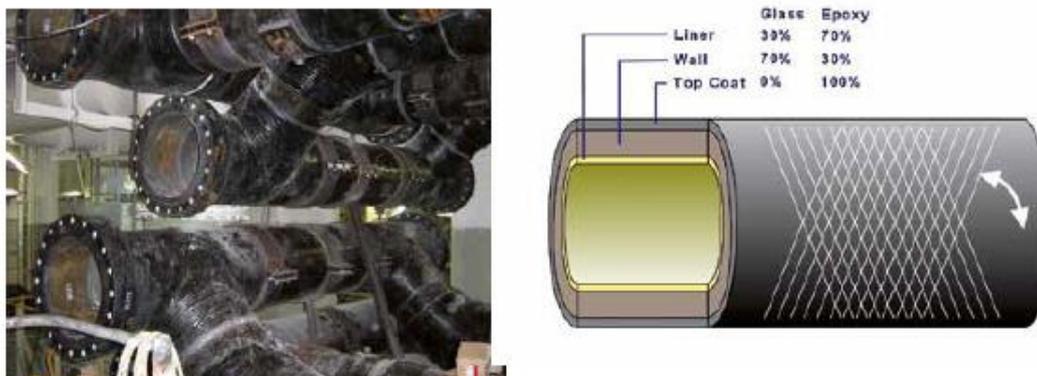
Στη συνέχεια κάνουμε μια εισαγωγή στα υλικά των scrubbers και των σωληνώσεων (που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του θαλασσινού νερού και του μείγματος πριν και μετά τον scrubber). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αντίστοιχα υλικά [B7].

Πίνακας 2 Υλικά που χρησιμοποιούνται στους scrubbers και τα δικτυώματα

Component	Common Material
Scrubber reaction chamber	Super austenitic stainless steel - SMO 254 (6 Moly)
Washwater lines (effluent, bleed-off)	GRP (glass reinforced plastic)
	Super duplex stainless steel
Water lines (scrubbing, cooling, reaction, makeup water)	GRE (glass reinforced epoxy)
	Carbon steel with PE (polyethylene) lining
Alkali (NaOH) supply	Stainless steel - SS 316L
Sludge tanks	Plastic
	Steel with synthetic coating
Sludge lines	GRE, FRP or GRP
Valves (Exhaust, bypass, isolation)	Nickel alloys

Το ζεστό όξινο θαλασσινό νερό σε pH 3 μπορεί να διαβρώσει γρήγορα τα σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως σαν εξοπλισμός στα πλοία. Για να εξασφαλίσουν μεγάλη διάρκεια ζωής τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονάδων καθαρισμού καυσαερίων καθώς και εξαρτημάτων όπως αντλίες, ψυγεία, διασυνδεδεμένες σωληνώσεις και βαλβίδες, περιλαμβάνουν κράματα με βάση το χρώμιο-νικέλιο (ανοξειδωτά χάλυβες) με υψηλή ισοδύναμη αντίσταση (PREN), τιτάνιο και μη μεταλλικά όπως ενισχυμένο με γυαλί εποξική (GRE) και κατάλληλα πλαστικά. Το

τελευταίο όταν χρησιμοποιείται για συστήματα σωληνώσεων απαιτεί εγκεκριμένες λύσεις ενώ απαιτεί χαμηλότερα επίπεδα ακαμψίας για να αντέξει στις υψηλές δονήσεις του πλοίου. Ωστόσο, η συναρμολόγηση μη μεταλλικών υλικών διευκολύνει τη μετασκευή και τη διάρκεια ζωής η οποία μπορεί να ξεπεράσει αυτή των μετάλλων.

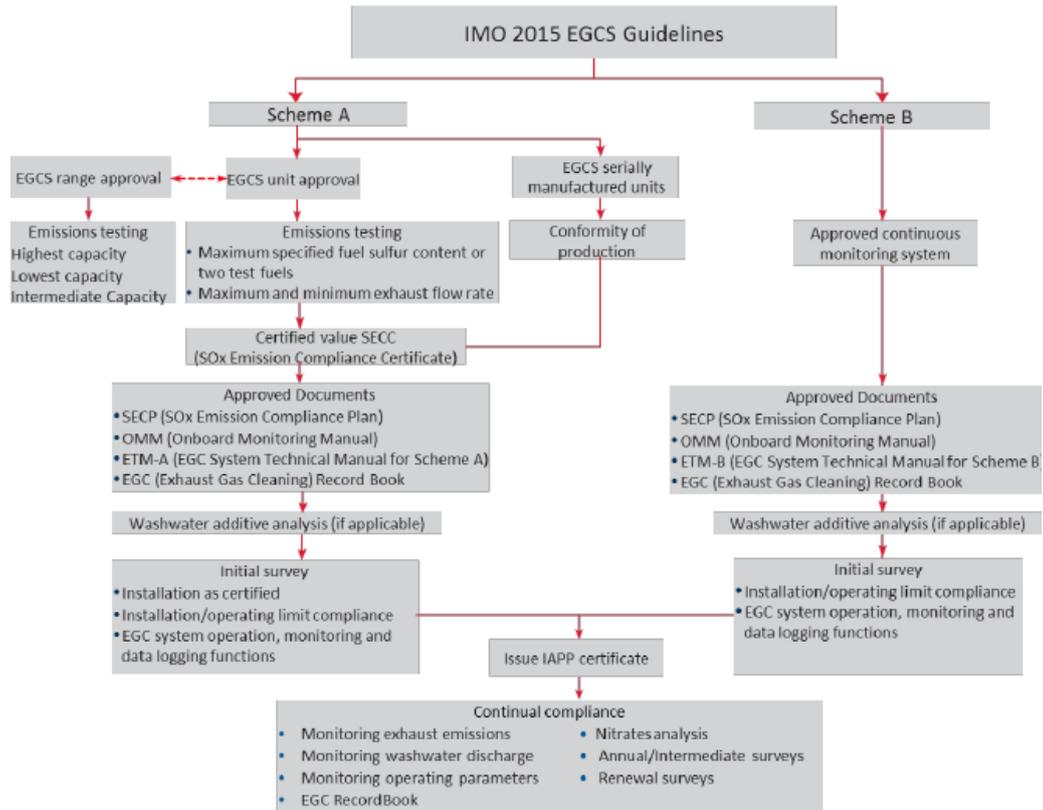


Εικόνα 25: Σωληνώσεις από υλικό GRE [B8]

3.8 Πιστοποίηση σε scrubber

Ένα σύστημα scrubber απαιτεί πιστοποίηση τόσο από νομικής όσο και από πλευράς κλάσης (σε ποια κλάση δηλαδή θα καταταχθεί) και περιλαμβάνει την επανεξέταση του εξοπλισμού καθώς και την επανεξέταση της ενσωματωμένης εγκατάστασης. Από νομική άποψη, η οδηγία IMO για συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, MEPC. 259 (68), περιγράφει τη διαδικασία που περιλαμβάνει τα Σχέδια έγκρισης A και το Σχέδιο B όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 27. Το Σχέδιο B (Scheme B) χρησιμοποιείται συνήθως για την έγκριση εγκαταστάσεων σε νέες κατασκευές και μετασκευές.

Η συμμόρφωση με το όριο εκπομπών SOx πραγματοποιείται μέσω συνεχούς παρακολούθησης της αναλογίας διοξειδίου του θείου / διοξειδίου του άνθρακα (SO₂ / CO₂) στα καυσαέρια και της κατάστασης των εκκενωμένων υδάτων πλύσης (στο Παράρτημα B περιγράφουμε την αντίστοιχη μεθοδολογία και τους τύπους για ατελή και τέλεια καύση). Μετά την αρχική έρευνα της εγκατάστασης και επαλήθευση της απόδοσης του συστήματος παρακολούθησης, με τη σύμφωνη γνώμη της Διοίκησης Σημαίας (Flag Administration), θα γίνεται αναφορά του scrubber στο Παράρτημα του Διεθνούς Πιστοποιητικού Πρόληψης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (IAPP) ως το ισοδύναμο μέσο για την κάλυψη των οριακών απαιτήσεων για το θείο. Η διοίκηση της σημαίας οφείλει να ενημερώσει για την αποδοχή στον IMO καθώς και να τη συμπεριλάβει στη βάση δεδομένων IMO GISIS για κάθε έγκριση συγκεκριμένου πλοίου.



Εικόνα 26: Διαδικασία πιστοποίησης σε scrubber (Σχήματα A και B) [B7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ SCRUBBER ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΑΝΤΙΘΛΙΨΗΣ – ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

Όπως έχει ειπωθεί, τα συστήματα scrubbers πετυχαίνουν μείωση μέχρι και 98% των εκπομπών SO₂ καθιστώντας τα μια αξιόπιστη πρόταση στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών. Το scrubber εγκαθίσταται στην έξοδο των καυσαερίων του κινητήρα οπότε επιβάλλεται να διερευνηθεί κατά πόσο αυτή η εισαγωγή προκαλεί μεταβολή στην πίεση αντίθλιψης (back pressure) της MEK η οποία κατά σχεδόν ολοκληρωτικό ποσοστό είναι υπερτροφοφοτούμενη με turbocharger. Επιβάλλεται λοιπόν να μετρηθεί η μεταβολή στην πίεση αντίθλιψης που προκαλεί σε περισσότερα από ένα σημεία λειτουργίας ενώ πρέπει να ελεγχθεί και η αντίστοιχη επίδραση στην απόδοση του κινητήρα ή και του turbocharger μεμονωμένα.

Συνήθως, οι κατασκευαστές ναυτικών MEK ντήζελ δεν είναι και κατασκευαστές συστημάτων scrubber. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται στενή συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών MEK και κατασκευαστών scrubber ώστε να διαμορφώνονται και οι κατάλληλες οδηγίες καθώς και τα τεχνικά βιβλία. Κάθε λοιπόν κατασκευαστής (MEK ή scrubber) οφείλει να εκδίδει τεχνικές οδηγίες προς συμμόρφωση αυτών που είτε θέλουν να εγκαταστήσουν ένα νέο scrubber σε ένα νέο πλοίο ή να πραγματοποιήσουν μετεγκατάσταση ή service σε έναν παλιό που ήδη λειτουργεί εγκατεστημένο σε ένα πλοίο.

Στα επόμενα υποκεφάλαια του κεφαλαίου περιγράφονται παραδείγματα είτε από κατασκευαστές ναυτικών μηχανών είτε διαχειριστών πλοίων, οι οποίοι εξετάζουν την επίδραση της λειτουργίας του scrubber τόσο στην πίεση αντίθλιψης όσο και στην απόδοση του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, παρέχονται τεχνικές οδηγίες από τέσσερις κατασκευαστές ναυτικών μηχανών.

4.1 Οδηγία Κατασκευαστή -1: όρια και ενδιάμεσες θέσεις λειτουργίας

Την 1η Ιανουαρίου 2020, το παγκόσμιο όριο θείου (S) για τα καύσιμα πλοίων πρέπει να μειωθεί από 3,50% σε 0,50% S . Αυτή η απόφαση-ορόσημο, που έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ναυπηγική (και ναυτιλιακή) βιομηχανία, λήφθηκε το 2016 στην 70η σύνοδο του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του IMO Επιτροπή Προστασίας (MEPC 70). Ωστόσο, η συνεχιζόμενη χρήση του HFO επιτρέπεται

υπό τον όρο ότι τα καυσαέρια καθαρίζονται από κατάλληλες συσκευές. Μια τέτοια συσκευή όπως η EGC που είναι εγκατεστημένη και πιστοποιημένη, πρέπει να συμμορφώνεται με το νέο κανονισμό για το θείο.

Οι χειριστές των δίχρονων κινητήρων αυτού του κατασκευαστή έχουν τις ακόλουθες τρεις επιλογές για λειτουργία σε παγκόσμια ύδατα:

1. Λειτουργία με καύσιμο Ντίζελ 0,50% πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (VLSFO) ή καύσιμο με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο
2. Λειτουργία με κινητήρα διπλού καυσίμου ME-GI ή ME-LGI σε LNG, αιθάνιο, μεθανόλη ή LPG
3. Συνέχιση της λειτουργίας με καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο και εφαρμογή μιας συσκευής EGC όπως ένα scrubber SO_x.

Αυτή η επιστολή συμμόρφωσης (service letter) [Γ1] ενημερώνει σχετικά με τον αντίκτυπο και την απαιτούμενη ενέργεια εάν ένας ιδιοκτήτης/χειριστής αποφασίσει να μετασκευάσει (retrofit) έναν scrubber SO_x εγκατεστημένο σε ένα δίχρονο κινητήρα σε λειτουργία. Μια τέτοια απόφαση απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του έργου, καθώς μπορεί για τη μετασκευή ενός scrubber SO_x να απαιτηθούν τροποποιήσεις (μεταβολές) στον κινητήρα και τροποποίηση του αντίστοιχου τεχνικού φακέλου για να διασφαλιστεί η συνέχιση της συμμόρφωσης με τον τεχνικό κώδικα NO_x του IMO 2008.

Η εταιρία δεν είναι κατασκευαστής scrubber SO_x αλλά κινητήρων ντίζελ. Κατά συνέπεια, ο κατασκευαστής scrubber SO_x και ο πλοιοκτήτης πρέπει να χειριστούν τη διάταξη καθαρισμού SO_x / EGC, την εγκατάσταση της διάταξης, τις διεπαφές εγκατάστασης με τα πλοία καθώς και το Σχέδιο συμμόρφωσης εκπομπών SO_x.

