



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Ανάλυση Εκπομπών Πλοίων με χρήση του στατιστικού
προγράμματος SPSS**

Statistical Analysis of Ship's Emissions with SPSS

Δημήτριος Βαρίτης

A.M.: 19393011

Επιβλέπουσα: Μαρία - Ελένη Πούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τίτλος

Ανάλυση Εκπομπών Πλοίων με χρήση του στατιστικού προγράμματος SPSS

Συγγραφέας

Δημήτριος Βαρίτης (Α.Μ. : 19393011)

Επιβλέπουσα

Μαρία – Ελένη Πούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α

Ημερομηνία εξέτασης

17/07/2024

Εξεταστική Επιτροπή

Όνοματεπώνυμο,
Μαρία – Ελένη Πούλου
Επ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Όνοματεπώνυμο,
Δημήτριος Μητσούδης
Αν. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Όνοματεπώνυμο,
Ιωάννης Τίγκας
Αν. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αφιερωμένη στον πατέρα μου Γιώργο Βαρίτη... για την
ουσιαστική στήριξη του σε όλα μου τα χρόνια....

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

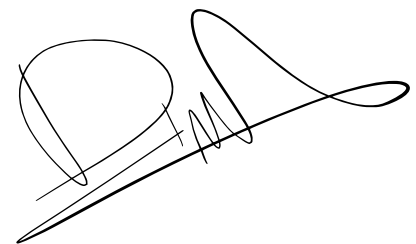
Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος Δημήτριος Βαρίτης του Γεωργίου με αριθμό μητρώου 19393011 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής 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».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Βαρίτης Δημήτριος



Ευχαριστίες:

Θα ήτανε λάθος αν η παράγραφος των ευχαριστιών ξεκινούσε με οποιοδήποτε άλλο άτομο πέρα από την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Μαρία – Ελένη Πούλου. Η κα. Πούλου, μου έδωσε την δυνατότητα να ξεφύγω από το στενό πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και να συνειδητοποιήσω πόσο δημιουργική μπορεί να γίνει, αλλά και πόσα πράγματα μπορεί να προσφέρει στον φοιτητή. Η συνεργασία μας καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας, από την ημερομηνία της ανάληψης μέχρι αυτή της εξέτασης ήταν άψογη, με την ίδια να είναι πάντα διαθέσιμη για την επίλυση οποιασδήποτε απορίας μου. Την ευχαριστώ για όλη την καθοδήγηση που μου παρείχε σε αυτό το «δύσβατο μονοπάτι» της διπλωματικής εργασίας και θα ήταν πραγματικά χαρά μου να ξανασυνεργαστώ μαζί της στο μέλλον.

Στη συνέχεια οφείλω ευχαριστίες στον κ. Μητσούδη και στον κ. Τίγκα, καθηγητές στο ΠΑ.Δ.Α και μέλη της τριμελούς επιτροπής εξέτασης της εργασίας. Τους ευχαριστώ για τις συμβουλές και τα σχόλια που μου διατύπωσαν κατά τη διάρκεια του εξαμήνου.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία «Minerva Marine» και συγκεκριμένα τον Junior Superintendent Engineer κ. Πέτρο Δημητρόπουλο, χάρη στον οποίο λήφθηκαν τα απαιτούμενα δεδομένα για τις εκπομπές σε αέριους ρύπους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Πάνο, αλλά και τον επιστήθιο φίλο μου Αλέξανδρο, οι οποίοι είναι πάντα δίπλα μου, και με στηρίζουν σε ότι απόφαση και αν πάρω.

Περίληψη

Οι εκπομπές αέριων ρύπων στη ναυτιλία είναι ένα πρόβλημα το οποίο εύλογα απασχολεί την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Πρόσφατες στατιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι η ναυτιλία είναι υπεύθυνη για πάνω από το 85% του παγκοσμίου εμπορίου καυσίμων, ενώ ταυτόχρονα καταναλώνει το 2% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, συνεισφέροντας περίπου στο 3% των παγκοσμίων εκπομπών ρύπων.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ενδελεχής περιγραφή των εκλυόμενων από τα πλοία ρύπων, χαρακτηριστικά παραδείγματα των οποίων είναι οι εκπομπές σε οξειδία του αζώτου – θείου, η περιγραφή χρήσης νέων τεχνολογιών όπως τα Scrubber για την προσπάθεια μείωσης των ρύπων, αλλά και η παρουσίαση μίας πλήρους στατιστικής ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων για τις εκπομπές σε διοξείδιο του άνθρακα, με χρήση του στατιστικού προγράμματος SPSS της IBM.

Λέξεις κλειδιά: Εκπομπές Πλοίων, Αέριοι Ρύποι, Ναυτιλία, Στατιστική Ανάλυση, SPSS, Scrubber, NO_x, SO_x, t test.

Abstract

As the effects of climate change become more evident, ship emissions are increasingly concern the global scientific community. Recent statistical studies have shown that shipping is responsible for over 85% of global fuel trade, consumes 2% of global energy demand, and contributes approximately 3% to global emissions. The subject of the thesis is the analysis of ship emissions such as CO₂ using data reported to the EU-MRV system and data from a Greek Naval Company for the years 2018-2022. The use of new technologies such as scrubbers to reduce emissions and comply with new regulations is discussed. Using descriptive statistical tools, numerical results are presented that indicate a reduction in emissions. However, the complexity of the multivariable relationship between ship's deadweight, distance traveled, and emission intensity across different types is also noted.

Key words: Ships Emissions, Air Pollution, Maritime, Statistical Analysis, SPSS, Scrubber, NO_x, SO_x, t – test.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ	1
1.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	3
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΛΟΙΩΝ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ – ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	9
3.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	10
3.2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ MRV	13
3.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΙΥ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΠΛΟΙΩΝ ΣΕ NO_x	17
4.1 ΠΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΤΑ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	17
4.2 ΑΡΝΗΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΩΝ ΑΛΛΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	20
4.3 ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΙΜΟ	21
4.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	24
4.5 ΤΡΟΠΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ NO _x	25
4.6 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ NO _x EMISSIONS.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: SCRUBBER – ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΕ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ SO_x	31
5.1 ΠΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΤΑ SO _x	31
5.2 ΑΡΝΗΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ – ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	31
5.3 ΙΜΟ SULPHUR CAP 2020.....	33
5.4 ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΛΟΓΩ SULPHUR CAP.....	36
5.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ SCRUBBER	37
5.5.1 <i>Dry Scrubbers</i>	40
5.5.2 <i>Wet Scrubbers</i>	41
5.6 ΛΟΓΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ SCRUBBER.....	46
5.7 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ SCRUBBER.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: SPSS	50
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	50
6.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ	54
6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SPSS – SO _x EMISSIONS.....	56
6.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑΣ SO _x	58
6.5 SPSS CO ₂ EMISSIONS 1 ST PART.....	61
6.6 ΚΟΛΜΟΓΟΡΟΝ – SHAPIRO NORMALITY TEST.....	68

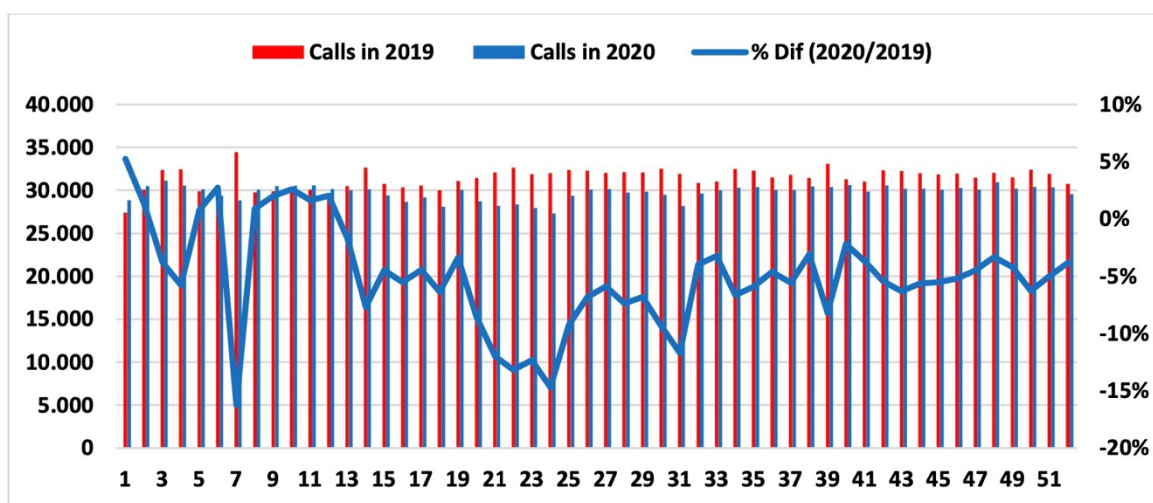
6.7	CO ₂ EMISSIONS 2 ND PART	71
6.8	ΚΟΛΜΟΓΟΡΟΒ – ΣΗΑΡΠΙΟ ΝΟΡΜΑΛΙΤΥ ΤΕΣΤ	72
6.9	T TEST	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		83
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
7.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		84
8.1	ΛΙΣΤΑ ΡΑΡΕΡ.....	84
8.2	ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ:	86

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ο ρόλος της ναυτιλίας

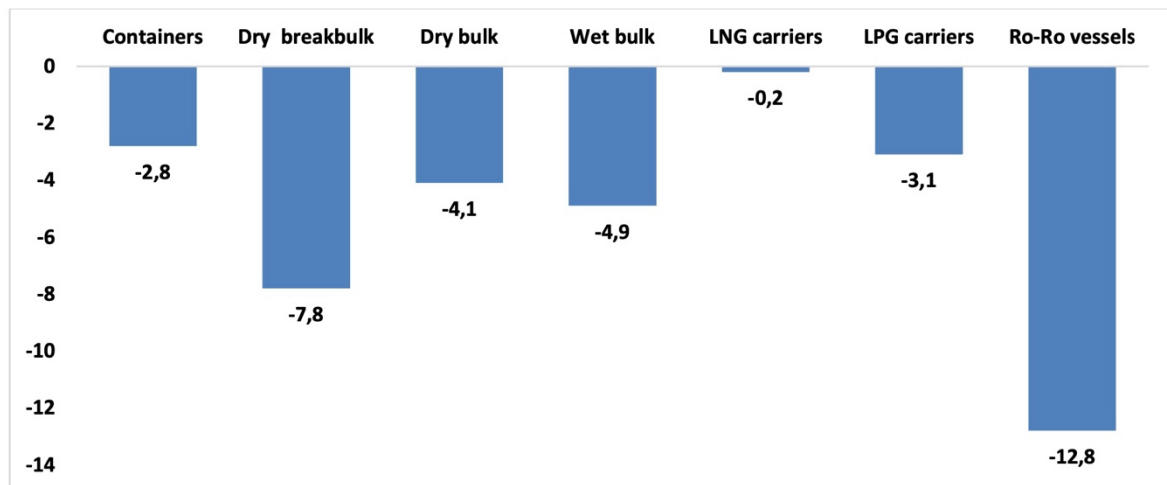
Οι θαλάσσιες μεταφορές έχουν κομβικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία, καθορίζουν την παγκόσμια μεταφορική αλυσίδα και συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στο διεθνές εμπόριο. Ενδεικτικό είναι ότι το 90% όλων των εμπορευμάτων μεταφέρονται δια θαλάσσης και αυτό το ποσοστό με την πάροδο των ετών όλο και αυξάνεται. Το γεγονός αυτό, μπορούμε να το ερμηνεύσουμε με το ότι η μεταφορά με πλοίο είναι σχεδόν πάντα ο οικονομικότερος και αποδοτικότερος τρόπος για τη μεταφορά των αγαθών και των προϊόντων, αλλά και λόγω της ασφάλειας που παρέχει στον έμπορο.

Πέρα όλων αυτών των θεωρητικών προσεγγίσεων, υπάρχουν μελέτες οι οποίες επιβεβαιώνουν όλους τους παραπάνω ισχυρισμούς. Θα αναφερθούμε στο έτος 2020, χρονιά ορόσημο για όλους τους ανθρώπους καθώς τότε ξέσπασε η πανδημία του COVID και έτσι υποχρεώθηκαν να παύσουν όλες τις διαδικασίες, ξεκινώντας από απλά μέτρα περιορισμού της κυκλοφορίας των πολιτών και φτάνοντας μέχρι την καθολική απαγόρευση κυκλοφορίας και την πλήρη παύση όλων των εμπορικών συναλλαγών. Ο μοναδικός τομέας στον οποίο η πανδημία είχε την μικρότερη επίπτωση δεν ήταν άλλος από τη ναυτιλία, η οποία σημείωσε μία μείωση της δραστηριότητας της σε σχέση με το έτος 2019 της τάξεως του 5%. Στα γραφήματα που ακολουθούν, βλέπουμε 2 γραφικές παραστάσεις οι οποίες προέρχονται από την μελέτη που πραγματοποίησε ο οργανισμός Ηνωμένων Εθνών και το τμήμα εμπορίου και ανάπτυξης (UNCTAD), οι οποίες απεικονίζουν διαγραμματικά όλα τα παραπάνω. (Paper List: 1)



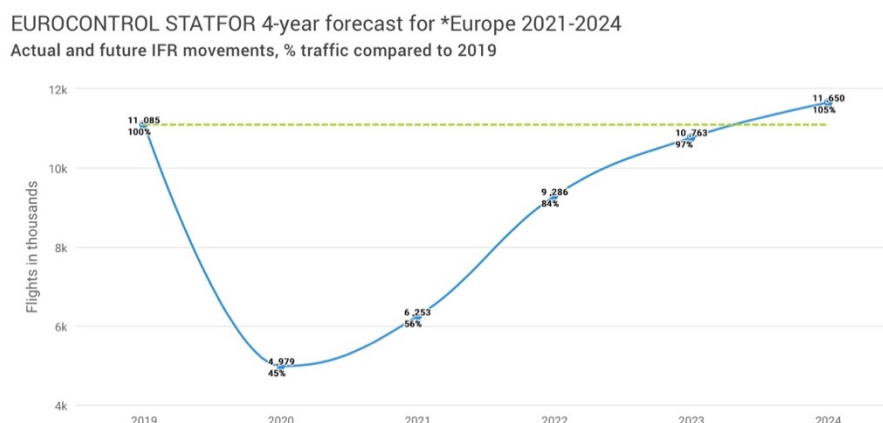
Εικόνα 1.1: Εβδομαδιαίες Κλήσεις Πλοίων, Πηγή: https://unctad.org/system/files/official-document/tcsdtlinf2022d1_en.pdf

Στην παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε τις εβδομαδιαίες «κλήσεις» πλοίων συγκριτικά το 2019 και το 2020 όπου και ξέσπασε η πανδημία. Στον οριζόντιο άξονα βλέπουμε τις εβδομάδες του χρόνου και στον κατακόρυφο τις κλήσεις πλοίων σε χιλιάδες. Βλέπουμε ότι την 7^η εβδομάδα του έτους όπου ξεκίνησε ο περιορισμός της κυκλοφορίας – η καραντίνα για την πλειονότητα των χωρών, υπάρχει μία αισθητή μείωση για ζήτηση σε ναύλους πλοίων, η οποία όμως μόλις την 9^η εβδομάδα έχει επανέλθει. Τέλος μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο τέλος του έτους, η μείωση στις συνολικές κλήσεις των πλοίων είναι περίπου 5%, αριθμός ο οποίος επιβεβαιώνει τους προηγούμενους ισχυρισμούς μας αναφορικά με τη δυναμική της ναυτιλίας. (Link List: 7)



Εικόνα 1.2: Μείωση κίνησης πλοίων συγκριτικά το 2019 με το 2020, Πηγή: https://unctad.org/system/files/official-document/tcsdtlinf2022d1_en.pdf

Στην 2^η γραφική παράσταση, βλέπουμε τη μείωση της κίνησης των πλοίων, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο έτος υπάρχει στα πλοία τύπου Ro – Ro (πλοία που επιτρέπουν φόρτωση οχημάτων), κάτι το οποίο είναι λογικό, καθώς είναι και τα μοναδικά από τα παραπάνω τα οποία μεταφέρουν επιβάτες. Ωστόσο και πάλι, με μία απλή άθροιση των ποσοστών και στην συνέχεια με μία διαίρεση δια του συνολικού αριθμού τύπων πλοίου, θα δούμε ότι η μείωση της κυκλοφορίας των πλοίων δεν ξεπερνά το 5.1%. (Link List: 8)



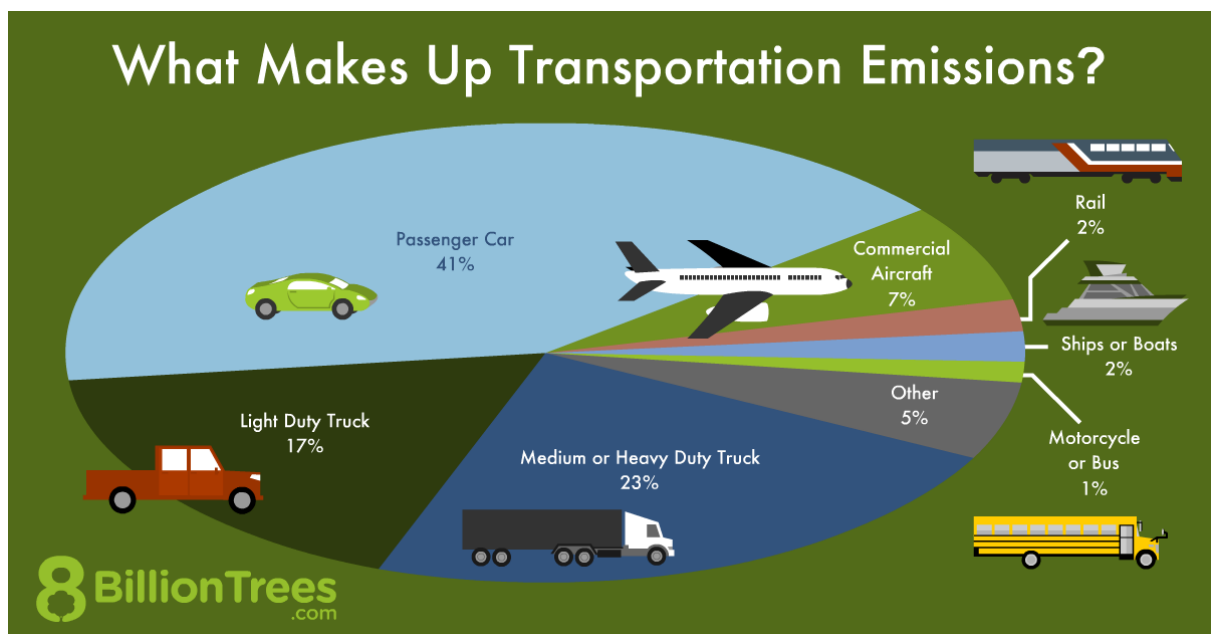
Εικόνα 1.3: Μείωση εναέριας κυκλοφορίας το 2020 και σταδιακή άνοδος της, Πηγή: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2024>

Για να δώσουμε ακόμα μεγαλύτερη έμφαση στον ρόλο της ναυτιλίας και να γίνει αντιληπτό από τον αναγνώστη πως αυτή συνεισφέρει στην παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα, παρατίθεται η 3^η γραφική παράσταση, στην οποία φαίνεται η μείωση της εναέριας κυκλοφορίας κατά το έτος 2019 και η σταδιακή της ανάκαμψη μέχρι και το έτος 2024. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται τα έτη 2019 – 2024 και στον κατακόρυφο οι πτήσεις σε χιλιάδες. Βλέπουμε ότι αμέσως μόλις ξέσπασε η πανδημία, η εναέρια κυκλοφορία σημειώνει ραγδαία πτώση της τάξεως του 55%, και επανέρχεται στα προ πανδημίας επίπεδα 3 χρόνια αργότερα, την ίδια στιγμή που η ναυτιλία ανέκαμψε σε μόλις λίγες βδομάδες (δεδομένα από 1^η γραφική παράσταση).

Από την παραπάνω ανάλυση, είναι ολοφάνερο πόσο μεγάλη βαρύτητα έχει η ναυτιλία στην παγκόσμια διακίνηση αγαθών και ότι ακόμα και όταν όλος ο πλανήτης «παρέλυσε», η ναυτιλία κατάφερε να διατηρηθεί απόρθητη. (Link List: 9)

1.2 Συμβολή στην ατμοσφαιρική ρύπανση

Όπως ήδη εξηγήσαμε στην προηγούμενη ενότητα, η ναυτιλία αποτελεί τον κύριο και τον βασικότερο τρόπο με τον οποίο διακινούνται τα προϊόντα στο παγκόσμιο εμπόριο. Παρόλα αυτά, δεν παύει να είναι υπεύθυνη για ένα «σημαντικό» ποσοστό των παγκοσμίων ρύπων στην ατμόσφαιρα το οποίο αγγίζει περίπου το 3%. Στο σημείο αυτό, πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι το ποσοστό αυτό είναι το ίδιο με εκείνο των αεροπλάνων τα οποία κατά πολλούς ανθρώπους θεωρούνται πιο φιλικά ως προς την εκπομπή αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα από τα πλοία...Ενδεικτικά παρατίθεται ένα διάγραμμα, το οποίο κάνει μία σύγκριση ανάμεσα στους ρύπους που εκπέμπονται από τα διάφορα μέσα μετακίνησης. (Paper List: 2)



Εικόνα 1.4: Εκλύόμενοι ρύποι από διάφορους τομείς, Πηγή: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-calculator/>

Οι περισσότεροι από τους ρύπους εκπέμπονται στην ανοιχτή θάλασσα, μακριά δηλαδή από τα εθνικά σύνορα, καθώς όσο περνάνε τα χρόνια, η κάθε χώρα αυστηροποιεί όλο και περισσότερο τους εθνικούς κανονισμούς. Εν τούτοις οι διεθνείς κανονισμοί, έχουν μεν δώσει βάρος στον περιορισμό των εκπομπών ρύπων ωστόσο χρειάζεται καλύτερος έλεγχος για τον άμεσο και αποτελεσματικό περιορισμό τους. (Link List: 10)

Όπως είναι γνωστό τα πλοία χρειάζονται ενέργεια για να λειτουργήσουν. Η πλειονότητα των πλοίων καταναλώνει μαζούτ (Heavy Fuel Oil) και αυτό έχει σαν συνέπεια την απελευθέρωση επιβλαβών αερίων συμπεριλαμβανομένου του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και του υποξειδίου του αζώτου (N₂O), αέρια τα οποία συμβάλλουν στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, τα πλοία, εκτός από τα προαναφερθέντα αέρια, παράγουν και οξείδια του θείου – ευρέως γνωστά ως SO_x – τα οποία μπορεί να μην έχουν άμεση επίδραση στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, μπορούν όμως να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου, αλλά και να προκαλέσουν μόλυνση στο περιβάλλον.

Τέλος, ένα άλλο πρόβλημα το οποίο προκαλούν τα πλοία είναι αυτό της ρύπανσης των θαλασσών κυρίως λόγω των λυμάτων τα οποία πιθανόν να εισάγουν στα λιμάνια που φτάνουν, αλλά και λόγω του ότι η ρύπανση που τυχόν μπορεί να προκληθεί σε ένα σημείο από διαρροή πετρελαίου, μπορεί να επηρεάσει ολόκληρο το οικοσύστημα της περιοχής που προκλήθηκε η ζημιά. (Link List: 4)

Είναι πρόδηλο λοιπόν, ότι επειδή η ναυτιλία και οι θαλάσσιες μεταφορές γενικότερα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας και ,επιπλέον, μας προμηθεύουν με ποικιλία προϊόντων από όλο τον κόσμο πρέπει να παρθούν επιπλέον μέτρα, για να καταστεί η ναυτιλία πιο βιώσιμη και για να διαφυλάξουμε το οικοσύστημά μας.

1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός λοιπόν της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, είναι να γίνει μια εκτενής ανάλυση των ρύπων που εκλύουν τα πλοία στην ατμόσφαιρα ανεξάρτητα από το είδος του πλοίου και πώς αυτοί μπορούν να περιοριστούν. Θα δοθεί μεγάλο βάρος, και θα πραγματοποιηθεί μία ενδελεχής ανάλυση για το κατά πόσο τα Scrubber και/ή το αποθειωμένο καύσιμο βοηθάνε στον περιορισμό των σωματιδίων του οξειδίου του θείου και αν τελικά η εγκατάσταση Scrubber αποτελεί μία πιο συμφέρουσα λύση από την αγορά καυσίμου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Τέλος, στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, με τη χρήση του προγράμματος SPSS, θα μελετήσουμε το κατά πόσο έχουν μειωθεί οι εκπομπές σε

CO₂ τα τελευταία 5 χρόνια σε ορισμένους τύπους πλοίων, και θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μία πρόβλεψη (βασισόμενη πάντα σε επιστημονικά δεδομένα) για το αν είναι εφικτό έως το 2050 να έχουμε μηδενική εκπομπή CO₂, στόχο τον οποίο έχει θέσει ο International Maritime Organization (IMO).

Κεφάλαιο 2: Κατηγορίες Πλοίων

Στο παρελθόν δεν υπήρχε καμία επίσημη κατηγοριοποίηση των πλοίων και όταν οι άνθρωποι αναφέρονταν στην λέξη «πλοίο» εννοούσαν κάθε σκάφος – πλεούμενο, το οποίο έχει την δυνατότητα να μεταφέρει φορτίο και είναι προορισμένο για να μετακινείται στο νερό. Καθώς όμως τα χρόνια πέρασαν και ο κόσμος εξελίχθηκε, δημιουργήθηκε η ανάγκη του διαχωρισμού τους και της ταξινόμησής τους, ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους. Φτάνοντας στον 21^ο αιώνα, δεν υπάρχει κάποια ευρέως αποδεκτή ταξινόμηση των πλοίων από τον IMO, ωστόσο μπορούμε να τα κατατάξουμε στις παρακάτω κατηγορίες:

- Πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου – Bulk Carrier
- Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων – Container Ships
- Πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου – General Cargo Ships
- Πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου – Tanker and LNG Carriers
- Επιβατηγά Πλοία – Passenger Ships
- Πλοία Ro – Ro
- Πλοία ειδικού σκοπού – Special Purpose Ships

Καθώς στο 2^ο μέρος της παρούσας εργασίας θα αναφερθούμε σε ορισμένους από τους παραπάνω τύπους πλοίων και στους εκλυόμενους από αυτά ρύπους σε CO₂, ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή του κάθε τύπου πλοίου και της χρησιμότητάς του. (Link List: 1)

1) Bulk Carrier Ships

Τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου – ευρέως γνωστά ως Bulk Carriers - είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά χύδην εμπορευμάτων, όπως για παράδειγμα ο άνθρακας, τα σιτηρά, η ζάχαρη κτλ. Τα εν λόγω πλοία κατέχουν ένα πολύ σημαντικό μέρος των παγκοσμίων θαλάσσιων μεταφορών καθώς αντιπροσωπεύουν περίπου το 1/3 αυτών. Το πρώτο Bulk Carrier κατασκευάστηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα και έκτοτε διαρκώς εκσυγχρονίζονται έχοντας ως κύριο γνώμονα την ασφάλεια και την καλύτερη δυνατή οικονομική εκμετάλλευση. Διακρίνονται σε κάποιες κατηγορίες ανάλογα με το μέγιστο φορτίο που μπορούν να μεταφέρουν αλλά και τους περιορισμούς που μπορεί να ζητήσει ο πλοιοκτήτης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι εκείνα που ονομάζονται Panamax, τα οποία έχουν μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις για να μπορούν να διασχίζουν την διώρυγα του Παναμά. (Link List: 12)

2) Tanker

Το δεξαμενόπλοιο είναι ένα πλοίο που έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει υγρά φορτία. Τα κυριότερα αγαθά τα οποία καλείται να μεταφέρει είναι το αργό πετρέλαιο, το λάδι ως τελικό προϊόν, τα καύσιμα και το υγροποιημένο φυσικό αέριο – ευρέως γνωστό ως LNG. Είναι εύκολο να το διακρίνουμε και να το ξεχωρίσουμε από τα άλλα πλοία κυρίως λόγω της σιλουέτας του, αφού τα περισσότερα Tanker έχουν ένα επίπεδο κατάστρωμα στο οποίο είναι εγκατεστημένο ένα δίκτυο σωληνώσεων. Επιπλέον, η μοναδική υπερκατασκευή που υπάρχει είναι αυτή της γέφυρας. Τα δεξαμενόπλοια κατέχουν το 35% της χωρητικότητας σε νεκρό βάρος του παγκοσμίου στόλου, κάτι το οποίο τα κάνει ιδιαίτερα σημαντικά για την παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα στον τομέα των υγρών καυσίμων. Ένας άλλος τρόπος μέσω του οποίου μπορούμε να καταλάβουμε την συνεισφορά των εν λόγω πλοίων, είναι από το γεγονός ότι με την εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία το 2022, και την άμεση παύση της παροχής φυσικού αερίου από την πλευρά της Ρωσίας στην Ευρώπη, αυτόματα η ευρωπαϊκή ένωση στράφηκε στη λύση της μεταφοράς του φυσικού αερίου με πλοία από την Αμερική και από άλλες χώρες οι οποίες εξάγουν φυσικό αέριο. Μέσα από αυτό το παράδειγμα καταδεικνύεται ακόμα περισσότερο η σημασία αυτού του είδους των πλοίων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στα “Oil tankers”. (Link List: 13)

3) Passenger Ships

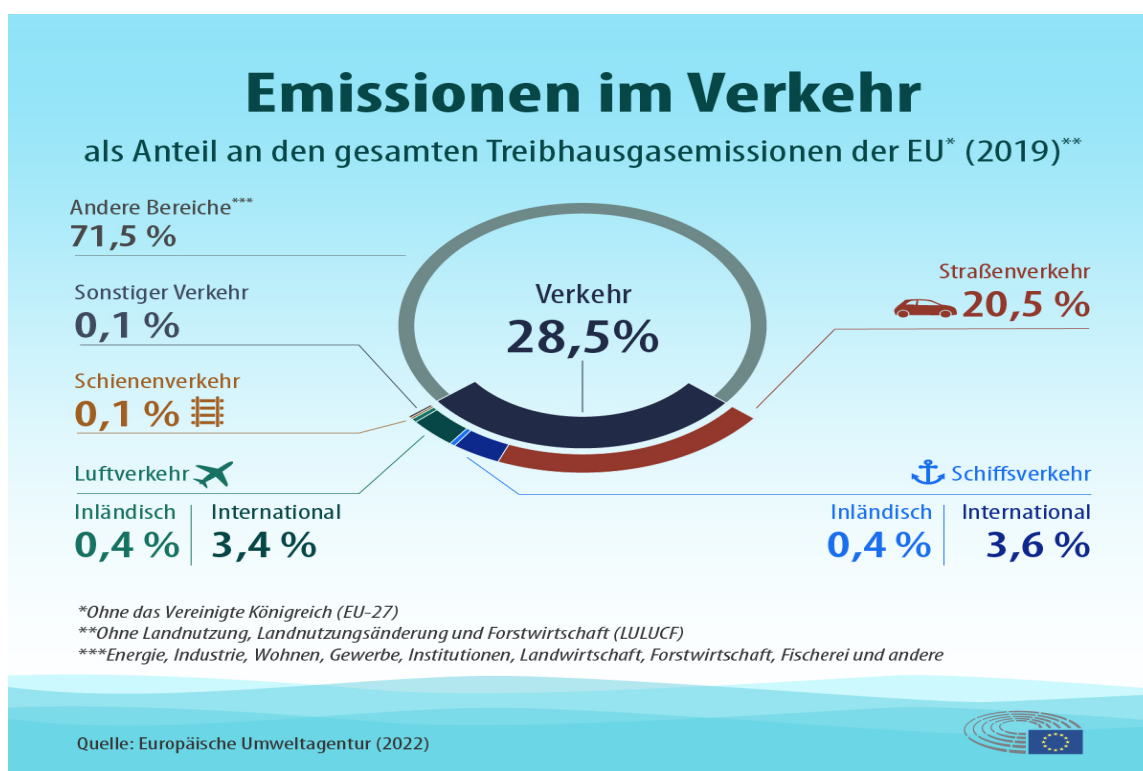
Σύμφωνα με τον αυστηρό ορισμό των κανονισμών, ως επιβατηγό ορίζεται το πλοίο το οποίο μεταφέρει περισσότερους από 12 επιβάτες εκτός των μελών του πληρώματος. Πρωταρχικό μέλημά του είναι να μεταφέρει τους επιβάτες με ασφάλεια στην θάλασσα. Αυτό το είδους πλοίου χωρίζεται σε κάποιες υποκατηγορίες. Για αρχή συναντάμε τα *κρουαζιερόπλοια*, τα οποία είναι πολύ μεγάλα επιβατηγά πλοία που χρησιμοποιούνται κυρίως για διακοπές. Σε αντίθεση με τα υπερωκεάνεια (Ocean Liners), σκοπός των κρουαζιερόπλοιων δεν είναι να μεταφέρουν τον επιβάτη από το ένα σημείο στο άλλο, αλλά συνήθως ξεκινούν ταξίδια μετ’ επιστροφής από ένα συγκεκριμένο λιμάνι, προσεγγίζοντας ενδιάμεσα διάφορα λιμάνια στα οποία οι επιβάτες μπορούν να ακολουθήσουν κάποιες περιηγήσεις και να γνωρίσουν το μέρος στο οποίο αποβιβάστηκαν. Μία άλλη υποκατηγορία πλοίου η οποία πλέον σπανίζει, είναι αυτή των *υπερωκεάνιων*. Τα εν λόγω πλοία εκτελούσαν προγραμματισμένα δρομολόγια σε όλα τα κατοικημένα μέρη του κόσμου και ειδικεύονταν στον διάπλου των ωκεανών. Καθώς όμως η τεχνολογία των αεροπλάνων εξελίχθηκε, τα συγκεκριμένα πλοία έχουν περιέλθει σε παρακμή και θα τα συναντήσει κάποιος σε ελάχιστες περιπτώσεις (μοναδική εξαίρεση το υπερωκεάνιο Queen Mary 2 της εταιρείας Cunard Lines –). Η τελευταία υποκατηγορία η οποία συναντάται και είναι κιόλας η πλέον γνωστή είναι τα λεγόμενα *ferries*. Πρόκειται για πλοία τα οποία

πραγματοποιούν ημερήσια ή ολονύχτια ταξίδια μικρών και μεσαίων αποστάσεων, και μεταφέρουν σε συνδυασμό τόσο επιβάτες όσο και οχήματα. Τα πλοία αυτά θα τα συναντήσει κανείς και με την ονομασία «Ro Pax». Η προηγούμενη συντομογραφία (Ro) σημαίνει Roll on – Roll Off και υποδηλώνει ότι τα οχήματα μπορούν να φορτώνονται αυτοδύναμα στο πλοίο και χωρίς την βοήθεια κάποιου γερανού. Το Pax αναφέρεται στο ότι υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς επιβατών. Έτσι προκύπτει η συντομογραφία Ro Pax. (Paper List: 3)

Για κάποιες από τις 3 κατηγορίες πλοίων που αναλύθηκαν παραπάνω θα γίνει και η μελέτη για τις εκπομπές σε CO₂ με το πρόγραμμα SPSS στο 2^ο μέρος της πτυχιακής.

