



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ & ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ & ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Παναγιώτης Σταυρίδης

Επιβλέπων Διπλωματικής: Επίκουρος Καθηγητής, Νικόλαος Θεμελής

Αθήνα, Ιούνιος 2023

Σύνοψη

Η βοηθητική ισχύς των γεννητριών ντίζελ είναι μείζονος σημασίας για τη λειτουργία του πλοίου. Κατά συνέπεια, ένα μεγάλο πλοίο διαθέτει τρεις ή τέσσερις διαφορετικές γεννήτριες ντίζελ. Ειδικότερα, σε πλοία τύπου containerships που φέρουν εμπορευματοκιβώτια ψύξης (reefers) οι ανάγκες βοηθητικής ισχύος είναι αυξημένες. Γι' αυτό, απαιτείται παρακολούθηση και αξιολόγηση της λειτουργίας αυτών των μηχανημάτων, ώστε να επιτυγχάνεται η χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση και επομένως εξοικονόμηση πόρων. Η διπλωματική εργασία αναλύει τη λειτουργία τεσσάρων γεννητριών ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, συμπεριλαμβανομένων reefers με βάση επιχειρησιακά δεδομένα που αφορούν χρονικό διάστημα τρεισήμισι ετών και στοχεύει στη συσχέτιση μεταξύ μεταβλητών που διέπουν τη λειτουργία των γεννητριών και στην πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου. Για να επιτευχθούν οι στόχοι, τα δεδομένα υπόκεινται σε μια αρχική επεξεργασία, η λειτουργία του πλοίου διαχωρίζεται σε δύο κύριες καταστάσεις λειτουργίας (πλου και ελλιμενισμού) και πραγματοποιείται μια στατιστική ανάλυση για την αρχική κατάσταση των συστημάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάλυση γραμμικής συσχέτισης με βάση το συντελεστή Pearson για την εξέταση της συσχέτισης της κατανάλωσης καυσίμου με τις υπόλοιπες μεταβλητές. Αφού πραγματοποιηθεί ένας επόμενος κύκλος φιλτραρίσματος (εκκαθάριση), ακολουθεί ο υπολογισμός των μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε μια από τις δύο κύριες καταστάσεις λειτουργίας όσον αφορά την πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου των ηλεκτρομηχανών. Στα μοντέλα πρόβλεψης οι δείκτες πρόβλεψης είναι το ηλεκτρικό φορτίο, ο αριθμός των κιβωτίων ψύξης και ο χρόνος λειτουργίας των γεννητριών. Τέλος πραγματοποιείται σύγκριση των μοντέλων των καταστάσεων λειτουργίας που υποδεικνύει τη λειτουργία εν πλω ως τη βέλτιστη ως προς την κατανάλωση καυσίμου.

Λέξεις Κλειδιά

ηλεκτρογεννήτρια; Η/Γ; ανάλυση γραμμικής συσχέτισης; συντελεστής Pearson; εν όρμω; κατάσταση θαλάσσης; καταστάσεις λειτουργίας; εκκαθάριση δεδομένων; μοντέλο πρόβλεψης; κατανάλωση καυσίμου; ηλεκτρική ισχύς; εμπορευματοκιβώτια ψυγεία; χρόνος λειτουργίας; γραμμική παλινδρόμηση; προβλεπόμενη κατανάλωση; σύγκριση καταστάσεων

Abstract

The auxiliary power of the diesel generators is of major importance for the operation of the ship. Consequently, a large ship carries three or four different diesel generators. In particular, on container ships carrying refrigerated containers (reefers) the need for auxiliary power is increased. Therefore, monitoring and evaluation of the operation of these machines is required in order to achieve the lowest possible consumption and therefore savings. The thesis describes the operation of four generators of a container ship, including reefers, based on operational data over a period of three and a half years and aims to correlate variables governing the operation of the generators and to predict fuel consumption. To achieve the objectives, the data are subjected to an initial processing, the ship operation is divided into two main operational states (sailing and berthing) and a statistical analysis is performed on the initial state of the systems. A linear correlation analysis based on the Pearson coefficient is then carried out, indicating the correlation between fuel consumption and the other variables. After a subsequent filtering (cleansing) cycle, a linear regression model for each of the two main operating states is synthesized for the prediction of the fuel consumption of the generators. In the predictive models, the predictive indicators are the electrical load, the number of reefers and the generators' operating time. In conclusion, a comparison of the operating condition models is made which indicates the open sea operation as optimal in terms of fuel consumption.

Keywords

diesel generator; DG; ανάλυση γραμμικής συσχέτισης; Pearson coefficient; at port; open sea; ship states; data filtering; predictive model; fuel consumption; electric Load; reefers; running time; linear regression; predicted consumption; states' comparison

[This page intentionally left blank]

Ευχαριστίες

Με τη διπλωματική εργασία αυτή, ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές, και αυτό είναι αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, μακροχρόνιων προσπαθειών πολλών ανθρώπων που συνέβαλαν και τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Αρχικά, αισθάνομαι βαθύτατη ευγνωμοσύνη προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου Νικόλαο Θεμελή, του οποίου η καθοδήγηση, η υπομονή και οι γνώσεις υπήρξαν καίριας σημασίας για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής σε κάθε επίπεδο δυσκολίας που συνάντησα. Τον ευχαριστώ ειλικρινά.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνεισφορά της ναυτιλιακής εταιρίας “Technomar Shipping Inc.®”, που εξασφάλισε και προσέφερε τα δεδομένα του πλοίου στα οποία βασίστηκε η μελέτη.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στο Πολεμικό Ναυτικό του οποίου οι μηχανικοί, κατά τη διάρκεια της θητείας μου, με βοήθησαν στην κατανόηση πολλών εκφάνσεων της λειτουργίας του πλοίου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στους γονείς μου και την αδελφή μου Ευαγγελία για την αμέριστη αγάπη, υποστήριξη και ενθάρρυνση όχι μόνο κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης αλλά και όλης της πορείας των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, με αλφαβητική σειρά, Γεώργιο Μ., Ευστάθιο Μ., Κωνσταντίνο Γ., Κωνσταντίνο Σ., Κωνσταντίνο Ψ., Μενέλαο Π., Παναγιώτη Α., Στέλιο Τ..

[This page intentionally left blank]

Περιεχόμενα

Σύνοψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες.....	5
Ονοματολογία.....	9
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	10
Περιεχόμενα Πινάκων.....	12
Περιεχόμενα Εικόνων	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	15
Εισαγωγή.....	15
1.1 Βοηθητική Ισχύς Πλοίων.....	15
1.2 Διαχείριση Ισχύος Φορτίου	15
1.2.1 Διαχείριση φορτίου γεννητριών.....	15
1.2.2 Μέθοδος ανάλυσης χρήσης βοηθητικών μηχανημάτων.....	16
1.2.3 Μέθοδοι βελτιώσεων	16
1.3 Μείωση Ηλεκτρικού Φορτίου.....	17
1.4 Μείωση Χρήσης Βοηθητικών Μηχανημάτων μέσω Συστήματος Σχεδιασμού.....	18
1.5 Παράλληλη Χρήση Ηλεκτρογεννητριών	18
1.6 Εμπορευματοκιβώτια Ψύξης	19
1.7 Ανασκόπηση Παρόμοιων Εργασιών.....	20
1.8 Υπολογιστικό Πλαίσιο και Στόχοι της Εργασίας.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	25
Αρχική Ανάλυση της Κατάστασης των Συστημάτων.....	25
2.1 Περιγραφή Μεθόδου Εφαρμογής Διαδικασίας.....	25
2.2 Επιλογή Μεταβλητών και Καταστάσεων Πλοίου.....	25
2.3 Ποσοστά Χρόνου Πλοίου σε Καταστάσεις Λειτουργίας.....	26
2.4 Παρουσίαση Αρχικών Στατιστικών Μεγεθών	27
2.5 Στατιστικά Μεγέθη για την Παράμετρο Running Hours για κάθε Γεννήτρια και Κατάσταση.....	32
2.6 Ανάλυση Γραμμικής Συσχέτισης με Χρήση του Συντελεστή Pearson	37
2.7 Αποτελέσματα Ανάλυσης Γραμμικής Συσχέτισης.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	48
Προετοιμασία Δεδομένων για το Μοντέλο Γραμμικής Παλλινδρόμησης.....	48

3.1 Εκκαθάριση Δεδομένων	48
3.2 Εφαρμογή Περιορισμών στα Δεδομένα	52
3.2.1 Electric Load	52
3.2.2 FOC.....	53
3.2.3 Επιλογή καταστάσεων μελέτης.....	53
3.2.4 Εφαρμογή περιορισμών και σύγκριση	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	55
Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης	55
4.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	55
4.2 Υπολογισμός Μοντέλων	55
4.2.1 Πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης.....	55
4.2.2 Βασικά χαρακτηριστικά και μεταβλητές.....	56
4.2.3 Συντελεστής προσδιορισμού	56
4.2.4 Πολυσυγγραμμικότητα	57
4.2.5 Τυπική απόκλιση	58
4.2.6 Τυπικό σφάλμα συντελεστή.....	58
4.2.7 T-value.....	58
4.2.8 F-value.....	58
4.2.9 P-value.....	59
4.3 Σενάρια Πρόβλεψης	60
4.3.1 Παρουσίαση μοντέλων	60
4.3.2 Πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου για διάφορα σενάρια.....	69
Συμπεράσματα	79
Βιβλιογραφία.....	80
Βιβλιογραφία σε Ελληνική Γλώσσα	80
Βιβλιογραφία σε Αγγλική Γλώσσα	80
Ιστότοποι	81
Παράρτημα Α.....	83
Παράρτημα Β	87
Β.1 Χαρακτηριστικά Τυπικής Ηλεκτρογεννήτριας	87
Β.2 Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών	88
Παράρτημα Γ	90
Μετρητικά Όργανα	90

Ονοματολογία

Συνομογραφίες

DG	Diesel Generator
Genset	Generator set
FOC	Fuel Oil Consumption
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
HFO	Heavy Fuel Oil
VLSFO	Very Low Sulphur Fuel Oil
ULSFO	Ultra Low Sulphur Fuel Oil
MCR	Maximum Continuous Rating
RH	Relative Humidity
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
GHG	Green House Gases
IMO	International Maritime Organization

Στατιστικά

Q1	1 st Quartile
Q3	3 rd Quartile
Q4	4 th Quartile
CDF	Cumulative Distribution Function
σ_x, σ_y	Τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής X και Y αντίστοιχα
$\text{cov}(X, Y)$	Συνδιακύμανση μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών
$\rho_{X,Y}, PCC_{X,Y}$	Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών X και Y με βάση Pearson Coefficient
DF	Degrees of Freedom
SE	Standard Error
SS	Sum of Squares

Αντοχή Υλικών

G	Μέτρο διάτμησης
Q	Ροπή άξονα
ϵ_{45}	διατμητική παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση 45 μοιρών σε σχέση με τους άξονες αναφοράς

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ροής βημάτων μελέτης.....	23
Διάγραμμα 2: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Electric Load Total.....	28
Διάγραμμα 3: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής DG No.1 Running Hours	29
Διάγραμμα 4: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Total Running Hours	29
Διάγραμμα 5: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Total Reefer Units Onboard ..	30
Διάγραμμα 6: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής HFO DGs	31
Διάγραμμα 7: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Total Fuel Consumption	31
Διάγραμμα 8: Συσχέτιση ζεύγους μεταβλητών VLSFO (<0.5%) Consumption DGs – Total Running Hours, σε κατάσταση θαλάσσης	41
Διάγραμμα 9: Αναπαράσταση σχέσης Total Fuel Consumption – Total Running Hours και αφορά το σύνολο των καταστάσεων	41
Διάγραμμα 10: Συσχέτιση ζεύγους μεταβλητών VLSFO (<0.5%) Consumption DGs – Total Running Hours, σε όλες τις καταστάσεις συνολικά	42
Διάγραμμα 11: Συσχέτιση των μεταβλητών VLSFO (<0.5%), Consumption DGs και Reefers/TEUs σε κατάσταση εν όρμω.....	42
Διάγραμμα 12: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Running Hours και Reefers/TEUs, σε κατάσταση εν όρμω	43
Διάγραμμα 13: Συσχέτιση των μεταβλητών VLSFO (<0.5%), Consumption DGs και Electric Load Total, σε κατάσταση θαλάσσης.....	43
Διάγραμμα 14: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Fuel Consumption και Electric Load Total, σε κατάσταση θαλάσσης.....	44
Διάγραμμα 15: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Running Hours και Total Fuel Consumption, σε κατάσταση θαλάσσης.....	45
Διάγραμμα 16: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Fuel Consumption και Reefers/TEUs, σε κατάσταση εν όρμω	45
Διάγραμμα 17: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς μεταβλητών Electric Load Total, Total Fuel Consumption, At Port state	49
Διάγραμμα 18: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς μεταβλητών Electric Load Total, Total Fuel Consumption, Open Sea state	50
Διάγραμμα 19: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Running Hours, Total Fuel Consumption, At Port state	50
Διάγραμμα 20: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Running Hours, Total Fuel Consumption, Open Sea state	51
Διάγραμμα 21: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Fuel Consumption, Reefers/TEUs, At Port state	52
Διάγραμμα 22: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Fuel Consumption, Reefers/TEUs, Open Sea state.....	52
Διάγραμμα 23: Μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές κατανάλωσης σύμφωνα με το 1 ^ο μοντέλο παλινδρόμησης, κατάσταση at port	62
Διάγραμμα 24: Μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές κατανάλωσης σύμφωνα με το 2 ^ο μοντέλο παλινδρόμησης, κατάσταση open sea	63
Διάγραμμα 25: Electric Load - διάγραμμα υπολοίπων, 1 st model.....	64