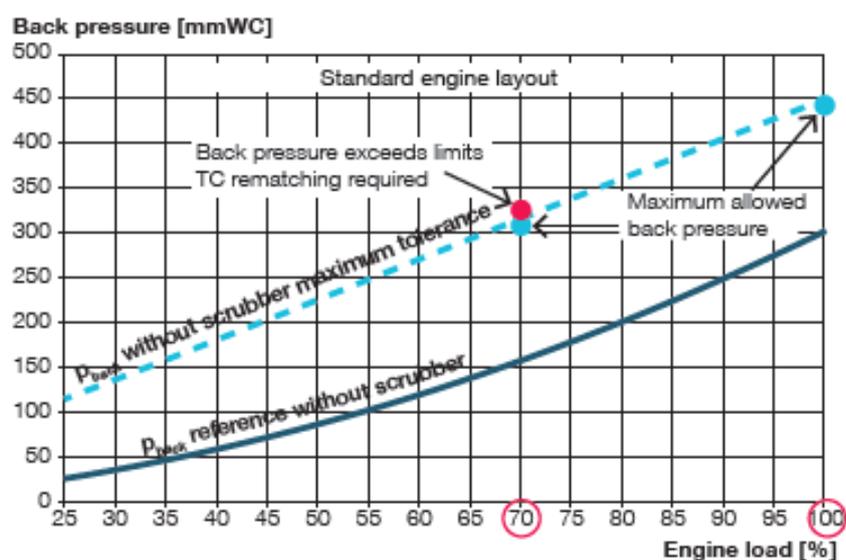
Η εταιρία προσφέρει τελικά ένα πακέτο μετασκευής (retrofit package) SO_x scrubber με συστάσεις για την επανασύνδεση του υπερσυμπιεστή, ανταλλακτικά καθώς και σχετικές εργασίες επαναπιστοποίησης για τον κινητήρα, τις τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν και την έγκριση από σχετικούς νηογνώμονες.

4.1.1 Αξιολόγηση πριν από την εγκατάσταση scrubber SO_x

Οι πλοιοκτήτες που επιθυμούν να διερευνήσουν εάν ένας scrubber SO_x είναι κατάλληλος για έναν συγκεκριμένο κινητήρα, θα χρειαστούν τα χαρακτηριστικά και την παροχή καυσαερίου στην έξοδο του τον εν λόγω κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση, ο κατασκευαστής μπορεί να παρέχει τα σχετικά δεδομένα καυσαερίων στην έξοδο του scrubber σε συνάρτηση της ισχύος της μηχανής (ως ποσοστό του Maximum Continuous Rating) ώστε να γίνονται οι κατάλληλοι υπολογισμοί για συγκεκριμένα φορτία κινητήρα.

Εάν ο πλοιοκτήτης αποφασίσει να εγκαταστήσει ένα EGC με λειτουργία του κινητήρα σε μερικό φορτίο, η ικανότητα καθαρισμού EGC πρέπει να ταιριάζει στο καθορισμένο μερικό φορτίο. Ο κινητήρας πρέπει πάντα να είναι σε θέση να εργάζεται στο 100% MCR, εξ ου και η διάταξη EGC πρέπει να έχει σχεδιαστεί για ροή αερίου στο 100% του MCR, εκτός εάν έχει εγκατασταθεί παράκαμψη διαδρομής καυσαερίων.

Η Εικόνα 28 δείχνει την καμπύλη της πίεσης αντίθλιψης ενός συνήθη κινητήρα. Η κάτω καμπύλη δείχνει την πίεση αντίθλιψης αναφοράς του κινητήρα πάνω από την ισχύ του κινητήρα. Η άνω καμπύλη δείχνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση αντίθλιψης πάνω από την ισχύ του κινητήρα. Οι πραγματικές τιμές της πίεσης αντίθλιψης στο διαφορετικά φορτία κινητήρα φαίνονται στον Πίνακα 3.



Εικόνα 27: Πίεση αντίθλιψης (back pressure) σε συνάρτηση με το φορτίο μηχανής για δίχρονο κινητήρα [Δ1]

Πίνακας 3 Δεδομένα πίεσης αντίθλιψης συναρτήσεως του φορτίου της μηχανής (ως ποσοστό του MCR)

Power (%)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Ref. p _{back}	25	35	46	58	72	86	102	119	138	157	178	200	223	247	273	300
Max. p _{back}	115	137	159	182	204	227	249	271	294	316	339	361	383	406	428	450
Tolerance p _{back}	90	102	113	124	132	141	147	152	156	159	161	161	160	159	155	150

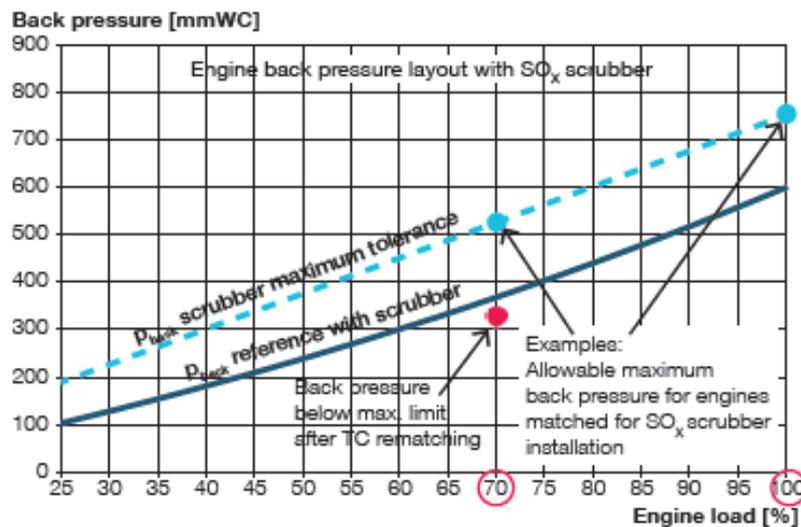
Όταν είναι εγκατεστημένος ένας scrubber SO_x, η πίεση αντίθλιψης μπορεί να αυξηθεί πάνω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη καμπύλη αντίθλιψης. Εάν ναι, ο υπερπληρωτής (turbocharger) πρέπει να επαναταιριαστεί (rematching) και παράλληλα να τροποποιηθεί ο τεχνικός φάκελος. Επιπλέον, εάν η πίεση αντίθλιψης του κινητήρα προστιθέμενη με την πίεση αντίθλιψης από το scrubber μετρηθεί μεταξύ των δύο καμπυλών, ο κατασκευαστής συνιστά ότι η απόδοση του κινητήρα πρέπει να αξιολογηθεί περαιτέρω και λεπτομερώς με

πιθανό νέο επαναταίριασμα του υπερπληρωτή (συμπεριλαμβανομένης της υποχρεωτικής τροποποίησης του τεχνικού αρχείου).

Το επαναταίριασμα του υπερπληρωτή θα διασφαλίσει ότι η κατανάλωση καυσίμου θα είναι η βέλτιστη όσο και πριν από την εγκατάσταση του scrubber SO_x, ότι το επίπεδο εκπομπών NO_x θα παραμείνει αμετάβλητο και ότι το θερμικό φορτίο του κινητήρα θα παραμείνει εντός επιτρεπτού εύρους.

4.1.2 Ρύθμιση κινητήρα για scrubber SO_x

Η Εικόνα 29 δείχνει την πίεση αντίθλιψης του κινητήρα μετά την εγκατάσταση του scrubber SO_x, το επαναταίριασμα του υπερπληρωτή και την τροποποίηση στον τεχνικό φάκελο. Οι πραγματικές τιμές της πίεσης αντίθλιψης σε διαφορετικά φορτία κινητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.



Εικόνα 28: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσει του φορτίου μηχανής μετά την εγκατάσταση scrubber [Δ1]

Πίνακας 4 Δεδομένα πίεσης αντίθλιψης συναρτήσει του φορτίου μηχανής για κινητήρα ρυθμισμένο με τον scrubber SO_x

Power (%)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Ref. P _{back}	100	125	151	178	207	237	268	300	333	368	403	440	479	518	558	600
Max. P _{back}	188	226	263	301	338	376	413	450	488	526	563	600	638	676	713	750
Tolerance P _{back}	88	101	112	123	131	139	145	150	155	158	160	160	169	158	155	150

Η κάτω καμπύλη δείχνει την πίεση αντίθλιψης αναφοράς του κινητήρα πάνω από την ισχύ του κινητήρα. Η επάνω καμπύλη δείχνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση αντίθλιψης κινητήρα πάνω από την ισχύ του κινητήρα. Η πίεση αντίθλιψης με εγκατεστημένο το scrubber SO_x πρέπει να είναι κάτω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη καμπύλη αντίθλιψης ανεξάρτητα από το φορτίο του κινητήρα. Η κόκκινη κουκκίδα στην Εικόνα 28 απεικονίζει έναν κινητήρα με εγκατεστημένο scrubber SO_x, το οποίο οδηγεί σε ολική αντίθλιψη 325 mmWC.

Στον Πίνακα 4 φαίνεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη αντίθλιψη σε φορτίο 70% είναι 316 mmWC. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση αυτή είναι υποχρεωτικό να γίνει επαναταίριασμα του υπερπληρωτή και τροποποίηση του τεχνικού φακέλου.

Στην Εικόνα 29, ο κινητήρας έχει ρυθμιστεί (tuned) για τον scrubber SOx, και η κόκκινη κουκκίδα δείχνει ότι είναι τώρα κάτω από τη μέγιστη καμπύλη πίεσης αντίθλιψης. Ο κινητήρας είναι τώρα συμβατός με το όριο της πίεσης αντίθλιψης, και η απόδοση του κινητήρα είναι τώρα βέλτιστη όπως πριν από την εγκατάσταση του scrubber SOx.

4.2 Οδηγία Κατασκευαστή - 2: έμφαση στην επιθεώρηση

Ξεκινάμε αρχικά με τη μετασκευή (retrofit) του scrubber.

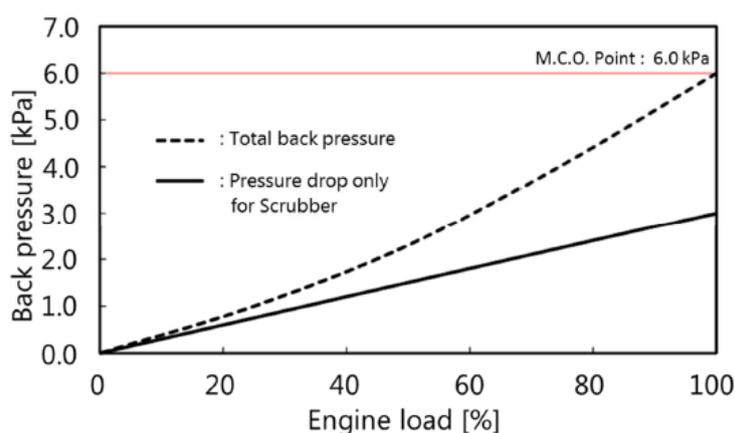
4.2.1 Προγραμματισμός για μετασκευή του scrubber

Είναι σημαντικό να θεωρήσει κανείς τα ακόλουθα δύο σημεία λειτουργίας όταν σχεδιάζεται μετασκευή (retrofit) στο scrubber [Γ2].

1. Οριακή τιμή στην πίεση αντίθλιψης του υπερπληρωτή

Σε κανονική μηχανή (χωρίς τον scrubber), η πίεση αντίθλιψης του υπερπληρωτή στο MCO (Maximum continuous operation) είναι ορισμένη στα 3.5 kPa ή χαμηλότερη. Λαμβάνοντας υπόψη το περιθώριο απωλειών λόγω των επικαθήσεων στο εσωτερικό της εξόδου κατά το στάδιο της σχεδίασης, συνιστάται να διατηρείται σε 3.0 kPa ή χαμηλότερη.

Στην περίπτωση εγκατάστασης scrubber, συνιστάται η (συνολική) πίεση αντίθλιψης να είναι 6.0 kPa ή χαμηλότερη στο σημείο MCO.



Εικόνα 29: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσει του φορτίου μηχανής [Δ2]

2. Αγωγός παράκαμψης του scrubber

Επιβάλλεται η εγκατάσταση αγωγού παράκαμψης σε περίπτωση αποτυχίας ή δυσλειτουργίας του συστήματος scrubber. Επίσης, σχεδιάζεται η εγκατάσταση του αγωγού αυτού σε περίπτωση συντήρησης του scrubber όταν χρησιμοποιείται καύσιμο χαμηλό σε θείο. Αν κάτι δεν πηγαίνει όπως είχε προγραμματισθεί, είναι απαραίτητο να διακοπεί η λειτουργία και παρακαμφθεί το σύστημα scrubber αυτόματα με στόχο να διατηρηθεί η κατάσταση της μηχανής. Έτσι, πρέπει να θεωρηθεί ως απαραίτητη η εγκατάσταση συστήματος ελέγχου για τη μεταλλαγή (switching) μεταξύ της γραμμής του scrubber (scrubber line) και της γραμμής παράκαμψης (bypass line). Όταν το καυσαέριο παρακάμπτεται, η πίεση αντίθλιψης μειώνεται καθώς η πτώση πίεσης στον scrubber παύει να υφίσταται. Ως αποτέλεσμα, η πίεση του αέρα απόπλυσης (scavenge air pressure) αυξάνεται και η θερμοκρασία του καυσαερίου στην έξοδο του υπερπληρωτή μειώνεται. Αν η επίδραση της πτώσης της θερμοκρασίας του καυσαερίου εξόδου είναι σημαντική, απαιτείται η εγκατάσταση συσκευής (π.χ κάποιο στόμιο) για τη διατήρηση της πίεσης αντίθλιψης κατά μήκος της γραμμής παράκαμψης. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει την επίδραση στην απόδοση της κύριας μηχανής λόγω της μείωσης της πίεσης αντίθλιψης.

Πίνακας 5 Δείκτης επίδρασης της μείωσης της πίεσης αντίθλιψης στην απόδοση του κινητήρα

Table1 : Influence index for decrease of back press on engine performance

Output [%]	Scav. air and exh gas amount [%]	T/C inlet temp. [°C]	T/C outlet temp. [°C]
110%	-2.1 × factor	+10 × factor	+10 × factor
100%	-2.1 × factor	+10 × factor	+10 × factor
85%	-2.1 × factor	+9 × factor	+9 × factor
75%	-2.1 × factor	+8 × factor	+9 × factor
50%	-2.1 × factor	+7 × factor	+8 × factor
25%	-2.1 × factor	+6 × factor	+7 × factor
0%	-2.1 × factor	+6 × factor	+7 × factor

4.2.2 Επίδραση στην κύρια μηχανή

Έπειτα εξετάζουμε την επίδραση στην κύρια μηχανή που προκαλείται από τη μετασκευή του scrubber.