Κεφάλαιο 3: Φαινόμενο – Αέρια Θερμοκηπίου

Στην εισαγωγή αναφέρθηκε ότι η ναυτιλία είναι υπεύθυνη για ένα ποσοστό περίπου 3% των παγκοσμίων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Παρόλο που η αεροπορία και η ναυτιλία αντιπροσωπεύουν μόνο το 4% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι μεταξύ των ταχύτερα αναπτυσσόμενων τομέων εκπομπών που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι η δυσανάλογη αύξηση του αριθμού των ναυλώσεων αλλά και των επιβατών. Επιπλέον, οι προσπάθειες για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ξεκίνησαν πολύ πρόσφατα τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο και το αντίκτυπο αυτής της καθυστερημένης ενεργοποίησής μας είναι πλέον φανερό. Ο IMO έχει θέσει τους εξής στόχους σχετικά με την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου: Μείωση κατά 55% έως το 2030 και επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας ως το 2050. Είναι επόμενο λοιπόν, ο IMO να έχει εντάξει και την ναυτιλία στο σύστημα εμπορίας καυσίμων ETS, το οποίο πρόκειται για μία έμμεση μορφή επιβράβευσης στις εταιρείες – βιομηχανίες, αφού όσο λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπουν – όσο λιγότερο ρυπαίνουν, τόσο λιγότερα χρήματα θα καλούνται να πληρώνουν στο τέλος κάθε χρόνου. Στο γράφημα που ακολουθεί βλέπουμε τις εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου για τον τομέα της ναυτιλίας, τον σιδηρόδρομο, τα αυτοκίνητα και για άλλους τομείς της βιομηχανίας. Δεν επιδέχεται καμία αμφιβολία το γεγονός, ότι το διοξείδιο του άνθρακα που προέρχεται από την ναυτιλία είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με τα άλλα μέσα μετακίνησης. (Link List: 2)



Εικόνα 3.1: Εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου, Πηγή: <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20191129STO67756/co2-emissionen-des-luft-und-schiffsverkehrs-zahlen-und-fakten-infografik>

Ενδεικτική μετάφραση:

Schiffsverkehr: Κυκλοφορία Πλοίων

Straßenverkehr: Κυκλοφορία Οχημάτων

Der Verkehr: η κυκλοφορία

Θερμοκηπίου

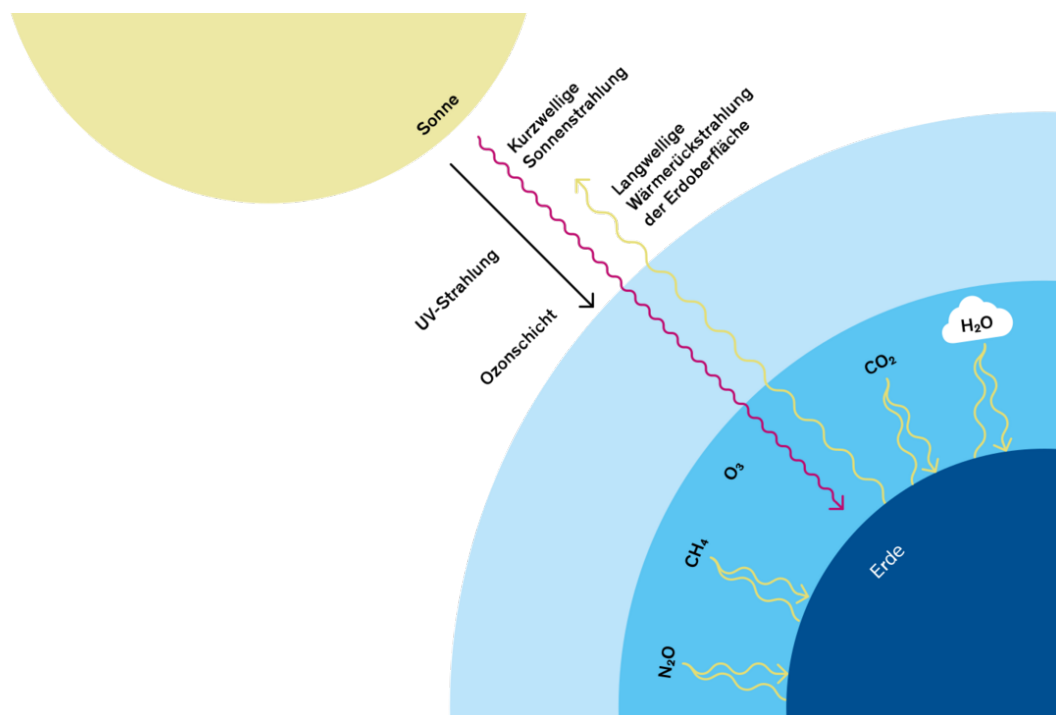
Luftverkehr: Εναέρια Κυκλοφορία

Andere Bereiche: Άλλοι τομείς

Treibhauseffekt: Φαινόμενο

3.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Πολλές φορές προκαλείται μία σύγχυση σχετικά με το ποια είναι τα αέρια του θερμοκηπίου και ποια από αυτά εκπέμπονται από τα πλοία. Για αρχή πρέπει να διασαφηνίσουμε «τι είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου» και γιατί αυτό έχει τόσο άμεση επίδραση στην ζωή μας. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου καθορίζει σημαντικά τη θερμοκρασία στην γη και από την αρχή της εκβιομηχάνισης, η εμφάνιση μακράς διάρκειας αερίων θερμοκηπίου έχει αυξηθεί δραματικά, γεγονός που αυξάνει το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το παραπάνω μπορούμε να το εξηγήσουμε με τον εξής απλό τρόπο. Η επιφάνεια της γης θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων με μία ροή που αντιστοιχεί σε περίπου 1.966 W/m^2 . Ένα μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας απορροφάται από τη Γη – από την ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει στο διάστημα. Για να είμαστε πιο συγκεκριμένοι, περίπου το 30% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται σε ποσοστό 20% από τα νέφη, 6% από την ατμόσφαιρα και 4% από την επιφάνεια της γης. Αντίστοιχα, το υπόλοιπο 70% της ηλιακής ακτινοβολίας κατανέμεται στην πλειοψηφία του στους ωκεανούς και την ατμόσφαιρα (51% και 16% αντίστοιχα). Τέλος, μόλις το 3% απορροφάται από τα νέφη



Εικόνα 3.2: Διαδικασία ανταλλαγής αερίων, Πηγή: <https://www.myclimate.org/de-ch/informieren/faq/faq-detail/was-ist-der-treibhauseffekt/>

Ταυτόχρονα με την παραπάνω διαδικασία που περιγράψαμε, η ίδια η γη εκπέμπει θερμική ακτινοβολία με τρόπο ανάλογο με αυτόν του ήλιου, με την μόνη διαφορά ότι εδώ έχουμε μεγάλα μήκη κύματος. Παράλληλα όμως η ατμόσφαιρα έχει την ικανότητα να μπορεί να απορροφά ένα μεγάλο μέρος (της τάξεως του 70%) της εκπεμπόμενης από την γη ακτινοβολία. Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα η ατμόσφαιρά της γης να συμπεριφέρεται ως μία δεύτερη πηγή θερμότητας – πάντα βέβαια μαζί με τον ήλιο και έτσι να μπορεί ο πλανήτης μας να είναι κατοικήσιμος. (Link List: 15)

Η ατμόσφαιρα και η σύνθεση της έχουν κομβικό ρόλο στην διαμόρφωση του κλίματος που επικρατεί. Αυτό το «κέλυφος» ανταλλαγής ακτινοβολιών που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο καθιστά δυνατή τη ζωή στην γη, αφενός επειδή μας προστατεύει από ορισμένες επιβλαβείς εξωτερικές επιδράσεις όπως αυτή της υπεριώδους ακτινοβολίας και αφετέρου επειδή αρκετά ακραία καιρικά φαινόμενα συμβαίνουν στο χαμηλότερο στρώμα που ονομάζεται τροπόσφαιρα. Οι άνεμοι επιπλέον εξασφαλίζουν την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών περιοχών. Εκτός από τα κύρια συστατικά που περιέχονται στην ατμόσφαιρα, τα οποία είναι το οξυγόνο και το άζωτο σε περιεκτικότητες ίσες με 21% και 78%, αντίστοιχα, υπάρχουν και τα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία έχουν κομβικό ρόλο στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και είναι τα εξής:

- Διοξείδιο του άνθρακα CO₂
- Μεθάνιο CH₄
- Οξείδιο του αζώτου N₂O
- Υδρατμοί

Το μεθάνιο ως αέριο του θερμοκηπίου είναι άχρωμο, άοσμο και δημιουργείται από τις βιολογικές διεργασίες κατά τη σήψη ή τη ζύμωση. Είναι το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Ως αέριο του θερμοκηπίου κατέχει τον δεύτερο πιο σημαντικό ρόλο μετά το διοξείδιο του άνθρακα δεδομένου ότι έχει περίπου 80 φορές μεγαλύτερη επίδραση από το CO₂. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή ένωση περίπου το ένα τρίτο της τρέχουσας υπερθέρμανσης του πλανήτη, οφείλεται στις εκπομπές μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο πρέπει να αναφέρουμε ότι τα μόρια του μεθανίου παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μόλις 10 – 12 χρόνια, την ίδια στιγμή που το διοξείδιο του άνθρακα παραμένει για αιώνες. (Link List: 17)

Το οξείδιο του αζώτου είναι ένα άχρωμο αέριο με γλυκιά οσμή. Η μέση διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα είναι περίπου 121 χρόνια και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα κυρίως μέσω λιπασμάτων που περιέχουν άζωτο. Στην βιομηχανία παράγεται κυρίως κατά τη διάρκεια χημικών διεργασιών. Αν και υπάρχουν μόνο ίχνη του στην ατμόσφαιρα, είναι 298 φορές πιο

επιβλαβές συγκριτικά πάντα με το διοξείδιο του άνθρακα και επομένως έχει σημαντικό μερίδιο στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Το διοξείδιο του άνθρακα, θα συμπεριληφθεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

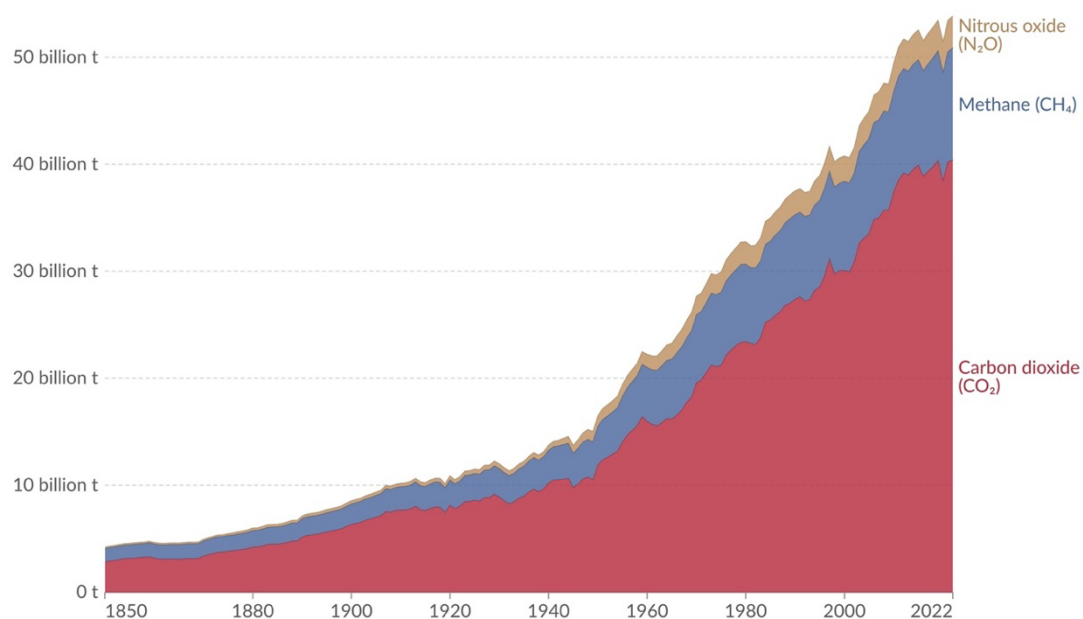
Τα παραπάνω αέρια έχουν την φυσική ιδιότητα να απορροφούν και να απελευθερώνουν τη θερμική ακτινοβολία κυμάτων μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από τη επιφάνεια της γης. Μέρος αυτής της ακτινοβολίας στέλνεται πίσω στην επιφάνεια της γης με τους τρόπους που αναλύσαμε παραπάνω, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας.

Το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου όπως αυτό αναλύθηκε, επιτρέπει τη ζωή στην γη όπως έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Σύμφωνα με την τρέχουσα έρευνα, η φυσική παρουσία των αερίων του θερμοκηπίου έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορά θερμοκρασίας 33 °C. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι χωρίς τα αέρια του θερμοκηπίου η μέση θερμοκρασία στη γη θα ήταν -18 °C, κάτι που θα καθιστούσε τη ζωή στην γη τελείως διαφορετική σε σχέση με το πως τη γνωρίζουμε σήμερα. Δυστυχώς όμως οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυξάνουν τραγικά με το πέρασμα των χρόνων το φυσικό αυτό αποτέλεσμα, και αυτό μπορεί να έχει μόνο αρνητικές συνέπειες για την ζωή μας. Ενδεικτικά στην παρακάτω γραφική παράσταση βλέπουμε πως τα αέρια του θερμοκηπίου αυξάνονται με το πέρασμα των ετών. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται οι χρονολογίες και στον κατακόρυφο το κάθε αέριο σε δισεκατομμύρια τόνους.

Greenhouse gas emissions by gas, World, 1850 to 2022

Our World
in Data

Greenhouse gas emissions¹ from all sources, including agriculture and land-use change. They are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.



Εικόνα 3.3: Αύξηση αερίων θερμοκηπίου με το πάροδο των ετών, Πηγή: <https://www.nature.com/articles/s43017-022-00285-w#Fig1>

Η ανάλυση που προηγήθηκε, είχε ως σκοπό, αφενός να δώσει στον αναγνώστη τη δυνατότητα να καταλάβει τη βαρύτητα του φαινομένου και των αερίων του θερμοκηπίου, και αφετέρου να κάνει σαφές ότι δεν προέρχονται όλα τα αέρια του θερμοκηπίου από τα πλοία και ότι όλο το πρόβλημα που υπάρχει σχετικά με τις εκπομπές των πλοίων, δεν περιορίζεται μόνο στα αέρια του θερμοκηπίου δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα αλλά και σε αρκετά παραπάνω στοιχεία τα οποία θα αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. (Link List: 16)

3.2 Κανονισμός MRV

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου το οποίο εκπέμπεται και από τα πλοία είναι αυτό του διοξειδίου του άνθρακα. Η ευρωπαϊκή ένωση, με στόχο να μπορέσει να ελέγξει τις εκπομπές CO₂ στον τομέα της ναυτιλίας, ψήφισε και στην συνέχεια εφάρμοσε τον κανονισμό 757/2015 ο οποίος είναι ευρέως γνωστός ως MRV. Το συγκεκριμένο ακρωνύμιο πρόκειται για τα αρχικά των λέξεων “monitoring”, “reporting” and “verification”. Ο εν λόγω κανονισμός αποτελεί ένα ενιαίο νομικό πλαίσιο για όλα τα κράτη της ευρωπαϊκής ένωσης και θεσπίζει κανόνες για την παρακολούθηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, την υποβολή εκθέσεων στην Ε.Ε. αλλά και την επαλήθευση των εκπομπών που παράγονται από πλοία κατά την διάρκεια των πλόων τους από τον τελευταίο λιμένα κατάπλου προς οποιοδήποτε λιμένα που υπάγεται στην δικαιοδοσία κράτους μέλους της Ε.Ε. Προφανώς ισχύει και το αντίστροφο, ότι δηλαδή έλεγχος εκπομπών υπάρχει κατά την αναχώρηση ενός πλοίου από οποιοδήποτε της ευρωπαϊκής ένωσης προς κάποιον άλλο προορισμό. Ο κανονισμός αφορά οποιοδήποτε πλοίο με ολική χωρητικότητα μεγαλύτερη από 5.000 Gross Tonnage, ανεξάρτητα από τη σημαία που φέρει, όσον αφορά στις εκπομπές σε CO₂ κατά την διάρκεια των πλόων. Τα μοναδικά πλοία που εξαιρούνται από τον κανονισμό είναι τα πολεμικά πλοία, τα αλιευτικά σκάφη, αλλά και τα ξύλινα πλοία παραδοσιακής κατασκευής.

Είναι πρόδηλο ότι με την εφαρμογή του παραπάνω κανονισμού, έχουν δημιουργηθεί κάποιες υποχρεώσεις στις ναυτιλιακές εταιρείες αναφορικά με τη σωστή εφαρμογή του. Για αρχή υποχρεούνται να υποβάλουν ένα αναλυτικό σχέδιο παρακολούθησης των εκπομπών των πλοίων τους σε συγκεκριμένους ελεγκτές. Επιπλέον, από την 1 Ιανουαρίου 2018, ήδη στον τομέα της παρακολούθησης των εκπομπών έχουν ενταχθεί και κάποιες πληροφορίες όπως, για παράδειγμα, η κατανάλωση του καυσίμου κατά την διάρκεια των πλόων – πάντοτε με βάση το σχέδιο που έχει κατατεθεί. Έως τις 30 Απριλίου του κάθε έτους, είναι υποχρεωμένες οι ναυτιλιακές εταιρείες να υποβάλουν μία έκθεση εκπομπών η οποία περιέχει όλες τις

πληροφορίες και τις καταγραφές αναφορικά με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για όλη την περίοδο αναφοράς.

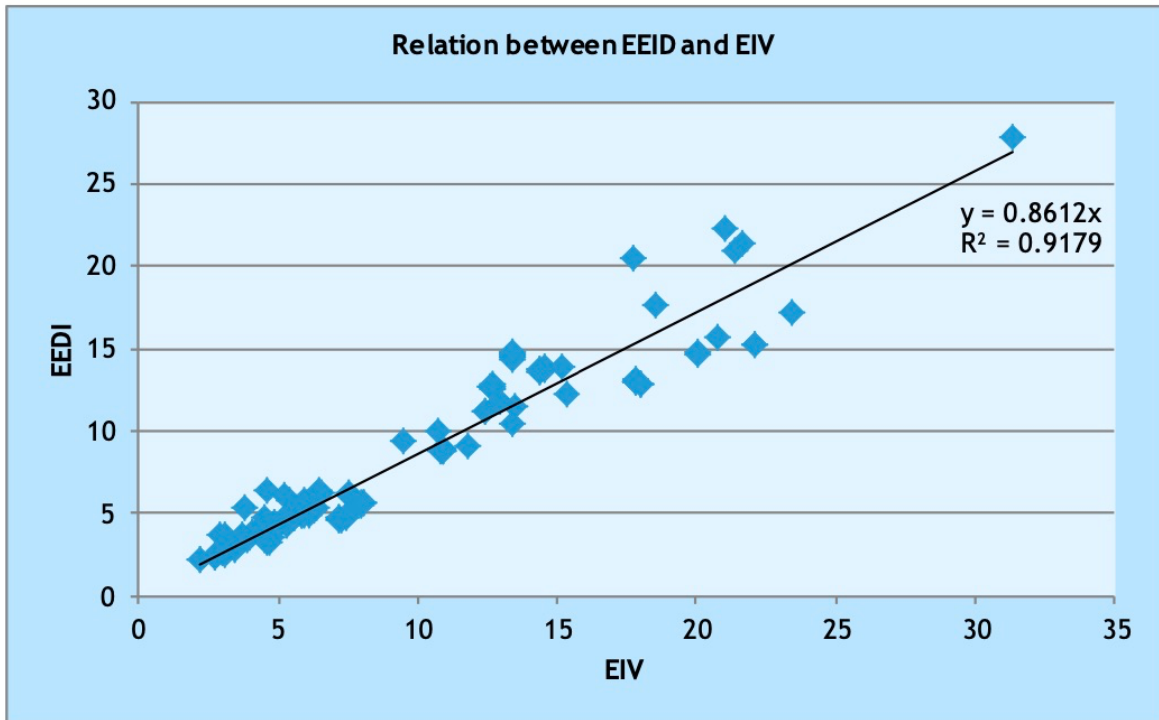
Από την πλευρά τους οι ελεγκτές οι οποίοι διαπιστεύονται από τον εθνικό οργανισμό διαπίστευσης, οφείλουν να ελέγχουν όλα τα παραπάνω δεδομένα που εισάγουν οι ναυτιλιακές εταιρείες και σε περίπτωση που διαπιστώσουν κάποια ανακρίβεια να προβαίνουν στις προβλεπόμενες κυρώσεις οι οποίες μπορεί να είναι από ένα πρόστιμο στην ναυτιλιακή εταιρεία αν δεν υπάρχει κάποια σοβαρή παράληψη, έως και εντολή εκδίωξης του πλοίου από τον λιμένα προσέγγισης, σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι δεν συμμορφώθηκε με τις απαιτήσεις για δύο ή περισσότερες διαδοχικές περιόδους αναφοράς. (Link List: 3)

3.3 Δείκτης EIV

Όλα τα πλοία που κατασκευάστηκαν μετά την 1^η Ιανουαρίου 2013 πρέπει να διαθέτουν τον λεγόμενο δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης (EEID). Αυτός ο δείκτης αντικατοπτρίζει τη μέση απόδοση καυσίμου κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις και εκφράζεται από την ποσότητα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε τόνους, ανάλογα με τα ναυτικά μίλια που διανύει το πλοίο. Ο απαιτούμενος δείκτης είναι μία συνάρτηση η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου αλλά και τον τύπο του πλοίου. Βασίζεται δε, σε μία εμπειρική ανάλυση δεδομένων που πραγματοποιήθηκε σε πλοία από τον IMO. Με την πάροδο των χρόνων ο απαιτούμενος δείκτης έχει αυστηροποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα από το 2015 και μετά τα πλοία πρέπει να είναι κατά 10% πιο αποτελεσματικά – αναφερόμαστε στο energy efficiency – και κάθε πέντε χρόνια η αυστηρότητα θα αυξάνεται κατά 10% μέχρι να φτάσουμε το 2025. Στο σημείο αυτό, πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι όσο χαμηλότερος είναι ο δείκτης EEID ενός πλοίου, τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το συγκεκριμένο πλοίο και τόσο χαμηλότερες αρνητικές επιπτώσεις έχει στο περιβάλλον. Προφανώς ο IMO έχει θεσπίσει κάποια όρια σχετικά με τον συγκεκριμένο δείκτη τα οποία δεν πρέπει να ξεπερνιούνται.

Ένα αρνητικό του συγκεκριμένου δείκτη είναι ότι μπορεί να προσδιοριστεί μόνο κατά τη διάρκεια θαλασσιών δοκιμών (sea trials). Για τον λόγο αυτό, αρκετές μελέτες χρησιμοποιούν μια απλοποιημένη μορφή του δείκτη η οποία ονομάζεται Estimated Index Value (EIV θα το συναντήσουμε στην βιβλιογραφία). Ο εν λόγω δείκτης ωστόσο λαμβάνει υψηλότερες τιμές κατά μέσο όρο σε σχέση με τον EEID και αυτό σημαίνει ότι τα πλοία μπορεί να φαίνονται περισσότερο ενεργειακά αποδοτικά από όσο δείχνει ο δείκτης. Για να το επιβεβαιώσουμε τον παραπάνω ισχυρισμό αρκεί να παρατηρήσουμε την παρακάτω γραφική παράσταση: (Link List: 18)

Relationship between EEDI and EIV for all types of ships



Εικόνα 3.4: Σχέση μεταξύ EEDI και EIV, Πηγή: https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2015%2005%20CE_Delft_7E50_Estimated_Index_Values_of_New_Ships_DEF.pdf

Βλέπουμε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 (coefficient of determination – η ελληνική μετάφραση ίσως να μην είναι η βέλτιστη) ισούται με περίπου 0,92. Όσο πιο κοντά στην μονάδα είναι αυτός ο συντελεστής τόσο καλύτερη είναι η γραφική παράσταση και τόσο πιο ανάλογα μεταβάλλονται τα μεγέθη μας. Επιπλέον επαληθεύεται ο παραπάνω ισχυρισμός μας, ότι δηλαδή για μία τιμή «x» του EEDI λαμβάνουμε τιμή EIV μεγαλύτερη του «x». (Paper List: 4)

Τρόπος προσδιορισμού δείκτη EIV

Ο δείκτης αυτός μπορεί να προσδιοριστεί με την βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$Estimated\ Index\ Value = 3.1144 \cdot \frac{190 \cdot \sum_{i=1}^{NME} P_{MEi} + 215 \cdot P_{AE}}{Capacity \cdot V_{ref}}$$

Οι όροι που περιλαμβάνει ο συγκεκριμένος τύπος μπορούν να αναλυθούν ως εξής:

- Συντελεστής εκπομπής άνθρακα: Σταθερός αριθμός για όλους τους κινητήρες και ισούται με 3.1144 g CO₂/ g fuel, δηλαδή 3.1144 γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα ανά γραμμάριο καυσίμου.

- Ειδική κατανάλωση καυσίμου την οποία θεωρούμε σταθερή για όλους τους κινητήρες και ισούται με $SFCME = 190 \text{ g/kWh}$
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου για βοηθητικούς κινητήρες πλοίων $SFCAE = 215 \text{ g/kWh}$.
- Το P_{ME} σημαίνει ισχύς κύριας μηχανής (Power of Main Engine) και ισούται με το 75% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς της προωστήριας εγκατάστασης.
- Το P_{AE} σημαίνει βοηθητική ισχύς και υπολογίζεται σύμφωνα με τις παραγράφους 2.5.6.1 και 2.5.6.2 του παραρτήματος MEPC. 212, δηλαδή των κανονισμών του IMO.
- Η χωρητικότητα (capacity τη βλέπουμε στον τύπο) ισούται με το 70% της χωρητικότητας του νεκρού βάρους για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και για το 100% του νεκρού βάρους για άλλους τύπους πλοίων.

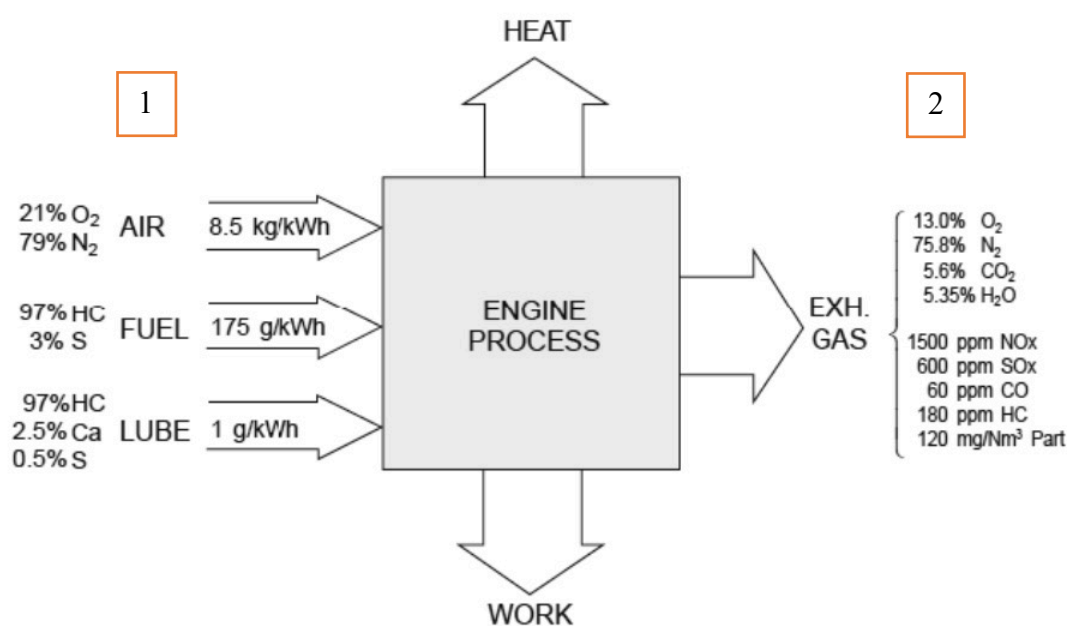
Η παραπάνω ανάλυση αποσκοπούσε στον να μπορέσει να κάνει «κτήμα» του ο αναγνώστης και να καταλάβει, τι είναι αυτοί οι δείκτες οι οποίοι αναφέρονται στην ενεργειακή αποδοτικότητα το πλοίου και πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Δόθηκε αρκετά μεγάλη έμφαση καθώς θα τους ξανασυναντήσουμε μπροστά μας στο 2^ο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που δεν είναι άλλο από αυτό της στατιστικής ανάλυσης. (Paper List: 4)

Κεφάλαιο 4: Εκπομπές Πλοίων σε NO_x

Η παρούσα ανάλυση αναφέρεται σε πλοία τα οποία χρησιμοποιούν παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα όπως για παράδειγμα το μαζούτ (Heavy Fuel Oil) ή το Diesel και όχι σε αυτά που κινούνται με υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquified Natural Gas). Με βάση τις πρόσφατες μελέτες της ευρωπαϊκής ένωσης τα πλοία αυτά αντικατοπτρίζουν το 83% του στόλου της και ευελπιστούν να έχουν μειωθεί στο 78% μέχρι το 2040 και στο 55% μέχρι το 2050. Γενικότερα υπάρχει μία τάση να αυξηθούν τα πλοία τα οποία χρησιμοποιούν εναλλακτικές μορφές πρόωσης όπως, για παράδειγμα, οι μπαταρίες και η ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο το κατά πόσο αυτό είναι εφικτό από τεχνικής άποψης και το κατά πόσο η ενέργεια η οποία παράγεται για την ηλεκτροπρόωση ή για τη φόρτιση των μπαταριών είναι πράσινη, δεν είναι αντικείμενο της συγκεκριμένης πτυχιακής. Εδώ θα επικεντρωθούμε στους ρύπους οι οποίοι παράγονται από παραδοσιακές εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες χρησιμοποιούν μαζούτ ή Diesel.

4.1 Πώς παράγονται τα Οξειδία του αζώτου στις μηχανές

Τα πλοία εκπέμπουν κατά κύριο λόγο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξειδία του αζώτου (NO_x), οξειδία του θείου (SO_x) αλλά και σωματίδια PM (Particular Matters). Τα οξειδία του αζώτου αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της αέριας ρύπανσης και σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε το πως εκλύονται από μία μηχανή εσωτερικής καύσης, MEK, αλλά και γιατί απασχολούν τόσο πολύ την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα.



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα Λειτουργίας MEK, Πηγή: <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/172/168>

Στο σημείο 1 της παραπάνω εικόνας βλέπουμε το μείγμα το οποίο εισάγεται στη μηχανή. Αυτό δεν είναι άλλο από τον αέρα, το εκάστοτε καύσιμο αλλά και το λιπαντικό. Στο σημείο 2 το οποίο είναι η εξαγωγή των καυσαερίων βλέπουμε τους εκλυόμενους από την μηχανή ρύπους.

Υπολογίζεται ότι σε παγκόσμια κλίμακα περίπου το 70% των εκπομπών επιβλαβών αερίων προέρχονται από τις θαλάσσιες μεταφορές, δηλαδή τη ναυτιλία, και απελευθερώνονται σε απόσταση μικρότερη των 400 χιλιομέτρων από την ξηρά, κάτι το οποίο μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του αέρα στις παράκτιες περιοχές. Η αυξανόμενη συνειδητοποίηση των επιπτώσεων που έχουν ρυπογόνες ουσίες που εκπέμπουν τα πλοία στην υγεία των ανθρώπων, είναι αυτή που ώθησε τις κυβερνήσεις αλλά και τον International Maritime Organization να θεσπίσουν κανονισμούς που ρυθμίζουν το επίπεδο των εκπομπών των τοξικών ουσιών. Ταυτόχρονα η θέσπιση των σχετικών κανονισμών δημιούργησε την ανάγκη, για ανάπτυξη μεθόδων μέτρησης των ρυπογόνων ουσιών των καυσαερίων αλλά για τρόπους πιθανής μείωσης τους. Επί του παρόντος η πιο βασική «πτυχή» της μείωσης της τοξικότητας των καυσαερίων είναι η μείωση των εκπομπών σε διοξείδια – οξειδία του αζώτου.

Στις μέρες μας οι κινητήρες Diesel τροφοδοτούν περισσότερο από το 90% των πλοίων στον πλανήτη μας, καθώς έχουν αντικαταστήσει τα περισσότερα από τα συστήματα των ατμοστροβίλων που ήταν το κυρίαρχο μέσο πρόωσης την δεκαετία του 1940. Τα περισσότερα ναυτιλιακά καύσιμα είναι υπολείμματα της απόσταξης – διύλισης του πετρελαίου, τα οποία είναι μεν οικονομικά και έτσι έχουν όφελος οι πλοιοκτήτες και οι ναυτιλιακές εταιρείες, περιέχουν ωστόσο σημαντική ποσότητα ρυπογόνων ουσιών. Επιπλέον έπειτα από την πετρελαϊκή κρίση το 1973 και στα πλαίσια της περαιτέρω αύξησης του κέρδους τους, οι πετρελαϊκές εταιρείες προχώρησαν σε δευτερογενή επεξεργασία του πετρελαίου και των παραγώγων του, με αποτέλεσμα το μαζούτ (Heavy Fuel Oil) το οποίο βρίσκεται στο τελευταίο στάδιο απόσταξης, και παράλληλα χρησιμοποιείται και ως καύσιμο στα πλοία, να περιέχει ακόμα περισσότερες ρυπογόνες ουσίες από ότι πριν. (Paper List: 7)

Τα κύρια συστατικά των υγρών καυσίμων (βενζίνη, Diesel κτλ.) που χρησιμοποιούν οι «παραδοσιακές» εμβολοφόρες ΜΕΚ είναι ο άνθρακας και το υδρογόνο. Πρόκειται ουσιαστικά για μείγματα χημικών ενώσεων τα οποία χαρακτηρίζονται από την κατά βάρος χημική τους σύσταση, η οποία είναι εν μέρη ίδια μεταξύ τους. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται η χημική σύσταση των βασικότερων υγρών καυσίμων: (Link List: 5)

	Βενζίνη	Κεροζίνη	Diesel	Ελαφρύ diesel λεβήτων	Βαρύ Diesel λεβήτων
C	85.5	86.3	86.3	86.2	86.1
H	14.4	13.6	12.8	12.4	11.8
S	0.1	0.1	0.9	1.4	2.1

Εικόνα 4.2: Χημική Σύσταση Βασικότερων υγρών καυσίμων, Πηγή: <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/?course=NA214>

Οι κινητήρες Diesel λειτουργούν με περίσσεια αέρα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος αέρας στον θάλαμο καύσης από αυτόν που απαιτείται για να γίνει η αυτανάφλεξη - να υπενθυμίσουμε ότι στις πετρελαιομηχανές δεν υπάρχει σπινθηριστής αλλά η έναυση επιτυγχάνεται λόγω των υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών που αναπτύσσονται μέσα στον κύλινδρο. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι μέσα στον θάλαμο καύσης μίας πετρελαιομηχανής επικρατούν περίπου 2000 βαθμοί Κελσίου κατά την καύση.

Η παρουσία των οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια των παλινδρομικών MEK και ειδικότερα σε αυτές που λειτουργούν με Diesel, έχει μετρηθεί και υπολογισθεί πειραματικά χρησιμοποιώντας μοντέλα χημικής κινητικής, όπου εκεί λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων συγκριτικά με το διαθέσιμο χρόνο στις κανονικές στροφές όπου λειτουργεί ο κινητήρας. Ταυτόχρονα όμως είναι γνωστό ότι στις παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης, αναπόφευκτα συμβαίνει το φαινόμενο της ατελούς καύσης, δηλαδή της μερικής οξείδωσης, και αυτό με τη σειρά του έχει σαν συνέπεια να εμφανίζονται στην εξαγωγή των καυσαερίων άκαυστοι υδρογονάνθρακες και άλλα στοιχεία όπως τα NOx. Σε πρώτη προσέγγιση, είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς, ότι οι περιεκτικότητες που εμφανίζονται είναι μικρές – ταυτόχρονα όμως μπορούν να θεωρηθούν πολύ μεγάλες όταν κάνουμε αναφορά στην περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλείται από τις παλινδρομικές MEK. Συγκεκριμένα η καύση ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: (Paper List: 6)



Το «OTHER» μπορεί να είναι όλες οι παραπάνω βλαβερές ουσίες που έχουμε αναφέρει όπως NOx κτλ. Από την εν λόγω εξίσωση βλέπουμε ότι τα οξείδια του αζώτου παράγονται, είτε από την οξείδωση του αζώτου του αέρα που λαμβάνει μέρος στην καύση ή από το άζωτο που περιέχεται στο καύσιμο με το οξυγόνο (για τις περιεκτικότητες των καυσίμων ανατρέξτε στην εικόνα 2). Το άζωτο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ένα αδρανές αέριο το οποίο δεν αντιδρά χημικά με άλλα στοιχεία της ατμόσφαιρας. Ωστόσο σε θερμοκρασίες άνω των 1100 βαθμών Κελσίου μετατρέπεται σε «αντιδραστικό» αέριο και αντιδρά πολύ εύκολα με το οξυγόνο.

Αυτό και μόνο το γεγονός το καθιστά «ιδανικό» για την παραγωγή των επιβλαβών ουσιών μιας και μεγάλες θερμοκρασίες ευνοούν τον σχηματισμό NOx. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι το διοξείδιο του αζώτου είναι προϊόν περαιτέρω οξείδωσης του οξειδίου του αζώτου.

Η αναλογία NO₂ προς NO είναι από 0.02 έως 0.30 και εξαρτάται από το είδος του κινητήρα, τις στροφές και το λόγο καυσίμου προς αέρα. Σε χαμηλές στροφές ο κύκλος του κινητήρα έχει μεγαλύτερη διάρκεια με αποτέλεσμα να υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος χρόνος για την οξείδωση του NO και την παραγωγή NO₂. Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν, ότι το ποσοστό NO₂/NO μειώνεται όσο αυξάνεται το φορτίο γιατί παράλληλα αυξάνονται οι θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης και έτσι παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα NO.

4.2 Αρνητικές συνέπειες στην υγεία των ανθρώπων αλλά και στο περιβάλλον

Όλη αυτή η ανάλυση αλλά και μέτρα που κλήθηκε να πάρει ο IMO αναφορικά με την οικογένεια των οξειδίων του αζώτου, πηγάζουν από το γεγονός, ότι τα παραπάνω έχουν ένα ευρύ φάσμα αρνητικών επιπτώσεων στην υγεία του ανθρώπου αλλά και στο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα οι εκθέσεις του Environmental Protection Agency αναφέρουν τα παρακάτω:

1) Δημιουργία νέφους στην ατμόσφαιρα – Ground Level Ozone (GLO)

Το GLO είναι μία ένωση που σχηματίζεται ως αποτέλεσμα της αντίδρασης μεταξύ των οξειδίων ή των διοξειδίων του αζώτου, και των πτητικών οργανικών ενώσεων κάτω από το ηλιακό φως και θερμότητα. Μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις και επιπλοκές στους πνεύμονες των ανθρώπων, προκαλώντας εκτεταμένες δυσλειτουργίες και δύσπνοια, ιδιαίτερα σε παιδιά, σε ηλικιωμένους, αλλά και σε ανθρώπους με άσθμα. Επιπλέον είναι επιβλαβές για την βλάστηση και τις καλλιέργειες.

2) Δημιουργία σωματιδίων

Όταν τα οξείδια του αζώτου αντιδράσουν με την αμμωνία, τότε σχηματίζονται άτομα νιτρικού οξέος και σωματίδια, τα οποία έχουν αρκετές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία όπως για παράδειγμα τον πρόωρο θάνατο (σε ακραίες περιπτώσεις) λόγω της πνευμονικής ανεπάρκειας που θα προκληθεί, όταν τα σωματίδια αυτά εισχωρήσουν σε ευαίσθητα μέρη των πνευμόνων.

3) Παγκόσμια Υπερθέρμανση του πλανήτη – Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το υποξείδιο του αζώτου NO₂ είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου το οποίο συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα μαζί με άλλα αέρια του θερμοκηπίου. Αυτό έχει σαν συνέπεια να προκαλείται περαιτέρω ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο ούτως ή άλλως αυξάνει την

θερμοκρασία της γης επικίνδυνα τα τελευταία χρόνια. Προφανώς η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη ελλοχεύει πάρα πολλούς κινδύνους, όπως για παράδειγμα την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, αλλαγές στους βιοτόπους των φυτών και των ζώων αλλά και προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία.

4) Περιορισμός ορατότητας

Τα υψηλότερα επίπεδα οξειδίου του αζώτου στον αέρα και την ατμόσφαιρα, είναι ικανά να εμποδίσουν την μετάδοση του φωτός μειώνοντας σημαντικά την ορατότητα σε ορισμένες αστικές κυρίως περιοχές.

5) Όξινη Βροχή

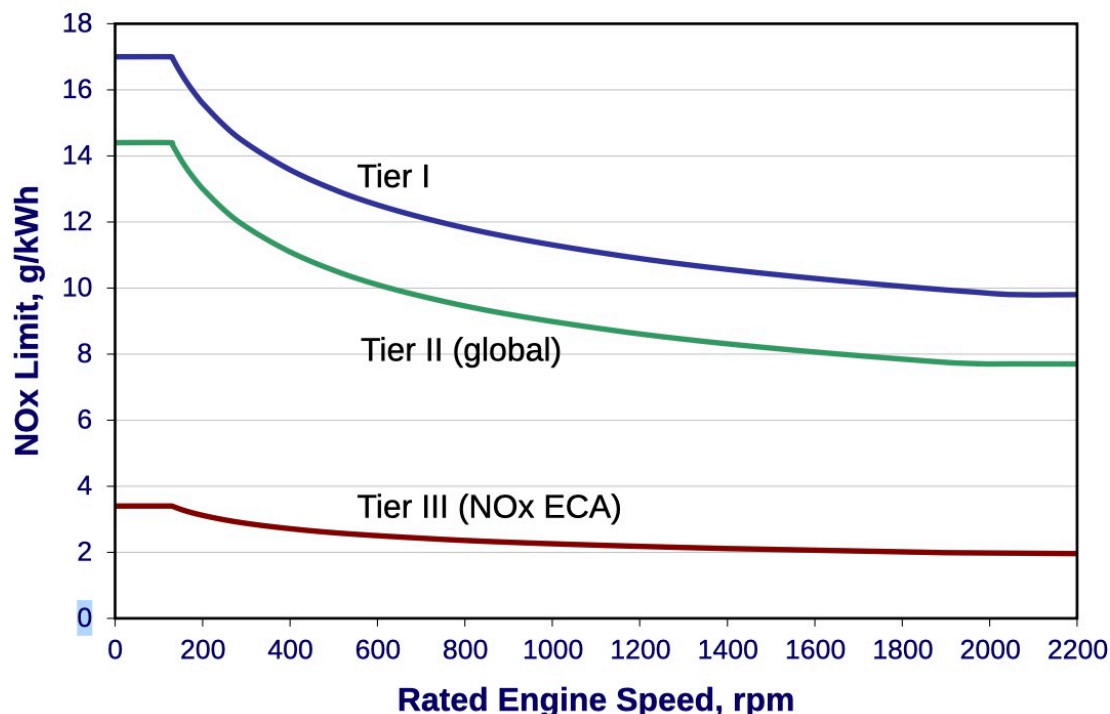
Ουσιαστικά με τον όρο όξινη βροχή, ονομάζουμε όλες τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, οι οποίες έχουν pH χαμηλότερο από το pH της κανονικής βροχής. Φυσιολογικά η βροχή στην φυσική της κατάσταση είναι ελαφρά όξινη, με το pH της να κυμαίνεται μεταξύ 5 και 5.6. Αυτό οφείλεται κυρίως στο διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, το οποίο διαλύεται στο νερό της βροχής και σχηματίζει το ανθρακικό οξύ. Η σημαντικότερη αιτία της όξινης βροχής είναι η παρουσία οξειδίων του αζώτου και οξειδίων του θείου στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα το οποίο προκύπτει μέσω της όξινης βροχής, είναι η καταστροφή των δασών, και η αλλοίωση των αντικειμένων που εκτίθενται στην όξινη βροχή.

4.3 Βαθμίδες IMO

Λόγω της κατάστασης με τους ρύπους η οποία πριν από αρκετά χρόνια δεν ελεγχόταν καθόλου, ο IMO αποφάσισε ότι για κινητήρες με ονομαστική ισχύ η μεγαλύτερη των 130 kW θα πρέπει να ελέγχει τις εκπομπές σε διοξείδια και οξείδια του αζώτου. Ο κανονισμός αυτός ουσιαστικά περιλαμβάνει όλα τα πλοία του παγκοσμίου στόλου, καθώς ελάχιστα είναι αυτά που έχουν κινητήρες με μικρότερη ιπποδύναμη από αυτήν. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι 130 κιλοβάτ, αντιστοιχούν σε μόλις 175 hp, και προφανώς δεν υπάρχει πλοίο με τόσο μικρή ιπποδύναμη. Ο τεχνικός κώδικας NOx 2008 (NOx Technical Code), είναι αυτός που ορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι μηχανές των πλοίων θα συμμορφώνονται με τις εκπομπές σε NOx.

