

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

Τίτλος Διατριβής:

**Βελτιστοποίηση λειτουργίας 2-Χ ναυτικού κινητήρα με τη χρήση  
στατιστικών μεθόδων**

Τίτλος Αγγλικά:

**Operation optimization of the two-stroke marine engine with the use  
of statistical methods**

Όνοματεπώνυμο Σπουδάστριας:

**Ουρανία Χρυσοπουλίδου**

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

**Βασίλειος Τσουκαλάς**



**Νοέμβριος 2022**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής**

**Τσουκαλάς Βασίλειος**

**Παπουτσιδάκης Μιχαήλ**

**Δρόσος Χρήστος**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ουρανία Χρυσουλίδου του Λαζάρου, με αριθμό μητρώου 8066221 φοιτήτρια του Διϋδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα

Ημερομηνία

17/11/22



Ουρανία

Χρυσουλίδου



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



## ΤΙΤΛΟΣ

Βελτιστοποίηση λειτουργίας 2-Χ ναυτικού κινητήρα με τη χρήση στατιστικών  
μεθόδων

## ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Ουρανία Χρυσουλίδου

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική  
εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του  
Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες  
στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος  
Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου  
Δυτικής Αττικής.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Βελτιστοποίηση λειτουργίας 2-Χ ναυτικού κινητήρα με τη χρήση στατιστικών μεθόδων”, φέρνει εις πέρας τη φοίτησή μου στο ΔΠΜΣ «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές».

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Βασίλειο Τσουκαλά για τη καθοδήγηση και τη βοήθεια του σε όλο τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Eastern Mediterranean Maritime Ltd., για τα δεδομένα που μου παρείχαν, για την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά και τους φίλους μου, για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός σύγχρονου ναυτικού κινητήρα. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για 3 συνεχή χρόνια σε φορτηγό πλοίο της ποντοπόρου ναυτιλίας με 2-X κινητήρα και scrubber για την αποθιοποίηση του HSFO που χρησιμοποιεί ως καύσιμο της ΜΕ.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους κινητήρες diesel των πλοίων και τα κυριότερα λειτουργικά μεγέθη αυτών. Στη συνέχεια αναφέρονται οι κατηγορίες των κινητήρων diesel και γίνεται σύγκριση των 2-X και 4-X κινητήρων, καθώς και ανάλυση της λειτουργίας τους. Για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και κατεπέκταση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου(SFOC), σημαντικό ρόλο έχει ο υπερπληρωτής και πιο συγκεκριμένα ενός 2-X κινητήρα.

Επιπλέον γίνεται αναφορά στη καύση και τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται κατά τη πλεύση, η ανάφλεξη και αυτανάφλεξη αυτών, η οποία είναι ανάλογη του είδους του καυσίμου. Ενώ γίνεται αναφορά και στα εναλλακτικά καύσιμα.

Γίνεται ανάλυση της ναυτιλίας και της ρύπανσης από τους αέριους ρύπους και οι κατηγορίες αυτών. Αναφορικά με τη μείωση των ρύπων, εκτός από τη κατηγορία του καυσίμου υπάρχουν και άλλες λύσεις, όπως η χρήση scrubbers και άλλες τεχνικές για το καθαρισμό των ρύπων. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο Διεθνές Πλαίσιο Μείωσης Αέριων Ρύπων από τη ναυτιλία με κανονισμούς, αλλά και πως μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται οι μέθοδοι και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη παρακολούθηση και τη μείωση των αέριων ρύπων. Η ανάλυση έγινε με το στατιστικό πρόγραμμα SPSS και πραγματοποιήθηκε έλεγχος κανονικότητας, έλεγχος Shapiro-Wilk, έλεγχος Kolmogorov-Smirnov, ανάλυση συσχέτισης, συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson, ανάλυση Παλινδρόμησης, πολλαπλή Παλινδρόμηση και τη μέθοδο Stepwise.

Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή και λειτουργία του κινητήρα MAN B&W DIESEL ENGINE 7S65ME-C8.2 και των βασικών εξαρτημάτων. Έπειτα υπάρχουν πίνακες σχετικά με την απόδοση της μηχανής (θερμοκρασίες, ταχύτητα, πίεση, δείκτη καυσίμου κλπ.), καθώς και τις καμπύλες απόδοσης για λειτουργία της μηχανής στο 100%. Επειδή ο συγκεκριμένος τύπος της μηχανής χρησιμοποιεί scrubber για την αποθιοποίηση του καυσίμου, γίνεται αναφορά σε αυτό και τα κύρια χαρακτηριστικά του και στα υπολείμματα που του καυσίμου.

Το πιο σημαντικό κομμάτι της εργασίας είναι η παρουσίαση και επεξεργασία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, εκ των οποίων ως ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν επιλεγεί η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή και θερμοκρασία εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger, ενώ εξαρτημένη μεταβλητή επιλέχθηκε η ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)) και το καύσιμο HSFO.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχετικά με τη συσχέτιση των μεταβλητών για τη παρακολούθηση και τη μείωση των αέριων ρύπων που προέρχονται από ναυτικούς κινητήρες diesel. Ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο αναγράφονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη παρακολούθηση της 2-X μηχανής για 3 έτη.

**Λέξεις κλειδιά :** κινητήρες diesel, 2-X κινητήρα, αέριοι ρύποι, απόδοση, scrubber, ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, turbocharger, θερμοκρασίες εισόδου, θερμοκρασίες εξόδου, υπερπληρωτής, HSFO, SFOC, SPSS

## Summary

The current thesis aims to investigate and reduce the emissions of gaseous pollutants of marine diesel engines. The survey was conducted into a freighter of shipping line with 2-stroke engines and scrubber for the desulfurization of HSFO that is used as fuel in ME, for three consecutive years.

The first chapter, literature review, presents the diesel engines of the ships and their functional sizes. The different categories of the diesel motors and a comparison between the 2-stroke and 4-stroke motors are bestowed based on the analysis of their mode. In order to reduce the fuel consumption and more specifically the consumption of the fuel oil of (SFOC), it is clearly depicted that the mechanical supercharger of the 2-stroke engine, is crucial.

Also, the combustion and fuel used during the sailing, their ignition and self ignition in proportion of the fuel are clearly stated, as well as the use of alternative fuels.

An analysis of shipment and pollution caused by the gaseous pollutants and their various categories they belong is deemed necessary. Concerning the reduction of the pollutants, there are various solutions that involve the usage of scrubbers and the numerous kinds that are used for cleaning dirt. Not only the International Framework for Reducing Gaseous Pollutants based on regulations for shipment is referred but also how to achieve efficient improvement in energy.

The second chapter addresses the methods and the data's used to investigate and reduce gaseous pollutants. Data were collected and analysis, test Shapiro-Wilk, test Kolmogorov-Smirnov, correlation analysis, Pearson linear regression analysis, regression analysis, multiple regressions and the method of Stepwise.

The description and the function of the engine MAN B & W DIESEL ENGINE 7S65ME-C8.2 and its basic components are shown through the tables that analyze the performance of the engine (temperature, speed, pressure, fuel gauge etc.) and the performance curves for a 100% functionality. The specific type of engine uses



scrubber to desulfurize the fuel so an extend analysis on it and its basic characteristics and the fuel residues is necessary.

The most important part of the project is the presentation and data analysis, from which, as independent variables the machine's rotation speed, the rotational speed of a turbocharger, exhaust temperate at turbo-charger Inlet and Outlet, while dependent variables were selected Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) and the fuel HSFO.

The results of the survey that derived from correlating the variables in order to investigate and reduce gaseous pollutants that stem from the marine diesel engines are mentioned whereas the last chapter concerns the results from investigating the 2-stroke engine for three years.

**Key words :** diesel engines, 2-stroke engine, pollutant gases, performance, scrubber, exhaust temperate at turbo-charger Inlet - Outlet, Turbocharger, HSFO, SFOC, SPSS.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |               |
|--|---------------|
| Εισαγωγή.....  | σελ.23        |
| <b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>  |               |
| <b>2.1 Κινητήρες Diesel.....</b>   | <b>σελ.26</b> |
| 2.1.1 Κυριότερα μεγέθη λειτουργιών των κινητήρων Diesel.....               | σελ.27        |
| 2.1.2 Κατηγορίες των κινητήρων Diesel.....                                 | σελ.33        |
| 2.1.2.1 Σύγκριση 2-Χ και 4-Χ κινητήρων Diesel.....                         | σελ.34        |
| 2.1.3 Λειτουργία κινητήρων Diesel.....                                     | σελ.36        |
| 2.1.3.1 Σημαντικότερα χαρακτηριστικά για τη λειτουργία κινητήρα diesel ... | σελ.37        |
| 2.1.4 Υπερπλήρωση.....   | σελ.40        |
| 2.1.4.1 Υπερπλήρωση 2-Χ κινητήρων.....                                     | σελ.41        |
| <b>2.2 Καύση και Καύσιμα.....</b>  | <b>σελ.42</b> |
| 2.2.1 Ανάφλεξη και αυτανάφλεξη.....  | σελ.42        |
| 2.2.2 Καύση.....   | σελ.44        |
| 2.2.3 Καύσιμα.....   | σελ.45        |
| 2.2.3.1 Είδη και Κατηγορίες Ναυτιλιακών Καυσίμων.....                      | σελ.46        |
| 2.2.3.2 Εναλλακτικά Ναυτιλιακά Καύσιμα.....                                | σελ.48        |
| <b>2.3 Ναυτιλία και Ρύπανση.....</b>                                       | <b>σελ.49</b> |
| 2.3.1 Αέριοι ρύποι.....  | σελ.50        |
| 2.3.2 Εκπομπή αέριων ρύπων από ναυτικούς κινητήρες diesel.....             | σελ.51        |
| 2.3.3 Κατηγορίες αέριων ρύπων .....  | σελ.51        |
| <b>2.4 Scrubbers.....</b>  | <b>σελ.58</b> |

|   |               |
|---|---------------|
| 2.4.1 Κατηγορίες των Scrubbers.....σελ.59                               | σελ.59        |
| 2.4.2 Dry Scrubbers (Ξηρές Πλυντρίδες).....σελ.59                       | σελ.59        |
| 2.4.3 Wet Scrubbers (Υγρές Πλυντρίδες).....σελ.60                       | σελ.60        |
| 2.4.3.1 Διαδικασία υγρού καθαρισμού.....σελ.61                          | σελ.61        |
| 2.4.4 Open Loop Scrubbers (Ανοιχτού βρόχου Πλυντρίδες).....σελ.63       | σελ.63        |
| 2.4.5 Closed Loop Scrubbers (Κλειστού βρόχου Πλυντρίδες).....σελ.64     | σελ.64        |
| 2.4.6 Hybrid Scrubbers (Υβριδικά Συστήματα Καθαρισμού).....σελ.66       | σελ.66        |
| <b>2.5 Ναυτιλία και Διεθνές Πλαίσιο Μείωσης Εκπομπών.....σελ.66</b>     | <b>σελ.66</b> |
| 2.5.1 Μελέτη του IMO για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.....σελ.67 | σελ.67        |
| 2.5.2 Πολιτικές και μέτρα μείωσης εκπομπών.....σελ.68                   | σελ.68        |
| 2.5.3 Βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας.....σελ.69                    | σελ.69        |
| <b>Μέθοδοι και Δεδομένα</b>   |               |
| <b>3.1 Στατιστικό πρόγραμμα SPSS.....σελ.71</b>                         | <b>σελ.71</b> |
| 3.1.1 Έλεγχος Κανονικότητας.....σελ.71                                  | σελ.71        |
| 3.1.1.1 Έλεγχος Shapiro-Wilk.....σελ.73                                 | σελ.73        |
| 3.1.1.2 Έλεγχος Kolmogorov-Smirnov.....σελ.74                           | σελ.74        |
| 3.1.2 Ανάλυση Συσχέτισης.....σελ.75                                     | σελ.75        |
| 3.1.2.1 Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson.....σελ.75             | σελ.75        |
| 3.1.3 Ανάλυση Παλινδρόμησης.....σελ.76                                  | σελ.76        |
| 3.1.3.1 Πολλαπλή Παλινδρόμηση.....σελ.76                                | σελ.76        |
| 3.1.3.2 Μέθοδος Stepwise.....σελ.77                                     | σελ.77        |

|   |
|---|
| <b>3.2 Περιγραφή και λειτουργία του κινητήρα MAN B&amp;W DIESEL ENGINE 7S65ME-C8.2.....σελ.78</b> |
| 3.2.1 Βασικά εξαρτήματα της ME.....σελ.79   |
| 3.2.2 Απόδοση της μηχανής σε λειτουργία 100%.....σελ.80   |
| 3.2.2.1 Καμπύλες απόδοσης για λειτουργία της μηχανής στο 100%.....σελ.82                          |
| 3.2.3 Scrubber της ME 7S65ME-C8.2.....σελ.83  |
| 3.2.3.1 Χαρακτηριστικά του scrubber της ME 7S65ME-C8.2.....σελ.84                                 |
| 3.2.4 Καύσιμα της ME 7S65ME-C8.2.....σελ.84   |
| <b>3.3 Παρουσίαση δεδομένων.....σελ.85</b>  |
| 3.3.1 Επεξεργασία δεδομένων.....σελ.87  |
| <b>Αποτελέσματα.....σελ.88</b>  |
| <b>Συμπεράσματα.....σελ.101</b>   |
| <b>Βιβλιογραφία.....σελ.104</b>   |

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

**Διάγραμμα 1.** Διάγραμμα ροπής στρίψεως-στροφών κινητήρα diesel

**Διάγραμμα 2.** Καμπύλες σταθερής ειδικής κατανάλωσης

**Διάγραμμα 3.** Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης συναρτήσει των στροφών για σταθερή περιοχή καυσίμου

**Διάγραμμα 4.** Ισχύς με λειτουργία ΜΕ στο 100%

**Διάγραμμα 5.** Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption)

## ΠΙΝΑΚΕΣ

**Πίνακας 1.** Πίνακας Καυσίμων

**Πίνακας 2.** Εξαρτήματα ΜΕ

**Πίνακας 3.** Λειτουργία ΜΕ στο 100%

**Πίνακας 4.** Κύλινδροι σε λειτουργία ΜΕ στο 100%

**Πίνακας 5.** Ψύξη αέρα με λειτουργία ΜΕ στο 100%

**Πίνακας 6.** Αέρας εισαγωγής, Καυσαέρια και Λιπαντικά με λειτουργίας ΜΕ στο 100%

**Πίνακας 7.** Χαρακτηριστικά του scrubber

**Πίνακας 8.** Υπολείμματα καυσίμου

**Πίνακας 9.** Τεστ κανονικότητας

**Πίνακας 10.** Περιγραφική στατιστική ανάλυση των μεταβλητών

**Πίνακας 11.** Έλεγχος συσχετίσεων

**Πίνακας 12.** Περιγραφική στατιστική της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και HSFO

**Πίνακας 13.** Έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ HSFO και ταχύτητας περιστροφής της μηχανής

**Πίνακας 14.** Έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή και θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger

**Πίνακας 15.** Έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόφαλο του turbocharger

**Πίνακας 16.** Μοντέλο παλινδρόμησης

**Πίνακας 17.** Παλινδρόμηση

**Πίνακας 18.** Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

**Πίνακας 19.** Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

**Πίνακας 20.** Σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

**Πίνακας 21.** Εξαγωγή μεταβλητών

**Πίνακας 22.** Παλινδρόμηση με μέθοδο stepwise



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



## ΕΙΚΟΝΕΣ

**Εικόνα 1.** Εγκάρσια τομή της κύριας μηχανής

**Εικόνα 2.** Scrubber της ME 7S65ME-C8.2



## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ / NOTATIONS

| Μέγεθος    | Επεξήγηση   | Μονάδες μέτρησης |
|------------|---|------------------|
| $p_{max}$  | Μέγιστη Πίεση Καύσεως<br>(Firing Pressure)                    | bar              |
| $m_{min}$  | Ελάχιστη Ποσότητα Αέρα<br>(Minimum Amount of Air)             | kg air/kg fuel   |
| $p_c$      | Πίεση Συμπιέσεως<br>(Compression Pressure)                    | bar              |
| $p_z$      | Μεγαλύτερη Πίεση<br>Καύσεως (Higher Firing<br>Pressure)       | bar              |
| $w_m$      | Μέση Ταχύτητα Καύσεως<br>(Mean Burning Rate)                  | bar/rad          |
| $T_c$      | Χρόνος Ανάφλεξης<br>(Ignition Time)                           | msec             |
| $p_e$      | Μέση Πραγματική Πίεση<br>(Mean Effective Pressure)            | bar              |
| $n$        | Στροφές της Έλικας (Turns<br>of the Helix)                    | RPM              |
| $M_{dD}$   | Ροπή Στρέψεως (Turning<br>Moment)                             | kNm              |
| $P_D$      | Ισχύς του Κινητήρα<br>( Engine Power)                         | kW               |
| $\omega$   | Γωνιακή Ταχύτητα Έλικας<br>(Angular Velocity of the<br>Helix) | rad/s            |
| $C_D$      | Σταθερά Αναλογίας<br>(Constant Ratio)                         | kNm min/s        |
| $n_{Dmax}$ | Μέγιστες Στροφές  | RPM              |

|             | (Maximum RPMs)  |        |
|-------------|---|--------|
| $p_{min}$   | Ελάχιστη Μέση<br>Πραγματική Πίεση<br>(Minimum Mean Effective<br>Pressure) | bar    |
| s           | Διαδρομή του Εμβόλου<br>(Stroke)  | m      |
| s/D         | Διαδρομή / Διάμετρο<br>Εμβόλου (Stroke to Bore<br>Ration)                 | $m^3$  |
| $p_i$       | Μέση Ενδεικνύμενη Πίεση<br>( Mean Indicated Pressure)                     | bar    |
| $m_B$       | Κατανάλωση Καυσίμου<br>(Fuel Consumption)                                 | Kg/s   |
| $H_u$       | Κατωτέρα Θερμογόνος<br>Δύναμη Καυσίμου (Lower<br>Heating Power of Fuel)   | J/kg   |
| $\eta_i$    | Εσωτερικός Βαθμός<br>Απόδοσης ( Internal Rate of<br>Efficiency)           | -      |
| $\eta_m$    | Μηχανικός Βαθμός<br>Απόδοσης (Mechanical<br>Degree of Efficiency)         | -      |
| $m_z$       | Αέρας Καύσεως (   | $m^3$  |
| $\lambda_v$ | Αέρας που παρίσταται στη<br>καύση (Air Involved in<br>Combustion)         | $mV$   |
| SFOC        | Ειδική Κατανάλωση   | gr/kWh |



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



|  |   |  |
|--|---|--|
|  | Καυσίμου (Specific Fuel<br>Oil Consumption) |  |
|--|---|--|

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ / ABBREVIATIONS

| Μέγεθος          | Επεξήγηση   |
|------------------|---|
| IMO              | Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization)                        |
| EEDI             | Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Design Index)                      |
| SEEMP            | Σχέδιο Διαχείρισης της Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan) |
| EEOI             | Δείκτης Λειτουργικής Αποδοτικότητας του Πλοίου (Energy Efficiency Operational Indicator)    |
| CCS              | Δέσμευσης και Αποθήκευση Άνθρακα (Carbon Capture and Storage)                               |
| DNV              | Νορβηγικός Νηογνώμονας (Det Norske Veritas)   |
| SO <sub>x</sub>  | Οξείδια του Θείου (Sulphur Oxides)  |
| SO <sub>2</sub>  | Διοξείδιο του Θείου (Sulphur Dioxide)   |
| SO <sub>3</sub>  | Τριοξείδιο του Θείου (Sulphur Trioxide)   |
| NO <sub>x</sub>  | Οξείδια του Αζώτου (Nitrogen Oxides)  |
| CH <sub>4</sub>  | Μεθάνιο (Methane)   |
| CO               | Μονοξείδιο του Άνθρακα (Carbon Monoxide)  |
| PM               | Αιωρούμενα Σωματίδια (Particulate Matter)   |
| Cl <sub>2</sub>  | Χλώριο (Chlorine)   |
| F <sub>2</sub>   | Φθόριο (Fluorine)   |
| O <sub>3</sub>   | Όζον (Ozone)  |
| CO <sub>2</sub>  | Διοξείδιο του Άνθρακα (Carbon Dioxide)  |
| HC               | Υδρογονάνθρακες (Hydrocarbons)  |
| O <sub>2</sub>   | Οξυγόνο (Oxygen)  |
| H <sub>2</sub> O | Υδρατμούς (Water Vapor)   |
| N <sub>2</sub>   | Αζωτο (Nitrogen)  |
| NM VOC           | Μη Μεθανικές Οργανικές Ενώσεις (Non-methane Organic Compounds)                              |
| ECAs             | Περιοχές Ελεγχόμενων Ρύπων (Emission Control Areas)   |
| EU               | Ευρωπαϊκή Ένωση (European Union)  |

|                  |  |
|------------------|--|
| UN Org.          | Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (United Nations Organization)  |
| SPSS             | Statistical Package for the Social Sciences  |
| GHGs             | Αέρια του Θερμοκηπίου (Green House Gases)  |
| N <sub>2</sub> O | Υποξείδιο του Αζώτου (Nitrous Oxide)   |
| EGR              | Τεχνολογία Επανακυκλοφορίας Καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation)   |
| BSFC             | Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (Brake-specific Fuel Consumption)   |
| CMCR             | Μέγιστη Συνεχής Ισχύς (Contracted Maximum Continuous Rating)   |
| BMEP             | Μέση Πραγματική Πίεση Πέδησης (Brake Mean Effective Pressure)  |
| L.O.T            | Φόρτωση στην Επιφάνεια (Loadontop)   |
| C.B.T            | Δεξαμενές Καθαρού Έρματος (Clean Ballast Tanks)  |
| S.T              | Δεξαμενές Πετρελαϊκών Καταλοίπων (Slop Tanks)  |
| O.D.M.C.S.M      | Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Απόρριξης Πετρελαιοειδών Καταλοίπων που Παράγονται στο Χώρο του Μηχανοστασίου (Oil Discharge Monitoring and Control System for Machinery Space) |
| O/W.I.D          | Ανιχνευτές/Διαχωριστήρες της Επιφάνειας Πετρελαίου/Νερού (Oil Water Interface Detectors)   |
| O.F.S            | Σύστημα Δύλισης Πετρελαίου (Oil Filtering System)  |
| S.B.T            | Δεξαμενές Ξεχωριστού Έρματος (Segregated Ballast Tanks)  |
| C.O.W            | Πλύσιμο με Αργό Πετρέλαιο (Crude Oil Washing)  |
| I.G.S            | Σύστημα Αδρανούς Αερίου (Inert Gas System)   |
| C.A.A.           | Βοήθειες Αποφυγής Σύγκρουσης (Collision Avoidance Aids)  |
| I.G.G.           | Γεννήτρια Αδρανούς Αερίου (Inert Gas Generator)  |
| O/WS             | Διαχωριστήρας Πετρελαίου/Νερού (Oily/Water Separator)  |
| P.L/S.B.T        | Επιλεγμένες Θέσεις Προστασίας για τις Δεξαμενές Διαχωρισμένους Έρματος (Protective Location of Segregated Ballast Tanks)   |
| P.S.D.           | Σωλήνας Μικρής Διαμέτρου (Pipe Small Diameter)   |
| S.D.C            | Πρότυπος Σύνδεσμος Σωληνώσεων Απόρριξης Καταλοίπων (Standard   |

|       |  |
|-------|--|
|       | Discharge Connection)  |
| T.O.S | Δεξαμενές Καταλοίπων Πετρελαίου ή Κατακαθημάτων (Tanks for Oil Sludges)        |
| T.S   | Σύστημα Μεταφοράς (Transfer System)  |
| EGE   | Εξοικονομητή Καυσαερίων (Exhaust Gas Economizer)                               |
| SCR   | Επιλεκτική Καταλυτική Αναγωγή (Selective Catalytic Reduction)                  |
| ECA   | Ειδικές Περιοχές Ελέγχου (Emission Control Areas)                              |
| EGCS  | Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων (Exhaust Gas Cleaning Systems)                   |
| Ca    | Ασβέστιο (Calcium)   |
| Na    | Νάτριο (Sodium)  |
| VPS   | Σωλήνας Κενού (Vacuum Pipe Still)  |
| MGO   | Ναυτιλιακό Πετρέλαιο Εσωτερικής Καύσης (Marine Gas Oil)                        |
| MDO   | Ναυτιλιακό Πετρέλαιο Ντίζελ (Marine Diesel Oil)                                |
| IFO   | Ενδιάμεσο Μαζούτ (Intermediate Fuel Oil)                                       |
| HFO   | Βαρύ Μαζούτ (Heavy Fuel Oil)   |
| HSFO  | Μαζούτ Υψηλής Περιεκτικότητας σε Θείο (High Sulphur Fuel Oil)                  |
| LSFO  | Μαζούτ Χαμηλής Περιεκτικότητας σε Θείο (Low Sulphur Fuel Oil)                  |
| ULSFO | Μαζούτ Εξαιρετικά Χαμηλής Περιεκτικότητας σε Θείο (Ultra-low Sulphur Fuel Oil) |
| NGLs  | Υγρά Φυσικού Αερίου (Natural Gas Liquids)                                      |
| LNG   | Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquid Natural Gas)                                 |
| SECA  | Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Special Emission Control Areas).                    |
| A.N.Σ | Άνω Νεκρό Σημείο ( Top Dead Center)  |
| MEK   | Μηχανή Εσωτερικής Καύσεως ( Internal Combustion Engine)                        |
| Κ.Ν.Σ | Κάτω Νεκρό Σημείο ( Bottom Dead Center)  |
| 2-X   | Δίχρονος Κινητήρας ( Two-Stroke Engine)  |
| 4-X   | Τετράχρονος Κινητήρας ( Four-Stroke Engine)                                    |
| RPM   | Στροφές ανά Λεπτό (Revolution per Minutes)                                     |
| ME    | Κύρια Μηχανή (Main Engine)   |

## Εισαγωγή

Η μόλυνση του περιβάλλοντος, είναι ένα ζήτημα που επηρεάζει τη παγκόσμια κοινότητα. Ειδικότερα, οι θαλάσσιες μεταφορές κινητοποίησαν σταδιακά παγκόσμιους οργανισμούς, με σκοπό την αντιμετώπιση του προβλήματος που έχει δημιουργηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Η συνεργασία κρατών σε περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο, με άλλα κράτη ή διεθνείς οργανισμούς, έχουν στόχο να πραγματοποιηθούν προσπάθειες για την ανάπτυξη και αποτελεσματική υλοποίηση των θεσμών, προστατεύοντας το περιβάλλον από τους ρύπους που επιφέρουν τα εμπορικά πλοία.

Πρέπει να τονίσουμε ότι τα εμπορικά πλοία, είναι το πιο αποδοτικό ενεργειακό μεταφορικό μέσον σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, αν σκεφτούμε ότι μεταφέρει περίπου το 90% του παγκόσμιου φορτίου και το ποσοστό των αέριων ρύπων που παράγονται από αυτά, αντιστοιχεί στο μόλις 2,7% των αέριων ρύπων σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι η αποδοτικότητα του πλοίου είναι ανάλογη με το μέγεθος και το τύπο του εκάστοτε πλοίου, αλλά και το φορτίο που μεταφέρει. Το ποσοστό αυτό, συνεχώς ανεβαίνει και σε βάθος 20ετίας αναμένεται σχεδόν να διπλασιαστεί. Δεν είναι τυχαίο που ολοένα και περισσότερες περιοχές χαρακτηρίζονται ως ECAs (Περιοχές Ελεγχόμενων Ρύπων).

Γι' αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί διεθνείς ρυθμίσεις προστασίας του περιβάλλοντος και ειδικότερα στη ναυτιλία. Επιπλέον, έχουν δημιουργηθεί και εξελιχθεί σημαντικοί κανονισμοί σε περιφερειακό και διεθνή επίπεδο, για τη προστασία του περιβάλλοντος από τους αέριους ρύπους των ναυτικών κινητήρων diesel. Κατά τη διάρκεια του 20<sup>ο</sup> αιώνα και έπειτα, οι παγκόσμιες οργανώσεις έχουν καταλυτικό ρόλο σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο IMO (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός), ενώ σε αρχικό στάδιο, δεν εμπλεκόταν με ζητήματα της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος, έχει εξελιχθεί ως ο κύριος οργανισμός διεθνών θεσμών προστασίας του. Η EU (Ευρωπαϊκή Ένωση), είναι ακόμη ένας οργανισμός, όπου με τη πάροδο

του χρόνου, θεσμοθέτησε κανόνες και εξέλιξε τη περιβαλλοντική πολιτική. Επιπλέον, ο UN Org. (United Nations Organization), ασχολείται με τη προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε περιφερειακό επίπεδο.