Λόγω της πτώσης πίεσης που προκαλείται κατά το πέρασμα του καυσαερίου στον scrubber, η συνολική πίεση αντίθλιψης (στατική πίεση μέσα στον αγωγό του καυσαερίου) μέσα στο σύστημα καυσαερίου αυξάνεται στην έξοδο του turbocharger. Γενικότερα, η ποσότητα του αέρα απόπλυσης και η πίεση

μειώνονται όταν η πίεση αντίθλιψης αυξάνεται, προκαλώντας υψηλότερα θερμικά φορτία στην κύρια μηχανή και αύξηση στην κατανάλωση του καυσίμου. Τμήματα της μηχανής μέσα στο θάλαμο καύσης όπως οι βαλβίδες καυσαερίου θα καταπονούνται περισσότερο θερμικά καθώς το θερμικό φορτίο της μηχανής αυξάνεται.

4.2.3 Επισκευή στην κύρια μηχανή ή/και τον υπερπληρωτή

Τέλος, εξετάζουμε την περίπτωση επισκευής στην κύρια μηχανή.

Λόγω της αύξησης στην πίεση αντίθλιψης μετά τη μετασκευή του scrubber, συνιστάται η τροποποίηση (μεταβολή) του υπερπληρωτή για να μετριασθεί η επίδραση στην κύρια μηχανή (όπως γράψαμε παραπάνω)). Για πλοία που είναι σε υπηρεσία, η απόδοση του υπερσυμπιεστή κατά μεγάλη πιθανότητα έχει μειωθεί. Εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά του υπερπληρωτή (τα οποία έχουν οδηγήσει σε μειωμένο βαθμό απόδοσης του), μπορούμε να πετύχουμε βελτίωση στην απόδοση της μηχανής. Αν η πίεση αντίθλιψης -μετά την εγκατάσταση του scrubber- ξεπερνά τα 3.5 kPa, συνιστάται η επέμβαση στον υπερπληρωτή. Εάν δεν είναι εφικτό αυτό, συνιστάται νέος έλεγχος στη βαλβίδα καυσαερίου και την κατάσταση του κυλίνδρου λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση που θα έχει αυτό στην κύρια μηχανή.

4.2.4 Επίδραση της αύξησης της πίεσης αντίθλιψης στις εκπομπές NOx

Η αύξηση της πίεσης αντίθλιψης επηρεάζει επίσης τον ρυθμό εκπομπής (emission rate) των NOx, οπότε το μέγιστο όριο ορίζεται από τον Τεχνικό Φάκελο NOx. Η επανεξέταση του Τεχνικού Φακέλου NOx είναι απαραίτητη αν η πίεση αντίθλιψης ξεπεράσει το μέγιστο όριο των 4.4 kPa. Όμως, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση στην πίεση αντίθλιψης λόγω των επικαθήσεων σε όλες τις εξόδους καυσαερίων, συνιστάται η επανεξέταση του Τεχνικού Φακέλου αν η πίεση αντίθλιψης είναι πάνω από 3.5 kPa.

4.3 Οδηγία Κατασκευαστή - 3: εστίαση στο μέγιστο φορτίο

Αυτή η τεχνική οδηγία [Γ3] περιγράφει τις επιδόσεις του κινητήρα και τη σχετική επίδραση της αυξημένης πίεσης καυσαερίων λόγω της εγκατάστασης ενός συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων, όπως το scrubber SOx.

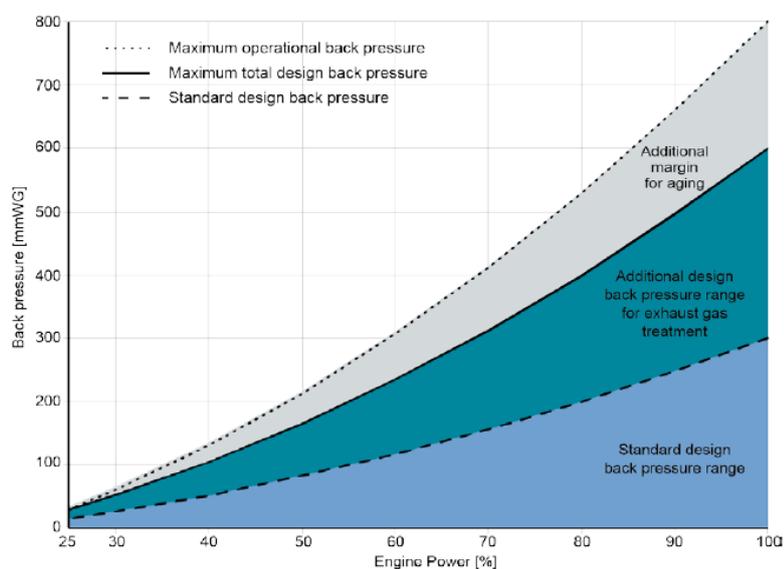
4.3.1 Πίεση αντίθλιψης λόγω συστήματος καυσαερίων

Τυπική πίεση αντίθλιψης: Η πίεση αντίθλιψης αναφοράς για τους κινητήρες αυτού του κατασκευαστή είναι 300 mmWC σε 100% ισχύ και συνθήκες περιβάλλοντος ISO. Αυτή είναι η τυπική πίεση αντίθλιψης, που αντιστοιχεί στη

μείωση της πίεσης στο σύστημα καυσαερίων από σωληνώσεις, εξοικονόμηση κ.λπ. Αυτή η τυπική αντίθλιψη δεν περιλαμβάνει συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων.

Πρόσθετη αντίθλιψη: Τα συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων, όπως τα scrubber SO_x (ή τα συστήματα LP-SCR), εγκαθίστανται στο σύστημα καυσαερίων μετά τον κινητήρα και ενδέχεται να αυξήσουν την πίεση πέραν του σχεδιαστικού ορίου των 300 mmWC στο 100% της ισχύος. Ωστόσο, η επιτρεπόμενη αύξηση της πίεσης αντίθλιψης από την εγκατάσταση επεξεργασίας καυσαερίων δεν μπορεί να είναι πάνω από (επιπλέον) 300 mmWC σε 100% ισχύ και συνθήκες περιβάλλοντος ISO.

Συνολική πίεση αντίθλιψης του συστήματος καυσαερίων: Η συνολική πίεση αντίθλιψης του συστήματος καυσαερίων δημιουργείται συνδυάζοντας τη (σχεδιασμένη) πίεση αντίθλιψης με την πρόσθετη αντίθλιψη που δημιουργείται από το σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων. Η μέγιστη επιτρεπόμενη αντίθλιψη είναι 600 mmWC.



Εικόνα 30: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσει της ισχύος μηχανής [Δ3]

4.3.2 Επίδραση στην απόδοση του κινητήρα λόγω συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων και ρύθμιση κινητήρα

Η εγκατάσταση ενός συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων θα επηρεάσει την απόδοση του κινητήρα, όπως την κατανάλωση καυσίμου, τη ροή και τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Ο κατασκευαστής παρέχει εξειδικευμένο λογισμικό στο οποίο εισάγοντας την τιμή της πρόσθετης πίεσης αντίθλιψης, υπολογίζονται αυτόματα οι παραπάνω επιδόσεις (απόδοση κινητήρα, κατανάλωση καυσίμου κτλ).

Όσον αφορά τη ρύθμιση του κινητήρα και την πιστοποίηση των δεδομένων απόδοσης (σε θάλαμο δοκιμής και όχι εν πλω), ο κατασκευαστής ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

1. Για τη ρύθμιση του κινητήρα και το ταίριασμα του υπερσυμπιεστή στο θάλαμο δοκιμής, η πίεση αντίθλιψης των καυσαερίων έχει ρυθμιστεί στα 300 mmWC συν την τιμή πτώσης πίεσης σχεδιασμού του scrubber σε 100% ισχύ. Όταν η πτώση της πίεσης του scrubber είναι άγνωστη, πρέπει να ρυθμιστεί συνολική πίεση αντίθλιψης να είναι 600 mmWC.
2. Τα δεδομένα απόδοσης του κινητήρα καταγράφονται ενώ η πίεση αντίθλιψης των καυσαερίων παραμένει αμετάβλητη.
3. Οι θυγατρικοί κινητήρες (member engines) δοκιμάζονται με την ίδια πίεση αντίθλιψης με τη μητρική μηχανή (parent engine).

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6 Οδηγία για τη ρύθμιση του κινητήρα

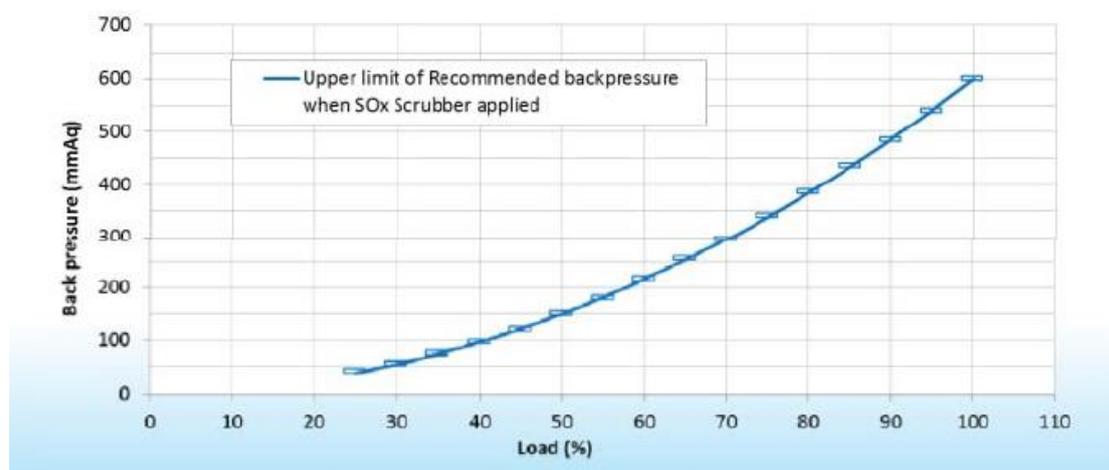
	Backpressure at 100% engine power for engine tuning, TC matching and performance data verification in Tier II mode , setting tolerance +/-50 mmWC	Backpressure at 100% engine power for performance data verification in Tier III mode , setting tolerance +/-50 mmWC
Scrubber only		-
Scrubber & LP-SCR ¹⁾	300 mmWC + Scrubber pressure drop or 600 mmWC	300 mmWC + SCR pressure drop
Scrubber & HP-SCR ²⁾		300 mmWC + Scrubber pressure drop or 600 mmWC
LP-SCR only	300 mmWC	300 mmWC + SCR pressure drop
HP-SCR only		300 mmWC

Σε περίπτωση που η πίεση αντίθλιψης αναφοράς για την επαλήθευση δεδομένων απόδοσης, όπως συμφωνήθηκε μεταξύ του κατασκευαστή κινητήρα και του ναυπηγείου, διαφέρει από τις τιμές που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα, τα μετρημένα δεδομένα απόδοσης μπορούν να διορθωθούν στη συμφωνημένη πίεση αντίθλιψης αναφοράς με τους τύπους διόρθωσης του κατασκευαστή.

4.4 Οδηγία Κατασκευαστή - 4: εστίαση στον υπερπληρωτή

Ο κατασκευαστής εξέδωσε το 2018 μια Τεχνική Οδηγία στην οποία αναφέρεται στην επίδραση (και τον χειρισμό) του scrubber στην πίεση αντίθλιψης. Με βάση αυτό, τα χαρακτηριστικά του υπερπληρωτή επιλέγονται (και βελτιστοποιούνται) έτσι ώστε να επιτευχθεί η σχεδιασμένη πίεση του αέρα απόπλυσης -υπό τη συνθήκη ότι το άνω όριο στην πίεση αντίθλιψης στο σημείο MCR (Maximum Continuous Rating) είναι 300 mmAq. Επομένως, όταν η πίεση αντίθλιψης υπερβεί τα 300 mmAq, τα χαρακτηριστικά του υπερπληρωτή πρέπει να μεταβληθούν.

Στην παρακάτω Εικόνα 32 φαίνονται οι αποδεκτές τιμές της πίεσης αντίθλιψης για τον SO_x scrubber.



Εικόνα 31: Πίεση αντίθλιψης συναρτήσει του φορτίου [Δ4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΝΕΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΕ SCRUBBER

Σε προηγούμενα κεφάλαια έχει γίνει αναφορά στις επιλογές (μέτρα) που έχει ένας χρήστης για να εναρμονισθεί με τον Κανονισμό IMO 2020 περί μείωσης των καυσαερίων. Μια από αυτές είναι η χρήση νέων καυσίμων τα οποία περιέχουν θείο σε μικρή περιεκτικότητα. Όμως, χρήση των νέων αυτών καυσίμων ήταν δεδομένο πως θα επέφερε την αύξηση του λειτουργικού κόστους των πλοίων και την ανάγκη κεφαλαίων για τις απαραίτητες αλλαγές σε αυτά, με δεδομένο πως τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο κοστίζουν περίπου 30% περισσότερο σε σχέση με τα κλασικά καύσιμα βαρέος τύπου. Από την άλλη, η εγκατάσταση scrubbers σε χιλιάδες (ελληνόκτητα) πλοία απαιτεί επενδύσεις εκατομμυρίων (υπολογίζεται σε ένα κόστος κατασκευής μεταξύ 2 και 4 εκατομμυρίων ευρώ). Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η τιμή των καυσίμων ανά περίοδο για κάθε τύπο καυσίμου καθώς αυτές μεταβάλλονται και επομένως επηρεάζουν αντίστοιχα και το κόστος.