Οι κανόνες του IMO για την ρύπανση των πλοίων περιέχονται στην «Διεθνή σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία» της MARPOL. Η εν λόγω σύμβαση τροποποιήθηκε στις 27 Σεπτεμβρίου 1997 από το «Πρωτόκολλο του 1997» και πλέον περιλαμβάνει και ένα επιπλέον παράρτημα (το Παράρτημα VI) το οποίο αναφέρεται στους «Κανονισμούς για την πρόληψη της αέριας – ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία» το οποίο ουσιαστικά θέτει τα

σημερινά όρια στις εκπομπές οξειδίων του θείου και του αζώτου από τα καυσαέρια των πλοίων. Τα πρότυπα των εκπομπών του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού, χωρίζονται σε κατηγορίες και αναφέρονται ως «Tiers 1,2 και 3».



Εικόνα 4.3: Βαθμίδες IMO, Πηγή: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)--Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)--Regulation-13.aspx)

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τις βαθμίδες του IMO. Στον οριζόντιο άξονα βλέπουμε τις στροφές της μηχανής ανά λεπτό και στον κατακόρυφο άξονα το όριο σε εκπομπές οξειδίου του αζώτου. Οι τρεις γραμμές διαφορετικού χρώματος, είναι τα όρια τα οποία υπάρχουν ανάλογα σε ποια βαθμίδα βρισκόμαστε. Να τονίσουμε ότι τις εκπομπές τις μετράμε σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα. Η βαθμίδα 1 (Tier 1) ή αλλιώς πρωτόκολλο 1997 της Μάρπολ το οποίο περιλαμβάνει το παράρτημα VI το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω, τέθηκε σε ισχύ μόλις 12 μήνες από όταν έγινε αποδεκτό από όλα τα κράτη μέλη που συμμετείχαν στην συνεδρίαση - στις 19 Μαΐου 2005. Εφαρμόστηκε αναδρομικά σε νέους κινητήρες με ισχύ μεγαλύτερη από 130 κιλοβάτ οι οποίοι κατασκευάστηκαν από την 1 Ιανουαρίου 2000. Ο κανονισμός εφαρμόζεται επίσης σε σταθερές και πλωτές εξέδρες γεώτρησης.

Στην συνέχεια και λόγω της αυστηροποίησης των κανονισμών περί εκπομπών του διεθνούς ναυτιλιακού οργανισμού, εισήχθησαν οι βαθμίδες 2 και 3 οι οποίες ήταν αρκετά αυστηρότερες σε σχέση με το Tier 1. Πιο συγκεκριμένα τα πρότυπα της βαθμίδας δύο, πρέπει να πληρούν την διαδικασία βελτιστοποίησης της καύσης. Οι παράμετροι που εξετάζονται από τους

κατασκευαστές των κινητήρων περιλαμβάνουν τον έλεγχο του χρονισμού του ψεκασμού του καυσίμου, το χρονισμό της βαλβίδας εξαγωγής, τον όγκο συμπίεσης του κυλίνδρου αλλά και την περιοχή της ροής γύρω από το ακροφύσιο του καυσίμου. Αυτά ήταν μερικά από τα στοιχεία τα οποία θα έπρεπε να ελέγχουν οι κατασκευαστές των κινητήρων από την στιγμή που είχε εισαχθεί η βαθμίδα δύο. Η εισαγωγή της βαθμίδας δύο το 2011, με στόχο τον περιορισμό των εκπομπών σε οξειδία και διοξειδία του αζώτου, είχε ως αποτέλεσμα να επέλθει μία μείωση στα NOx της τάξεως του 20 τα 100 σε σχέση με αυτά της βαθμίδας ένα.

Η βαθμίδα τρία (Tier 3), είναι η πιο αυστηρή από όλες τις προηγούμενες και τα πρότυπα της απαιτούν ειδικές τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών NOx όπως η εισαγωγή του νερού στην διαδικασία της καύσης ή η ανακυκλοφορία των καυσαερίων. Πέρα από αυτό, στην Tier III θα συναντήσει κανείς τα λεγόμενα Emission Control Areas ή στα ελληνικά «Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών». Οι συγκεκριμένες, πρόκειται για περιοχές όπου υπάρχουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις για τα πλοία που εισέρχονται σε αυτές, αναφορικά με τις εκπομπές τους σε σωματίδια, οξειδία του αζώτου του αλλά και οξειδία του θείου. (Paper List: 8)



Εικόνα 4.4: Emission Control Areas, Πηγή: <https://www.egcsa.com/regulatory/>

Στην εικόνα τέσσερα βλέπουμε με πράσινο χρώμα τις θαλάσσιες περιοχές όπου υπάρχει μεγάλος περιορισμός στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου και οξειδίου του θείου. Αυτές είναι οι εξής:

- Βαλτική Θάλασσα: σε ισχύ από το 2021
- Βόρεια Θάλασσα: σε ισχύ από το 2021
- Ακτές βόρειας Αμερικής και Καναδά: σε ισχύ από το 2010

- Ένα κομμάτι της Καραϊβικής: σε ισχύ από το 2014
- Μεσόγειος θάλασσα: θα τεθεί σε ισχύ το 2025

Όπως αναφέραμε τα όρια στις εκπομπές των NOx για τις πετρελαιομηχανές εξαρτώνται από τον μέγιστο αριθμό στροφών του κινητήρα. Οι βαθμίδες I και II θέτουν τα όρια παγκοσμίως, ενώ η βαθμίδα III αφορά μόνο τα Emission Control Areas. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα όρια τα οποία συναντήσαμε στην γραφική παράσταση 3, σε μορφή πίνακα. Το “n” αφορά τις στροφές της μηχανής. Είναι εμφανές ότι όταν τα πλοία βρίσκονται σε μέρη όπου ισχύει η βαθμίδα III, οι εκπομπές τους σε NOx πρέπει να είναι αισθητά περιορισμένες.

Tier	Date	NOx Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	45 · n ^{-0.2}	9.8
Tier II	2011	14.4	44 · n ^{-0.23}	7.7
Tier III	2016†	3.4	9 · n ^{-0.2}	1.96

† In NOx Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).

Εικόνα 4.5: Κατηγοριοποίηση σε σχέση με τα rpm των κινητήρων, Πηγή: <https://dieselnet.com/standards/us/marine.php>

4.4 Κατηγοριοποίηση Κινητήρων

Με σκοπό τον περαιτέρω περιορισμό των εκπομπών, οι κινητήρες των πλοίων μπορούν να χωριστούν σε επιπλέον κατηγορίες με βάση τον κυβισμό τους **ανά κύλινδρο** όπως φαίνεται στον επισυναπτόμενο Πίνακα 6. Κάθε μία από τις κατηγορίες αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική τεχνολογία κινητήρα. Οι κατηγορίες είναι τρεις στον αριθμό, με την πρώτη και τη δεύτερη να χωρίζονται σε περαιτέρω υποκατηγορίες ανάλογα πάντα με τον όγκο εμβολισμού και την καθαρή ισχύει που έχουμε στην έξοδο του κινητήρα. Το dm³ συμβολίζει κυβικά δεκατόμετρα. (Link List: 19)

Category	Displacement per Cylinder (D)		Basic Engine Technology
	Tier 1-2	Tier 3-4	
1	D < 5 dm ³ †	D < 7 dm ³	Land-based nonroad diesel
2	5 dm ³ ≤ D < 30 dm ³	7 dm ³ ≤ D < 30 dm ³	Locomotive engine
3	D ≥ 30 dm ³		Unique marine engine design

† And power ≥ 37 kW

Εικόνα 4.6: Κατηγοριοποίηση κινητήρων σε σχέση με τον όγκο εμβολισμού τους, Πηγή: <https://dieselnet.com/standards/us/marine.php>

Οι ναυτικοί κινητήρες της κατηγορίας τρία (Category III), κυμαίνονται σε ιπποδυνάμεις από 3000 έως 100.000 ίππους. Πρόκειται για πολύ μεγάλους πετρελαιοκινητήρες πλοίων που

χρησιμοποιούνται για την πρόωση σε ποντοπόρα πλοία όπως τα container ships , τα πετρελαιοφόρα και τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην. Στην κατηγορία αυτή, λόγω των πολύ μεγάλων ιπποδυνάμεων που έχουμε, οι τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών σε διοξείδια του αζώτου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αρκετά περιορισμένες. Γι' αυτό το λόγο έχει πολύ μεγάλη σημασία το καύσιμο που χρησιμοποιείται να είναι όσο το δυνατόν καλύτερης ποιότητας.

Σε αντίθεση με την κατηγορία III, οι κινητήρες που εντάσσονται στις κατηγορίες I και II (Category I and II), έχουν ένα σαφώς μικρότερο εύρος ιπποδυνάμεων το οποίο κυμαίνεται από 700 ίππους και φτάνει μέχρι τους 11.000. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένα πλοίο που εκτελεί το δρομολόγιο Πειραιάς – Αίγινα το οποίο διαρκεί μιάμιση ώρα, απέχει από τον Πειραιά 22 ναυτικά μίλια και εκτελείται από πλοία με μέγιστο μήκος τα 100 μέτρα, χρησιμοποιεί μία μηχανή που αποδίδει περίπου 10.000 ίππους. Μέσω αυτού του απλού παραδείγματος θέλουμε να κάνουμε κατανοητό, ότι οι κατηγορίες μηχανών 1 και 2 αναφέρονται σε σημαντικά μικρότερα πλοία τα οποία εκτελούν τοπικούς πλόες.

Επιπλέον πρέπει να τονίσουμε ότι μηχανές μικρότερων ιπποδυνάμεων οι οποίες ανήκουν στις κατηγορίες I και II, τυγχάνει να συναντάμε σε αρκετά μεγαλύτερα πλοία, όπου εκεί όμως αυτές δεν λειτουργούν σαν αυτόνομο μέσω πρόωσης αλλά συμπληρωματικά για να καλύψουν τις ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου – λειτουργούν δηλαδή σαν γεννήτριες. Γίνεται λοιπόν σαφές, ότι αναφορικά με τις εκπομπές σε NOx, μας απασχολούν περισσότερο οι κινητήρες της κατηγορίας 3, και είναι και αυτοί που πρέπει να πληρούν τις προϋποθέσεις που ορίζονται στο παράστημα IV του IMO και της MARPOL. (Link List: 21)

4.5 Τρόποι περιορισμού των NOx

Για να περιοριστούν ακόμα περισσότερο οι εκπομπές σε διοξείδια του αζώτου, μπορούν να γίνουν μερικές ενέργειες οι οποίες αφορούν για παράδειγμα τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η καύση - και είναι ανεξάρτητες από το Tier System του IMO - με τις οποίες θα περιοριστούν έστω και σε ένα μικρό βαθμό οι εκπομπές των οξειδίων αζώτου. Πιο συγκεκριμένα: (Paper List: 8)

- Low NOx Burners

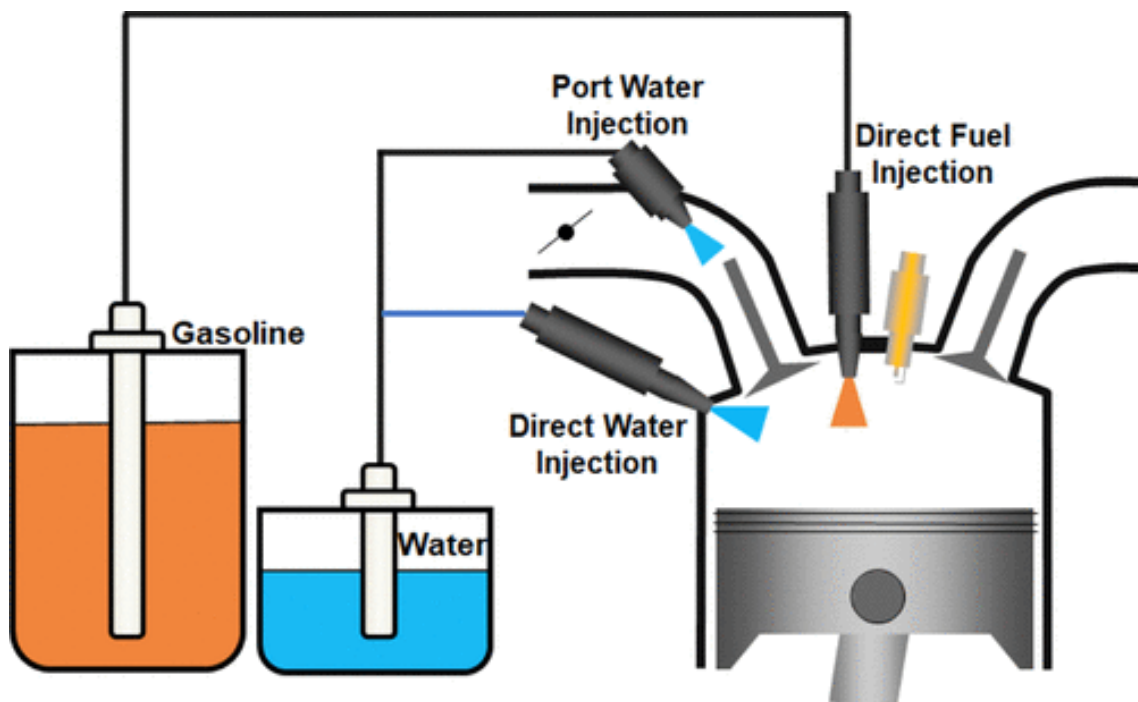
Η Wärtsilä (μία από τις μεγαλύτερες εταιρείες που κατασκευάζει ναυτικούς κινητήρες) ανέπτυξε ένα σύστημα – μία διαδικασία καύσης, η οποία μειώνει το επίπεδο των εκπομπών NOx στους κινητήρες Diesel από 25% μέχρι και 35%, χωρίς όμως να επηρεάζεται αντίστοιχα

η θερμική απόδοση του κινητήρα. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εξής λογική: Πρώτον ότι εξασφαλίζεται υψηλός λόγος συμπίεσης το οποίο έχει ως άμεσο αποτέλεσμα να έχουμε υψηλότερη θερμοκρασία κατά την έναρξη της καύσης και της έγχυσης του καυσίμου, η οποία όμως υψηλότερη θερμοκρασία μειώνει δραστικά την καθυστέρηση της ανάφλεξης. Μέσω της ταχύτερης ανάφλεξης, ο κύλινδρος φτάνει στην μέγιστη θερμοκρασία του για λιγότερη ώρα, πράγμα το οποίο ευνοεί την μικρότερη εκπομπή σε NOx. Επιπλέον η τεχνική αυτή βασίζεται στην καθυστερημένη έναρξη της εγχύσεως του καυσίμου αλλά και στην μικρότερη διάρκεια έγχυσης με στόχο να μπορέσουμε «ελέγξουμε» την καύση και να την τοποθετήσουμε στο βέλτιστο σημείο του κύκλου σε σχέση πάντα με την απόδοση. Τέλος εφαρμόζεται βελτιωμένος ψεκασμός του καυσίμου σε αναλογικά με τον χώρο - όγκο του θαλάμου καύσης, για την καλύτερη και σωστότερη ανάμειξη του αέρα με το καύσιμο.

- Μέθοδος άμεσης έγχυσης νερού – Direct Water Injection

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την μείωση των εκπομπών σε οξειδία και διοξειδία του αζώτου, και επιτυγχάνεται με την απευθείας έγχυση νερού στον θάλαμο καύσης μέσα από ένα ξεχωριστό ακροφύσιο. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να επιτύχουμε μία μείωση των NOx της τάξεως του 50% με 60%, με την ανάλογη όμως επίδραση στην κατανάλωση. Βλέπουμε λοιπόν ότι με την μέθοδο αυτή σε αντίθεση με την Low NOx Burners, έχουμε μία σημαντική αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου. Το βασικό στοιχείο της ιδέας αυτής είναι τα ξεχωριστά ακροφύσια που χρησιμοποιούνται για την έγχυση του καυσίμου. Το ένα ακροφύσιο είναι υπεύθυνο αποκλειστικά και μόνο για την έγχυση του καυσίμου, και το άλλο για την έγχυση του νερού. Η έγχυση του νερού ξεκινά αρκετά πριν από την έγχυση του καυσίμου, προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία. – να ψυχθεί ο θάλαμος καύσης, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατόν χαμηλότερη παραγωγή NOx πριν από την ανάφλεξη του καυσίμου. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπενθυμίσουμε, ότι η ανάπτυξη NOx ευνοείται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Για την έγχυση του νερού χρησιμοποιούνται αντλίες υψηλής πίεσης, οι οποίες είναι ικανές να πετύχουν μία πολύ υψηλή πίεση νερού της τάξεως των 200 – 400 bar. Προφανώς λόγω των πιέσεων που δημιουργούνται μπορεί να δημιουργηθούν κάποιοι παλμοί πίεσης οι οποίοι όμως ελέγχονται ηλεκτρονικά. Επίσης ηλεκτρονικά ελέγχεται και ο χρονισμός της έγχυσης. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η ποσότητα του νερού που εγχέεται, δηλαδή η αναλογία νερού/καυσίμου ελέγχεται κατά την διάρκεια της έγχυσης. Η μέθοδος του άμεσου ψεκασμού νερού (direct water injection), αποτέλεσε ένα ενδιάμεσο βήμα για την συμμόρφωση με τους κανονισμούς των νηογνωμών.

Σε δεύτερο χρόνο αναπτύχθηκαν και νέες τεχνολογίες, όπως αυτές που θα αναλύσουμε παρακάτω. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι, η εγκατάστασή του αποτελεί μία εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία. Η δυσκολία στο εγχείρημα αυτό έγκειται στο γεγονός ότι είναι πάρα πολύ δύσκολο να εγκατασταθεί το ακροφύσιο το οποίο θα «ψεκάζει» το νερό στον κύλινδρο.



Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση έγχυσης νερού. Πηγή: [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/direct-water-injection-\(dwi\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/direct-water-injection-(dwi))

Στην παραπάνω εικόνα (7), βλέπουμε σχηματικά την διαδικασία που έχουμε περιγράψει στην προηγούμενη σελίδα. Γίνεται αντιληπτό το ξεχωριστό ακροφύσιο το οποίο εγχέει το νερό, όπως επίσης και οι διαφορετικές δεξαμενές νερού και καυσίμου. (Link List: 20)

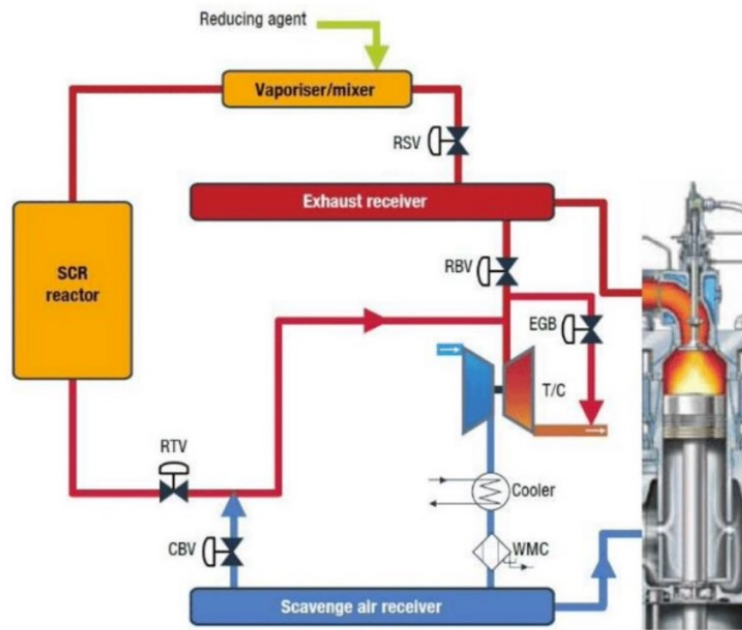
- Ανακυκλόφοια καυσαερίων – Exhaust Gas Recirculation

Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων είναι μία άλλη ευρέως γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται για να μπορέσουμε να μετριάσουμε τις εκπομπές των NOX. Η βασική της αρχή είναι η ανταλλαγή μέρους του φρέσκου αέρα που εισάγεται στον κινητήρα με τα καυσαέρια – μέσω των βαλβίδων της πολλαπλής εισαγωγής και εξαγωγής – έτσι ώστε τα μόρια του οξυγόνου και του αζώτου στον «καθαρό» αέρα να αντικαθίστανται από το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό στα καυσαέρια. Οι μέγιστες θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης θα μειωθούν ελαφρά και αυτό θα έχει σαν συνέπεια, να υπάρξουν μειώσεις στον σχηματισμό διοξειδίων – οξειδίων του αζώτου. Γενικότερα η ανακυκλοφορία των καυσαερίων, εκφράζεται

ως ποσοστό κατά μάζα ή κατά όγκο. Αν αναφερθούμε σε όρους που αφορούν την μέτρηση του όγκου, ο λόγος της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων είναι ο λόγος της μάζας του συνολικού αέρα που μπαίνει στον κύλινδρο προς τον όγκο των καυσαερίων που ανακυκλοφορείται – ανακυκλώνεται από την πλευρά της εξάτμισης. Η αναλογία αυτή κυμαίνεται μεταξύ 10 με 20 τοις 100 εάν το πλοίο κινείται στην βαθμίδα δύο (Tier II) του IMO και σε 30 με 40 τοις 100 εάν βρισκόμαστε σε Emission Control Areas (Tier III). Υπάρχουν δύο τύποι βαλβίδων για την ανακυκλοφορία των καυσαερίων: οι πρώτες είναι αυτές που ενεργοποιούνται αυτόματα από μόνες τους, λόγο της υποπίεσης στην πολλαπλή εισαγωγή. Οι δεύτερες είναι αυτές που ενεργοποιούνται ηλεκτρονικά μέσα από κάποιο ηλεκτρικό σήμα και έχουν το πλεονέκτημα της γρηγορότερης απόκρισης σε σχέση με αυτές που ενεργοποιούνται από μόνες τους. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου ανακυκλοφορίας των καυσαερίων, είναι ότι μειώνει σε μεγάλο βαθμό τις θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης. Αυτό πέραν της μείωσης των οξειδίων του αζώτου που θα επιφέρει, θα μειώσει τον θόρυβο αλλά και τους κραδασμούς του κινητήρα. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η διαδικασία της καύσης μέσα στον θάλαμο θα επιδεινωθεί και αυτό θα έχει σαν συνέπεια να έχουμε απώλειες στην ισχύ του κινητήρα. Επιπλέον θα έχουμε αύξηση στις εκπομπές των σωματιδίων Particular Matters αλλά και αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Πρέπει να αναφερθεί ότι η φθορά της λίπανσης του κινητήρα λόγω της επίδρασης των μορίων του άνθρακα που προέρχονται από την εξάτμιση, θα έχει σαν συνέπεια μακροχρόνια φθορά στον κινητήρα.

- Selective Catalytic Reduction

Το σύστημα της καταλυτικής μείωσης αναπτύχθηκε για τον περιορισμό των NOx στους κινητήρες Diesel. Ο στόχος του συστήματος αυτού είναι να παρέχει έναν επιλεκτικό μετατροπέα για τις εκπομπές των NOx μετά τον καθαρισμό των σωματιδίων στην εξαγωγή των καυσαερίων, σε ένα φίλτρο με καταλυτική επικάλυψη επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα τα καυσαέρια που εξέρχονται από την μηχανή, περνάνε από το φίλτρο σωματιδίων στο πρώτο στάδιο, και έτσι συγκρατείται το 70% των σωματιδίων. Στην συνέχεια τα καυσαέρια που διέρχονται από το φίλτρο σωματιδίων υποβάλλονται σε οξείδωση. Τα μόρια του οξυγόνου που στέλνονται στα καυσαέρια κατά την διαδικασία της οξείδωσης, αντιδρούν με τα ατελή προϊόντα της καύσης όπως τα μόρια του μονοξειδίου του άνθρακα και το μονοξείδιο του αζώτου. Επιπλέον οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες που υπάρχουν στα καυσαέρια καίγονται με το οξυγόνο εκεί. Τέλος λαμβάνουν μέρος κάποιες χημικές αντιδράσεις από τις οποίες παράγεται νερό και μόρια του αζώτου. Μην ξεχνάμε ότι ο κύριος σκοπός της παρουσίας του καταλύτη είναι η μείωση των NOx χρησιμοποιώντας αμμωνία. (Paper List: 8)



Εικόνα 4.8: Καταλυτική μείωση NOx, Πηγή:

https://www.researchgate.net/publication/371919467_Nitrogen_Oxides_NOx_Reduction_Methods_Used_in_Marine_Diesel_Engine_Gemi_Dizel_Motorunda_Azot_Oksitleri_NOx_Indirgeme_Yontemleri

Η εικόνα 8, δείχνει όλη τη διαδικασία που περιγράψαμε. Μία πρόσφατη μελέτη του 2023 από δύο κινέζους επιστήμονες, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης υψηλής πίεσης, είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την μείωση εκπομπών οξειδίου του αζώτου σε θαλάσσιους κινητήρες υψηλής ισχύος και χαμηλών στροφών. Η μείωση που μπορεί να επιτευχθεί είναι τόσο μεγάλη ώστε τα πλοία αυτά μπορούν να πλέουν χωρίς περιορισμούς σε emission control areas.

Οι τέσσερις τρόποι περιορισμού των οξειδίων του αζώτου που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι από τους βασικότερους που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ναυτιλίας. Φυσικά υπάρχουν και κάποιοι άλλοι τρόποι, οι οποίοι δεν έχουν άμεση εφαρμογή στη ναυτιλία και για αυτόν τον λόγο δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία.

4.6 Τρόποι μέτρησης NOx emissions

Σύμφωνα με τον Environmental Protection Agency (EPA) υπάρχουν 2 μέθοδοι διαθέσιμες για τον υπολογισμό των εκπομπών NOx στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Γνωρίζοντας την ιπποδύναμη (brake horse power) και τις ώρες λειτουργίας της μηχανής μπορούμε να κάνουμε χρήση του παρακάτω τύπου:

1^{ος} τρόπος

$$AE_i = E_{fi} \times B_{hp} \times t$$

όπου: i = NO_x emissions ή οποιοδήποτε στοιχείο θέλουμε να μετρήσουμε τις εκπομπές του

AE = annual emissions – ετήσιες εκπομπές

E_f = Chemical Emission factor – συντελεστής χημικών εκπομπών

B_{hp} = ισχύ μηχανής

t = συνολικές ώρες ετήσιας λειτουργίας

Η ισχύς της μηχανής μπορεί να ληφθεί είτε κατευθείαν από τον κατασκευαστή, είτε από το συνοδευτικό βιβλίο που λαμβάνετε κατά την παράδοση της μηχανής.

2^{ος} Τρόπος:

Μία εναλλακτική μέθοδος υπολογισμού είναι αν μας παρέχεται η κατανάλωση του καυσίμου, όπου τότε θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση:

$$Q = U_{max} \times H_v \times \rho \times t / (\text{efficiency} \times 106)$$

όπου: Q = Annual heat input

U_{max} = μέγιστη δυναμική χρήση καυσίμου του κινητήρα μας ανά ώρα (liters/hour)

H_v = heating value of the fuel.

ρ = density of the fuel (πυκνότητα του καυσίμου)

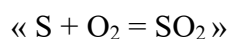
t = συνολικές ώρες ετήσιας λειτουργίας

Κάνοντας χρήση ενός εκ των δύο παραπάνω τύπων, μπορούμε να έχουμε δυναμικά σωστά αποτελέσματα για την τιμή των εκπομπών σε οξείδια του αζώτου. (Link List: 21)

Κεφάλαιο 5: Scrubber – Εκπομπές σε οξείδια του θείου SO_x

5.1 Πως παράγονται τα SO_x

Το θείο (S) είναι ένα συστατικό το οποίο περιέχεται στο αργό πετρέλαιο και κατά συνέπεια στο μαζούτ (Heavy Fuel Oil) το οποίο καταναλώνουν τα πλοία ως καύσιμο, με περιεκτικότητες που κυμαίνονται από 0.5% έως 6%. Η καύση καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, είναι ικανή να οδηγήσει σε εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και ιδιαίτερα σε εκπομπές διοξειδίων του θείου (SO₂), ένα άχρωμο, άοσμο και ιδιαίτερα διαβρωτικό αέριο, το οποίο κατά τους ειδικούς θεωρείται ότι επιφέρει αρνητικές συνέπειες στην υγεία των ανθρώπων αλλά και στο ίδιο το περιβάλλον. Τα οξείδια του θείου παράγονται από την οξείδωση του θείου στο καύσιμο. Η αντίδραση που γίνεται είναι ιδιαίτερα απλή. Το θείο που προϋπάρχει όπως ήδη αναφέραμε στο καύσιμο, αντιδρά με το οξυγόνο που περιέχεται στον αέρα (ο αέρας είναι απαραίτητο στοιχείο για να γίνει η έναυση) και έτσι προκύπτουν τα οξείδια – διοξείδια του θείου. Πιο συγκεκριμένα η αντίδραση είναι της εξής μορφής:



Από την παραπάνω χημική εξίσωση εύκολα κάποιος μπορεί να συμπεράνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο, τόσο πιο έντονη θα είναι και η παρουσία των οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια. Σε σύγκριση με τις χερσαίες εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας, τα καύσιμα και οι εκπομπές που προέρχονται από τη ναυτιλία έχουν σημαντικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο – έως και 4,5% μεγαλύτερη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι καθαρά οικονομικός και έχει να κάνει με το γεγονός ότι το μαζούτ που χρησιμοποιούν ως καύσιμο οι περισσότεροι ναυτικοί κινητήρες, επειδή είναι το τελευταίο προϊόν που λαμβάνεται από την στήλη απόσταξης του πετρελαίου έχει την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε θείο. Την ίδια στιγμή όμως έχει το χαμηλότερο κόστος από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, και αυτό οδηγεί τις ναυτιλιακές εταιρείες στο να δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για αυτό. (Paper List: 13)

5.2 Αρνητικές επιπτώσεις – Κίνδυνος υπερθέρμανσης

Δεν επιδέχεται καμία αμφιβολία το γεγονός ότι οι εκπομπές των SO_x, τόσο από τον τομέα της ναυτιλίας όσο και γενικότερα, μπορούν να επιφέρουν μία πληθώρα αρνητικών συνεπειών στην υγεία των ανθρώπων αλλά και στο ίδιο το περιβάλλον. Για αυτό τον λόγο ο διεθνής

ναυτιλιακός οργανισμός (IMO) αποφάσισε να λάβει μέτρα, με στόχο τον περιορισμό των εκπομπών σε SOx.

Το 95% των SOx που εκπέμπονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, είναι διοξείδιο του θείου δηλαδή SO₂. Το διοξείδιο του θείου είναι ένα τοξικό αέριο το οποίο όταν το εισπνεύσει ο άνθρωπος μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην υγεία του. Το ίδιο είναι βαρύτερο από τον αέρα και μπορεί να έχει αποπνικτική οσμή αν η συγκέντρωσή του ξεπεράσει τα 500 parts per billion (Parts per million ισούται με: ppb = mass of solute / mass of solution * 10⁹). Στην περίπτωση αυτή, η οποιαδήποτε εισπνοή του θα έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τον θάνατο. Σε χαμηλότερα επίπεδα μπορεί να προκαλέσει πόνους στο στήθος, αναπνευστικά προβλήματα όπως δύσπνοια, ερεθισμό των ματιών, και επιπλέον η εισπνοή του μπορεί να κάνει τον άνθρωπο ευάλωτο σε καρδιαγγειακές και πνευμονικές παθήσεις. Σε περιεκτικότητες των 20 ppb ή και χαμηλότερα, ένα υγιές άτομο δεν θα αντιμετωπίσει κάποιο πρόβλημα. Μία επιπλέον αρνητική συνέπεια που μπορεί να προκληθεί, είναι ο σχηματισμός θεικών αλάτων με την μορφή αερολυμάτων ή πολύ λεπτών αιρούμενων σωματιδίων, τα οποία αποτελούν μέρος των particular matters (PM) και έχουν συνδεθεί με αυξημένες κρίσεις άσθματος, καρδιακές και πνευμονικές παθήσεις αλλά και αναπνευστικά προβλήματα στις ευπαθείς πληθυσμιακές ομάδες. Τέλος οι εκπομπές των διοξειδίων του θείου είναι και αυτές υπεύθυνες για την δημιουργία της όξινης βροχής, την οποία την έχουμε αναφέρει ξανά στις εκπομπές NOx. Τα οξείδια του θείου μπορούν να μετατραπούν σε οξέα λόγω των αντιδράσεων που συμβαίνουν στην φύση, και αυτά τα όξινα αερολύματα να κατακρημνίζονται στην συνέχεια ως όξινη βροχή ή ομίχλη. Κανονικά, απουσία της ανθρώπινης δραστηριότητας και της ανθρωπογενούς ρύπανσης, η βροχή έχει pH γύρω στο 5, το οποίο σημαίνει ότι είναι ελαφρώς όξινη. Αυτό συμβαίνει λόγω της παρουσίας του ανθρακικού οξέος από τη αλληλεπίδραση των υδρατμών και των φυσιολογικών επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο λόγω της ρύπανσης που προκαλείται, το pH της όξινης βροχής μπορεί να αγγίζει το 3, το οποίο αντιστοιχεί στο pH του ξυδιού.

Σε μία κοινή πρόταση το 2009 προς τον IMO, οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς, απεύθυναν έκκληση στον IMO να λάβει μέτρα με στόχο τον περιορισμό των εκπομπών των οξειδίων – διοξειδίων του θείου, καθώς σύμφωνα με μελέτη του πανεπιστημίου της βρετανικής Κολομβίας κάθε χρόνο περίπου 8000 άνθρωποι χάνουν την ζωή τους, λόγω των άμεσων ή των έμμεσων επιπτώσεων των SOx. (Link List: 23)

5.3 IMO Sulphur CAP 2020

Όπως συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις, κύριο μέλημα του IMO είναι να ασχολείται ενδελεχώς με τον τρόπο μείωσης των επιβλαβών αερίων που προέρχονται από την ναυτιλία. Το παράρτημα VI της Marpol ήταν ένας κανονισμός που θεσπίστηκε και είχε σαν στόχο, να μπορέσουν να ελεγχθούν οι εκπομπές σε οξειδία του αζώτου, οξειδία του θείου κτλ. Όλα τα παραπάνω έχουν άμεση σχέση με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, για τις οποίες έχει γίνει ειδική αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο παράρτημα VI γίνεται μία αναφορά στις εκπομπές σε οξειδία και διοξειδία του θείου και αυτό είχε ως αποτέλεσμα στην τελευταία αναθεώρηση που έλαβε χώρα, να εγκριθεί και να ξεκινήσει να εφαρμόζεται υποχρεωτικά ο περιορισμός του θείου στο μαζούτ. Πιο συγκεκριμένα από την 1^η Ιανουαρίου 2020, όλα τα πλοία που κινούνται παγκοσμίως, υποχρεώνονται να περιορίζουν την ποσότητα του θείου που περιέχεται στο καύσιμο τους, με μέγιστο το 0.5% αν κινούνται σε «ανοιχτή» θάλασσα. Η συμπληρωματική τροπολογία της διεθνούς σύμβασης για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL), απαγορεύει την μεταφορά μη συμμορφωμένου με τον κανονισμό του IMO μαζούτ για σκοπούς καύσης και πρόωσης, **εκτός** αν το πλοίο διαθέτει εγκεκριμένο σύστημα καθαρισμού καυσαερίων Scrubber, όπου τότε θα μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιεί καύσιμο με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Ακόμα όμως και αν η ναυτιλιακή εταιρεία, επιλέξει το πλοίο της να λειτουργεί με σύστημα καθαρισμού καυσαερίων, θα πρέπει αυτά να είναι πιστοποιημένα από τον νηογνώμονα που παρακολουθεί το πλοίο αλλά και από το εκάστοτε Port State Control. Μέχρι πριν την θέσπιση του κανονισμού Sulphur CAP 2020, δεν υπήρχε κάποιος αυστηρός περιορισμός για το θείο και έτσι τα πλοία μπορούσαν να χρησιμοποιούν καύσιμο, ακόμα και με 4.5% περιεκτικότητα σε S. Ενδεικτικά στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα όρια που υπήρχαν στο S των καυσίμων, πριν ξεκινήσει η εφαρμογή του κανονισμού: (Link List: 24)

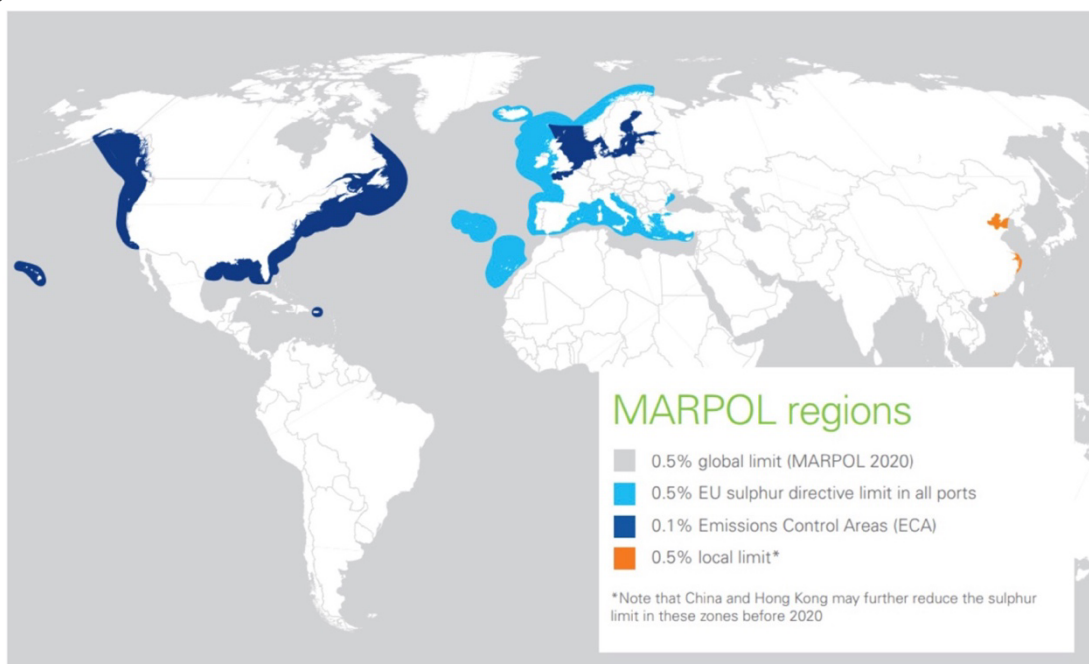
Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	
2012	0.1%	3.5%
2015		0.5%
2020		

Εικόνα 5.1: Όρια που υπάρχουν για την περιεκτικότητα θείου στο καύσιμο, Πηγή: <https://dieselnet.com>

Ο ίδιος ο IMO, παρόλο που θέσπισε τον κανονισμό δεν είναι υπεύθυνος για να ελέγχει την τήρηση του. Τον ρόλο αυτό έχει ως επί το πλείστον το Port State Control του κάθε λιμένα και δευτερευόντως η σημαία του κάθε κράτους. Για να μπορέσει να ελεγχθεί αν εφαρμόζεται το Sulphur cap, ο IMO θα πρέπει να εξετάζει την αναλογία εκπομπών SO₂(ppm)/CO₂(vol/vol). Πριν την έναρξη του μέτρου, ο λόγος αυτός για καύσιμα με περιεκτικότητα 3.5% S, κυμαινόταν από 151.7 μέχρι 151.9. Πλέον για καύσιμα με 0.5% S, βλέπουμε μία θεαματική μείωση αυτού του λόγου στο 21.7%. Στην περίπτωση δε, όπου έχουμε S = 0.1%, ο λόγος αγγίζει οριακά το 0% (4.1%).