Καθώς η ανάπτυξη του ναυτιλιακού κλάδου όσο πάει αυξάνεται, κατεπέκταση αυξάνεται και η θαλάσσια ρύπανση από τα πλοία. Έτσι έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι και συστήματα επί του πλοίου για τη μείωση της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και αέριων ρύπων που παράγονται από τις δραστηριότητες του.

Οι μέθοδοι και τα συστήματα είναι, σύστημα loadontop (L.O.T), δεξαμενές καθαρού έρματος (C.B.T), μέθοδος Butterworth, δεξαμενές πετρελαϊκών καταλοίπων (S.T), σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου της απόρριψης πετρελαιοειδών καταλοίπων που παράγονται στο χώρο του μηχανοστασίου (O.D.M.C.S.M), ανιχνευτές / διαχωριστήρες της επιφάνειας πετρελαίου/νερού (O/W.I.D), σύστημα διύλισης πετρελαίου (O.F.S), δεξαμενές ξεχωριστού έρματος (S.B.T), πλύσιμο με αργό πετρέλαιο (C.O.W), σύστημα αδρανούς αερίου (I.G.S), βοήθειες αποφυγής σύγκρουσης (C.A.A.), γεννήτρια αδρανούς αερίου (I.G.G.), διαχωριστήρας πετρελαίου/νερού (O/WS), επιλεγμένες θέσεις προστασίας για τις δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος (P.L/S.B.T), σωλήνας μικρής διαμέτρου (P.S.D.), κατακράτηση πετρελαίου επί του πλοίου, πρότυπος σύνδεσμος σωληνώσεων απόρριψης καταλοίπων (S.D.C), δεξαμενές καταλοίπων πετρελαίου ή κατακαθημάτων (T.O.S) και το σύστημα μεταφοράς (T.S). (Βλάχος Γ.Π., 2007)

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ναυτικών κινητήρων diesel μέσα από τη παρακολούθηση των δεδομένων με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων. Πιο συγκεκριμένα σε ένα φορτηγό πλοίο της ποντοπόρας ναυτιλίας με 2-X κινητήρα και scrubber, όπου σύμφωνα με τους κανονισμούς του 2020 βοηθάει στη περαιτέρω μείωση των ρύπων.



Τα ερωτήματα που τέθηκαν στην εργασία είναι:

Ποιες μεταβλητές επηρεάζουν την εκπομπή αέριων ρύπων;

Αν υπάρχει μεταβολή στις τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption) κατά τη διάρκεια της περιόδου αναφοράς, καθώς αυτή συνδέεται με εκτεμπόμενους ρύπους;

Η μεταβολή της ειδική κατανάλωση καυσίμου επηρεάζεται από τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και αν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στη γενική σχέση;

Η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή επηρεάζει τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων και σε τι ποσοστό, μεταβάλλεται το ποσοστό αυτό βάση τη θερμοκρασία εσόδου των καυσαερίων;

Ποιοί άλλοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τη μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου;

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Κινητήρες Diesel

Οι κινητήρες είναι το βασικότερο εξάρτημα των πλοίων. Ο κινητήρας diesel είναι ένας τύπος μηχανής εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ), με τον οποίον τροφοδοτούν τα περισσότερα πλοία στο κόσμο, ως κύρια μηχανή πρόωσης των πλοίων, διότι έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης (η απόδοση των μηχανών είναι περίπου 35-40% και σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες να φτάνει στο 48%) σε σύγκριση με άλλες θερμικές μηχανές. Το μειονέκτημα αυτών των κινητήρων είναι ότι εκπέμπουν επιβλαβή αέρια όπως, το οξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα κ.ά.. Με το πέρασμα του χρόνου, έχουν εφαρμοστεί διάφοροι περιορισμοί γι' αυτούς τους ρύπους από διεθνείς, εθνικούς και περιφερειακούς κανονισμούς.

Εκτός από τα παραπάνω, για τη κατασκευή του κινητήρα πρέπει να ληφθούν υπόψη η επιλογή του κινητήρα, η μελέτη των παρελκόμενων, η μελέτη του αξονικού συστήματος και η έδραση του κινητήρα.

Γενικά, οι ναυτικοί κινητήρες diesel, ακολουθούν το κύκλο του Diesel.

Θερμοδυναμικός κύκλος Diesel:

**1-2** ισεντροπική συμπίεση

**2-3** ισόθλιπτη πρόσδοση θερμότητας

**3-4** ισεντροπική εκτόνωση

**4-1** ισόογκη αποβολή θερμότητας

Πρακτικά σε έναν ιδανικό κύκλο diesel αυτό σημαίνει ότι, η πρώτη διαδρομή του εμβόλου εισάγει αέρα στον κύλινδρο και η δεύτερη διαδρομή, η επιστροφή, συμπιέζει τον αέρα τόσο ώστε η θερμοκρασία να αυξηθεί αδιαβατικά μέχρι να ανυψωθεί τόσο ή θερμοκρασία του, ώστε να αυτοφλέγεται το καύσιμο που ψεκάζεται τότε. Όταν το έμβολο φθάσει στο τέρμα της διαδρομής του και η πίεση

και θερμοκρασία βρίσκονται στο υψηλότερο σημείο τους, ανοίγει μια θυρίδα και αρχίζει η έγχυση του καυσίμου υπό υψηλή πίεση. Το καύσιμο αναφλέγεται άμεσα και υπό σταθερή πίεση. Καθώς τώρα το έμβολο οπισθοχωρεί, ο αέρας κανονικά θα ψυχθεί αλλά το φλεγόμενο καύσιμο το αποτρέπει. Η θερμική ενέργεια του φλεγόμενου καυσίμου μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο οδηγώντας το έμβολο στο κάτω μέρος του κυλίνδρου. Ακολουθεί ψύξη υπό σταθερό όγκο οπότε ο κύκλος κλείνει και επαναλαμβάνεται.

Εκτός από τους κινητήρες diesel, σε μικρά κυρίως σκάφη, τα οποία λειτουργούν με κινητήρες Otto ή βενζινομηχανή, λόγω του πολύ μικρού συντελεστή λειτουργίας και απαίτησής για μικρό όγκο και βάρος. (Ι. Ιωαννίδης, 2009)

Η διαφορά μεταξύ των κινητήρων diesel και Otto είναι στην έναυση της καύσης, όπου:

- Ο βαθμός συμπίεσης στις μηχανές Otto περιορίζεται για να μην συμβούν κρουστικές καύσεις
- Στις μηχανές Diesel δεν μπορούν να συμβούν κρουστικές καύσεις, καθώς συμπιέζεται μόνος του ο αέρας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι βαθμοί συμπίεσης μπορούν να είναι υψηλότεροι.

### **2.1.1 Κυριότερα μεγέθη λειτουργιών των κινητήρων Diesel**

Τα κυριότερα μεγέθη λειτουργιών που μας δίνουν δεδομένα για την απόδοση μιας μηχανής είναι:

#### Ενεργός Ισχύς - Power (kW ή BHP)

Η ισχύς που αναπτύσσεται από τη μηχανή πλην την ισχύ που χάνεται λόγω τριβών κ.ά. Εδώ μελετάμε τις διακυμάνσεις της ισχύος με σκοπό την ισοφόρτιση της μηχανής. Δεν θέλουμε μεγάλες διαφορές ώστε να μην δημιουργούν άνισες δυνάμεις και αντίστοιχες ροπές, στο σύστημα μετάδοσης και τον στροφαλοφόρο άξονα.

Οι αιτίες δημιουργίας των άνισων δυνάμεων και αντίστοιχων ροπών στο σύστημα μετάδοσης και τον στροφαλοφόρο άξονα, δημιουργούνται λόγω του καύσιμου, της προπορείας του καυσίμου, τα μεταλλικά μέρη (χιτώνια, έμβολα, ελατήρια).

#### Ταχύτητα Μηχανής - Στροφές ανά λεπτό (RPM)

Η ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα, εκφρασμένη σε στροφές ανά λεπτό (rpm).

Μικρή πτώση των στροφών. (> 5%)

Μεγάλη πτώση στροφών. (> 10%)

Δεν επιθυμούμε αστάθεια στροφών στην μηχανή ιδιαίτερα όταν λαμβάνουμε στοιχεία απόδοσής της. Για πιθανή αστάθεια τα αίτια εστιάζουν στο ρυθμιστή στροφών governor και στο αντλητικό σύστημα τροφοδοσίας και εγχύσεως καυσίμου.

#### Μέση Ενδεικνύμενη Πίεση του κυλίνδρου - $p_i$ (bar)

Η μέση ενδεικνύμενη πίεση χαρακτηρίζει την ποιότητα λειτουργίας του κινητήρα, που είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του κινητήρα. Στο διάγραμμα  $p-x$  αποτελεί το ύψος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, το οποίο έχει εμβαδόν ίσο με το ενδεικνύμενο έργο του κυλίνδρου, ενώ η βάση του παραλληλογράμμου ισούται με τη διαδρομή του εμβόλου.

Η Μέση ενδεικνύμενη πίεση δεν θα πρέπει να διαφέρει από κύλινδρο σε κύλινδρο περισσότερο από 1 bar, (ανεξαρτήτως φορτίου).

- Η μείωση των παραμέτρων αυτών οφείλεται κυρίως στην αύξηση των τριβών.
- Σε ανωμαλία στον εγχυτήρα καυσίμου ή σε άλλο εξάρτημα του συστήματος έγχυσης καυσίμου.

Αν είναι υψηλότερη τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Μπορεί να προέρχεται από αυξημένη ποσότητα καυσίμου σε συγκεκριμένο κύλινδρο. (Θα συνδυάζετε με υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων) Παίρνουμε αυξημένη ισχύ στον συγκεκριμένο κύλινδρο, ενώ η κατανάλωση αυξάνει υπέρμετρα.
- Αυξημένη προπορεία έγχυσης. (Θα συνδυάζετε με χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων.) Μπορεί να προκαλεί ανεπιθύμητες, πρόωρες καύσεις πυρήνων καυσίμου.

Αν είναι χαμηλότερη τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Ελλιπής ποσότητα καυσίμου. Δεν αποδίδετε ή πλήρης ισχύς του κυλίνδρου. (Θα συνδυάζετε με χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων).
- Βραδυπορία εγχύσεως καυσίμου, πιθανότατα κακός χρονισμός συστήματος εγχύσεως, πιθανή δυσλειτουργία αντλίας-εγχυτήρων. (Θα συνδυάζεται με υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων), δεν θα πάρουμε την πλήρη ισχύ του κυλίνδρου, η καύση είναι κακή και πιθανόν να έχουμε αυξημένη ρύπανση της μηχανής.

#### Πίεση κατά την συμπίεση (compression pressure) - $p_c$ (bar)

Η πίεση αυτή είναι η πίεση που αναπτύσσεται στον θάλαμο καύσης στο τέλος της συμπίεσης και χωρίς ανάφλεξη του καυσίμου μείγματος.

Η μέτρηση της πίεσης στο θάλαμο καύσης κατά την συμπίεση παρέχει ενδείξεις για την ποιότητα της μηχανής και την κατάσταση της. Πάντως η πίεση εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των βαλβίδων.

Η Πίεση συμπίεσης δεν πρέπει να διαφοροποιείται μεταξύ των κυλίνδρων περισσότερο από  $\pm 3$  bar.

Αν είναι υψηλότερη από την κανονική (δεδομένη από τον κατασκευαστή) τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Μπορεί να προέρχεται από αυξημένη συγκέντρωση εξανθρακώματος στην κεφαλή του εμβόλου.
- Από λεπτότερη προσθήκη παρεμβύσματος, μεταξύ σώματος κυλίνδρου και πώματος.
- Αυξημένη ποσότητα - παροχή λαδιού στο έμβολο, ή αυξημένα κυλινδρέλαια σε περίπτωση δίχρονης μηχανής.
- Μεγάλος σε πάχος διωστήρας, (Για συγκεκριμένου τύπου Μ.Ε.Κ.) \*Μείωση διακένου συμπίεσης - καύσης.
- Κακό χρονισμό της βαλβίδας εξαγωγής ή βλάβη του συστήματος μετάδοσης, (υδραυλικού ή μηχανικού ανάλογα).

Αν είναι χαμηλότερη τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Φθαρμένα ελατήρια εμβόλων
- Μειωμένη παροχή λαδιού
- Έλεγχος του πάχους του καπακιού
- Η βαλβίδα εξαγωγής διαρρέει ή μένει ανοικτή για μεγαλύτερο διάστημα σε μοίρες στροφάλου. Μεγάλες ελευθερίες μεταξύ χιτωνίου και εμβόλου
- Αν είναι μικρός σε πάχος ο διωστήρας
- Αύξηση διακένου συμπίεσης – καύσης

#### Θέση Εκδήλωσης Μέγιστης Πίεσης Καύσης - Pmax position (μοίρες - degrees)

Ο παράγοντας θέσης της μέγιστης πίεσης στον θάλαμο καύσης (location of peak pressure - LPP) βοηθά την κατανόηση του φαινομένου. Σε ιδανικές συνθήκες, η θέση της μέγιστης πίεσης στον θάλαμο καύσης πρέπει να εμφανίζεται 14 μοίρες μετά την έναυση της καύσης ή αλλιώς 14 μοίρες μετά το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ). Σε ιδανικές συνθήκες και ανάλογα με τον σχεδιασμό του θαλάμου καύσης, η έναυση πρέπει να ξεκινά περίπου 20 μοίρες πριν το ΑΝΣ και να έχουμε την μέγιστη πίεση 14 μοίρες μετά το ΑΝΣ. Η θέση της μέγιστης πίεσης στον θάλαμο καύσης είναι ένας μηχανικός συντελεστής όπως ο κινητήρας είναι μια μηχανική συσκευή. Το έμβολο ταξιδεύει πάνω και κάτω και αν η μέγιστη πίεση είναι πολύ νωρίς ή έχει μεγάλη καθυστέρηση τότε δεν παράγεται το μέγιστο έργο. Για αυτό το λόγο η θέση

μέγιστης πίεσης είναι πάντα 14 μοίρες μετά το ΑΝΣ. Κατανοώντας καλύτερα την θέση της μέγιστης πίεσης στον θάλαμο καύσης, πριν από αυτή υπάρχει μια αύξηση πίεσης στον θάλαμο καύσης ενώ μετά από αυτή την θέση η πίεση έχει φθίνουσα πορεία όσο το έμβολο ταξιδεύει προς τα κάτω και ανοίγουν οι βαλβίδες εξόδου.

Η θέση εκδήλωσης μέγιστης πίεσης καύσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20 μοίρες μεταξύ των κυλίνδρων.

Αν είναι υψηλότερη από την κανονική (δεδομένη από τον κατασκευαστή) τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Έλεγχος μετακαύσης
- Έλεγχος μοίρες στροφάλου

#### Μέγιστη Πίεση Καύσεως - Pmax – combustion (bar)

Η Μέγιστη Πίεση Καύσεως έχουμε όταν η μάζα του καυσίμου έχει αναφλεγεί και έχει δημιουργηθεί η δύναμη η οποία ανά την επιφάνεια που παρουσιάζει το έμβολο θα δώσει μηχανικό έργο.

Η Μέγιστη πίεση καύσεως δεν πρέπει να διαφοροποιείται μεταξύ των κυλίνδρων περισσότερο από  $\pm 2$  bar.

Αν είναι υψηλότερη από την κανονική (δεδομένη από τον κατασκευαστή) τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Την πίεση πριν ανοίξουν οι βαλβίδες εξαγωγής
- Θερμική καταπόνηση
- Έλεγχος χρονισμού μηχανής φάσεων καύσης από το διάγραμμα

Αν είναι χαμηλότερη τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Αδυναμία υπερπλήρωσης μηχανής
- Η χαμηλή κινητική ενέργεια προς την έξοδο καυσαερίων

### Γωνία εγχύσεως καυσίμου - Injection angle (σε μοίρες - degrees)

Ο κατασκευαστής της κάθε μηχανής δίνει την γωνία έναρξης της εγχύσεως που είναι τιμή στάνταρ, όμως αυτό αλλάζει ανάλογα με το καύσιμο.

Ο χρόνος εγχύσεως έχει άμεση σχέση με την γωνία στροφάλου ως προς την στιγμή έναρξης της έγχυσης στην μηχανή η έγχυση ξεκινά πριν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ, άρα το κομβίο του στροφάλου είναι 18 μοίρες πριν το 0 που είναι το ΑΝΣ, αν η έγχυση ξεκινήσει πριν τις 18 μοίρες είναι προπορεία, αν η έγχυση ξεκινήσει μετά τις 18 μοίρες είναι βραδυπορία.

Η γωνία έναρξης της εγχύσεως καυσίμου δεν πρέπει να διαφοροποιείται μεταξύ των κυλίνδρων περισσότερο από  $\pm 0,7$  μοίρες.

Αν είναι μεγαλύτερη τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Έχουμε αυξημένη προπορεία εγχύσεως πιθανότητα κρουστικής καύσης από πρόωρη ανάφλεξη.

Αν είναι μικρότερη τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Έχουμε βραδυπορία καυσίμου και θα παρουσιαστεί εμφανής καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου. Καθυστέρηση ανάφλεξης (ignition delay) είναι το χρονικό διάστημα ή ο αντίστοιχος αριθμός μοιρών περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα, μεταξύ έναρξης εισαγωγής και ανάφλεξης του μείγματος.
- Πιθανότητα ανεπιθύμητων μετακαύσεων στην φάση της εκτόνωσης των καυσαερίων.

### Θερμοκρασία καυσαερίων - Exhaust gases temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

Η θερμοκρασία καυσαερίων, είναι πολύ σημαντικό κριτήριο, λόγω των θερμικών καταπονήσεων που υποβάλει τα μεταλλικά τμήματα της μηχανής και την αυξημένη επικινδυνότητα αναφλέξεως συγκεντρώσεων εύφλεκτων ρύπων.



Τέλος για διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας των καυσαερίων πράγμα που αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την καλή λειτουργία της μηχανής.

Για τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων δεν πρέπει να διαφοροποιείται μεταξύ των κυλίνδρων περισσότερο από  $\pm 30$  °C, με ανώτατο όριο διαφοράς τούς 50 °C.

Αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Αν έχουμε καθαρό ψυγείο αέρα (air coolers)
- Αν η θερμοκρασία του ψυκτικού κυκλώματος είναι σωστή
- Αν η πίεση στο ψυγείο έχει ανέβει, που σημαίνει ότι ο αέρας δεν ψύχεται και διατηρεί αυξημένο όγκο.
- Την θερμοκρασία των κύριων ψυγείων θαλάσσης (central cooling system).
- Την εναλλαγή του αέρα, μέσω των ανεμιστήρων και την πίεση του μηχανοστασίου (forced draft fans).
- Το φορτίο της μηχανής.

Πτώση της θερμοκρασίας των καυσαερίων τότε τα αίτια που ελέγχουμε είναι:

- Ελαττωμένη ποσότητα καύσιμου
- Αυξημένη πορεία εκχύσεως καύσιμου

### 2.1.2 Κατηγορίες των κινητήρων Diesel

Οι ναυτικές μηχανές diesel μπορούν να είναι 2-χρονες ή 4-χρονες, διάφορων τύπων, σχημάτων, μεγεθών και ισχύος.(Λ. Κλιάνης κ.ά., 2017)

Πιο αναλυτικά οι κατηγορίες που κατατάσσονται είναι:

- 2-X(δίχρονοι) ή 4-X(τετράχρονοι), όπου οι 2-X κινητήρες έχουν θυρίδες εισαγωγής του αέρα και θυρίδες ή βαλβίδες εξαγωγής των καυσαερίων, ενώ οι 4-X κινητήρες έχουν δύο βαλβίδες εισαγωγής αέρα και δυο βαλβίδες εξαγωγής του αέρα.
- Με φυσική αναπνοή ή υπερπληρωμένοι
- Ο αριθμός των κυλίνδρων και η διάταξη τους

- Η διάμετρος και η διαδρομή του εμβόλου ή ο όγκος εμβολισμού
- Με βάκτρο και ζύγωμα-διωστήρα-στρόφαλο στους 2- $X$  και μόνο με διωστήρα-στρόφαλο στους 4- $X$
- Αριθμό στροφών ανά λεπτό, όπου ανάλογα με τον αριθμό χωρίζονται σε κατηγορίες (βραδύστροφοι, μεσόστροφοι και ταχύστροφοι)

### 2.1.2.1 Σύγκριση 2- $X$ και 4- $X$ κινητήρων Diesel

#### 2- $X$ κινητήρες

Είναι κινητήρες, οι οποίοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για τη πρόωση των πλοίων και λόγω των χαμηλών στροφών συνδέονται απ' ευθείας με την έλικα, χωρίς μειωτήρα.

Τα χαρακτηριστικά των 2- $X$  κινητήρων είναι, 1) οι στροφές τους είναι περίπου 100rpm. 2) Η διαδρομή  $s$  είναι μεγάλη, πρέπει όμως  $s/D < 4$ . 3) Η διάμετρος ( $D$ ) του κυλίνδρου είναι 280-980 mm και η διαδρομή εμβόλου ( $S$ ) ίση με 980-3188mm. 4) Οι 2- $X$  κινητήρες έχουν διπλάσιο αριθμό διαδρομών ισχύος από τους 4- $X$  κινητήρες έτσι ώστε να έχουν ίση ισχύ με τους 4- $X$  σε μικρότερη μέση πίεση, άρα υπόκεινται σε λιγότερα φορτία. 5) Η θερμοκρασία καυσαερίων στους 2- $X$  είναι μικρότερη λόγω της σάρωσης και τις ανάμειξης του ατμοσφαιρικού αέρα με τα καυσαέρια, με αποτέλεσμα τη δυσκολότερη υπερπλήρωση. 7) Λόγω της αυξημένης τιμής του  $s/D$ , χρησιμοποιείται πλέον μόνο η ευθύγραμμη σάρωση. 8) Κύλινδροι με ψύξη κοντά στο χώρο καύσεως. 9) Λίπανση των κυλίνδρων για την αποφυγή διάβρωσης λόγω του όξινου περιβάλλοντος καύσης. 10) Έμβολο και βάκτρο. 11) Ψύξη με νερό ή λάδι. 10) Διάφραγμα για διαχωρισμό του κυλίνδρου από τα μηχανικά μέρη. 12) Ζύγωμα-Στροφαλοφόρος. 13) Έχει ευκολότερη συντήρηση. 14) Ισχύς/Κύλινδρο είναι 400- 5710 kW.

#### 4- $X$ κινητήρες

Τα χαρακτηριστικά των 4- $X$  κινητήρων είναι, 1) η ισχύς είναι ως 4500 kW και είναι υπερπληρωμένοι. 2) Η διάταξη είναι κατακόρυφη σε σειρά μέχρι 10 ή σε διάταξη  $V$  μέχρι 20 κύλινδροι. 3) Η διάμετρος ( $D$ ) του κυλίνδρου είναι 280-620 mm και η διαδρομή εμβόλου ( $S$ ) ίση με 320-660mm. 4) Ισχύς/Κύλινδρο ως 4500 kW. 5)

Εγκατάσταση πολλών μηχανών σε χωριστούς ελικοφόρους. 6) Πλεονέκτημα εύκολων ελιγμών. 7) Μικρότερο ύψος μηχανοστασίου από τους 2-X.

#### Λειτουργία 2-X κινητήρα

1<sup>ος</sup> χρόνος:

Η εκκίνηση του εμβόλου από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ περιλαμβάνει,

- Ολοκλήρωση της εισαγωγής αέρα
- Ολοκλήρωση εξαγωγής και σάρωσης καυσαερίων
- Συμπίεση
- Έναρξη εγχύσεως και καύσεως

2<sup>ος</sup> χρόνος:

Η εκκίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ περιλαμβάνει,

- Ολοκλήρωση εγχύσεως και καύσεως
- Εκτόνωση καυσαερίων
- Έναρξη εξαγωγής καυσαερίων
- Έναρξη εισαγωγής αέρα

#### Λειτουργία 4-X κινητήρα

1<sup>ος</sup> χρόνος:

Η εκκίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ περιλαμβάνει,

- Βαλβίδα εισαγωγής ανοιχτή βαλβίδα εξαγωγής κλειστή
- Εισαγωγή ατμοσφαιρικού αέρα
- Βαλβίδα εισαγωγής κλειστή

2<sup>ος</sup> χρόνος:

Η εκκίνηση του εμβόλου από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ περιλαμβάνει,

- Βαλβίδα εισαγωγή κλειστή-βαλβίδα εξαγωγής κλειστή

- Συμπύεση

3<sup>ος</sup> χρόνος:

Η εκκίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ περιλαμβάνει,

- Βαλβίδα εισαγωγή κλειστή-βαλβίδα εξαγωγής κλειστή
- Έγχυση καυσίμου
- Καύση
- Εκτόνωση

4<sup>ος</sup> χρόνος:

Η εκκίνηση του εμβόλου από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ περιλαμβάνει,

- Βαλβίδα εξαγωγής ανοιχτή-βαλβίδα εισαγωγής κλειστή
- Εξαγωγή καυσαερίων
- Βαλβίδα εξαγωγής κλειστή

### 2.1.3 Λειτουργία κινητήρων Diesel

Στους κινητήρες diesel, η ροπή στρέψεως  $M_{dD}$ , είναι ανάλογη της μέσης πραγματικής πίεσης ( $p_e$ ), η οποία εξαρτάται από τη ποσότητα του καυσίμου που εκτοξεύεται στους κυλίνδρους (ρυθμίζεται από ρυθμιστή στροφών ή χειροκίνητα) και ανεξάρτητη των στροφών ( $n$ ). Αυτή η σχέση ισχύει προσεγγιστικά σε μία ορισμένη περιοχή και εξαρτάται πάντα, από το τύπο του κινητήρα.

Από τη μορφή της ροπής στρέψεως  $M_{dD}$ , προκύπτει ο υπολογισμός της ισχύς του κινητήρα diesel στον άξονα της έλικας ( $P_D$ ), αφού ισχύει: (Ι. Ιωαννίδης, 2009)

$$P_D = M_{dD} \cdot \omega = M_{dD} \cdot \frac{\pi n}{30} = C_D \cdot n, \quad \text{για } p_e = \text{σταθ.}$$

$P_D$ : ισχύς του κινητήρα diesel στον άξονα της έλικας, kW

$M_{dD}$ : ροπή στρέψεως του κινητήρα diesel στον άξονα της έλικας, kNm

$\omega$ : γωνιακή ταχύτητα της έλικας, rad/s

$n$ : στροφές τις έλικας, RPM

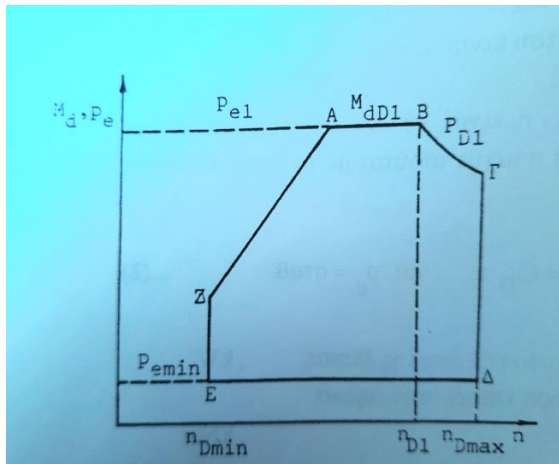
$C_D$ : σταθερά αναλογίας,  $kNm \text{ min/s}$

Μέσα από τη παραπάνω σχέση προκύπτει ότι, για σταθερή  $p_e$ , η ισχύς είναι ανάλογη των στροφών του κινητήρα. Η τιμή της  $C_D$ , είναι διαφορετική για τη κάθε τιμή της μέσης πραγματικής πίεσης. Σε περίπτωση που η μέγιστη ροπή στρέψεως δεν είναι ανεξάρτητη των στροφών, τότε θα επηρεάζεται ανάλογα και η μέγιστη ισχύς των στροφών στον κινητήρα.