Διάγραμμα 26: Reefers - διάγραμμα υπολοίπων, 1 st model	65
Διάγραμμα 27: Running Time - διάγραμμα υπολοίπων, 1st model	65
Διάγραμμα 28: Electric Load - διάγραμμα υπολοίπων, 2 nd model	67
Διάγραμμα 29: Reefers - διάγραμμα υπολοίπων, 2 nd model.....	67
Διάγραμμα 30: Running Time - διάγραμμα υπολοίπων, 2 nd model	68
Διάγραμμα 31: Προβλεπόμενη κατανάλωση σε σχέση με Running Time για τις δύο καταστάσεις, με Reefers = 79 και Running Time = 19.4 [hours]	69
Διάγραμμα 32: Προβλεπόμενη κατανάλωση σε σχέση με Reefers για τις δύο καταστάσεις, με Electric Load = 1408.6 [kW] και Running Time = 19.4 [hours]	70
Διάγραμμα 33: Μεταβολή προβλεπόμενης FOC σε σχέση με Electric Load για τις δύο καταστάσεις, με Electric Load = 1408.6 [kW] και Reefers = 79	70
Διάγραμμα 34: Διάγραμμα Reefers – Predicted FOC, για Electric Load = 1,050 [kW] και Running Time = 15 [hours]	74
Διάγραμμα 35: Διάγραμμα Reefers – Predicted FOC, για Electric Load = 1,408.6 [kW] και Running Time = 20 [hours]	75
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα Reefers – Predicted FOC, για Electric Load = 1,700 [kW] και Running Time = 25 [hours]	75
Ομάδα διαγραμμάτων 1: Διαγράμματα υπολοίπων απόκρισης, κατάστασης at port, από Minitab®	66
Ομάδα διαγραμμάτων 2: Διαγράμματα υπολοίπων απόκρισης, κατάστασης open sea, από Minitab®	68
Ομάδα διαγραμμάτων 3: Καταστάσεις για 1,050 [kW]	71
Ομάδα διαγραμμάτων 4: Καταστάσεις για 1,454.5 [kW]	72
Ομάδα διαγραμμάτων 5: Καταστάσεις για 1,700 [kW]	73
Ομάδα διαγραμμάτων 6: Καταστάσεις για 1,700 [kW]	84
Ομάδα διαγραμμάτων 7: Καταστάσεις για 1,800 [kW]	85
Ομάδα διαγραμμάτων 8: Καταστάσεις για 1,900 [kW]	86

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Vessel Data	25
Πίνακας 2: Παράμετροι λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών	26
Πίνακας 3: Στατιστικά μεγέθη παραμέτρων DG No.1 Running Hours, DG No.2 Running Hours, DG No.3 Running Hours, DG No.4 Running Hours για την κάθε κατάσταση λειτουργίας	33
Πίνακας 4: Στατιστικά μεγέθη ηλεκτρογεννητριών	34
Πίνακας 5: Στατιστικά μεγέθη των fuel types και Electric Load Total	36
Πίνακας 6: Ποσοστά τύπων καυσίμου για κάθε state	36
Πίνακας 7: Στατιστικά μεγέθη των DGs/TEUs και Reefers/TEUs	37
Πίνακας 8: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: συνολική λειτουργία	38
Πίνακας 9: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: κατάσταση λειτουργίας at anchor	39
Πίνακας 10: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: κατάσταση λειτουργίας at port	39
Πίνακας 11: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: κατάσταση λειτουργίας at sea	40
Πίνακας 12: Απόρριψη δεδομένων (outliers, zeros) που αλλοιώνουν τα τελικά αποτελέσματα	49
Πίνακας 13: Μείωση πλήθους δεδομένων μελέτης	53
Πίνακας 14: Στατιστικά ανάλυσης 1 ^{ου} μοντέλου παλινδρόμησης που αφορούν τις μεταβλητές πρόβλεψης	61
Πίνακας 15: Συντελεστές προσδιορισμού και τυπικό σφάλμα 1 ^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	61
Πίνακας 16: Ανάλυση διακύμανσης 1 ^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	61
Πίνακας 17: Στατιστικά ανάλυσης 2 ^{ου} μοντέλου παλινδρόμησης που αφορούν τις μεταβλητές πρόβλεψης	61
Πίνακας 18: Συντελεστής προσδιορισμού και τυπικό σφάλμα 2 ^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	62
Πίνακας 19: Ανάλυση διακύμανσης 2 ^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	62
Πίνακας 20: Διάμεσοι παραμέτρων από συνολικό σετ δεδομένων πρόβλεψης	69
Πίνακας 21: Νέοι συνδυασμοί παραμέτρων	74

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Ηλεκτρογεννήτρια	15
Εικόνα 2: Εμπορευματοκιβώτιο ψύξης.....	20
Εικόνα 3: Ποσοστά για κάθε κύρια κατάσταση.....	27
Εικόνα 4: 1 ^ο μοντέλο σε MATLAB®, Electric Load = 1,408.6 [kW]	76
Εικόνα 5: 2 ^ο μοντέλο σε MATLAB®, Electric Load = 1,408.6 [kW]	76
Εικόνα 6: Stator and Rotor	89
Εικόνα 7: Πλευρική όψη τυπικής ηλεκτρογεννήτριας	89
Εικόνες 8: Σχέδια γενικής διάταξης*	89

[This page intentionally left blank]

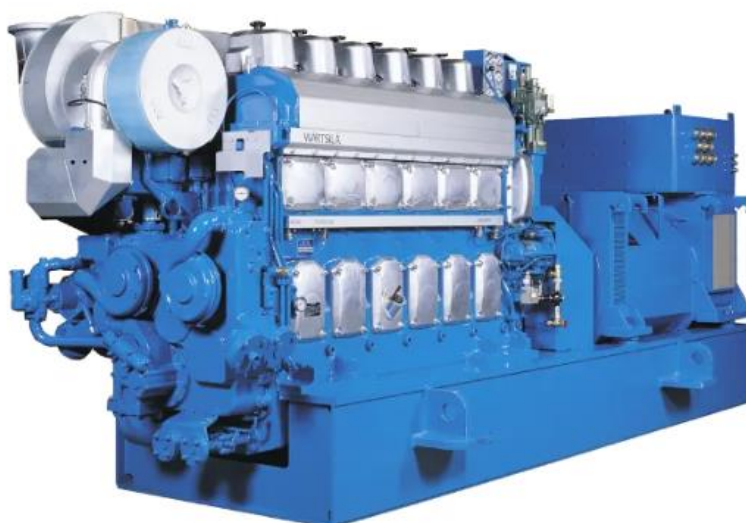
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Βοηθητική Ισχύς Πλοίων

Στα σύγχρονα πλοία, οι απαιτήσεις βοηθητικής ισχύος είναι υψηλές. Ιδιαίτερα σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, συμπεριλαμβανομένων εμπορευματοκιβωτίων ψύξης, υπάρχουν αυξημένες ανάγκες, λόγω της παροχής ψύξης. Επιπλέον, μεγάλες ανάγκες προκύπτουν σε περίπτωση χρήσης εξοπλισμού φόρτωσης και εκφόρτωσης ή της περαιτέρω χρήσης των βοηθητικών μηχανημάτων, όπως των ηλεκτροκινητήρων των bow thrusters.

Η παροχή βοηθητικής ισχύος, συνεισφέρει ένα σημαντικό μέρος στη συνολική κατανάλωση καυσίμου του πλοίου. Γι' αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση, και η αξιολόγηση των ηλεκτρογεννητριών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους και επομένως της εξοικονόμησης οικονομικών πόρων.



Εικόνα 1: Ηλεκτρογεννήτρια¹

1.2 Διαχείριση Ισχύος Φορτίου²

1.2.1 Διαχείριση φορτίου γεννητριών

Υπάρχουν πολλά στοιχεία που δείχνουν ότι η διαχείριση του φορτίου των βοηθητικών κινητήρων είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου αυτών καθώς και του κόστους συντήρησής τους. Κάθε πλοίο έχει συνήθως τρεις ή περισσότερες βοηθητικές μηχανές, όπου η κάθε μία είναι συνδεδεμένη με μία ηλεκτρική

¹Figure: Model 20DF, Wärtsilä Marine®, URL: [<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/generating-sets/wartsila-gensets>]

²IMO (2016), Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation, Module 4 – Ship Board Energy Management

γεννήτρια. Ο κινητήρας και η γεννήτρια ως συνδυασμένο σύστημα αναφέρονται συνήθως ως γεννήτρια ντίζελ (DG).

Στα πλοία, και συχνά για να διασφαλιστεί η αποφυγή διακοπής ρεύματος, δύο DGs λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με συντελεστή φορτίου μικρότερο από 50%. Οι περίοδοι για τις οποίες διατηρούνται αυτές οι συνθήκες μπορεί να αφορούν τη λειτουργία επί των λιμένων, τις περιόδους αναμονής, τις περιόδους καθαρισμού δεξαμενών και τις περιόδους ανταλλαγής έρματος. Πολλές φορές εκτός των συνθηκών αυτών γίνεται περιττή ταυτόχρονη χρήση των γεννητριών σε χαμηλούς συντελεστές φορτίου και πέραν των απαιτήσεων. Ως αποτέλεσμα, ο χαμηλός συντελεστής φορτίου οδηγεί σε κακή ενεργειακή απόδοση.

1.2.2 Μέθοδος ανάλυσης χρήσης βοηθητικών μηχανημάτων

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι επικρατούσες πρακτικές σχετικά με τη χρήση βοηθητικών μηχανημάτων, πρέπει να διερευνηθούν οι ακόλουθοι τομείς:

- ❖ Ο συντελεστής φορτίου των διαφόρων DGs του πλοίου πρέπει να καθοριστεί μέσω συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Δεδομένου ότι η ισχύς των DGs συνήθως μετράται και παρουσιάζεται στην αίθουσα ελέγχου μηχανών, η μέτρηση αυτή είναι αρκετά απλή.
- ❖ Εναλλακτικά, μπορούν να εκτιμηθούν οι συντελεστές χρήσης (utilization factors) των κινητήρων. Αυτό μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί από τα αρχεία των ωρών λειτουργίας των γεννητριών που είναι διαθέσιμα σε μηνιαία βάση. Από τους συντελεστές χρησιμοποίησης για όλες τις ηλεκτρομηχανές, μπορούν στη συνέχεια να καθοριστούν οι χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες μια DG, δύο DGs ή περισσότερες DGs έχουν λειτουργήσει ταυτόχρονα.
- ❖ Το επόμενο βήμα είναι να αξιολογηθεί εάν η χρήση των γεννητριών είναι υπερβολική. Αυτό θα απαιτήσει την αξιολόγηση του προφίλ λειτουργίας του πλοίου σε σχέση με τον αριθμό των γεννητριών που πραγματικά απαιτούνται για επιχειρησιακούς σκοπούς ή σκοπούς ασφαλείας.
- ❖ Με τον προσδιορισμό μεθόδων με τις οποίες θα μπορούσαν να μειωθούν οι ώρες λειτουργίας των γεννητριών και έτσι να εξοικονομηθούν καύσιμα.

1.2.3 Μέθοδοι βελτιώσεων

Υπάρχουν δύο τρόποι για τη βελτίωση των συντελεστών φορτίου και τη μείωση των συντελεστών χρήσης των γεννητριών. Αυτοί είναι οι παρακάτω:

- ❖ Αποφυγή της παράλληλης λειτουργίας πολλών γεννητριών όταν δεν είναι απαραίτητη. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός των δραστηριοτήτων επί του πλοίου που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια η υλοποίησή αυτού του σχεδιασμού. Επίσης, πρέπει να διατηρηθεί ο αριθμός των ηλεκτρομηχανών που λειτουργούν στο ελάχιστο σύμφωνα με τις απαιτήσεις και να αποφεύγεται η σκόπιμη λειτουργία πολλαπλών ηλεκτρομηχανών, όταν δεν χρειάζεται.
- ❖ Επίσης, είναι σημαντικό να γίνεται διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης μέσω καλύτερου σχεδιασμού του συστήματος ηλεκτροδότησης, για τη μείωση του

φορτίου. Η μείωση των φορτίων με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στην παροχή καλύτερης διαχείρισης του φορτίου των DGs και έτσι αποφεύγεται η λειτουργία για παράδειγμα δύο γεννητριών σε χαμηλά φορτία. Σε αυτό το πλαίσιο, η σωστή διαχείριση της ηλεκτρικής ζήτησης ενός πλοίου, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης του φορτίου και της ρύθμισης του επιπέδου αυτού, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων DGs και επίσης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των DGs.