Ο κανονισμός IMO 2020 Sulphur cap, είναι τόσο προσεκτικά διατυπωμένος και με τέτοιες λεπτομέρειες, που προβλέπει ακόμα και την περίπτωση ένα πλοίο το οποίο είναι εν πλω, λειτουργεί με Scrubber και άρα χρησιμοποιεί καύσιμο με κανονική περιεκτικότητα σε θείο, να χαλάσει το Scrubber του οπότε ξαφνικά να αρχίσει να εκπέμπει κανονικά SO_x χωρίς να γίνεται προηγουμένως κάποιο φιλτράρισμα. Στην εξαιρετικά σπάνια αυτή περίπτωση, υποχρεώνει το πλοίο να καταπλεύσει στον κοντινότερο λιμένα, ώστε είτε να επισκευάσει την πλυντηρίδα του είτε να εφοδιαστεί με καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και να συνεχίσει κανονικά το ταξίδι του. Στα πλαίσια της περαιτέρω αυστηροποίησης, ο IMO όρισε κάποιες γεωγραφικές ζώνες (κυρίως κοντά στις ακτές) στις οποίες όταν κινούνται τα πλοία, οφείλουν να καταναλώνουν καύσιμο με ακόμα πιο χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. (Paper List: 12)

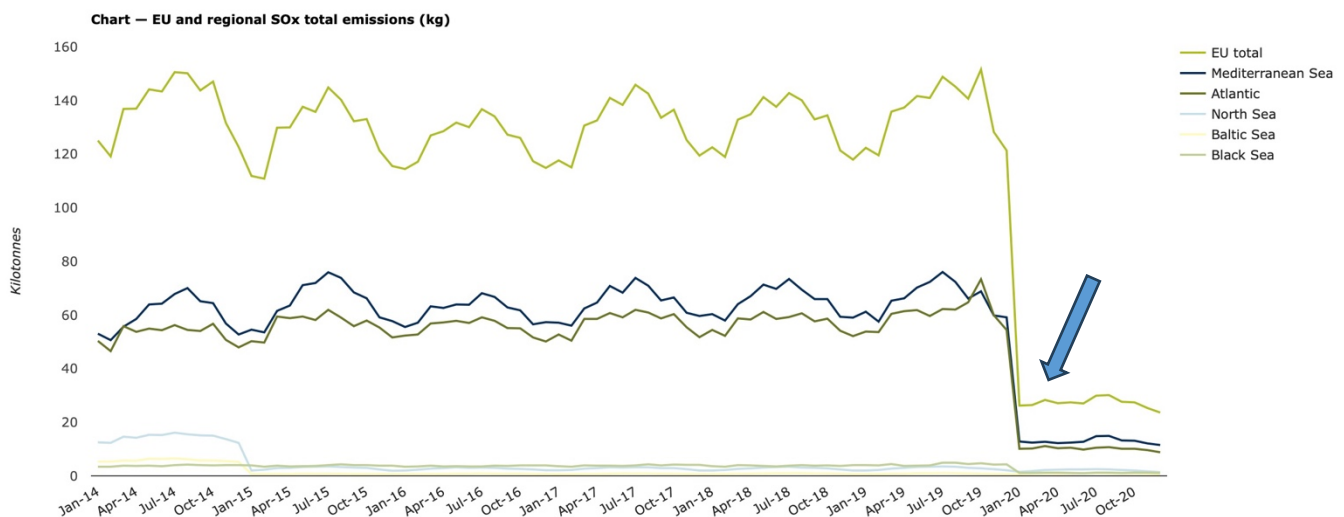
Πιο συγκεκριμένα επιτρέπεται το καύσιμο να περιέχει θείο σε ποσοστό μόλις 0.1%, δηλαδή 5 φορές χαμηλότερο, σε σχέση με τα ήδη μειωμένα όρια που θεσπίστηκαν. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται Sulphur Emission Control Areas και είναι πανομοιότυπες με αυτές που αφορούν τα ECA για τα NO_x. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε γραφικά αυτές τις περιοχές: (Link List: 26)



Εικόνα 5.2: Sulphur ECA, Πηγή: <https://www.purenviro.com/en/2018/09/11/new-sox-regulation-affects-70-000-ships/>

Από την παραπάνω εικόνα, μπορούμε να δούμε ότι οι περιοχές που έχουν τον αυστηρότερο περιορισμό αναφορικά με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο, δηλαδή αυτές που έχουν 0.1 τοις 100, είναι οι ακτές της Αμερικής, η Βόρεια και η Βαλτική θάλασσα, και κάποιες ακτές της Καραϊβικής. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε, ότι από το 2025 και μετά στις περιοχές που θα χαρακτηρίζονται ως Emission Control Areas, θα ανήκει και η μεσόγειος θάλασσα.

Στην γραφική παράσταση που ακολουθεί, βλέπουμε την θεαματική μείωση που υπάρχει στις εκπομπές SOx πριν και μετά το Sulphur Cap του 2020. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται οι εκπομπές σε οξειδία του αζώτου πριν τον Ιανουάριο του 2020, και αμέσως μόλις τίθεται σε ισχύ ο κανονισμός, βλέπουμε την θεαματική μείωση. Ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στις χρονολογίες και ξεκινάει από τον Ιανουάριο του 2014 ενώ ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στα Kilotones of SOx per year.



Εικόνα 5.3: Μείωση SOx με την εφαρμογή του IMO Sulphur Cap, Πηγή: <https://clearseas.org/insights/what-is-imo-2020/>

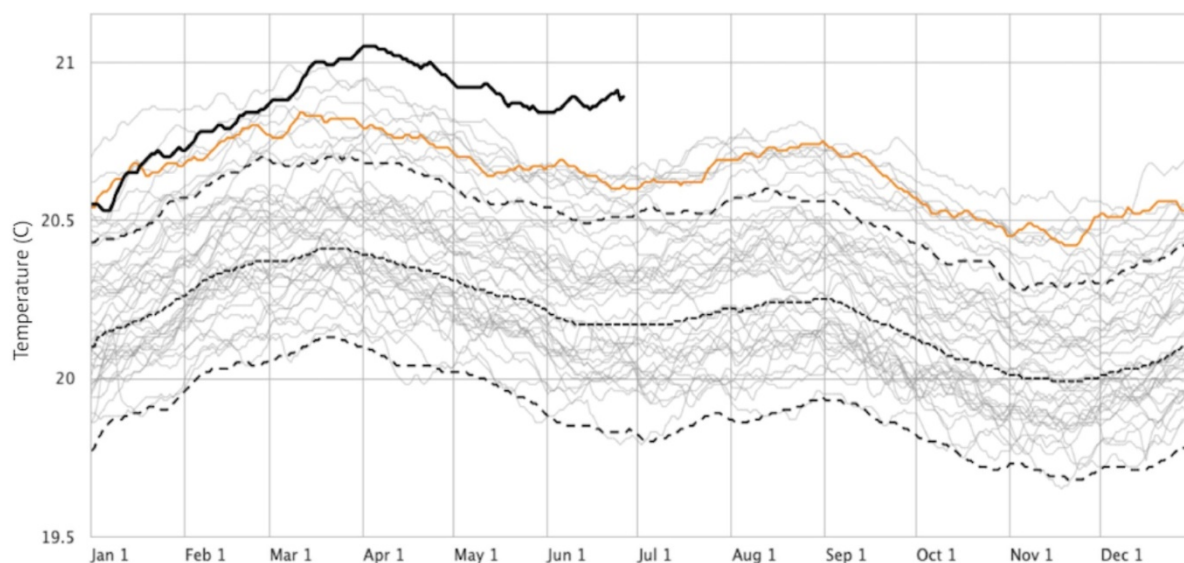
Στο σημείο όπου δείχνει το μπλε βέλος, βλέπουμε την αλλαγή στις εκπομπές. Από περίπου 140 kilotons ετησίως, η καμπύλη μειώνεται στους 30 – πρόκειται δηλαδή για μία μείωση της τάξεως του 366%. Τα διαφορετικά χρώματα που απεικονίζονται στην γραφική παράσταση, αναφέρονται στις διαφορετικές θάλασσες για τις οποίες έχει γίνει η μελέτη. Πιο συγκεκριμένα η μπλε γραμμή αναφέρεται στην μεσόγειο θάλασσα, η οποία όπως υπογραμμίσαμε θα ανήκει σε Emissions Control Area από το 2025 και αυτό θα έχει ως άμεση συνέπεια την περαιτέρω μείωση των εκπομπών, η σκούρα πράσινη στον ατλαντικό ωκεανό και η λαχανί στην Ευρώπη γενικότερα. (Link List: 27)

5.4 Κίνδυνος αύξησης θερμοκρασίας λόγω Sulphur Cap

Πέρα από τις αρνητικές συνέπειες που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, οι οποίες ελλοχεύουν πολλούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, είναι χρήσιμο να τονιστεί το γεγονός ότι, η πολύ μεγάλη μείωση του SO₂ την οποία επιθυμεί ο IMO με το Sulphur CAP 2020, θα προκαλέσει πρόβλημα στο περιβάλλον καθώς το SO₂ έχει ισχυρή επίδραση στην ψύξη του κλίματος και στην θερμοκρασία της θάλασσας, τόσο μέσω της άμεσης ανάκλασης του εισερχόμενου ηλιακού φωτός όσο και με την λειτουργία του ως πυρήνας συμπύκνωσης των νεφών. Δεδομένης της επίδρασης του στην ψύξη του κλίματος, μία μείωση των SO₂ κατά 10%, θα μπορούσε θεωρητικά να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Το πόσο μεγάλη θα είναι αυτή η αύξηση δεν μπορούμε να το προβλέψουμε με βεβαιότητα, σίγουρα όμως θα προκληθεί κάποιο πρόβλημα. Τα τελευταία 2 χρόνια έχει δοθεί πολύ μεγάλη έμφαση στην θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας παγκοσμίως, καθώς αρκετοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι η σταδιακή κατάργηση του θείου στα καύσιμα των πλοίων θα μπορούσε να είναι αρχή για την επιπλέον υπερθέρμανση του πλανήτη, ένα φαινόμενο το οποίο ήδη προσπαθούμε να αντιμετωπίσουμε και σε καμία των περιπτώσεων δεν θέλουμε να χειροτερέψουμε

Η παρακάτω γραφική παράσταση μας δείχνει την παγκόσμια θερμοκρασία της θάλασσας (SST) και προέρχεται ένα σύνολο δεδομένων της εθνικής υπηρεσίας ωκεανών και ατμόσφαιρας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Το νεότερο έτος (2023) εμφανίζεται με την συμπαγή μαύρη γραμμή ενώ το 2022 με την πορτοκαλί γραμμή. Τα προηγούμενα έτη εμφανίζονται με τις υπόλοιπες γραμμές.

Global daily sea surface temperatures between 1981–2023 (C)



Εικόνα 5.4: Θερμοκρασία Επιφάνειας θάλασσας, Πηγή: https://climatereanalyzer.org/clim/t2_daily/?dm_id=world

Αξίζει δε να αναφερθεί το γεγονός ότι η τρέχουσα μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, είναι κατά 0.2 βαθμούς κελσίου υψηλότερη σε σχέση με το έτος 2022. Επιπλέον από την γραφική παράσταση, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι καθώς τα χρόνια περνάνε, η θερμοκρασία της θάλασσας έχει αυξηθεί αρκετά.

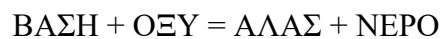
Κάνοντας χρήση ενός απλού μοντέλου το οποίο έκανε σύγκριση μεταξύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πριν και μετά το Sulphur cap, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η μείωση των εκπομπών σε SO₂, αύξησε την ακτινοβολία κατά 0.079 watt ανά τετραγωνικό μέτρο σε όλη την επιφάνεια της γης. Η μελέτη αυτή προήλθε από τον καθηγητή του Πανεπιστημίου του Leeds Prof. Piers Foster και συγκλίνει αρκετά με άλλες που έχουν γίνει, οι οποίες αξιολογούν το πιθανό αντίκτυπο που θα έχει αυτή η ακαριαία μείωση των εκπομπών σε SO₂. Με βεβαιότητα μπορούμε να αποφανθούμε, ότι για να αποφάσισε ο IMO να εφαρμόσει αυτό το οριζόντιο μέτρο περιορισμού των SO_x emissions, σίγουρα έχουν ληφθεί υπόψιν όλα τα παραπάνω που αναφέρθηκαν σχετικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη και την αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας, ωστόσο ενδεχόμενος να κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι προς όφελος του κοινωνικού συνόλου και της υγείας μας η μείωση των εκπομπών, μίας και δεν πρέπει να ξεχνάμε πόσα προβλήματα μπορούν να προκύψουν από τα δι – οξειδία του θείου.

5.5 Σύστημα καθαρισμού καυσαερίων Scrubber

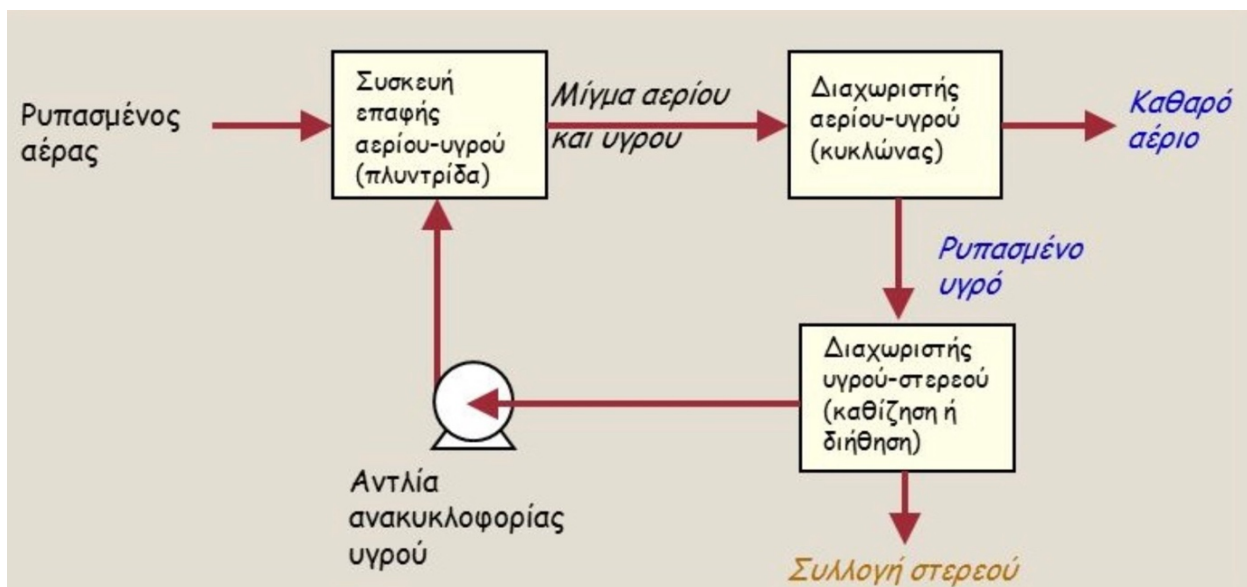
Όπως αναφέραμε ήδη, έπειτα από την στιγμή που ο IMO έθεσε σε εφαρμογή τον κανονισμό περιορισμού των διοξειδίων του θείου, όλες οι ναυτιλιακές εταιρείες υποχρεώθηκαν είτε να εφοδιάσουν τα πλοία με καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο ώστε να περιορίσουν τις εκπομπές τους, είτε να εγκαταστήσουν στα πλοία τους ένα σύστημα το οποίο θα απομακρύνει από τα καυσαέρια τα SO_x και έτσι το πλοίο θα συνεχίσει να κινείται με το ίδιο καύσιμο (δηλαδή με την ίδια περιεκτικότητα σε θείο) που είχε πριν το Sulphur Cap του 2020.

Το σύστημα αυτό που οι ναυτιλιακές εταιρείες έχουν την επιλογή να εγκαταστήσουν, λέγεται Scrubber (ή στα ελληνικά «Πλυντηρίδες») και ουσιαστικά πρόκειται για μία συσκευή ελέγχου της αέριας ρύπανσης, όπου κύριο μέλημα τους είναι η απομάκρυνση των σωματιδίων και των αέριων ρύπων που μπορεί να περιέχονται στα καυσαέρια των πλοίων. Είναι λογικό καθώς δεν είναι μόνο τα πλοία που παράγουν βλαβερά για το περιβάλλον απόβλητα, τα Scrubber να χρησιμοποιούνται και για άλλους τομείς της βιομηχανίας όπως για παράδειγμα η εξαγωγή των καυσαερίων στα διυλιστήρια κτλ. (Paper List: 13)

Η βασική αρχή λειτουργίας όλων των Scrubber ανεξάρτητα από το σε ποια κατηγορία ανήκουν (γίνεται αναφορά για τις κατηγορίες σε επόμενες σελίδες) είναι η εξής: Τα καυσαέρια τα οποία εκλύονται από τον κινητήρα με πολύ υψηλή ταχύτητα, περνάνε από την πλυντηρίδα, όπου εκεί ψεκάζονται με ένα αλκαλικό διάλυμα το οποίο εξουδετερώνει τη όξινη φύση των καυσαερίων, δηλαδή τα SOx, και έτσι αυτό που απομένει είναι μία σκόνη, η οποία συλλέγεται προσεκτικά και παραδίδεται στον λιμένα κατάπλου του πλοίου για περαιτέρω επεξεργασία. Πέρα από τα SOx, οι πλυντηρίδες είναι ικανές να απομακρύνουν ακόμα και πολύ μικρά σωματίδια (particular matters) της τάξεως των 10 μικρομέτρων. Είναι πρόδηλο ότι στην συνέχεια τα καυσαέρια διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα, απαλλαγμένα πλέον από την πλειονότητα των βλαβερών ουσιών που είχανε. Η σκόνη που όπως είπαμε προκύπτει, βασίζεται στην χημική αντίδραση:



Στην περίπτωση που μελετάμε, τα διοξείδια του θείου είναι όξινα, και λόγω του ότι αντιδρούν με μία βάση (το αλκαλικό διάλυμα) παράγεται το άλας (σκόνη) και το νερό. Στην παρακάτω φωτογραφία διακρίνεται τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος πλυντηρίδας:



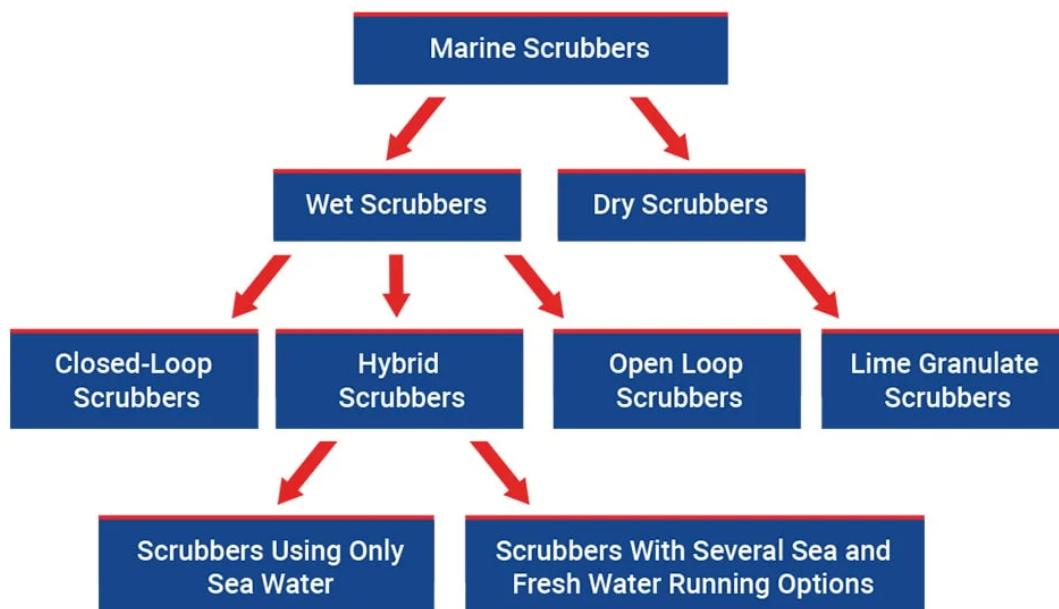
Εικόνα 5.5: Κυριότερα Τμήματα ενός συστήματος πλυντηρίδας, Πηγή: <https://slideplayer.gr/slide/11165096/>

Όπως βλέπουμε στην φωτογραφία, γίνεται εισαγωγή του ρυπασμένου αέρα (στην προκειμένη περίπτωση καυσαέρια από τον κινητήρα) και κατευθύνεται στην «συσκευή επαφής». Εκεί γίνεται μία πρώτη επαφή των καυσαερίων με το αλκαλικό διάλυμα. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι όταν τα λεπτά σωματίδια έρθουν σε επαφή με ένα υγρό, τότε άμεσα προσκολλώνται σε αυτό. Για να αυξηθεί ο χρόνος επαφής των σωματιδίων με το αλκαλικό διάλυμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές σειρές από αντιδραστήρια όπως ο

ασβεστόλιθος, τα οποία είναι ικανά να επιβραδύνουν την κατακόρυφη ροή του νερού μέσα στην πλυντηρίδα, και να εντείνουν την διαδικασία ψύξης των καυσαερίων και εξουδετέρωσης του όξινου υγρού. Σε δεύτερο στάδιο το μίγμα του ρυπασμένου αέρα και του αλκαλικού διαλύματος μεταβιβάζεται στον επονομαζόμενο «Διαχωριστή» - όπου εκεί στροβιλίζεται με υψηλή ταχύτητα και έτσι πετυχαίνουμε τον διαχωρισμό των βλαβερών ουσών με τα καθαρά καυσαέρια τα οποία πλέον διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα. Τέλος η σκόνη η οποία έχει προκύψει ως προϊόν της αντίδρασης συλλέγεται για να παραδοθεί στον λιμένα.

Η παραπάνω διαδικασία που περιγράψαμε είναι η βασική αρχή λειτουργίας των Scrubber, η οποία δεν διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με το τι τύπο Scrubber έχουμε (δηλαδή αν είναι ανοικτού ή κλειστού τύπου). Εξαιρέση αποτελούν τα συστήματα ξηρού τύπου, για τα οποία όμως γίνεται ειδική αναφορά. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει συνοπτικά τις διάφορες κατηγορίες των Scrubber. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν οι ακόλουθοι τύποι Scrubber:

Classification of Marine Scrubbers Based on Their Operational Principle



Εικόνα 5.6: Ταξινόμηση Scrubber, Πηγή: <https://www.adv-polymer.com/blog/scrubbers-on-marine-vessels>

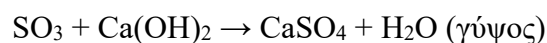
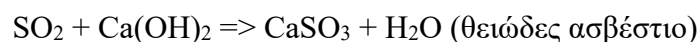
Όπως βλέπουμε από την παραπάνω εικόνα, τα Scrubber που χρησιμοποιούνται στα πλοία, μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 μεγάλες κατηγορίες. Σε αυτά του υγρού τύπου, τα οποία

χωρίζονται σε ακόμα περισσότερες υποκατηγορίες, και σε αυτά του ξηρού τύπου. Θα ξεκινήσουμε την ανάλυση μας με την κατηγορία των Scrubber ξηρού τύπου, καθώς αυτά συνιστούν την μικρότερη κατηγορία:

5.5.1 Dry Scrubbers

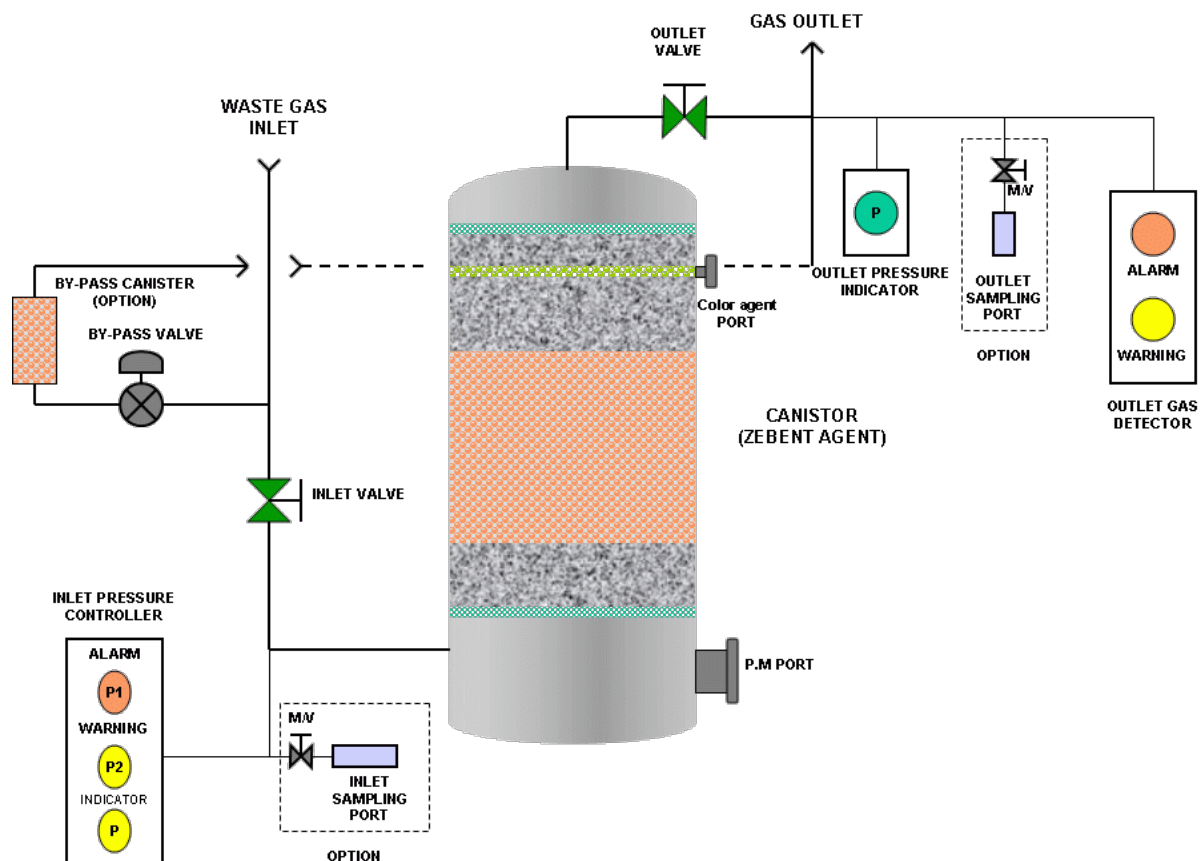
Σε αυτού το είδους Scrubber, το νερό ή κάποιο άλλο υγρό, δεν χρησιμοποιείται ως μέσο καθαρισμού των καυσαερίων. Αντίθετα χρησιμοποιούνται στερεά συστατικά όπως το οξειδίο του ασβεστίου και το ανθρακικό ασβέστιο, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα SOX των καυσαερίων τα οποία εισέρχονται στο Scrubber, να απορροφούνται και στην συνέχεια μέσω κάποιων χημικών αντιδράσεων να μετατρέπονται σε γύψο. (Paper List: 11)

Τα Dry Scrubber λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αντίστοιχα υγρού τύπου, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς υπάρχει παντελής απουσία του νερού. Με αυτόν τον τρόπο αποκτούν πλεονέκτημα στο ότι κατά την διαδικασία καθαρισμού καυσαερίων, καίγονται τυχόν υπολείμματα αιθάλης στο σύστημα. Το ασβέστιο το οποίο υπάρχει σε κόκκους καυστικού ασβέστη, αντιδρά με το διοξείδιο του θείου στα καυσαέρια για να σχηματιστεί σαν προϊόν της αντίδρασης το θειώδες ασβέστιο. Στην συνέχεια το θειώδες ασβέστιο οξειδώνεται με τον αέρα για να σχηματίσει αφυδατωμένο θειικό ασβέστιο, το οποίο με το νερό σχηματίζει γύψο. Τα ξηρά συστήματα Scrubber καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια από τα αντίστοιχα υγρού τύπου καθώς δεν χρειάζεται να εγκατασταθούν αντλίες κυκλοφορίας, για να κινείται το νερό, αφού όπως υπογραμμίσαμε δεν χρησιμοποιείται ως μέσο καθαρισμού. Ωστόσο ζυγίζουν αρκετά περισσότερο από τα Wet Scrubber. Οι χημικές αντιδράσεις που περιγράψαμε παραπάνω, φαίνονται παρακάτω:



Τα πλεονεκτήματα των Dry Scrubber σε σχέση με τα Wet Scrubber είναι ότι υπάρχει αποτελεσματική απομάκρυνση των οξειδίων του αζώτου και του θείου και ότι αυτός ο τύπος πλυντηρίδων, δεν έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υγρών αποβλήτων, τα οποία είναι πιο δύσκολα στην διαχείριση τους. Τέλος ο γύψος που παράγεται κατά την διαδικασία καθαρισμού δύναται να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Κάποια από τα μειονεκτήματά τους πέρα από το ζήτημα του επιπλέον βάρους, είναι το γεγονός ότι απαιτούν σημαντικό χώρο για την αποθήκευσή των χημικών αντιδραστηρίων και των προϊόντων που

σχετίζονται με την διαδικασία. Επιπλέον τα αντιδραστήρια που απαιτούνται είναι ιδιαίτερα ακριβά. Το μειονέκτημα του κόστους των αντιδραστηρίων σε συνδυασμό με το αυξημένο βάρος τους, το οποίο θα έχει άμεση συνέπεια στην κατανάλωση, τα κάνουν μη ελκυστικά για την χρήση σε πλοία. Στην εικόνα που ακολουθεί, βλέπουμε μια τυπική διάταξη scrubber ξηρού τύπου στην οποία είναι ευδιάκριτη η εισαγωγή των καυσαερίων, η πορεία που ακολουθεί ο καθαρισμός των καυσαερίων, αλλά και η έξοδός τους από την πλυντηρίδα.



Εικόνα 5.7: Διάταξη Scrubber Ξηρού τύπου, Πηγή: <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>

5.5.2 Wet Scrubbers

Τα συστήματα υγρού τύπου διακρίνονται σε 3 υποκατηγορίες. Στα ανοικτού βρόγχου, στα κλειστού βρόγχου και στα υβριδικά. Κοινό στοιχείο και στα 3 συστήματα, είναι η χρήση του θαλασσινού νερού ως αλκαλικό διάλυμα για την απομάκρυνση των οξειδίων του θείου.

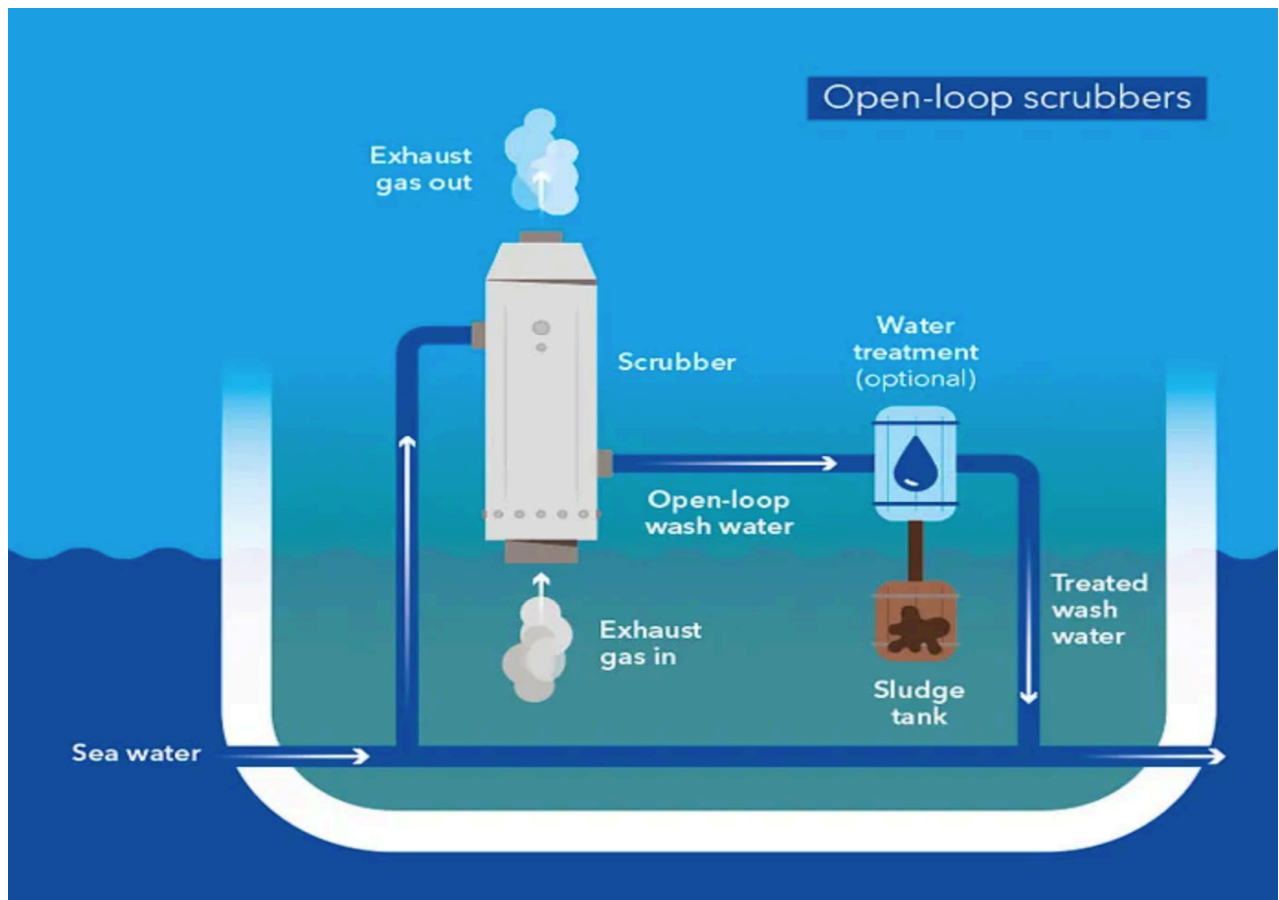
Τα scrubber ανοικτού κυκλώματος (ή όπως θα τα συναντήσει κανείς στα αγγλικά, Open Loop Systems) χρησιμοποιούνε το θαλασσινό νερό ως μέσο απομάκρυνσης των SOx, χωρίς να κρίνεται αναγκαία η χρήση άλλων χημικών πρόσθετων για την αποθείωση των καυσαερίων. Το ρεύμα των καυσαερίων εξέρχεται από τον κινητήρα και οδηγείται μέσα στο Scrubber, όπου εκεί μόνο με την χρήση θαλασσινού νερού επεξεργάζεται. Ο όγκος του θαλασσινού νερού που

απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, εξαρτάται από το μέγεθος του κινητήρα και την ισχύ που αποδίδει.

Μετά το πέρας της αποθείωσης, το νερό που χρησιμοποιήθηκε πέφτει σε ένα υγρό κάρτερ στο κάτω μέρος του scrubber και από εκεί θα πρέπει να υποβληθεί σε νέα επεξεργασία, ώστε να πληροί τα κριτήρια απόρριψης νερού, όπως αυτά ορίζονται από την Marpol. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι σε περίπτωση που το πλοίο βρίσκεται σε emission control areas, ενδέχεται να ισχύουν πρόσθετοι τοπικοί και εθνικοί περιορισμοί, οι οποίοι θα θέτουν ακόμα πιο αυστηρά κριτήρια από την Marpol για το νερό που απορρίπτεται. Στις περιοχές αυτές, το νερό πλύσης θα πρέπει να υποβληθεί σε περεταίρω επεξεργασία για να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα νερού που θα περιέχουν τέφρα, βαρέα μέταλλα και particular matters (pm), στοιχεία τα οποία αφαιρούνται από τα καυσαέρια κατά την διαδικασία του Scrubbing. Για αυτή την ενδεχόμενη επιπλέον επεξεργασία του νερού απόρριψης, θα πρέπει να γίνει εγκατάσταση πρόσθετου εξοπλισμού όπως φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες, κάτι το οποίο θα επιβαρύνει τις ναυτιλιακές εταιρίες με επιπλέον κόστος, αλλά και πρόσθετο βάρος στα πλοία τους, το οποίο θα έχει ως αντίκτυπο αυξημένη κατανάλωση.

Το σύστημα ανοικτού βρόγχου είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό, αλλά απαιτεί μεγάλη ικανότητα άντλησης νερού από την θάλασσα, καθώς όπως αναφέραμε, η ποσότητα του απαιτούμενου θαλασσινού νερού, είναι συνάρτηση του μεγέθους του κινητήρα και του φορτίου που λειτουργεί. Μία σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν και αφορά τα συστήματα ανοικτού βρόγχου, είναι ότι το θαλασσινό νερό πρέπει να έχει την απαιτούμενη αλκαλικότητα για να μπορεί χρησιμοποιηθεί στο scrubber και να είναι αποδοτικό. Όταν το νερό βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία δεν είναι κατάλληλο για χρήση και αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όταν το πλοίο πλέει κοντά στο ισημερινό, όπου η θερμοκρασία της θάλασσας είναι αυξημένη. Κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα των Open Loop Scrubber είναι ότι έχουν πολύ λιγότερα κινούμενα μέρη και έτσι είναι πολύ εύκολη η εγκατάστασή τους, αλλά και το γεγονός ότι εκτός από τους ελέγχους απορρύπανσης το σύστημα απαιτεί την ελάχιστη δυνατή συντήρηση. Ωστόσο υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να αναφερθούν, όπως για παράδειγμα, ότι η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται από την αλκαλικότητα της θάλασσας, αλλά και ότι λόγω του μεγάλου όγκου νερού που απαιτείται, το σύστημα καταναλώνει αρκετά υψηλή ισχύ. Τέλος στις ζώνες και τα λιμάνια των Emission Control Areas, θα πρέπει να καταναλώνονται καύσιμα υψηλότερου κόστους.

Στην εικόνα που ακολουθεί, βλέπουμε τα μέρη ενός Scrubber ανοικτού κυκλώματος. Μπορούμε να διακρίνουμε το κύριο χαρακτηριστικό που τα ξεχωρίζει, ότι δηλαδή το νερό που χρησιμοποιείται επιστρέφει στην θάλασσα.