Σε περίπτωση πραγματικού κινητήρα όμως, η ροπή και η ισχύς σε συνάρτηση με τις στροφές, δεν ισχύουν σε όλο το πεδίο.

### 2.1.3.1 Σημαντικότερα χαρακτηριστικά για τη λειτουργία κινητήρα diesel

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η μέγιστη ροπής στρέψεως  $M_{dD1}$ . Όπου ξεκινάει από το σημείο Α μέχρι το Β, αυτή η γραμμή αντιστοιχεί στις ονομαστικές στροφές του κινητήρα. Από το σημείο Β όπου ονομάζεται ‘‘ISO standard power’’ (συχνό πεδίο σε 2-Χρονούς κινητήρες diesel) μέχρι το Γ, παρατηρείται ότι ελαττώνεται η περιοχή λειτουργίας από τη μέγιστη συνεχή ισχύ του κινητήρα. Η ευθεία ΓΔ, είναι οι μέγιστες στροφές  $n_{Dmax}$  που λειτουργεί ο κινητήρας. Η ευθεία ΔΕ, είναι η ελάχιστη μέση πραγματική πίεση  $p_{emin}$  που λειτουργεί ο κινητήρας, με αρκετά προβλήματα λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών. Η ευθεία ΕΖ, περιορίζει το πεδίο λειτουργίας του κινητήρα με τις αντίστοιχες ελάχιστες στροφές. (Ι. Ιωαννίδης, 2009) Σε αυτό το σημείο είναι δύσκολη η αυτανάφλεξη στον κινητήρα. Στο πεδίο ΖΑ, οι στροφές είναι χαμηλές και παρουσιάζονται περιορισμοί λόγω του υπερπληρωτή. Σε αυτά τα σημεία που αντιστοιχούν στη ΖΑ, ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει για απεριόριστο χρονικό διάστημα.



**Διάγραμμα 1.** Διάγραμμα ροπής στρέψεως-στροφών κινητήρα diesel

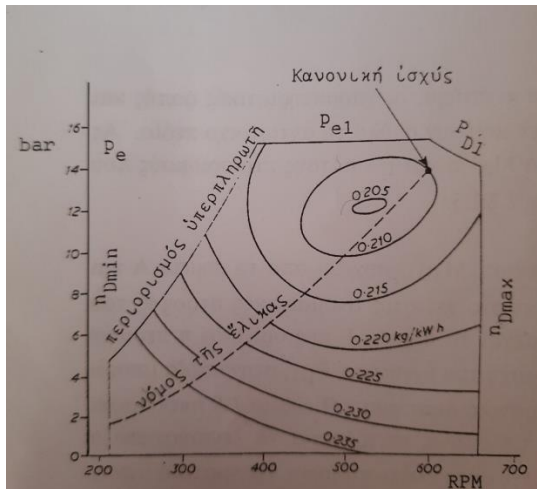
(Πηγή: Ι. Ιωαννίδης, 2009)

Πεδίο λειτουργίας του κινητήρα diesel σε διάγραμμα ροπής στρέψεως-στροφών

Ανάλογα με τη κατασκευή του κάθε κινητήρα, υπάρχουν και αποκλίσεις για το τρόπο που περιορίζεται η έκταση του πεδίου λειτουργίας.

Η ειδική κατανάλωση του καυσίμου, είναι ένας επιπρόσθετος σημαντικός παράγοντας για το κινητήρα diesel.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η ειδική κατανάλωση με σχεδόν ελλειψοειδές καμπύλες. Στο κέντρο βρίσκεται η έλλειψη με τη μικρότερη ειδική κατανάλωση. Σε βραδύστροφους κινητήρες, με στροφές που αντιστοιχούν στο νόμο της έλικας, η μικρότερη ειδική κατανάλωση είναι ίση με το 75-85% της μέγιστης συνεχούς ισχύς του κινητήρα diesel.

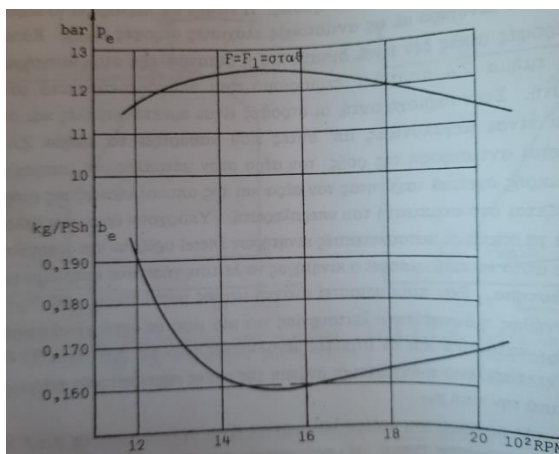


**Διάγραμμα 2.** Καμπύλες σταθερής ειδικής κατανάλωσης

(Πηγή: Ι. Ιωαννίδης, 2009)

Καμπύλες σταθερής ειδικής κατανάλωσης

Επιπλέον, η ειδική κατανάλωση μπορεί να δοθεί με τη μορφή καμπύλης ειδικής κατανάλωσης σε συνάρτηση της ισχύος. Θα μπορούσαν όμως, τα σημεία να βρίσκονται πάνω σε μία καμπύλη σταθερής παροχής καυσίμου και να μεταβάλλονται μόνο με τις στροφές.



**Διάγραμμα 3.** Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης συναρτήσει των στροφών για σταθερή περιοχή καυσίμου

(Πηγή: Ι. Ιωαννίδης, 2009)



#### 2.1.4 Υπερπλήρωση

Υπερπλήρωση είναι η πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα μεγαλύτερης πυκνότητας από αυτόν που εισερχόταν μέσω φυσικής αναπνοής. Η μεγαλύτερη πυκνότητα επιτυγχάνεται με την αύξηση της πίεσεως του αέρα από το συμπιεστή. Επιπλέον, για να υπάρξει μεγαλύτερη πυκνότητα θα πρέπει να υπάρχει και μεγαλύτερη μάζα του αέρα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου, άρα και την αύξηση της ισχύς του κινητήρα.

Για τη πραγματική ισχύ του κινητήρα, ισχύει ότι:

$$Pe = m_B \cdot H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_m , (1)$$

$m_B$  : κατανάλωση καυσίμου, Kg/s

$H_u$  : κατώτερα θερμογόνο δύναμη καυσίμου, J/kg

$\eta_i$  : εσωτερικός βαθμός απόδοσης

$\eta_m$  : μηχανικός βαθμός απόδοσης

Εάν, αντικατασταθεί η κατανάλωση καυσίμου, προκύπτει ότι:

$$m_B = \frac{m_z}{m_{\min} \cdot \lambda_v} , (2)$$

$m_z$  : αέρας καύσεως,  $m^3$

$m_{\min}$  : ελάχιστη ποσότητα αέρα, kg air/kg fuel

$\lambda_v$  : αέρας που παρίσταται στη καύση, mV

Με τη χρήση υπερπληρωτή, σημειώνεται αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος (όπως αναφέρεται παραπάνω) και σύμφωνα με τη σχέση (2) και ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης, π.χ. στους στροβιλοϋπερπλητωτές, γιατί ο στρόβιλος κινείται με ομοιόμορφες χρονικά και περιφερειακά συνθήκες στην είσοδο.

Αυτό που προκύπτει από τις σχέσεις (1) και (2) είναι:

$$Pe = \frac{m_z \cdot H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_m}{\lambda_v \cdot m_{\min}} , (3)$$



Όπου  $H_u$ ,  $\lambda_v$  και  $m_{\min}$  είναι σταθερά.

Τα όρια ψύξεως του αέρα υπερπληρώσεως (προσδιορίζονται με τη θεωρία μειγμάτων) καθορίζονται με τρόπο τέτοιο, ώστε να μην συμπυκνούνται ο υδρατμός που περιέχεται σ' αυτόν. Για τη μέγιστη υπερπλήρωση πρέπει να διατηρηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία.

Στους κινητήρες χρησιμοποιείται ο στροβιλοϋπερπλητωτής (turbocharger), οποίος αποτελείται από το στρόβιλο που κινείται από τα καυσαέρια και το περιστροφικό συμπιεστή. (Ι. Ιωαννίδης, 2009) Με τη χρήση του στροβιλοϋπερπλητωτή, υπάρχουν δύο τρόποι υπερπλήρωσης:

- Υπερπλήρωση σταθερής πίεσης όπου, ο στρόβιλος δέχεται σταθερή πίεση και υψηλότερη στατική θερμοκρασία (λόγω της στράγγισης των καυσαερίων που ρέουν προς το συλλέκτη καυσαερίων)
- Τη κρουστική υπερπλήρωση όπου, τα καυσαέρια μέσω των κυλίνδρων (σε κάθε κύλινδρο επικρατούν διαφορετικές συνθήκες) φτάνουν στο στρόβιλο και προσβάλλουν διαφορετικό τομέα ακροφυσίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου να υποφέρει.

Συμπερασματικά σε περίπτωση 2-X κινητήρα diesel, η υπερπλήρωση είναι μεγαλύτερη, λόγω της μη εφαρμογής κρουστικής καύσης, άρα και εφαρμογή υψηλότερων πιέσεων (που οφείλονται στην αντοχή των 2-X κινητήρων).

#### 2.1.4.1 Υπερπλήρωση 2-X κινητήρων

Τα χαρακτηριστικά της υπερπλήρωσης των 2-X κινητήρων είναι:

- Ο μικρός χρόνος που διατίθεται για την αλλαγή μείγματος
- Απαιτείται μεγαλύτερη παροχή αέρα για την επίτευξη της αποπλύσεως
- Λόγω του μεγαλύτερου όγκου αέρα, θα πρέπει η θερμοκρασία των καυσαερίων όταν εξάγονται από τον στροβιλοϋπερπλητωτή να είναι χαμηλότερη

- Λόγω της μικρής ποσότητας αέρα (λόγω φορτίων ή ξεκινήματος), χρησιμοποιείται ανεμιστήρας όταν η υπερπλήρωση πέσει κάτω από μία ορισμένη τιμή (24bar) με τη χρήση ηλεκτροκινητήρα

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλές στροφές, απαιτείται μεγαλύτερη ισχύ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διβάθμια υπερπλήρωση και ψύξη σε ενδιάμεσο ψυγείο.

( I. Ιωαννίδης, 2009)

Ο στροβιλοϋπερπλητωτής παρέχει την απαιτούμενη πίεση πληρώσεως σε συνάρτηση με το φορτίο του κινητήρα. Σε περίπτωση επιλογής στροβιλοϋπερπλητωτή που θα παρέχει την απαιτούμενη πίεση πληρώσεως στο 50% του φορτίου, θα παρέχει πολύ μεγαλύτερη από την απαιτούμενη πίεση σε πλήρες φορτίο. ( I. Ιωαννίδης, 2009) Στη περίπτωση αυτή το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη μείωση της παροχής καυσαερίων με τη διαδικασία εκτόνωσης σε στρόβιλο ισχύος μέσω μειωτήρα προς το στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα. Ο στρόβιλος ισχύος χρησιμοποιείται σε 2-X και 4-X κινητήρες, αλλά και για τη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε πλήρες φορτίο της κύριας μηχανής. Ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ο στροβιλοϋπερπλητωτής μπορεί να έχει διαμορφωθεί για την απαιτούμενη πίεση του πλήρες φορτίου, θα παρέχει μικρότερη απαιτούμενη πίεση σε φορτίο 50%.

## 2.2 Καύση και Καύσιμα

Τα καύσιμα και κατ' επέκταση και η καύση αυτών, εξασφαλίζουν τη κίνηση των πλοίων. Το γεγονός ότι δια θαλάσσης μεταφέρεται το 90% του παγκόσμιου εμπορίου, τα καύσιμα και η καύση αυτών από τους κινητήρες των πλοίων, τα καθιστά πρωταρχικής σημασίας για τη ποιότητα, τη διαθεσιμότητα και τη χρήση αυτών, με τις λιγότερες επιπτώσεις.

### 2.2.1 Ανάφλεξη και αυτανάφλεξη

Η ανάφλεξη υλοποιείται στα υγρά καύσιμα και είναι η έναρξη του φαινομένου της καύσεως. Το σημείο ανάφλεξης (flash-point) πραγματοποιείται στην κατώτερη θερμοκρασία, όπου ένα υγρό αναδύει επαρκής ατμούς, σχηματίζοντας το κατάλληλο μείγμα ατμός καυσίμου/αέρα, με μία πηγή θερμότητας. (I. Δαγκίνης & Α. Γλύκας,

2017) Η πτητικότητα έχει μεγάλη σημασία στη διαχείριση των καυσίμων και την ανάφλεξη τους.

Το σημείο ανάφλεξης μετράτε με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος, είναι η μέθοδος ανοιχτού δοχείου, όπου χρησιμοποιείται ως σημείο ανάφλεξης ένα ανοιχτό δοχείο για την υποδοχή του δείγματος. Ενώ η δεύτερη μέθοδος, είναι η μέθοδος κλειστού δοχείου, όπου όπου χρησιμοποιείται ως σημείο ανάφλεξης ένα κλειστό δοχείο.

- Μέθοδος ανοιχτού δοχείου του υγρού, πραγματοποιείται στη χαμηλότερη θερμοκρασία, όπου η εφαρμογή μίας φλόγας προκαλεί στα αέρια του υγρού ανάφλεξη, όταν θερμαίνονται υπό καθορισμένες συνθήκες σε ανοιχτό δοχείο.
- Μέθοδος κλειστού δοχείου του υγρού, πραγματοποιείται στη χαμηλότερη θερμοκρασία, όπου η εφαρμογή μίας φλόγας προκαλεί στα αέρια που βρίσκονται πάνω από το υγρό ανάφλεξη, όταν το υγρό θερμαίνεται υπό καθορισμένες συνθήκες σε κλειστό δοχείο.

Το σημείο ανάφλεξης του ανοιχτού δοχείου είναι πάντα λίγο υψηλότερο, επειδή υπάρχει μεγαλύτερη απώλεια αερίων στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος κλειστού δοχείου να είναι πιο αποτελεσματική.

Εκτός από τη ανάφλεξη των υγρών, μπορεί να δημιουργηθεί και το φαινόμενο της αυτανάφλεξης (spontaneous ignition temperature), όπου το μείγμα αέρα καυσίμου θα αναφλεγεί μόνο του, χωρίς τη βοήθεια εξωτερικής πηγής. Το κοινό με τη ανάφλεξη είναι ότι θα πρέπει να υπάρχει ανάμειξη των ατμών του νερού με τον αέρα. Επιπλέον, η αυτανάφλεξης ενός μείγματος καυσίμου/αέρα μπορεί να πραγματοποιηθεί συμπιέζοντας το έως την θερμοκρασία αυτανάφλεξης του. ανάλογα των χαρακτηριστικών του κάθε καυσίμου, μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτανάφλεξη είτε σε χαμηλή είτε σε υψηλή πίεση.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι το σημείο αναφλέξεως είναι ανεξάρτητο από το σημείο αυτανάφλεξης.

### 2.2.2 Καύση

Καύση ορίζεται η εξώθερμη αντίδραση μίας ουσίας οξυγόνου ( $O_2$ ) ή αέρια, που συνδέεται από εκπομπή φωτός και έκλυση θερμότητας. Εκτός από το  $O_2$ , μπορούν κι άλλες ουσίες να προκαλέσουν καύση, όπως το όζον ( $O_3$ ), το φθόριο ( $F_2$ ) και το χλώριο ( $Cl_2$ ). Για τη διαδικασία της καύσης είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση των αντιδρώντων σωμάτων, με δημιουργία σπινθήρων ή με θέρμανση τους σε υψηλή θερμοκρασία. (Ι.Δαγκίνης & Α. Γλύκας, 2017) Ανάλογα με το οξυγόνο η καύση μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, τη τέλεια καύση και την ατελή καύση. Πιο αναλυτικά:

- Όταν δεν περισσεύει άκαυστη χημική ουσία και η καύση γίνεται με περίσσεια οξυγόνου, τότε δημιουργείται η τέλεια καύση. Αυτή η καύση είναι σχεδόν αδύνατον να πραγματοποιηθεί και το επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι παραμένει άκαυστη ποσότητα χημικής ουσίας.
- Στην ατελή καύση απαιτείται ελάχιστη ποσότητα αέρα, η οποία δίδεται από τη στοιχειομετρική εξίσωση.

Όπου, ισχύει:

$$m_{\min} = 11,5 \cdot C + 34,3 \cdot H + 4,31 \cdot S - 4,32 \cdot O, \text{ kg air/kg fuel}$$

C, H, S, O: είναι η ποσοστιαία περιεκτικότητα των διάφορων στοιχείων του καυσίμου.

Η έναρξη της καύσεως γίνεται σε  $0-5^\circ$ . Στο τέλος της συμπίεσεως επικρατεί η πίεση συμπίεσεως  $p_c$ , ενώ η μεγαλύτερη πίεση καύσεως είναι η  $p_z$ . Ο συνολικός χρόνος καύσεως  $\varphi_v$ , περιλαμβάνει το διασκορπισμό του καυσίμου και τη καθ' αυτό καύση.

Η καθυστέρηση της ανάφλεξης, εξαρτάται από τη  $p_c$ ,  $T_c$  και από τον αριθμό κητανίου του καυσίμου. Η καθυστέρηση της ανάφλεξης σε πραγματικό χρόνο είναι 1-12 msec επί του συνολικού χρόνου καύσεως 5-50 msec.

Η καύση του καυσίμου πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις:

- Πρώτη φάση καύσεως με απότομη αύξηση της πίεσης. Η μέση ταχύτητα καύσεως είναι:

$$w_m = \frac{p_3 - p_2}{\varphi_3 - \varphi_2}, \text{ bar/rad}$$

$\varphi_3, \varphi_2$ : γωνίες στροφάλου, rad

$p_3, p_2$ : πιέσεις, bar

Στην καύση βαρέος πετρελαίου αυξάνεται το  $w_m$  λόγω της μεγαλύτερης καθυστέρησης αναφλέξεως. Σε βραδύστροφους κινητήρες η οριακή τιμή είναι η  $w_m < 5$  bar/rad προ του Α.Ν.Σ.

- Δεύτερη φάση, είναι η ελεγχόμενη καύση. Σε αυτό το στάδιο καίγεται το περίπου το 50% του καυσίμου σε πλήρες φορτίο. Δημιουργείται η μέγιστη πίεση καύσεως  $p_z$ , που είναι σχεδόν 30% μεγαλύτερη από τη πίεση συμπίεσεως  $p_c$ .
- Στη τελευταία και Τρίτη φάση, καίγεται λίγο ποσοστό καυσίμου < 10%.

### 2.2.3 Καύσιμα

Το αργό πετρέλαιο (crude oil), δημιουργήθηκε από την αποσύνθεση θαλασσινής ζωής και από οργανική ύλη φυτών, κάτω από την επίδραση βακτηριδίων, υψηλής θερμοκρασίας, πίεσης και χρόνου, στα διάφορα στρώματα της γης, σε βάθος από λίγα μέχρι 5.000 μέτρα. (Σταματόπουλου Β. & Σταματόπουλου Δ., 2018) Το αργό αποτελείται από ένα σύνθετο μείγμα υδρογονανθράκων, καθώς και θείο (0-5%), άζωτο (0-1%), οξυγόνο (0-2%), νερό και ίχνη μεταλλικών στοιχείων (0-0,1%).

Το σχήμα και η σύνθεση της ένωσης του αργού πετρελαίου, ευθύνονται για τη ποιότητα του. Κατ'επέκταση η ποιότητα του καυσίμου, επηρεάζει τη καύση στη μηχανή, όπως τις βαλβίδες εξαγωγής, τις βαλβίδες εισαγωγής και τις αντλίες, αλλά και τους υπερπληρωτές και το σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων. Επιπλέον, ανάλογα με το καύσιμο, αλλάζει η διαδικασία καθαρισμού του.

### 2.2.3.1 Είδη και Κατηγορίες Ναυτιλιακών Καυσίμων

Σύμφωνα με το ISO:8217, τα ναυτιλιακά καύσιμα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το περιεχόμενο, τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές του καυσίμου.

Παρακάτω αναλύονται οι κατηγορίες:

- Το πρώτο στάδιο είναι δύλιση, που αρχίζει με τη απόσταξη του αργού, δηλαδή την επεξεργασία και μετατροπή του.
- Το αργό πετρέλαιο μετά τη μεταφορά του στα δυλιστήρια αποθηκεύτε σε δεξαμενές για επιπρόσθετη επεξεργασία του και την παραγωγή προϊόντων, όπου πραγματοποιείται με κλασματική απόσταξη. Η κλασματική απόσταξη είναι η διαδικασία απομακρύνσεως και διαχωρισμού των κλασμάτων του αργού με κριτήριο το σημείο βρασμού. (Ι.Δαγκίνης & Α. Γλύκας, 2017) Τα κύρια προϊόντα της κλασματικής απόσταξης είναι πετρελαϊκά αέρια, πετρελαϊκά ελαφρά, μέσης αποστάξεως, βαριά πετρελαϊκά και υπολείμματα.
- Τα υπολείμματα απόσταξης (residues), είναι τα παρθένα υπολείμματα που απομένουν μετά την ατμοσφαιρική κλασματική απόσταξη. Χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία των μονάδων vacuum distillation και για blending των ενδιάμεσων καυσίμων ναυτιλίας.
- Vacuum residues, είναι τα υπολείμματα από κλασματική απόσταξη υπό κενό, από μονάδα VPS (Vacuum Pipe Still), που χρησιμοποιείται για την αύξηση παραγωγής των αποσταγμάτων σε θερμοκρασίες  $>370^{\circ}\text{C}$ .
- Τα υπολείμματα καταλυτικής σχάσης (catalytic cracked residues), είναι βαρέα κλάσματα απόσταξης και υπολείμματα από τη μονάδα VPS μετατρέπονται με τη βοήθεια του καταλύτη αλουμινίου-πυριτίου στον αντιδραστήρα.
- Τα υπολείμματα ιξωδόλυσης (visbroken residues), είναι τα υπολείμματα από μονάδες APS και VPS σε θερμικό αντιδραστήρα.

Στη ναυτιλία τα κύρια καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα:

| Marine fuel                        | Max. Sulphur Content | Refining                |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| MGO (Marine Gas Oil)               | 1,5%                 | Distillation            |
| MDO (Marine Diesel Oil)            | 1,5%                 | Distillation            |
| IFO (Intermediate Fuel Oil)        | 3,5%                 | HFO+MGO or MDO          |
| HFO (Heavy Fuel Oil)               | 3,5%                 | Fractional Distillation |
| HSFO (High Sulphur Fuel Oil)       | 3,5%                 | Distillation Residues   |
| LSFO (Low Sulphur Fuel Oil)        | 1%                   | Distillation Residues   |
| ULSFO (Ultra-low Sulphur Fuel Oil) | 0,1%                 | Distillation Residues   |

**Πίνακας 1.** Πίνακας Καυσίμων

MGO (Marine Gas Oil): είναι μία ομάδα αποσταγμάτων που μπορούν να καούν σε κινητήρες αυτόματης ανάφλεξης. Η σύνθεση του αποτελείται από υδρογονάνθρακες με πολύ μικρή ποσότητα θείου, οξυγόνο και άζωτο. Αν ρυπανθεί από καύσιμο, τότε θα περιέχει τα μέταλλα βανάδιο, νικέλιο, αλουμίνιο και νάτριο. Ενώ σε περίπτωση που μολυνθεί από νερό, το ελαφρυντικό για τα μέταλλα που περιέχει είναι ότι το νερό χωρίζεται από το καύσιμο και τα μέταλλα πέφτουν στον πυθμένα του settling tank. (Δ. Σταματόπουλος, 1993)

MDO (Marine Diesel Oil): είναι ένας όρος για το ναυτιλιακό πετρέλαιο ντίζελ, όπου αποτελείται από διάφορα αποστάγματα και βαρύ μαζούτ. Τα αποστάγματα είναι όλα εκείνα τα συστατικά του αργού πετρελαίου που εξατμίζονται σε κλασματική απόσταξη και στη συνέχεια συμπυκνώνονται από την αέρια φάση σε υγρά κλάσματα. Έχει μεγάλη πυκνότητα και δεν χρειάζεται να θερμανθεί πριν την αποθήκευση του.

Τα κοινά χαρακτηριστικά του MGO και MDO, ότι είναι καύσιμα απόσταξης και χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητήρες υψηλής και μεσαίας ταχύτητας και



γεννήτριες. Έχουν χαμηλό ιξώδες και σημείο ανάφλεξης και χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο μετρούμενο κατ' όγκο (κατά βάρος έχουν υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο) από τα πιο παχύρρευστα καύσιμα, αλλά είναι γενικά πιο καθαρά και παράγουν λιγότερους αέριους ρύπους.

IFO (Intermediate Fuel Oil): είναι το ενδιάμεσο μαζούτ, το οποίο αποτελείται από τη μίξη του HFO με ποσοστό περίπου 98% και με MGO ή MDO σε ποσοστό σχεδόν 2%. Οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη ναυτιλία είναι το IFO 380 mm<sup>2</sup>/s και το IFO180 mm<sup>2</sup>/s.

HFO (Heavy Fuel Oil): είναι ένας όρος που καλύπτει πολλά διαφορετικά θαλάσσια υπολείμματα καυσίμου.(J. Bai & A. Chircop,2020) Το HFO παράγεται από ένα μίγμα υπολειμματικών καυσίμων, για επιτευχθεί υψηλό ιξώδες και πυκνότητα. Αυτό ποικίλει ανάλογα με τη προέλευση του πετρελαίου τροφοδοσίας, τη ποιότητα ή τις ιδιότητες πετρελαίου τροφοδοσίας, τις παραλλαγές του αποστάγματος που προστίθεται για να παραχθεί το απαιτούμενο ιξώδες και τις διάφορες διαδικασίες διύλισης. Αυτό το καύσιμο απαιτεί συνήθως θέρμανση και φιλτράρισμα για τη σωστή καύση στον κινητήρα. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες του HFO: HSFO, LSFO και ULSFO.

### 2.2.3.2 Εναλλακτικά Ναυτιλιακά Καύσιμα

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων και κατ' επέκταση στη ναυτιλία. Μετά το 2020 έχουν επιβληθεί καινούργιες τεχνολογίες και καύσιμα για την επίτευξη του στόχου. Οι τεχνολογία των scrubbers (αναλύονται στη ενότητα 2.4), τα καύσιμα όπως LNG (Liquid Natural Gas) και το ULSFO (Ultra-low Sulphur Fuel Oil) είναι μερικές από τις τάσεις μείωσης των αέριων ρύπων.

LNG (Liquid Natural Gas): το φυσικό αέριο αποτελείται από μικρότερες ποσότητες βαρύτερων υδρογονανθράκων NGLs. Ανεξάρτητα από τη προέλευση, το φυσικό αέριο χρήζει επεξεργασίας για την αφαίρεση βαρύτερων υδρογονανθράκων και μη υδρογοναθρακικών συστατικών, τη χρήση του ως αεριώδη καύσιμο.(N.Νικητάκος,2013)



Το ακατέργαστο αέριο είναι απαλλαγμένο από κατάλοιπα. Στη συνέχεια ακολουθεί η αφαίρεση των όξινων αερίων. Το διοξείδιο του άνθρακα πρέπει να αφαιρεθεί, επειδή παγώνει σε θερμοκρασία πάνω από το ατμοσφαιρικό σημείο βρασμού του LNG και το τοξικό σύνθετο σουλφίδιο υδρογόνου απομακρύνεται, επειδή προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση όταν καίγεται ως καύσιμο. (McGuire & White, 2020) Με την αφαίρεση του όξινου αερίου, προκύπτει εμπότισμός του αέριου ρεύματος με υδρατμούς, οι οποίοι στη συνέχεια αφαιρούνται. Μετά, το αέριο περνά σε μία μονάδα διαχωρισμού, όπου τα NGLs αφαιρούνται και γίνεται η περαιτέρω διάσπαση σε προπάνιο και βουτάνιο. Στο τελικό στάδιο, η κύρια ροή του αερίου (συνήθως μεθάνιο), υγροποιείται και προκύπτει το υγροποιημένο φυσικό αέριο.