Οι ναυτιλιακές εταιρίες αναζητούν τη βέλτιστη πολιτική που θα ακολουθήσουν καθώς είναι υποχρεωμένες να προβούν σε αποφάσεις και πράξεις. Αναζητούνται λύσεις οι οποίες δεν σχετίζονται απαραίτητα με τις επιλογές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για παράδειγμα, σύμφωνα με στοιχεία των δύο τελευταίων ετών, αρκετές ελληνικές ναυτιλιακές εταιρίες στράφηκαν στην πρακτική του «slow steaming» (δηλαδή στη μείωση της ταχύτητας των πλοίων, με στόχο τη μείωση του κόστους κατανάλωσης καυσίμου καθώς και της μείωσης των εκπομπών) ως μια εναλλακτική λύση στην αύξηση της τιμής των καυσίμων, ώστε να μην εξαναγκαστούν να προχωρήσουν στην αύξηση των ναύλων και να χάσουν έτσι ένα από τα ανταγωνιστικά τους πλεονεκτήματα στη διεθνή αγορά. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται μόνο η λύση των scrubbers σε σχέση με τη χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο.

Στα παρακάτω υποκεφάλαια γίνεται αναφορά στα (νέα) καύσιμα -και το κατά πόσο πρέπει να έχουν χαμηλό ιξώδες ή όχι για χρήση σε νέα πλοία-, και εκτιμάται ο χρόνος απόσβεσης/αποπληρωμής (payback time) για την επένδυση σε scrubber καθώς αυτή συγκρίνεται με το κόστος χρησιμοποίησης καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (νέα καύσιμα).

5.1 Κατηγορίες (νέων) καυσίμων

Ενώ οι αλλαγές της τελευταίας δεκαετίας έχουν ήδη επηρεάσει την ποικιλία των διαθέσιμων καυσίμων σε όλο τον κόσμο, η πλειονότητα του στόλου εξακολουθεί να λειτουργεί με βαρύ μαζούτ. Όμως, οι νέοι κανόνες, που μειώνουν την τρέχουσα περιεκτικότητα σε θείο κατά 85%, θα προκαλέσουν τις πιο σημαντικές αλλαγές που έχει δει ποτέ η βιομηχανία. Οι χειριστές (operators) χωρίς μια προηγούμενη κατανόηση των παραμέτρων καυσίμου και των σχετικών απαιτήσεων χειρισμού διατρέχουν τον κίνδυνο σημαντικών δαπανών και προβλημάτων. Σε μια πρόσφατη ενημέρωση (ανακοίνωση) του φορέα Lloyd's List, σημειώθηκε ότι παρόλο που δεν υπάρχει συντονισμένη προσέγγιση από τα διυλιστήρια, είναι σαφές ότι η βιομηχανία κατευθύνεται προς ένα μέλλον πολλαπλών καυσίμων.

Πηγαίνοντας σε μια πιο λεπτομερή προσέγγιση, μπορούμε να αναμένουμε τα καύσιμα μετά το 2020 να ταξινομούνται σε πέντε κύριες κατηγορίες:

- Μαζούτ εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ULSFO), μέγιστο 0,10%
- Μαζούτ με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (VLSFO), μέγιστο 0,50%
- Βαρύ μαζούτ, μέγιστο 3,50%
- LNG (υγροποιημένο φυσικό αέριο)
- Τα υπόλοιπα καύσιμα (βιοκαύσιμα, βιοντίζελ, αμμωνία)

Παρακάτω γίνεται αναφορά στην καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

5.1.1 ULSFO 0,10% S

Θα εξακολουθήσει να χρησιμοποιείται μια σειρά νέων καυσίμων που εισήλθαν στην αγορά για να καλύψουν τις απαιτήσεις ECA 0,10%. Αυτοί οι τύποι καυσίμων είναι κυρίως καθαρά αποστάγματα. Ωστόσο, θα μπορούσαν επίσης να είναι υβρίδια - πετρέλαιο αερίου αναμεμιγμένο με υπόλειμμα λαδιού. Γενικά, αυτά τα καύσιμα λειτουργούν καλά με τις τυπικές διαμορφώσεις του κινητήρα, αν και ενδέχεται να απαιτούν λειτουργικές αλλαγές. Για παράδειγμα, τα αποστάγματα έχουν σχετικά χαμηλά επίπεδα ιξώδους, τα οποία απαιτούν προσεκτική διαχείριση. Επίσης, μερικά από τα νέα υβρίδια χρησιμοποιούν προϊόντα που δεν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά σε ναυτικές εφαρμογές, προκαλώντας αβεβαιότητα σχετικά με τη σταθερότητα, τη συμβατότητα και τη μόλυνση. Λόγω της δυνητικά υψηλής ζήτησης για αυτά τα καύσιμα, ο θαλάσσιος και ναυτικός τομέας μπορεί να βρεθεί σε ανταγωνισμό με άλλες βιομηχανίες και αυτά τα καύσιμα θα αποτελούν μια ακριβή επιλογή.

5.1.2 VLSFO 0,50% S

Τα διυλιστήρια θα έχουν πάντα την ανάγκη να χρησιμοποιούν προληπτικά τα υπολείμματα τους. Είναι δυνατή η ανάμειξη κατάλληλων υπολειμμάτων

προϊόντων με αποστάγματα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο για τη δημιουργία καυσίμων συμβατών με καλή ποιότητα. Αυτά τα μίγματα μπορούν να περιέχουν υπόλειμμα έως και 40%, αλλά εξακολουθούν να διατηρούνται κάτω από το όριο του θείου 0,50% (sulfur cap). Ωστόσο, έρχονται με υψηλό κίνδυνο αστάθειας και ενδέχεται να είναι μη αποτελεσματικά στην ανάμιξη με άλλα καύσιμα όταν το πλοίο είναι εν κινήσει.

5.1.3 Βαρύ μαζούτ

Παρόλο που οι κανονισμοί του IMO αναφέρονται στα επίπεδα θείου στο καύσιμο, τα πλοία θεωρούνται συμμορφούμενα εάν διαθέτουν τεχνολογία μείωσης για να «καθαρίζουν» το θείο από τα καυσαέρια τους. Τα scrubbers που λειτουργούν ήδη έχουν αποδειχθεί ικανά να χειριστούν υψηλά επίπεδα θείου στα καύσιμα. Επιτρέπουν στους χειριστές να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν τα φθηνά, άφθονα υπολείμματα καυσίμων που ήδη γνωρίζουν καλά. Αν και δεν είναι κατάλληλο για όλα τα πλοία, αυτό αποτελεί μια ελκυστική επιλογή για πολλά εξ αυτών.

5.1.4 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο

Η περιεκτικότητα σε LNG σε θείο είναι πολύ κάτω από το όριο ρύθμισης και οι καθαρές ιδιότητες καύσης το καθιστούν μια ελκυστική επιλογή. Στην πράξη, ωστόσο, το κόστος επισκευής, κατασκευής, μεταφοράς και αποθήκευσης (τόσο στην ξηρά όσο και στο πλοίο) το αποκλείει προς το παρόν ως βιώσιμη επιλογή για τους περισσότερους χειριστές. Το LNG αποτελείται ως επί το πλείστο από μεθάνιο - ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου - έτσι η διαρροή αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική ανησυχία. Και η καύση του ΥΦΑ εξακολουθεί να απελευθερώνει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από ό, τι αρκετοί θεωρούν. Επί του παρόντος, λειτουργούν μόνο περίπου 200 πλοία ΥΦΑ. Αυτός ο αριθμός θα αυξηθεί σταθερά σε νέες κατασκευές και η ExxonMobil εκτιμά ότι το 12% του καυσίμου που θα χρησιμοποιείται το 2040 θα είναι αέριο. Με άλλα λόγια, το ΥΦΑ μπορεί να γίνει το κύριο καύσιμο ναυτιλίας του μέλλοντος, αλλά αυτό το μέλλον παραμένει δεκαετίες μακριά.

5.1.5 Αμμωνία

Η αμμωνία αποτελεί μια επιλογή για μειωμένες εκπομπές ρύπων (carbon free) η οποία ήδη εξετάζεται σε ερευνητικό επίπεδο από τους δύο μεγαλύτερους κατασκευαστές ναυτικών μηχανών. Η χρήση της προορίζεται τόσο για δίχρονους διπλού καυσίμου όσο και για τετράχρονους κινητήρες και τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα ήδη δημοσιεύονται [Z9].

5.1.6 Βιοκαύσιμα και βιοντίζελ

Μια σειρά άλλων τύπων καυσίμων άρχισαν επίσης να χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα βιοκαύσιμα - επίσης γνωστά ως FAME

(μεθυλαιθέρας λιπαρού οξέος) - καύσιμα που εξαγονται από απορρίμματα πλαστικών, μεθανόλη και άλλους νέους τύπους που δεν κυκλοφορούν ακόμη στην αγορά. Μερικά από αυτά τα καύσιμα παρουσιάζουν ιδιότητες που είναι προβληματικές για ναυτική χρήση, όπως είναι ο υψηλός κίνδυνος μικροβιακής ανάπτυξης. Ωστόσο, το βιοντίζελ δεν περιέχει θείο και έχει σχετικά ικανοποιητική λιπαντικότητα. Αυτοί οι τύποι καυσίμων παραμένουν ιδιαίτερα ακριβοί για να αποτελούν μια εναλλακτική επιλογή, αλλά μπορεί να είναι χρήσιμοι για ανάμειξη με άλλα καύσιμα με στόχο τη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο.

5.2 Ιδιότητες και προβλήματα με τη χρήση νέων καυσίμων

Η χρήση νέων καυσίμων προς εναρμόνιση με τον Κανονισμό IMO 2020 θα επιφέρει αύξηση του λειτουργικού κόστους, όμως δεν σηματοδοτεί απαραίτητα απαίτηση δέσμευσης νέων κεφαλαίων υπό μορφή επένδυσης. Τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητάς σε θείο στοιχίζουν περίπου 30% περισσότερο σε σχέση με τα κλασσικά καύσιμα βαρέως τύπου. Ενδεικτικά, τα χαμηλής περιεκτικότητας καύσιμα σε θείο και το Marine gas oil στοιχίζουν κατά μέσο όρο 440 \$/τόνο και 605 \$/τόνο αντιστοίχως, ενώ τα καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας 390 \$/τόνο. Προς μερική άμβλυνση της κοστολογικής επιβάρυνσης, δύναται να χρησιμοποιηθεί ένα μίγμα καυσίμων υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο για να επιτευχθεί το όριο του IMO. Άλλη μια λύση στην αύξηση της τιμής των καυσίμων είναι η στροφή των πλοιοκτητών στο slow-steaming, δηλαδή στη μείωση της ταχύτητας των πλοίων με σκοπό την μείωση του κόστους κατανάλωσης καυσίμου.

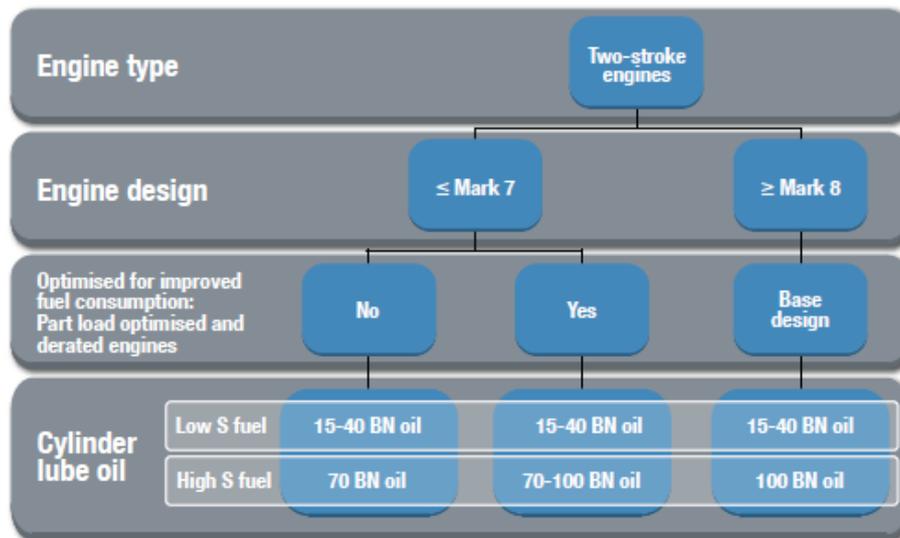
5.2.1 Ιδιότητες που πρέπει να πληρούν

Μέχρι τώρα, οι ναυτικοί κινητήρες χαμηλής ταχύτητας και τα λιπαντικά τους έχουν βελτιστοποιηθεί για λειτουργία σε βαρύ μαζούτ (HFO) με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (S). Κατά τη διάρκεια της καύσης, το S μετατρέπεται σε τριοξείδιο του θείου (SO₃). Σε συνδυασμό με νερό από την καύση και τον αέρα καθαρισμού, το SO₃ σχηματίζει θειικό οξύ (H₂SO₄). Όταν η θερμοκρασία της γόμωσης πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του θειικού οξέος και του νερού, ένα διαβρωτικό μείγμα συμπυκνώνεται στο τοίχωμα της γόμωσης. Τα υψηλά αλκαλικά λιπαντικά (λάδια υψηλού BN) καθαρίζουν το οξύ και αποτρέπουν τη διάβρωση των δακτυλίων εμβόλου και των επιφανειών των κυλίνδρων.

Όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα με λιγότερο από 0,1% S, όπως αποστάγματα με εξαιρετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (ULSFO) λιγότερη από 0,1% S, LNG, μεθανόλη, αιθάνιο και LPG, σχηματίζονται μόνο μικρές ποσότητες θειικού οξέος στο θάλαμο καύσης. Τα πρόσθετα λαδιού δεν χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον σκοπό που επιτελούν και τείνουν να συσσωρεύονται ως εναποθέσεις. Αυτές οι εναποθέσεις μπορεί να διαταράξουν τη μεμβράνη λαδιού λιπαντικού και να εμποδίσουν την κίνηση του δακτυλίου, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση του κινδύνου εμφάνισης γραμμώσεων στους δακτυλίους του εμβόλου. Ο σχηματισμός επικαθήσεων και η συνολική έλλειψη διάβρωσης αυξάνουν τον κίνδυνο στίλβωσης των διατρήσεων, γεγονός που θα

μπορούσε επίσης να οδηγήσει σε αυξημένη φθορά και γρατζουνιές. Για κινητήρες που λειτουργούν συνεχώς σε καύσιμα με λιγότερο από 0,1% S, συνιστάται η τοποθέτηση δακτυλίων εμβόλου με επίστρωση κεραμοειδούς και στους τέσσερις δακτυλίους για να μειωθεί ο κίνδυνος γρατζουνιών.