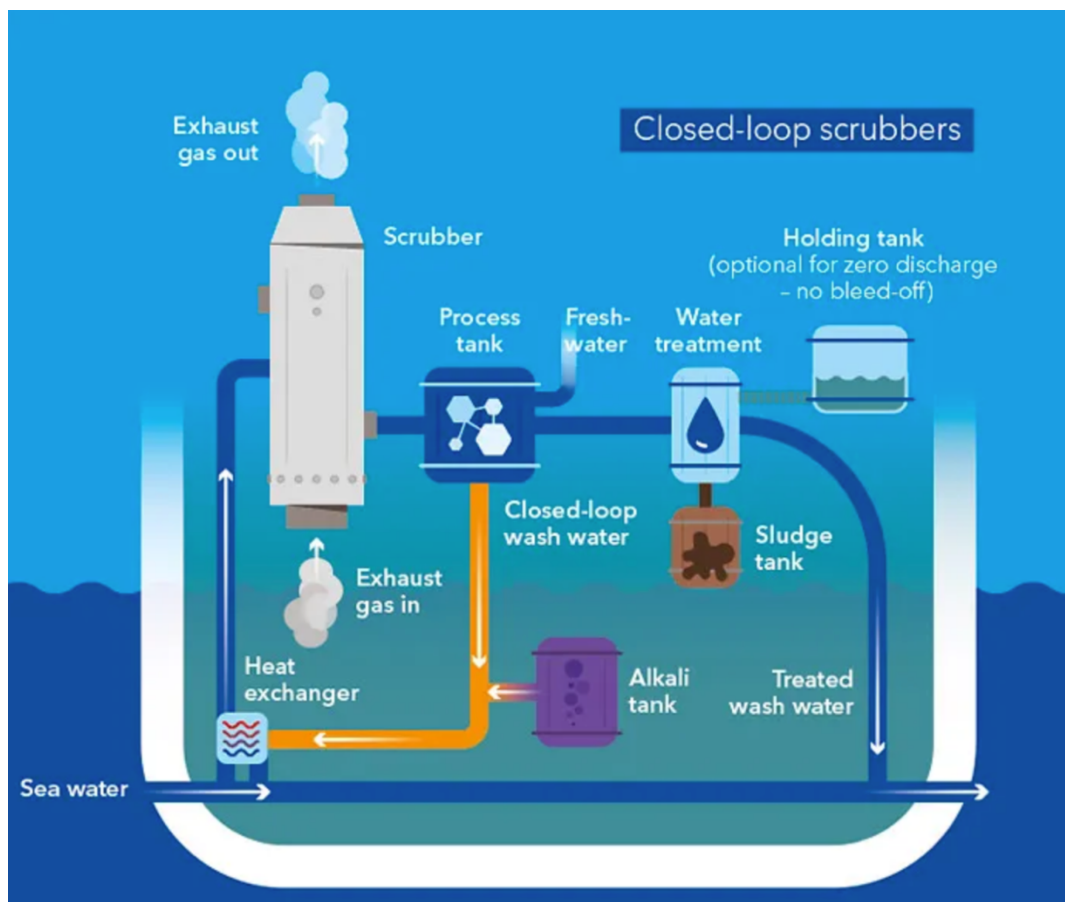
Εικόνα 5.8: Σύστημα Ανοικτού Βρόγχου, Πηγή: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance/>

Ένα scrubber κλειστού βρόγχου, έχει παρόμοια αρχή λειτουργίας με αυτό του ανοικτού βρόγχου, με την διαφορά ότι το νερό πλύσης δεν εκβάλλεται στην θάλασσα, αλλά καθαρίζεται και ανακυκλοφορεί στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία καθαρισμού των καυσαερίων, είναι ανεξάρτητη και δεν επηρεάζεται η απόδοσή της από την αλκαλικότητα της θάλασσας, όπως συνέβαινε με τα συστήματα Open Loop Scrubbers. Στο νερό που κυκλοφορεί στο κλειστό κύκλωμα, προστίθεται μία χημική ουσία, με συνηθέστερο το υδροξείδιο του νατρίου (σπανιότερα θα συναντήσουμε και οξείδιο του μαγνησίου) με σκοπό τον έλεγχο της αλκαλικότητας του νερού. Τα οξείδια του θείου που προέρχονται από τα καυσαέρια, μετατρέπονται σε θειικό νάτριο.

Το εν λόγω σύστημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με γλυκό είτε με θαλασσινό νερό. Ανεξάρτητα από το είδος του νερού, ανά τακτά χρονικά διαστήματα πρέπει μία μικρή

ποσότητα του νερού να αφαιρείται από το κύκλωμα και να προστίθεται νέα, για να αποφευχθεί συσσώρευση θειικού νατρίου στο σύστημα.

Οι κατασκευαστές των scrubber ισχυρίζονται ότι μία πλυντηρίδα κλειστού βρόγχου απαιτεί περίπου το μισό ή και λιγότερο από το νερό πλύσης συγκριτικά με ένα σύστημα ανοικτού βρόγχου - για να πετύχει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα σε επίπεδο αφαίρεσης SOx. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι ότι τα υψηλά επίπεδα αλκαλικότητας διασφαλίζονται με τον άμεσο έλεγχο του επιπέδου PH, χρησιμοποιώντας κάποιες πρόσθετες ουσίες όπως το υδροξείδιο του νατρίου. Ωστόσο απαιτούνται περισσότερες δεξαμενές, όπως για παράδειγμα μία δεξαμενή επεξεργασίας του νερού, μία δεξαμενή συγκράτησης μέσω της οποίας απαγορεύεται η απόρριψη του νερού στη θάλασσα αλλά και μία δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία έχει ως αποκλειστικό σκοπό την ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού. Τα scrubber closed loop, έχουν πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης της τάξεως του 90%, και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για καθαρισμό καυσαερίων είναι πολύ μεγάλες ή και σε περιπτώσεις όπου η αλκαλικότητα της θάλασσας είναι ανύπαρκτη. Ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι ότι απαιτούν αρκετό αποθηκευτικό χώρο για να μπορούν να διαχειρίζονται τα λύματα, μέχρι αυτά να απορριφθούν. Στην εικόνα που ακολουθεί, βλέπουμε ένα scrubber κλειστού τύπου και τα διάφορα σημεία λειτουργίας του.



Εικόνα 5.9: Σύστημα Κλειστού Βρόγχου, Πηγή: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance/>

Τέλος στην κατηγορία των Wet Scrubbers, εντάσσονται και τα υβριδικά Scrubber. Αυτά πρόκειται για μία κατηγορία πλυντηρίδων, η οποία έχει την δυνατότητα να λειτουργεί είτε σαν σύστημα open loop, είτε σαν σύστημα closed loop. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται χρήση θαλασσινού νερού, ενώ στην δεύτερη γλυκού νερού. Τα υβριδικά συστήματα προσφέρουν μία απλή και εύκολη λύση για την εκ των υστέρων τοποθέτηση σε πλοία, τα οποία λειτουργούσαν αρχικά μόνο με καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, κοινώς Heavy Fuel Oil. Ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι το πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασής τους και ο μεγάλος χρόνος παράδοσης που έχουν, στοιχεία τα οποία όμως μπορούν να αποσβεσθούν αν αναλογιστούμε ότι τα πλοία στα οποία είναι εγκατεστημένα τα Hybrid Scrubbers, μπορούν να πλέουν σε ECA zones πολύ περισσότερο χρόνο σε σχέση με τα συστήματα ανοικτού βρόγχου, και ταυτόχρονα όταν βρίσκονται στην ανοικτή θάλασσα να χρησιμοποιούν το open loop system.

Όλα τα παραπάνω τα οποία περιγράψαμε, μπορούμε να τα δούμε συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα, τον οποίο έχει φτιάξει ο αμερικάνικος νηογνώμονας. Αυτός ο πίνακας αποσκοπεί στο να κάνει ευκολότερη την σύγκριση διαφορετικών ειδών πλυντηρίδων.

EGCS	Pros	Cons	Application
Open Loop	<ul style="list-style-type: none"> • Uses seawater for scrubbing; does not usually involve storage or handling of hazardous chemical (caustic soda) • Comparatively simple system; less equipment/system compared to closed loop • CAPEX and OPEX relatively low 	<ul style="list-style-type: none"> • Not suitable for low alkalinity water • Restriction of washwater discharge in certain coastal/port areas • Large washwater demand 	<ul style="list-style-type: none"> • Vessels operating most of the time in the ocean/open sea • Vessels not entering areas with washwater discharge restriction
Closed Loop	<ul style="list-style-type: none"> • Independent of operation location - in low alkalinity water; in discharge restricted coastal/port areas • Effluent is stored onboard for the duration that the tank volumes will permit 	<ul style="list-style-type: none"> • Complex washwater system • Additional equipment/system for water treatment • More space required • Special care for handling and storage of NaOH solution, a hazardous substance. • Operation duration limited by effluent tank size • Relatively higher CAPEX • Relatively higher OPEX due to use of NaOH and residue handling 	<ul style="list-style-type: none"> • Vessels trading constantly in areas with discharge restriction or low alkalinity water
Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Significant flexibility for operating in all regions regardless of seawater alkalinity or temperature • Effluent may be stored onboard for the duration that the tank volumes will permit 	<ul style="list-style-type: none"> • Complicated system with more components • More space required • Handling and storage of NaOH, and residue disposal for closed mode operation • Highest CAPEX • Higher OPEX due to use of NaOH and residue handling 	<ul style="list-style-type: none"> • Both in ocean/open sea and discharge/operation restricted areas

Εικόνα 5.10: Συγκριτικός Πίνακας Scrubber με βάση τον ABS, Πηγή: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/exhaust-gas-scrubber-systems-advisory.pdf>

θα εγκατασταθεί το Scrubber αλλά και από τυχόν άλλες απαιτήσεις της εκάστοτε ναυτιλιακής εταιρείας.

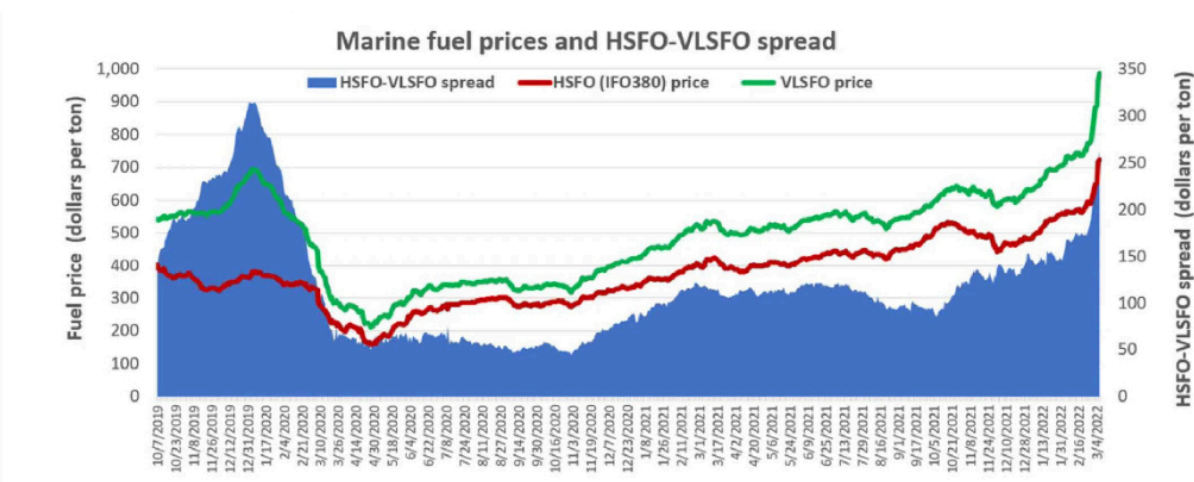
5.6 Λόγοι επιλογής των Scrubber

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι οι οποίοι θα οδηγήσουν μία ναυτιλιακή εταιρεία στο να προβεί στην εγκατάσταση scrubber στα πλοία της. Παρακάτω παρατίθεται οι κυριότεροι από αυτούς:

- Τρέχουσες τιμές των καυσίμων

Η μεγαλύτερη «καθημερινή» δαπάνη για ένα πλοίο και μία ναυτιλιακή εταιρεία είναι το καύσιμο, στοιχείο απαραίτητο για την λειτουργία του πλοίο καθώς χωρίς αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει. Η τιμή των καυσίμων έχει καθοριστικό ρόλο για την διαμόρφωση των ναυλολογίων αλλά και για το τελικό εισόδημα που αποφέρει κάθε πλοίο. Το πρόβλημα που συναντάται ειδικά στην Ευρώπη και πολύ λιγότερο στην Αμερική, είναι ότι δεν είναι ενεργειακά ανεξάρτητη και αυτό έχει ως συνέπεια τα καύσιμα εν τέλη να κοστίζουν πολύ πιο ακριβά.

Σύμφωνα με τους ειδικούς στο θέμα του Bunkering, οι νέες τιμές των καυσίμων έπειτα από τον αέναο πόλεμο μεταξύ Ρωσίας και Ουκρανίας είναι δύσκολο έως αδύνατο να προβλεφθούν για τα διάφορα λιμάνια του κόσμου. Η πρόβλεψη των τιμών γίνεται μόνο μέσω εικασιών. Το μόνο το οποίο θεωρείται ευρέως αποδεκτό είναι ότι η διαφορά στην τιμή μεταξύ Low Sulphur Fuel και Heavy Fuel Oil θα γίνει ακόμα μεγαλύτερη, δηλαδή το καύσιμο σε χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο θα ακριβύνει υπέρμετρα. Επιπλέον σύμφωνα με μία τελευταία έρευνα του πανεπιστημίου της Σαγκάη, μόνο το 27% του παγκοσμίου στόλου έχει εγκαταστήσει Scrubber, πράγμα το οποίο σημαίνει μεγάλη ζήτηση για το VLSFO (very low Sulphur fuel oil – το ποσοστό σε θείο δεν υπερβαίνει το 0.5%).



Εικόνα 5.11: Εξέλιξη τιμών HSFU και VLSFU, Πηγή: <https://www.transportenvironment.org/topics/ships>

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε την εξέλιξη των τιμών στο HSFU και στο VLSFU. Ενδεικτικά τον Μάρτιο του 2022, όπου ξεσπάσει ο πόλεμος, η τιμή του VLSFU εκτινάσσεται στους 350 δολάρια ανά τόνο. Από τα παραπάνω λοιπόν, είναι πρόδηλο ότι με τις τιμές των καυσίμων δεν μπορεί να υπάρχει μία βεβαιότητα στον πλοιοκτήτη σχετικά με τα έξοδα του πλοίου του. Αντίθετα κάνοντας χρήση Scrubber, επενδύεται αρχικά ένα ποσό το οποίο στην συνέχεια και με το πέρασμα των χρόνων, λογικά θα αποσβεσθεί. (Paper List: 12)

- Προγραμματισμένο Dry Dock για την εγκατάσταση των Scrubber

Τα πλοία σε όλη την διάρκεια της ζωής του, είναι υποχρεωμένα να ανταπεξέρχονται σε κάποιες προγραμματισμένες επιθεωρήσεις. Από αυτές τις επιθεωρήσεις κάποιες μπορούν να γίνονται όσο το πλοίο είναι μέσα στην θάλασσα, και για κάποιες άλλες πρέπει υποχρεωτικά με βάση τον κανονισμό να βγει στην δεξαμενή. Από την στιγμή που το πλοίο ανέβει στην δεξαμενή, αυτόματα παύει να είναι προσοδοφόρο αφού δεν κινείται. Εκείνη την περίοδο λοιπόν είναι μία ευκαιρία για την ναυτιλιακή εταιρεία, να εγκαταστήσει τις πλυντηρίδες. Με τον τρόπο αυτό οι εταιρείες θα αποκτήσουν ένα επιπλέον κίνητρο για να εγκαθιστούν σε μεγαλύτερο βαθμό scrubber στα πλοία τους, και αυτά να μην χρησιμοποιούν το ασύμφορο VLSFU.

- Ανταγωνιστικό πλεονέκτημα

Όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά οι ειδικοί στην ναυτιλία, η εγκατάσταση ενός συστήματος Scrubber, αν και φαντάζει δύσκολη σαν διαδικασία και ταυτόχρονα είναι πραγματικά δαπανηρή, αποδεικνύεται ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα πλοία που κινούνται με Low Sulphur Fuel, γιατί αποτελεί μία «πράσινη ενέργεια» εκ μέρους των πλοιοκτητών. Όσο αίολο και αν ακούγεται το εν λόγω επιχείρημα όλες οι εταιρίες επικροτούν τις πράσινες τεχνολογίες και αυτές είναι αποδεκτές από την κοινότητα των ναυλώσεων με πολύ θετικά αποτελέσματα σε θέματα ναύλων και μακροπρόθεσμων ναυλώσεων. Επιπλέον είναι γνωστό, ότι ένα πλοίο το οποίο είναι εξοπλισμένο με Scrubber, μπορεί να προσφέρει τις υπηρεσίες του σε αρκετά χαμηλότερες τιμές, καθώς όπως είδαμε στην προηγούμενη γραφική παράσταση, η τιμή του μαζούτ, σε σχέση με το Low Sulphur Fuel είναι περίπου υποδιπλάσια, κάτι το οποίο σημαίνει μειωμένες τιμές των ναύλων.

- Αυξημένη μεταπωλητική αξία

Ένας από τους κύριους παράγοντες που εξετάζουν οι ναυτιλιακές εταιρείες πριν προβούν στην εγκατάσταση Scrubber στα πλοία τους είναι η μεταπωλητική αξία του πλοίου τους. Η προστιθέμενη αξία που προσδίδει σε ένα πλοίο το Scrubber είναι ένας σημαντικός παράγοντας για κάποιους πλοιοκτήτες. Καθώς όπως εξηγήσαμε παραπάνω, η παγκόσμιες τάσεις είναι να

επιβραβεύονται οι πράσινες τεχνολογίες, οι πλοιοκτήτες με Scrubber, αναμένουν όχι μόνο να λάβουν "πίσω" τα χρήματά τους σε αυξημένους ναύλους, αλλά και σε αυξημένη αξία του πλοίου τους, για να πωληθεί μεταγενέστερα. Είναι πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για κάποιον ο οποίος θα αγοράσει ένα μεταχειρισμένο πλοίο, αυτό να είναι ήδη εξοπλισμένο με Scrubber και να μην χρειάζεται να τα εγκαταστήσει ο ίδιος. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι ο πλοιοκτήτης που θα αγοράσει το πλοίο, θα εφοδιάζει αυτό εξαρχής με HFO (heavy fuel oil = μαζούτ) και έτσι θα εξοικονομεί χρήματα.

- Λιγότερα μακροχρόνια προβλήματα στην κύρια μηχανή του πλοίου:

Αναφορικά με τα προβλήματα των κινητήρων, είναι πιθανό ότι τα νέου τύπου καύσιμα που θα χρησιμοποιούνται (Low Sulphur Fuel etc.) να προκαλέσουν προβλήματα στις μηχανές των πλοίων και γενικότερα στα μηχανήματα του. Αυτό κάθε άλλο παρά αβάσιμο δεν μπορεί να θεωρηθεί, καθώς τα νέα αυτά καύσιμα λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, παρουσιάζουν και μειωμένη λιπαντική ικανότητα, και αυτό μπορεί μακροχρόνια να προκαλέσει νέα προβλήματα. Τα νέα καύσιμα είναι μείγματα τα οποία παρόλο που οι μεγάλες πετρελαϊκές εταιρείες διασφαλίζουν ότι έχουν ελεγχθεί και είναι ικανά για καύση σε πετρελαιομηχανές, εξακολουθούν να μην έχουν δοκιμαστεί εκτενώς και σε πραγματικές συνθήκες. Η επισημασμένη μη συμβατότητα των νεών καυσίμων, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των κύριων τμημάτων του κινητήρα, όπως για παράδειγμα αστοχία στην αντλία καυσίμου και αυτό με την σειράς του να προκαλέσει διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα. Όλα τα παραπάνω είναι απίθανο να συμβούν στα πλοία που χρησιμοποιούν συστήματα Scrubber, καθώς το μαζούτ είναι ένα καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται πάρα πολλά χρόνια στη ναυτιλία και πρακτικά είναι δοκιμασμένο σε όλες τις συνθήκες.

Οι παραπάνω λόγοι που αναλύθηκαν, είναι οι κυριότεροι για τους οποίους η εγκατάσταση του συστήματος Scrubber καθίσταται πιο συμφέρουσα επιλογή, συγκριτικά με το καύσιμο VLSFO.

5.7 Οικονομικό παράδειγμα εγκατάστασης Scrubber

Στην παράγραφο αυτή, θα γίνει μία ανάλυση για το πια λύση είναι πιο προσοδοφόρα:

Έστω ότι η τιμή για την εγκατάσταση ενός συστήματος Scrubber είναι 6.000.000 δολάρια και ότι το πλοίο μας είναι ένα VLCC. Επιπλέον ορίζουμε ότι η διάρκεια ζωής του Scrubber είναι 15 χρόνια, οπότε η απόσβεση της επένδυσης μας θα πρέπει να γίνει σε διάστημα μικρότερο των 10-12 ετών, αλλιώς δεν θα υπάρχει μεγάλο περιθώριο κέρδους.

Στον παρακάτω πίνακα εξετάζονται 4 σενάρια, όπου και στα 4 η τιμή των Low Sulphur Fuel και του HSFO διαφέρει. Όταν η διαφορά της τιμής είναι 20% και ταυτόχρονα η τιμή του HSFO είναι υψηλή, τότε η περίοδος απόσβεσης του Scrubber είναι μόλις 3.3 χρόνια. Εάν η τιμή του HSFO πέσει, αλλά η διαφορά παραμένει σταθερή στο 20% τότε η απόσβεση ανεβαίνει στα 4.2 χρόνια. Τέλος αν η διαφορά τιμής αυξηθεί στο 50% τότε η απόσβεση για τις πληντυρίδες πέφτει στους μόλις 15 μήνες και αν δεν υπάρχει διαφορά τιμής έχουμε μηδενική απόσβεση.

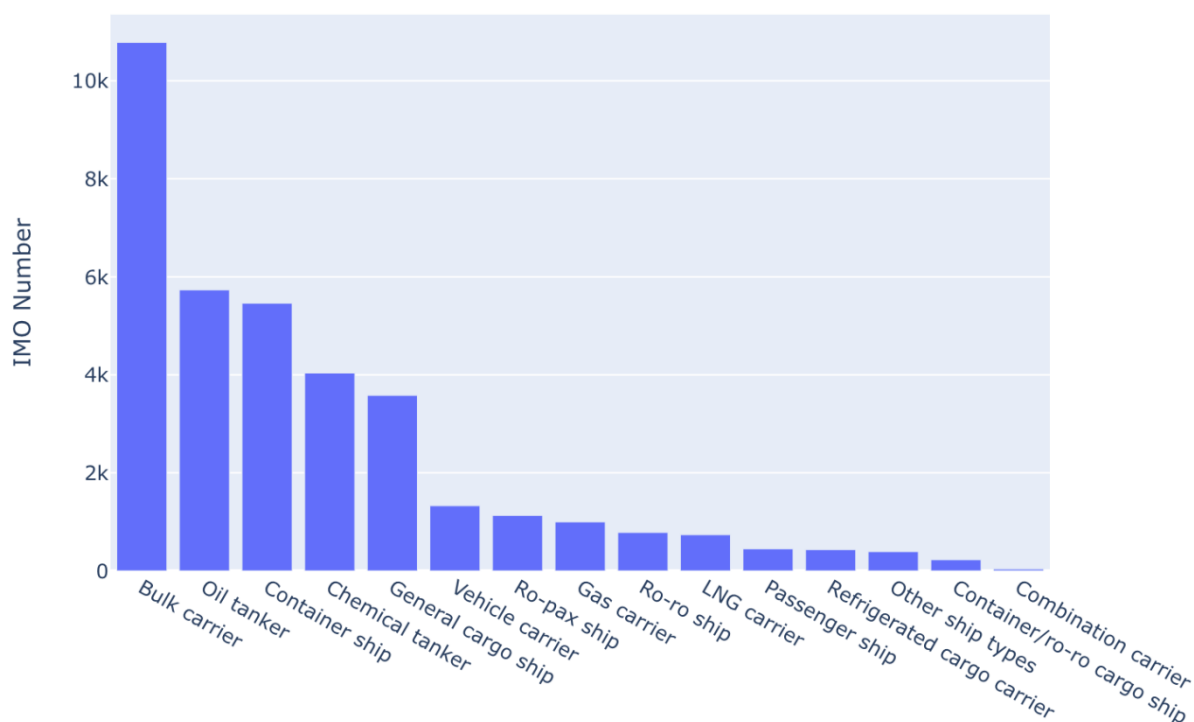
	Scenario 1: Base case	Scenario 2: Lower conventional fuel cost	Scenario 3: Higher low- sulphur fuel cost	Scenario 4: Lower low- sulphur fuel cost
Scrubber installation cost	\$6.000.000	\$6.000.000	\$6.000.000	\$6.000.000
Bunker fuel cost per ton	\$450	\$350	\$450	\$450
Low-sulphur fuel cost per ton	\$540	\$420	\$675	\$450
Difference	\$90 (20%)	\$70 (20%)	\$225 (50%)	\$0 (0%)
Cost saving (lifecycle/ interval of 15 years)	\$27.216.000	\$21.168.000	\$68.040.000	\$0
Annual saving	\$1.814.400	\$1.411.200	\$4.536.000	\$0
Payback	3.3 years	4.2 years	1.3 years	0

Εικόνα 5.12: Οικονομική Ανάλυση Scrubber, Πηγή: <https://www.hempel.com/markets/marine/technical-articles/the-scrubber-dilemma-and-the-impact-of-selecting-the-optimum-hull-coating>

Κεφάλαιο 6: SPSS

6.1 Εισαγωγή

Για αρχή θα πρέπει να τονιστεί, ότι στην βάση δεδομένων που δημιουργήσαμε περιλαμβάνονται ως επί το πλείστον δεξαμενόπλοια (Oil Tankers), για τα οποία είχαμε στην διάθεση μας πέρα από την ονομασία τους, το λιμάνι νηολόγησης και τον αριθμό που έχουν στον IMO, τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης EIV, τις ετήσιες εκπομπές τους σε CO₂, αλλά και την ετήσια κατανάλωση τους σε καύσιμο. Οι λόγοι για τους οποίους επιλέξαμε να κάνουμε την ανάλυση για τα δεξαμενόπλοια και όχι για κάποιο άλλο είδος πλοίου φαίνονται στην γραφική παράσταση που ακολουθεί:

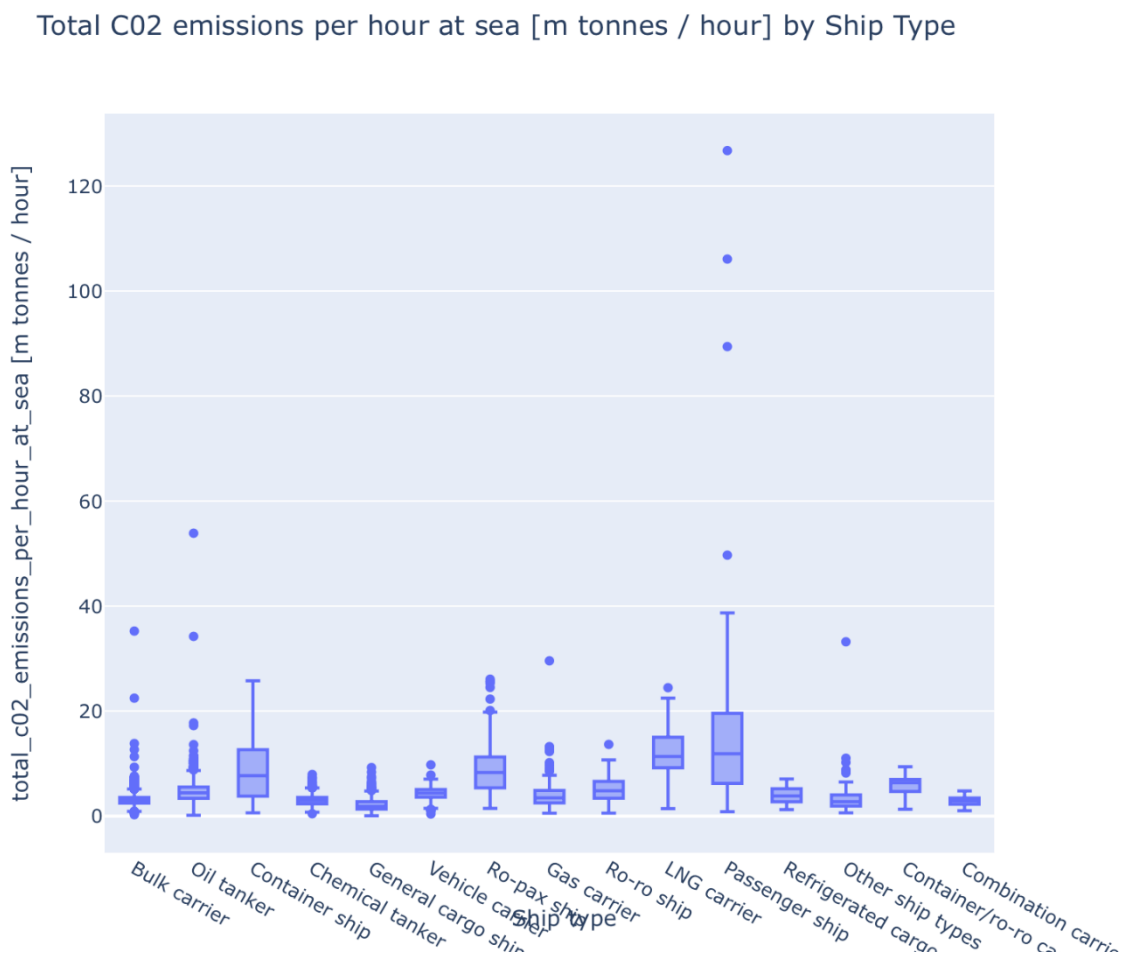


Εικόνα 6.1: Αριθμός πλοίων ανά κατηγορία σε παγκόσμιο επίπεδο, Πηγή: <https://www.kaggle.com/code/ronand97/eu->

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω γράφημα (Εικόνα 6.1), ο δεύτερος μεγαλύτερος αριθμός πλοίων σε παγκόσμια κλίμακα μετά τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (Bulk Carrier), είναι αυτός των Oil tankers. Ειδικότερα αυτά αριθμούν περί τα 6000 πλοία. Κάτι το οποίο αξίζει να σχολιαστεί είναι, ότι τα GAS carriers τα οποία είναι πλοία που μεταφέρουν βενζίνη, αντιστοιχούν στο 1/6 του αριθμού των Tanker. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί, λόγω του ότι, ο σκοπός τους είναι αποκλειστικά και μόνο η μεταφορά της βενζίνης, δηλαδή καυσίμου το οποίο έχει ήδη υποστεί διύλιση, ενώ τα Oil Tanker μπορούν να μεταφέρουν κατευθείαν το

ακατέργαστο καύσιμο, γεγονός που τα κάνει περισσότερο δημοφιλή. Ο δεύτερος λόγος που εστίασαμε στα Oil Tankers, είναι ότι είχαμε στην διάθεσή μας για τα ίδια πλοία, τόσο τις εκπομπές τους σε CO₂ όσο και τις εκπομπές τους σε SO_x, κάτι το οποίο μας δίνει την δυνατότητα να έχουμε μία ευρεία αντίληψη για τα emissions των συγκεκριμένων πλοίων.

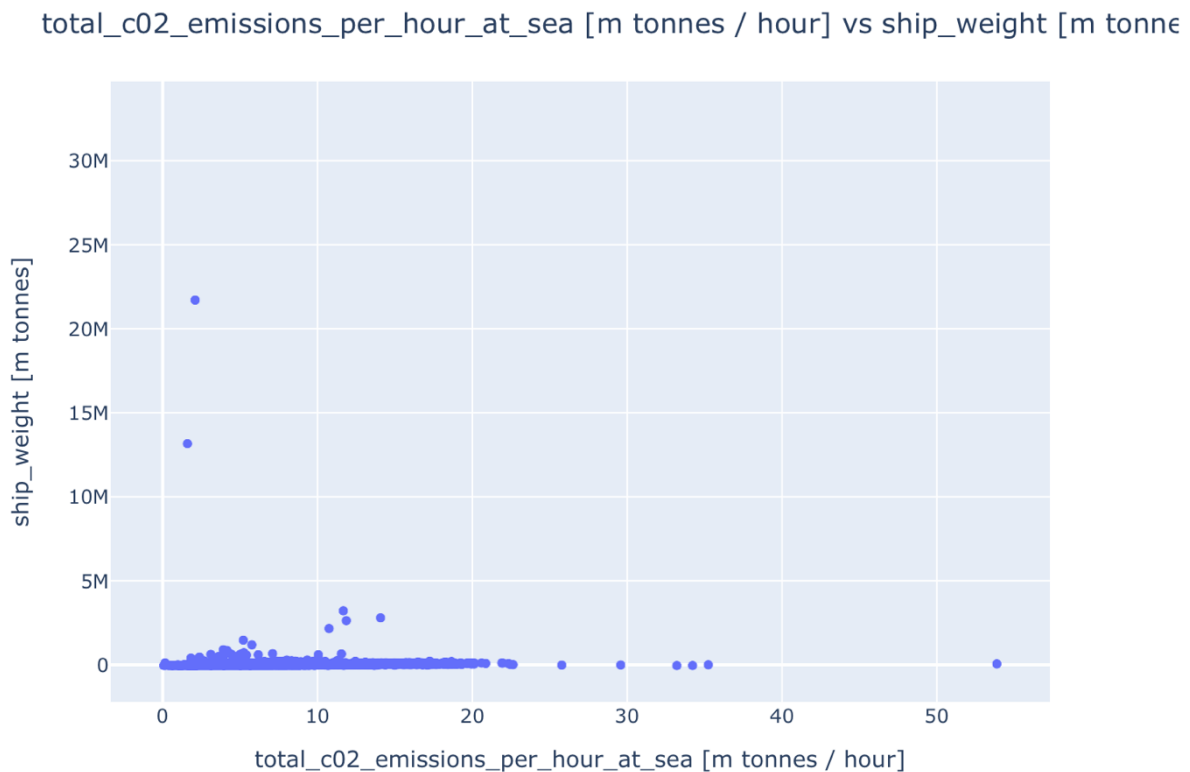
Ένα άλλο στοιχείο το οποίο μας προβλημάτισε και μας οδήγησε στην επιλογή των τάνκερ, ήταν οι ετήσιες εκπομπές όλων των κατηγοριών των πλοίων οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω γράφημα: (Link List: 28)



Εικόνα 6.2: Εκπομπές για όλες τις κατηγορίες πλοίων ανά ώρα λειτουργίας της μηχανής, Πηγή: <https://www.kaggle.com/code/ronand97/eu-ship-emissions>

Όπως βλέπουμε, στην εικόνα 6.2 απεικονίζονται οι εκπομπές για όλες τις κατηγορίες των πλοίων ανά ώρα λειτουργίας της μηχανής. Τις μεγαλύτερες τιμές λαμβάνουν τα επιβατηγά πλοία, τα Ro Pax, τα LNG και τα Container ships. Είναι φανερό ότι τα δεξαμενόπλοια, τα οποία στη συνείδηση των περισσότερων ανθρώπων ανήκουν στα πιο ρυπογόνα πλοία, εκπέμπουν σημαντικά λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα ανά ώρα λειτουργίας του κινητήρα.

Τέλος, το ζήτημα της επιλογής των πλοίων που θα συμμετέχουν στην μελέτη, επηρεάστηκε σημαντικά από το γεγονός, ότι για να έχουμε ένα σωστό μέτρο σύγκρισης, έπρεπε τα πλοία που θα επιλέξουμε να κάνουν κάθε χρόνο τα ίδια ταξίδια – να καταναλώνουν την ίδια ποσότητα καυσίμου αλλά και να έχουν όσο δυνατόν γίνεται την ίδια μεταφορική ικανότητα.



Εικόνα 6.3: Σχέση ανάμεσα στις εκπομπές των πλοίων και το βάρος του πλοίου, Πηγή: <https://www.kaggle.com/code/ronand97/eu-ship-emissions>

Στην Εικόνα 6.3, βλέπουμε τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στις εκπομπές των πλοίων σε διοξείδιο του άνθρακα με το βάρος του πλοίου σε mtonnes. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στα emissions και στο ship weight, είναι αμελητέα εκτός από ελάχιστες ακραίες τιμές.

Δυστυχώς το αντίστοιχο δεν μπορούμε να το πούμε και για την κατανάλωση – τα ταξίδια που κάνουν τα πλοία. Είναι λογικό ότι όταν ένα πλοίο διανύσει μία απόσταση X , και ένα άλλο πλοίο διανύσει μία απόσταση διπλάσια του X , θα έχει μεγαλύτερες εκπομπές τόσο σε SOx όσο και σε CO₂. Εμείς προσπαθήσαμε το data base που φτιάξαμε να περιέχει πλοία τα οποία κάνουν όσο το δυνατόν πανομοιότυπες διαδρομές το ένα με το άλλο και άρα καταναλώνουν παρόμοιες ποσότητες καυσίμου. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, και υπήρχαν περιπτώσεις όπου

είχαμε μικρές αποκλίσεις, οι οποίες όμως δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το αποτέλεσμα όπως αναφέραμε πιο πάνω.

Συμπερασματικά και αναφορικά με τον τρόπο επιλογής στοιχείων για την δημιουργία της βάσης δεδομένων, μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής: Τα πλοία χύδην φορτίου αποτελούν την πλειοψηφία του συνόλου των πλοίων του παγκοσμίου στόλου αριθμώντας περισσότερα από 10.000 πλοία. Την ίδια στιγμή όμως, σύμφωνα με μελέτη του του παγκόσμιου οργανισμού εμπορίου, η ανάγκη για μεταφορά πετρελαίου αλλά και φυσικού αερίου, ιδιαίτερα μετά την διακοπή της παροχής αερίου στην Ευρώπη από πλευράς της Ρωσίας, είναι σημαντικά μεγαλύτερη, από την ανάγκη για μεταφορά χύδην φορτίου στην Ευρώπη. Αυτή είναι και η αιτία όπου οι ναυλώσεις τάνκερ έχουν γίνει αρκετά δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια, και για τους λόγους αυτούς, επιλέξαμε να εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στα oil tanker.

Σχετικά με τις εκπομπές ρύπων ανά κατηγορία πλοίου, όπως είδαμε και στις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, τα πλέον ρυπογόνα πλοία είναι τα Ro Pax, τα container ships αλλά και τα LNG. Θα ήταν ενδιαφέρον να κάναμε μία προσέγγιση και να υπολογίζαμε στοιχεία για τις εκπομπές των LNG, καθώς τα συγκεκριμένα, λόγω του ότι λειτουργούν στην πλειονότητα τους με μηχανή διπλού καυσίμου, δηλαδή μπορούν να καταναλώνουν τόσο μαζούτ όσο και φυσικό αέριο, θα έπρεπε να εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με τα Oil Tankers τα οποία λειτουργούν αποκλειστικά με μαζούτ.

Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη (2021) του IMO, τα πλοία με τον μεγαλύτερο μέσο όρο ηλικίας είναι τα Oil Tankers και τα πλοία «ψυγεία». Αυτό πρόκειται για ένα ακόμα δεδομένο, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες και λόγω της παλαιότητας των μηχανών των συγκεκριμένων πλοίων, θα έπρεπε αυτά να εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, πράγμα το οποίο όμως δεν συμβαίνει. Όλα τα παραπάνω είναι στοιχεία τα οποία μας διέγειραν το ενδιαφέρον, για να προχωρήσουμε στην μελέτη των Oil Tankers.

Τέλος, το σημαντικότερο στοιχείο το οποίο πρέπει να αναφέρουμε, και είναι αποτέλεσμα αρκετών μελετών που έγιναν τα προηγούμενα χρόνια, είναι πως δεν υπάρχει κανένας τρόπος να μπορέσει να γίνει μία ακριβής κατηγοριοποίηση των πλοίων και να χρησιμοποιηθεί σε μία στατιστική ανάλυση, αφού οι επιμέρους κατηγορίες που χωρίζονται τα πλοία συγκριτικά με τις εκπομπές τους, είναι πάρα πολλές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι οι εκπομπές μετριούνται διαφορετικά για τους τοπικούς πλόες σε σύγκριση με τους διεθνείς. Οι κινητήρες λειτουργούν διαφορετικές στροφές όταν το πλοίο βρίσκεται σε ανοικτή θάλασσα και σε διαφορετικές κοντά σε λιμάνια, όπου υποχρεούται να μειώσει την ταχύτητά του. Το

κυριότερο όλων είναι ότι είναι αδύνατον το ίδιο πλοίο να εκτελέσει ακριβώς τα ίδια δρομολόγια σε 5 διαδοχικά χρόνια, όπως παρουσιάζεται στη στατιστική μελέτη που θα ακολουθήσει, να καταναλώσει παρεμφερή ποσότητα καυσίμου, αλλά και να λειτουργήσει ο κινητήρας στις ίδιες στροφές με τις ίδιες συνθήκες.

Λόγω όλων των προαναφερθέντων, το ζήτημα της σωστής επιλογής δεδομένων αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Εμείς κληθήκαμε να το επιλύσουμε και για να το καταφέρουμε, προσπαθήσαμε όλα μας τα πλοία να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιογενή. (Link List: 28)

6.2 Βασικές έννοιες της στατιστικής

Στα πλαίσια της περαιτέρω ανάλυσης των εκπομπών των πλοίων, αλλά και για να μπορέσουμε να καταλάβουμε κατά πόσο τα μέτρα τα οποία πήρε ο IMO (Sulphur cap κτλ.), έχουν αποτέλεσμα ή θα έχουν αποτέλεσμα στο άμεσο μέλλον (απανθρακοποίηση της ναυτιλίας μέχρι το 2050), συλλέξαμε δεδομένα για εκπομπές πλοίων από μερικές ναυτιλιακές και κάναμε μία στατιστική ανάλυση, η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω. Αναφορικά με τα δεδομένα για τις εκπομπές σε οξείδια του θείου και την μείωση τους, αυτά προήλθαν από την ναυτιλιακή εταιρεία Minerva Marine και συγκεκριμένα έπειτα από την θετική ανταπόκριση του κ. Πέτρου Δημητρόπουλου – Junior Superintendent Engineer στο τεχνικό τμήμα της εν λόγω ναυτιλιακής, για να μας δώσει ένα Excel με τις εκπομπές των πλοίων τους πριν και μετά το Sulphur Cap. Το Excel περιελάμβανε ολόκληρο τον στόλο των δεξαμενοπλοίων της Minerva Marine ο οποίος στις 12/04/2023 αριθμούσε περίπου 45 πλοία.