1.3 Μείωση Ηλεκτρικού Φορτίου

Συχνά, είναι δυνατόν να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας επί του σκάφους με την προσπάθεια για περισσότερο συνειδητή και βέλτιστη λειτουργία των μηχανημάτων και των συστημάτων του πλοίου. Αυτές οι διαδικασίες, θα μπορούσαν να επιτευχθούν πιο αποτελεσματικά με το σχεδιασμό μέτρων για κάθε τρόπο λειτουργίας. Ορισμένα παραδείγματα μέτρων που μπορούν να εξεταστούν περιλαμβάνουν:

- ❖ Αποφυγή της περιττής χρήσης ενέργειας μέσω της απενεργοποίησης των μηχανημάτων όταν δεν χρειάζονται. Όλα τα μη απαραίτητα και μη απαιτούμενα μηχανήματα και ο εξοπλισμός που δεν επηρεάζουν το πλοίο και την ασφάλεια του προσωπικού, θα πρέπει να σταματούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας επί του λιμένα και στη θάλασσα για να μειωθεί η κατανάλωση ντίζελ των γεννητριών. Τέτοια στοιχεία θα πρέπει πρώτα να εντοπιστούν και στη συνέχεια να ακολουθηθούν διαδικασίες για την εκτέλεση εργασιών όπου θα πρέπει αρχικά να αναπτυχθούν και στη συνέχεια να εφαρμοστούν.
- ❖ Αποφυγή της παράλληλης λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών όταν η μία είναι επαρκής για κάποιο σκοπό. Η πτυχή αυτή καλύπτεται πλήρως στο πλαίσιο της διαχείρισης του φορτίου της γεννήτριας.
- ❖ Βελτιστοποιημένη λειτουργία HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning, δηλαδή θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός) επί του σκάφους. Η HVAC θα πρέπει να ευθυγραμμίζεται με τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες είτε μέσω αυτόματων ρυθμίσεων ή χειροκίνητων λειτουργιών (αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό μέτρο για τα κρουαζιερόπλοια).
- ❖ Θα πρέπει να διατηρείται κατάλληλος συντονισμός επί του σκάφους μεταξύ του καταστρώματος και των μηχανημάτων, ειδικά για τη χρήση των μηχανημάτων/εξοπλισμού, όπως τους κινητήρες του μηχανισμού του πηδαλίου (steering gear motors), τις αντλίες υδροσυλλεκτών και τις αντλίες πυρόσβεσης, τα βαρούλκα και τον εξοπλισμό πρόσδεσης, τους γεραμούς καταστρώματος και της χρήσης πεπιεσμένου αέρα, ώστε να μειωθεί το φορτίο στις γεννήτριες.

Οι παραπάνω δραστηριότητες θα οδηγήσουν σε μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι εργασίες θα μπορούσαν να συντονιστούν και να ομαδοποιηθούν, ώστε να λειτουργούν δύο γεννήτριες πιο αποτελεσματικά και για ένα μικρότερο χρονικό διάστημα. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω του σχεδιασμού του συστήματος και περισσότερο συντονισμένων ενεργειών.

1.4 Μείωση Χρήσης Βοηθητικών Μηχανημάτων μέσω Συστήματος Σχεδιασμού

Υπάρχει σημαντικός αριθμός εφεδρικών μηχανημάτων που λειτουργούν στα πλοία. Η ύπαρξη εφεδρικών μηχανημάτων, επιτρέπει την ομαλή λειτουργία του πλοίου σε περίπτωση που ένα από τα μηχανήματα σταματάει να λειτουργεί, όποτε υπάρχει διαθέσιμο μηχανήμα να λειτουργήσει ως αντικατάσταση. Η ύπαρξη τους ακόμη βοηθάει και σε κρίσιμες για την ασφάλεια καταστάσεις όπου πολλά μηχανήματα πρέπει να λειτουργούν ταυτόχρονα. Στην πράξη, τα εφεδρικά μηχανήματα χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερο από ότι είναι απαραίτητο. Τα μηχανήματα αυτά είναι κάθε είδους, ιδιαίτερα ανεμιστήρες και αντλίες. Οποιαδήποτε μείωση της χρήσης τέτοιων μηχανημάτων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Ο σωστός σχεδιασμός της χρήσης του αριθμού των μηχανημάτων σε σχέση με τον τρόπο λειτουργίας τους, είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την επίτευξη του στόχου βελτίωσης της αποδοτικότητας. Η ταυτόχρονη χρήση πολλών μηχανημάτων παράλληλα θα μπορούσε να μειωθεί μέσω του προηγμένου σχεδιασμού και της λήψης αποφάσεων σχετικά με τον αριθμό των μηχανημάτων που θα χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι, το σχέδιο θα πρέπει να περιλαμβάνει την απενεργοποίηση ενός ή δύο ανεμιστήρων εξαερισμού του μηχανοστασίου, καθώς η κύρια μηχανή δεν λειτουργεί. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο εξοπλισμός πρόσδεσης. Όταν ο εξοπλισμός πρόσδεσης δεν είναι απαραίτητος, οι σχετικές αντλίες και τα μηχανήματα θα μπορούσαν να απενεργοποιηθούν.

Για να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία, όλα τα μέτρα που αναφέρθηκαν πρέπει να σχεδιάζονται και να εκτελούνται προληπτικά. Χωρίς τον καθημερινό σχεδιασμό και την καθιέρωση των σχετικών διαδικασιών, το έργο της μείωσης της χρήσης ενέργειας δεν μπορεί να επιτευχθεί. Όπως τονίστηκε και προηγουμένως, ο συντονισμός μεταξύ των τμημάτων καταστρώματος και μηχανής είναι ύψιστης σημασίας για μια αποτελεσματική και ταυτόχρονα ασφαλή δράση, ώστε να αποφεύγονται απροσδόκητες συνέπειες.

1.5 Παράλληλη Χρήση Ηλεκτρογεννητριών³

Το σύστημα παράλληλης λειτουργίας διατηρεί ένα κύριο σύνολο γεννητριών ενεργοποιημένο και συνδεδεμένο στο δίκτυο ανά πάσα στιγμή. Η κύρια γεννήτρια μπορεί να είναι διαφορετική μονάδα κάθε φορά. Με την εναλλαγή της λειτουργίας των γεννητριών με αυτόν τον τρόπο, οι ώρες εργασίας τους κατανομούνται μεταξύ των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Μόλις η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξηθεί πέραν ενός προκαθορισμένου ορίου, το σύστημα θέτει σε λειτουργία την επόμενη γεννήτρια και τη συνδέει στο δίκτυο. Στη συνέχεια, το φορτίο κατανέμεται μεταξύ όλων των γεννητριών που είναι συνδεδεμένες. Όταν το φορτίο πέσει κάτω από το προκαθορισμένο όριο, τα κατάλληλα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη απενεργοποιούνται αυτόματα και σταματούν. Για λόγους συντήρησης, είναι δυνατή η διατήρηση και η παροχή ρεύματος ακόμη και αν μία από τις γεννήτριες είναι εκτός λειτουργίας.

Ο πρώτος μηχανικός είναι υπεύθυνος να εκτελεί την καλύτερη δυνατή διαχείριση τηρώντας τα όρια ασφαλούς συνεχούς λειτουργίας των γεννητριών. Είναι ακόμη υπεύθυνος για την κατανομή του φορτίου με βέλτιστο τρόπο καθώς και για τη χρήση των γεννητριών με

³Sole Diesel®, URL: [https://www.solediesel.com/datos_publicos/Fichas/FA1397EN000002.pdf], Marine Engineering Online, URL: [<https://marineengineeringonline.com/parallel-operation-procedure-marine-diesel-generators-ships/>], Φραγκόπουλος Χρίστος - Προυσαλίδης Ιωάννης (2019), Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Αθήνα, Εκδόσεις da Vinci

τέτοιο τρόπο ώστε να ακολουθείται πιστά το πρόγραμμα συντήρησης που προτείνεται από τον κατασκευαστή.

1.6 Εμπορευματοκιβώτια Ψύξης⁴

Τα ψυκτικά εμπορευματοκιβώτια (refrigerated containers ή reefers), χρησιμοποιούνται για εμπορεύματα που πρέπει να ελέγχονται ως προς τη θερμοκρασία τους κατά τη διάρκεια της μεταφοράς. Τα εμπορευματοκιβώτια ψυγεία είναι εξοπλισμένα με μια ψυκτική μονάδα που συνδέεται με την παροχή ρεύματος στο πλοίο.

Τα εμπορεύματα που μεταφέρονται συχνά σε εμπορευματοκιβώτια ψυγεία είναι φρούτα και λαχανικά, κρέας και ψάρια (νωπά ή κατεψυγμένα), γάλα και γαλακτοκομικά προϊόντα, λουλούδια, φαρμακευτικά προϊόντα, χυμοί και συμπυκνώματα και σοκολάτες.

Τα εμπορευματοκιβώτια ψυγεία είναι σχεδιασμένα ώστε να διατηρούν τη θερμοκρασία, την υγρασία και την ατμόσφαιρα του εμπορευματοκιβωτίου σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της διαμετακόμισης.

Υπάρχουν 4 ρυθμίσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μεταφορά φορτίων ψυγείου, η θερμοκρασία, ο αερισμός, η υγρασία και η αποστράγγιση.

- ❖ **Θερμοκρασία:** Όλα τα τυποποιημένα εμπορευματοκιβώτια ψυγείων είναι κατασκευασμένα για να διατηρούν θερμοκρασία μεταξύ +25 [°C] και -25 [°C] για ψυχρό και κατεψυγμένο φορτίο. Ένα ποσοστό του παγκόσμιου στόλου εμπορευματοκιβωτίων ψυγείων είναι επίσης ικανό να διατηρεί θερμοκρασία έως και -35 [°C] ή και χαμηλότερη. Τα ειδικά εμπορευματοκιβώτια (super freezers) μπορούν να διατηρήσουν θερμοκρασία έως και -70 [°C].
- ❖ **Εξαερισμός:** Για μια ψυχρή θερμοκρασία, ο αέρας πρέπει να διαρρέει το φορτίο ανά πάσα στιγμή για να απομακρύνει τη θερμότητα και τα αέρια. Ως εκ τούτου, τα χρησιμοποιούμενα κιβώτια μεταφοράς πρέπει να διαθέτουν εξαερισμό. Για τα φρούτα και τα λαχανικά απαιτείται αερισμός με φρέσκο αέρα. Για τα κατεψυγμένα προϊόντα, ο αέρας πρέπει να ρέει γύρω από το φορτίο. Δεν πρέπει να υπάρχουν μεγάλα κενά μεταξύ του φορτίου και των τοιχωμάτων. Το φορτίο πρέπει επίσης να στοιβάζεται σε μπλοκ.
- ❖ **Υγρασία:** Ορισμένα προϊόντα επωφελούνται από ένα χαμηλότερο επίπεδο υγρασίας στον αέρα. Επομένως μια μονάδα ψυγείου διαθέτει λειτουργία αφύγρανσης, η οποία μπορεί να μειώσει το επίπεδο υγρασίας στον αέρα. Αν και ορισμένες νεότερες μονάδες μπορούν να φτάσουν το 50%, το πρότυπο είναι μεταξύ 60% και 85% σχετική υγρασία (RH).
- ❖ **Αποχετεύσεις:** Χρησιμοποιούνται για την απελευθέρωση της περίσσειας νερού που μπορεί να συσσωρευτεί στο εσωτερικό των εμπορευματοκιβωτίων. Επιπλέον, ο σχεδιασμός τους αποτρέπει την είσοδο νερού ή εντόμων στο εσωτερικό.

Τα μηχανήματα ψυγείου δεν λειτουργούν μόνα τους, αλλά πρέπει να είναι συνδεδεμένα με μια ηλεκτρική πηγή. Στην περίπτωση του πλοίου αυτή η πηγή είναι οι ηλεκτρογεννήτριες που φέρει.

Στο εσωτερικό του εμπορευματοκιβωτίου υπάρχει ένας μικροεπεξεργαστής, ο οποίος είναι ένας ηλεκτρονικός καταγραφέας θερμοκρασίας. Η συσκευή αυτή αποθηκεύει όλα τα δεδομένα, όπως τη θερμοκρασία εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα, τις θερμοκρασίες των απομακρυσμένων ανιχνευτών φορτίου, τη δραστηριότητα απόψυξης, τις αλλαγές στο σημείο ρύθμισης, και το χρόνο ενεργοποίησης και απενεργοποίησης ψύξης. Για την καταγραφή της θερμοκρασίας φορτίου ορισμένων αποστολών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες φορτίου. Αυτοί οι ανιχνευτές είναι καλώδια με ένα θερμοευαίσθητο στοιχείο στερεωμένο στο ένα άκρο. Στο εμπόριο συναντάται μια πρόσθετη, ανεξάρτητη από το μεταφορέα συσκευή παρακολούθησης (φορητός καταγραφέας δεδομένων), η οποία είναι συμβατή με

⁴Kuehne+Nagel®, URL: [<https://home.kuehne-nagel.com/-/knowledge/what-is-a-reefer-container>]

τα συστήματα παρακολούθησης και εντοπισμού. Αυτή η συσκευή, παρέχει πληροφορίες για τα δεδομένα θερμοκρασίας των εμπορευμάτων ανά πάσα στιγμή.

Μια ψυκτική μονάδα είναι κατασκευασμένη για να διατηρεί μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το φορτίο πρέπει να προψυχθεί στη θερμοκρασία που έχει οριστεί πριν από τη φόρτωση. Ειδικά για τα φρέσκα φρούτα και λαχανικά, η μείωση της θερμοκρασίας μετά τη συγκομιδή στη βέλτιστη θερμοκρασία μεταφοράς είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση της καλής ποιότητας και της μακρύτερης δυνατής διάρκειας ζωής του εμπορεύματος.



Εικόνα 2: Εμπορευματοκιβώτιο ψύξης⁵

1.7 Ανασκόπηση Παρόμοιων Εργασιών

Για την επίτευξη της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής ήταν σημαντική η συνεισφορά ορισμένων άλλων εργασιών ως προς τη διεύρυνση του γνωστικού πεδίου και τη διόρθωση σφαλμάτων. Αυτές ήταν οι διπλωματικές του Καραγκούνη Χρήστου (2022), Μουρτζίνου Τασόπουλου Γεώργιου (2021), Ζαλαχώρη Αναστάσιου (2020), καθώς και την εργασία της Ξουρίδα Ειρήνης (2023). Οι συγκεκριμένες διπλωματικές ήταν χρήσιμες στην απόκτηση γνώσεων και πληροφοριών για την αντιμετώπιση ζητημάτων που προέκυψαν κατά τη συγγραφή της πτυχιακής εργασίας.