Στρατηγική λίπανσης: Οι επιπλοκές που προκαλούνται από τη συσσώρευση καταθέσεων μπορούν να αποφευχθούν χρησιμοποιώντας εσωτερικά λιπαντικά με ποσότητα πρόσθετων που σχηματίζουν χαμηλή εναπόθεση και καλές ιδιότητες απορρυπαντικότητας (λιπαντικά χαμηλού BN) και λειτουργώντας με τον χαμηλότερο συνιστώμενο ρυθμό τροφοδοσίας του λιπαντικού. Ο ρυθμός τροφοδοσίας θα πρέπει να μειωθεί στον ελάχιστο ρυθμό τροφοδοσίας που καθορίζεται στα πιο πρόσφατα service letters. Η γενική στρατηγική λίπανσης είναι η χρήση λαδιού με υψηλή περιεκτικότητα σε BN (70-100 BN) όταν λειτουργεί με καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο και χαμηλής σε BN (15-40 BN) όταν λειτουργεί με καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Μια εικόνα σχετικά με τον τρόπο επιλογής ενός κατάλληλου λιπαντικού για τον κύλινδρο φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 32: Επιλογή λαδιού κυλίνδρου για 2-Χ μηχανές

Το τρέχον πρότυπο ISO 8217-2012 για τα ναυτιλιακά καύσιμα καθορίζει τρεις διαφορετικές ποιότητες αποστάγματος (DM) και έναν αριθμό υπολειμματικών βαθμών (RM) (ασύντακτο). Ο Πίνακας 7 δείχνει τα βασικά χαρακτηριστικά για τα καύσιμα που πληρούν το μέγιστο όριο του 0,1% σε θείο. Τρία νέα καύσιμα με λιγότερο από 0,1% S παρασκευάζονται ως απάντηση στο 0,1% S όριο σε περιοχές SECA.

Αυτός ο νέος τύπος καυσίμων συνήθως αναφέρεται ως καύσιμα εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ULSFO), τα οποία συνήθως δεν είναι παραδοσιακά υπολείμματα, αλλά αναμειγμένα προϊόντα ή προϊόντα από διυλιστήρια που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως εκτενώς στα

καύσιμα πλοίων. Μία από τους δύο μεγαλύτερους κατασκευαστές ναυτικών μηχανών εκτιμά ότι αυτά τα καύσιμα είναι κατάλληλα για τους δίχρονου κινητήρες που αυτή διαθέτει. Ωστόσο, όπως πάντα, είναι σημαντικό να συνυπολογίσει κανείς τις προτάσεις των προμηθευτών των καυσίμων, τα εγχειρίδια και τα τεχνικά φυλλάδια αυτών για να διασφαλίσει ότι το καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Μερικά από τα καύσιμα βρίσκονται εντός των περιοχών τιμών DM και RM του προτύπου ISO 8217.

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά διαφόρων καυσίμων

Key characteristics	Unit	Limit	DMA	DMZ	DMB	RMA 10	RMB 30	RMD 80
Density at 15°C	kg/m ³	Max.	890	890	900	920	960	975
Viscosity at 40°C	mm ² /s (cSt)	Min.	2.00	3.00	2.00	-	-	-
		Max.	6.0	6.0	11.0	-	-	-
Viscosity at 50°C	mm ² /s (cSt)	Max.	-	-	-	10.0	30.0	80.0
Sulphur	% m/m	Max.	1.50	1.50	2.00	max. 0.1% in SECA		
Flash point	°C	Min.	60	60	60	60	60	60
Pour point (winter)	°C	Max.	-6.0	-6.0	0.0	0	0	30
Acid number	mg KOH/g	Max.	0.5	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5
Al+Si	ppm m/m	Max.	-	-	-	25	40	40
Lubricity	µm	Max.	520	520	520	-	-	-

Τα γενικά χαρακτηριστικά του ULSFO είναι:

- Μπορεί να έχουν υψηλότερο ιξώδες από τους βαθμούς αποστάγματος ISO 8217
- Μπορεί να περιέχουν Al + Si,
- Μπορεί να έχουν υψηλό σημείο ροής,
- Θα μπορούσαν να υπάρξουν προβλήματα συμβατότητας κατά την ανάμιξη με άλλα καύσιμα,

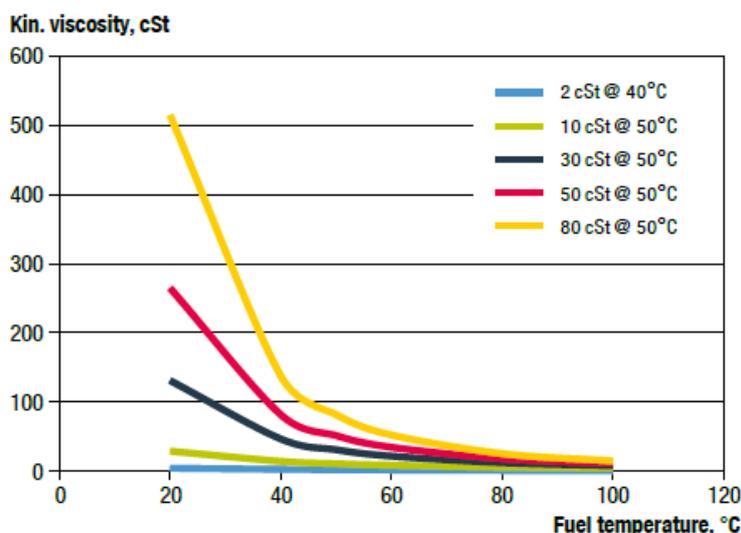
Βασικά χαρακτηριστικά παραδειγμάτων νέων τύπων καυσίμων με λιγότερο από 0,1% S υπάρχουν στον Πίνακα 8 παρακάτω. Οι περιοχές με κίτρινο χρώμα περιλαμβάνουν τιμές που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή.

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά νέων τύπων καυσίμων

Key characteristics	Unit	Limit	Supplier A	Supplier B	Supplier C	Supplier D	Supplier E
Density at 15°C	kg/m ³	Max.	895-915	870-930	928	910	845
Viscosity at 40°C	mm ² /s (=cSt)	Min.	40	-	45	-	-
		Max.	75	-	65	-	-
Viscosity at 50°C	mm ² /s (=cSt)	-	-	8-25	30-40	65	8.8
Sulphur	% m/m	Max.	0.1	0.1	0.1	0.095	0.03
Flash point	°C	Min.	70	60-80	70	60	70
Pour point (winter)	°C	Max.	15-30	18-21	20-25	20	21
Acid number	mg KOH/g	Max.	0.1	0.1-0.2	2.5	2.5	0.04
Al+Si	ppm m/m	Max.	<0.3	12-15	10-20	17	<1
Lubricity	µm	Max.	<320	-	-	520	328

Το προτεινόμενο εύρος τιμών **ιξώδους** καυσίμου για τους δίχρονους κινητήρες (στην είσοδο του κινητήρα) φαίνεται στον Πίνακα 8. Το χαμηλότερο όριο ιξώδους καυσίμου είναι 2 cSt. Η Εικόνα 34 δείχνει τυπικές σχέσεις ιξώδους καυσίμου και θερμοκρασίας για καύσιμα πλοίων. Για χαμηλές τιμές ιξώδους,

πρέπει να προσέχει κανείς ώστε να μην θερμανθεί το καύσιμο πάρα πολύ και έτσι να μειωθεί το ιξώδες.



Εικόνα 33: Ιξώδες συναρτήσει της θερμοκρασίας καυσίμου [Z7]

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των νέων καυσίμων (για εκτεταμένη χρήση) είναι ότι δεν έχουν γίνει οι απαραίτητες δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης. Σε πρώτη φάση, αναμένεται ότι κάθε διυλιστήριο θα χρησιμοποιεί το δικό του μίγμα καυσίμου, εγείροντας έτσι ανησυχίες στους πλοιοκτήτες για την πιθανή επίπτωση των διαφορετικών μιγμάτων στις μηχανές των πλοίων. Επίσης οι μηχανικοί της MAN προτείνουν στους πλοιοκτήτες να επενδύσουν σε κεραμικό έμβολο εάν πρόκειται να χρησιμοποιήσουν καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, καθώς και να αυξάνουν την αλκαλικότητα του λιπαντικού που χρησιμοποιούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα καθώς οι μηχανές θα υπόκεινται σε μεγαλύτερη φθορά. Μείζον θέμα είναι και η ετοιμότητα των διυλιστηρίων και των παρόχων για τα νέα καύσιμα η οποία είναι αμφίβολη όπως και η διαθεσιμότητά τους σε όλα τα λιμάνια η οποία καθίσταται ακόμα πιο δύσκολη για τα μικρότερα λιμάνια.

5.2.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία το πρώτο εξάμηνο του 2020

Η Lubrizol Corp δημοσίευσε έρευνα [Z8] σχετικά με τις επιπτώσεις του πολύ χαμηλού θείου μαζούτ (VLSFO) στη δημιουργία επικαθήσεων και την απόδοση της λίπανσης σε δίχρονους κινητήρες. Τα παλαιά λιπαντικά κυλίνδρων ενδέχεται να μην προστατεύουν τους κινητήρες πλοίων από τα μεταβλητά χαρακτηριστικά τέτοιων καυσίμων, σύμφωνα με τον παγκόσμιο προμηθευτή πρόσθετων υλών [Z2].

Οι δοκιμές σε ναυτικό κινητήρα αποκάλυψαν υψηλό βαθμό μεταβλητότητας στα χαρακτηριστικά σχηματισμού επικαθήσεων και καύσης μεταξύ των μιγμάτων VLSFO, ακόμη και χρησιμοποιώντας δείγματα που αποκτήθηκαν από μια σχετικά μικρή γεωγραφική περιοχή. Η εκτεταμένη χρήση του VLSFO θα

μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένη επίπτωση των εναποθέσεων στον κινητήρα και δαπανηρή ζημιά εάν τα λιπαντικά που επιλέγονται από τους πλοιοκτήτες δεν είναι αρκετά ανθεκτικά για να διατηρήσουν επαρκώς την καθαριότητα του κινητήρα.

Τα ευρήματα του Lubrizol φαίνεται να υποστηρίζονται από πρώιμες αναφορές για υψηλά επίπεδα ιζημάτων - που υπερβαίνουν τις προδιαγραφές του προτύπου καυσίμων πλοίων ISO 8217: 2017 - σε πολλά δείγματα δοκιμής καυσίμου θείου 0,5% που ελήφθησαν στο Χιούστον και τη Σιγκαπούρη. Τα καύσιμα με υψηλά επίπεδα ιζημάτων μπορούν να οδηγήσουν σε συσσώρευση λάσπης στα συστήματα αποθήκευσης, χειρισμού και επεξεργασίας καυσίμων, τα οποία θα μπορούσαν να βλάψουν τους κινητήρες των πλοίων.



Εικόνα 35: Έλεγχος για επικαθήσεις σε κυλίνδρους

«Είναι σαφές ότι ορισμένα χαρακτηριστικά των VLSFO εισάγουν μεταβλητότητα που θα απαιτούν λιπαντικά με βελτιωμένη απόδοση σχετικά με τη διαχείριση επικαθήσεων», τονίζει ο Harriet Brice, διευθυντής τεχνολογίας λιπαντικών ναυτικού κινητήρα ντίζελ, Lubrizol. «Η χρήση ενός σταθερού (σε απόδοση) λιπαντικού θα συμβάλει στη μείωση της επίδρασης αυτής της μεταβλητότητας στον κινητήρα.»

Τα λιπαντικά κυλίνδρων σε ναυτικούς κινητήρες για καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο δεν παρουσίασαν αυτόν τον βαθμό σχηματισμού εναποθέσεων (κατά το παρελθόν) αλλά μπορεί να μην είναι αρκετά ανθεκτικά για να ανταπεξέλθουν στα μεταβλητά χαρακτηριστικά καυσίμου του VLSFO.

Με βάση αυτήν την έρευνα, η Lubrizol ανέπτυξε και δοκίμασε αυστηρά τη δική της, χαμηλή σε περιεκτικότητα σειρά με πρόσθετα χαμηλού BN για λάδια κυλίνδρων που θα χρησιμοποιηθούν με VLSFO. Η προκύπτουσα σύνθεση παρουσιάζει χημεία που είναι νέα στον τομέα λιπαντικών σε πλοία και έχει σχεδιαστεί ειδικά για να βοηθά τους κινητήρες να αποδίδουν αξιόπιστα ενώ καίει 0,5% καύσιμα θείου σε ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων.

Η χρήση νέων χημικών προσθέτων δεν θα σταματήσει το 2020 καθώς η αγορά καυσίμων της ναυτιλίας συνεχίζει να διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, τα νέα καύσιμα χαμηλού άνθρακα και ουδέτερου άνθρακα αναμένεται να είναι πιο φιλικά για την κατάσταση του κινητήρα. Η πολύχρονη επένδυση της Lubrizol στην έρευνα, οι στενοί δεσμοί με τη ναυτική βιομηχανία και η πρόσθετη εμπειρία σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς θα την καταστήσουν πρωτοποριακή για να προσφέρει τις λύσεις που χρειάζεται η ναυτιλία [Z5].