Πριν ξεκινήσουμε να αναλύουμε τα δεδομένα μας και να παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε σε κάποιες βασικές έννοιες της στατιστικής ανάλυσης και κάποιες ορολογίες, καθώς θα χρησιμοποιηθούν αρκετά για την περιγραφή της στατιστικής.

Αρχικά πρέπει να τονίσουμε ότι εμείς θα κάνουμε μία περιγραφική στατιστική, η οποία ασχολείται με την συνοπτική αλλά ταυτόχρονα αποτελεσματική παρουσίαση των στατιστικών δεδομένων. Τα βήματα που ακολουθούνται για να πραγματοποιηθεί σωστά η περιγραφική στατιστική είναι τα εξής: Σε πρώτο χρόνο πρέπει να γίνει η συλλογή και η ταξινόμηση των στατιστικών στοιχείων. Σε δεύτερο χρόνο πρέπει να γίνει μία σύνοψη των κυριότερων πληροφοριών των στοιχείων και τέλος να αναλυθούν και να παρουσιαστούν κατάλληλα.

1) Αριθμητικός μέσος:

Ο αριθμητικός μέσος ενός τυχαίου δείγματος πληθυσμού, συμβολίζεται με \bar{X} , είναι το πιο γνωστό μέτρο θέσης, και υπολογίζεται από τον λόγο του αθροίσματος όλων των τιμών μίας μεταβλητής προς το πλήθος των τιμών. Ο μέσος όρος έχει το χαρακτηριστικό γνώρισμα ότι επηρεάζεται έντονα από τις ακραίες τιμές (outliers) μίας μεταβλητής.

2) Διάμεσος

Η διάμεσος που συμβολίζεται με το γράμμα «δ», είναι η τιμή που βρίσκεται στο μέσο των δεδομένων, με μοναδική προϋπόθεση τα δεδομένα να έχουν ταξινομηθεί με αύξουσα σειρά. Έχει την ιδιότητα ότι το 50% των παρατηρήσεων – τιμών, είναι μικρότερες από την τιμή της διαμέσου και το υπόλοιπο 50% μεγαλύτερες.

3) Επικρατούσα τιμή

Η επικρατούσα τιμή είναι αυτή η οποία σε ένα σύνολο δεδομένων εμφανίζεται με την μεγαλύτερη συχνότητα. Στην περίπτωση όπου υπάρχουν 2 ή περισσότερες τιμές με την ίδια συχνότητα εμφάνισης, τότε λέμε ότι τα δεδομένα μας έχουν περισσότερες από μία επικρατούσες τιμές.

4) Εύρος

Το εύρος το οποίο συμβολίζεται με R από το range, θεωρείται το πιο απλό μέτρο διασποράς και ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής ενός συνόλου παρατηρήσεων. Παρόλο που το εύρος είναι αρκετά εύκολο να υπολογισθεί, δεν θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστο αφού βασίζεται μόνο σε 2 παρατηρήσεις, δηλαδή την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή, και επιπλέον επηρεάζεται πάρα πολύ από ενδεχόμενες ακραίες τιμές.

5) Διακύμανση

Η διακύμανση η οποία συμβολίζεται με το S^2 , είναι ένα μέτρο διασποράς το οποίο βασίζεται στην απόσταση μίας παρατήρησης από τον μέσο όρο των παρατηρήσεων (δηλαδή τον αριθμητικό μέσο). Αν αφαιρέσουμε από την κάθε παρατήρηση την μέση τιμή και βρούμε τον μέσο όρο αυτών των διαφορών, ο αριθμός που θα προκύπτει θα ισούται πάντα με το 0. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί, αν χρησιμοποιήσουμε τα τετράγωνα των αποκλίσεων.

6) Τυπική απόκλιση:

Παρόλο που η διακύμανση είναι ένα πολύ χρήσιμο και συνάμα αξιόπιστο μέτρο διασποράς, είναι δύσκολο να την ερμηνεύσουμε, δεδομένου ότι δεν εκφράζεται στις μονάδες με τις οποίες εκφράζονται οι παρατηρήσεις, αλλά στα τετράγωνα των μονάδων αυτών. Ο τρόπος για να

ξεπεράσουμε αυτό το μειονέκτημα είναι να κάνουμε χρήση της τετραγωνικής ρίζας της διακύμανσης. Επιπλέον, πρέπει να τονίσουμε ότι η διασπορά συμβολίζεται με S^2 ή με σ^2 αν αναφερόμαστε σε δείγμα ή πληθυσμό αντίστοιχα και ομοίως η τυπική απόκλιση με S ή σ .

Τέλος, μία πολύ σημαντική έννοια στη στατιστική είναι η κανονική κατανομή. Η κανονική κατανομή είναι η σπουδαιότερη κατανομή της θεωρίας των πιθανοτήτων και της στατιστικής γενικότερα, λόγω της ευρύτατης χρήσης της σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Μερικοί από τους λόγους που την κάνουν τόσο σημαντική και δημοφιλή είναι οι εξής: Αρχικά το γεγονός ότι πολλά πληθυσμιακά χαρακτηριστικά περιγράφονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Επιπλέον το ότι τα τυχαία σφάλματα που εμφανίζονται σε διάφορες μετρήσεις έχουν κανονική κατανομή την κάνει αρκετά φιλική για χρήση. Τέλος, πολλές κατανομές τόσο συνεχείς όσο και διακριτές, μπορούν κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις να προσεγγιστούν από την κανονική κατανομή. (Paper List: 15)

6.3 Ανάλυση εκπομπών πλοίων με χρήση του προγράμματος SPSS – SOx Emissions

Το SPSS είναι ένα πακέτο λογισμικού για τη στατιστική ανάλυση δεδομένων. Είναι το πιο διαδεδομένο λογισμικό στατιστικής ανάλυσης σε παγκόσμιο επίπεδο και χρησιμοποιείται από πληθώρα ερευνητών.

Μέσω του analysis => descriptive statistics και την επιλογή της μέσης τιμής, της διαμέσου, της τυπικής απόκλισης, αλλά και της ελάχιστης – μέγιστης τιμής θα προκύψουν οι παρακάτω πίνακες:

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
2019 SOx EMISSIONS (MT)	41	89.730	607.710	269.22756	125.764652
2020 SOx EMISSIONS (MT)	41	1.03	49.16	5.7954	7.98220
Valid N (listwise)	41				

Πίνακας 1: Εκπομπές σε SOx 2019 – 2020, Πηγή: SPSS Analysis

Στον Πίνακα 1 βλέπουμε τις εκπομπές σε οξείδια του θείου το 2019 και αυτές το 2020. Το N υποδηλώνει τον αριθμό των πλοίων για τα οποία έγινε η μελέτη, ο οποίος εδώ ανέρχεται σε $N = 41$. Το minimum and maximum αναφέρονται στις μέγιστες και στις ελάχιστες τιμές

αντίστοιχα. Τέλος βλέπουμε τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση για κάθε χρονιά. Ο σχολιασμός του Πίνακα 1 θα γίνει σε συνδυασμό με τον Πίνακα 2, τον οποίο θα συναντήσουμε παρακάτω:

		Statistics	
		2019 SOx EMMISSIONS (MT)	2020 SOx EMMISSIONS (MT)
N	Valid	41	41
	Missing	4	4
Mean		269.22756	5.7954
Median		239.52000	3.7200
Std. Deviation		125.764652	7.98220
Variance		15816.748	63.715
Range		517.980	48.13
Minimum		89.730	1.03
Maximum		607.710	49.16

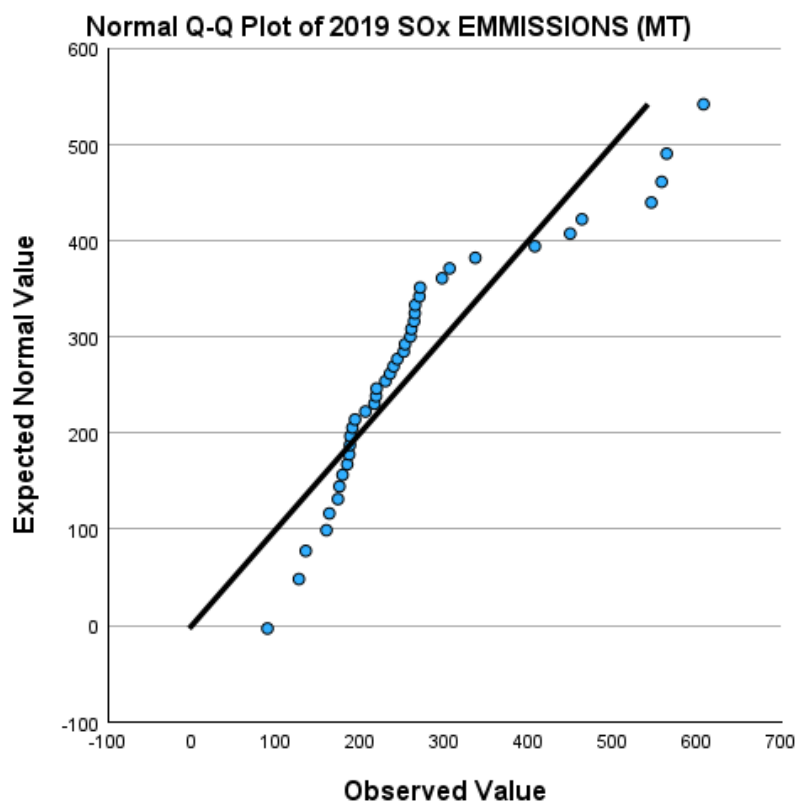
Πίνακας 2: Εκπομπές σε SOx 2019 – 2020, Πηγή: SPSS Analysis

Αυτό το οποίο είναι άξιο να σχολιαστεί στους Πίνακες 1 και 2 είναι το ζήτημα του μέσου όρου (mean value), της διαμέσου (median) αλλά και της τυπικής απόκλισης. Βλέπουμε ότι ο μέσος όρος με τη διάμεσο έχουν μεγάλη διαφορά. Αυτό υποδηλώνει την ύπαρξη ακραίων τιμών στις εκπομπές, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές στα SOX ενός πλοίου, λόγω του ότι αυτό έκανε μεγάλα δρομολόγια (από πλευράς μιλίων). Παρατηρούμε ότι και τις 2 χρονολογίες έχουμε μεγάλη διασπορά δεδομένων.

Ένα άλλο μέγεθος το οποίο παρατηρούμε στον πίνακα 2 είναι αυτό του εύρους Range. Παρατηρούμε ότι η απόσταση της μέγιστης τιμής με την ελάχιστη είναι τεράστια. Αυτό, σε συνδυασμό με μία μεγάλη τιμή τυπικής απόκλισης, μας δηλώνει ότι έχουμε μεγάλη διασπορά των τιμών μας. Αναφορικά με τις τιμές των εκπομπών σε οξείδια – διοξείδια του θείου, είναι περιττό θεωρώ να αναφέρουμε, ότι με την εφαρμογή του IMO Sulphur CAP, οι εκπομπές μειώθηκαν δραστικά. Πιο συγκεκριμένα από 607,710 MT το έτος 2019, μειώθηκαν σε 49,16 MT το έτος 2020, μία μείωση της τάξεως του περίπου 92%.

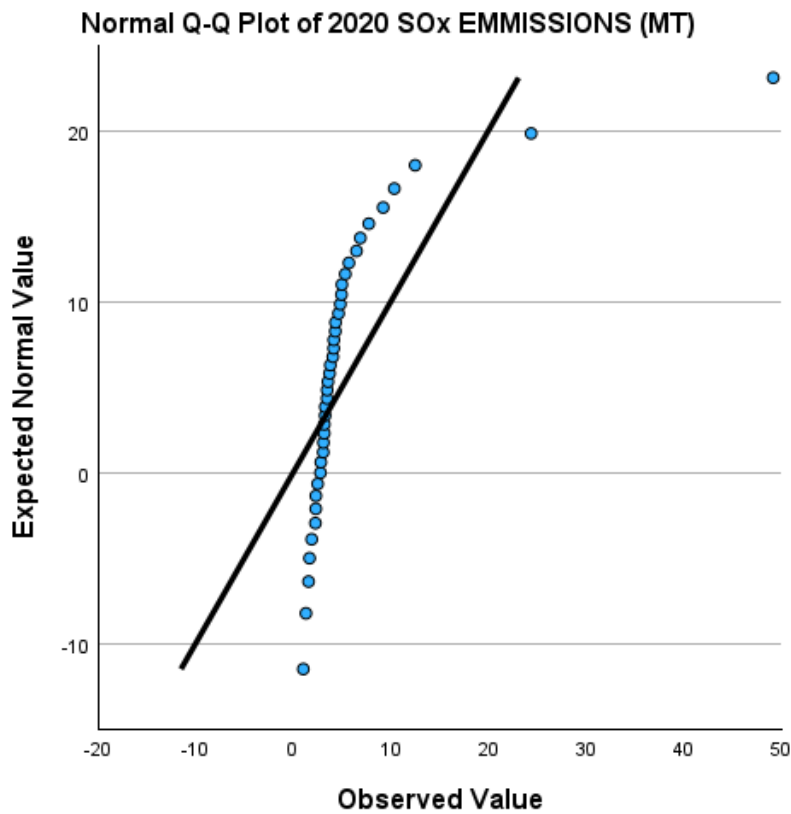
6.4 Έλεγχος κανονικότητας SOx

Επόμενο στάδιο της μελέτης είναι ο έλεγχος κανονικότητας. Μία από τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τα δεδομένα μίας έρευνας γενικότερα, για να μπορέσουν να εφαρμοστούν τα παραμετρικά στατιστικά κριτήρια, είναι να ακολουθούν κανονική κατανομή. Ένας από τους τρόπους για να το κάνουμε αυτό, είναι η κατασκευή του διαγράμματος QQ PLOT. Το τελευταίο πρόκειται για ένα διάγραμμα όπου η παρατηρηθείσα τιμή είναι στον ένα άξονα και η αναμενόμενη τιμή στον άλλο άξονα (συνήθως η αναμενόμενη είναι στον κατακόρυφο άξονα). Για να είναι η κατανομή κανονική θα πρέπει όλα τα σημεία να βρίσκονται πάνω στην διαγώνιο. Δυστυχώς δεν υπάρχουν ευρέως αποδεκτά κριτήρια για τον καθορισμό της απόστασης που μπορούν να έχουν τα σημεία από την διαγώνιο, για να θεωρηθεί κανονική η κατανομή. Έχει επικρατήσει, η οριακή τιμή να είναι οι 45 μοίρες. Παρακάτω παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις QQ PLOT για τις εκπομπές των SOX των ετών 2019 – 2020.



Γραφική παράσταση 1: QQ PLOT for SOx emissions 2019, Πηγή: SPSS Analysis

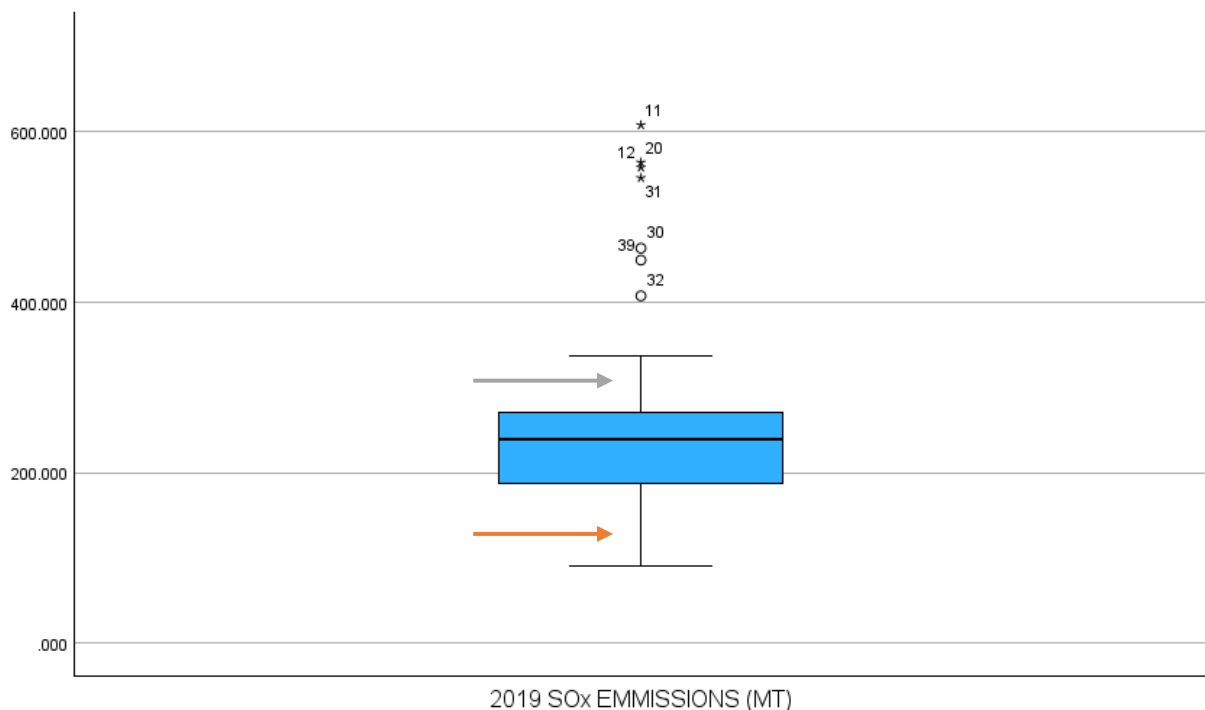
Όπως βλέπουμε για το έτος 2019, το δείγμα δεν ακολουθεί κανονική κατανομή, γιατί τα δεδομένα δεν κινούνται πάνω στην γραμμή αναφοράς (η συνεχής διαγώνια γραμμή με το μαύρο χρώμα) και επιπλέον απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από 45 μοίρες. Στο σημείο αυτό θέλω να υπογραμμιστεί, ότι ο έλεγχος αυτός μας δείχνει εμπειρικά το αποτέλεσμα.



Γραφική παράσταση 2: QQ PLOT for SOx emissions 2020, Πηγή: SPSS Analysis

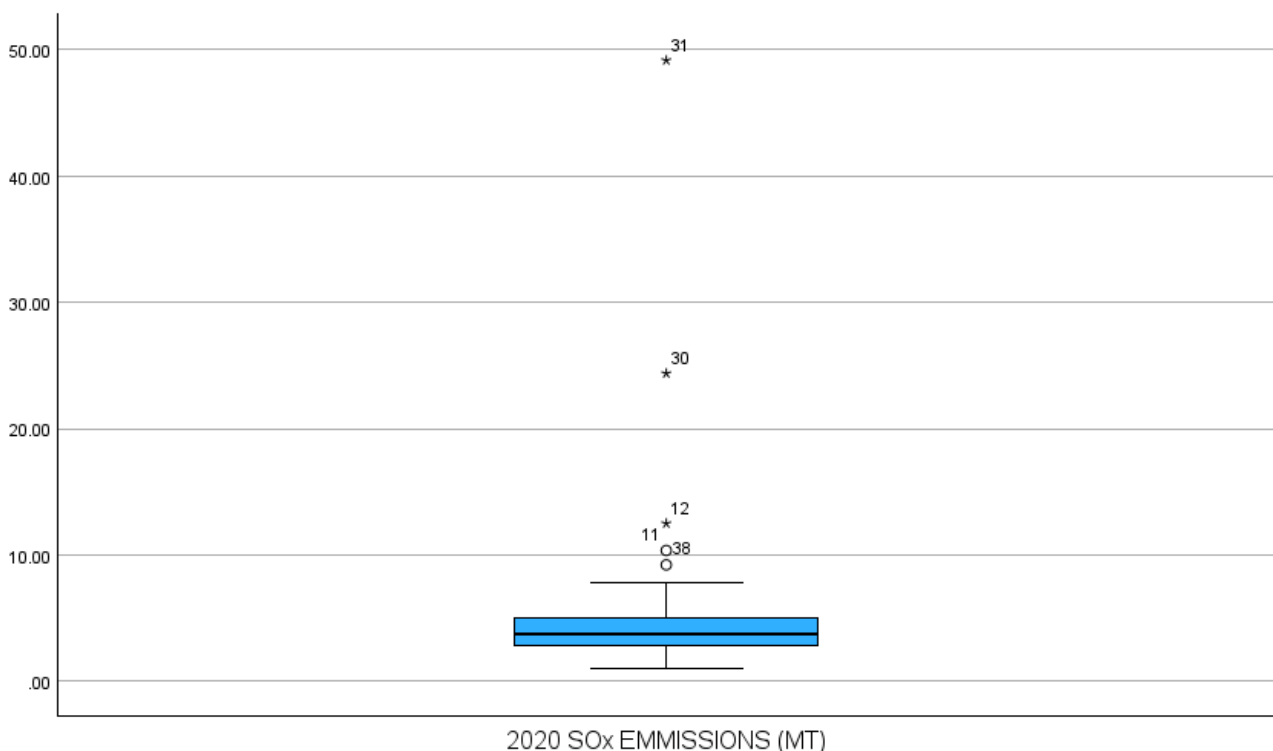
Παραπάνω βλέπουμε τον αντίστοιχο έλεγχο για το έτος 2020

Αυτό το οποίο είναι κοινό και στις 2 γραφικές QQ plot, είναι η ύπαρξη ακραίων τιμών. Για τον λόγο αυτό θα κάνουμε ένα θηκόγραμμα ή αλλιώς BOX Plot. Το θηκόγραμμα είναι ένας τρόπος να αναπαραστήσουμε 5 αριθμητικά δεδομένα προερχόμενα από μία σειρά παρατηρήσεων. Παρακάτω βλέπουμε το BOX plot του έτους 2019:



Γραφική παράσταση 3: BOX PLOT for SOx emissions 2019, Πηγή: SPSS Analysis

Αναφορικά με την παραπάνω γραφική αναπαράσταση πρέπει να σχολιαστούν τα εξής στοιχεία: Γενικότερα η διάμεσος δεν επηρεάζεται από τις ακραίες τιμές, ωστόσο εδώ λόγω της ύπαρξης ακραίων τιμών, ως μέτρο τάσης θα απορρίψουμε τον μέσο όρο. Το μπλε σχέδιο που βλέπουμε και περικλείεται από 4 μαύρες γραμμές, αντιστοιχεί στο 50% των τιμών. Η μαύρη γραμμή μέσα στο μπλε σχέδιο είναι η διάμεσος η οποία δεν βρίσκεται στην μέση λόγω των ακραίων τιμών. Η κάτω μαύρη γραμμή λέγεται Q1 (πρώτο τεταρτημόριο) και αντιστοιχεί στο 25% των δεδομένων ενώ η άνω μαύρη γραμμή λέγεται Q3 (3^ο τεταρτημόριο) και αντιστοιχεί στο 75% των δεδομένων. Το σημείο το οποίο φαίνεται με πορτοκαλί βέλος ορίζεται ως: $Q1 - \text{standard deviation} * 1.5$. Το σημείο το οποίο φαίνεται με πράσινο βέλος ορίζεται ως: $Q3 + \text{standard deviation} * 1.5$. Γενικότερα ισχύει ότι όσο πιο μεγάλα είναι αυτά τα σημεία σε μέγεθος, τόσο μεγαλύτερο εύρος τιμών έχουμε. Τέλος πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι τα σημεία τα οποία φαίνονται με κύκλο είναι μέτρια ακραίες τιμές και είναι 2 φορές η τυπική απόκλιση, ενώ αυτά με αστεράκι (*) πολύ μεγάλες ακραίες τιμές, οι οποίες προκαλούν πρόβλημα στην συνολική εικόνα του φαινομένου και είναι 3 φορές οι τυπική απόκλιση. Ακολούθως βλέπουμε το box plot για τις εκπομπές του 2020.



Γραφική παράσταση 4: BOX PLOT for SOx emissions 2020, Πηγή: SPSS Analysis

Είναι εμφανές ότι για τα δεδομένα του 2020, έχουμε σημαντικά λιγότερες ακραίες τιμές, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από την καλύτερη συμπεριφορά των τιμών που βρίσκονται στο 50%.

6.5 SPSS CO₂ Emissions 1st Part

Συνέχεια στην ανάλυση με το SPSS έχουν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Για τα ίδια πλοία στα οποία έγινε η στατιστική ανάλυση των οξειδίων του θείου, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση για τα CO₂. Μοναδική διαφορά είναι ότι ενώ πριν είχαμε ένα δείγμα της τάξεως των 45 πλοίων, πλέον έχουμε τις εκπομπές για μόλις 10 πλοία. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμίσουμε, ότι για κάθε πλοίο έχουμε στην διάθεσή μας τις εκπομπές για 5 διαδοχικές χρονολογίες – από το 2018 μέχρι και το 2022. Αυτό αντιστοιχεί σε 50 τιμές.

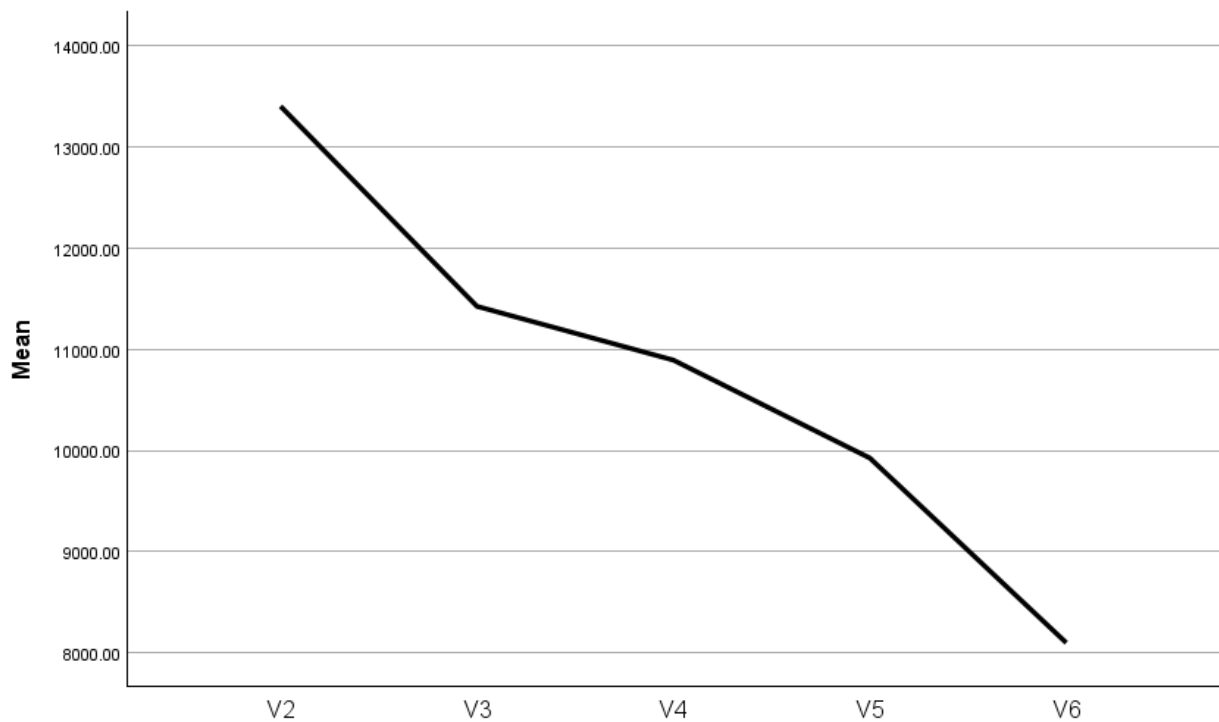
Ξεκινώντας την ανάλυση θα δημιουργήσουμε κάποιους συγκεντρωτικούς πίνακες, οι οποίοι θα δείχνουν τις μέσες τιμές, τις διαμέσους, την τυπική απόκλιση κτλ. Σαν αποτέλεσμα θα λάβουμε τον παρακάτω πίνακα:

		Statistics				
		V2	V3	V4	V5	V6
N	Valid	11	11	11	11	11
	Missing	0	0	0	0	0
Mean		13404.1882	11426.0464	10894.2736	9925.9445	8099.2300
Median		13114.2100	10031.6200	10205.6200	6943.8000	7841.5300
Std. Deviation		5524.31335	7559.91331	6097.93832	7469.23086	4952.03992
Variance		30518037.999	57152289.314	37184851.695	55789409.704	24522699.343
Range		19329.81	22410.56	20651.38	19379.93	12963.06
Percentiles	25	8946.3000	3978.1200	5898.4300	2923.3500	3001.9100
	50	13114.2100	10031.6200	10205.6200	6943.8000	7841.5300
	75	18165.3400	16071.2000	15715.2700	17357.6000	12752.9500

Πίνακας 3: Εκπομπές σε CO₂ για τα έτη 2018 - 2022, Πηγή: SPSS Analysis

Το V2 αντιστοιχεί στο έτος 2018. Αντίστοιχα τα V3,4,5,6, στα έτη 2019, 2020, 2021, 2022. Για να συμπεράνουμε αν όντως το διοξείδιο του άνθρακα έχει μειωθεί με την πάροδο των ετών θα πρέπει να εισάγουμε μία γραφική παράσταση η οποία αν είναι φθίνουσα ως προς την μονοτονία της, θα σημαίνει ότι η τιμή του CO₂ μειώθηκε, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα αυξάνεται διαρκώς. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε το εξής: ο international maritime organization (IMO) έχει θέσει ως στόχο για την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας το έτος 2050. Πιο συγκεκριμένα μέχρι το 2030 έχει τεθεί ως στόχος μία μείωση της τάξεως του 40% με ταυτόχρονη χρήση καυσίμων που δεν εκπέμπουν ρυπογόνες για το περιβάλλον ουσίες σε ποσοστό 25% (όπως για παράδειγμα η αμμωνία ή το υδρογόνο) και μέχρι το 2050 να έχουμε πετύχει κλιματική ουδετερότητα. Αυτός ο στόχος σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές οι οποίοι

είναι ειδικοί σε θέματα εκπομπών στην ναυτιλία, έχουν «κρούσει τον κώδωνα του κινδύνου» στο IMO, αναφέροντάς του, ότι αυτό που ζητάει είναι ανέφικτο.

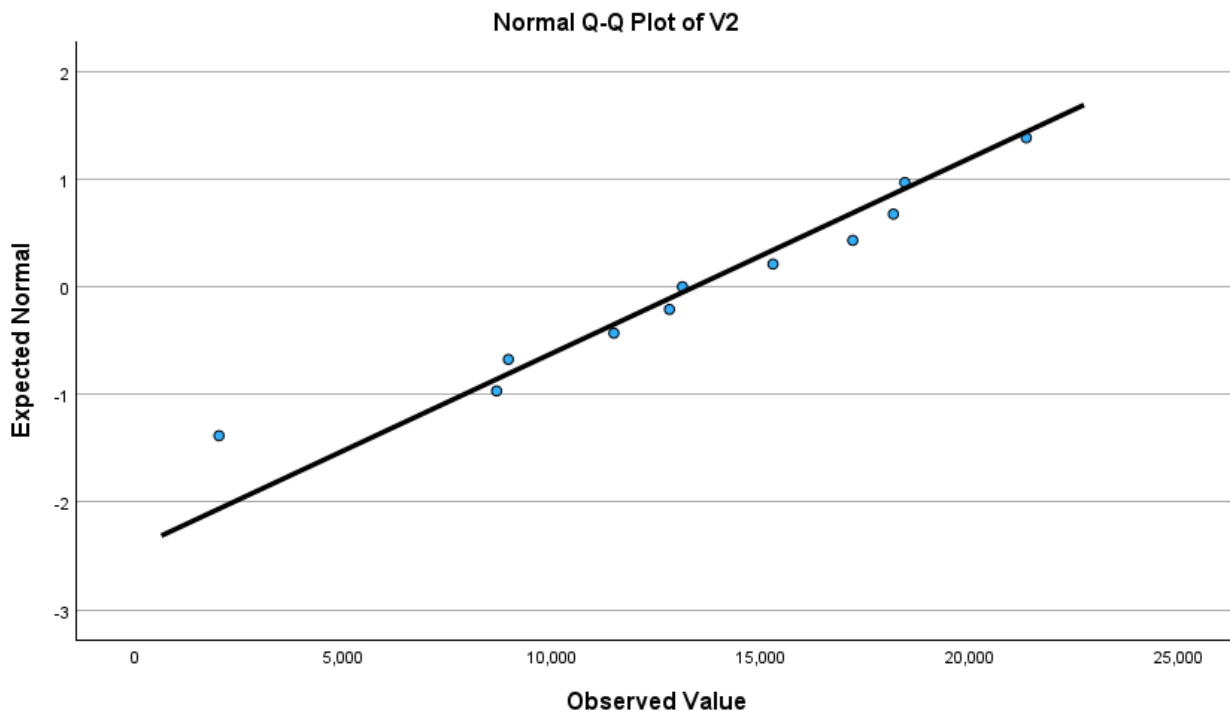


Γραφική παράσταση 5: Μείωση CO₂ από το 2018 - 2022, Πηγή: SPSS Analysis

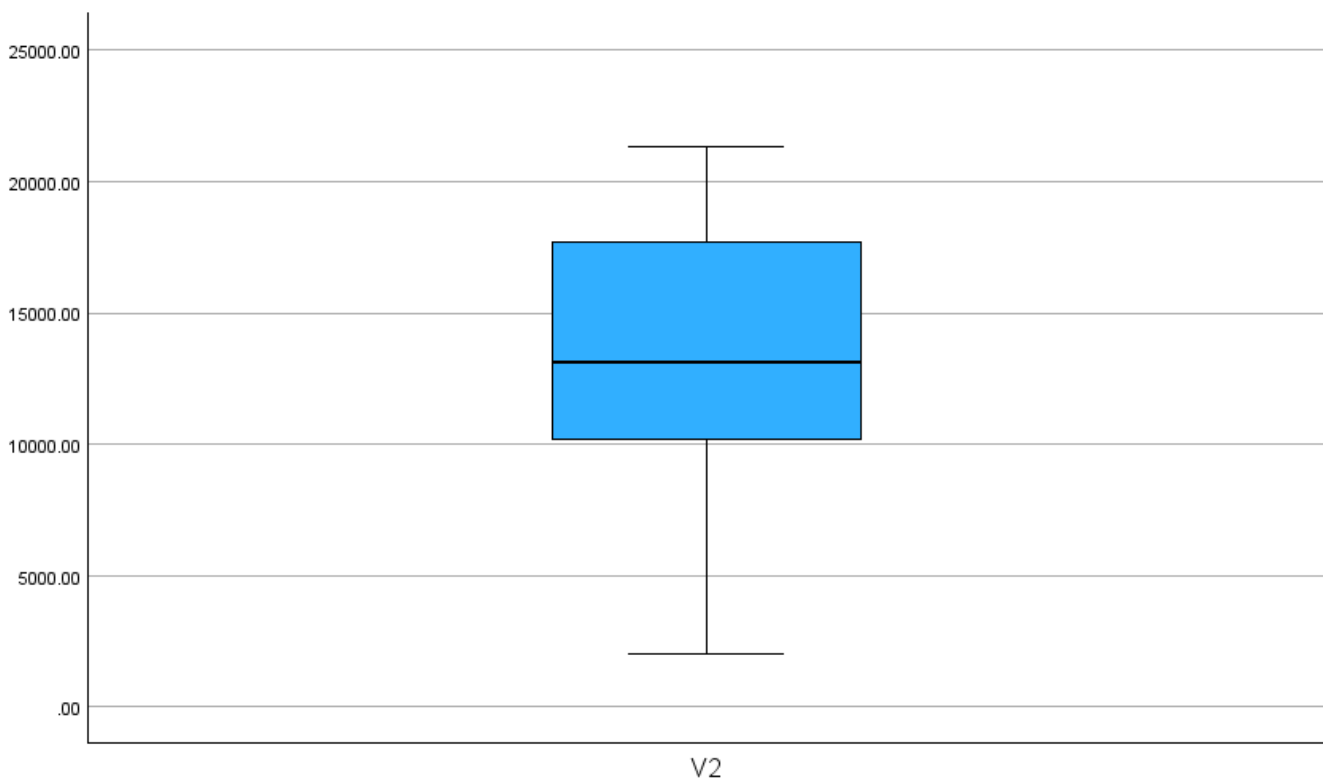
Βλέπουμε ότι πράγματι το διοξείδιο του άνθρακα από το 2018 που ξεκινάει τα δεδομένα μας μέχρι και το 2022, συνολικά έχει μειωθεί σημαντικά.

Ακολουθούν τα QQ PLOT και τα BOX PLOT, για κάθε χρονιά για την οποία έχουμε δεδομένα. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα, μέσω του qq plot, θέλουμε να ελέγξουμε, κατά πόσο το δείγμα μας ακολουθεί κανονική κατανομή. Παράλληλα μέσω του BOX PLOT εξετάζεται η μαύρη γραμμή είναι στο μέσο του μπλε κουτιού, τότε το δείγμα μας ακολουθεί κανονική κατανομή.