Αναλυτικότερα:

- ❖ Η διπλωματική εργασία του Καραγκούνη Χρήστου έχει τίτλο “Εξέταση της απόδοσης ηλεκτρογεννητριών με χρήση δεικτών απόδοσης και λειτουργικών δεδομένων”. Αυτή η εργασία, είχε στόχο την ανάπτυξη δεικτών για την καλύτερη παρακολούθηση και αξιολόγηση της απόδοσης τριών ηλεκτρογεννητριών, έπειτα από ανάλυση και κατάλληλες επεξεργασίες δεδομένων, όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου. Σε αυτή την περίπτωση η εκκαθάριση έγινε με βάση δύο παράγοντες, την κατανάλωση καυσίμου και του φορτίου των μηχανών. Η ανάπτυξη δεικτών πραγματοποιήθηκε με χρήση συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson, από όπου προκύπτει ότι τα

⁵Figure: Kühne+Nagel®, URL: [<https://home.kuehne-nagel.com/-/knowledge/what-is-a-reefer-container>]

σχετιζόμενα μεγέθη είναι: η μέση θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από κυλίνδρους ως προς το επί τοις εκατό ποσοστό του φορτίου της μηχανής και η κοινή θερμοκρασία των καυσαερίων κατά την είσοδο τους στο στροβιλοσυμπιεστή ως προς το επί τοις εκατό ποσοστό του φορτίου της μηχανής. Στην παρούσα διπλωματική, η εργασία χρησίμευσε στην καλύτερη γνωστική κατάρτιση του αντικειμένου ιδίως στην ανάπτυξη των εισαγωγικών κεφαλαίων της,

- ❖ Η διπλωματική εργασία του Μουρτζίνου Τασόπουλου Γεώργιου έχει τίτλο “Αξιολόγηση και Βελτιστοποίηση Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών Εμπορικού Πλοίου” και στόχο τη μελέτη τριών ηλεκτρομηχανών με χρήση λογισμικού MATLAB®. Χρησιμοποιώντας έναν αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων κατάφερε να προσεγγίσει την ειδική κατανάλωση (SFOC) και εν συνέχεια με τα εξαγόμενα αποτελέσματα γίνεται αξιολόγηση και βελτιστοποίηση κάθε ηλεκτρογεννήτριας. Στην προκειμένη περίπτωση και η εργασία αυτή συνείσφερε στην προσθήκη επιπλέον πληροφοριών όσον αφορά το ευρύ αντικείμενο του performance του πλοίου,
- ❖ Η διπλωματική εργασία του Ζαλαχώρη Αναστάσιου έχει τίτλο “Evaluation of the efficiency of a Mewis duct by performance monitoring” και έχει ως στόχο την πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου ώστε να εξάγει αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του πλοίου χρησιμοποιώντας ειδικά προσαρμοσμένο εξάρτημα μπροστά από την προπέλα. Για την επίτευξη των αναγκών της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν επιχειρησιακά δεδομένα που αφορούσαν περίοδο τριών ετών. Έγινε κατάλληλη επεξεργασία αυτών και στη συνέχεια αναπτύχθηκαν δείκτες KPI για την αξιολόγηση της απόδοσης ενώ ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης χρησίμευσε στην πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου. Με τη βοήθεια αυτής της διπλωματικής κατανοήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης της παρούσας εργασίας,
- ❖ Η διπλωματική εργασία της Ξουρίδα Ειρήνης έχει τίτλο “Επίδραση της Βελτιστοποίησης της Διαγωγής στην Αποδοτικότητα των Πλοίων με Χρήση Επιχειρησιακών Δεδομένων” και στόχο την εύρεση της trim optimized επιλογής μεταξύ δύο αδελφών πλοίων. Μέσω επεξεργασίας δεδομένων που αφορούν περίοδο τεσσάρων ετών, όπου στη συνέχεια διορθώνονται για κατάσταση κυματισμού και ανέμου, παρουσιάζεται ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, το οποίο συσχετίζει την ισχύ του πλοίου με άλλα μεγέθη άμεσα συνδεδεμένα με την πορεία του, δηλαδή την ταχύτητα, το μέσο βύθισμα και τη διαγωγή του. Με τη βοήθεια αυτής της μεθόδου γίνεται εκτίμηση της μεταβολής της ισχύος του πλοίου για ένα εύρος ταχυτήτων, ανάλογων των μετρούμενων από τα ληφθέντα δεδομένα, και για διάφορους συνδυασμούς βυθίσματος και διαγωγής. Αυτή η εργασία χρησίμευσε στην κατανόηση της χρήσης των μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και των σχετικών δεικτών για την εξέταση της καταλληλότητάς τους.

1.8 Υπολογιστικό Πλαίσιο και Στόχοι της Εργασίας

Με βάση τα προηγούμενα, γίνεται αντιληπτό ότι η σημασία της παρακολούθησης της λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών και της εκτίμησης της απαιτούμενης κατανάλωσης

καυσίμου με βάση τις ανάγκες για βοηθητική ισχύ του πλοίου κρίνεται σημαντική. Για το σκοπό αυτό θα εξεταστεί ένα πλοίο containership το οποίο έχει αυξημένες ανάγκες βοηθητικής ισχύος εξαιτίας της παροχής ψύξεως στα εμπορευματοκιβώτια. Επιπλέον, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από τις ημερήσιες αναφορές (Noon Report) για την εύρεση των σημαντικότερων παραμέτρων που επιδρούν στην κατανάλωση καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου, καθώς επίσης και για την κατασκευή στατιστικών μοντέλων παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της κατανάλωσης τους. Το προτεινόμενο υπολογιστικό πλαίσιο φαίνεται στο διάγραμμα 1.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ανάλυση που περιλαμβάνει την επιλογή μεταβλητών σχετικών με λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών, το διαχωρισμό σε δύο κύριες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου καθώς επίσης και τη στατιστική διερευνητική μελέτη βασικών παραμέτρων της λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται εκκαθάριση του διαθέσιμου σετ δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα τμήματα της εργασίας, ώστε να αποβληθούν τα παρεκτρεπόμενα σημεία που αλλοιώνουν τα αποτελέσματα. Η εκκαθάριση, αποτελεί προετοιμασία για το μοντέλο πρόβλεψης που θα ακολουθήσει.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα μοντέλο πρόβλεψης για κάθε μια από τις δύο κύριες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου και στη συνέχεια συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις κρίνεται η βέλτιστη και η δυσμενέστερη περίπτωση λειτουργίας όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου.

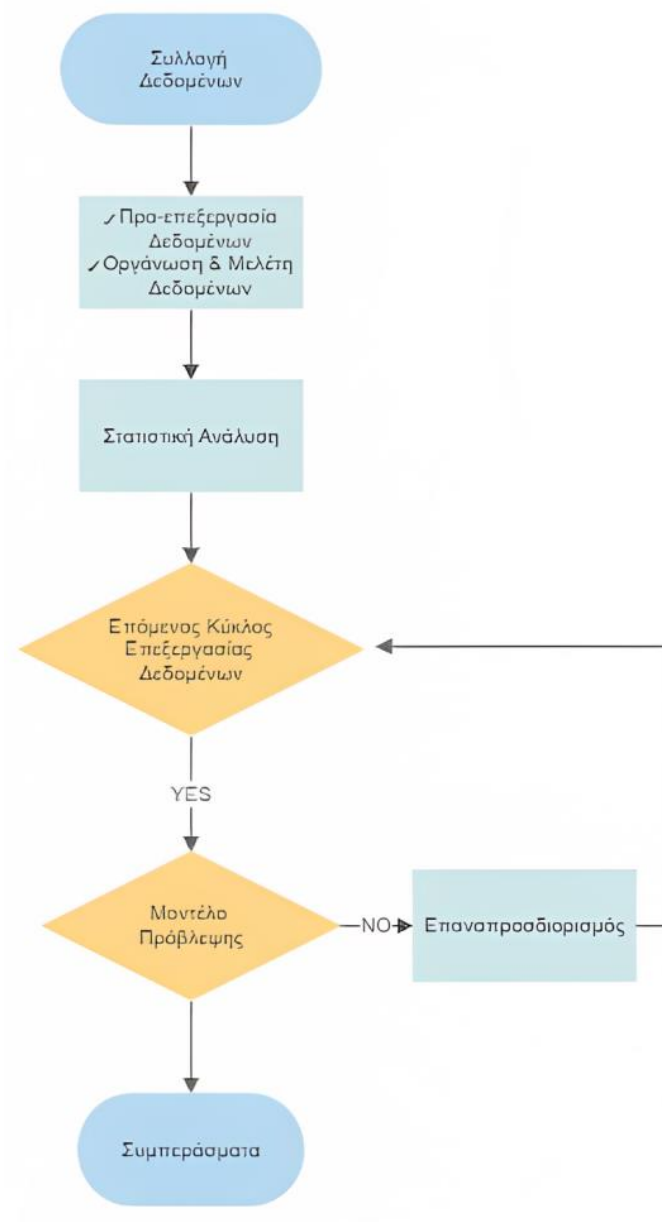
Τέλος παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης, καθώς επίσης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο παράρτημα Α, παρουσιάζονται καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου που αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές ηλεκτρικής ισχύος από το εκκαθαρισμένο σετ δεδομένων και εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα.

Στο παράρτημα Β, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά μιας τυπικής ηλεκτρογεννήτριας και ο τρόπος με τον οποίο αυτή λειτουργεί.

Στο παράρτημα Γ, περιγράφονται τα βασικότερα μετρητικά όργανα ορισμένων μεγεθών που μελετώνται (όπως η κατανάλωση καυσίμου) και διέπουν τη λειτουργία των γεννητριών.

Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η μελέτη της σχέσης μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμου (Fuel Oil Consumption – FOC) με την ηλεκτρική ισχύς (Electric Load), τον αριθμό των κιβωτίων-ψυγείων (Reefers) και το χρόνο λειτουργίας (Running Hours) των ηλεκτρογεννητριών.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ροής βημάτων μελέτης

[This page intentionally left blank]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Αρχική Ανάλυση της Κατάστασης των Συστημάτων

2.1 Περιγραφή Μεθόδου Εφαρμογής Διαδικασίας

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την ανάλυση της κατάστασης των γεννητριών του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί μια αρχική περιγραφή των παραμέτρων χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από αρχείο Microsoft Excel®, που περιλαμβάνει τις παραμέτρους για τη λειτουργία του πλοίου στο χρονικό διάστημα 09/05/2018 έως 10/11/2021 (~1281 ημέρες). Το υπό μελέτη πλοίο εκτελούσε σε αυτό το διάστημα δρομολόγια σε όλες τις ηπείρους του πλανήτη. Η διαλογή των μεταβλητών προς διερεύνηση στηρίζεται στη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών (diesel generators ή gensets).

Για το υπό μελέτη πλοίο είναι γνωστές οι παρακάτω πληροφορίες του πίνακα 1:

Type of Ship	Containership
L _{pp} [m]	258
B [m]	42.8
T _d [m]	13
T _{sc} [m]	14.5
DWT [t]	80,000
Propeller Pitch [m]	9.835
MCR [kW]	33,670
MCR [RPM]	78
Max Load per DG [kW]	3,350

Πίνακας 1: Vessel Data

Τα λειτουργικά δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούν τις μετρήσεις ορισμένων μεγεθών που διέπουν τη λειτουργία των γεννητριών, και με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων συγκεντρώθηκαν σε ένα ευρύ αρχείο Microsoft Excel®, 11 φύλλων εργασίας. Τα συγκεκριμένα δεδομένα θα χρειαστεί να φιλτραριστούν και στη συνέχεια να παρουσιαστούν διερευνητικά στατιστικά τους προκειμένου να αποκτηθεί μια συνολική εικόνα για το πως λειτουργήσαν οι ηλεκτρογεννήτριες για εκείνο το διάστημα, ώστε να καταστεί δυνατή η εύρεση παρεκτρεπόμενων σημείων (outliers) καθώς και μη ρεαλιστικών τιμών.

Το φύλλα Microsoft Excel® διορθώθηκαν όσο το δυνατόν περαιτέρω σε πρώτη φάση από προβληματικές μετρήσεις για το υπό μελέτη πλοίο.

2.2 Επιλογή Μεταβλητών και Καταστάσεων Πλοίου

Η εν προκειμένω ανάλυση περιλαμβάνει την περιγραφή των παραμέτρων που είναι διαθέσιμες και τον υπολογισμό των ποσοστών του χρόνου που το πλοίο ήταν σε διάφορες φάσεις λειτουργίας.

Παρατίθενται στατιστικά για τις ημερήσιες ώρες λειτουργίας (running hours) για κάθε γεννήτρια και κατάσταση λειτουργίας, καθώς και στοιχεία που αφορούν το συνολικό

αριθμό containers που φέρει το πλοίο σε κάθε περίπτωση (και τα ποσοστά αυτών που είναι DGs ή reefers). Ακόμη θα υπολογιστούν τα στατιστικά μεγέθη για τους διάφορους τύπους κατανάλωσης καυσίμου αλλά και της ηλεκτρικής ισχύος. Τέλος εκτελείται έλεγχος με χρήση της μεθόδου γραμμικής συσχέτισης με βάση το συντελεστή Pearson, με σκοπό τον εντοπισμό της συσχέτισης της κατανάλωσης (που αποτελεί τη μεταβλητή προς διερεύνηση) και τον υπολοίπων παραμέτρων.