5.3 Επένδυση σε scrubber

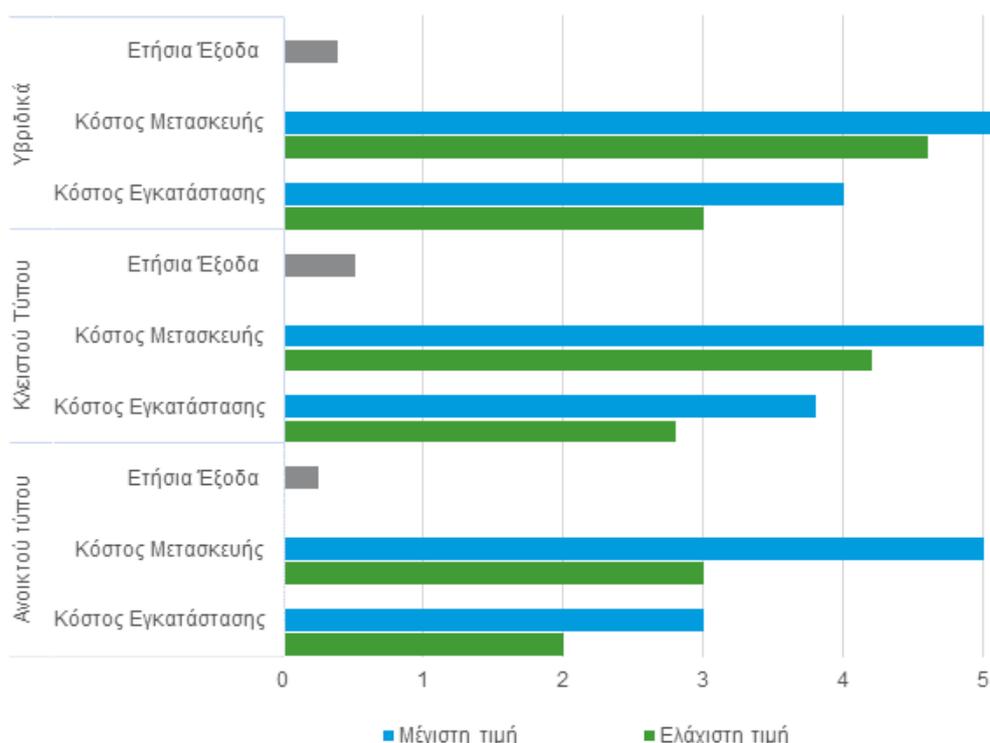
Η επιλογή νέου καυσίμου ή heavy fuel oil (με υποχρεωτική χρήση συστήματος scrubber) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η τιμή των καυσίμων, ο απαιτούμενος χρόνος αποπληρωμής (payback) κ.α. Δυστυχώς, και λόγω των πρόσφατων εξελίξεων με την πανδημία, η ακριβής εκτίμηση των αναγκών καθώς και των τιμών των καυσίμων καθίσταται επισφαλής, οπότε θα προχωρήσουμε σε έναν υπολογισμό του χρόνου αποπληρωμής της επένδυσης αγοράς και εγκατάστασης συστημάτων scrubbers με βάση μέσες τιμές προηγούμενων ετών καθώς και προβλέψεων που έχουν πρόσφατα δημοσιευθεί από σχετικούς φορείς.

Μια πρόσφατη εκτίμηση θεωρεί ότι τα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο καύσιμα (νέα) κοστίζουν κατά 30% περισσότερα από το HFO (heavy fuel oil) ενώ η προμήθεια και τοποθέτηση ενός scrubber κοστίζει περίπου 2.5 εκατομμύρια ευρώ για πλοίο που χρησιμοποιεί HFO.

Εναλλακτική λύση αποτελεί η εγκατάσταση των συστημάτων καθαρισμού (scrubbers) για τον περιορισμό εκπομπών κυρίως SOx οι οποίες δημιουργούνται από καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Τα scrubbers ελέγχουν και παρεμποδίζουν την μόλυνση της ατμόσφαιρας καθώς δεν επιτρέπουν στα επιβλαβή σωματίδια να απελευθερώνονται στο περιβάλλον μέσω των καυσαερίων. Υπάρχουν τριών ειδών scrubbers που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία: τα κλειστού τύπου, τα ανοιχτού τύπου και τα υβριδικά. Στα κλειστού τύπου (closed loop), τα λύματα παραμένουν σε ειδικές δεξαμενές μέσα στο πλοίο και εκφορτώνονται στα λιμάνια, ενώ στα ανοιχτού τύπου (open loop) τα λύματα αποβάλλονται μέσα στη θάλασσα. Τα υβριδικά προσφέρουν την επιλογή ανάμεσα και στους δύο τύπους, ανοιχτού ή κλειστού, αναλόγως τον εκάστοτε προγραμματισμό πλεύσης του στόλου. Το πρόβλημα με τα ανοιχτού τύπου scrubbers είναι ότι σύμφωνα με μελέτες της επιστημονικής κοινότητας τα λύματα ενδέχεται να επιβαρύνουν το περιβάλλον, με αποτέλεσμα κάποια λιμάνια αλλά και ολόκληρες χώρες να έχουν αρχίσει ήδη να τα απαγορεύουν (ενδεικτικά αναφέρονται το Fujairah, το Primorsk, το Cardiff, όλα τα εσωτερικά ύδατα της Κίνας, τρεις Αμερικάνικες πολιτείες -μεταξύ αυτών η Καλιφόρνια-, η Σιγκαπούρη κλπ). Άρα, η επιλογή του τύπου πρέπει να λαμβάνει υπόψη την περιοχή στην οποία δραστηριοποιείται το εκάστοτε πλοίο.

Με στοιχεία από την Xclusiv Shipbrokers για το έτος 2018 τα κόστη των scrubbers με βάση ένα VLCC, δηλαδή ένα πολύ μεγάλο πλοίο μεταφοράς αργού πετρελαίου είναι τα εξής: Τα ανοιχτού τύπου για νεόκτιστο πλοίο είναι από \$2-\$3 εκατ., η μετασκευή \$3-\$5 εκατ. και τα ετήσια έξοδα λειτουργίας περίπου στις \$250 χιλ. Τα κλειστού τύπου σε νεόκτιστο από \$2,8-\$3,8 εκατ. η μετασκευή \$4,2-\$5 εκατ. και το ετήσιο κόστος \$520 χιλ. Τα υβριδικά scrubbers από \$3-\$4 εκατ. σε νέα πλοία, με την μετασκευή να κοστίζει \$4,6-\$5,4 εκατ. και τα ετήσια έξοδα να ανέρχονται στα \$390 χιλ.

Εκτιμώμενα κόστη και έξοδα των ναυτιλιακών εταιριών κατά την εφαρμογή εναλλακτικών λύσεων scrubbers για τη συμμόρφωση με τον κανονισμό IMO 2020 (ποσά σε \$ εκατ.)



Εικόνα 34: Κόστος επένδυσης σε scrubber [13]

Μειονεκτήματα εγκατάστασης και λειτουργίας scrubber

Παρατηρείται ότι το κόστος δε λαμβάνεται υπόψη μόνο στην αρχική επένδυση των scrubbers αλλά και κατά τη συνέχεια της χρήσης τους. επίσης, τα scrubbers καταναλώνουν χώρο στο κατάστρωμα κάτι το οποίο μπορεί να μην αποτελεί πρόβλημα σε ένα φορτηγό πλοίο (ξηρού φορτίου ή πετρελαιοφόρου) αλλά να δεσμεύει πολύτιμο χώρο σε ένα πλοίο μεταφοράς κοντέινερ. Άλλο ένα σημαντικό αρνητικό είναι ότι η λίστα παραγγελιών στα ναυπηγεία για την εγκατάσταση scrubber είναι τέτοια σε μέγεθος με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτό να μπορεί να εξυπηρετηθεί ολόκληρος ο παγκόσμιος στόλος από το τέλος του 2019 και έπειτα.

Με βάση επισκόπηση του “Exhaust Gas Cleaning Systems Association” για το έτος 2018, το 43% όλου του στόλου παγκοσμίως (κατά μέσο όρο) είχε μετασκευαστεί με scrubbers ενώ το 37% το έχει εγκαταστήσει σε νεόκτιστα πλοία. Στον παρακάτω πίνακα (μελέτη Clarksons Research) δείχνουμε και τα ποσοστά ανά τύπο πλοίου.

Πίνακας 9 Εφοδιασμός πλοίων ανά κατηγορία με scrubber

Dry Bulk	Scrubbers	Total Fleet	% of Fleet
Capesize 100,000+	384	1723	22.29%
Panamax 65-100,000	179	2554	7.01%
Handymax 40-65,000	193	3613	5.34%
Handysize 10-40,000	57	3410	1.67%
Total	813	11300	7.19%

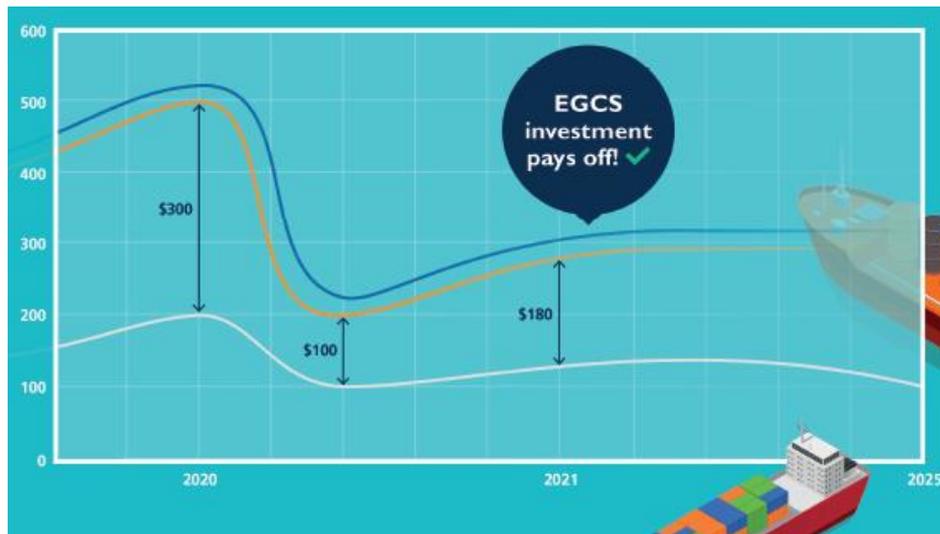
Tankers	Scrubbers	Total Fleet	% of Fleet
VLCC 200,000+	239	729	32.78%
Suezmax 125 -200,000	143	568	25.18%
Aframax 85 -125,000	173	1000	17.30%
Panamax 55 - 85,000	21	457	4.60%
Small 0 - 55,000	318	3925	8.10%
Total	894	6679	13.39%

Containers	Scrubbers	Total Fleet	% of Fleet
15,000+ teu	60	120	50.00%
12 - 14,999 teu	97	236	41.10%
8 - 11,999 teu	135	619	21.81%
6 - 7,999 teu	27	270	10.00%
3 - 5,999 teu	56	1093	5.12%
100-2,999 teu	162	2937	5.52%
Total	537	5275	10.18%



5.3.1 Περίοδος αποπληρωμής επένδυσης σε scrubber

Ακολουθώντας εκτιμήσεις αναλυτών του Bloomberg, εκτιμάται ότι η διαφορά τιμών (price spread) μεταξύ του HFO και του VLSFO θα είναι μεταξύ 165 και 300 δολαρίων. Μάλιστα δίνεται το παρακάτω εποπτικό σχήμα:



Εικόνα 35: Πρόβλεψη διαφοράς τιμής καυσίμων [Θ1]

Παρακάτω γίνεται ο υπολογισμός για τα κόστη επένδυσης σε scrubber:

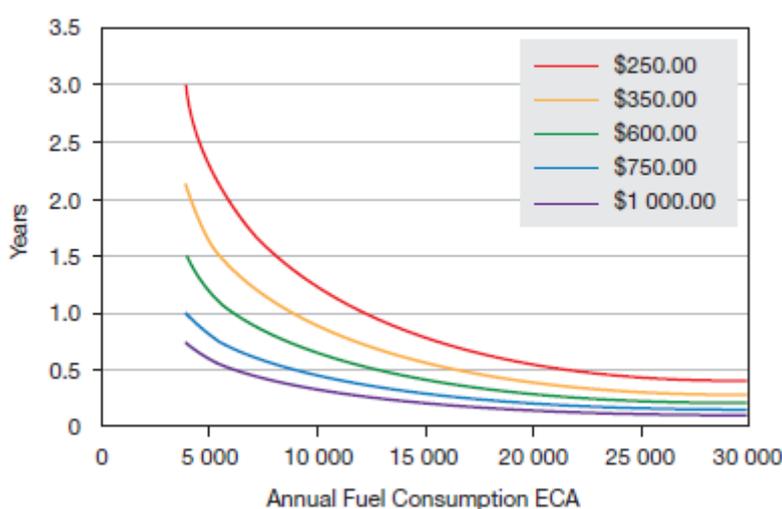
Επένδυση συστήματος (δολάρια)	
Σύστημα scrubber	1250
Engineering	125
Εγκατάσταση	750
OFF-HIRE	300
Σύν.	2415 k

Κέρδη από καύσιμα (Δολ.)	
Διαφορά τιμής (ανά τόνο)	180
Κατανάλωση καυσίμου (τόνοι την ημέρα)	40 X

Σύν. 720

Περίοδος αποπληρωμής: $2415/7.2 = 335$ Ημέρες

Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε και αντίστοιχη μελέτη που έχει γίνει από την εταιρία Wärtsilä. Στην Εικόνα 36 φαίνεται η εκτίμηση του μεγέθους Return on investment συναρτήσει της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου.



Εικόνα 36: Return on investment συναρτήσει της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου [Θ2]

5.3.2 Οι επιλογές της ελληνικής ναυτιλιακής βιομηχανίας

Υπάρχουν αρκετοί πλοιοκτήτες οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η τοποθέτηση scrubbers στα πλοία δεν αποτελεί την ιδεατή λύση, δεδομένου ότι αυτό που κάνουν είναι να μεταφέρουν τη ρύπανση από τον αέρα στη θάλασσα (ενώ τελικά επιλέγουν τη λύση του slow steaming).

Αρκετοί, ωστόσο, Έλληνες πλοιοκτήτες έχουν ταχθεί υπέρ των scrubbers, προχωρώντας στις απαραίτητες ενέργειες προκειμένου να εξοπλίσουν ανάλογα τα πλοία τους. Πρόσφατο παράδειγμα αποτελούν οι πλοιοκτήτες των γνωστών ναυτιλιακών εταιριών οι οποίοι έχουν αποφασίσει να τοποθετήσουν scrubbers στα περισσότερα πλοία τους, με εξαίρεση δύο. Η συγκεκριμένη επένδυση έχει κόστος 350 εκατ. δολάρια. Ενδεικτικά αναφέρουμε τέσσερις περιπτώσεις ναυτιλιακών εταιριών στις οποίες αποτυπώνεται η επικρατούσα τάση, για την προμήθεια και λειτουργία συστημάτων scrubbers.