ULSFO (Ultra-low Sulphur Fuel Oil): είναι ένα βαρύ μαζούτ της ναυτιλίας, αλλά με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 0,1% κατά μάζα. Το ULSFO, επειδή είναι υπολειμματικό μαζούτ θα πρέπει να θερμανθεί για να μπορεί να αποθειοθεί. Χρησιμοποιείται για καύση στη κύρια μηχανή, σε ηλεκτρομηχανές και στο λέβητα ατμοπαραγωγής. Γίνεται χρήση του συγκεκριμένου καυσίμου σε περιοχές SECA (Special Emission Control Areas).

### 2.3 Ναυτιλία και ρύπανση

Μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, διαπιστώθηκαν τα προβλήματα από τη θαλάσσια ρύπανση. Σταδιακά παρατηρήθηκε η αύξηση των ρυπογόνων ουσιών που προκαλούνται εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η ρύπανση που προκαλείται από τη ναυτιλία είναι κατά τη μεταφορά φορτίου, εκμετάλλευση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, από διαδικασίες ναυπήγησης, φορτοεκφόρτωσης, ερματισμού, διάλυσης πλοίων, απορρίψεις ουσιών, ναυτικές εργασίες, χύδην επικίνδυνα υγρά φορτία, συσκευασμένα επικίνδυνα ξηρά φορτία. Στην εργασία αναλύονται οι αέριοι ρύποι που προκαλούνται από το κινητήρα του πλοίου κατά τη λειτουργία των προαναφερόμενων εργασιών και μη.

### 2.3.1 Αέριοι ρύποι

Οι αέριοι ρύποι, αναδίδονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα ή είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας με το οικοσύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται χημικοί και βιολογικοί παράγοντες, που επηρεάζουν σημαντικά την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Γι αυτό το λόγο είναι σημαντική η παρακολούθηση των αέριων ρύπων, ώστε να συγκεντρωθούν πληροφορίες για τους ρύπους που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα και να πραγματοποιηθούν μελέτες για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι προέρχονται από SO<sub>x</sub> (οξειδία του θείου), NO<sub>x</sub> (οξειδία του αζώτου), CH<sub>4</sub> (μεθάνιο), CO (μονοξείδιο του άνθρακα), CO<sub>2</sub> (διοξείδιο του άνθρακα), PM (αιωρούμενα σωματίδια), O<sub>3</sub> (όζον), HC (υδρογονάνθρακες), O<sub>2</sub> (οξυγόνο), H<sub>2</sub>O (υδρατμούς), N<sub>2</sub> (άζωτο) και NMVOC (μη μεθανικές οργανικές ενώσεις). (Καρανδεινός, et al, 1996, Γιώργος Τσαλιγκιρίδης, 2015 & Townsend, 2008)

Το CO<sub>2</sub> (διοξείδιο του άνθρακα), CH<sub>4</sub> (μεθάνιο), O<sub>3</sub> (όζον) και το N<sub>2</sub>O (υποξείδιο του αζώτου), ανήκουν στα GHGs (Αέρια του Θερμοκηπίου). Αυτά που δεν είναι αέρια του θερμοκηπίου είναι τα SO<sub>x</sub> (οξειδία του θείου), NO<sub>x</sub> (οξειδία του αζώτου), PM (αιωρούμενα σωματίδια), ο μαύρος άνθρακας κ.ά. (Ψαραύτης, 2013)

Οι αέριοι ρύποι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύπους.

Πρωτογενείς ρύποι: είναι οι ρύποι που εκπέμπονται απευθείας από τη πηγή ρύπανσης στην ατμόσφαιρα. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC και H<sub>2</sub>O. Οι επιπτώσεις που προκαλούνται είναι στη κακή ζωική λειτουργία, τη μείωση της ορατότητας, σκουριά στα μέταλλα, διάβρωση των κατασκευών κ.ά. (Legge & Krupa, 1986)

Δευτερογενείς ρύποι: είναι ρύποι που σχηματίζονται από χημικές αντιδράσεις, που περιλαμβάνουν οι πρωτογενείς ρύποι ή εκπέμπουν χημικές ουσίες που σχηματίζονται στα κατώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας. Σε αυτή τη κατηγορία

ανήκουν  $N_2$  και  $O_3$ . Αυτές οι χημικές ουσίες συμμετέχουν σε ένα σύμπλεγμα φωτοχημικών αντιδράσεων, όπου με τον συνδυασμό της υπεριώδη ακτινοβολίας και του αέρια σχηματίζουν τους δευτερογενείς ρύπους. (Roy M. Harrison and Roger Perry, 1986) Το  $O_3$  είναι ειδική κατηγορία, καθώς σχηματίζεται μέσω χημικών διαδικασιών στη ατμόσφαιρά και είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις καιρικές συνθήκες. (Κρυπα V.S., 1997 & Ανώνυμος, 2000b)

Επιπλέον, οι δευτερογενείς ρύποι μπορεί να είναι αέριοι ή σωματιδιακά αερολύματα. Γι' αυτό το λόγο είναι πιο δύσκολο να ελεγχθούν, επειδή έχουν διαφορετικούς τρόπους σύνθεσης και ο σχηματισμούς τους δεν είναι καλά κατανοητός. Σχηματίζονται συνήθως σε ομοιογενείς αντιδράσεις αέριας φάσης οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις ξεκινούν φωτοχημικά.

### 2.3.2 Εκπομπή αέριων ρύπων από ναυτικούς κινητήρες diesel

Ο προσδιορισμός των ορίων για τους ρύπους από τους κινητήρες, συνθέτουν περίπλοκο κοινωνικό, οικονομικό και πολιτικό θέμα. Τα καυσαέρια που εκπέμπονται από ναυτικούς κινητήρες diesel, δημιουργούνται από μια σειρά προϊόντων καύσης που είναι επιβλαβή για την υγεία και το περιβάλλον. Η σύνθεση αυτών των ρύπων, εξαρτάτε από τον αέρα που υπάρχει στον κινητήρα όταν παραδίδετε το καύσιμο, το καύσιμο, το λιπαντικό λάδι και τη διαδικασία καύσης. Τα καυσαέρια που δημιουργούνται από ναυτικούς κινητήρες diesel περιλαμβάνουν,  $SO_x$  (οξειδία του θείου),  $NO_x$  (οξειδία του αζώτου),  $CO$  (μονοξείδιο του άνθρακα),  $CO_2$  (διοξείδιο του άνθρακα),  $PM$  (αιρούμενα σωματίδια),  $HC$  (υδρογονάνθρακες),  $O_2$  (οξυγόνο),  $H_2O$  (υδρατμούς) και  $N_2$  (άζωτο).

### 2.3.3 Κατηγορίες αέριων ρύπων

Παρακάτω αναλύονται οι αέριοι ρύποι από ναυτικούς κινητήρες diesel:

$SO_x$ : το θείο προέρχεται από τη διύλιση του αργού και πιο συγκεκριμένα από τα διυλιστήρια που φροντίζουν για την αποθείωση του, τα τελευταία χρόνια. Τα οξείδια του θείου σχηματίζονται κατά τη διαδικασία καύσης, με το συνδυασμό του θείου με το οξυγόνο. Το κύριο οξείδιο του θείου είναι το  $SO_2$ . Η ποσότητα των  $SO_x$  που

σχηματίζονται σε ένα κινητήρα εξαρτώνται κυρίως από τη ποσότητα θείου στα καύσιμα. Σε περιπτώσεις όπου το καύσιμο περιέχει μικρή ποσότητα θείου, η λειτουργία των συστημάτων άμεσης έκχυσης νερού στο εσωτερικό του κυλίνδρου και της επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής, ευνοούνται λόγω της ευαισθησίας αυτών των τεχνικών στο θείο. Αντίθετα, όταν στους κινητήρες καίγονται καύσιμα υψηλά σε περιεκτικότητα θείου, τότε εκπέμπουν και μεγάλες ποσότητες SO<sub>x</sub>.

Από τα οξειδία του θείου πάνω από το 95% είναι το ποσοστό του διοξειδίου του θείου SO<sub>2</sub>, που εκπέμπονται από ναυτικούς κινητήρες diesel. Επιπλέον είναι πηγή σχηματισμού θεικών και νιτρικών αλάτων με τη μορφή ανόργανων αερολυμάτων. Επίσης το SO<sub>2</sub> μπορεί να οξειδωθεί και να μετατραπεί σε οξέα.(EPA,2019)

Για τον υπολογισμό SO<sub>2</sub>, χρησιμοποιείται η καταναλωμένη ποσότητα καυσίμου, η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο και τη ποσότητα δέσμευσης θείου κατά τη διαδικασία της καύσης.

Η απλούστερη προσέγγιση για τη μείωση εκπομπών SO<sub>x</sub> είναι η χρησιμοποίηση καυσίμων με μικρότερη περιεκτικότητα σε θείο (π.χ. MGO). Υπάρχουν όμως και άλλοι τρόποι, όπως η οι κινητήρες διπλού καυσίμου και ο καθαρισμός των αερίων με ψεκασμό νερού (SO<sub>x</sub> scrubber).

Ανάλογα με τη ποσότητα θείου και τη πυκνότητα στο καύσιμο, χαρακτηρίζεται το αργό, ως βαρύ ή ελαφρύ.

**NO<sub>x</sub>:** Ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου, εξαρτάτε από τις τοπικές συνθήκες θερμοκρασίας και οξυγόνου μέσα στη περιοχή της καιόμενης δέσμης καυσίμου. (Τζουγανάτος N., 2013) Στους κινητήρες των πλοίων, σχηματίζονται μέσω φωτοχημικού νέφους.

Η μείωση του μπορεί να επιτευχθεί με τη πρωτογενή μέθοδο (μείωση 10%-50%) και τη δευτερογενή μέθοδο με (μείωση μέχρι 90%).

- **Πρωτογενής μέθοδος:** Η λειτουργία του κινητήρα μπορεί να βελτιωθεί μόνο σε συγκεκριμένο φορτίο και ταχύτητα περιστροφής. Αυτό έχει σαν

αποτέλεσμα την αρνητική επίδραση στην ειδική κατανάλωση του καυσίμου. Με την εισαγωγή ηλεκτρονικά ελεγχόμενων κινητήρων, υπάρχουν περισσότερες επιλογές στη μείωση των NO<sub>x</sub>, με λιγότερη επιβάρυνση στη ειδική κατανάλωση του καυσίμου και επιτρέπει την επίτευξη των προτύπων Tier II. Το σύστημα κοινού συλλέκτη, επιτρέπει πολύ υψηλές πιέσεις ψεκασμού, διευκολύνοντας τη κατασκευή μηχανών συμβατών με τα πρότυπα Tier III για τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν τρεις διαφορετικοί μέθοδοι: (Τζουγανάτος Ν., 2013)

- 1) Γαλακτωματοποίηση καυσίμου με νερό (water emulsion): με τη προσθήκη νερού στο καύσιμο πριν την έγχυση, μειώνει τη θερμοκρασία και τα NO<sub>x</sub>, σχεδόν 10%. Τα μειονεκτήματα είναι η αρνητική επίδραση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, η υψηλή κατανάλωση νερού και η ανάγκη αφαλάτωσης και απομετάλλωσης του νερού.
- 2) Άμεση έγχυση νερού (direct water injection): πραγματοποιείται από την άμεση έγχυση νερού μέσω ενός δευτέρου ηλεκτρονικά ελεγχόμενου συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη στους κυλίνδρους του κινητήρα, χωρίς τη προηγούμενη ανάμιξη με το καύσιμο. Σε αυτή τη περίπτωση εκτός από τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα, είναι και η εξασφάλιση ποσοτήτων νερού.
- 3) Ύγρανση του αναρροφώμενου αέρα (air humidification): πειραματικά από τη Man Diesel & Turbo, αυτή η μέθοδος επιτυγχάνετε με τη μείωση της τοπικής μέγιστης θερμοκρασίας καύσης και της συγκέντρωσης υδρατμών. Επιπλέον, υπάρχει μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Πιθανές φθορές μπορούν να γίνουν στους κυλίνδρους, από τα άλατα στον αέρα αναρρόφησης και να δημιουργηθεί επιπλέον μειονέκτημα από τη μεγάλη ποσότητα νερού. (Man Diesel & Turbo, 2008)
- 4) Τεχνολογία επανακυκλοφορίας καυσαερίων (EGR): τμήμα των καυσαερίων καθορίζεται με νερό σε scrubber, ψύχεται και ανατροφοδοτείται στον οχετό εισαγωγής αέρα λόγω του συμπιεστή. Με αυτόν το τρόπο υπάρχει μείωση των SO<sub>x</sub> και PM.

- Δευτερογενής μέθοδος: Σε αυτή τη μέθοδο, εμπεριέχεται ο ψεκασμός διαλύματος ουρίας ή αμμωνίας στο ρεύμα των καυσαερίων πριν την είσοδο τους σε έναν ειδικό καταλύτη. Σε 2-χρονους κινητήρες ο καταλυτικός αντιδραστήρας τοποθετείται ανάμεσα στον οχετό εξαγωγής καυσαερίων και της εισόδου στροβίλου του συστήματος στροβιλοϋπερπληρωτή, για να υπάρξει το αναγκαίο θερμοκρασιακό εύρος για την αποδοτικότερη λειτουργία του.

Για τη διασφάλιση της ακριβούς δοσολογίας της αμμωνίας χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου, το οποίο τροφοδοτεί αρχικά το ρεύμα καυσαερίων με ποσότητα αμμωνίας βάσει μίας ήδη υπάρχουσας συσχέτισης μεταξύ των παραγόμενων NOx και του φορτίου. (Τζουγανάτος Ν., 2013)

CO: ο σχηματισμός του μονοξειδίου του άνθρακα οφείλεται στην ατελή καύση. Είναι συνάρτηση με την τοπική συγκέντρωση του οξυγόνου, τη θερμοκρασία καύσης και την ομοιομορφία του μίγματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται αέριο μεγάλης τοξικότητας. (Τζουγανάτος Ν., 2013)

Σε μικρές μονάδες οι εκπομπές CO είναι μεγαλύτερες λόγω της ατελούς καύσης. Επιπλέον, η ηλικία του κινητήρα έχει σημαντικό ρόλο στην εκπομπή των ρύπων CO και PM. Ένας ακόμη λόγος στις μικρές μονάδες είναι η έλλειψη οξυγόνου για τη καύση, λόγω αναποτελεσματικής λειτουργίας των στροβιλοσυμπιεστών για τους κύριους κινητήρες diesel. (Agrawal Harshit, et.al, 2008a, Huang Cheng, et.al., 2018, M. Yusuf Khan, et.al., 2013 & Moldanova Jana, et.al., 2009)

Η μείωση του CO, πραγματοποιείται με την αύξηση της απόδοσης καύσης μέσω μεγαλύτερης ομοιομορφίας του μίγματος αέρα-καυσίμου. (Τζουγανάτος Ν., 2013)

CO<sub>2</sub>: το διοξείδιο του άνθρακα είναι το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου που παράγεται από τους κινητήρες των πλοίων. Αυτό το προϊόν είναι αναπόφευκτο στη ναυτιλία, καθώς παράγεται από τη καύση όλων των ορυκτών καυσίμων.

Αν και από τη ναυτιλία παράγεται περίπου το 15% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>, σχεδόν το 70% του παγκόσμιου έργου μεταφοράς εμπορευμάτων μεταφέρετε από το



κλάδο της ναυτιλίας. Αυτό κάνει τη ναυτιλία, να είναι ο πιο ελκυστικός τρόπος μεταφοράς, για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC). Πρακτικά αυτό σημαίνει, ότι όλες οι τεχνικές μείωσης της BSFC, έχει ως αποτέλεσμα και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Σε συνδυασμό με τον καλύτερο σχεδιασμό του κύριου σώματος του πλοίου και της προπέλας, υπάρχει μεγαλύτερη αύξηση της απόδοσης του κινητήρα. Επιπλέον θα πρέπει να λαμβάνετε υπόψιν ότι για κάθε μείωση της ειδικής κατανάλωσης, υπάρχει και φυσική αύξηση των διοξειδίων του αζώτου NO<sub>x</sub>. (Τζουγανάτος N., 2013) Ένας ακόμη τρόπος που συμβάλει στη μείωση των CO<sub>2</sub> είναι η μείωση της ταχύτητας των πλοίων.

Για την αύξηση της απόδοσης των κινητήρων, το βασικότερο είναι η ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων, όπου σε ένα κύκλο Rankine, προβλέπεται η αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων. Με τη θερμική ενέργεια που παράγεται σε ένα κύκλωμα νερού-ατμού, έχουμε την ύπαρξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία στροβιλογεννήτρια. Με αυτόν το τρόπο, πετυχαίνεται η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου στις βοηθητικές μηχανές. Ο κινητήρας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (μέσω της αναρρόφησης από το εξωτερικό περιβάλλον) του αέρα εξαγωγής, έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνετε η ενέργεια.

Επιπλέον, για τη μείωση των CO<sub>2</sub> υπάρχει η δυνατότητα της εκμετάλλευσης του ευρέος πεδίου ισχύος/ταχύτητας. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι η μέγιστη πίεση λειτουργίας  $p_{max}$  παραμένει σταθερή στο σύνολο αυτού με αποτέλεσμα η επιλογή χαμηλού CMCR και η μειωμένη μέση πραγματική πίεση πέδησης (BMEP), να οδηγεί σε αύξηση του λόγου  $p_{max}/BMEP$  και μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Ενώ η επιλογή CMCR με χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής επιτρέπει ευελιξία στην επιλογή βέλτιστου συστήματος πρόωσης και οδηγεί στη μείωση της κατανάλωσης. (Τζουγανάτος N., 2013) Η κατανάλωση καυσίμου μειώνεται όταν είναι σταθερή η ταχύτητα του πλοίου, λόγω της αύξησης του λόγου  $p_{max}/BMEP$  και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των λειτουργικών εξόδων.

Για περισσότερη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, συμβάλει και η αύξηση του συστήματος πρόωσης.

PM: τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω μεταφοράς διάφορων χημικών στοιχείων και ενώσεων, τα οποία απορροφούνται πάνω στα σωματίδια. Η εκπομπή PM κατά τη διαδικασία της καύσης δημιουργεί μεγάλη συγκέντρωση πολύ μικρών σωματιδίων καυσίμου, στην καύση τμήματος του λιπαντικού ελαίου και στη περιεκτικότητα του καυσίμου και του λιπαντικού ελαίου σε τέφρα. (Τζουγανάτος Ν., 2013) Τα PM αποτελούνται κυρίως από ανθρακούχα υλικά, παραγόμενα από τη καύση. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι το μέγεθος, το σχήμα και η χημική σύσταση. (Λαζαρίδης, 2010)

Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων, σχηματίζονται από δύο ξεχωριστούς μηχανισμούς.

- Τα σωματίδια που είναι σαν πυρήνες αποτελούνται από συμπυκνωμένους υδρογονάνθρακες και θειικά άλατα. Οι αέριες ουσίες συμπυκνώνονται καθώς η θερμοκρασία μειώνεται στο σύστημα εξάτμισης και μετά την ανάμειξη με τον ψυχρό αέρα στην ατμόσφαιρα. Τα θειικά άλατα προέρχονται από το συνδυασμό SO<sub>x</sub> και νερού στα καυσαέρια.
- Τα σωματίδια που συσσωρεύονται δημιουργούν μείγματα και σχηματίζονται κατά τη καύση με τη συσσωμάτωση πρωτογενών ανθρακούχων σωματιδίων και άλλων στερεών υλικών. Τα περισσότερα σωματίδια αυτού του τρόπου, σχηματίζονται στο πυρήνα του ψεκασμού καυσίμου την ώρα της καύσης. Αυτά είναι ο μαύρος άνθρακας και η αιθάλη. Επιπλέον, αέρια και συμπυκνωμένοι ατμοί υδρογονανθράκων απορροφώνται στην επιφάνεια των σωματιδίων. Ο σχηματισμός αιθάλης με το τρόπο συσσωρεύσης είναι εγγενής στη διαδικασία καύσης diesel και εξαρτάται μόνο από τη ποιότητα του καυσίμου.

Οι συμπυκνωμένοι υδρογονάνθρακες στα σωματίδια του πυρήνα και στην επιφάνεια των σωματιδίων του τρόπου συσσωρεύσης, περιέχουν τοξικούς και καρκινογόνους



υδρογονάνθρακες. Η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων οδηγεί σε σχετικά υψηλά επίπεδα θειικών σωματιδίων.

HC: Είναι οι υδρογονάνθρακες που εμφανίζονται στην εξαγωγή των κινητήρων Diesel και προέρχονται από την ατελή καύση του καυσίμου και του λιπαντικού ελαίου. Η σημαντικότερη αιτία για τη δημιουργία των υδρογονανθράκων είναι η πτωχή ύπαρξη θυλάκων μίγματος, το οποίο δεν αυταναφλέγεται ή δεν είναι ικανό να συντηρήσει την καύση.

Οι υδρογονάνθρακες χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Παραφινικοί: υψηλότερη πυκνότητα, μείωση της πτητικότητας, αύξηση του σημείου ζήσης για μόρια σε υγρή φάση και αύξηση του σημείου υγροποίησης.
- Ναφθενικοί: έχουν λιγότερα άτομα υδρογόνου, αυξάνοντας τον άνθρακα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η πυκνότητα του μόριο και ελαττώνεται η ενέργεια. Είναι θερμικά σταθεροί, ενδιάμεσο αριθμό κετανίου και χαμηλό σημείο ροής.
- Αρωματικοί: έχουν κυκλικούς σχηματισμούς, χημική αστάθεια, θερμικά είναι σταθεροί και δεν έχουν καλή καύση. Ανάλογα με τη σύστασή τους χωρίζονται σε: 1) αρωματικά, όπου βελτιώνουν τη σταθερότητα και έχουν αρνητική επίδραση στην ανάφλεξη και 2) αλειφατικά (αλκάνια, αλκένια, αλκίνια, ναφθίνες) όπου, βελτιώνουν την ανάφλεξη και έχουν αρνητική επίδραση στη σταθερότητα του καυσίμου ( Σταματόπουλου Β. & Σταματόπουλου Δ., 2018)

Η λειτουργία των κινητήρων Diesel έχουν καθοριστικό ρόλο στις εκπομπές των HC.

O<sub>2</sub>: το οξυγόνο με τη παρουσία υλικών ανάφλεξης ή υψηλής θερμοκρασίας, μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη στο κινητήρα. Το O<sub>2</sub> έχει τη μεγαλύτερη επιρροή σε εκπομπές NO<sub>x</sub>. Ειδικότερα στη περιοχή δέσμης καυσίμου και αναλογικά με τις τοπικές θερμοκρασίες και τη συγκέντρωση οξυγόνου, εντός αυτής.

H<sub>2</sub>O: μέσα στα καύσιμα που παραδίδονται στα πλοία, συχνά υπάρχουν μεγάλες ποσότητες νερού. Η πλήρη καύση του μίγματος οδηγεί στο σχηματισμό αποκλειστικά και μόνο υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα, η ποσότητα των οποίων είναι άμεσα εξαρτημένη από τη σύνθεση υδρογονάνθρακα και την απόδοση του κινητήρα. (Τζουγανάτος Ν., 2013) Η δημιουργία H<sub>2</sub>O μπορεί να αρνητικές συνέπειες στα φίλτρα, τη διάβρωση του εξοπλισμού ψεκασμού καυσίμου, στη διάβρωση βαλβίδων εξαγωγής και δυσλειτουργία του υπερπληρωτή. Σημαντικό ρόλο έχει η φύση του νερού, δηλαδή θαλασσινό ή γλυκό. Επιπλέον, η πυκνότητα και το ιξώδες του καυσίμου θα επηρεάσουν την απόδοση των δεξαμενών κατακάθισης και καθαρισμού του, σε σχέση με την απομάκρυνση του νερού. (Σταματόπουλου Β. & Σταματόπουλου Δ., 2018)

N<sub>2</sub>: όπως το οξυγόνο, έτσι και άζωτο παρατηρούνται στον αγωγό εξόδου των καυσαερίων ως συνέπεια της χρήσης περίσσειας αέρα κατά τη καύση. (Τζουγανάτος Ν., 2013) Το άζωτο στο αργό, μπορεί να δηλητηριάσει τον καταλύτη κατά τη δύλιση με τη μέθοδο σχάσης.

## 2.4 Scrubbers

Το σύστημα καθαρισμού των καυσαερίων είναι το γνωστό scrubber. Είναι μία συσκευή που εγκαθίστανται στο σύστημα καυσαερίων του κινητήρα και του λέβητα. Χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των καυσαερίων με μία ποικιλία ουσιών, συμπεριλαμβανομένου του θαλασσινού νερού, χημικά επεξεργασμένου γλυκού νερού ή ξηρών ουσιών, ώστε να αφαιρείται το μεγαλύτερο μέρος των οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) από τα καυσαέρια και να μειώνονται σε κάποιο βαθμό τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Μετά την έκπλυση, τα καθαρισμένα καυσαέρια εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Όλες οι τεχνολογίες καθαρισμού δημιουργούν ένα ρεύμα αποβλήτων που περιέχει την ουσία που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία καθαρισμού και τη αφαίρεση SO<sub>x</sub> και PM από τα καυσαέρια των κινητήρων και των λεβήτων.

Τα οξείδια του θείου SO<sub>x</sub> (όπως SO<sub>2</sub> και SO<sub>3</sub>) είναι υδατοδιαλυτά αέρια. Μόλις διαλυθούν, αυτά τα αέρια από ισχυρά οξέα που αντιδρούν με τη φυσική αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού ή την αλκαλικότητα που περιέχεται από τις

προστιθέμενες ουσίες (συνήθως υδροξείδια του νατρίου), σχηματίζοντας διαλυτό θεικό άλας νατρίου, το οποίο είναι το φυσικό άλας στις θάλασσες. Επιπλέον, τα PM στην εξάτμιση θα παγιδευτούν στο νερό πλύσης, προσθέτοντας στη λάσπη που δημιουργείται έναν καθαριστή. Σε ξηρές πλυντρίδες, το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), αντιδρά με τα οξείδια του θείου ( $\text{SO}_x$ ) και το στερεό θεικό ασβέστιο ( $\text{CaSO}_4$ ).

Το ρεύμα αποβλήτων και η παραγόμενη ύλη, πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία σύμφωνα με τις οδηγίες το IMO πριν από τη απόρριψη στη θάλασσα.

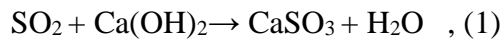
#### 2.4.1 Κατηγορίες των Scrubbers

Η τεχνολογία των scrubbers για τα πλοία χωρίζονται συνήθως σε δύο βασικές κατηγορίες, όπου είναι οι dry scrubbers και οι wet scrubbers. Αρκετές μελέτες που εξετάζουν το κόστος και τα ωφέλεια των συστημάτων πλύσης, έχουν καταλήξει σε παρόμοια συμπεράσματα. Η διαφορά τιμής HFO και MGO, ο χρόνος που δαπανάτε σε περιοχές ελέγχου εκπομπών και η εναπομένουσα διάρκεια ζωής του πλοίου, θεωρούνται θεμελιώδεις παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, για το ενδεχόμενο εγκατάστασης πλυντρίδων εντός του πλοίου. (Abadie et.al., 2017)

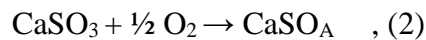
#### 2.4.2 Dry Scrubbers (Ξηρές Πλυντρίδες)

Ένας ξηρός καθαριστής δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει νερό ή υγρές ουσίες για να πραγματοποιήσει διαδικασίες καθαρισμού, αλλά έχω ως βάση ενυδατωμένους κόκκους επεξεργασμένους με ασβέστη στα καυσαέρια για να δημιουργήσει χημική αντίδραση που αφαιρεί τις εκπομπές αέριων ρύπων από τα  $\text{SO}_x$ . Δεδομένου ότι τα καυσαέρια δεν διέρχονται μέσα από το νερό, δεν μπορούν να ψύχονται και επομένως οι ξηρές πλυντρίδες μπορούν να τοποθετηθούν πριν από τον εξοικονομητή καυσαερίων (EGE) ή να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με μονάδες επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR), που απαιτούν συνήθως οι θερμοκρασίες των καυσαερίων να είναι πάνω από  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , για να ενεργοποιηθούν οι καταλύτες και να λειτουργεί σωστά, ώστε να μειώνονται τόσο οι εκπομπές των  $\text{SO}_x$ , όσο και των  $\text{NO}_x$ .