Οι παράμετροι που μελετώνται αναφέρονται στη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών και είναι διαθέσιμες από το προαναφερθέν αρχείο Microsoft Excel®. Αυτές δίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2). Συγκεκριμένα, διακρίνουμε τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε ηλεκτρογεννήτρια, τη συνολική ηλεκτρική ισχύ, το συνολικό αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων ψυγείων, το συνολικό αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων που φέρουν επικίνδυνα αγαθά, τέσσερις τύπους κατανάλωσης καυσίμου ανά ημέρα και τη συνολική κατανάλωση καυσίμου ανά ημέρα.

Παράμετρος	Μονάδες Μέτρησης
DG No.1 Running Hours	[Hours]
DG No.2 Running Hours	[Hours]
DG No.3 Running Hours	[Hours]
DG No.4 Running Hours	[Hours]
Electric Load Total	[kW]
Total DG Units Onboard	-
Total Reefer Units Onboard	-
HFO Consumption DGs	[tons/day]
Diesel Consumption DGs	[tons/day]
VLSFO (<5%) Consumption DGs	[tons/day]
ULSFO Consumption DGs	[tons/day]
Total Fuel Consumption	[tons/day]

Πίνακας 2: Παράμετροι λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών

2.3 Ποσοστά Χρόνου Πλοίου σε Καταστάσεις Λειτουργίας

Σύμφωνα με το αρχείο “Noon Report” η λειτουργία του πλοίου αναλύεται σε **at sea state** (κατάσταση θαλάσσης), **at port state** (λειτουργία επί του λιμένα, όπου το πλοίο μπορεί να εκτελεί στροφή, ενώ δουλεύουν η κύρια μηχανή και αρκετά από τα βοηθητικά μηχανήματα), **at anchor** (σε αγκυροβόλιο, όπου το πλοίο βρίσκεται σε idle κατάσταση), και **drifting** (όπου το πλοίο είναι εν πλω και επηρεάζεται από την επίδραση του καιρού, όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται υπό την επίδραση ανέμου υψηλής έντασης).

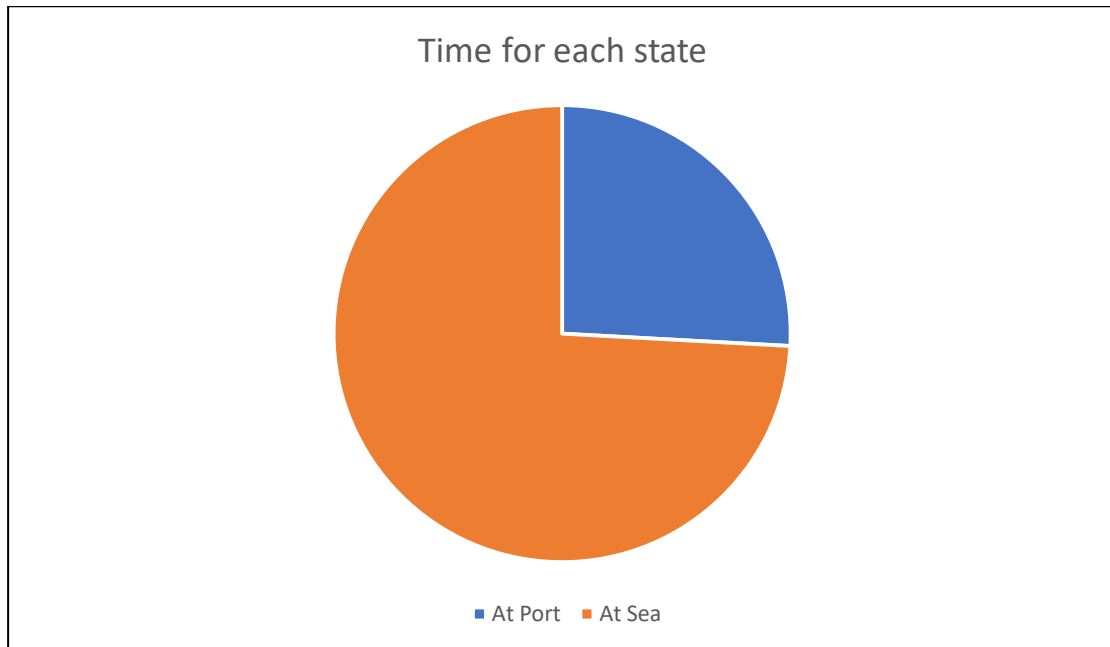
Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα νέο αρχείο Microsoft Excel® με τα διαθέσιμα δεδομένα, στο οποίο όμως γίνονται επεξεργασίες (όπως ταξινομήσεις, αφαιρέσεις, διορθώσεις). Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση υπολογισμού του χρόνου μεταξύ ημερομηνιών (συμπεριλαμβανομένου ημέρας, ώρας, λεπτού πχ dd:hh:mm) προκύπτουν οι δύο κύριες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου που ορίζονται ως εξής:

At port: ~25.862% συνολικού χρόνου και

At sea: ~74.138% του συνολικού χρόνου.

Οι καταστάσεις at anchor και drifting συμπεριλήφθηκαν στις κύριες καταστάσεις at port και at sea αντιστοίχως.

Παρακάτω ακολουθεί γράφημα (Εικόνα 7) όπου φαίνεται σε ποσοστό επί τοις εκατό ο χρόνος λειτουργίας για κάθε μια από τις δύο κύριες καταστάσεις στο συνολικό χρονικό διάστημα.

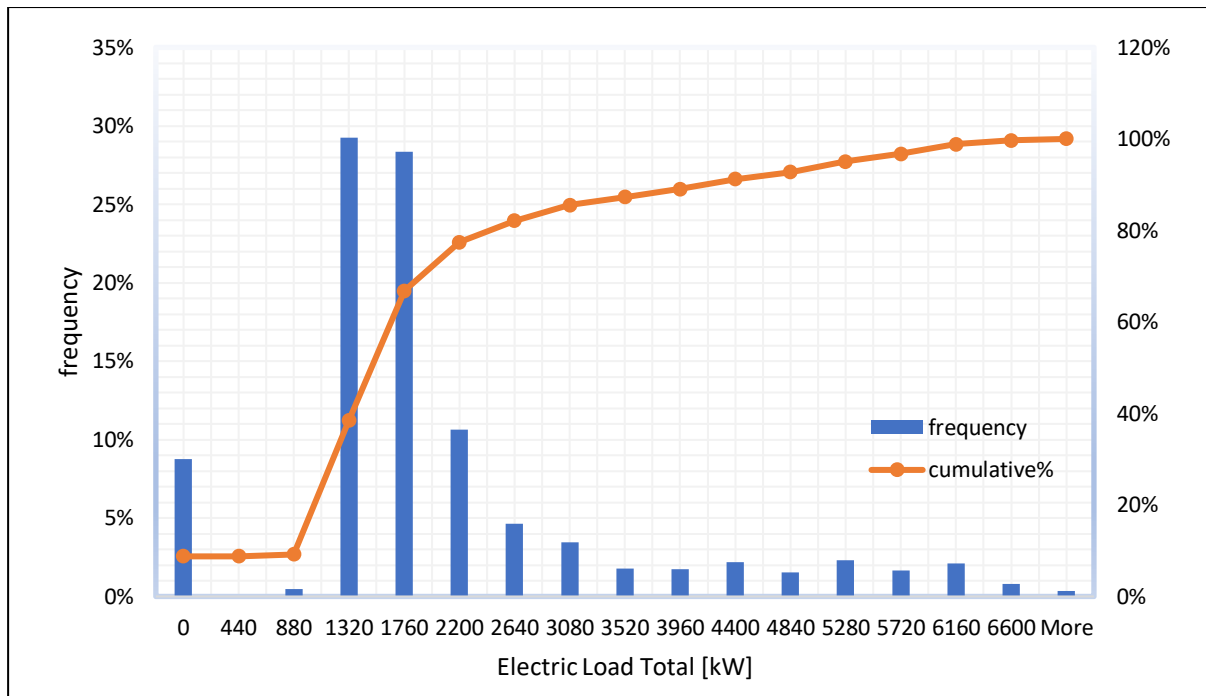


Εικόνα 3: Ποσοστά για κάθε κύρια κατάσταση

2.4 Παρουσίαση Αρχικών Στατιστικών Μεγεθών

Σε αυτό το σημείο, παρουσιάζονται ιστογράμματα σχετικής συχνότητας για ορισμένες από τις μεταβλητές. Τα παρακάτω στατιστικά μεγέθη έχουν παραχθεί με βοήθεια του Microsoft Excel®, απομονώνοντας τα data sets των δεδομένων από το αρχείο “Noon Report”. Το αθροιστικό ιστόγραμμα, είναι μια γραφική αναπαράσταση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDF). Η CDF αναπαριστά τη συνολική συσσωρευμένη πιθανότητα μέχρι μια ορισμένη τιμή στο σύνολο των δεδομένων. Σε ένα αθροιστικό ιστόγραμμα, ο άξονας y δείχνει τη σχετική συχνότητα, ενώ ο άξονας x δείχνει τις τιμές του συνόλου δεδομένων. Το ιστόγραμμα αυτό, μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση των συνολικών χαρακτηριστικών ενός συνόλου δεδομένων και τον εντοπισμό τυχόν τάσεων ή μοτίβων που μπορεί να υπάρχουν.

Στα ιστογράμματα που ακολουθούν μπορούμε να εντοπίσουμε δεδομένα που είναι outliers, δηλαδή εκτός ορίων των πραγματικών range τιμών και να διακρίνουμε το είδος της κατανομής των δεδομένων. Ακόμη γίνεται κατανοητό, ποιες τιμές από το εκάστοτε εύρος, λαμβάνουν χώρα συχνότερα κατά τις μετρήσεις.

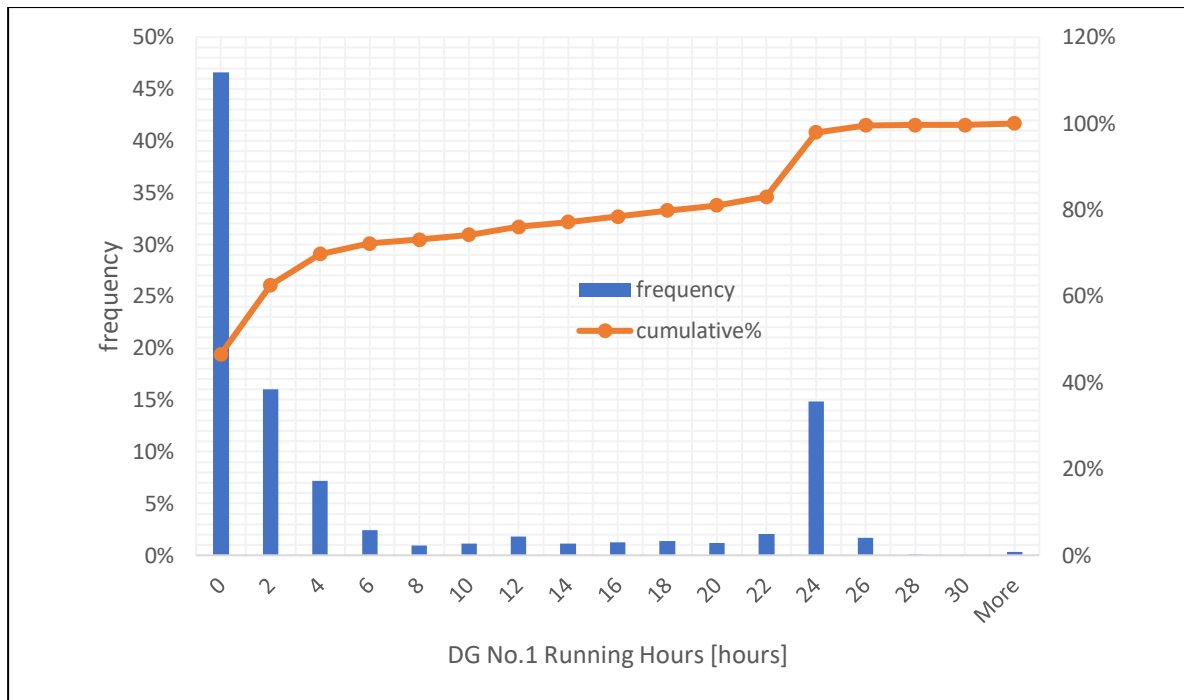


Διάγραμμα 2: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Electric Load Total

Πολλά φυσικά φαινόμενα και μετρήσεις τείνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή και γι' αυτό, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στη στατιστική και την ανάλυση δεδομένων.