Ναυτιλιακή εταιρία – 1:

Η εταιρία επέλεξε μεν τη λύση των scrubbers, ωστόσο, κατάφερε να εξασφαλίσει χρηματοδότηση για την τοποθέτηση τους. Συγκεκριμένα προχώρησε στη σύναψη συμφωνιών με τους ναυλωτές της εταιρείας για την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers) σε πέντε από τα πλοία της, τύπου Capesize. Μάλιστα, έχει εξασφαλίσει την έγκαιρη προμήθεια του εξοπλισμού από την Hyundai Materials της Ν. Κορέας και έχει ήδη κλείσει ημερομηνίες εγκατάστασης σε μεγάλο ναυπηγείο της Κίνας. Το έργο αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί, ενώ μετά την ολοκλήρωση του θα ξεκινήσουν οι χρονοναυλώσεις των σχετικών πλοίων διάρκειας μεταξύ τριών έως πέντε ετών με τρεις ναυλωτές ξηρού φορτίου. Η συνολική επένδυση αναμένεται να ξεπεράσει τα 12,5 εκατ. δολάρια, συμπεριλαμβανομένου του κόστους εξοπλισμού και εγκατάστασης, τα οποία θα καλυφθούν εξ ολοκλήρου από τους ναυλωτές. Παράλληλα, η ναυτιλιακή βρίσκεται σε συζητήσεις για την εφαρμογή αντίστοιχων επενδύσεων και σε άλλα πλοία της, προκειμένου κατά την εφαρμογή των νέων κανονισμών του IMO, όλος ο στόλος της να είναι συμβατός με αυτούς.

Ναυτιλιακή εταιρία – 2:

Η ναυτιλιακή συμφώνησε να προχωρήσει στον εξοπλισμό πέντε πλοίων της post panamax με σύστημα καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers), εν όψει της έναρξης εφαρμογής του νέου ορίου εκπομπών θείου την 1η Ιανουαρίου 2020. Πρόκειται για τα πλοία χωρητικότητας 9,403 TEU, κατασκευής 2014, MSC Azon, MSC Ajaccio και MSC Amalfi, για τα οποία τα υφιστάμενα ναύλα ανέρχονται σε 43.000 δολ. ημερησίως, καθώς και τα χωρητικότητας 8,827 TEU MSC Athens και MSC Athos, κατασκευής 2013, με ημερήσια ναύλα 42.000 δολ. ημερησίως.

Ναυτιλιακή εταιρία – 3:

Η εταιρεία προχώρησε σε συμφωνία με την Cosco Shipping Heavy Industry για την εγκατάσταση συστήματος καθαρισμού καυσαερίων τύπου PureSOx στα μισά περίπου πλοία του στόλου της, κυρίως στα kamsarmaxes και τα post-panamax. Ειδικότερα, η εταιρία θα εγκαταστήσει scrubbers σε 13 post-panamaxes, 5 kamsarmaxes, καθώς και σε ένα capesize που απέκτησε πρόσφατα, με option για ένα ακόμα. Η εγκατάσταση αναμένεται να ξεκινήσει στο δεύτερο τρίμηνο του τρέχοντος και να ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος του έτους. Το κόστος εκτιμάται στα 2 εκατ. δολάρια για κάθε πλοίο.

Ναυτιλιακή εταιρία – 4:

Υπέρμαχοι των scrubbers είναι οι πλοιοκτήτες αυτής της εταιρίας οι οποίοι έχουν εμπλουτίσει τον εξοπλισμό του στόλου της εταιρείας του με σύστημα καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers), με το αναμενόμενο μέσο κόστος για τις εργασίες, συμπεριλαμβανομένης και της εγκατάστασης, να υπολογίζεται σε κάτω από τα 2 εκατ. δολ. ανά πλοίο. Η εταιρία μάλιστα, έχει εξασφαλίσει για το εγχείρημα χρηματοδότηση προκειμένου να καλύψει έως και 70% του εν λόγω

κόστους και αναμένει ότι το υπόλοιπο ποσό θα καλυφθεί από τις λειτουργικές ταμειακές ροές και τα μετρητά. Σημειώνεται ότι τον περασμένο Αύγουστο, η εταιρία ολοκλήρωσε με επιτυχία την πρώτη εγκατάσταση scrubber σε πλοίο της, ενώ αυτό βρισκόνταν στη θάλασσα.

Πρόσφατη μελέτη για τη χρήση scrubbers σε διεθνές επίπεδο (Ιούνιος 2020)

Σε ανάλυση για το μέλλον των scrubbers στη διεθνή ναυτιλία προέβη η εταιρεία Pacific Green Technologies (PGT), σε άρθρο που δημοσιεύτηκε στην ιστοσελίδα της, τη Δευτέρα 22 Ιουνίου 2020.

Σύμφωνα με όσα αναφέρει η PGT, η τιμή του Brent Crude έχει πλέον ξεπεράσει τα \$42 ανά βαρέλι και οι παγκόσμιες εκτιμήσεις κάνουν λόγο για περαιτέρω μακροπρόθεσμες αυξήσεις. Παράλληλα, η υφιστάμενη κατάσταση σχετικά με τις τιμές του πετρελαίου μεγαλώνει τη διαφορά της τιμής του καυσίμου HSFO και του περιβαλλοντικά φιλικότερου LSFO, η τιμή του οποίου αναμένεται να αυξηθεί αρκετά. Ως εκ τούτου, η PGT ανέφερε ότι η χρήση scrubbers αποτελεί ελκυστική λύση για τους μεταφορείς, όχι μόνο για τη συμμόρφωσή τους με τον κανονισμό του IMO 2020, αλλά και για την εξοικονόμηση σημαντικών κονδυλίων. Επιπλέον, πολλά διυλιστήρια δεν έχουν ακόμη την οικονομική δυνατότητα αναβάθμισης των εγκαταστάσεών τους για την αποκλειστική παραγωγή LSFO, γεγονός που, τουλάχιστον μεσοπρόθεσμα, θα επιφέρει την αφθονία του HSFO στην παγκόσμια αγορά.

Το άρθρο της PGT αναφέρει επίσης τους κινδύνους που ενέχει η αλλαγή των καυσίμων των πλοίων, αναφέροντας ότι πολλοί πλοιοκτήτες δεν είναι έτοιμοι να αντιμετωπίσουν τα τεχνικά προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν. Το LSFO αποτελεί προϊόν ανάμειξης αποσταγμάτων, κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα απρόβλεπτο. Κάθε διαφορετική παρτίδα LSFO μπορεί να έχει εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά και η χρήση του σε ένα πλοίο μπορεί να επιφέρει τεχνικά προβλήματα ή ακόμα και να καταστρέψει τη μηχανή του, ανέφερε η PGT.

Αν και οι απόψεις σχετικά με τη χρήση scrubbers στη ναυτιλία δίστανται, εντούτοις φαίνεται πως, τουλάχιστον μεσοπρόθεσμα, τα scrubbers θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται από τους μεταφορείς. Τα πλέον αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα των scrubbers είναι η πλήρης συμμόρφωση με το IMO 2020 (sulphur cap), καθώς και η εξοικονόμηση χρημάτων για τους πλοιοκτήτες.

5.4 Προβλήματα σε scrubbers ανοικτού βρόχου

Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς, τα scrubbers μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολλούς τρόπους. Ενώ τα scrubbers κλειστού βρόχου διατηρούν τις εκπομπές θείου για ασφαλέστερη απόρριψη στο λιμάνι, τα scrubbers ανοικτού βρόχου απελευθερώνουν ρύπους πίσω στη θάλασσα αφού μετατρέψουν το διοξείδιο

του θείου σε θειικό οξύ. Υπάρχουν επίσης υβριδικά scrubbers, τα οποία εναλλάσσονται μεταξύ ανοικτού και κλειστού βρόχου ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες όπως είναι οι τοπικοί κανόνες που ενδέχεται ή όχι να απαγορεύουν την απόρριψη νερού.

Μέχρι στιγμής, τα συστήματα ανοικτού βρόχου παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση στον κλάδο σε σύγκριση με τις κλειστές μονάδες. Σύμφωνα με την DNV GL, επί του παρόντος υπάρχουν 3.756 σκάφη με scrubbers - μια τεράστια αύξηση από τους 767 το 2018 - και μόνο 65 έχουν κλειστό βρόχο. Ο αριθμός αυτός εκτιμάται ότι θα υπερβεί τα 4.000 τη στιγμή που θα τεθεί σε ισχύ η νομοθεσία.

Σύμφωνα με τον Holst-Mikkelsen, οι εφοπλιστές προτιμούν τα συστήματα ανοικτού βρόχου από τον κλειστό, επειδή «είναι πολύ εύκολο στην εγκατάσταση, απαιτούν λιγότερη συντήρηση και δεν απαιτούν αποθήκευση για τα απόβλητα υλικά - καθώς το νερό αντλείται απευθείας στη θάλασσα μετά την επεξεργασία στο πλοίο» [H1].

Επικρατεί μια έντονη συζήτηση σχετικά με το εάν τα scrubbers ανοικτού βρόχου αντιπροσωπεύουν μια περιβαλλοντικά ορθή επιλογή. Μια έκθεση του Independent το Σεπτέμβριο του 2019 έφερε το ζήτημα των scrubbers ανοικτού βρόχου στο προσκήνιο, αποκαλύπτοντας ότι οι ναυτιλιακές εταιρείες έχουν ήδη επενδύσει πάνω από 12 δισ. Δολάρια σε scrubbers ανοικτού βρόχου, έτσι ώστε τα πλοία να πληρούν τα πρότυπα του IMO. Η έρευνα ισχυρίστηκε ότι οι εφοπλιστές το έκαναν, παρόλο που γνώριζαν ότι τα scrubbers «έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στην άγρια ζωή στα βρετανικά ύδατα και σε όλο τον κόσμο».

Στην έρευνα συμμετείχε η εταιρία Μεταφορών και Περιβάλλοντος Lucy Gilliam, η οποία χαρακτήρισε τα scrubbers ανοικτού βρόχου ως «συσκευές εξαπάτησης που επιτρέπουν στις ναυτιλιακές εταιρείες να πλένουν τα χέρια τους από τις περιβαλλοντικές τους ευθύνες».

Σε απάντηση στο Independent, ο IMO ανέφερε ότι εγκρίνει τη χρήση scrubbers ανοικτού βρόχου, θεωρώντας τους ως «ισοδύναμο» - το οποίο ορίζεται ως «οποιοδήποτε εξάρτημα, συσκευή ή συσκευή που θα τοποθετηθεί σε πλοίο ή άλλες διαδικασίες, εναλλακτικά καύσιμα, ή μέθοδοι συμμόρφωσης που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική λύση». Ωστόσο, έχει εκδώσει αυστηρές οδηγίες για την απόρριψη του νερού πλύσης από συστήματα καθαρισμού καυσαερίων. «Το νερό πλύσης πρέπει να πληροί αυστηρά κριτήρια, έτσι ώστε το νερό απόρριψης να έχει pH όχι μικρότερο από 6,5», δήλωσε εκπρόσωπος του IMO στην Ship Technology Global.

Η Μαλαισία προσχώρησε στη λίστα των εθνών και των περιοχών που προχώρησαν στην απαγόρευση της χρήσης scrubbers ανοικτού βρόχου ενόψει της εφαρμογής του sulfur cap IMO2020 [H2].

"Η Μαλαισία απαγορεύει την απόρριψη νερού πλύσης από [scrubbers ανοικτού βρόχου] στο νερό σε απόσταση 12 ναυτικών μιλίων από την πλησιέστερη γη)",

δήλωσε η ναυτιλιακή ρυθμιστική αρχή Laut Laut Malaysia σε δήλωση που δημοσιεύτηκε στην ιστοσελίδα της στις 12 Νοεμβρίου. "Συνιστάται στους πλοιοκτήτες από τις εποπτικές αρχές στους λιμένες της Μαλαισίας να συμμορφωθούν ως προς το μαζούτ ή να αλλάξουν σε σύστημα κλειστού βρόχου (εάν το υβριδικό σύστημα λειτουργεί σε ανοικτό βρόχο) πριν εισέλθουν στα ύδατα και τα λιμάνια της Μαλαισίας."

Το πρακτορείο δημοσίευσε επίσης μια ανακοίνωση πρόθεσης να επιβάλει το νέο sulfur cap καυσίμου IMO2020 0,5% όταν τεθεί σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου.