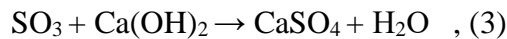
Οι ξηροί καθαριστές χρησιμοποιούν κόκκους με καυστικό ασβέστη ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) που αντιδρά με το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), για να σχηματιστεί θειώδες ασβέστιο: (Eyring et.al., 2007)



Το θειώδες ασβέστιο στη συνέχεια οξειδώνεται για σχηματίσει θειικό ασβέστιο:



Όπου η αντίδραση με το τριοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_3$ ) είναι :



Το νερό σχηματίζει :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (γύψος)

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει ότι δεν υπάρχουν  $\text{CO}_2$ .

Ο ξηρός καθαριστής Couple System λειτουργεί τροφοδοτώντας ξηρά σφαιρίδια ενυδατωμένου ασβέστη επεξεργασμένου σε κοκκοποίηση ,έσω ενός συσκευασμένου απορροφητή κλίνης. Ο ενυδατωμένος ασβέστης αντιδρά με τα καυτά καυσαέρια και απορροφά τα συστατικά των  $\text{SO}_x$  για σχηματίσει σφαιρίδια γύψου, μια μη τοξική αβλαβή ουσία, που χρησιμοποιείται συνήθως για τη κατασκευή σπιτιών. Τα σφαιρίδια που περιέχουν γύψο απορροφούνται από τον απορροφητή και αποθηκεύονται στο πλοίο, με σκοπό να γίνει απόρριψη στη ξηρά. Η μεταφορά σφαιριδίων από και προς τον απορροφητή επιτυγχάνονται πνευματικά.

Σε περιόδους που κατά τις οποίες ο καθαριστής δεν λειτουργεί ή όταν δεν απαιτείται η λειτουργία του, απαιτείται παράκαμψη καυσαερίων.

### 2.4.3 Wet Scrubbers (Υγρές Πλυντρίδες)

Οι υγρές πλυντρίδες περνούν τα καυσαέρια μέσω ενός υγρού μέσου, για να αφαιρέσουν τις ενώσεις των οξειδίων του θείου ( $\text{SO}_x$ ) από το καυσαέριο, αντιδρώντας χημικά με μέρη του υγρού πλύσης. Τα πιο κοινά υγρά είναι το ακατέργαστο θαλασσινό νερό ή χημικά επεξεργασμένο γλυκό νερό. Οι πλυντρίδες θαλασσινού νερού είναι συνήθως ανοιχτού βρόχου, όπου προέρχεται και

εκκενώνεται το νερό έξω από το σύστημα και το νερό ρέει μόνο μία φορά μέσα από τη μονάδα. Σε έναν καθαριστή κλειστού βρόχου, το νερό επεξεργασίας καθαρίζεται και ανακυκλώνεται πίσω στο scrubber σε συνεχή κλειστό βρόχο. Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, τα σωματίδια και το νερό επεξεργάζονται για να διατηρήσουν το pH του και στη συνέχεια να το κάνουν κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση στο scrubber.

Το σύστημα υγρών πλυντριδών SOx περιλαμβάνουν τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Μία μονάδα πλυσίματος – ένα δοχείο ή μία σειρά από στενά συνδεδεμένα εξαρτήματα που φέρνουν το νερό σε στενή επαφή με τα καυσαέρια από μία ή περισσότερες μονάδες καύσης.
- Μία μονάδα επεξεργασία για η ρύθμιση του νερού πλύσης πριν από την απόρριψη στη θάλασσα.
- Εγκατάσταση χειρισμού υπολειμμάτων λάσπης που διαχωρίζεται από τα απόβλητα πλύσης.
- Σύστημα ελέγχου καθαρισμού και παρακολούθησής εκπομπών.

Αυτά τα εξαρτήματα θα διασυνδέονται με σωληνώσεις με διάφορες αντλίες, ψύκτες και δεξαμενές, ανάλογα με το σύστημα πλύσης. Ένα σύστημα σωληνώσεων και μία μονάδα επεξεργασίας νερού πλύσης, μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερες από μία πλυντρίδες.

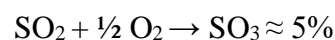
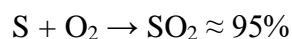
#### 2.4.3.1 Διαδικασία υγρού καθαρισμού

Ενώ μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στον λεπτομερή σχεδιασμό του EGCS και του υγρού μέσου που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή της διαδικασίας καθαρισμού, όλες οι υγρές πλυντρίδες λειτουργούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες βασικές χημικές διαδικασίες. Ο στόχος, είναι να διαλυθούν τα υδατοδιαλυτά αέρια που προέρχονται στα καυσαέρια, αναμειγνύοντας τα καυσαέρια με το υγρό καθαρισμού χρησιμοποιώντας κάποιο συνδυασμό ψεκασμού του νερού ή συστήματος καταρρακτώδους υγρού.

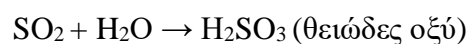
Άλλες πλυντρίδες μπορεί να έχουν τη δομή που μοιάζει με πύργο με ακροφύσια ψεκασμού και διαφράγματα για τη δημιουργία ενός τυρβώδους περιβάλλοντος και την ανάμειξη των ρευμάτων (καυσαερίου-νερού). Σε όλες τις υγρές πλυντρίδες, ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η επιφάνεια του νερού σε επαφή με τα καυσαέρια για να προωθηθεί η απορρόφηση των SO<sub>x</sub> στο υγρό, χωρίς να περιορίζεται υπερβολικά η ροή των καυσαερίων και χωρίς να υπερβαίνουν τα όρια υποπίεσης των καυσαερίων του κινητήρα ή του λέβητα. Μόλις τα SO<sub>x</sub> αναμιχθούμε με το υγρό, πρέπει να παρέχετε αλκαλικό υγρό, διάφορες χημικές αντιδράσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν ανάλογα με τη χημεία του νερού. Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να παρέχεται αλκαλικό υγρό για την εξουδετέρωση των όξινων συστατικών με βάση τα SO<sub>x</sub>.

Τα αέρια των SO<sub>x</sub> (SO<sub>2</sub> και SO<sub>3</sub>) είναι υδατοδιαλυτά. Μόλις διαλυθούν, αυτά τα αέρια σχηματίζουν ισχυρά οξέα που αντιδρούν με τη φυσική αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού ή την αλκαλικότητα που προέρχεται από τις προστιθέμενες ουσίες (συνήθως υδροξείδια του νατρίου), σχηματίζοντας διαλυτό άλας θειικού νατρίου, το οποίο βρίσκεται φυσικά στον ωκεανό. Επί πρόσθετα, τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) των καυσαερίων παγιδεύονται στο νερό της πλύσης.

Χημεία καυσαερίων κινητήρα: (James Chambers, 2018)



Αντιδράσεις οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) σε πλυντρίδες:



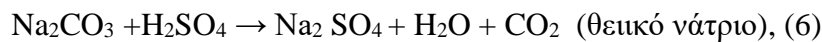
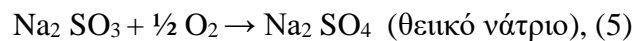
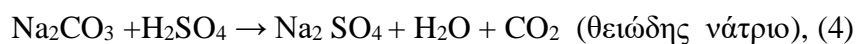
Τα θειούχα αέρια στο νερό βρίσκονται σε κατάσταση ταχείας οξείδωσης. Το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), οξειδώνεται σε τριοξείδιο του (SO<sub>3</sub>), το οποίο διαλύεται στο νερό για να σχηματιστεί θειώδες οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) ή θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), το οποίο

διασπάται γρήγορα για να σχηματίσει το όξινο θειικό ιόν ( $\text{HSO}_3$ ), το οποίο με τη σειρά του οξειδώνεται σε θειικό.

#### 2.4.4 Open Loop Scrubbers (Ανοιχτού βρόχου Πλυντρίδες)

Στη πλυντρίδα ανοιχτού βρόχου, χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό ως μέσο καθαρισμού.

Το θαλασσινό νερό τροφοδοτείται συνήθως από ειδική αντλία. Το διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$ , διαλύεται στο θαλασσινό νερό σχηματίζοντας ιόντα οξέος, διττανθρακικό ή ανθρακικό ανάλογα το pH. Το θετικό ιόν μπορεί να είναι ασβέστιο (Ca) ή νάτριο (Na), εδώ χρησιμοποιείται το ανθρακικό άλας νατρίου ως παράδειγμα. Όταν το ανθρακικό/διττανθρακικό ιόν αντιδρά με ένα οξύ απελευθερώνεται το διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$ . (Tien Anh Tran,2017)



Κάθε κατασκευαστής συστήματος EGC έχει τις δικιές του τεχνικές για τον τρόπο με τον οποίο ο καθαριστής αναμιγνύει τα καυσαέρια με το νερό. Όπως αναφέρεται παραπάνω, ένας καθαριστής ανοιχτού βρόχου είναι αποτελεσματικός μόνο εάν το νερό της πηγής είναι αλκαλικό. Ωστόσο, ορισμένα ποτάμια το νερό είναι σκληρό με αλκαλικότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλότερο από το θαλασσινό νερό, επομένως οι πλυντρίδες ανοιχτού βρόχου, μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και σε κάποιους ποταμούς. Επομένως, η αποτελεσματικότητα μίας πλυντρίδας ανοιχτού βρόχου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημεία του νερού στο οποίο πλέει το πλοίο. (Tien Anh Tran,2017)

Αφού πραγματοποιηθεί η βασική διαδικασία καθαρισμού στον κύριο πύργο πλυσίματος, το μίγμα των καυσαερίων διέρχεται κανονικά μέσω ενός διαχωριστή αποθάμβωσης ή σταγονιδίων νερού για την απομάκρυνση των σωματιδίων του



νερού από τα αέρια, γεγονός που μειώνει τη δυνατότητα παραγωγής ατμού, καθώς τα καυσαέρια υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Ενώ ο ατμός στα καυσαέρια είναι αβλαβές, δημιουργεί την εμφάνιση καπνού στη εξάτμιση και θα πρέπει να αποφεύγετε.

Πολλά συστήματα ενσωματώνουν ή έχουν επιλογή να τοποθετήσουν έναν αναθερμαντήρα μετά τη μονάδα συστήματος EGC.

Το μείγμα νερού που δημιουργείται κατά τη διαδικασία του καθαρισμού, πέφτει σε ένα υγρό κάρτερ στο κάτω μέρος του scrubber. Αυτό το νερό που ονομάζεται νερό έκπλυσης, όπου αφαιρείται από το κάρτερ πλύσης με βαρύτητα ή με μία αντλία, αφού περάσει από έναν εξαεριστή. Σε ορισμένα συστήματα, από έναν υδροκυκλώνα ή διαχωριστή για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων, ενώ στη συνέχεια απορρίπτεται σε ειδική δεξαμενή υπολειμμάτων του πλοίου. Τα συλλεγόμενα υπολείμματα θα περιέχουν αιωρούμενα μικροσωματίδια (PM), τέφρα, βαρέα μέταλλα κ.λπ., που αφαιρούνται από τα καυσαέρια, μαζί με το αδιάλυτο θειικό ασβέστιο και τη λάσπη, που παρασύρονται στο νερό πλύσης, το οποίο αντλείται από τις εκβολές ποταμών και τα νερά των λιμανιών. Όπου η πηγή του νερού πλύσης έχει μεγάλη ποσότητα λάσπης, αυτή η λάσπη μπορεί να αποτελέσει το κυρίαρχο τμήμα του όγκου της λάσπης. Η λάσπη που παράγεται από ουσίες στο εισερχόμενο νερό, είναι ένα πρόβλημα μόνο για τις πλυντρίδες ανοιχτού βρόχου.

#### **2.4.5 Closed Loop Scrubbers (Κλειστού βρόχου Πλυντρίδες)**

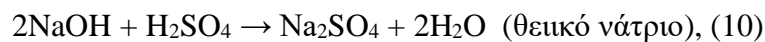
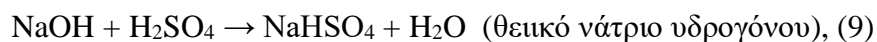
Σε μία πλυντρίδα κλειστού βρόχου, το επεξεργασμένο νερό κυκλοφορεί μέσω του scrubber, για να διατηρείται η διαδικασία καθαρισμού, ανεξάρτητα από τη χημεία των νερών στα οποία πλέει το πλοίο, καθώς ελάχιστα ή καθόλου νερό που απορρίπτεται στη θάλασσα από τη διαδικασία καθαρισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ανάγκη επεξεργασίας του νερού πλύσης για να γίνει κατάλληλο για εκκένωση. Το υδροξείδιο του νατρίου ως χημικό πρόσθετο χρησιμοποιείται συνήθως σε θαλάσσια συστήματα EGC, για τον έλεγχο της



αλκαλικότητας του νερού που μπορεί να παραχθεί με ηλεκτρόλυση του θαλάσσιου νερού.

Το εσωτερικό μίας πλυντρίδας κλειστού βρόχου, είναι παρόμοιο με αυτό ενός ανοιχτού βρόχου και οι χημικές διεργασίες για την αφαίρεση των SOx, οι εκπομπές αερίων είναι παρόμοιες. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι ότι αντί να έκπλυσης να πέφτει στη θάλασσα, το μεγαλύτερο μέρος του κυκλοφορόντος νερού πλύσης, επεξεργάζεται μετά το πύργο πλύσης, για να γίνει κατάλληλο για την ανακυκλοφορία ως μέσο νερού πλύσης. Το νερό πλύσης μπορεί να είναι γλυκό ή αλμυρό, ανάλογα με το σχεδιασμό της πλυντρίδας. Σε αυτή τη διαδικασία επεξεργασίας, τα υπολείμματα αφαιρούνται από το νερό έκπλυσης και το νερό κλείνεται ξανά με τη καυστικό σόδα για να αποκατασταθεί η αλκαλικότητα του.

Σε πλυντρίδες γλυκού νερού, το SO<sub>2</sub>, συνδυάζεται με ένα άλας και κατά συνέπεια δεν αντιδρά με το φυσικό διττανθρακικό άλας του θαλασσινού νερού. Έτσι, δεν υπάρχει έλκυση των διοξειδίων του άνθρακα CO<sub>2</sub>. (Tien Anh Tran, 2017)



Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, το βρώμικο νερό πλύσης που εξέρχεται από το καθαριστή πηγαίνει σε μία δεξαμενή διεργασίας ή κυκλοφορίας. Μία περιορισμένη ποσότητα νερού πλύσης από τον πυθμένα της δεξαμενής διεργασίας, όπου έχουν συλλεχθεί τα υπολείμματα, εξάγεται με χαμηλή αναρρόφηση και πηγαίνει σε έναν υδροκυκλώνα ή διαχειριστή, παρόμοιο με ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου, όπου αναρροφώνται τα υπολείμματα ή για κάποιο σύστημα το εξαγόμενο νερό, μπορεί να πάει σε μία μονάδα εξαέρωσης.

#### 2.4.6 Hybrid Scrubbers (Υβριδικά Συστήματα Καθαρισμού)

Υπάρχουν πλεονεκτήματα στα συστήματα τύπου ανοιχτού βρόχου, όπως η αποφυγή αγοράς και χειρισμού καυστικής σόδας και η αποφυγή της ανάγκης επεξεργασίας του νερού πλύσης. Το σύστημα κλειστού βρόχου έχει τα πλεονεκτήματα ότι το scrubber λειτουργεί με την ίδια απόδοση ανεξάρτητα από πού λειτουργεί το πλοίο και υπάρχει μικρή ή καθόλου εκροή νερού, καθιστώντας το καταλληλότερο για τη λειτουργία σε παράκτιες περιοχές, λιμάνια και εσωτερικά ύδατα. Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα και των δύο συστημάτων, ορισμένοι κατασκευαστές έχουν προτείνει υβριδικά συστήματα καθαρισμού.

Αυτά λειτουργούν ως συστήματα κλειστού βρόχου όταν βρίσκονται στον ανοιχτό ωκεανό και ως συστήματα κλειστού βρόχου όταν βρίσκονται σε Ειδικές Περιοχές Ελέγχου (ECA). Η μετάβαση από τον ανοιχτό στο κλειστό βρόχο, γίνεται με αλλαγή της αναρρόφησης της αντλίας κυκλοφορίας από το θαλασσινό νερό στην εκροή του γλυκού νερού από την εκκένωση στη θάλασσα, που παίρνει από τη δεξαμενή κυκλοφορίας.

#### 2.5 Ναυτιλία και διεθνές πλαίσιο μείωσης εκπομπών

Οι ναυτιλιακές δραστηριότητες πρέπει να πραγματοποιούνται σύμφωνα με τους κανόνες, τα πρότυπα και τις διαδικασίες που προβλέπονται από τις διεθνείς σχετικές συμβάσεις ( Δίκαιο της Θάλασσας UNCLOS, MARPOL, SOLAS, Σύμβαση της Βαρκελώνης κ.ά. στη Διεθνή Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών περί Κλιματικής Αλλαγής που πραγματοποιήθηκε στο Durban 28/11-09/12/2011, αναγνωρίστηκε ο ρόλος του IMO για την πρόοδο που έχει επιτευχθεί στο κλάδο της ναυτιλίας.

Η υιοθέτηση και εφαρμογή των διεθνών συμβάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των ακόλουθων οργανισμών/φορέων:

- Διεθνείς οργανισμοί: Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, Ευρωπαϊκή Ένωση.
- Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization- IMO)

- Αρχές του κράτους νηολόγησης (Flat State) δια της τήρησης των διεθνών συνθηκών που έχουν επικυρωθεί.
- Αρχές της χώρας του λιμένα προσέγγισης (Port State) δια του ελέγχου των πλοίων ξένης σημαίας για τη τήρηση των διεθνώς αποδεκτών συνθηκών/συμβάσεων.

(United Nations Framework Convention on Climate Change, 28 November to 03 December 2011)

Εκτός του IMO, ιδιαίτερα δραστήρια σε θέματα ρυθμιστικών παρεμβάσεων στη ναυτιλία είναι η Ε.Ε., η οποία έχει εκδώσει πλήθος σχετικών οδηγιών. Μια από τις πλέον σημαντικές είναι η Οδηγία 2008/56 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 17<sup>ης</sup> Ιουνίου 2008, η οποία ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο με το νόμο 3983/11. Η οδηγία αποσκοπεί στην επίτευξη και διατήρηση καλής περιβαλλοντικής κατάστασης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αλλά και στη διαμόρφωση και εφαρμογή εθνικής περιβαλλοντικής στρατηγικής για τη προστασία και διαχείριση των θαλάσσιων υδάτων.

### 2.5.1 Μελέτη του IMO για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη του IMO είναι ότι οι εκπομπές της ναυτιλίας αντιστοιχούν στο 3,3% των παγκόσμιων εκπομπών για το 2007, όπου το 2,7% αντιστοιχεί στη ναυτιλία διεθνών πλόων. Το πιο σημαντικό αέριο που εκπέμπεται από τα πλοία είναι το CO<sub>2</sub>.

Αν δεν εφαρμοστούν πολιτικές περιορισμού των εκπομπών της ναυτιλίας, αυτές αναμένονται να τριπλασιαστούν έως το 2050, ως αποτέλεσμα της ραγδαίας ανάπτυξης του διεθνούς εμπορίου. Η έκθεση κατέγραψε πολιτικές για βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και μείωση των εκπομπών της ναυτιλίας κατά 25-75%. Οι πολιτικές αυτές περιλαμβάνουν τόσο την εφαρμογή νέων τεχνολογιών όσο και την εφαρμογή αποδοτικότερων λειτουργικών μέτρων. Πολλές από αυτές τις πολιτικές αποτελούν οικονομικά αποδοτικές πολιτικές, αλλά ρυθμιστικά και μη οικονομικά εμπόδια καθιστούν την εφαρμογή τους δύσκολη.

Η ναυτιλία αποτελεί ενεργειακά πιο αποδοτικό μέσο μεταφοράς σε σύγκριση με τα άλλα μεταφορικά μέσα, όμως παρουσιάζει σημαντικά περιθώρια βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Οι αγορακεντρικοί μηχανισμοί αποτελούν οικονομικά αποδοτικά μέτρα και έχουν υψηλή περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα. Σε συνδυασμό με τεχνικά ή λειτουργικά μέτρα θα μπορούσαν να επιτύχουν σημαντικά περιθώρια μείωσης εκπομπών και παράλληλα να αντισταθμίσουν μειώσεις εκπομπών σε άλλους τομείς της οικονομίας.

### 2.5.2 Πολιτικές και μέτρα μείωσης εκπομπών

Η μείωση αερίων εκπομπών στη ναυτιλία μπορεί να γίνει με διαφορές πολιτικές και μέτρα. Η Συνθήκη του Μόντρεαλ καθώς και το Παράρτημα 4 της Σύμβασης του Marpol, πέτυχαν σημαντικές μειώσεις στα αέρια που σχετίζονται με τη τρύπα του όζοντος.

Τα μέτρα και πολιτικές είναι:

- Τεχνολογικές και Λειτουργικές/Διαχειριστικές Πολιτικές (βελτίωση στην ποιότητα των καυσίμων, ναυπήγηση νέων πλοίων).
- Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- Αλλαγή στη φιλοσοφία σχεδιασμού, όσον αφορά τη ταχύτητα, τη δυναμικότητα και την αεροδυναμική.
- Αλλαγή στη φιλοσοφία σχεδιασμού, όσον αφορά το μέγεθος (μήκος, πλάτος, βύθισμα).
- Χρήση νέων τεχνολογιών στα ενεργειακά συστήματα και στα συστήματα πρόωσης.
- Αλλαγές στο σχεδιασμό όσον αφορά το κύτος και υπερ-κατασκευές.
- Τρόπος Διαχείρισης/Λειτουργίας πλοίων.
- Διαχείριση στόλου.
- Βελτιστοποίηση πλόων.
- Διαχείριση ενέργειας.

(Annex IV of MARPOL)

### 2.5.3 Βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας

Ο IMO κατέστησε υποχρεωτικό τον Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Design Index-EEDI) καθώς και το Σχέδιο Διαχείρισης της Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan-SEEMP). Επίσης καθιέρωσε το καθεστώς για τη μείωση των εκπομπών ρύπων συνολικά σε ένα κλάδο οικονομικής δραστηριότητας.

Ο Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI), ενσωματώθηκε μέσω της απόφασης της Marine Environment Protection Committee-MEPC 203(62)-15/07/2011 και έχει την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{transport work}}$$

(ποσοστό CO<sub>2</sub> / μεταφορικό έργο, όπου μεταφορικό έργο= μάζα φορτίου \* απόσταση ταξιδιού)

Το Σχέδιο Διαχείρισης της Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP), σε αντίθεση με τον EEDI δεν καθορίζει ποσοτικοποιημένους στόχους αλλά αφορά το σύνολο των πλοίων και όχι μόνο τα νέα. Ο SEEMP αφορά:

- Σχεδιασμό.
- Προσδιορισμό της τρέχουσας κατάστασης του πλοίου και των αναμενόμενων βελτιώσεων της ενεργειακής αποδοτικότητας του.
- Εφαρμογή.
- Διαμόρφωση συστήματος εφαρμογής των βελτιώσεων που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο.
- Έλεγχο.
- Ποσοτικό έλεγχο της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου με δυνατότητα χρήσης του Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI).
- Επαναξιολόγηση.
- Προπαρασκευή για τον επόμενο κύκλο βελτιώσεων.

(Marine Environment Protection Committee-MEPC.1/circ.684)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



Παράλληλα, αναπτύσσονται και σύγχρονες τεχνολογίες μείωσης εκπομπών, όπως η εφαρμογή συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) στα πλοία. Ένα τέτοιο σχέδιο παρουσίασε ο Νορβηγικός Νηογνώμονας (DNV), το οποίο βλέπει την εγκατάσταση συστήματος το οποίο αναλαμβάνει με χημικές διεργασίες να δεσμεύσει ελκυτόμενο άνθρακα των καυσαερίων.

## Μέθοδοι και Δεδομένα

### 3.1 Στατιστικό πρόγραμμα SPSS

Το 1965 στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας Stanford, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το στατιστικό πακέτο του SPSS. Το SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), είναι ένα από τα πιο αξιόπιστα στατιστικά πακέτα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, κυρίως σε ποσοτικές, αλλά και ποιοτικές έρευνες. Με εξειδικευμένες μεθόδους (π.χ. γραφή κώδικα), πραγματοποιείτε για την ανάλυση της διακύμανσης των μεταβλητών, σύγκριση των τιμών και προβλέψεις κ.ά. Αλλά πραγματοποιούνται και πιο απλές διαδικασίες, όπως η σύγκριση μέσων όρων, η τυπική απόκλιση και η γενική εικόνα του δείγματος, κ.ά.

#### 3.1.1 Έλεγχος Κανονικότητας

Για τη στατιστική ανάλυση δεδομένων ο πρώτος έλεγχος που γίνεται είναι ο έλεγχος κανονικότητας. Όπου ελέγχεται αν οι μεταβλητές παραμετρικές ή μη παραμετρικές, αλλά και τη πιθανότητα να ακολουθούν ή όχι τη κανονική κατανομή. Η κανονική κατανομή συμβολίζεται με  $N(\mu, \sigma^2)$  και δίνεται από το τύπο:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

όπου,  $-\infty < x < \infty$

$\sigma$  : σταθερή απόκλιση

$x$  : τυχαία τιμή της συνεχούς μεταβλητής

$\pi$  : μαθηματική σταθερά,  $\approx 3,14$

$e$  : μαθηματική σταθερά,  $\approx 2,71$

Ο έλεγχος κανονικότητας γίνεται με τη:

- Αξιολόγηση συντελεστών ασυμμετρίας και κύρτωσης
- Εφαρμογή γραφημάτων

- Υλοποίηση στατιστικών ελέγχων
- Σύγκριση μέσης και διάμεσης τιμής

Η εφαρμογή της κανονικής κατανομής γίνεται με τη χρήση υποθέσεων για στατιστικό επίπεδο σημαντικότητας (συνήθως)  $\alpha=0,05$ . Το παρατηρούμενο επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας είναι το (p-value). Οι υποθέσεις που γίνονται είναι:

- $H_0$  : Μηδενική υπόθεση, όπου τα δεδομένα ακολουθούν τη κανονική κατανομή
- $H_1$  : Εναλλακτική υπόθεση, όπου τα δεδομένα δεν ακολουθούν τη κανονική κατανομή

Για τον έλεγχο υπόθεσης συγκρίνουμε το p-value με το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας  $\alpha=0,05$ . Άρα,

- Αν  $p\text{-value} < 0,05$  , απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση, δηλαδή τα δεδομένα δεν ακολουθούν τη κανονική κατανομή.
- Αν  $p\text{-value} > 0,05$  , απορρίπτεται η εναλλακτική υπόθεση, δηλαδή τα δεδομένα ενδεχομένως ακολουθούν τη κανονική κατανομή, αλλά σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=0,05$  δεν εξακριβώνονται στατιστικά σημαντικές αποκλίσεις από τη κανονικότητα.

Οι βασικοί έλεγχοι κανονικότητας είναι Kolmogorov-Smirnov και Shapiro-Wilk. Αρχικά χρησιμοποιείτε το τεστ Shapiro-Wilk για μη παραμετρικές μεθόδους, για να γίνει έλεγχος αν οι μεταβλητές ακολουθούν τη κανονική κατανομή(δεν είναι γνωστό αν οι μεταβλητές ακολουθούν τη κανονική κατανομή). Ενώ στη συνέχεια(για να επαλειφθεί ότι οι μεταβλητές ακολουθούν τη κανονική κατανομή) πραγματοποιείται το τεστ Kolmogorov-Smirnov, που εφαρμόζεται στις παραμετρικούς μεθόδους, όπου ακολουθούν τη κανονική κατανομή.