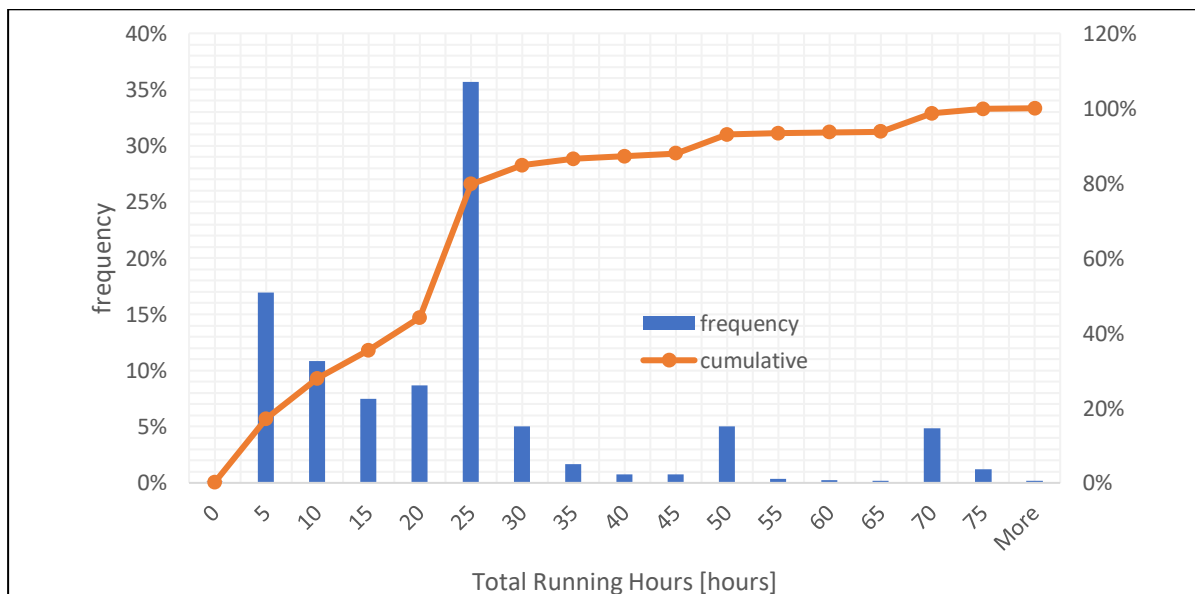
Στο διάγραμμα 2 εμφανίζεται μη συμμετρική κατανομή που τείνει να μοιάζει με σχήμα καμπάνας, πράγμα που υποδηλώνει ότι τα δεδομένα ακολουθούν κατανομή σχετικά κοντά σε κανονική κατανομή ή κατανομή Gauss. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα κατανέμονται σχετικά συμμετρικά γύρω από τη μέση τιμή, με τα περισσότερα δεδομένα να συγκεντρώνονται κοντά στη μέση τιμή και να μειώνονται όσο απομακρύνεστε από τη μέση τιμή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Τα σημεία που αντιστοιχούν σε μηδενικά αποτελέσματα αποτελούν outliers. Οι περισσότερες μετρήσεις λαμβάνουν τιμές 1,320 [kW] και 1,760 [kW].

Η καμπύλη αθροιστικής κατανομής παίρνει, στο "Διάγραμμα 2" και στις παρακάτω περιπτώσεις (επόμενα διαγράμματα), όλο και μεγαλύτερες τιμές κατά μήκος του άξονα x, όπως είναι λογικό. Η καμπύλη αυτή υποδεικνύει τι ποσοστό των δεδομένων έχει λάβει χώρα έως την τετμημένη μου εξετάζεται κάθε φορά.



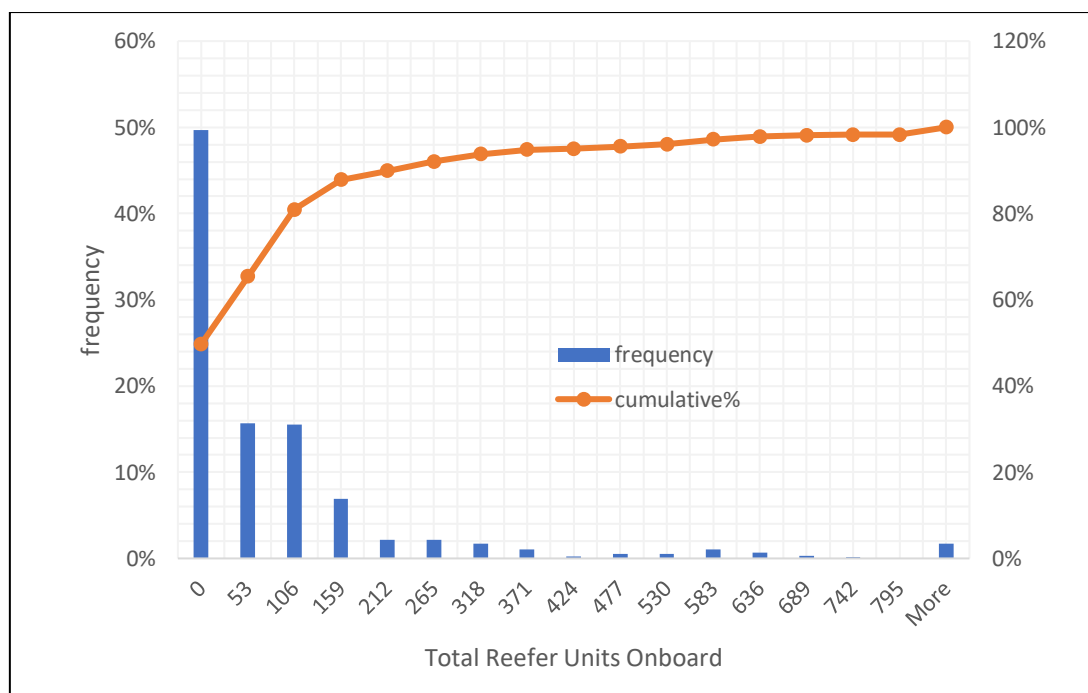
Διάγραμμα 3: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής DG No.1 Running Hours

Στο διάγραμμα 3, όπως είναι αναμενόμενο η τιμές που παίρνει η DG No.1 Running Hours εμπίπτουν στο διάστημα [0, 24], ενώ οι τιμές για $x \geq 24$ [hours], είναι outliers. Εμφανίζεται μη συμμετρική κατανομή στο συγκεκριμένο διάγραμμα, δηλαδή τα σημεία κατανέμονται μη συμμετρικά γύρω από τη μέση τιμή. Το μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεις λαμβάνει μηδενική τιμή, όταν δηλαδή η πρώτη γεννήτρια δεν χρησιμοποιείται.



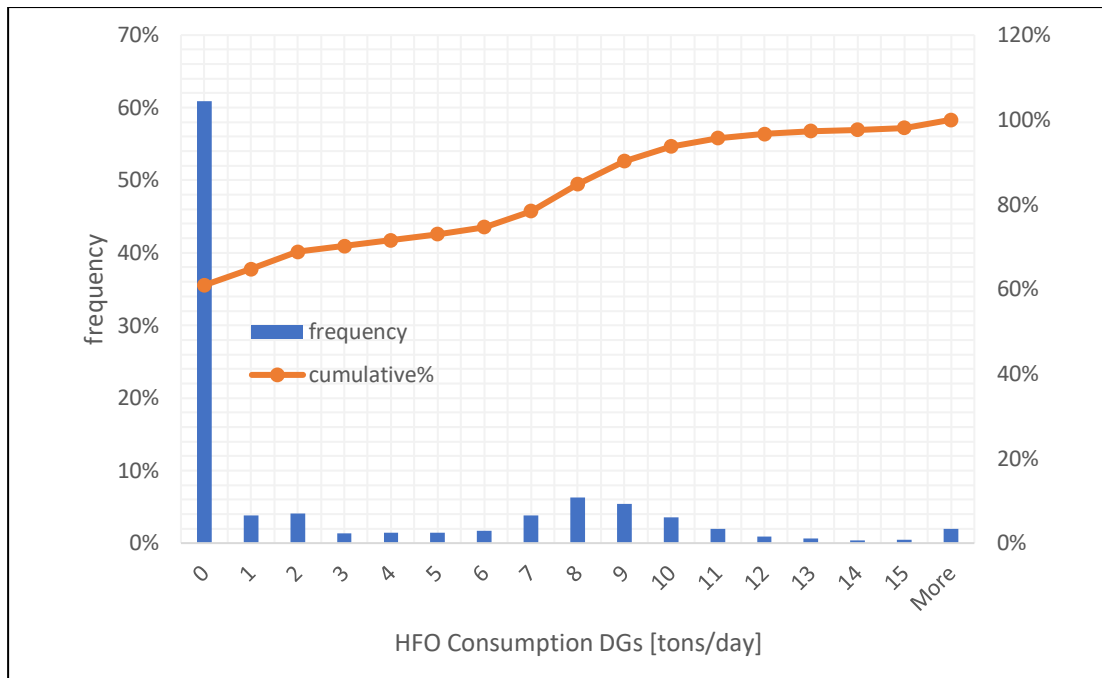
Διάγραμμα 4: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Total Running Hours

Στο διάγραμμα 4, μεγάλο ποσοστό των δεδομένων εμπίπτουν σε ένα εύρος τιμών [5, 25], σε αυτήν την περίπτωση, πρόκειται για μη συμμετρική κατανομή των αποτελεσμάτων γύρω από τη μέση τιμή. Το μεγαλύτερο πλήθος των δεδομένων λαμβάνει τιμή 25 [hours].



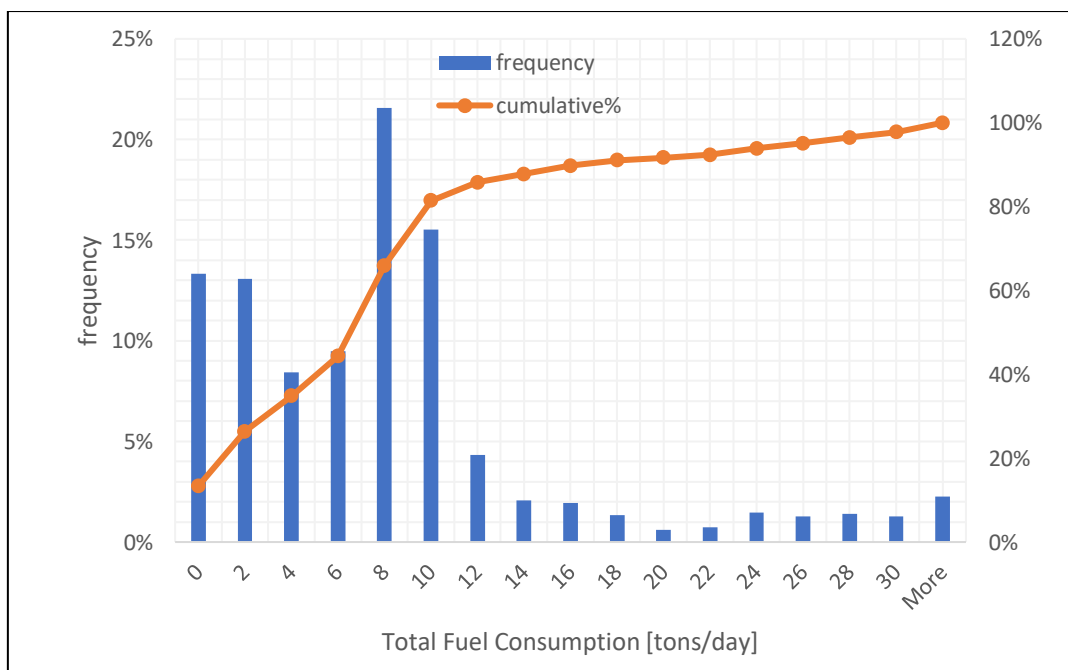
Διάγραμμα 5: Ιστογράμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Total Reefer Units Onboard

Στο διάγραμμα 5, παρατηρείται μια συνεχή μείωση στην κατανομή. Αυτό το γεγονός, υποδηλώνει ότι τα δεδομένα είναι λοξά προς τα δεξιά ή θετικά λοξά. Σε μια θετικά λοξή κατανομή, η ουρά της κατανομής είναι μεγαλύτερη στη δεξιά πλευρά και η επικρατούσα τιμή (η τιμή με τη μεγαλύτερη συχνότητα) είναι μικρότερη από τη διάμεσο, η οποία είναι μικρότερη από τη μέση τιμή. Αυτό δείχνει ότι η πλειονότητα των σημείων δεδομένων είναι συγκεντρωμένα στην αριστερή πλευρά της κατανομής. Στις περισσότερες περιπτώσεις το υπό μελέτη πλοίο δεν φέρει κιβώτια τύπου ψυγείου.



Διάγραμμα 6: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής HFO DGs

Η κατανομή που εικονίζεται στο διάγραμμα 6 δείχνει ότι η μεταβλητή HFO Consumption DGs παίρνει τιμή μηδέν (τις στιγμές που χρησιμοποιείται άλλος τύπος καυσίμου, προς κατανάλωση) συχνότερα από κάθε άλλη τιμή. Η κατανομή είναι μη συμμετρική.



Διάγραμμα 7: Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας μεταβλητής Total Fuel Consumption

Από το διάγραμμα 7 που δόθηκε εσχάτως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι περισσότερα δεδομένα στην προκειμένη περίπτωση έχουν κατά μεγαλύτερο ποσοστό τιμή έως 10 [tons/day] και ότι η κατανομή υπάγεται σε μη συμμετρικής μορφής.

2.5 Στατιστικά Μεγέθη για την Παράμετρο Running Hours για κάθε Γεννήτρια και Κατάσταση

Προκειμένου να ληφθεί η αρχική περιγραφή της κατάστασης των συστημάτων είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα στατιστικά μεγέθη για τη μεταβλητή λειτουργίας Running Hours για κάθε γεννήτρια και κάθε κατάσταση λειτουργίας. Οι τέσσερις καταστάσεις που απαρτίζουν τη λειτουργία του πλοίου όπως έχει επισημανθεί είναι οι καταστάσεις at anchor (το πλοίο έχει αγκυροβολήσει), at port (το πλοίο βρίσκεται επί του λιμένα), at sea (το πλοίο βρίσκεται σε ταξίδι στα ανοιχτά), drifting (το πλοίο βρίσκεται σε καιρό, παραδείγματος χάριν η πορεία του επηρεάζεται από τον άνεμο υψηλής έντασης). Προκειμένου να ερμηνευτεί η λειτουργία των γεννητριών στις διάφορες καταστάσεις, λοιπόν, παρουσιάζεται ο παρακάτω πίνακας, όπου παρουσιάζονται βασικά στατιστικά μεγέθη. Συγκεκριμένα, διακρίνουμε για κάθε γεννήτρια τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή.