Τα scrubbers ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό για να συλλέξουν οξείδια του θείου από το ρεύμα εξάτμισης του πλοίου, μειώνοντας τις εκπομπές SOx σε επίπεδο ισοδύναμο ή χαμηλότερο από αυτό που παράγεται με την καύση συμβατού καυσίμου 0,5%-θείου. Το νερό πλύσης απορρίπτεται στο θαλάσσιο περιβάλλον, προκαλώντας ανησυχίες σχετικά με το εάν οι ρύποι της καπνοδόχου μεταφέρονται από τη μία διαδρομή εκκένωσης στην άλλη. Η Σιγκαπούρη, η Φουτζάιρα, η Καλιφόρνια, το Βέλγιο και η Κίνα έχουν ήδη εφαρμόσει μερική ή πλήρη απαγόρευση των απορρίψεων του νερού πλύσης ανοιχτού βρόχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η καταγραφή των τεχνολογιών και συστημάτων scrubbers καθώς και η επίδραση στους ρύπους (διοξείδιο του θείου) και την πίεση αντίθλιψης υπερπληρωτή ναυτικού κινητήρα. Με βάση την ανάλυση που έγινε, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- 1) Με τις συσκευές scrubbers μπορούμε να πετύχουμε μείωση των εκπομπών SO₂ από τα πλοία μέχρι και κατά 98% προκειμένου να επιτευχθεί συμμόρφωση με τον κανονισμό IMO 2020. Το πρόβλημα της μείωσης των εκπομπών καυσαερίων (ιδιαίτερα των οξειδίων του αζώτου και του θείου) έχει αναδειχθεί ως μείζον και ο κανονισμός IMO 2020 θέτει τους κανόνες και τους περιορισμούς
- 2) Υπάρχουν τρεις τύποι συσκευών scrubbers: ανοικτού, κλειστού βρόχου καθώς και υβριδικού. Οι περισσότεροι πλοιοκτήτες χρησιμοποιούν τους scrubbers ανοικτού τύπου διότι είναι οι πιο απλοί στην κατασκευή, τη λειτουργία ενώ έχουν και χαμηλότερο κόστος. Όμως, υπάρχουν βάσιμες υποψίες ότι ρυπαίνουν το θαλασσινό νερό (μιας και αυτό χρησιμοποιούν για την πλύση) καθώς το εναποθέτουν στη θάλασσα με αποτέλεσμα αρκετές χώρες να απαγορεύουν την κίνηση πλοίων με scrubber ανοικτού τύπου όταν αυτά πλησιάζουν τα λιμάνια
- 3) Η απαιτούμενη ισχύς στους ξηρούς scrubbers SO_x είναι σημαντικά μικρότερη από ότι στους υγρούς scrubbers SO_x. Επίσης, ο ρυθμός ροής του νερού πλυσίματος σε έναν scrubber SO_x ανοικτού βρόχου είναι υψηλότερος ($\approx 45\text{m}^3/\text{MWh}$) από τον scrubber SO_x κλειστού βρόχου ($\approx 20\text{m}^3/\text{MWh}$), σχεδόν δηλαδή διπλάσιος
- 4) Ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα (περιοχή τιμών από 2 MW ως 80 MW), οι κατασκευαστές scrubbers έχουν αναπτύξει και διαθέτουν στην αγορά διαφορετικά συστήματα (σειρές προϊόντων) που διαφέρουν ως προς τον όγκο (κυρίως), και το κόστος. Αυξημένος όγκος δημιουργεί με τη σειρά του θέματα ευστάθειας του πλοίου η οποία πρέπει να μελετηθεί εκ νέου
- 5) Σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του scrubber αποτελεί πρωτίστως και η επίδραση στην πίεση αντίθλιψης καθώς και το απαιτούμενο ταίριασμα με τον υπερπληρωτή. Οι σημαντικότεροι κατασκευαστές κινητήρων έχουν εκδώσει τεχνικές οδηγίες στις οποίες αναφέρεται ότι η συνολική πίεση αντίθλιψης δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 600 mmWC στο 100% MCR του φορτίου της μηχανής. Σε μια περιοχή τιμών μεταξύ 400 και 500 mmWC και σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται να γίνει μεταβολή στον υπερπληρωτή. Τέλος, η αυξημένη πίεση αντίθλιψης προκαλεί επιπλέον θερμική καταπόνηση στον κινητήρα

- 6) Η αύξηση της πίεση αντίθλιψης λόγω της λειτουργίας του scrubber προκαλεί αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου περίπου κατά 0.8% (μετρήσεις από κατασκευαστή scrubber)
- 7) Τα καυσαέρια αφήνουν τον scrubber με μια θερμοκρασία κοντά στους 60° C. Για την ομαλή λειτουργία απαιτείται συμβατότητα και καλή συνεργασία του scrubber με το σύστημα SCR, το οποίο πρέπει να είναι υψηλής πίεσης
- 8) Όσον αφορά τα μετρητικά συστήματα, αυτά ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τα επεμβατικά (με τη χρήση κατάλληλου probe) και τα μη επεμβατικά. Αν υπάρχει η δυνατότητα προμήθειας, προτιμώνται τα δεύτερα διότι η μέτρηση γίνεται με μη επεμβατικό (στο καυσαέριο) τρόπο
- 9) Παρόλο που συνήθως εφαρμόζεται συνδυασμός διορθωτικής και προληπτικής συντήρησης, συνιστάται η προγνωστική συντήρηση (η οποία απαιτεί αποδοτικούς μαθηματικούς αλγορίθμους για την έγκαιρη παρούσα και μελλοντική κατάσταση υγείας των scrubbers)
- 10) Η περίοδος αποπληρωμής (payback time) μιας επένδυσης σε scrubber υπολογίζεται ότι είναι περίπου ενάμισης χρόνος (θεωρώντας αρχική επένδυση περίπου στα 2.5 εκατομμύρια ευρώ και τιμές καυσίμων δευτέρου εξαμήνου του 2020). Για τη διετία 2019-2020, υπάρχει σαφής προτίμηση στην επένδυση σε scrubbers και τη χρήση μαζούτ (παράλληλα) σε σχέση με τη χρήση κινητήρων με χαμηλά σε θείο καύσιμο. Όμως, η διαφορά στο κόστος καυσίμου μεταξύ του μαζούτ και των χαμηλών σε θείο καύσιμα φαίνεται να ελαττώνεται μετά τον Σεπτέμβριο του 2020 (εκτιμήσεις οίκων που ειδικεύονται στις προβλέψεις τιμών καυσίμων κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση) με αποτέλεσμα να πρέπει να επανεξεταστεί για το 2021 και μετά αν όντως εξακολουθεί να συμφέρει η επένδυση σε scrubbers
- 11) Οι περισσότερες ελληνικές ναυτιλιακές εταιρίες έχουν προχωρήσει (μετά το 2019) στην παραγγελία και εγκατάσταση συστημάτων ανοικτού βρόχου
- 12) Η χρήση ναυτικών μηχανών με νέα καύσιμα -χαμηλά σε περιεκτικότητα σε θείο- παρουσιάζει τεχνικά ζητήματα (δεδομένα από λειτουργία τους κατά το πρώτο εξάμηνο του 2020), κυρίως όσον αφορά τη λίπανση του κινητήρα. Για να περιοριστούν αυτά τα προβλήματα, προτείνεται η χρήση κεραμικού εμβόλου, Βιοκαύσιμα, βιοντίζελ και αμμωνία εξετάζονται ως εναλλακτικές επιλογές καυσίμων

13) Τέλος, το κριτήριο της διαθεσιμότητας των διυλιστηρίων σε νέα καύσιμα είναι σημαντικό και πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη όσον αφορά την τελική επιλογή των πλοιοκτητών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Βιβλία για ΜΕΚ

- [1] 'Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.' Κ.Δ. Ρακόπουλος
- [2] 'Μ.Ε.Κ. Ι' Κ.Δ. Ρακόπουλος
- [3] 'Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.' Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής
- [4] 'Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.' Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας
- [5] Σημειώσεις Παρουσιάσεων 'Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων ΜΕΚ', Ε. Γ. Γιακουμής (<http://users.ntua.gr/vgiakms/KRMEK.htm>), Εαρινό εξάμηνο 2020

B. Κανονισμοί IMO και Οδηγίες Κατασκευαστών/Νηογνωμόνων

- [1] <https://www.dnvgl.com/news/sulphur-limit-in-ecas-increased-risk-of-psc-deficiencies-and-detentions-142911>
- [2] Lloyd's Register Marine Guidance for shipowners and operators on the Annex VI SOx and NOx regulations
- [3] http://www.bergemaritiem.nl/nox_tier_iii_neca
- [4] Wärtsilä Environmental Product Guide
- [5] <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Finland%20study%20on%20health%20benefits.pdf>
- [6] <https://www.nortonrosefulbright.com/engr/knowledge/publications/5c72cf58/enforcing-imo-2020-are-we-ready>
- [7] https://www.standard-club.com/media/3229390/abs_scrubber-guidance.pdf
- [8] EGCSA Handbook 2012

Γ. Κατασκευαστές συστημάτων scrubbers

- [1] <https://www.alfalaval.gr/microsites/puresox/>
- [2] Alfalaval Optimizing maintenance for SOx scrubbers. Technical document
- [3] <https://www.alfalaval.com/media/news/2018/not-only-at-todays-forefront-alfa-laval-is-securing-future-flexibility-with-alfa-laval-puresox/>
- [4] https://www.andritz.com/products-en/environmental-solutions/environmental-solutions/air-pollution-control/season-exhaust-gas-cleaning?qclid=EAlalQobChMI7v7SiYTR6QIVzrLVCh0NIqntEAMYAiAAEgLVpPD_BwE

- [5] <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/sox-scrubber-systems>
- [6] http://www.msb.mhi.co.jp/en/products/AF/dia_sox/
- [7] <https://www.vdlaecmaritime.com/scrubbers/why-a-scrubber>
- [8] <https://www.langhtech.com/>
- [9] <https://cleanmarine.no/>
- [10] <https://www.kameliacleantech.com/media-centre/exhaust-scrubbers-ship-scrubbers-sox-scrubber-exhaust-gas-cleaning-marine-scrubbers/>
- [11] <https://www.safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/01/3.6-Marco-Dierico-DuPont.pdf>
- [12] <https://www.wartsila.com/media/news/07-01-2020-wartsila-exhaust-gas-cleaning-system-gets-ccs-type-approval-2610776>

Δ. Τεχνικές οδηγίες κατασκευαστών (επίδραση στην πίεση αντίθλιψης)

- [1] MAN Service letter
- [2] Mitsui Service Letter
- [3] WinGD Service Letter
- [4] Japan Engine Corporation Recommendation Letter

Ε. Μετρητικά συστήματα

- [1] Norsk Analyse Continuous Emission Monitoring System for marine exhaust gas
- [2] EfficienSEA 2.0 Deliverable Report 5.6 Report on the available technologies and sensors
- [3] <http://emsys-maritime.com/emsys-emissions-monitoring-system/>

Ζ. Νέα καύσιμα: Ιδιότητες και προβλήματα

- [1] <https://shipandbunker.com/news/world/300507-vps-identifies-40-vessels-with-engine-damage-using-combination-of-vlsfo-and-40bn-lubricants>
- [2] <https://seanews.co.uk/shipping/fuel/vlsfo-threats-still-remain-for-shipowners/>
- [3] <https://www.hellenicshippingnews.com/should-the-industry-worry-about-decreasing-vlsfo-viscosity/>
- [4] <https://www.mandieselturbo.com/docs/defaultsource/shopwaredocuments/guidelines-for-operation-on-fuels-with-less-than-0-1-sulphur.pdf?sfvrsn=0>
- [5] <https://www.shippingandfreightresource.com/vlsfo-already-facing-issuesimo2020/#>

[6] <https://www.motorship.com/news101/fuels-and-oils/looking-into-the-lubricant-demands-of-vlsfo-fuel>

[7] MAN Diesel & Turbo Operation on Fuels with less than 0.1% Sulphur. Technical document

[8] <https://www.nafsgreen.gr/sea-tech/emissions/7568-lubrizol-whitepaper-identifies-vlsfo-engine-condition-challenges.html>

[9] <https://www.wartsila.com/media/news/30-06-2020-world-s-first-full-scale-ammonia-engine-test---an-important-step-towards-carbon-free-shipping-2737809>

H. Scrubbers ανοικτού βρόχου και προβλήματα

[1] <https://www.naftikachronika.gr/2019/11/20/neo-blok-sta-open-loop-scrubbers/>

[2] <https://www.maritime-executive.com/article/malaysia-bans-open-loop-scrubbers>

Θ. Οικονομική αξιολόγηση (περίοδος αποπληρωμής)

[1] <https://www.vdlaecmaritime.com/scrubbers/product-whitepapers>

[2] Wärtsilä SOx scrubber technology. Product Guide

I. Ελληνική ναυτιλιακή βιομηχανία

[1] <https://www.vdlgroep.com/en/news/vdl-aec-maritime-secures-order-for-scrubber-systems-in-greece>

[2] <https://www.energia.gr/article/153274/poioi-ellhnes-epilegoyn-scrubbers-gia-ta-ploia-toys>

[3] <https://www.rsm.global/greece/news/imo-2020-i-prasini-proklisi-sti-naytilia>

[4] <https://www.naftikachronika.gr/2020/06/26/pacific-green-ta-scrubbers-synechizoun-na-apoteloun-tin-kalyteri-perivallontiki-lysi-gia-ti-naftilia/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αντιστοίχιση Κατασκευαστών ναυτικών μηχανών με Εμπορικές Εταιρίες (Υποκεφάλαια 4.1 - 4.4)

Κατασκευαστής - 1: MAN Energy Solutions

Κατασκευαστής - 2: Mitsui E&S

Κατασκευαστής - 3: WinGD

Κατασκευαστής - 4: Japan Engine Corporation

Αντιστοίχιση Κατασκευαστών εμπορικών συστημάτων scrubbers με Εμπορικές Εταιρίες (Υποκεφάλαιο 3.4)

Κατασκευαστής - 5: Alphasval (PureSOx)

Κατασκευαστής - 6: Wärtsilä

Κατασκευαστής - 7: Andritz (SeaSOx)

Κατασκευαστής - 8: Mitsubishi Shipbuilding (Dia-SOx)

Κατασκευαστής - 9: Hamworthy Krystallon

Κατασκευαστής - 10: Langh Tech

Κατασκευαστής - 11: Clean Marine

Κατασκευαστής - 12: Kamelia

Κατασκευαστής - 13: Belco

Αντιστοίχιση Ναυτιλιακών εταιριών (αύξων αριθμός) με Εμπορικές Εταιρίες (Υποκεφάλαιο 5.2)

Ναυτιλιακή εταιρία - 1: Seaenergy

Ναυτιλιακή εταιρία - 2: Costamare

Ναυτιλιακή εταιρία - 3: Safe Bulkera

Ναυτιλιακή εταιρία - 4: Star Bulk Carriers

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Όρια με βάση τη μέθοδο αναλογίας SO₂/CO₂ (όπως περιγράφεται στο ΜΕΡC.29 (68))

Για τέλεια καύση, πρέπει να ισχύει:

$$\frac{\text{SO}_2 \text{ (ppm}^*)}{\text{CO}_2 \text{ (%}^*)} \leq 65$$

Για ατελή καύση, πρέπει να ισχύει:

$$\frac{\text{SO}_2 \text{ (ppm}^*)}{\text{CO}_2 \text{ (%}^*) + (\text{CO}(\text{ppm}^*)/10000) + (\text{THC}(\text{ppm}^*)/10000)} \leq 65$$