### 3.1.1.1 Έλεγχος Shapiro-Wilk

Το τεστ Shapiro-Wilk (1965) περιορίστηκε αρχικά για τον έλεγχο κάτω των 50 δειγμάτων. Αυτή ήταν η πρώτη δοκιμή που μπόρεσε να ανιχνεύσει αποκλίσεις από την κανονικότητα είτε λόγος λοξότητας είτε λόγο κύρτωσης, είτε και των δύο. (Althouse et. al, 1998) Δεδομένου ενός ταξινομημένου τυχαίου δείγματος  $y_1 < y_2 < \dots < y_n$ , το αρχικό στατιστικό τεστ του Shapiro-Wilk (1965), είναι :

$$W = \frac{(\sum_{j=1}^n a_j y_{(j)})^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}$$

$\bar{y}$  : μέσος όρος του δείγματος

$y_{(i)}$  : όπου (i) στατιστική τάξη του δείγματος

Ο συντελεστής  $a_i$  δίνεται από τη σχέση:

$$a_i = (a_1, \dots, a_n) = \frac{m T y_{-i}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$$

$m$  : οι αναμενόμενες τιμές των στατιστικών τάξεων των ανεξάρτητων και πανομοιότυπα κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών που ελήφθησαν ως δείγμα από τη τυπική κανονική κατανομή

$V$  : ο πίνακας συνδιακύμανσης αυτών των στατιστικών τάξεων

Η τιμή του  $W$  είναι  $0 \leq W \leq 1$ , οι μικρές τιμές του οδηγούν στην απόρριψη της κανονικότητας, ενώ όταν  $W \approx 1$ , υποδηλώνει τη κανονικότητα των δεδομένων. Το τεστ του  $W$  τροποποιήθηκε από τον Royston (1982a), για να διευρύνει τον περιορισμό του μεγέθους των δειγμάτων στα 2000 και στη συνέχεια κατασκευάστηκε ο αλγόριθμος AS181 (1982b, 1982c). αργότερα ο Royston (1992) παρατήρησε ότι η προσέγγιση του Shapiro-Wilk (1965) για τους συντελεστές  $a$  που χρησιμοποιήθηκαν στους αλγόριθμους ήταν ανεπαρκής όταν το σύνολο των δειγμάτων ξεπερνούσε το 50. Στη συνέχεια έδωσε μία βελτιωμένη προσέγγιση στους συντελεστές και δημιούργησε τον αλγόριθμό AS R94 (Royston, 1995), ο οποίος

μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δείγματα  $3 \leq n \leq 5000$ , ( $n$ =αριθμός δειγμάτων). Σε αυτή τη μελέτη έγινε χρήση του αλγορίθμου AS R94.

### 3.1.1.2 Έλεγχος Kolmogorov-Smirnov

Ο στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov, ανήκει στην ανώτερη κατηγορία των στατιστικών EDF, όπου αυτή κατηγορία στατιστικών βασίζεται στη μεγαλύτερη κάθετη διαφορά μεταξύ της υποθετικής και εμπειρικής κατανομής. (Conover, 1999). Για μία δομημένη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής  $F(x)$  (Conover, 1999), όρισε το στατιστικό τεστ που πρότεινε ο Kolmogorov (1933), ως:

$$T = \sup_x | F^*(x) - F_n(x) |$$

$\sup_x$  : supremum, το μεγαλύτερο

$F_n(x)$  : το EDF που εκτιμάτε με βάση το τυχαίο δείγμα

$F^*(x)$  : υποθετική κατανομή συνάρτησης

Στο τεστ κανονικότητας Kolmogorov-Smirnov, η  $F(x)$  λαμβάνεται ως μία κανονική κατανομή με γνωστό μέσο όρο  $\mu$ , και τυπική απόκλιση  $\sigma$ .

Αν,

$H_0 : F(x) = F^*(x)$ , για  $-\infty < x < \infty$ , τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή

ή

$H_1 : F(x) \neq F^*(x)$ , για τουλάχιστον μία τιμή του  $x$ , τα δεδομένα δεν ακολουθούν τη κανονική κατανομή.

Σε γενικές γραμμές, ανάμεσα στα δύο τεστ που εξετάστηκαν, το τεστ Shapiro-Wilk είναι το πιο ισχυρό τεστ κανονικότητας για όλους τους τύπους και μεγέθη δειγμάτων. Παρόλα αυτά, η δοκιμή Shapiro-Wilk εξακολουθεί να είναι αδύναμη για μικρά δείγματα. Εν κατακλείδι, τα μέτρα λοξότητας και κύρτωσης επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος.

### 3.1.2 Ανάλυση Συσχέτισης

Η Ανάλυση Συσχέτισης προηγείται της ανάλυσης παλινδρόμησης, διότι με αυτή ελέγχετε η ύπαρξη σχέσης των μεταβλητών. Ο συντελεστής συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε είναι του Pearson.

#### 3.1.2.1 Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson ( $r$ ) :

- Ελέγχει τη σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών
- Απεικονίζει τη κατεύθυνση της σχέσης θετική ή αρνητική και κατά πόσο είναι ισχυρή
- $-1 < r < 1$
- Δεν προσδιορίζει την αιτιώδη σχέση που συνδέει τις μεταβλητές

Η αιτία για τη χρήση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης  $r$  του Pearson ως τον καταλληλότερο τρόπο είναι ότι οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι ποσοτικές σε αναλογική κλίμακα και η σχέση τους γραμμική.

Ο τύπος που χρησιμοποιείτε για τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r_i$  για τον έλεγχο της πολυσυγγραμμικότητας ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y}$$

άρα,

$$r_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_i)(Y_j - \bar{Y}_i)}{k s_x k s_y} = \frac{\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_i)(Y_j - \bar{Y}_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^k (Y_j - \bar{Y}_i)^2}}$$

οπότε,

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_i)(Y_j - \bar{Y}_i)}{k s_x k s_y} = \frac{\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_i)(Y_j - \bar{Y}_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^k (Y_j - \bar{Y}_i)^2}}$$

$r_{x,y}$  : συντελεστής γραμμικής συσχέτισης, όπου  $-1 < r < 1$

$x_j, y_j$  και  $j=1,2,\dots,n$  : οι τιμές των μεταβλητών

$\Sigma_x$  και  $\Sigma_y$  : οι τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών

$k$  : ο αριθμός των κοντινότερων γειτόνων γύρω από το σημείο παρατήρησης  $i$

Μόνο αν υπάρχει ικανοποιητική σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές, συνεχίζεται η διαδικασία τη ανάλυσης παλινδρόμησης. Όμως ο εντοπισμός σχέσης ανάμεσα στις μεταβλητές και τη δημιουργία παλινδρομικού μοντέλου είναι η πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων και ο έλεγχος μελλοντικών γεγονότων.

### 3.1.3 Ανάλυση Παλινδρόμησης

Η ανάλυση παλινδρόμησης μετράει την ένταση της μαθηματικής σχέσης ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες μεταβλητές. Για τον υπολογισμό της έντασης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συσχέτισης Pearson, Spearman και Kendall.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η γραμμική παλινδρόμηση, διότι τα δεδομένα είναι ποσοτικά σε ιεραρχική κλίμακα και έχει αποφασιστεί ποια θα είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, έτσι ώστε οι υπόλοιπες μεταβλητές να είναι ανεξάρτητες.

Η παλινδρόμηση μπορεί να είναι:

- Απλή – Simple, μόνο για μία ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$  και μία εξαρτημένη  $Y$   
ή
- Πολλαπλή – Multiple, για δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$  και μία εξαρτημένη τη  $Y$ .

#### 3.1.3.1 Πολλαπλή Παλινδρόμηση

Όπως αναφέρετε παραπάνω έχει γίνει η επιλογή της γραμμικής παλινδρόμησης και πιο συγκεκριμένα της πολλαπλής γραμμικής, που έχει τη μορφή:

$$Y = b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki} + \varepsilon, \text{ όπου:}$$

$Y$  : η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$  : οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών

$b_1, b_2, \dots, b_k$  : οι συντελεστές παλινδρόμησης, όπου απεικονίζουν τη μέση μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής όταν η ανεξάρτητη μεταβληθεί κατά μία μονάδα

$\varepsilon$  : το σφάλμα, δηλαδή η διαφορά της πραγματικής της  $Y$  και τιμής που θα προκύψει από τη πρόβλεψη

$b_0$  : σταθερός όρος

$k$  : ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών

$i$  : 1, 2, ...,  $n$  το πλήθος των παρατηρήσεων

Οι βασικές προϋποθέσεις της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης :

- Τα σφάλματα  $\varepsilon_i$  είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και κατανέμονται κανονικά
- Οι αναμενόμενες τιμές (μέσοι) των σφαλμάτων  $\varepsilon_i$  είναι μηδέν
- Τα σφάλματα  $\varepsilon_i$  έχουν την ίδια διακύμανση  $\sigma_\varepsilon^2$  για όλους τους συνδυασμούς των ανεξάρτητων μεταβλητών
- Τα σφάλματα  $\varepsilon_i$  και  $\varepsilon_j$  να είναι ασυσχέτιστα,  $\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, i \neq j$

Για τη διαδικασία ολοκλήρωσης της πολλαπλής παλινδρόμησης, υπάρχουν οι εξής μέθοδοι: Enter, Stepwise, Remove, Backward και Forward. Η ανάλυση στη παρούσα εργασία ολοκληρώθηκε με τη μέθοδο Stepwise.

### 3.1.3.2 Μέθοδος Stepwise

Η μέθοδος της διαδοχικής επιλογής των ανεξάρτητων μεταβλητών (Stepwise regression), χρησιμοποιείτε για την εύρεση των σημαντικότερων ανεξάρτητων μεταβλητών  $X$  (Ε. Δημητριάδης, 2012), που συνεισφέρουν στην ερμηνεία της διακύμανσης των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$ . Σε πειραματικά μοντέλα που δεν γνωρίζουμε τη συμβολή της κάθε μεταβλητής στην ερμηνευτικότητα του.

Οι μεταβλητές προστίθενται στην εξίσωση παλινδρόμησης μία κάθε φορά, χρησιμοποιώντας το στατιστικό κριτήριο της μεγιστοποίησης του  $R^2$  των μεταβλητών που περιλαμβάνονται. Η διαδικασία προσθήκης περισσότερων

μεταβλητών σταματά όταν έχουν συμπεριληφθεί όλες οι διαθέσιμες μεταβλητές ή όταν είναι δυνατό να γίνει στατιστική σημαντική βελτίωση στο  $R^2$  χρησιμοποιώντας κάποια από τις μεταβλητές που δεν περιλαμβάνονται ακόμη. Δεδομένου ότι οι μεταβλητές δεν θα προστεθούν στην εξίσωση παλινδρόμησης εκτός εάν κάνουν μία στατιστικά σημαντική προσθήκη στην ανάλυση, όλες οι εξαρτημένες μεταβλητές που επιλέχθηκαν για τη συμπερίληψη θα έχουν μία στατιστικά σημαντική σχέση με την εξαρτημένη μεταβλητή.

Με τη μέθοδο της διαδοχικής επιλογής συνθέτονται όλα τα ανταλλακτικά μοντέλα τα οποία είναι στατιστικά σημαντικά. Με αυτόν το τρόπο υπάρχει η ευκαιρία της επιλογής του μοντέλου, που ικανοποιεί τα κριτήρια της έρευνας.

### **3.2 Περιγραφή και λειτουργία του κινητήρα MAN B&W DIESEL ENGINE 7S65ME-C8.2**

Ο κινητήρας είναι 2-Χ, βραδύστροφός, ο οποίος αποτελείται από ένα υδραυλικό μηχανικό σύστημα, για την ενεργοποίηση του ψεκασμού καυσίμου και των βαλβίδων εξαγωγής. Οι ενεργοποιητές ελέγχονται ηλεκτρονικά από μονάδα ελέγχου, που είναι ένα πλήρες Σύστημα Ελέγχου Κινητήρα.

Ο ενισχυτής πίεσης καυσίμου αποτελείται από ένα απλό έμβολο που τροφοδοτείται από το υδραυλικό έμβολο, το οποίο ενεργοποιείται από τη πίεση του λαδιού. Η πίεση του λαδιού ελέγχεται από μία ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βαλβίδα.

Η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει υδραυλικά μέσω ενός ενεργοποιητή βαλβίδας εξαγωγής δύο σταδίων, οποίος ενεργοποιείται από το λάδι ελέγχου από μία ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βαλβίδα. Οι βαλβίδες εξαγωγής κλείνουν από το “air spring”.

Στο υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται το “κανονικό” λιπαντικό ως μέσο. Φιλτράρεται και συμπιέζεται από μία μονάδα Τροφοδοσίας Υδραυλικού Ρεύματος τοποθετημένη στη μηχανή.

Οι βαλβίδες εκκίνησης ανοίγουν πνευματικά με ηλεκτρονικά ελεγχόμενες βαλβίδες ‘‘On//Off’’, οι οποίες καθιστούν δυνατή την απαλλαγή από τον μηχανικά ενεργοποιημένο διανομέα αέρα εκκίνησης.

Με τον ηλεκτρονικό έλεγχο των παραπάνω βαλβίδων, σύμφωνα με τη μετρούμενη στιγμιαία θέση στροφαλοφόρου άξονα, το Σύστημα Ελέγχου Κινητήρα, ελέγχεται πλήρως η διαδικασία καύσης.

### 3.2.1 Βασικά εξαρτήματα της ΜΕ

Λαμβάνοντας υπόψιν τη περιγραφή της λειτουργία του κινητήρα 7S65ME-C8.2, παρακάτω αναφέρονται τα βασικά εξαρτήματα του.

Η εικόνα 1. δίδει, το σκελετό της κύριας μηχανής που αποτελεί το βασικό τμήμα του κινητήρα και τα βασικά εξαρτήματα. Σε τέτοιου τύπου μηχανές ο σκελετός είναι ενιαίος με το σώμα των κυλίνδρων (εικ. 1.) και δεν υπάρχει ξεχωριστή βάση. Τη λειτουργία της βάσης σε αυτή τη περίπτωση, την επωμίζεται το κάτω μέρος του σκελετού.

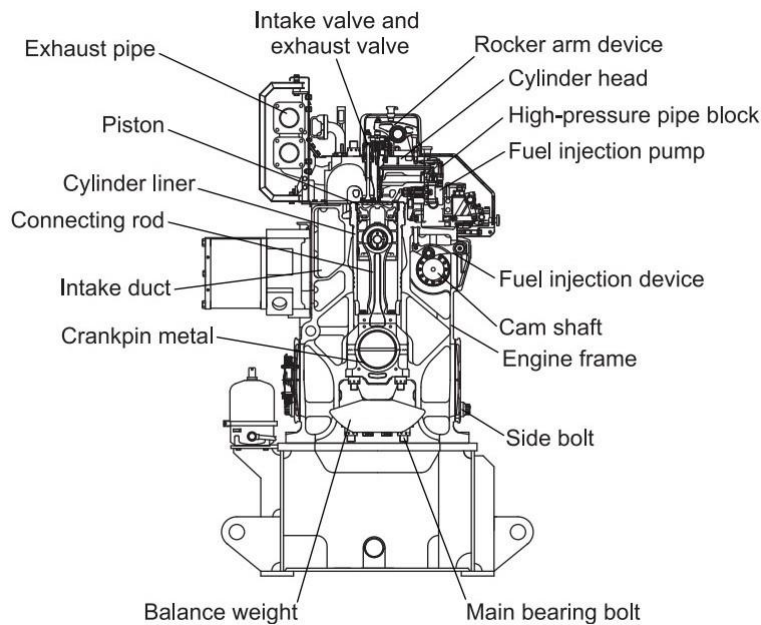
Τα βασικά εξαρτήματα είναι:

|  |  |
|--|--|
| Βαλβίδα εισαγωγής και εξαγωγής (Intake valve and exhaust valve)    | Βίδα κύριου κουζινέτου βάσης (Main bearing bolt) |
| Συσκευή περιστροφής βαλβίδων (Rocker arm device)                   | Αντίβαρα ζυγοστάθμισης (Balance weight)          |
| Κεφαλή κυλίνδρου (Cylinder head)                                   | Διωστήρας κουζινέτου (Crankpin metal)            |
| Τάκος υψηλής πίεσεως σωλήνας πετρελαίου (High-pressure pipe block) | Οχετός εισαγωγής-Σάρωση (Intake duct)            |
| Αντλία ψεκασμού καυσίμου (Fuel injection pump)                     | Διωστήρας (Connecting rod)                       |
| Σύστημα έγχυσης καυσίμου (Fuel injection device)                   | Χιτώνιο (Cylinder liner)                         |



|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Εκκεντροφόρος (Cam shaft)      | Έμβολο (Piston)                |
| Πλαίσιο μηχανής (Engine frame) | Οχετός εξαγωγής (Exhaust pipe) |
| Βίδα βάσης (Side bolt)         |                                |

**Πίνακας 2.** Εξαρτήματα ΜΕ



**Εικόνα 1.** Εγκάρσια τομή της κύριας μηχανής

(Πηγή: MAN B&W DIESEL ENGINE 7S65ME-C8.2)

Ο σκελετός στα πλάγια έχει ανοίγματα, που προσαρμόζονται ανθρωποθυρίδες προσπελάσεως και βαλβίδες ασφαλείας. Στο άνω μέρος του σκελετού βρίσκεται το σώμα του κυλίνδρων, ενώ στο κάτω μέρος του στηρίζεται στη βάση της μηχανής.

( Λαζάρου Χ. Κλιάνη, Ιωάννη Κ. Νικολού και Ιωάννη Α. Σιδέρη, 2017)

### 3.2.2 Απόδοση της μηχανής σε λειτουργία 100%

Στους πίνακες παρακάτω αναγράφονται οι τιμές (θερμοκρασίες, ταχύτητα, πίεση, δείκτη καυσίμου κλπ.), όταν ο κινητήρας λειτουργεί στο 100%.



|                   |                     |                                 |                     |                           |                            |                |                           |                                  |  |  |
|-------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------------|--|--|
| Engine No : 4766  |                     | Engine Type : 7S65ME-C8.2       |                     | Sheet No. : M4            |                            |                |                           |                                  |  |  |
| 100 % Load        |                     | Start time of the Meas. : 10:25 |                     | Date : February 17, 2015  |                            |                |                           |                                  |  |  |
| Ambient Condition |                     | Temp.: 20.0 °C                  | Press.: 1013.0 mbar |                           |                            |                |                           |                                  |  |  |
| Engine Speed      |                     | W/B Weight                      | Brake Output        |                           |                            |                |                           |                                  |  |  |
| 85.03 min-1       |                     | 253.90 kg                       | 15879 kW            |                           |                            |                |                           |                                  |  |  |
| Handle position   | Fuel index          | Thrust pad temp.                | Exh. V Spring air   |                           |                            |                |                           |                                  |  |  |
| ***               | 101.0               | 49 °C                           | 0.74 MPa            |                           |                            |                |                           |                                  |  |  |
|                   | Main Lub. Oil inlet | Piston Cooling Oil inlet        | T/C Lub. Oil Inlet  | Hydraulic Cont. Oil inlet | Hydraulic Cont. Oil outlet | Fuel Oil inlet | Cooling Fresh Water inlet | Charging Air coolant Water inlet |  |  |
| Press. MPa        | 0.22                | 0.22                            |                     |                           | 30.0                       | 0.73           | 0.42                      | 0.21                             |  |  |
| Temp. °C          | 46                  | 46                              |                     |                           |                            | 14             | 80                        |                                  |  |  |

Πίνακας 3. Λειτουργία ΜΕ στο 100%

| Cyl. No.                        | Ave.  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8   | 9   |
|---------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Pmax. MPa                       | 17.03 | 17.0 | 17.0 | 17.1 | 17.0 | 17.1 | 17.2 | 16.9 | *** | *** |
| Pcomp. MPa                      | 15.04 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 15.2 | 15.1 | 14.9 | 15.0 | *** | *** |
| PI MPa                          | 1.82  | 1.79 | 1.85 | 1.84 | 1.84 | 1.85 | 1.79 | 1.77 | *** | *** |
| Exh. Gas Temp. Cyl. Outlet (°C) | 318.6 | 320  | 325  | 315  | 315  | 315  | 320  | 320  | *** | *** |
| C.F.W. Temp. Cyl. Outlet (°C)   | 90.0  | 90   | 90   | 90   | 90   | 90   | 90   | 90   | *** | *** |
| P.C.O. Temp. Cyl. Outlet (°C)   | 50.0  | 50   | 50   | 50   | 50   | 50   | 50   | 50   | *** | *** |

Πίνακας 4. Κύλινδροι σε λειτουργία ΜΕ στο 100%

| Air cooler Number            |       | 1     | 2   | 3   | Scav. Receiver |                            | Exh. Receiver |  |
|------------------------------|-------|-------|-----|-----|----------------|----------------------------|---------------|--|
| Inlet Press. (MPa)           |       | 0.283 | *** |     | Press. MPa     | 0.281                      | 0.261         |  |
| Press. Drop. (mmAq)          |       | 260   | *** |     | Temp. °C       | 36                         |               |  |
| Temp. (°C)                   | Air   | In    | 180 | *** |                |                            |               |  |
|                              |       | Out   | 32  | *** |                |                            |               |  |
|                              | Water | In    | 22  | *** |                |                            |               |  |
|                              |       | Out   | 43  | *** |                |                            |               |  |
| Fuel Oil Consumption (g/kWh) |       |       |     |     |                |                            |               |  |
|                              |       |       |     |     | Measured       | LCV Corrected to 42.7MJ/kg | ISO Converted |  |
|                              |       |       |     |     | 168.3          | 167.1                      | 167.4         |  |

Πίνακας 5. Ψύξη αέρα με λειτουργία ΜΕ στο 100%

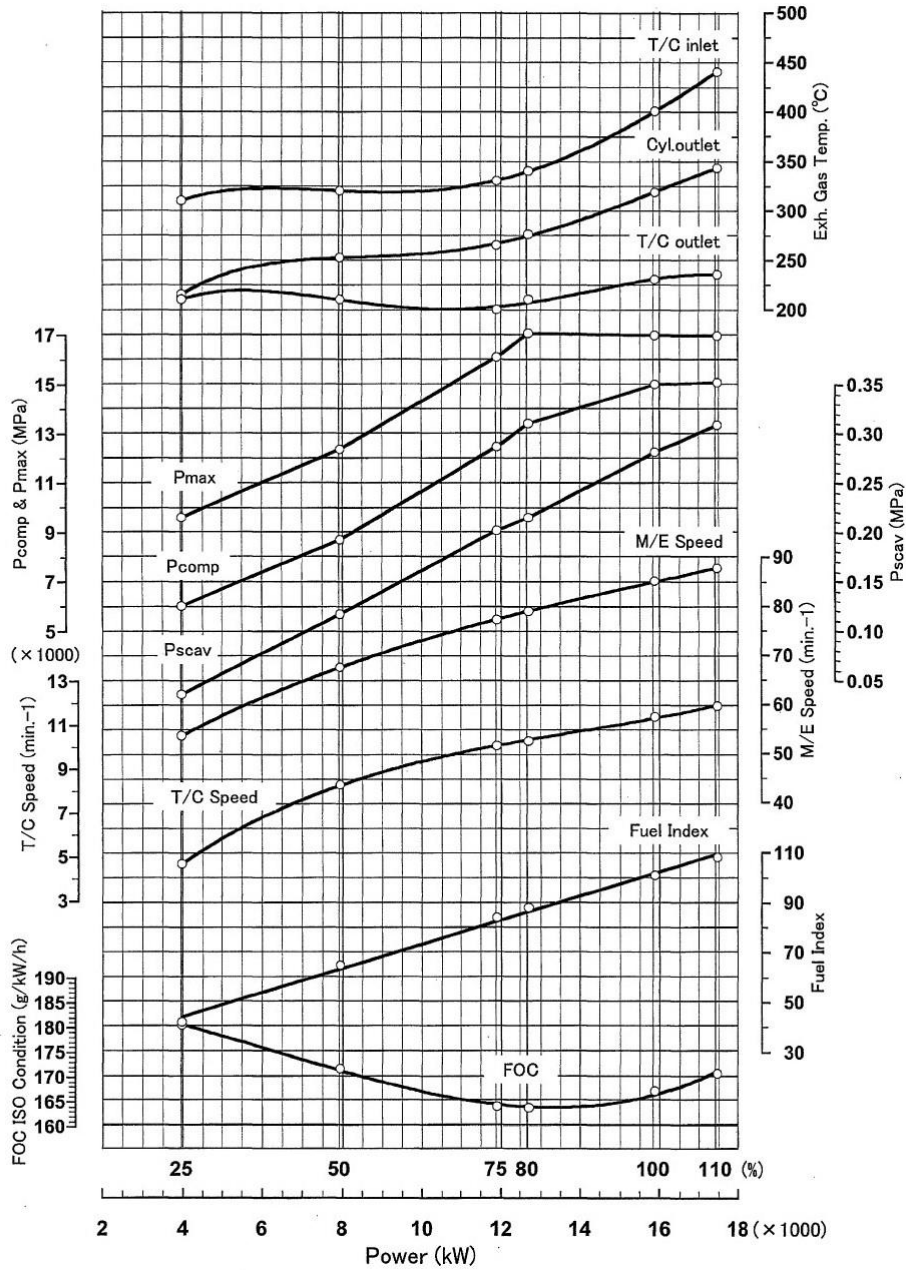
|     | Speed (min-1) | Intake Air |                          |                  | Exhaust Gas       |                    |                    |                    | Lub. Oil          |     |
|-----|---------------|------------|--------------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-----|
|     |               | Temp. (°C) | Filter Press. Drop (kPa) | Inlet Temp. (°C) | Outlet Temp. (°C) | Inlet Press. (MPa) | Back Press. (mmAq) | Inlet Press. (MPa) | Outlet Temp. (°C) |     |
| T/C | No.1          | 11400      | 22.2                     | 0.55             | 400               | 230                | 0.258              | 255                | 0.14              | 70  |
|     | No.2          | ***        | ***                      | ***              | ***               | ***                | ***                | ***                | ***               | *** |
|     | No.3          |            |                          |                  |                   |                    |                    |                    |                   |     |

Πίνακας 6. Αέρας εισαγωγής, Καυσαέρια και Λιπαντικά με λειτουργίας ΜΕ στο 100%



### 3.2.2.1 Καμπύλες απόδοσης για λειτουργία της μηχανής στο 100%

Performance curve

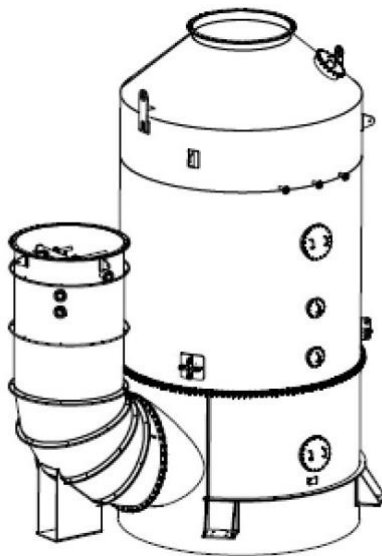


Διάγραμμα 4. Ισχύς με λειτουργία ΜΕ στο 100%

### 3.2.3 Scrubber της ME 7S65ME-C8.2

Το κόστος των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο όπως το MDO και το MGO είναι υψηλό σε σχέση με το βαρύ μαζούτ HFO. Γι' αυτό αναπτύχθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι χαμηλού κόστους για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων, με καθαρισμό καυσαερίων.

Η διαδικασία καθαρισμού των καυσαερίων στο συγκεκριμένο πλοίο εκτελείται με μονάδα πλύσης υγρού παράγοντα για την απομάκρυνση των SO<sub>x</sub> και PM. Ο κινητήρας είναι εξοπλισμένος με πλυντρίδα θαλασσινού νερού.



**Εικόνα 2.** Scrubber της ME 7S65ME-C8.2

(Πηγή: MAN B&W DIESEL ENGINE 7S65ME-C8.2)

Στην υγρή πλυντρίδα, τα καυσαέρια καθαρίζονται με νερό. Το νερό εγχέεται στο ρεύμα των καυσαερίων και εκκενώνεται από τον πυθμένα του πλυντηρίου. Τα οξείδια του θείου που παράγονται στη διαδικασία καύσης λόγω του θειούχου καυσίμου διαλύονται και απομακρύνονται από το νερό του καθαρισμού μετά μία απλή χημική αντίδραση.