At Anchor	DG No.1 Running Hours	DG No.2 Running Hours	DG No.3 Running Hours	DG No.4 Running Hours
Μέση Τιμή	1.9	3.2	2.5	5.0
Τυπική Απόκλιση	3.792	7.307	4.0487	7.365
Ελάχιστο	0	0	0	0
Μέγιστο	11.3	24.0	10.0	24.0
At Port	DG No.1 Running Hours	DG No.2 Running Hours	DG No.3 Running Hours	DG No.4 Running Hours
Μέση Τιμή	4.5	2.9	4.2	4.4
Τυπική Απόκλιση	7.998	6.624	7.088	7.330
Ελάχιστο	0	0	0	0

Μέγιστο	24.0	24.0	24.0	24.0
At Sea	DG No.1 Running Hours	DG No.2 Running Hours	DG No.3 Running Hours	DG No.4 Running Hours
Μέση Τιμή	6.7	4.6	5.7	6.7
Τυπική Απόκλιση	9.802	8.707	9.258	9.895
Ελάχιστο	0	0	0	0
Μέγιστο	24.0	24.0	24.0	24.0
Drifting	DG No.1 Running Hours	DG No.2 Running Hours	DG No.3 Running Hours	DG No.4 Running Hours
Μέση Τιμή	0.7	0.1	6.1	9.9
Τυπική Απόκλιση	1.491	0.242	9.555	10.963
Ελάχιστο	0	0	0	0
Μέγιστο	3.7	0.6	20.0	24.0

Πίνακας 3: Στατιστικά μεγέθη παραμέτρων DG No.1 Running Hours, DG No.2 Running Hours, DG No.3 Running Hours, DG No.4 Running Hours για την κάθε κατάσταση λειτουργίας

Υπολογισμός βασικών στατιστικών μεγεθών ηλεκτρογεννητριών (DGs):

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 4), που περιέχει τα βασικά στατιστικά μεγέθη για τις ηλεκτρογεννήτριες όσον αφορά το συνολικό χρονικό διάστημα λειτουργίας και παρακάτω γίνεται ανάλυση του. Στον πίνακα, οι μονάδες του Electric Load Total έχουν μετατραπεί σε [MW] από [kW]. Τα Q1, Q3 και Q4 αποτελούν τα 1st, 3rd και 4th quartile αντιστοίχως. Σε αυτή την περίπτωση δίνονται επίσης η μέση τιμή και τυπική απόκλιση κάθε παραμέτρου.

DGs	Total Containers Onboard	Electric Load Total [MW]	HFO Consumption DGs [tons/day]	Diesel Consumption DGs [tons/day]	VLSFO (<0.5%) Consumption DGs [tons/day]
Μέση Τιμή	1,356.601	4.340	2.708	0.411	7.727
Τυπική Απόκλιση	1,158.538	1,336.569	4.361	1.492	9.101
Q1	1201	1,261	0	0	0
Q3	2,938	2,192.66	6.2	0	9.3
Q4	3,717	8,398	24	15.73	48.56

Πίνακας 4: Στατιστικά μεγέθη ηλεκτρογεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5) φαίνεται στατιστικά μεγέθη των ηλεκτρογεννητριών ανάλογα την κατάσταση λειτουργίας. Ο πίνακας, περιέχει τα ίδια στατιστικά μεγέθη με τον προηγούμενο πίνακα.

At Anchor	Electric Load Total [MW]	HFO Consumption DGs [tons/day]	Diesel Consumption DGs [tons/day]	VLSFO (<0.5%) Consumption DGs [tons/day]
Μέση Τιμή	1.529	2.209	0.995	2.143
Τυπική Απόκλιση	0.490	2.399	2.203	1.902
Q1	1.333	0	0	1.4
Q3	1.658	3.64	0	3.215
Q4	2,600	7.73	6.42	3.63

At Port	Electric Load Total [MW]	HFO Consumption DGs [tons/day]	Diesel Consumption DGs [tons/day]	VLSFO (<0.5%) Consumption DGs [tons/day]
Μέση Τιμή	1.869	1.449	0.694	5.855
Τυπική Απόκλιση	1.108	2.940	1.893	5.936
Q1	1.248	0	0	1.96
Q3	1.965	1.3	0	7.623
Q4	8.320	19.15	15.64	48.56
At Sea	Electric Load Total [MW]	HFO Consumption DGs [tons/day]	Diesel Consumption DGs [tons/day]	VLSFO (<0.5%) Consumption DGs [tons/day]
Μέση Τιμή	2.134	3.051	0.327	8.305
Τυπική Απόκλιση	1.394	4.631	1.347	9.799
Q1	1.266	0	0	0
Q3	2.277	7.07	0	9.7
Q4	8.398	24	15.73	34.6
Drifting	Electric Load Total [MW]	HFO Consumption DGs [tons/day]	Diesel Consumption DGs [tons/day]	VLSFO (<0.5%) Consumption DGs [tons/day]
Μέση Τιμή	1.294	1.56	0.82	6.467
Τυπική Απόκλιση	0.482	2.827	1.403	1.818

Q1	1.027	0	0	5.8
Q3	1.572	4.23	0.76	7.5
Q4	2.016	7	3.4	7.8

Πίνακας 5: Στατιστικά μεγέθη των fuel types και Electric Load Total

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα είναι ανάγκη να υπολογιστούν τα ποσοστά χρήσης του κάθε τύπου καυσίμου για την κάθε φάση λειτουργίας (state). Από το υπολογιστικό εργαλείο Microsoft Excel® έχουν υπολογιστεί τα επί τοις εκατό ποσοστά σε κάθε περίπτωση και δίδονται στον πίνακα 6:

Percentages	Average of % ULSFO	Average of % HFO	Average of % Diesel	Average of % VLSFO
At Anchor	0%	66%	20%	13.33%
At Port	0%	28.34%	16.33%	55.33%
At Sea	0.056%	48.32%	8.22%	43.41%
Drifting	0%	50%	17.95%	32.05%

Πίνακας 6: Ποσοστά τύπων καυσίμου για κάθε state

Επίσης, ως προς την ανάλυση πρέπει να γνωρίζουμε το σχετικό αριθμό των Reefers και DG Units προς το συνολικό αριθμό των TEUs (μέσο όρο, τυπική απόκλιση, ελάχιστο και μέγιστο). Τα σχετικά στατιστικά μεγέθη παρουσιάζονται στον πίνακα 7 σε επί τοις εκατό ποσοστά.

Conversions' Statistics	Τυπική Απόκλιση	Μέση Τιμή	Ελάχιστο	Μέγιστο
-------------------------	-----------------	-----------	----------	---------

DGs/TEUs:	1.161%	0.839%	0%	8.9%
Reefers/TEUs:	4.945%	1.854%	0%	40.9%

Πίνακας 7: Στατιστικά μεγέθη των DGs/TEUs και Reefers/TEUs

2.6 Ανάλυση Γραμμικής Συσχέτισης με Χρήση του Συντελεστή Pearson

Η ανάλυση γραμμικής συσχέτισης μέσω του συντελεστή Pearson που αφορά τις μεταβλητές των ηλεκτρογεννητριών κατηγοριοποιείται ως “Overall”, και αναλόγως την εκάστοτε φάση λειτουργίας ως “At Anchor”, “At Port”, “At Sea”, ενώ η φάση λειτουργίας “Drifting” παραλείπεται λόγω της ανεπάρκειας δεδομένων.

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson, όταν εφαρμόζεται σε έναν πληθυσμό, παριστάνεται συνήθως με το ελληνικό γράμμα ρ (rho) και μπορεί να αναφέρεται ως συντελεστής συσχέτισης πληθυσμού ή συντελεστής συσχέτισης πληθυσμού Pearson.

Δεδομένου ενός ζεύγους τυχαίων μεταβλητών (X, Y), ο τύπος για το ρ είναι:

$$PCC_{X,Y} = \rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.1)$$

όπου:

- ❖ $cov(X, Y)$: είναι η συνδιακύμανση (ή συνμεταβλητότητα) μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών X και Y
- ❖ σ_X : είναι η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής X
- ❖ σ_Y : είναι η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής Y

Σε αυτό το σημείο, με σκοπό τη μελέτη συγκεκριμένων μεταβλητών θα οριστούν τα επημέρους συνθετικά στοιχεία τους. Οι μεταβλητές DG No.1 Running Hours, DG No.3 Running Hours, DG No.3 Running Hours, DG No.4 Running Hours συγχωνεύονται και μετασηματίζονται στη μεταβλητή Total Running Hours. Επιπλέον υπάρχει και η μεταβλητή Total Fuel Consumption, που αντικατοπτρίζει το άθροισμα των επιμέρους καταναλώσεων, HFO Consumption DGs, Diesel Consumption DGs, VLSFO (<5%) Consumption DGs. Η μεταβλητή ULSFO Consumption DGs, δεν συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση λόγω λιγοστών δεδομένων. Συγκεκριμένα:

$$Total\ Running\ Hours = DG\ No.1\ Running\ Hours + DG\ No.2\ Running\ Hours + DG\ No.3\ Running\ Hours + DG\ No.4\ Running\ Hours \quad (2.2)$$

$$Total\ Fuel\ Consumption = HFO\ Consumption\ DGs + Diesel\ Consumption\ DGs + VLSFO\ (<0.5\%)\ Consumption\ DGs \quad (2.3)$$

Τα μεγέθη των συσχετίσεων των μεταβλητών υπολογίζονται με τη χρήση συναρτήσεων υπολογισμού συσχέτισης συντελεστή Pearson μεταξύ μεταβλητών στο Microsoft Excel® και απεικονίζονται στους πίνακες που ακολουθούν. Στους πίνακες δίνονται

τα μέγεθθ της συσχέτισης και κατηγοριοποιούνται με βάση τη χρωματική διαβάθμιση, όπως αναλύεται και παρακάτω.

Διευκρινίζεται ότι όπου υπάρχει το σύμβολο “-” είχε προκύψει το σφάλμα “#ΔΙΑΙΡ/0!” δηλαδή δεν υπάρχουν τιμές και από τις δύο παραμέτρους για να προκύψει ο συντελεστής Pearson (μηδενικός παρονομαστής, δηλαδή απροσδιοριστία).

Τιμές για Electric Load, μεγαλύτερες του 10,000 [kW] θεωρούνται μη αποδεκτές και κρίνεται ότι πρέπει να διαγραφούν, αφού για το συγκεκριμένο Containership ισχύει ότι: max load per DG = 3,350 [kW], ενώ μπορούν να δουλεύουν το πολύ τρεις DGs ταυτόχρονα (συνήθως δουλεύουν δύο ταυτόχρονα και ποτέ όλες μαζί στο maximum σημείο λειτουργίας τους).

Overall	Electric Load Total	Total DGs/TEUs	Total Reefers/TEUs	HFO Consumption DGs	Diesel Consumption DGs	VLSFO (<5%) Consumption DGs	Total Running Hours	Total Fuel Consumption
Electric Load Total kW	1							
Total DGs/TEUs	-0.109	1						
Total Reefers/TEUs	0.126	0.402	1					
HFO Consumption DGs	-0.090	-0.047	-0.084	1				
Diesel Consumption DGs	-0.109	0.141	0.044	-0.149	1			
VLSFO (<5%) Consumption DGs	0.756	-0.258	-0.021	-0.027	-0.142	1		
Total Running Hours	0.586	-0.262	-0.076	0.167	-0.003	0.862	1	
Total Fuel Consumption	0.646	-0.258	-0.053	0.200	-0.030	0.991	0.876	1

Πίνακας 8: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: συνολική λειτουργία

At anchor	Electric Load Total kW	Total DGs/TEUs	Total Reefers/TEUs	HFO Consumption DGs	Diesel Consumption DGs	VLSFO (<5%) Consumption DGs	Total Running Hours	Total Fuel Consumption
Electric Load Total kW	1							
Total DGs/TEUs	0.582	1						
Total Reefers/TEUs	0.683	0.832	1					
HFO Consumption DGs	0.418	-0.072	-0.269	1				

Diesel Consumption DGs	-0.582	-0.328	-0.382	-0.445	1			
VLSFO (<5%) Consumption DGs	-0.510	-0.815	-0.062	-	-0.976	1		
Total Running Hours	-0.530	-0.481	-0.768	0.420	0.433	0.748	1	
Total Fuel Consumption	-0.553	-0.419	-0.633	0.482	0.449	0.800	0.872	1

Πίνακας 9: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: κατάσταση λειτουργίας at anchor

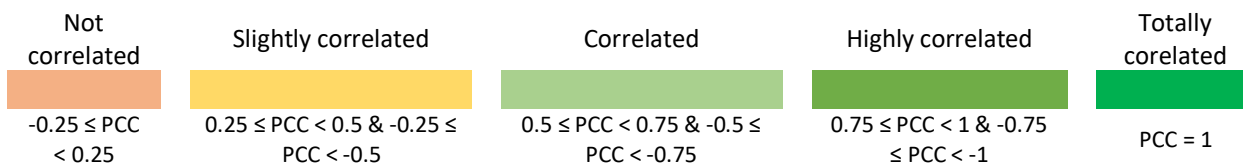
At port	Electric Load Total kW	Total DGs/TEUs	Total Reefers/TEUs	HFO Consumption DGs	Diesel Consumption DGs	VLSFO (<5%) Consumption DGs	Total Running Hours	Total Fuel Consumption
Electric Load Total kW	1							
Total DGs/TEUs	-0.174	1						
Total Reefers/TEUs	0.639	-0.055	1					
HFO Consumption DGs	0.033	0.092	-0.082	1				
Diesel Consumption DGs	-0.106	-0.019	-0.099	-0.181	1			
VLSFO (<5%) Consumption DGs	0.672	-0.222	0.722	-	-0.225	1		
Total Running Hours	0.436	-0.048	0.496	0.241	0.108	0.817	1	
Total Fuel Consumption	0.477	-0.024	0.636	0.167	0.036	0.975	0.844	1