QQ – BOX PLOT V2



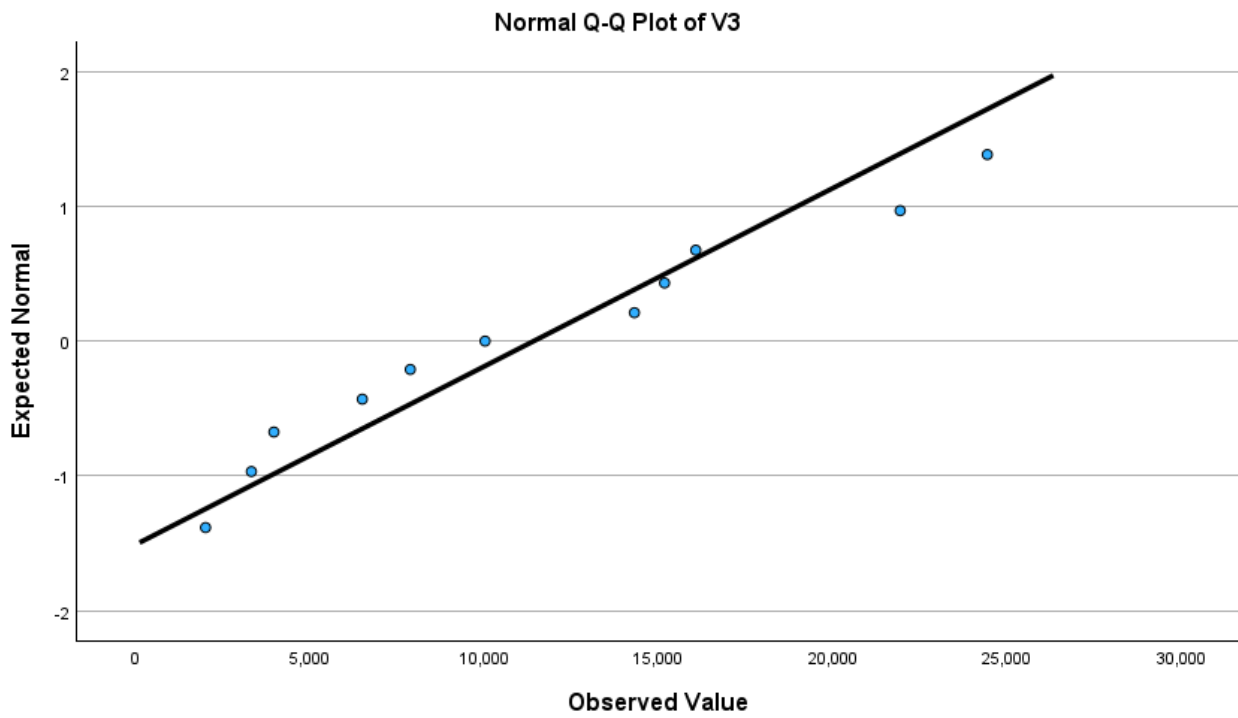
Γραφική παράσταση 6: Q-Q PLOT for CO₂ emissions 2018, Πηγή: SPSS Analysis



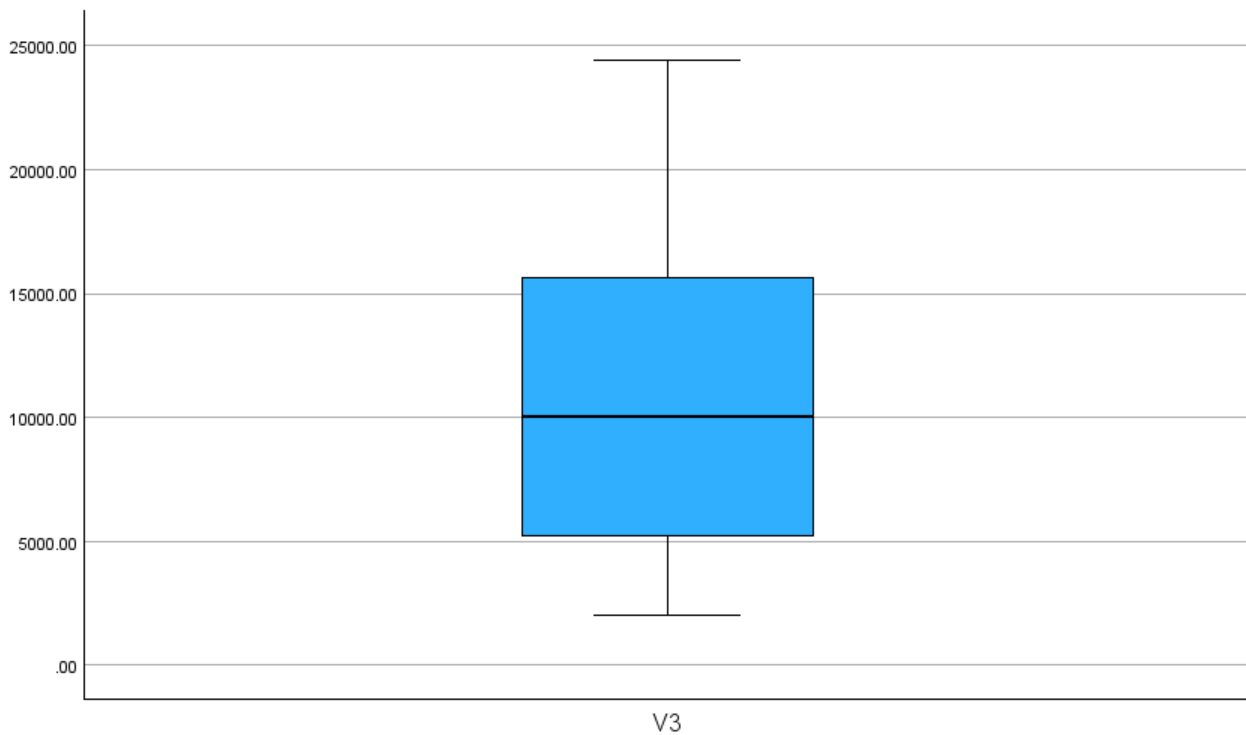
Γραφική παράσταση 7: BOX PLOT for CO₂ emissions 2018, Πηγή: SPSS Analysis

Το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή.

QQ – BOX PLOT V3



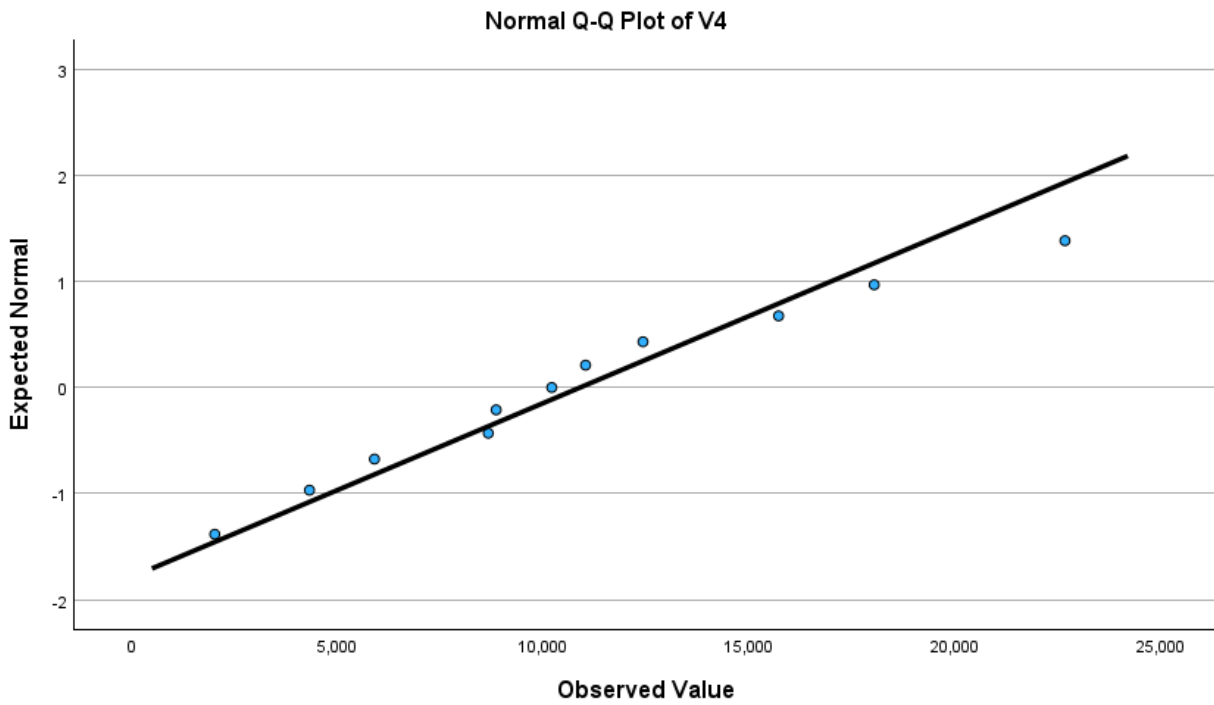
Γραφική παράσταση 8: QQ PLOT for CO₂ emissions 2019, Πηγή: SPSS Analysis



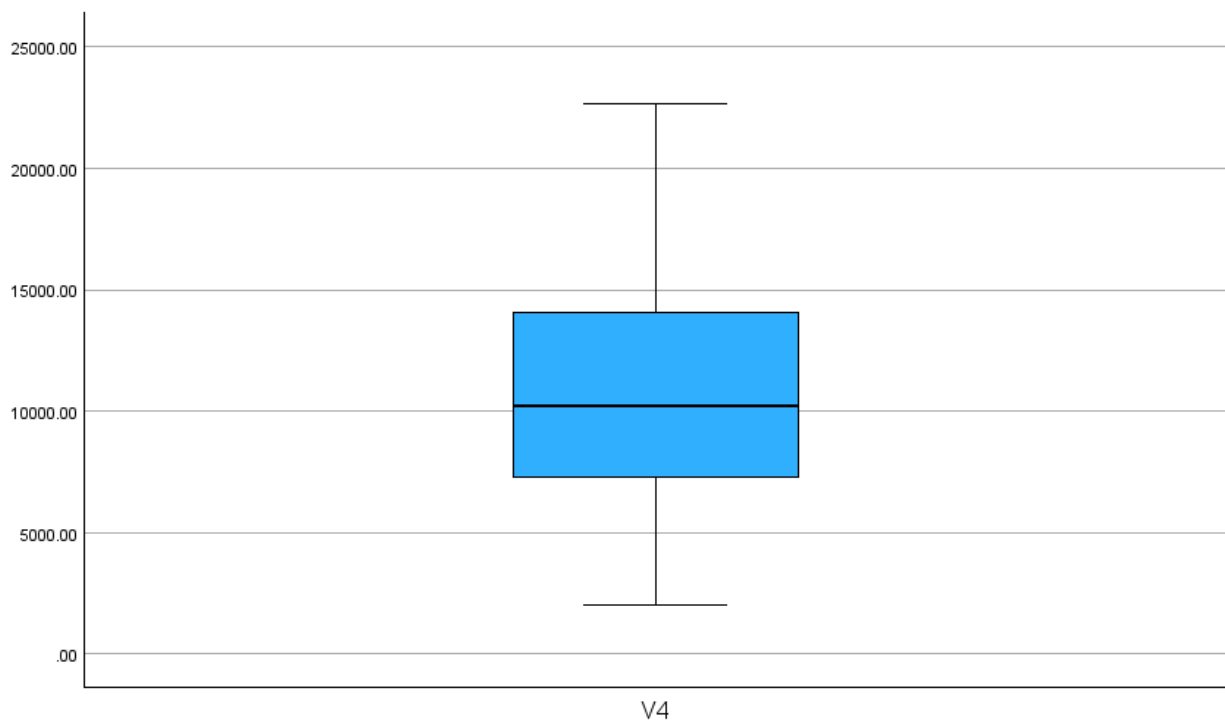
Γραφική παράσταση 9: BOX PLOT for CO₂ emissions 2019, Πηγή: SPSS Analysis

Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι υπάρχει απόκλιση από την κανονική κατανομή λόγω της μεγάλης ασυμμετρίας που εμφανίζει το QQ PLOT.

QQ – BOX PLOT V4



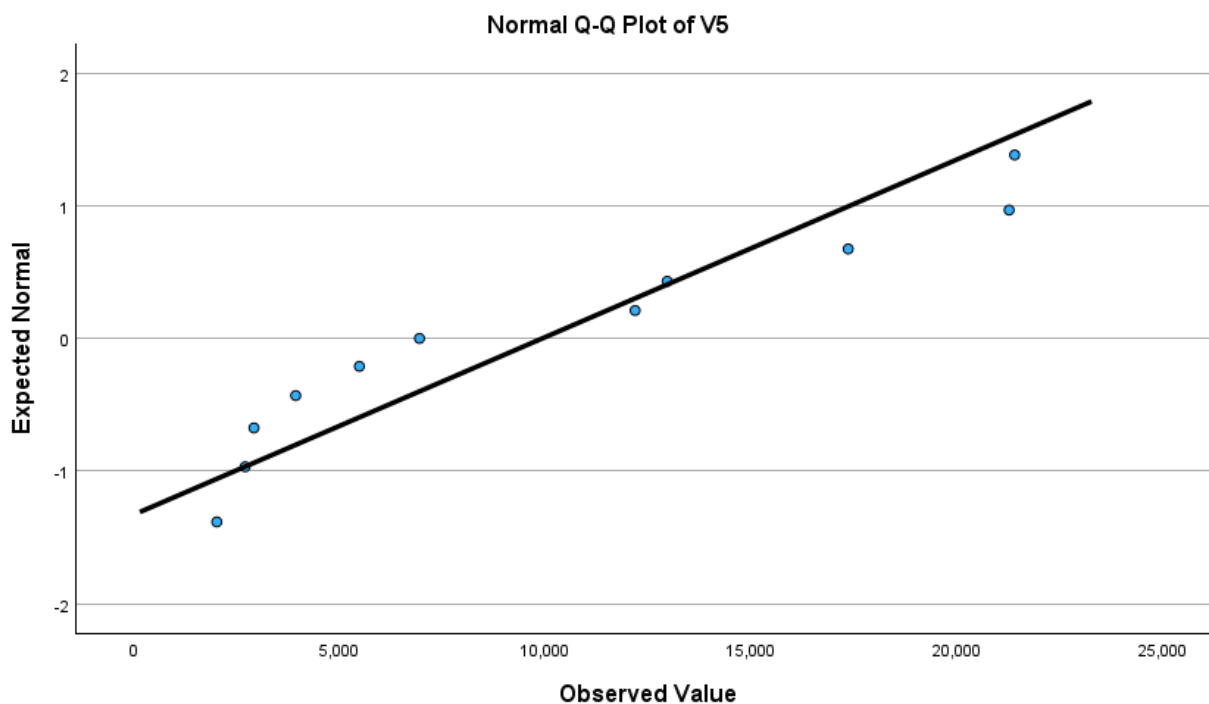
Γραφική παράσταση 10: QQ PLOT for CO₂ emissions 2020, Πηγή: SPSS Analysis



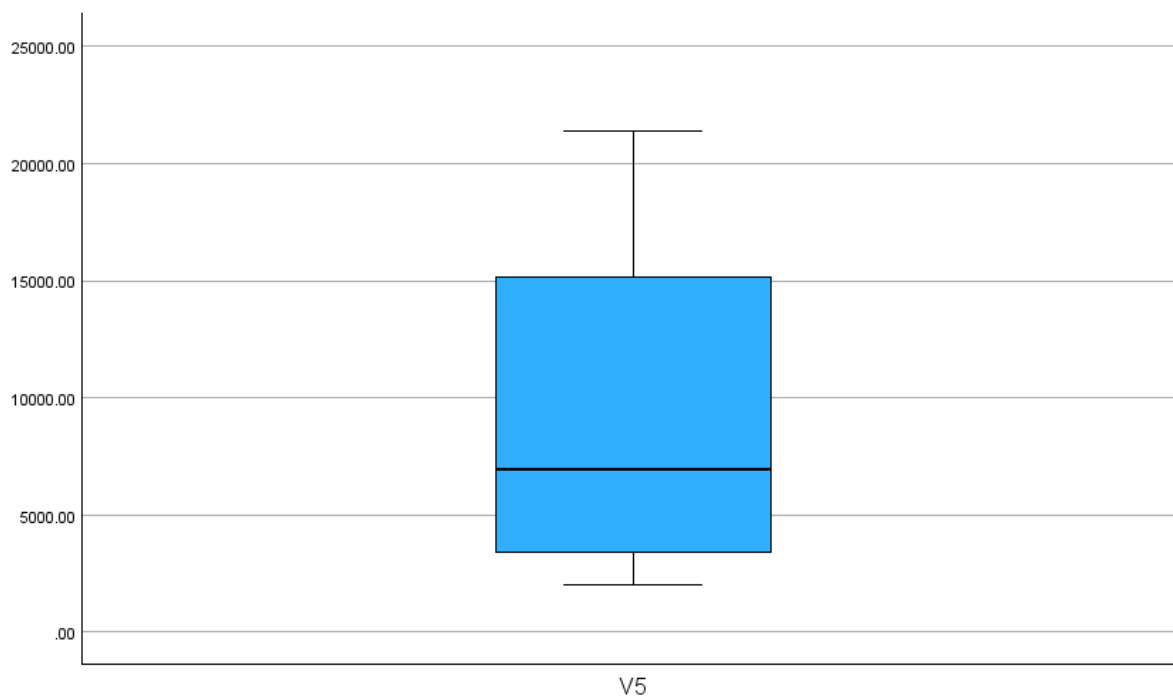
Γραφική παράσταση 11: BOX PLOT for CO₂ emissions 2020, Πηγή: SPSS Analysis

Το δείγμα, δείχνει να ακολουθεί κανονική κατανομή.

QQ – BOX PLOT V5



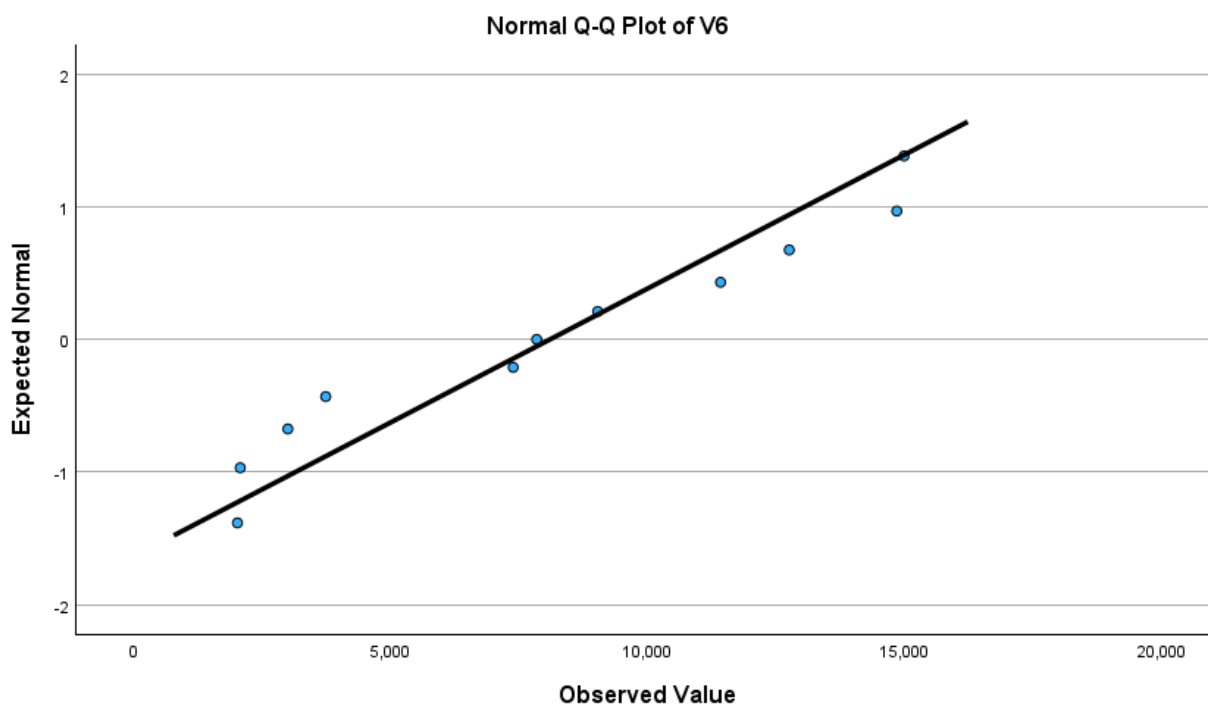
Γραφική παράσταση 12: QQ PLOT for CO₂ emissions 2021, Πηγή: SPSS Analysis



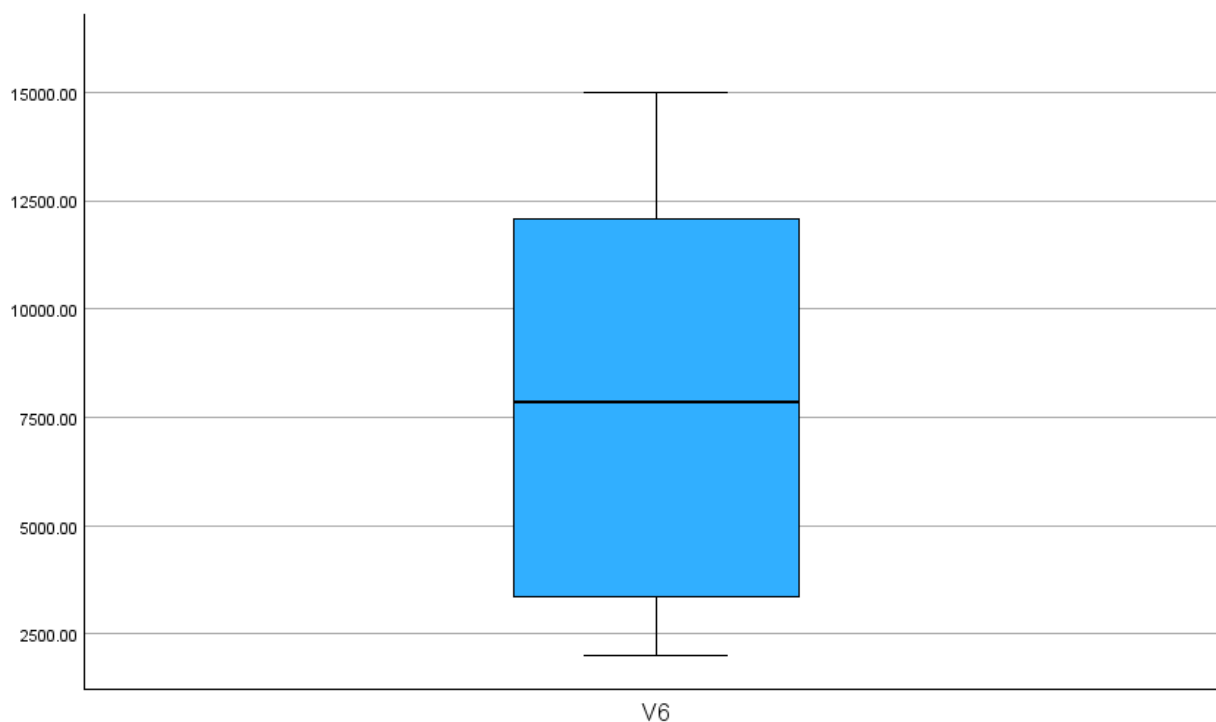
Γραφική παράσταση 13: BOX PLOT for CO₂ emissions 2021, Πηγή: SPSS Analysis

Και πάλι έχουμε απόκλιση από την κανονική κατανομή λόγω ασυμμετρίας των τιμών των δεδομένων.

QQ – BOX PLOT V6



Γραφική παράσταση 14: *QQ PLOT for CO₂ emissions 2022, Πηγή: SPSS Analysis*



Γραφική παράσταση 15: *BOX PLOT for CO₂ emissions 2022, Πηγή: SPSS Analysis*

Λόγω του «καλού» BOX PLOT, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή.

6.6 Kolmogorov – Shapiro Normality Test

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα, η αξιολόγηση της κανονικότητας των δεδομένων είναι απαραίτητη διαδικασία για πολλές στατιστικές δοκιμές, καθώς για να έχουμε κανονική κατανομή, καλό είναι ο αριθμός των δεδομένων μας να είναι μεγαλύτερος από 30. Ωστόσο, είναι δυνατόν υπό προϋποθέσεις, να έχουμε κανονική κατανομή και με μικρότερο αριθμό δεδομένων. Υπάρχουν 2 κύριοι μέθοδοι αξιολόγησης της κανονικότητας: Ο γραφικός και ο αριθμητικός τρόπος (συμπεριλαμβανομένων και των στατιστικών δοκιμών). Οι στατιστικές δοκιμές έχουν το πλεονέκτημα ότι κάνουν μια αντικειμενική κρίση της κανονικότητας, αλλά έχουν ταυτόχρονα και το σημαντικό μειονέκτημα, να είναι αρκετά «ευαίσθητες» σε χαμηλές τιμές στοιχείο τα οποία μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αντίθετα η γραφική ερμηνεία έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την ορθή κρίση για την αξιολόγηση της κανονικότητας, σε καταστάσεις όπου τα αριθμητικά τεστ είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων. Εάν κάποιος δεν έχει τη κατάλληλη εμπειρία στο να μπορεί να καταλαβαίνει με απόλυτη ακρίβεια τους γραφικούς ελέγχους, είναι προτιμότερο να καταφύγει στις αριθμητικές μεθόδους. Δύο από τις πιο γνωστές μεθόδους για τον έλεγχο της κανονικότητας συνεχών μεταβλητών είναι η δοκιμή «Kolmogorov – Smirnov» και η δοκιμή «Shapiro – Wilk».

Η δοκιμή Shapiro – Wilk είναι καταλληλότερη μέθοδος για μικρούς αριθμούς δειγμάτων ($n < 50$) – αν και δεν υπάρχει ρητή απαγόρευση της για χρήση σε μεγαλύτερα δείγματα – ενώ η δοκιμή Kolmogorov – Smirnov χρησιμοποιείται για $n > 50$.

Το κριτήριο K-S (one sample Kolmogorov-Smirnov) είναι ένας μονοδειγματικός μη παραμετρικός έλεγχος που χρησιμοποιείται για να εξετάσει την καλή προσαρμογή ενός τυχαίου δείγματος σε μια δεδομένη κατανομή. Βασίζεται στη διαφορά της εμπειρικής συνάρτησης κατανομής που προέρχεται από το δείγμα και της αναμενόμενης συνάρτησης κατανομής υπό την υπόθεση της κανονικότητας (H_0).

Ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov υποθέτει ότι οι παράμετροι της υπό έλεγχο κατανομής, στην περίπτωση μας της κανονικής κατανομής προσδιορίζονται εκ των προτέρων. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, οι απαιτούμενες παράμετροι υπολογίζονται από το δείγμα.

Συνεπώς, ειδικά στην περίπτωση του ελέγχου κανονικότητας, οι υποθέσεις του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov έχουν την μορφή (Paper List: 15)

$$H_0: F_n(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2s^2}(t-\bar{x})^2}$$

$$H_1: F_n(x) \neq \int_{-\infty}^x \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2s^2}(t-\bar{x})^2}$$

όπου για κάποιο δείγμα η εμπειρική συνάρτηση κατανομής δίνεται από τον τύπο

$$F_n := \frac{N(x_i)}{n}$$

με $N(x_i)$ το πλήθος των παρατηρήσεων. Η στατιστική ελεγχοσυνάρτηση του K-S test δίνεται από την μέγιστη απόλυτη διαφορά μεταξύ της εμπειρικής αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας και της συνάρτησης κανονικής κατανομής στην περίπτωση μας. Οι εκτιμήσεις τείνουν στις πραγματικές πληθυσμιακές παραμέτρους όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του δείγματος. Συνεπώς, η εγκυρότητα του ελέγχου K-S θεωρείται μεγαλύτερη για δείγματα μεγέθους $n > 25$.

Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 4) παρατηρούμε ότι με την διαδικασία του K-S test διενεργήθηκε έλεγχος μηδενικής υπόθεσης

$$H_0: F_{24}(x) = F(62.9567, 2.84759)$$

σε δείγμα μεγέθους 24 με υποθετική κανονική κατανομή με $N(62.9567, 2.84759)$ εκτιμώμενων από τις αντίστοιχες δειγματικές στατιστικές συναρτήσεις.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		V2 2018
N		20
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	13670.1955
	Std. Deviation	5488.33968
Most Extreme Differences	Absolute	.105
	Positive	.105
	Negative	-.090
Kolmogorov-Smirnov Z		.471
Asymp. Sig. (2-tailed)		.980

Monte Carlo Sig. (2-tailed)	Sig.		.960 ^c
	99% Confidence Interval	Lower Bound	.955
		Upper Bound	.965

- Test distribution is Normal.
- User-Specified
- Based on 10000 sampled tables with starting seed 2000000.

Οι ακραίες διαφορές μεταξύ των συναρτήσεων αυτών περιγράφονται στην γραμμή most Extreme Differences. Έτσι, η μέγιστη απόλυτη διαφορά βρέθηκε ίση με 0.105, η μέγιστη θετική διαφορά βρέθηκε ίση με 0.105 ενώ η ακραία αρνητική διαφορά βρέθηκε ίση με -0.090.

Η τιμή της συνάρτησης ελέγχου αναφέρεται ως 0.471. Προκειμένου να αποφανθούμε περί της κανονικότητας ή μη της εξεταζόμενης κατανομής V2018 εστιάζουμε στη γραμμή που αναφέρει Asymp.Sig (2-tailed). Η αναφερόμενη εκεί τιμή είναι 0.980 Με στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0.05$ (αλλά και σε $\alpha=0.01$, αφού η p-value είναι εξαιρετικά μεγάλη) αποδεχόμαστε τη μηδενική υπόθεση.

Μια ακόμα δυνατότητα στατιστικού ελέγχου της κανονικότητας δίνεται με χρήση του κριτηρίου Shapiro-Wilk. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες υποθέσεις με το K-S test αναδιατάσσουμε τα δεδομένα του δείγματος σε φθίνουσα σειρά και υπολογίζουμε την στατιστική συνάρτηση

$$W := \frac{\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2}$$

όπου α_i είναι η σταθερές που προκύπτουν από τις μέσες τιμές, διακυμάνσεις και τις συνδιακυμάνσεις των διατεταγμένων στατιστικών ενός κανονικού δείγματος. Συνήθως ο έλεγχος αυτός προτιμάται από τον K-S όταν το δείγμα είναι $n \leq 25$.

Τέλος η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά test αφορά τα σημεία στα οποία παρουσιάζουν ευαισθησία. Πιο συγκεκριμένα η δοκιμή «Shapiro – Wilk» έχει ευαισθησία στην «ουρά». Αυτό σημαίνει όταν τα δεδομένα εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές κανονικών δεδομένων στα άκρα. Τότε το test μπορεί να μας παρουσιάσει εσφαλμένα αποτελέσματα. Αντίθετα η δοκιμή «Kolmogorov – Smirnov» παρουσιάζει

ευαισθησία στην απόκλιση που μπορούν να εμφανίζουν τα μεσαία δεδομένα της από τα αντίστοιχα της κανονικής κατανομής.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν:

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
V2_2018	.134	10	.200*	.955	10	.729
V3_2019	.131	10	.200*	.941	10	.566
V4_2020	.155	10	.200*	.955	10	.727
V5_2021	.196	10	.200*	.881	10	.135
V6_2022	.151	10	.200*	.928	10	.425

Πίνακας 4: Test of Normality Shapiro - Kolmogorov, Πηγή: SPSS Analysis

Για αρχή να αναφέρουμε ότι τα V2,V3, V4, V5, V6, αντιστοιχούν όπως και στους προηγούμενους ελέγχους στις χρονολογίες 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 κτλ. Το df σημαίνει degree of freedom και αναφέρεται στους βαθμούς ελευθερίας όπου στην περίπτωση μας είναι 10, καθώς έχουμε 10 δεδομένα. Τέλος, όπως βλέπουμε το Sig (significance) είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο από το 0,05, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι έχουμε κανονική κατανομή.

6.7 CO₂ Emissions 2nd Part

Στο 2^ο μέρος των εκπομπών σε διοξείδιο του άνθρακα, αυξήσαμε τον αριθμό των δεδομένων μας, δηλαδή των πλοίων, από 10 σε 20, με στόχο και πάλι το n να είναι μικρότερο του 30 που απαιτείται για την χρήση της Student κατανομής αλλά ταυτόχρονα να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια. Για τα νέα δεδομένα-πλοία ισχύει ότι έχουν κάνει όσο το δυνατόν πανομοιότυπα ταξίδια. Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων και των τεστ κανονικότητας με μικρό σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

6.8 Kolmogorov – Shapiro Normality Test

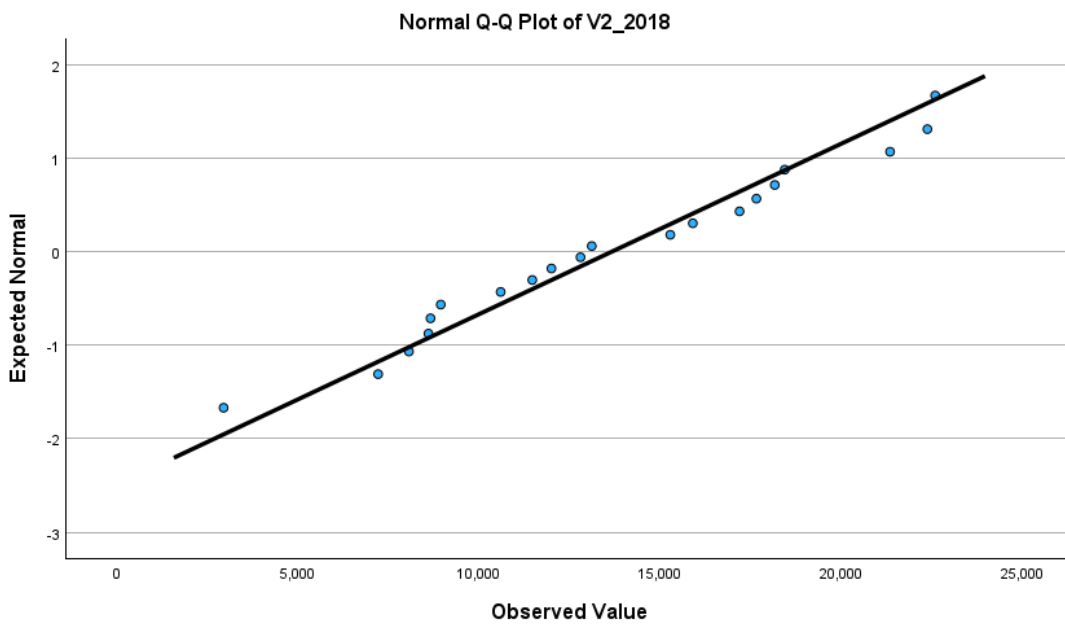
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
V2_2018	.105	20	.200*	.966	20	.671
V3_2019	.155	20	.200*	.937	20	.214
V4_2020	.123	20	.200*	.958	20	.511
V5_2021	.146	20	.200*	.925	20	.125
V6_2022	.145	20	.200*	.936	20	.203

Πίνακας 5: Έλεγχος Κανονικότητας, Πηγή: SPSS Analysis

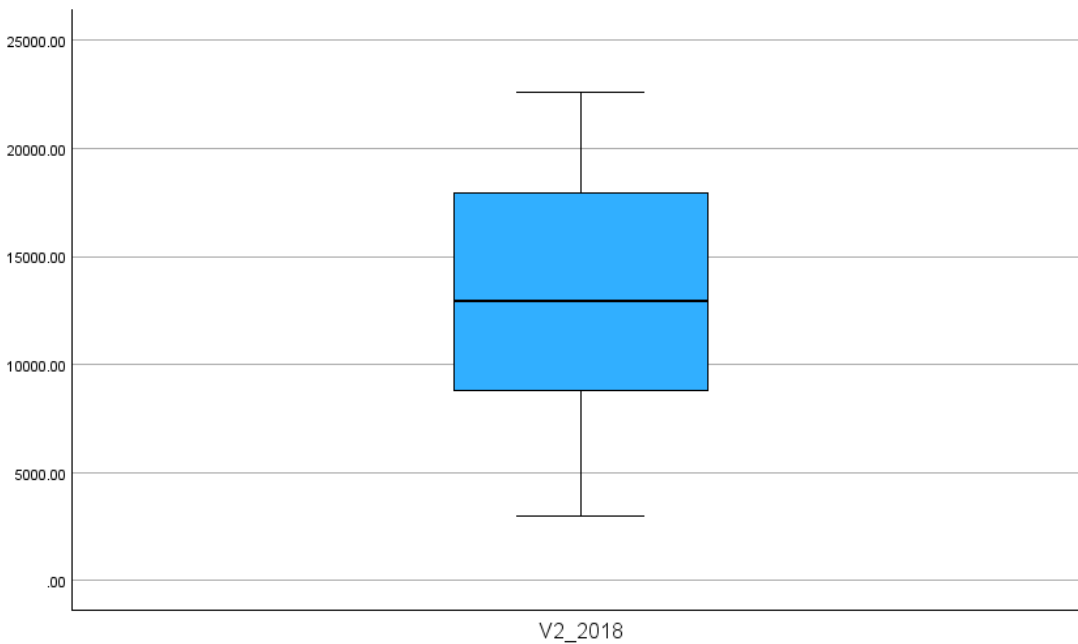
BOX PLOT – QQ PLOT

Το Shapiro-Wilk τεστ επαληθεύει την κανονικότητα των αποτελεσμάτων με τιμές μεγαλύτερες του 0.05 για όλες τις χρονολογίες. Ακολουθούν τα διαγράμματα box plot και qq plot για κάθε χρονιά.