### 3.2.3.1 Χαρακτηριστικά του scrubber της ME 7S65ME-C8.2

Στο παρακάτω πίνακα, αναγράφονται τα χαρακτηριστικά του scrubber του κινητήρα ME 7S65ME-C8.2.

|                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Type                          | Scrubber tower with packing |
| Function                      | SOx removing                |
| Maximum exhaust gas           | 117,470 kg / hr             |
| Operating pressure            | 3000 pa                     |
| Operating temperature         | ≤450°C                      |
| Material of pre-spray section | 254Mo                       |
| Bottom of absorber tower      | TAi                         |
| Middle of absorber tower      | UNS2507                     |
| Upper of absorber tower       | UNS2205                     |
| Size                          | Φ4000*9266*7018mm           |
| Net weight                    | 11.3 tons                   |
| Operating weight              | 22 tons                     |

### Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά του scrubber

(Πηγή: MAN B&W DIESEL ENGINE)

### 3.2.4 Καύσιμα της ME 7S65ME-C8.2

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται από τη ME είναι βαρύ μαζούτ (HFO) και πιο συγκεκριμένα HSFO, το οποίο έχει μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 3,5%. Λόγω του υψηλού ποσοστού σε θείο, χρησιμοποιείται το scrubber (όπως αναφέρεται στη παραπάνω ενότητα) για την αποθιοποίηση του καυσίμου. Παρακάτω είναι ο πίνακας με τα υπολείμματα του καυσίμου της ME.



| Characteristics/性状 <sup>1)</sup>                                   | Unit                             | Limit              | CIMAC A30   | CIMAC B30 | CIMAC D80 | CIMAC E180 | CIMAC F180 | CIMAC G380 | CIMAC H380 | CIMAC K380 | CIMAC H700 | CIMAC K700 | Test method reference                   |                                    |
|--|----------------------------------|--------------------|---|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|------------------------------------|
| Density at 15°C/<br>15°Cでの密度                                       | Kg/m <sup>3</sup>                | Max.               | 960.0   | 975.0     | 980.0     | 991.0      |            | 991.0      |            | 1010.0     | 991.0      | 1010.0     | ISO 3675 or ISO 12185<br>(see also 6.1) |                                    |
| Kinematic viscosity at 50°C/<br>50°Cでの動粘度                          | Mm <sup>2</sup> /s <sup>2)</sup> | Max.               | 30.0  |           | 80.0      | 180.0      |            | 380.0      |            | 700.0      |            |            | ISO 3104                                |                                    |
|  |                                  | Min. <sup>3)</sup> | 22.0  | -         | -         | -          |            | -          |            | -          |            |            | ISO 3104                                |                                    |
| Flash point/<br>引火点  | °C                               | Min.               | 60  |           | 60        | 60         |            | 60         |            | 60         |            |            | ISO 2719<br>(see also 6.2)              |                                    |
| Pour pint (upper)/流動点(上部)  | °C                               | Max.               | 0   | 24        | 30        | 30         | 30         | 30         | 30         | 30         | 30         | 30         | ISO 3016                                |                                    |
| 1. Winter quality/冬季<br>2. Summer quality/夏季                       |                                  |                    |   |           |           |            |            |            |            |            |            |            |   |                                    |
| Carbon residue/残留炭素  | % (m/m)                          | Max.               | 10  |           | 14        | 15         | 20         | 18         | 22         |            | 22         |            | ISO 10370                               |                                    |
| Ash/灰分   | % (m/m)                          | Max.               | 0.10  |           | 0.10      | 0.10       | 0.15       | 0.15       |            | 0.15       |            | 0.15       | ISO 6245                                |                                    |
| Water/水分   | % (V/V)                          | Max.               | 0.5   |           | 0.5       | 0.5        |            | 0.5        |            | 0.5        |            |            | ISO 3733                                |                                    |
| Sulphur/硫黄 <sup>4)</sup>   | % (m/m)                          | Max.               | 3.50  |           | 4.00      | 4.50       |            | 4.50       |            | 4.50       |            |            | ISO 14596 or ISO 8754<br>(see also 6.3) |                                    |
| Vanadium/バナジウム   | mg/kg                            | Max.               | 150   |           | 350       | 200        | 500        | 300        | 600        |            | 600        |            | ISO 14597 or IP 501<br>(see also 6.8)   |                                    |
| Total sediment potential/<br>総沈殿物の見込み                              | % (m/m)                          | Max.               | 0.10  |           | 0.10      | 0.10       |            | 0.10       |            | 0.10       |            |            | ISO 10307-2<br>(see also 6.6)           |                                    |
| Aluminium plus silicon <sup>5)/<br/>アルミニウム+シリコン<sup>6)</sup></sup> | mg/kg                            | Max.               | 80  |           | 80        | 80         |            | 80         |            | 80         |            |            | ISO 10478                               |                                    |
| Used lubricating oil (ULO)/<br>使用済潤滑油                              |                                  |                    | The fuel must be free of ULO. A fuel shall be considered to be free of ULO, if one or more of the elements Zinc, Phosphorus and Calcium is below or at the specified limit. All three elements must exceed the same limits before a fuel is to be deemed to contain ULO.<br>燃料にはULOが含まれてはいけい。亜鉛、リン、カルシウムの1つでもリミットの値以下であれば、燃料にはULOが含まれていないとみなす。ULOを含んでいるとみなされるときは、3つ全てがリミットを超える値となる。 |           |           |            |            |            |            |            |            |            |   |                                    |
| Zinc/亜鉛  | mg/kg                            | -                  |   |           |           |            |            | 15         |            |            |            |            |   | IP 501 or IP 470                   |
| Phosphorus/リン  | mg/kg                            | -                  |   |           |           |            |            | 15         |            |            |            |            |   | IP 501 or IP 500                   |
| Calcium/カルシウム  | mg/kg                            | -                  |   |           |           |            |            | 30         |            |            |            |            |   | IP 501 or IP 470<br>(see also 6.7) |

Πίνακας 8. Υπολείμματα καυσίμου

### 3.3 Παρουσίαση δεδομένων

Τη χρονική περίοδο 2017-2020 συλλέχθηκαν πληροφορίες για τις Engine Speed, Turbocharger Speed, Exhaust gas inlet temperature, Exhaust gas outlet temperature και Specific Fuel Oil Consumption όταν το πλοίο είχε σε πλήρη λειτουργία τη ΜΕ. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προκύψουν 990 μετρήσεις, μέσα από τις οποίες θα μπορούσαμε να βγάλουμε αξιόλογα αποτελέσματα. Τα ταξίδια που πραγματοποιήθηκαν ήταν κυρίως σε περιοχές ECAs και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εντατική χρήση του scrubber, για την αποθιοποίηση του HSFO με περιεκτικότητα 3,5% σε θείο.

Engine Speed: είναι η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ανά λεπτό, δηλαδή πόσο γρήγορα περιστρέφεται ο κινητήρας. Όταν οι στροφές είναι υψηλές, τότε υπάρχει και μεγάλη κατανάλωση αέρα και καυσίμου.

Turbocharger Speed: είναι η ταχύτητα περιστροφής του στροβιλοϋπερπληρωτή, όπου η λειτουργία του στηρίζεται στη συμπίεση του αέρα με τη χρήση περιστροφικού συμπιεστή με πτέρυγα. Με τα εξερχόμενα καυσαέρια της μηχανής, δημιουργείται η αναγκαία ισχύς για τη περιστροφή του του στροβίλου και

κατεπέκταση του συμπιεστή. Όταν από το κύλινδρο εξέρχονται τα καυσαέρια, έχουν μεγάλη πίεση, άρα και μεγάλη ενέργεια. Ένα ποσοστό της ενέργεια αυτής, αποτελείται από την ενέργεια της καύσης του καυσίμου. Λόγω αυτής της ενέργειας, την οποία απορροφά ο στρόβιλος, έχουμε ως αποτέλεσμα στο συμπιεστή να συμπιεστή ο εισερχόμενος αέρας και να αυξηθεί η εισερχόμενη μάζα στον κύλινδρο.

Ο στροβιλοϋπερπληρωτής αποτελείται από το συμπιεστή, το στρόβιλο, τα έδρανα και τον εναλλάκτη θερμότητας.

Exhaust gas inlet temperature : θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger.

Exhaust gas outlet temperature : θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger.

Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) : η κατανάλωση μαζούτ ανά μονάδα ενέργειας στον άξονα εξόδου είναι γνωστή ως ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) είναι η μάζα κατανάλωση καυσίμου ανά πραγματικό ίππο ισχύος της μηχανής. Δηλαδή, η συνολική κατανάλωση για καυσίμου, για τις ανάγκες του πλοίου. Στους κινητήρες Diesel, είναι η ειδική κατανάλωση μόνο του κινητήρα, ανά πραγματικό ίππο ισχύος στην πέδη. Δεν συγκαταλέγετε η ισχύς των μηχανημάτων που τον εξυπηρετούν κατά τη λειτουργία του. Σημαντικό ρόλο έχει το είδος του καυσίμου, για τη θερμογόνο δύναμη και τη τιμή του καυσίμου.

Για τον υπολογισμό της SFOC στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο τύπος :

$$SFOC = (HSFO/Torque/24) \times 10^6, \text{ gr/kWh}$$

HSFO : η κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια της περιόδου, που έγιναν οι μετρήσεις, metric tones

Torque: ισχύς πέδησης, kW

24 : είναι οι ώρες, που ο κινητήρας ήταν σε πλήρη λειτουργία, h

High Sulphur Fuel Oil (HSFO) : ανήκει στη κατηγορία του βαρύ μαζούτ ( HFO) που χρησιμοποιούνται στα πλοία. Έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδια του θείου μέχρι 3.5% και για τη αποθείωση του, σύμφωνα με τους κανονισμούς το 2020 και τη εκάστοτε περίπτωση , χρησιμοποιείται scrubber για την αποθείωση του.

### 3.3.1 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων απαιτήθηκε σε πρώτη φάση η συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων μέσω των προαναφερθέντων βάσεων δεδομένων. Στη συνέχεια και αφού συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα στην μορφή που ήταν απαραίτητη , ξεκίνησε η δημιουργία μιας κοινής βάσης δεδομένων με τη χρήση του προγράμματος Microsoft ®Excel . Μέσω του Excel έγινε η αρχική επεξεργασία των δεδομένων όπου και έγιναν όλοι οι υπολογισμοί που ήταν απαραίτητοι για την δημιουργία κάποιων νέων μεταβλητών. Επίσης χρειάστηκε η επεξεργασία των δεδομένων ώστε να μπορέσουν να περαστούν στο στατιστικό πρόγραμμα όπου θα γινόταν η περαιτέρω ανάλυση τους. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες είναι οι ταχύτητες περιστροφής της μηχανής, οι ταχύτητες περιστροφής του υπερπληρωτή, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger, ενώ ως εξαρτημένη η ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Consumption) (βλ. 3.3.). Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό IBM-SPSS όπου είναι ένα στατιστικό πρόγραμμα το οποίο διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για την επεξεργασία δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να υπολογίσει ένα πλήθος περιγραφικών χαρακτηριστικών ενός δείγματος και να υλοποιήσει μια σειρά από στατιστικούς ελέγχους.

## Αποτελέσματα

### Τεστ κανονικότητας

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος κανονικότητας στα δεδομένα για να εξακριβωθεί αν οι μελετηθείσες μεταβλητές ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για τον έλεγχο αυτό, χρησιμοποιήθηκε το τεστ Shapiro-Wilk, καθώς είναι ένας πολύ γνωστός μη παραμετρικός έλεγχος, με τον οποίο μπορεί να εξακριβωθεί αν οι παρατηρήσεις μίας μεταβλητής προέρχονται από κανονική κατανομή. Επιπλέον, το αποτέλεσμα επαληθεύτηκε και μέσω του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov, ο οποίος βοηθά επίσης στον έλεγχο κανονικότητας μίας μεταβλητής.

Ελέγχθηκε, λοιπόν, η 'Μηδενική' υπόθεση έναντι της 'Εναλλακτικής' υπόθεσης, όπου:

- Μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ): Η υπό έλεγχο μεταβλητή ακολουθεί την κανονική κατανομή.
- Εναλλακτική υπόθεση ( $H_1$ ): Η υπό έλεγχο μεταβλητή δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Από τα αποτελέσματα του ελέγχου διαπιστώνεται, ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται σε επίπεδο σημαντικότητας 5% (αν  $p\text{-value} < 0.05$  απορρίπτω την  $H_0$ ) και συνεπώς οι μελετηθείσες μεταβλητές δεν ακολουθούν κανονική κατανομή.

### Tests of Normality

|   | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |     |      | Shapiro-Wilk |     |      |
|---|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
|   | Statistic                       | df  | Sig. | Statistic    | df  | Sig. |
| RPM   | ,101                            | 990 | ,000 | ,959         | 990 | ,000 |
| Turbo_inlet                                 | ,152                            | 990 | ,000 | ,860         | 990 | ,000 |
| Turbo_outlet                                | ,085                            | 990 | ,000 | ,769         | 990 | ,000 |
| Turbocharger<br>Revolutions RPM             | ,094                            | 990 | ,000 | ,963         | 990 | ,000 |
| Specific Fuel Consumption<br>(SFOC, gr/kWh) | ,259                            | 990 | ,000 | ,396         | 990 | ,000 |
| HSFO Main (metric<br>tonnes)                | ,070                            | 990 | ,000 | ,977         | 990 | ,000 |

a. Lilliefors Significance Correction



## Πίνακας 9. Τεστ κανονικότητας

### Περιγραφική στατιστική

Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω πίνακα έχουμε έξι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Το σύνολο των παρατηρήσεων είναι 990 μετρήσεις. Από αυτές οι τρεις συσχετίζονται με το turbo όπως οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger, όπου οι μέσοι όροι τους είναι 337,5 και 264,9 αντίστοιχα. Το ελάχιστο που παρατηρείται σαν τιμή στις θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο είναι το 0, ενώ η μέγιστη 394 και στις θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο του turbocharger η ελάχιστη τιμή είναι το 24 ενώ η μέγιστη είναι το 368. Η τρίτη μεταβλητή είναι η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή όπου ο μέσος όρος του είναι 6943,83 ενώ το ελάχιστο και το μέγιστο κυμαίνεται από 0 έως και 10384.

Η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής έχει μέσο όρο περίπου 64 και το εύρος των τιμών είναι από 30 μέχρι 80. Τέλος η **HSFO** με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (**Specific Fuel Consumption**) όπου είναι άρτια συνδεδεμένες έχουν μέσο όρο 28,5 και 212,5 αντίστοιχα με τις ελάχιστες τιμές τους να είναι 0,3 και 1,74 και τις μέγιστες 53,25 και 1791 ,5 αντίστοιχα.

Statistics

|                |         | HSFO Main<br>(metric<br>tonnes) | RPM     | Turbo_inlet | Turbo_outlet | Turbocharger<br>Revolutions<br>RPM | Specific Fuel<br>Consumption<br>(SFOC,<br>gr/kWh) |
|----------------|---------|---------------------------------|---------|-------------|--------------|------------------------------------|---|
| N              | Valid   | 990                             | 990     | 990         | 990          | 990                                | 990   |
|                | Missing | 1                               | 1       | 1           | 1            | 1                                  | 1   |
| Mean           |         | 28,45861616                     | 64,2377 | 337,57      | 264,86       | 6943,83                            | 212,4851420                                       |
| Median         |         | 29,47500000                     | 66,0000 | 349,00      | 266,00       | 7258,00                            | 215,3510821                                       |
| Mode           |         | 23,90000000                     | 70,00   | 358         | 265          | 7258 <sup>a</sup>                  | 208,409451 <sup>a</sup>                           |
| Std. Deviation |         | 10,06525713                     | 7,12988 | 30,969      | 19,183       | 1788,860                           | 80,65362562                                       |
| Minimum        |         | ,3000000000                     | 30,20   | 0           | 24           | 0                                  | 1,742366692                                       |
| Maximum        |         | 52,25000000                     | 80,10   | 394         | 368          | 10384                              | 1791,483113                                       |

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

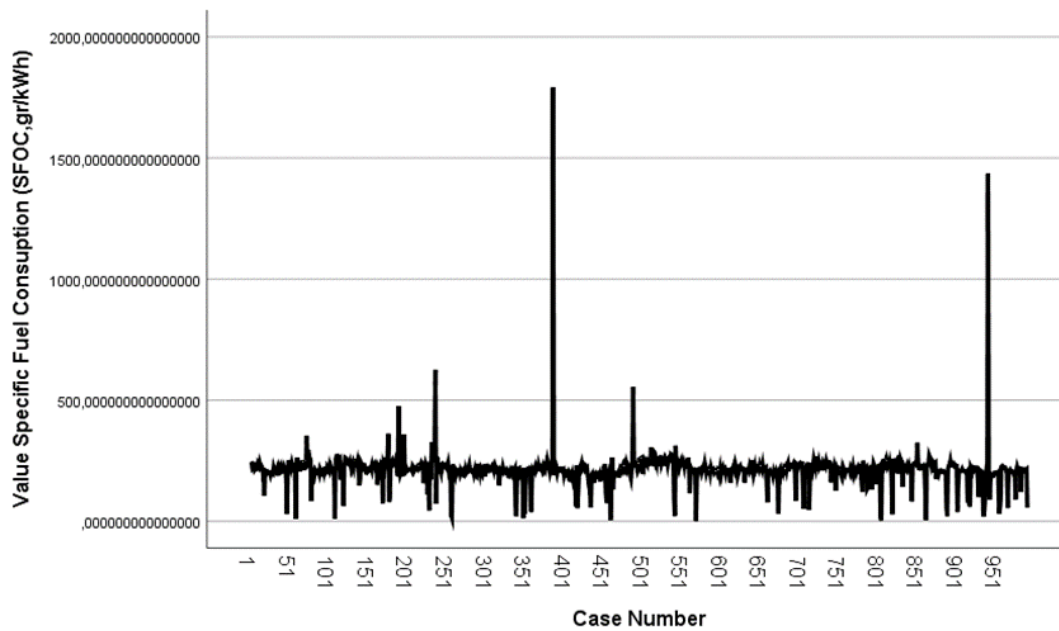
**Πίνακας 10.** Περιγραφική στατιστική ανάλυση των μεταβλητών

Αποτελέσματα ερωτημάτων

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάλυση του δείγματος, στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση των σχέσεων των μεταβλητών, για τη δημιουργία αποτελεσμάτων. Αυτό θα μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για τη παρακολούθηση των αέριων ρύπων, αφού ήδη γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου και από το είδος του καυσίμου, είναι συνδεδεμένα με τους αέριους ρύπους που παράγονται από ναυτικούς κινητήρες diesel.

- **Αν υπάρχει μεταβολή στις τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption) κατά τη διάρκεια της περιόδου αναφοράς, καθώς αυτή συνδέεται με εκπαιμπόμενους ρύπους;**

Κατά την διάρκεια της περιόδου αναφοράς στην μεταβλητή Specific Fuel Consumption παρατηρείτε μια συνεχή πορεία ανόδου και καθόδου έχοντας κάποιες ακραίες τιμές κυρίως στην άνοδο των τιμών. Υπάρχουν δηλαδή σκαμπανεβάσματα στην τιμή της διατηρώντας όμως μέσα στον χρόνο μία νοητή γραμμή όπου ισορροπεί.



**Διάγραμμα 5.** Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption)

Για την εύρεση των σχέσεων που υπάρχουν μεταξύ των μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε η έννοια του συντελεστή συσχέτισης. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι καθαροί αριθμοί, οι οποίοι δείχνουν το μέγεθος και τη κατεύθυνση της συσχέτισης μεταξύ δύο ποσοτικών μεταβλητών και λαμβάνουν τιμές στο διάστημα  $-1,1$  όπου:

- Αν  $r=1$ , ισχυρή θετική συσχέτιση
- Αν  $r=0$ , απουσία συσχέτισης
- Αν  $r=-1$ , ισχυρή αρνητική συσχέτιση

**Correlations**

|                                 |                     | HSFO Main<br>(metric<br>tonnes) | RPM     | Turbo_inlet | Turbo_outlet | Turbocharger<br>Revolutions<br>RPM |
|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------|-------------|--------------|------------------------------------|
| HSFO Main (metric<br>tonnes)    | Pearson Correlation | 1                               | ,810**  | ,646**      | -,085**      | ,761**                             |
|                                 | Sig. (2-tailed)     |                                 | ,000    | ,000        | ,008         | ,000                               |
|                                 | N                   | 990                             | 990     | 990         | 990          | 990                                |
| RPM                             | Pearson Correlation | ,810**                          | 1       | ,788**      | -,158**      | ,898**                             |
|                                 | Sig. (2-tailed)     | ,000                            |         | ,000        | ,000         | ,000                               |
|                                 | N                   | 990                             | 990     | 990         | 990          | 990                                |
| Turbo_inlet                     | Pearson Correlation | ,646**                          | ,788**  | 1           | ,081*        | ,778**                             |
|                                 | Sig. (2-tailed)     | ,000                            | ,000    |             | ,011         | ,000                               |
|                                 | N                   | 990                             | 990     | 990         | 990          | 990                                |
| Turbo_outlet                    | Pearson Correlation | -,085**                         | -,158** | ,081*       | 1            | -,210**                            |
|                                 | Sig. (2-tailed)     | ,008                            | ,000    | ,011        |              | ,000                               |
|                                 | N                   | 990                             | 990     | 990         | 990          | 990                                |
| Turbocharger<br>Revolutions RPM | Pearson Correlation | ,761**                          | ,898**  | ,778**      | -,210**      | 1                                  |
|                                 | Sig. (2-tailed)     | ,000                            | ,000    | ,000        | ,000         |                                    |
|                                 | N                   | 990                             | 990     | 990         | 990          | 990                                |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**Πίνακας 11.** Έλεγχος συσχετίσεων

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson  $r$  εμφανίζεται στην πρώτη σειρά: Pearson 's και μας δείχνει τις συσχετίσεις όλων των μεταβλητών. Όπως διαπιστώνετε, την τιμή του συντελεστή ακολουθούν δύο αστεράκια που σημαίνουν ότι τα αποτελέσματα είναι στατιστικά σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας  $p < 0,01$ . Συνεπώς, η πιθανότητα το συγκεκριμένο αποτέλεσμα να οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες, είναι σχεδόν μηδενική. Κατά συνέπεια, απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση (που υπεστήριζε ότι δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην HSFO Main και στις μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στο υπόδειγμα). Πιο ισχυρή συσχέτιση παρουσιάζει με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής με  $r = 0,81$ . Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι δεν οφείλετε σε τυχαίους παράγοντες και υπάρχει συσχέτιση κυρίως θετική με τις τρεις μεταβλητές της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής, τις θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger και τη ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την ταυτόχρονη ή μεμονωμένη ελάττωση των τριών μεταβλητών, πετυχαίνεται και ελάττωση της κατανάλωσης καυσίμου.

- Η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου επηρεάζεται από τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και αν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στη γενική σχέση;

Όπως έχει αναφερθεί η ειδική κατανάλωση καυσίμου προκύπτει από την HSFO Main. Το αποτέλεσμα αυτό, είναι στατιστικά τεκμηριωμένο από τον έλεγχο Pearson, που πραγματοποιήθηκε στις μεταβλητές, όπου παρατηρείται θετική συσχέτιση ανάμεσα στις δύο μεταβλητές.

### Descriptive Statistics

|                           | Mean                   | Std. Deviation         | N   |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-----|
| RPM                       | 64,2377                | 7,12988                | 990 |
| HSFO Main (metric tonnes) | 28,4586161616<br>16170 | 10,0652571261<br>39880 | 990 |

**Πίνακας 12.** Περιγραφική στατιστική της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και HSFO

### Correlations

|                              |                     | RPM    | HSFO Main<br>(metric<br>tonnes) |
|------------------------------|---------------------|--------|---------------------------------|
| RPM                          | Pearson Correlation | 1      | ,810**                          |
|                              | Sig. (1-tailed)     |        | ,000                            |
|                              | N                   | 990    | 990                             |
| HSFO Main (metric<br>tonnes) | Pearson Correlation | ,810** | 1                               |
|                              | Sig. (1-tailed)     | ,000   |                                 |
|                              | N                   | 990    | 990                             |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (1-tailed).

**Πίνακας 13.** Έλεγχος συσχέτισεων μεταξύ HSFO και ταχύτητας περιστροφής της μηχανής

Από το παραπάνω έλεγχο συσχέτισης μεταξύ HSFO και ταχύτητας περιστροφής της μηχανής, προκύπτει, ότι η κατανάλωση του καυσίμου επηρεάζεται σχεδόν στο 100% από τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Όσο μικρότερη η ταχύτητα περιστροφή της μηχανής τόσο μικρότερη και η κατανάλωση.

- **Η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή επηρεάζει τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων και σε τι ποσοστό, μεταβάλλεται το ποσοστό αυτό με βάση τη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων;**

Από τον παρακάτω πίνακα συσχέτισης είναι φανερό ότι η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή επηρεάζει αρνητικά τη θερμοκρασία των καυσαερίων κατά τη έξοδο τους από το στρόβιλο του turbocharger σε ποσοστό 21% όπου είναι στατιστικά σημαντικό. Όμως παρατηρούμε επίσης ότι σε σχέση με τις θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο υπάρχει μια σχεδόν ουδέτερη συσχέτιση όποτε η μεταβολή του ποσοστού είναι ελάχιστη.

### Correlations

|                                 |                     | Turdocharger<br>Revolutions<br>RPM | Turbo_outlet |
|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|--------------|
| Turdocharger<br>Revolutions RPM | Pearson Correlation | 1                                  | -,210**      |
|                                 | Sig. (1-tailed)     |                                    | ,000         |
|                                 | N                   | 990                                | 990          |
| Turbo_outlet                    | Pearson Correlation | -,210**                            | 1            |
|                                 | Sig. (1-tailed)     | ,000                               |              |
|                                 | N                   | 990                                | 990          |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (1-tailed).

**Πίνακας 14.** Έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή και θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger

### Correlations

|              |                     | Turbo_outlet | Turbo_inlet |
|--------------|---------------------|--------------|-------------|
| Turbo_outlet | Pearson Correlation | 1            | ,081**      |
|              | Sig. (1-tailed)     |              | ,005        |
|              | N                   | 990          | 990         |
| Turbo_inlet  | Pearson Correlation | ,081**       | 1           |
|              | Sig. (1-tailed)     | ,005         |             |
|              | N                   | 990          | 990         |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (1-tailed).

**Πίνακας 15.** Έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόφαλο του turbocharger

- **Ποιοί άλλοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τη μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου;**

### Παλινδρόμηση

Ο κλάδος της στατιστικής ο οποίος εξετάζει τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της μιας από τις υπόλοιπες ονομάζεται ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis). Με τον όρο εξαρτημένη μεταβλητή εννοείται η μεταβλητή της οποίας η τιμή πρόκειται να προβλεφθεί, ενώ με τον όρο ανεξάρτητη γίνεται αναφορά σε εκείνη τη μεταβλητή η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής. Η ανεξάρτητη μεταβλητή δεν θεωρείται τυχαία, αλλά παίρνει καθαρισμένες τιμές. Η εξαρτημένη μεταβλητή θεωρείται τυχαία και επηρεάζεται από την ανεξάρτητη.

### Model Summary

| Model | R                 | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate | R Square Change | Change Statistics |     |     | Sig. F Change |
|-------|-------------------|----------|-------------------|----------------------------|-----------------|-------------------|-----|-----|---------------|
|       |                   |          |                   |                            |                 | F Change          | df1 | df2 |               |
| 1     | ,816 <sup>a</sup> | ,666     | ,665              | 5,825864452                | ,666            | 491,765           | 4   | 985 | ,000          |

a. Predictors: (Constant), Turbocharger Revolutions RPM, Turbo\_outlet, Turbo\_inlet, RPM

**Πίνακας 16.** Μοντέλο παλινδρόμησης

**Coefficients<sup>a</sup>**

| Model |                                 | Unstandardized Coefficients |            | Standardized | t       | Sig. |
|-------|---------------------------------|-----------------------------|------------|--------------|---------|------|
|       |                                 | B                           | Std. Error | Beta         |         |      |
| 1     | (Constant)                      | -44,610                     | 3,639      |              | -12,257 | ,000 |
|       | RPM                             | ,949                        | ,062       | ,672         | 15,185  | ,000 |
|       | Turbo_inlet                     | -,019                       | ,011       | -,058        | -1,717  | ,086 |
|       | Turbo_outlet                    | ,038                        | ,011       | ,072         | 3,495   | ,000 |
|       | Turbocharger<br>Revolutions RPM | ,001                        | ,000       | ,217         | 4,840   | ,000 |

a. Dependent Variable: HSFO Main (metric tonnes)

### Πίνακας 17. Παλινδρόμηση

Το  $r^2$  είναι 0,666 που σημαίνει ότι το 66,6% της εξαρτημένης μας μεταβλητής εξηγείται από τις 4 εξαρτημένες μας μεταβλητές. Στην ουσία μπορούμε να προβλέψουμε το 66,6% της συνολικής διακύμανσης στην μέτρηση του HSFO. Αυτό επιτυγχάνετε κυρίως από την μεταβλητή της ταχύτητας της μηχανής. Ο συντελεστής  $\alpha$  είναι -44,610.