QQ – BOX PLOT V2

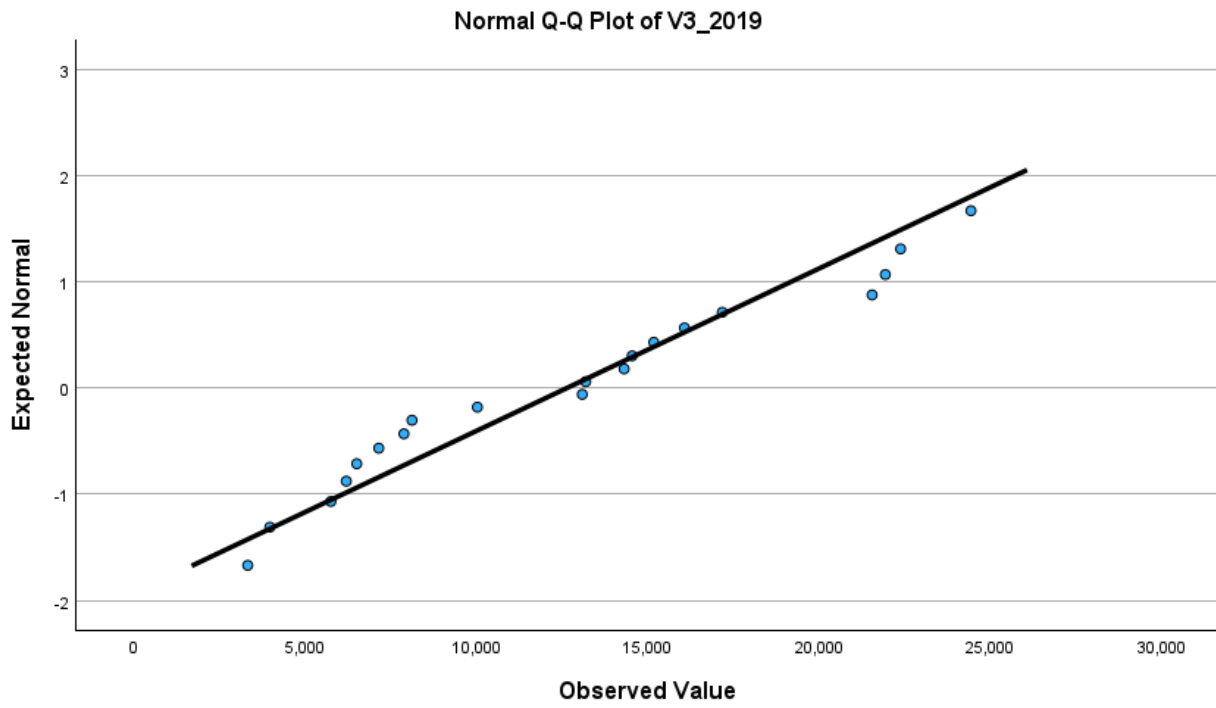


Γραφική παράσταση 16: QQ PLOT for CO₂ emissions 2018, Πηγή: SPSS Analysis

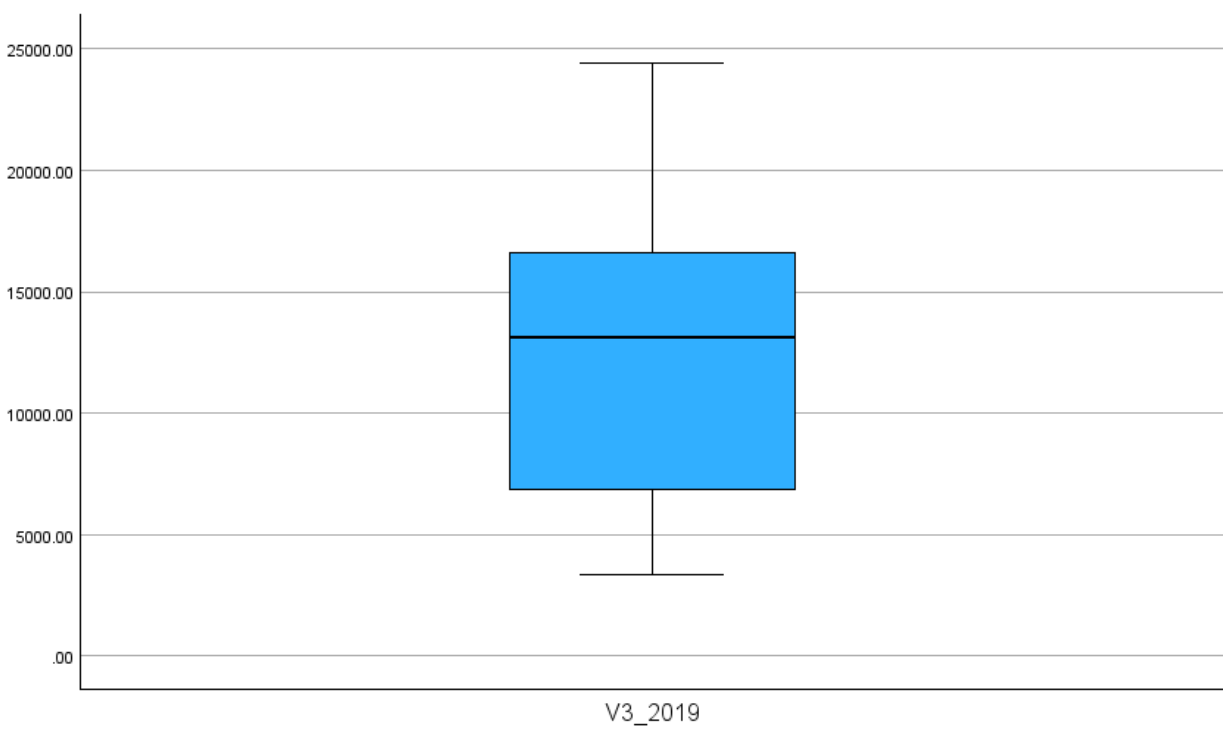


Γραφική παράσταση 17: BOX PLOT for CO₂ emissions 2018, Πηγή: SPSS Analysis

QQ – BOX PLOT V3

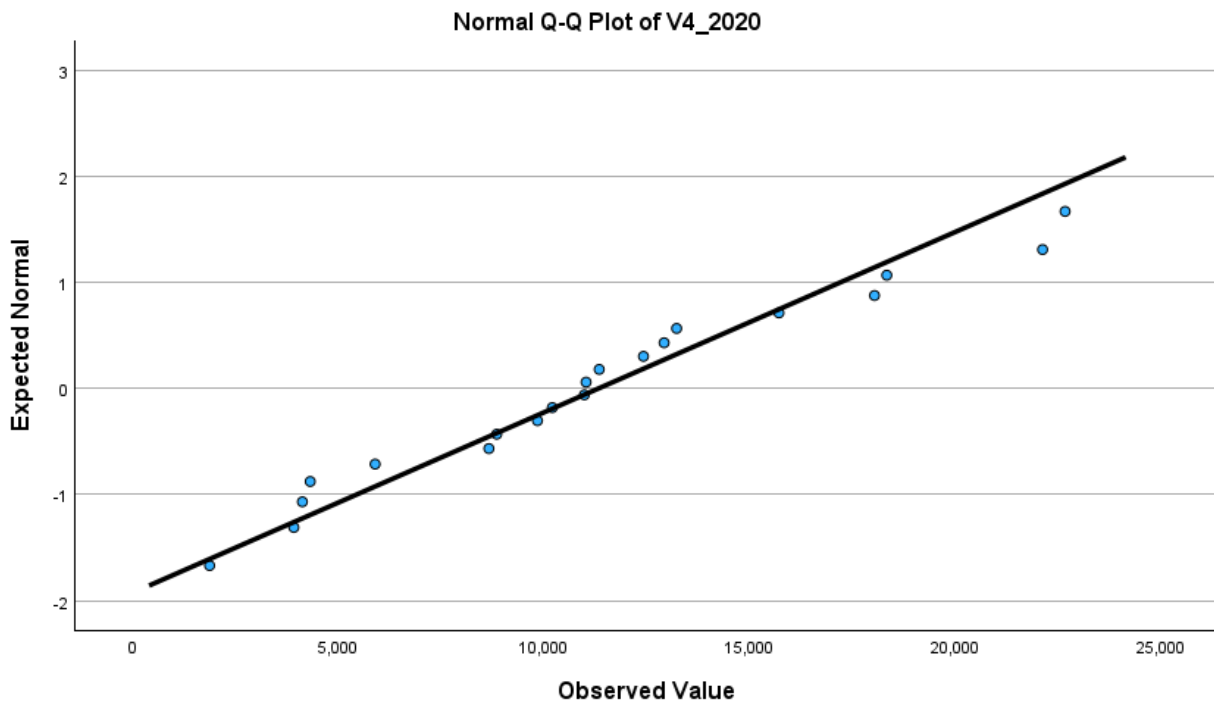


Γραφική παράσταση 18: QQ PLOT for CO₂ emissions 2019, Πηγή: SPSS Analysis

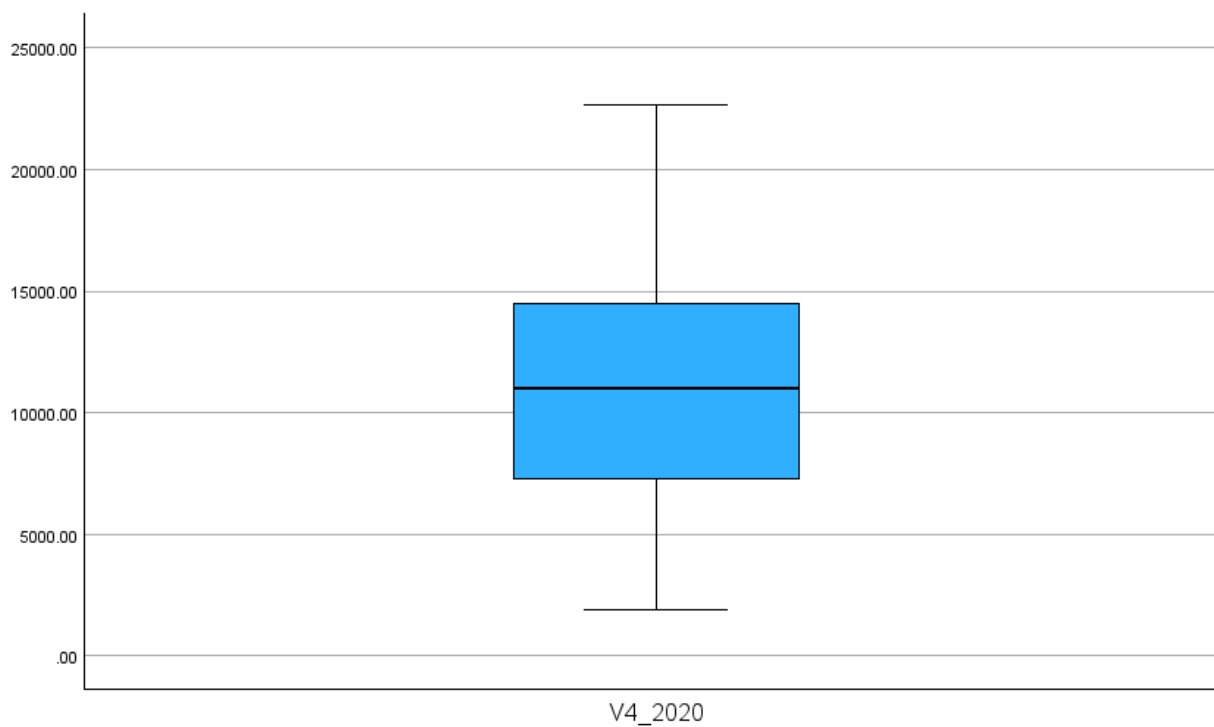


Γραφική παράσταση 19: BOX PLOT for CO₂ emissions 2019, Πηγή: SPSS Analysis

QQ – BOX PLOT V4

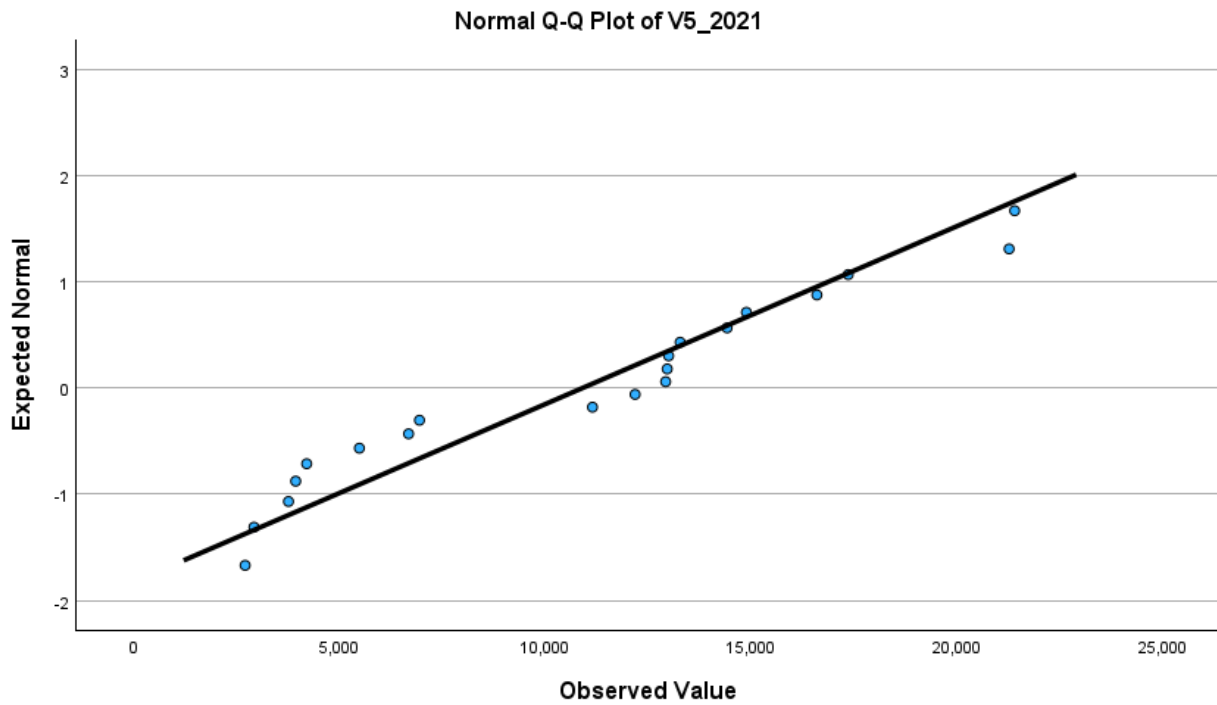


Γραφική παράσταση 20: QQ PLOT for CO₂ emissions 2020, Πηγή: SPSS Analysis

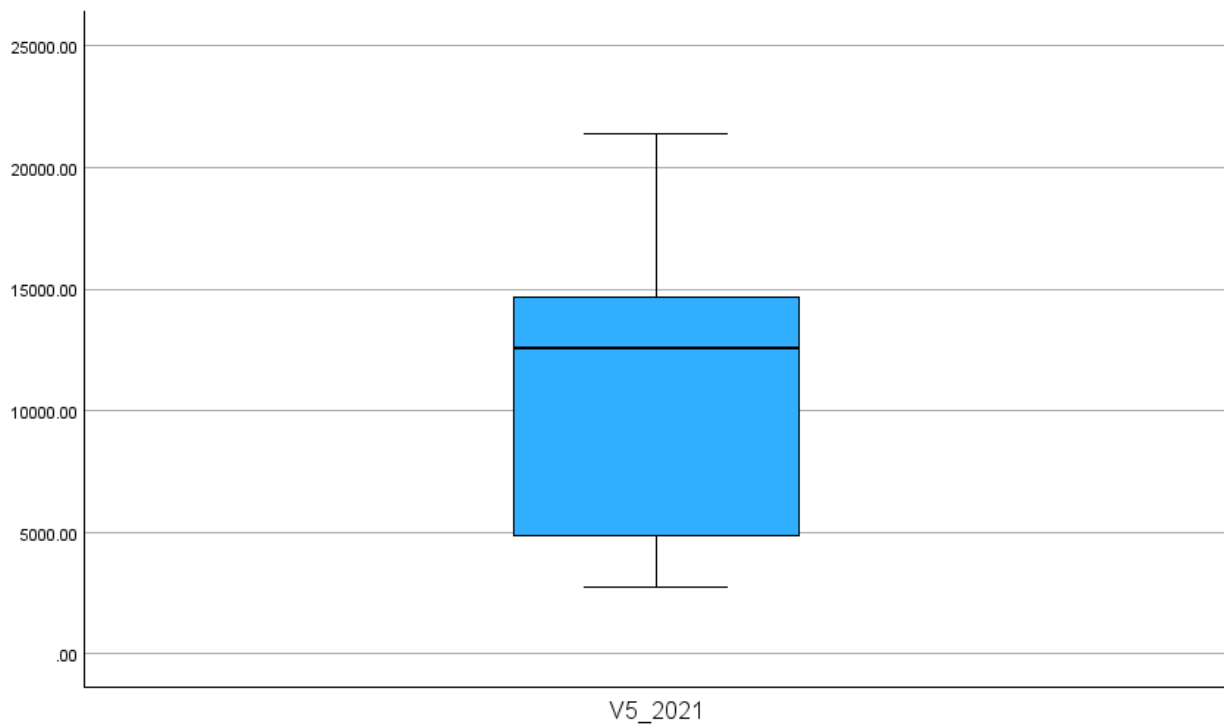


Γραφική παράσταση 21: BOX PLOT for CO₂ emissions 2020, Πηγή: SPSS Analysis

QQ – BOX PLOT V5

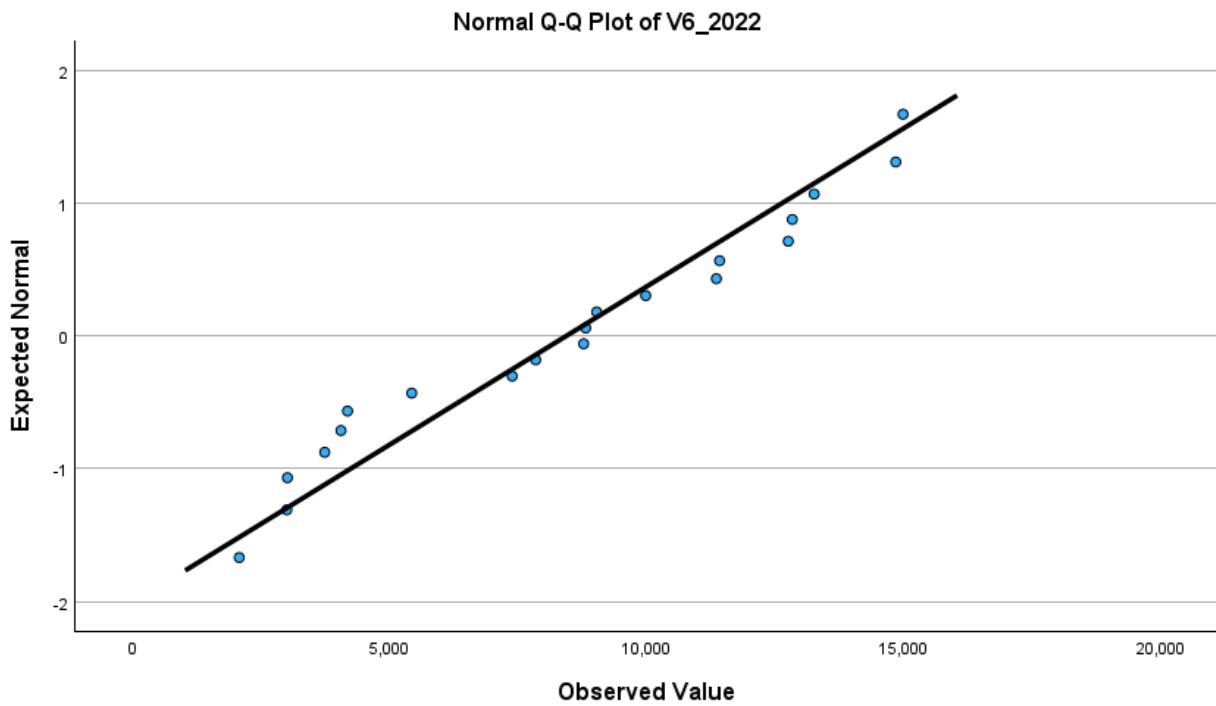


Γραφική παράσταση 22: QQ PLOT for CO₂ emissions 2021, Πηγή: SPSS Analysis

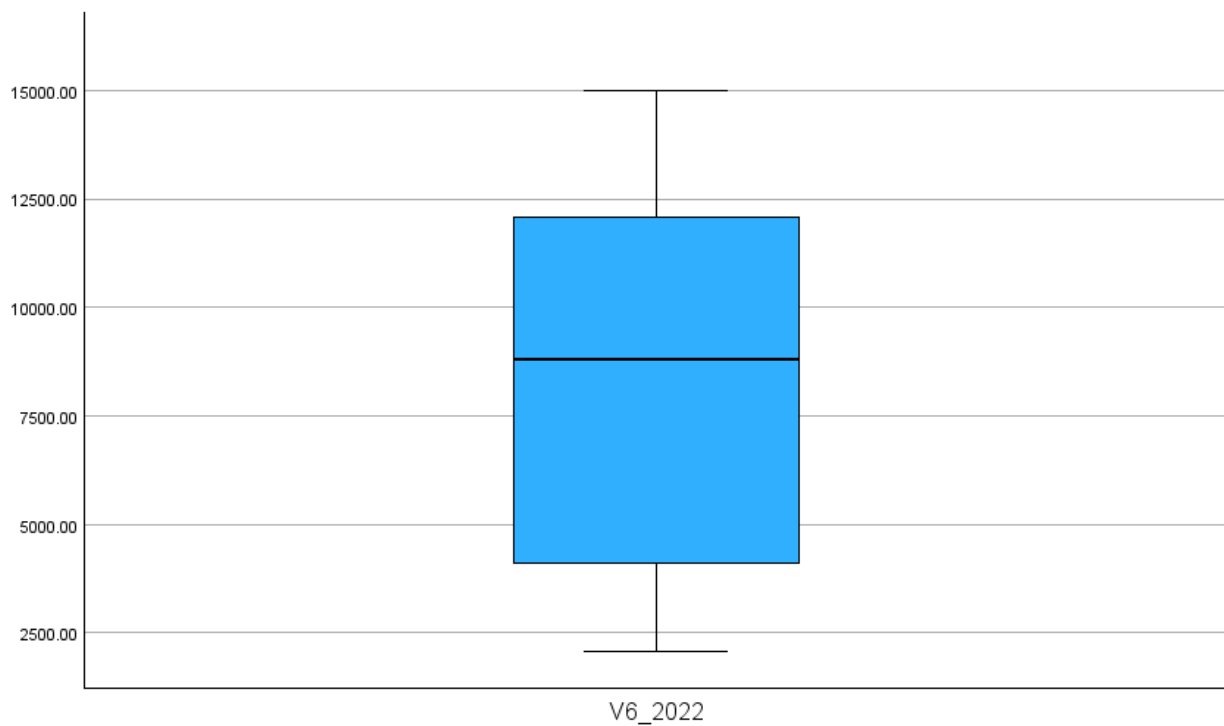


Γραφική παράσταση 23: BOX PLOT for CO₂ emissions 2021, Πηγή: SPSS Analysis

QQ – BOX PLOT V6



Γραφική παράσταση 24: QQ PLOT for CO₂ emissions 2022, Πηγή: SPSS Analysis



Γραφική παράσταση 25: BOX PLOT for CO₂ emissions 2022, Πηγή: SPSS Analysis

6.9 T TEST

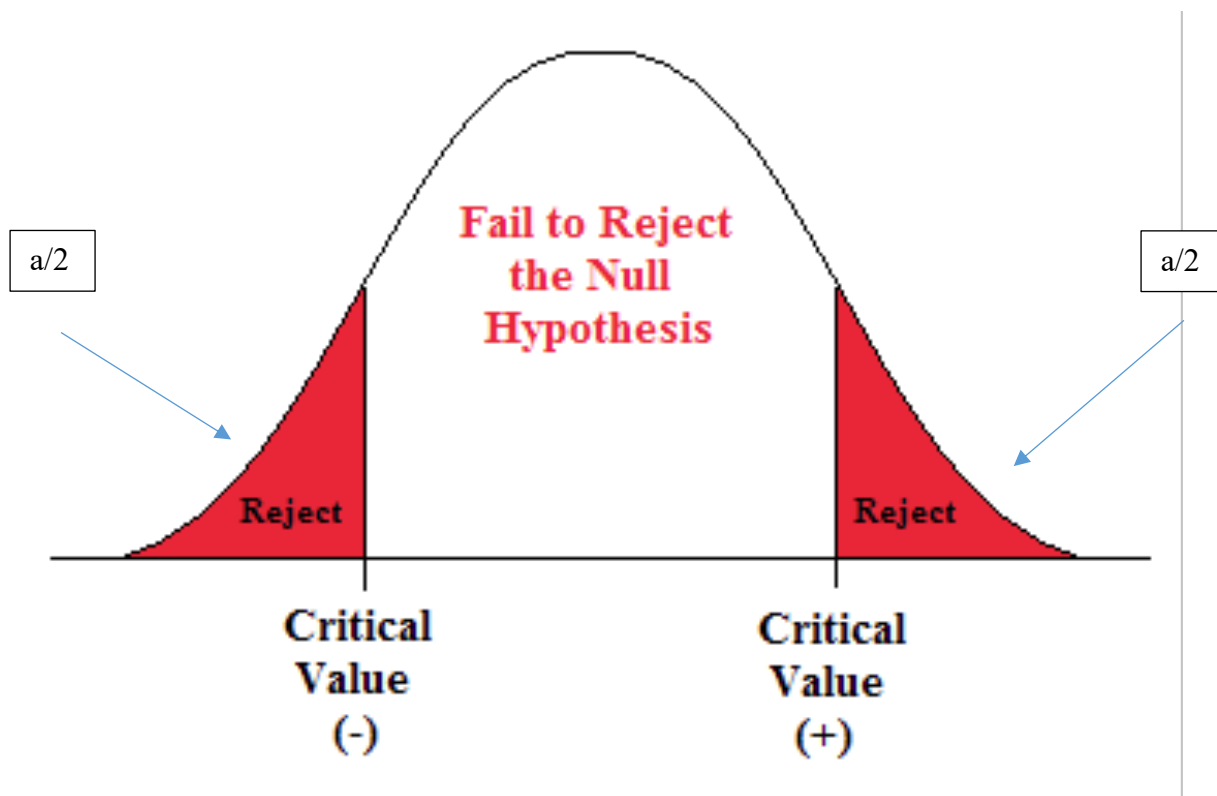
Μία πληθυσμιακή παράμετρος όπως είναι η μέση τιμή εκπομπής CO₂ μπορεί να εκτιμηθεί από τα δειγματικά δεδομένα όπως είδαμε παραπάνω. Ο στόχος μίας έρευνας όμως, δεν είναι απλώς η εκτίμηση μίας παραμέτρου αλλά η εξακρίβωση της ορθότητας ή όχι κάποιας ερευνητικής υπόθεσης σχετικά με την παράμετρο αυτή. Συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή θέλουμε να εξακριβώσουμε αν με την πάροδο των τελευταίων ετών και την επιβολή των κανονισμών, υπάρχει μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Για τη μελέτη αυτή θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά ένα σύνολο από 10 πλοία. Λόγω του αριθμού των δεδομένων μας, θα κάνουμε χρήση του στατιστικού τεστ υποθέσεων t - test. [15]

1^η Περίπτωση:

Η πρώτη υπόθεση που έχουμε κάνει είναι ότι η διαφορά που έχουν οι μέσες τιμές για την ομάδα αυτή των πλοίων, δεν έχει αλλάξει ανάμεσα από χρονιά σε χρονιά, δηλαδή $\text{diffvar} = \mu_1 - \mu_2 = \mu = 0$, με εναλλακτική υπόθεση ότι υπάρχει διαφορά.

H_0 : Μηδενική Υπόθεση : $\mu_1 - \mu_2 = \mu = 0$

H_1 : Εναλλακτική Υπόθεση : $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$



Εικόνα 6.4: t - test hypothesis, [15]

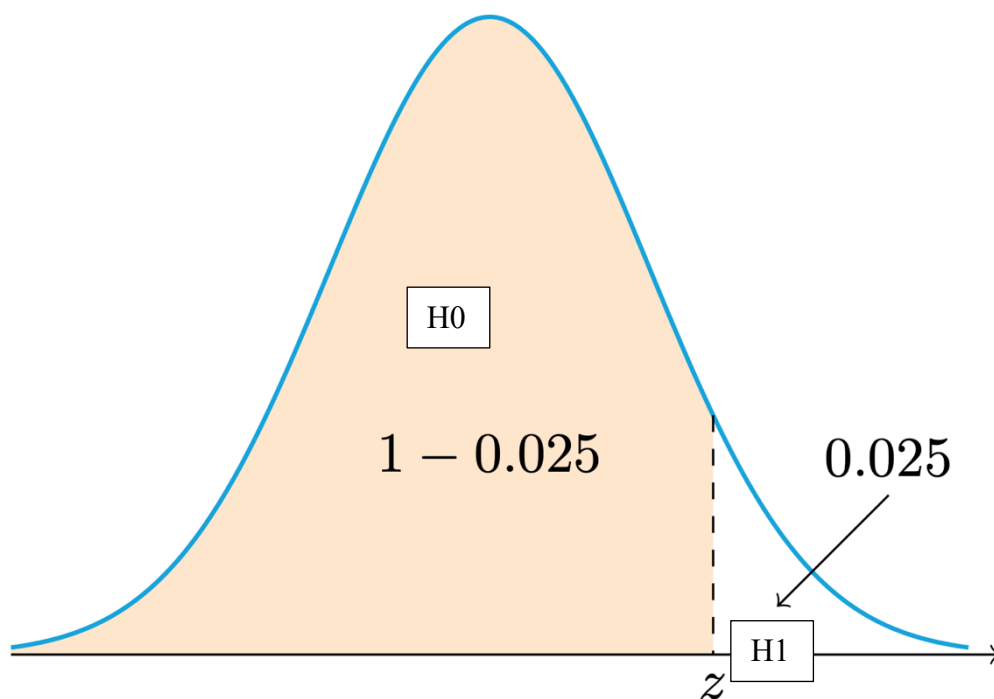
Αναφορικά με το διάστημα εμπιστοσύνης, το οποίο εδώ το ορίσαμε 95% πρέπει να τονίσουμε το εξής: Γενικότερα κανείς δεν μπορεί να είναι σίγουρος ότι η τιμή της εκτιμήτριας θα συμπίπτει με την άγνωστη παράμετρο. Προφανώς το κάθε δείγμα θα έχει την δική του σημειακή εκτίμηση. Για τον λόγο αυτό είναι χρήσιμο να προβούμε στην κατασκευή ενός διαστήματος εμπιστοσύνης για την άγνωστη παράμετρο, δηλαδή ένα διάστημα της μορφής $[L,U]$ το οποίο μπορεί να περιέχει την παράμετρο με αρκετά μεγάλη πιθανότητα. Για τα διαστήματα εμπιστοσύνης συνήθως γίνεται ο υπολογισμός με τιμές επιπέδου σημαντικότητας (ε.σ.) $\alpha=0.10, 0.05, 0.025,$ και 0.001 . Η πιθανότητα $1-\alpha$, λέγεται συντελεστής διαστήματος εμπιστοσύνης.

2^η περίπτωση

Ο δεύτερος έλεγχος αφορά την μείωση των εκπομπών, συγκεκριμένα έχουμε τις παρακάτω υποθέσει diffvar:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 < 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$$



Εικόνα 6.5: *t*-test hypothesis, Πηγή: Θεωρία Πιθανοτήτων και στατιστικής – Μ.Ε.Φιλιππάκης

Στην περίπτωση αυτή στόχος είναι να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση, δηλαδή η H_0 και κατά συνέπεια να γίνει η αποδοχή με το αντίστοιχο ε.σ. ότι το μ_2 μειώθηκε και κατά συνέπεια μειώθηκαν και οι εκπομπές.

Η τιμή του t test, αυτός ορίζεται ως εξής:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

όπου \bar{x} είναι η μέση τιμή του δείγματός, s η δειγματική απόκλιση, μ_0 η τιμή σύγκρισης και n είναι το μέγεθος του δείγματος.

Για τη μελέτη του ελέγχου υποθέσεων ορίσαμε καινούριες μεταβλητές τα diffvar. Για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε το t test, πρέπει να ελέγξουμε αν οι μεταβλητές που ορίσαμε ακολουθούν κανονική κατανομή. Για τον έλεγχο αυτό πραγματοποιήθηκαν τα τστ κανονικότητας «Shapiro – Kolmogorov».

Το diffvar1 ορίζεται ως η διαφορά του 2018 – 2019, το diffvar2 ως η διαφορά του 2019 – 2020, το diffvar3 η διαφορά του 2020 – 2021 και τέλος το diffvar4 η διαφορά του 2021 – 2022.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
diffvar1	.213	20	.018	.901	20	.044
diffvar2	.165	20	.154	.936	20	.200
diffvar3	.169	20	.135	.956	20	.463
diffvar4	.213	20	.017	.863	20	.009

a. Lilliefors Significance Correction

Πίνακας 6: Έλεγχος Κανονικότητας, Πηγή: SPSS Analysis

Στον Πίνακα 6 οι μεταβλητές diffvar1 και diffvar 4, λαμβάνουν τιμές μικρότερες του 0.05, το οποίο σημαίνει ότι δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα δεν μπορεί για αυτές να πραγματοποιηθεί το αντίστοιχο t test. Αυτό συμβαίνει γιατί στις χρονολογίες που ανήκουν οι μεταβλητές αυτές υπήρχε η ύπαρξη ακραίων τιμών στις εκπομπές CO2, πιθανότατα λόγω της

αύξησης των ναυλώσεων. Στον Πίνακα 7, βλέπουμε το t test για τις μεταβλητές diffvar2 και diffvar3.

One-Sample Test							
Test Value = 0							
	t	df	Significance		Mean Difference	90% Confidence Interval of the Difference	
			One-Sided p	Two-Sided p		Lower	Upper
diffvar 2	2.954	19	.004	.008	2534.03900	1050.8365	4017.2415
diffvar 3	1.551	19	.069	.137	1969.92100	-226.4679	4166.3099

Πίνακας 7: t – test , Πηγή: SPSS Analysis

Με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.01$ (two sided) και $\alpha=0.05$ (one sided) η μεταβλητή diffvar2 είναι $t=2.954$, πολύ πάνω από την κρίσιμη τιμή $t = 1.729$ με p-value $0.008 < 0.01$ και $0.004 < 0.05$ αντίστοιχα, οπότε δεχόμαστε την μείωση, ενώ **για το diffvar3 αποδεχόμαστε την μηδενική υπόθεση καθώς δεν έχουμε αρκετά στοιχεία για να την απορρίψουμε.**

Συνεχίζοντας, επειδή οι μεταβλητές diffvar1 και diffvar4 δεν ακολουθούν κανονική κατανομή δεν μπορούμε να πραγματοποιήσουμε t test. Για τον λόγο αυτό, ορίζεται μία νέα μεταβλητή, η $diffvar5 = diffvar1 - diffvar4$. Η απόφαση αυτή πάρθηκε, καθώς οι τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τις ενδιάμεσες χρονιές μεταξύ του 2018 και του 2022 δεν ήταν οι αναμενόμενες καθώς λόγω της πανδημίας υπήρχε μία αύξηση στις ναυλώσεις πλοίων (παύση αεροπορικών μεταφορών) και άρα αύξηση των εκπομπών. Επομένως, για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έγινε ο έλεγχος για την ύπαρξη μείωσης ανάμεσα στις χρονολογίες 2018 και 2022 που θεωρητικά δεν έχουν επηρεαστεί από την πανδημία.

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
diffvar5	.124	20	.200*	.971	20	.781

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Πίνακας 8: Έλεγχος Κανονικότητας , Πηγή: SPSS Analysis

Για την μελέτη της μεταβλητής αυτής πραγματοποιήθηκε έλεγχος κανονικότητας ο οποίος με βάση το Shapiro Kolmogorov test, έδειξε ότι η diffvar5 ακολουθεί κανονική κατανομή.

One-Sample Test							
Test Value = 0							
	t	df	Significance		Mean Difference	90% Confidence Interval of the Difference	
			One-Sided p	Two-Sided p		Lower	Upper
diffvar 5	4.209	19	<.001	<.001	5232.18700	3082.7164	7381.6576

Πίνακας 9: t – test , Πηγή: SPSS Analysis

Από τον έλεγχο των υποθέσεων t-test έχουμε ότι $t=4.209$ με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.01$ (two sided) και $\alpha=0.05$ (one sided) με p-value <0.001 και στις δύο περιπτώσεις. Συνεπώς, καθώς η τιμή t είναι πολύ μεγαλύτερη της κρίσιμης 1.729 δεχόμαστε την μείωση των εκπομπών για την σύγκριση των χρονολογιών 2018-2022.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Μέσω της συγκεκριμένης στατιστικής ανάλυσης, μπορέσαμε και κάναμε μία εκτίμηση, στο κατά πόσο οι εκπομπές σε διοξείδιο του άνθρακα και σε διοξείδιο του θείου μειώθηκαν με την πάροδο των ετών. Με βάση τον όγκο δεδομένων που είχαμε στην διάθεση μας, είδαμε ότι οι εκπομπές σε CO₂, παρουσίασαν μία σημαντική μείωση, από το έτος 2018 μέχρι και το 2022. Επιπλέον, με την εφαρμογή του IMO Sulphur Cap 2020, οι εκπομπές μειώθηκαν κατά 366%.

7.2 Προτάσεις

Στο μέλλον σε κάποια διπλωματική εργασία, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη ανάλυση έχοντας όμως ως κύρια μεταβλητή το νεκρό βάρος του πλοίου (Deadweight) με δεδομένα που θα έχουν συλλεχτεί σε real time. Επιπλέον, σε επίπεδο διδακτορικής διατριβής, θα μπορούσαμε να έχουμε ως μεταβλητή την κατανάλωση σε καύσιμο που έχει το πλοίο ανά ναυτικό μίλι που διανύει με δεδομένα που θα έχουν συλλεχτεί σε real time .

Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

8.1 Λίστα Paper

- 1) Μιχαήλ Περδικόπουλος, Υπολογισμός εκπομπών ρύπων από την ναυτιλία στον λιμένα της Μασσαλίας, Ιούλιος 2021, Αριθμός Σελίδων.: 64, από:
<https://ikee.lib.auth.gr/record/336902/files/Μιχαήλ%20Περδικόπουλος%20-%20Διπλωματική%20εργασία-converted.pdf>
- 2) United Nations Research, Covid 19 and Maritime Crisis, Ιανουάριος 2022, Αριθμός Σελίδων: 99, από:
https://unctad.org/system/files/official-document/tesdtlinf2022d1_en.pdf
- 3) Masaaki Okubo, Takuya Kuwahara, Introduction in Naval Architecture, February 2020, Αριθμός Σελίδων: 77, από:
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/passenger-ship>
- 4) Jasper Faber, Maarten t' Hoen, TU DELFT, Estimated Index Value of Ships 2009 – 2016, May 2017, Αριθμός Σελίδων: 24, από:
https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/2017_07_CE_Delft_7L97_Estimated_Index_Values_of_Ships_2009-2016_def_2017.pdf
- 5) Alfa Val, Reducing NOx emissions from ship exhaust, January 2020, Αριθμός Σελίδων: 20, από:
https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/process-solutions/marine-exhaust-gas-solutions/purenox/reducing-nox-emissions-from-ship-exhaust_white-paper_en.pdf
- 6) Bryan Comer, Samantha McCabe, Edward W. Carr, Max Elling, Elise Sturup, Bettina Knudsen, Jörg Beecken, James J. Winebrake, Real worlds NOx emission from ships and implication for future regulations, ICCT, October 2023, Αριθμός Σελίδων: 15, από:
<https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Marine-real-world-NOx-Working-paper-20-A4-v6.pdf>

- 7) M.I Lamas, C.G Rodriguez, Emissions from marine engines and reduction Methods, JMR, February 2012, Αριθμός Σελίδων: 5, από:
<https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/172/168>
- 8) Fatih Okumus, Gorkem Kokkulunk, NOx reduction methods usen in marine diesel engines, June 2023, Αριθμός Σελίδων: 12, από:
https://www.researchgate.net/publication/371919467_Nitrogen_Oxides_NOx_Reduction_Methods_Used_in_Marine_Diesel_EngineGemi_Dizel_Motorunda_Azot_Oksitle_ri_NOx_Indirgeme_Yontemleri
- 9) Χρήστος Παπαδόπουλος, Μάριος Κουρτελέσης, Αναστασία – Μαρία Μοσχοβή, Κωνσταντίνος Μιλτιάδης Σάκκας, Ιάκωβος Γιακουμής, Selected Techniques for cutting SOX emissions in Maritime Industry, Techologies 2022, Αύγουστος 2022, Αριθμός Σελίδων: 21, από:
<https://www.mdpi.com/2227-7080/10/5/99>
- 10) Hulda Wines, Erik Fridell, Jana Moldanova, Effects on Marine Exhaust Gas Scrubbers on gas and particle emissions, Marine Engineer performance and emissions, April 2020, Αριθμός Σελίδων: 21, από:
<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/4/299>
- 11) Τσαούσης Κωνσταντίνος, Scrubbers in shipping, Οκτώβριος 2019, Αριθμός Σελίδων: 98, από:
<https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/12309/Tsaousis.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- 12) Navigo, IMO 2020 and Scrubbers – Frequently Asked questions, Μάρτιος 2018, Αριθμός Σελίδων: 17, από:
<https://eclass.unipi.gr/modules/document/file.php/NAS247/Shipping%20environmental%20-%20safety%20reports/2018%2003%2005%20IMO%202020%20%26%20Scrubber%20-%20Frequently%20asked%20questions%20%28white%20paper...%20%281%29.pdf>

- 13) ABS, Advisory on exhaust gas scrubber systems, Ιούλιος 2018, Αριθμός Σελίδων: 52, από:
<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/exhaust-gas-scrubber-systems-advisory.pdf>
- 14) Prabhaker Mishra, Chandra M Pandey, Uttam Singh, Anshul Gupta, Chinmoy Sahu, Amit, Keshri, Descriptive Statistics and Normality Test for Statistical Data, Μάρτιος 2019, Αριθμός Σελίδων: 13, από:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6350423/>
- 15) Μιχαήλ Φιλιππάκης, Θεωρία Πιθανοτήτων και στατιστικής, 2019, Αριθμός Σελίδων: 1024

8.2 Λίστα Συνδέσμων:

- 1) <https://e-nautilia.gr/katigories-kai-eidi-ploiwn/>
- 2) <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20170213STO62208/to-sustima-emporias-dikaiomaton-ekpompon-tis-ee-kai-i-metarruthmisi-tou>
- 3) <https://elinyae.gr/lexeis-kleidia/kanonismos-mrv>
- 4) <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20220610STO32720/meiosi-ekpompon-apo-aeroplana-kai-ploia-ta-metra-tis-ee>
- 5) <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/index.php?course=NAFP117&openDir=/5264d892cp5y/5c41c556AGn8>
- 6) <https://www.helmholtz-klima.de/aktuelles/die-rolle-des-seeverkehrs-klimaschutz-und-globale-bedeutung>
- 7) https://unctad.org/system/files/official-document/tcsdtinf2022d1_en.pdf
- 8) <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2024>
- 9) <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schifffahrt#fakten-zur-seeschifffahrt-und-zu-ihren-auswirkungen-auf-die-umwelt>
- 10) <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-calculator/>
- 11) <https://www.transportenvironment.org/challenges/ships/greenhouse-gases/>
- 12) <https://de.wikipedia.org/wiki/Massengutfrachter>

- 13) <https://www.planet-wissen.de/technik/schifffahrt/handelsschifffahrt/pwietankergigantendermeere100.html>
- 14) <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20191129STO67756/co2-emissionen-des-luft-und-schiffsverkehrs-zahlen-und-fakten-infografik>
- 15) <https://www.myclimate.org/de-ch/informieren/faq/faq-detail/was-ist-der-treibhauseffekt/>
- 16) <https://www.nature.com/articles/s43017-022-00285-w#Fig1>
- 17) <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
- 18) https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Schifffahrt/Umwelt_und_Schifffahrt/Schiffsemissionen/schiffsemissionen_node.html
- 19) <https://dieselnet.com/standards/us/marine.php>
- 20) [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/direct-water-injection-\(dwi\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/direct-water-injection-(dwi))
- 21) <https://www.epa.gov/general-conformity/general-conformity-training-modules-appendix-sample-emissions-calculations>
- 22) <https://www.standard-club.com/knowledge-news/article-exhaust-gas-cleaning-systems-scrubber-guidance-1234/>
- 23) <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-low-sulphur-shipping-rules-are-affecting-global-warming/>
- 24) <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>
- 25) <https://www.egcsa.com/technical-reference/what-are-the-effects-of-sulphur-oxides-on-human-health-and-ecosystems/>
- 26) <https://www.purenviro.com/en/2018/09/11/new-sox-regulation-affects-70-000-ships/>
- 27) <https://www.transportenvironment.org/challenges/ships/european-shipping-emissions-2022/>
- 28) <https://www.kaggle.com/code/ronand97/eu-ship-emissions>