Η γραμμική συσχέτιση που προκύπτει από την παλινδρόμηση εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$\text{HSFO} = -44,610 + 0,949 * \text{ES} + 0,038 * \text{EGOT} + 0,001 * \text{TS} \text{ , (1) όπου}$$

ES : Engine Speed

EGOT : Exhaust Gas Outlet Temperature

TS : Turbocharger

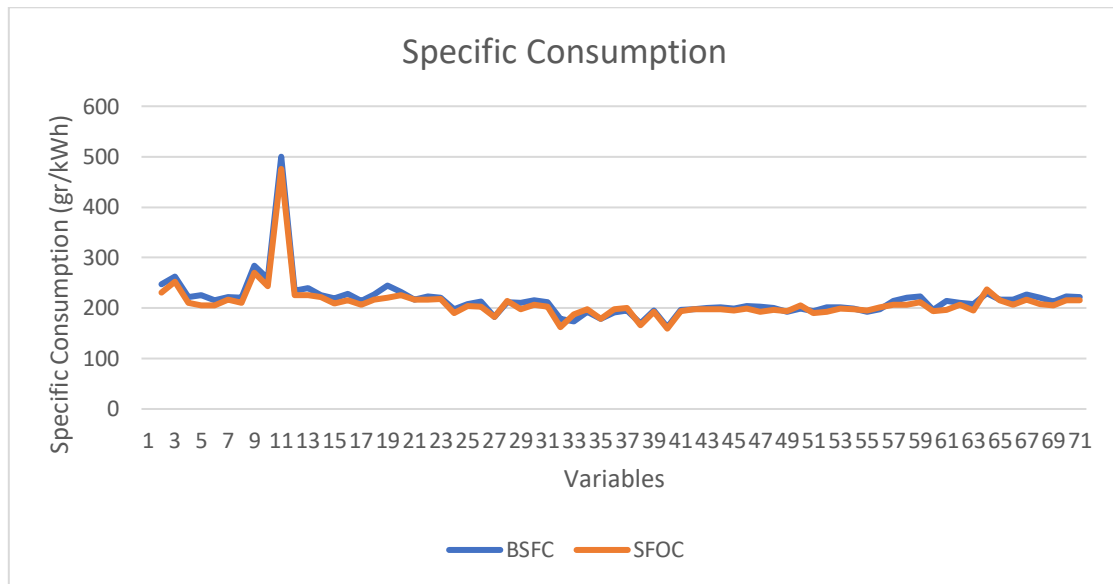
Οπότε από τη σχέση (1) προκύπτει ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{BSFC} = (\text{HSFO} / \text{T} / 24) * 1000000$$

T : Torque

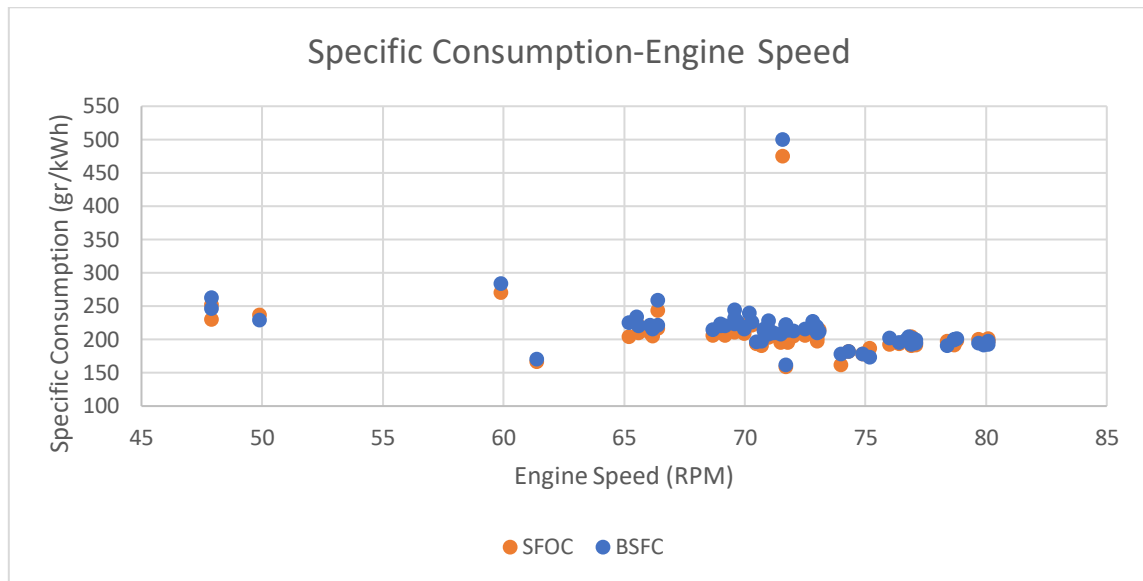


Μέσα από την εξίσωση που προέκυψε από τη γραμμική συσχέτιση των μεταβλητών, μπορούμε να κάνουμε πρόβλεψη με στατιστικά μοντέλα για την ειδική κατανάλωση καυσίμου.



### Πίνακας 18. Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

Στο παραπάνω πίνακα απεικονίζεται ένα δείγμα 70 μετρήσεων με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) από το τύπο που γνωρίζουμε μέχρι τώρα από τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με τα δεδομένα του πλοίου, σε σύγκριση με το στατιστικό μοντέλο (BSFC) που δημιουργήθηκε, χρησιμοποιώντας μόνο τις μεταβλητές που είναι στατιστικά σημαντικές. Μέσα από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχουν ακραίες τιμές και σκαμπανεβάσματα στις τιμές της ειδικής κατανάλωσης χρησιμοποιώντας όλες τις μεταβλητές. Σε αντίθεση με το καινούργιο μοντέλο, όπου χρησιμοποιώντας μόνο τις στατιστικά σημαντικές μεταβλητές, που τελικά αυτές είναι που επηρεάζουν και την ειδική κατανάλωση, παρατηρούμε μία ομαλότητα στις τιμές.



**Πίνακας 19.** Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

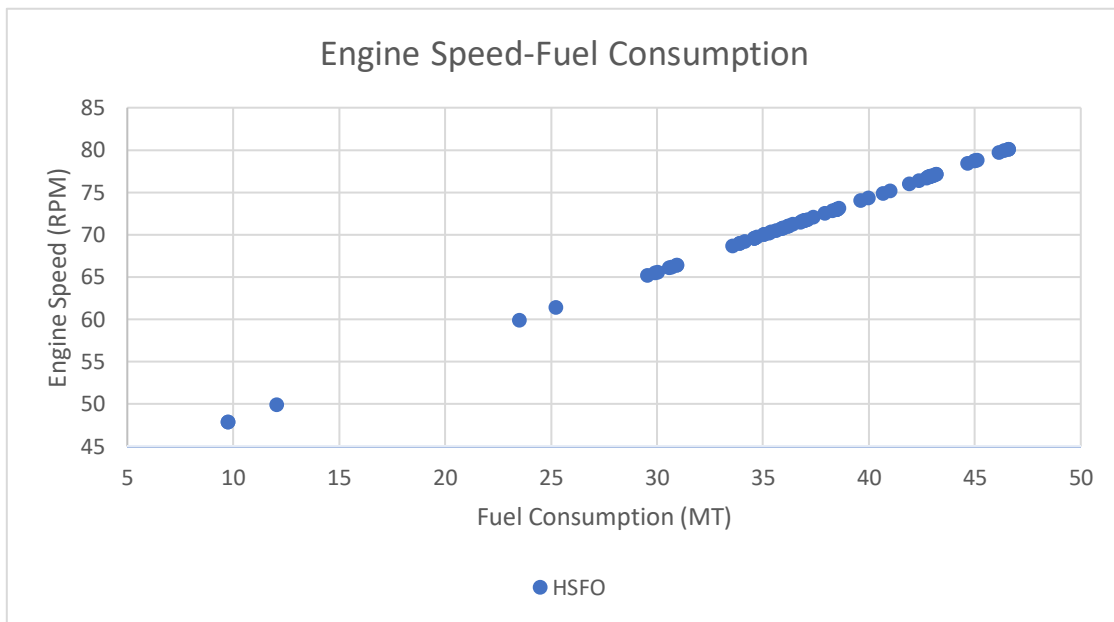
Στο παραπάνω πίνακα απεικονίζεται η αρχική ειδική κατανάλωση καυσίμου(SFOC) μαζί με τα αποτελέσματα της ειδικής κατανάλωσης από το στατιστικό μοντέλο (BSFC), σε σύγκριση με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Αυτό που προκύπτει είναι ότι στις ίδιες στροφές, οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης έχουν μεγάλη απόκλιση. Αυτό οφείλεται, στις επιπλέον μη στατιστικά μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στη κατανάλωση καυσίμου, σε αντίθεση με τη δεύτερη περίπτωση που έχουμε την εφαρμογή στον τύπο με τις μεταβλητές που επηρεάζουν ουσιαστικά την κατανάλωση.

Στο παράδειγμα μας όμως παρατηρούμε ότι οι 3 από τις 4 μεταβλητές δεν έχουν τόσο μεγάλη στατιστική σημαντικότητα. Επομένως χρησιμοποιώντας την μέθοδο stepwise στην παλινδρόμηση θα ελεγχθεί αν υπάρχει γραμμική συσχέτιση που είναι πιο αποτελεσματική στην πρόβλεψη του HSFO από όπου προκύπτει η ζητούμενη μεταβλητή αυτή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Πράγματι όπως είναι φανερό από τα παρακάτω αποτελέσματα ο έλεγχος με την μέθοδο stepwise αφαίρεσε τις τρεις μεταβλητές από το υπόδειγμα και προέκυψε μία νέα γραμμική συσχέτιση:

$$HSFO = -45,016 + 1,144 * RPM$$



Μέσα από την μέθοδο stepwise στην παλινδρόμηση προέκυψε η παραπάνω εξίσωση. Στο παρακάτω πίνακα, παρατηρούμε ότι η κατανάλωση καυσίμου είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα τόσο αυξάνεται και η κατανάλωση.



**Πίνακας 20.** Σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

### Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

| Model | Variables Entered                  | Variables Removed | Method  |
|-------|------------------------------------|-------------------|---|
| 1     | RPM                                | .                 | Stepwise<br>(Criteria:<br>Probability-of-<br>F-to-enter <= ,<br>050,<br>Probability-of-<br>F-to-remove<br>>= ,100). |
| 2     | Turdocharger<br>Revolutions<br>RPM | .                 | Stepwise<br>(Criteria:<br>Probability-of-<br>F-to-enter <= ,<br>050,<br>Probability-of-<br>F-to-remove<br>>= ,100). |

a. Dependent Variable: HSFO Main (metric tonnes)

### Πίνακας 21. Εξαγωγή μεταβλητών

### Coefficients<sup>a</sup>

| Model |                                 | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients | t       | Sig. |
|-------|---------------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|---------|------|
|       |                                 | B                           | Std. Error | Beta                      |         |      |
| 1     | (Constant)                      | -45,016                     | 1,701      |                           | -26,459 | ,000 |
|       | RPM                             | 1,144                       | ,026       | ,810                      | 43,451  | ,000 |
| 2     | (Constant)                      | -37,764                     | 2,452      |                           | -15,400 | ,000 |
|       | RPM                             | ,927                        | ,059       | ,656                      | 15,628  | ,000 |
|       | Turdocharger<br>Revolutions RPM | ,001                        | ,000       | ,171                      | 4,077   | ,000 |

a. Dependent Variable: HSFO Main (metric tonnes)

### Πίνακας 22. Παλινδρόμηση με μέθοδο stepwise

## Συμπεράσματα

Μέσα από την εκτεταμένη ανάλυση των δεδομένων των οποίων αντλήσαμε και την σύνδεση τους με την θεωρητική βάση εξήχθησαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά τα δεδομένα όπως ήταν φυσικό ως απρόβλεπτες τιμές δεν ακολουθούν κανονική κατανομή.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι, ο μέσος όρος των θερμοκρασιών εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger είναι 337,5 °C και εξόδου 264,9 °C, της ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή 6943,83 rpm και της μηχανής 64 rpm, ενώ της ειδικής κατανάλωσης είναι 212gr/kWh.

Η βασική μας μεταβλητή είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Consumption), στην οποία παρατηρείται μια συνεχή πορεία ανόδου και καθόδου έχοντας κάποιες ακραίες τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 1,74 έως 1791,5 gr/kWh. Ακόμη από τον έλεγχο συσχετίσεων που πραγματοποιήθηκε, προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες η μεταβλητή μας και υπάρχει συσχέτιση κυρίως θετική με τις τρεις μεταβλητές ταχύτητα περιστροφής της μηχανής  $r=0,81$ , θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger  $r=0,646$  και η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή  $r=0,761$ . Ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι στατιστικά σημαντικά.

Στην συνέχεια έγιναν έλεγχοι συσχετίσεων ανάμεσα στις μεταβλητές turbo και πως επηρεάζονται μεταξύ τους, όπου προέκυψε ότι το turbocharger επηρεάζει αρνητικά τις τιμές των θερμοκρασιών εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger κατά ποσοστό 21% όπου είναι στατιστικά σημαντικό. Επίσης αυτό το ποσοστό δεν αλλάζει μέσω των θερμοκρασιών εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger καθώς υπάρχει μια σχεδόν ουδέτερη συσχέτιση μεταξύ των δύο και η μεταβολή του ποσοστού είναι ελάχιστη. Σε ποσοστό 66,6% η ειδική κατανάλωση καυσίμου επηρεάζεται από τις 4 μεταβλητές, ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή, θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger, το οποίο παρατηρούμε μέσα από τη γραμμική παλινδρόμηση.

Στην παλινδρόμηση που έγινε αντλήσαμε αρχικά μία γραμμική συσχέτιση η οποία όμως περιείχε μεταβλητές που φαινόταν να μην επηρεάζουν την εξαρτημένη μεταβλητή που μελετήθηκε. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο να επαναληφθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο stepwise όπου ανάλογα με την σημαντικότητα που θέσαμε έβγαζε ως αποτέλεσμα το καλύτερο μοντέλο γραμμικής συσχέτισης.

Το μοντέλο γραμμικής συσχέτισης που προκύπτει από τις τρεις μεταβλητές ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων και τη ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή, μας δίνει αποτελέσματα για ποσοστό άνω του 66,6% της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Όπως φαίνεται από τους πίνακες 18 κ 19, αποφεύγουμε τις ακραίες τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, δημιουργώντας ομαλή διακύμανση των τιμών και ασφαλή αποτελέσματα για τον προβλεπόμενο υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης.

Η γραμμική συσχέτιση που προέκυψε για την πρόβλεψη του HSFO και κατ' επέκταση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption) είναι το εξής :

$$\text{HSFO} = -45,016 + 1,144 * \text{RPM}$$

και

$$\text{BSFC} = (\text{HSFO} / \text{T} / 24) * 1000000, \text{ όπου}$$

$$\text{HSFO} = -44,610 + 0,949 * \text{ES} + 0,038 * \text{EGOT} + 0,001 * \text{TS}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής επηρεάζει την ειδική κατανάλωση καυσίμου, άρα όσες παραπάνω είναι οι στροφές τόσο μεγαλύτερη είναι και η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Μέσα από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι εκπομπές αέριων ρύπων SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> και CO<sub>2</sub> από τους ναυτικούς κινητήρες diesel είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Οπότε με τη μείωση των στροφών του κινητήρα πετυχαίνουμε και μείωση αυτών αέριων ρύπων. Επιπλέον τα CO εξαρτώνται από τη ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή το οποίο δεν επηρεάζεται πολύ από τις θερμοκρασίες εισόδου των

καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger, αλλά επηρεάζει αρνητικά τις θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger

Συμπερασματικά οι 4 μεταβλητές (ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή, θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο του turbocharger) που χρησιμοποιήθηκαν επηρεάζουν την ειδική κατανάλωση καυσίμου σε ποσοστό 66,6%, το οποίο είναι σημαντικό, αλλά με το καινούργιο στατιστικό μοντέλο προκύπτουν εγκυρότερα αποτελέσματα. Ελέγχοντας με τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και του υπερπληρωτή, θα υπάρξει και έλεγχος στη κατανάλωση του καυσίμου και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα diesel. Σημαντικό ρόλο έχει η ποιότητα του καυσίμου και καλή λειτουργία του συμπιεστή στο στροβιλοϋπερπληρωτή.

## Βιβλιογραφία

1. “2012 guidelines on the method of calculation of attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships”, Marine Environment Protection Committee-MEPC 63/23.
2. “Assessment of IMO mandated energy efficiency measures for international shipping: Estimated CO<sup>2</sup> emissions reduction from introduction of mandatory technical and operational energy efficiency measures for ships”, Marine Environment Protection Committee-MEPC 63/INF.2 .
3. “Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)”, Marine Environment Protection Committee-MEPC.1/circ.684
4. “Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in PARPOL Annex VI”, 2011, Marine Environment Protection Committee-MEPC 62/24/Add1.
5. “Market-Based Measures Proposals under consideration within the Expert Group on Feasibility Study and Impact Assessment of Possible Market Based Measures”, I IMO Marine Environment Protection Committee-MEPC 62/5/1, 08 April 2011.
6. “Reduction of GHG emissions from ships: Full report of the work undertaken by the Expert Group on Feasibility Study and Impact Assessment of possible Market-based Measures”, IMO Marine Environment Protection Committee-MEPC 61/INF.2, August 2010.
7. “Review of Proposed MBMs: Grouping and evaluation of proposed MBMs” submitted by Greece at the IMO Intersectional meeting of the working group on GHG emissions from ships, GHG-WG 3/3, 24 February 2011.
8. “Second IMO GHG Study 2009”, International Maritime Organization (IMO), London, UK, April, 2009.
9. “Technical and Operational Measures”, IMO



10. Agrawal Harshit, Quentin G.J. Malloy, William A. Welch, J. Wayne Miller, David R. Cocker III, In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel. *Atmospheric Environment*. 42, pp.5504–5510, 2008a.
11. Linda Akel, William B., Ferron, John M., Detecting Departures from Normality: A Monte Carlo Simulation of A New Omnibus Test based on Moments, Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Diego, C.A., 1998
12. Conover, W.J., *Practical Nonparametric Statistics*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, pp.428-433 (6.1), 1999  
DOI: [10.1080/25725084.2020.1861823](https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1861823)
13. Eyring Veronika, Corbet J. James, David S. Lee, James J. Winebrake, Brief summary of the impact of ship emissions on atmospheric composition, climate, and human health, Health and Environment sub-group of the International Maritime Organization, 6<sup>th</sup> November, 2007
14. Giada Kyaw Oo D'Amore, Marco Biot, Francesco Mauro, Jan Kašpar, Green Shipping—Multifunctional Marine Scrubbers for Emission Control: Silencing Effect, *Applied Sciences*, 2021, σελ. 11,  
<https://doi.org/10.3390/app11199079>
15. Huang Cheng, Hu Qingyao, Wang Hanyu, Qiao Liping, Jing, Sheng'aoJing, Wang Hongli, Zhou Min, Zhu Shuhui, Ma Yingge, Lou Shengrong, Li Li, Tao Shikang, Li Yingjie, Lou Diming, Emission factors of particulate and gaseous compounds from a large cargo vessel operated under real-world conditions. *Environment Pollution*. 242, pp.667–674, 2018.
16. IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions,  
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
17. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974.
18. James Chambers, ABS advisory on exhaust gas scrubber systems, p.p.18-19, July, 2018.

19. Jiayu Bai & Aldo Chircop, The Regulation of Heavy Fuel Oil in Arctic Shipping: Interests, Measures and Impacts, pp.265-283, August 2020
20. Klara Andersson, Byongung Jeong, Hayoung Jang, Life Cycle and Cost Assessment of a Marine Scrubber Installation, Journal of International Maritime Safety, Environment Affairs and Shipping, pp 162-176, 2020
21. Krupa V.S., Air quality and crops. In: Air pollution people and plants. An introduction. The American Phytopathological Society, pp. 95-116,1997
22. Legge A.H. & Krupa S.V., Air pollutants and their effects on the terrestrial ecosystems. John Wiley & Sons, NY, 1986.
23. Luis Maria Abadie, Nestor Goicoechea, Ibon Galarraga, Transportation Research Part D Transport and Environment, Adapting the shipping sector to stricter emissions regulations: Fuel switching or installing a scrubber?, pp 237-250, December, 2017
24. M. Yusuf Khan, Ranganathan, Sindhuja, Agrawal Harshit, Welch, William A., Laroo Christopher, Miller J.Wayne, David Cocker III, Measuring in-use ship emissions with international and U.S. federal methods. Journal of the Air Waste Manage. Assoc. 63, pp. 284–291, 2013.
25. Man Diesel & Turbo, Technical Paper: "Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow, Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engines", 2008
26. Marine Environment Protection Committee-MEPC 57/11, 07 April 2008.
27. McGuire & White, Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals, 3<sup>th</sup> edition, Sigtto, London, 2020
28. Moldanova Jana, Fridell Erik, Popovicheva B. Olga, Demirdjian Benjamin, Tishkova Victoria, Faccinnetto Alessandro, Focsa C., Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine. Atmospheric Environment 43, pp.2632–2641, 2009.
29. Noeske Veritas (DNV) and Process Systems Enterprise Ltd. (PSE), released the results of the Maritime CCS (carbon capture and storage) research and development project.

30. Prevention of pollution by sewage from ships, contained in Annex IV of MARPOL.
31. Roy M. Harrison and Roger Perry, Handbook of Air Pollution Analysis, 2<sup>nd</sup> edition, London, New York: Chapman and Hall, 1986
32. Royston, J.P., Algorithm AS 177: Expected Normal Order Statistics (Exact and Approximate), Applied Statistics, 31, pp.161-165, 1982b
33. Royston, J.P., Algorithm AS 181: The W Test for Normality, Applied Statistics, 31, pp.176-180, 1982c
34. Royston, J.P., An Extension of Shapiro and Wilk 's W Tests for Normality to Large Samples, Applied Statistics, 31, pp.115-124, 1982a
35. Royston, J.P., Approximating the Shapiro-Wilk W test for Non-normality(Abstract), Statistics and Computing, 2, pp.117-119, 1992
36. Royston, J.P., Remark AS R94: A Remark on Algorithm AS181:The W-test for Normality, Journal of the Royal Statistics Society, Vol.44, No.4, pp.547-551, 1995
37. S.THEODOROPOULOS, The role of shipping services receipts in combating the "twin deficits"- "twin crisis" of the Greek economy, ECONSHIP 2011.
38. Shapiro, S.S. and Wilk, M.B, An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). Biometrika, Vol.52, No.3/4, pp 591-611,1965
39. The United Nations Convention on the Law of the Sea.
40. Tien Anh Tran, Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships, November, 2017
41. Townsend C., Marine Fuels and Engines, Maritime Reporter &Engineering News, November 2008
42. United Nations Conference on Trade and Development, "Review of Maritime transport 2011", New York and Geneva, 2011.
43. United Nations Framework Convention on Climate Change, 35<sup>th</sup> session of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, Durban, 28 November to 03 December 2011.

44. Ανώνυμος, Βιολογική καταπολέμηση εντόμων-εχθρών των καλλιεργειών (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις). Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας & Εντομολογίας, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. 28 σελ, 2000b.
45. Βλάχος Γ.Π., Εμπορική Ναυτιλία και Θαλάσσιο Περιβάλλον, εκδ. ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, Β' ΕΚΔΟΣΗ, σελ.362-381, Αθήνα, 2007
46. Γουργουρίνης Α., Δαγούμης Α., Ζαφαγωνίτης Γ., Καρακίτσου Κ., Κοσμίδης Τ., Κρητικός Μ., Μπατσαρά Ε., Μπίκος Σ., Νικητάκος Ν., Νικολόπουλος Λ., Παπανικολάου Α., Παυλίδης Γ., Τζαννάτος Ε., Τζουγανάτος Ν., Φαραντούρης Ε. Νικόλαος, Χαροκόπος Μ., Χασάπης Χ., Ψαρούτης Χ., ΕΝΕΡΓΕΙΑ (Ναυτιλία & Θαλάσσιες Μεταφορές), εκδ. ΝΟΜΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ, Αθήνα, 2013
47. Δαγκίνης Κ. Ιωάννης, Γλύκας Ι. Αλέξανδρος, Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού, Βοηθητικά μηχανήματα πλοίων, Β' έκδοση, εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου-ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ, Αθήνα, 2017
48. Δαφέρμος Β., Κοινωνική στατιστική & Μεθοδολογία έρευνας με το SPSS, εκδ. ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 2011
49. Δημήτρης Σ. Σταματόπουλος, Εγχειρίδιο Καυσίμων & Λιπαντικών για τη Ναυτιλία, Αθήνα, 1993
50. Δημητριάδης Ε, Στατιστική επιχειρήσεων με εφαρμογές σε SPSS και LISREL, εκδ. ΚΡΙΤΙΚΗ, Αθήνα, 2012, σελ.483
51. Ζαΐρης Εμμ. Ποσειδώνας, Στατιστική Μεθοδολογία, εκδ. ΚΡΙΤΙΚΗ, Αθήνα, 2010
52. Ζαφειρόπουλος Κ., Μυλωνάς Ν., Στατιστική με SPSS (Περιέχει Θεωρία Πιθανοτήτων), εκδ. ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 2017
53. Ιωαννίδης Π. Ιωάννης, Ναυτικές μηχανές: Γενικά Κινητήρες DIESEL, 4<sup>η</sup> Έκδοση, εκδ. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα, 2009
54. Καρανδεινός Μ.Γ. και συνεργάτες, Εργαστηριακές σημειώσεις οικολογίας και περιβάλλοντος, εκδ. Γεωπονικών Πανεπιστήμιο Αθηνών, 1996

55. Κλιάνης Χ. Λάζαρος, Νικολός Κ. Ιωάννης, Σιδέρης Α. Ιωάννης, Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού, Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως, Ά τόμος, Β΄ έκδοση, εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου-ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ, Αθήνα, 2017
56. Λαζαρίδης Μιχάλης, Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας, 2<sup>η</sup> Έκδοση, εκδ. ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 2010
57. Λαζάρου Χ. Κλιάνη, Ιωάννη Κ. Νικολού, Ιωάννη Α. Σιδέρη, Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως, Β΄ Έκδοση, εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου(ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ), Αθήνα, 2017, σελ.44
58. Νόμος 3983/11 “Εθνική Στρατηγική για την προστασία και διαχείριση του θαλάσσιου περιβάλλοντος”.
59. Οδηγία 2008/56/ΕΚ περί πλαισίου κοινοτικής δράσης στο πεδίο της πολιτικής για το θαλάσσιο περιβάλλον.
60. Πράσινη Βίβλος της Επιτροπής: Προς μια μελλοντική Θαλάσσια Πολιτική για την Ένωση: Ένα ευρωπαϊκό όραμα για τους ωκεανούς και τις θάλασσες, 2006.
61. Πως λειτουργούν τα scrubbers των πλοίων;(βίντεο), Isalos.net, 6 Oct. 2018, <https://www.isalos.net/2018/10/pos-leitourgoun-ta-scrubbers-sta-ploia-yinteo/>
62. Σαββάκης Νικόλας, Σημειώσεις Διαχείριση Αέριων Εκπομπών (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις), Περιβαλλοντική Διαχείριση, ΤΕΙ Κρήτης, 2016
63. Σταματόπουλος Δ. Βασίλης, Σταματόπουλος Σ. Δημήτρη, Καύσιμα Ναυτιλίας, εκδ. ELSII DRUG TESTING LTD, Αθήνα, 2018
64. Τσαλιγκιρίδης Γιώργος, Εργαστηριακές σημειώσεις Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015