Πίνακας 10: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: κατάσταση λειτουργίας at port

At sea	Electric Load Total kW	Total DGs/TEUs	Total Reefers/TEUs	HFO Consumption DGs	Diesel Consumption DGs	VLSFO (<5%) Consumption DGs	Total Running Hours	Total Fuel Consumption
Electric Load Total kW	1							
Total DGs/TEUs	-0.033	1						
Total Reefers/TEUs	-0.078	0.830	1					
HFO Consumption DGs	-0.122	0.091	0.126	1				

Diesel Consumption DGs	-0.099	0.208	0.163	-0.130	1			
VLSFO (<5%) Consumption DGs	0.763	-	-	-0.032	-0.120	1		
Total Running Hours	0.605	-0.158	-0.167	0.132	-0.004	0.866	1	
Total Fuel Consumption	0.668	-0.183	-0.188	0.186	-0.032	0.993	0.878	1

Πίνακας 11: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson: κατάσταση λειτουργίας at sea



Χρωματική διαβάθμιση:

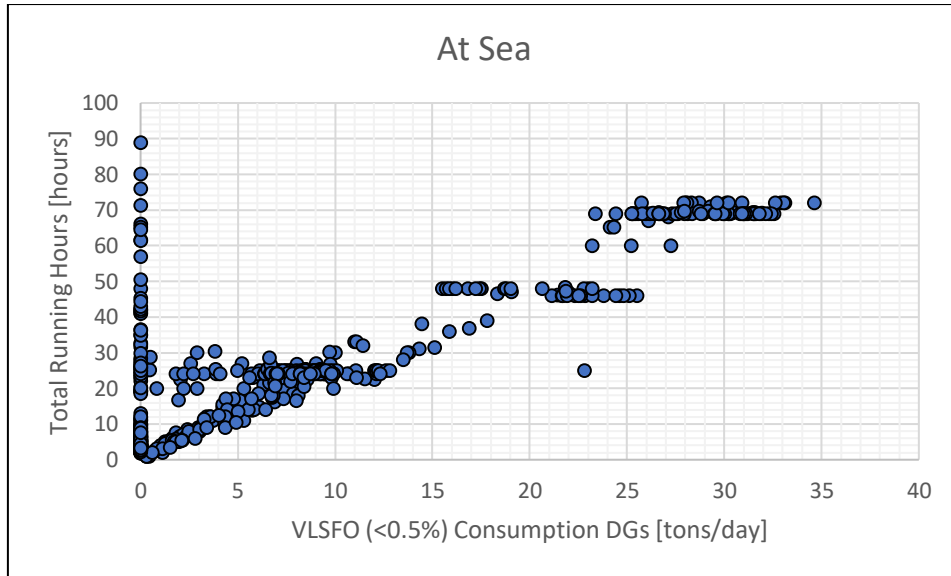
1. Πορτοκαλί: συντελεστή συσχέτισης με τιμή από -0.25 έως 0.25 (not correlated),
2. Κίτρινο: συντελεστή συσχέτισης με τιμή από 0.25 έως 0.5 και από -0.25 έως -0.5 (slightly correlated),
3. Ελαφρύ πράσινο: συντελεστή συσχέτισης με τιμή από 0.5 έως 0.75 και από -0.5 έως -0.75 (correlated),
4. Ενδιάμεση απόχρωση πράσινου: συντελεστή συσχέτισης με τιμή από 0.75 έως 1 και από -0.75 έως -1 (highly Correlated) και
5. Σκούρο πράσινο: συντελεστή συσχέτισης με τιμή 1 (totally Correlated).

2.7 Αποτελέσματα Ανάλυσης Γραμμικής Συσχέτισης

Γίνεται αντιληπτό ότι η Electric Load Total σε σχέση με το αριθμό των DG Units Onboard/TEUs έχει αρνητικό συντελεστή Pearson. Όμως λαμβάνοντας υπόψιν προηγούμενο πίνακα (Πίνακας 7) γίνεται αντιληπτό ότι λόγω μικρών ποσοστών του λόγου εμπορευματοκιβωτίων, ουσιαστικά δεν υπάρχει ουσιαστική συσχέτιση με την ηλεκτρική ισχύ.

Κάθε ζεύγος παραμέτρων εμπίπτει σε μια κατηγορία (ανάλογα το χρωματισμό), με βάση την παραπάνω ανάλυση Pearson. Για κάθε κατηγορία μεγέθους συσχέτισης, έχουν παρασταθεί σε κοινό διάγραμμα η διασπορά συγκεκριμένων ζευγών μεταβλητών.

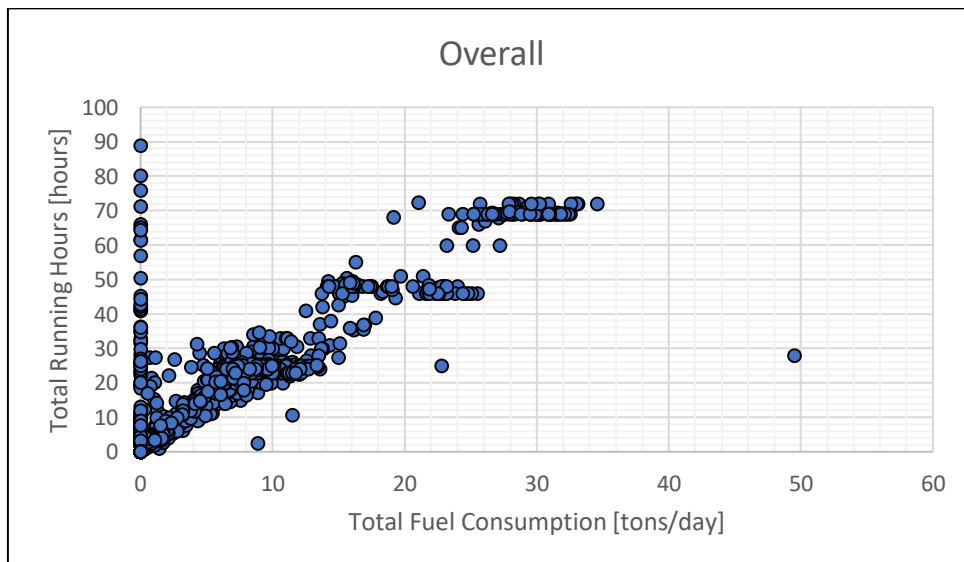
Ενδεικτικά δίνονται τα διαγράμματα διασποράς σε δύο καταστάσεις για το ζεύγος μεταβλητών VLSFO (<0.5%) Consumption DGs και Total Running Hours, που εμπίπτουν στην κατηγορία “highly correlated”, και αποτελούν απεικόνιση των αποτελεσμάτων των ανωτέρω πινάκων.



Διάγραμμα 8: Συσχέτιση ζεύγους μεταβλητών VLSFO (<0.5%) Consumption DGs – Total Running Hours, σε κατάσταση θαλάσσης

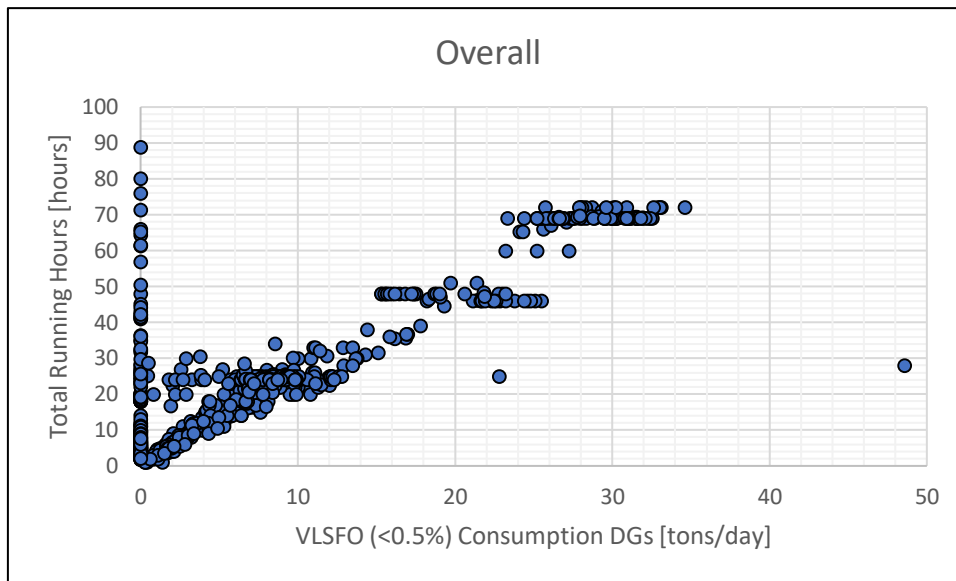
Όταν τα σημεία που έχουν υψηλή τιμή των working hours έχουν μηδενική κατανάλωση σημαίνει ότι προφανώς έχει χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο καύσιμο εκείνη τη χρονική στιγμή (Διάγραμμα 8).

Στο διάγραμμα 9, όπου φαίνεται ότι υπάρχουν μηδενικές τιμές για την Total Fuel Consumption, συμβαίνει για το λόγο ότι δεν έλαβε χώρα κάποια μέτρηση.



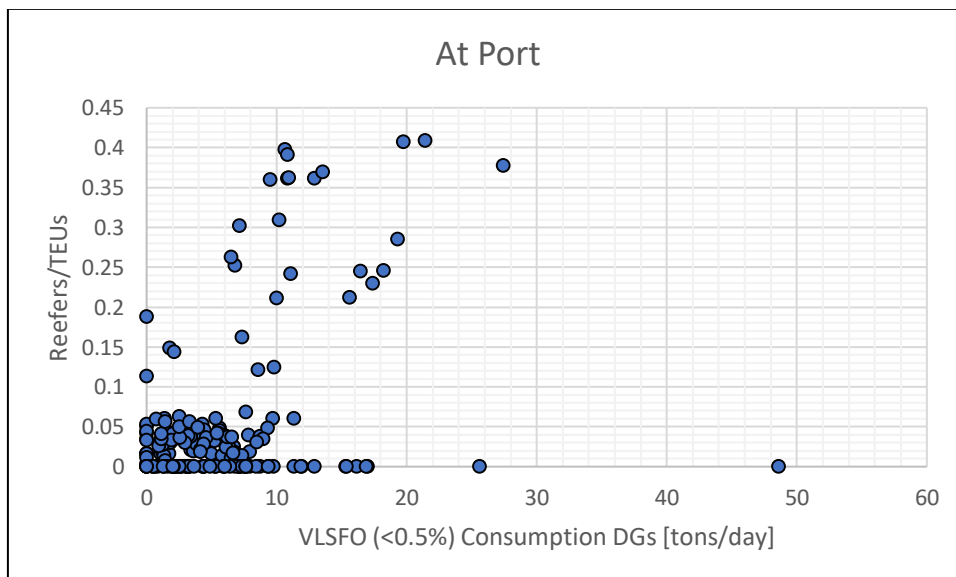
Διάγραμμα 9: Αναπαράσταση σχέσης Total Fuel Consumption – Total Running Hours και αφορά το σύνολο των καταστάσεων

Η συσχέτιση ενός ζεύγους στο συνολικό χρονικό διάστημα διακρίνεται παρακάτω στο “Διάγραμμα 10”.



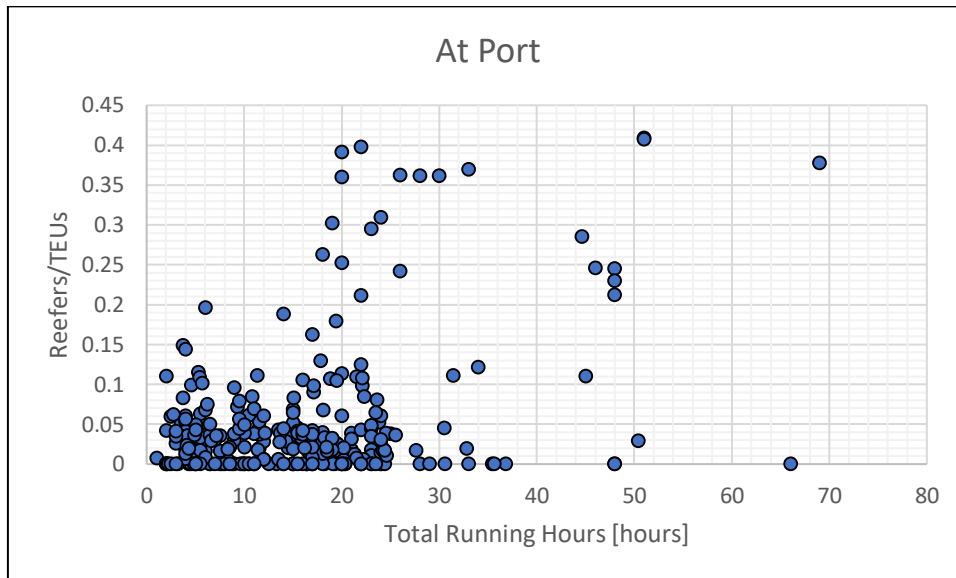
Διάγραμμα 10: Συσχέτιση ζεύγους μεταβλητών VLSFO (<0.5%) Consumption DGs – Total Running Hours, σε όλες τις καταστάσεις συνολικά

Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα διασποράς από ορισμένα ακόμη ενδιαφέρον ζεύγη παραμέτρων όπου στους πίνακες γραμμικής συσχέτισης με βάση το συντελεστή Pearson έχουν επισημανθεί (με bold κόκκινο και μωβ χρώμα).



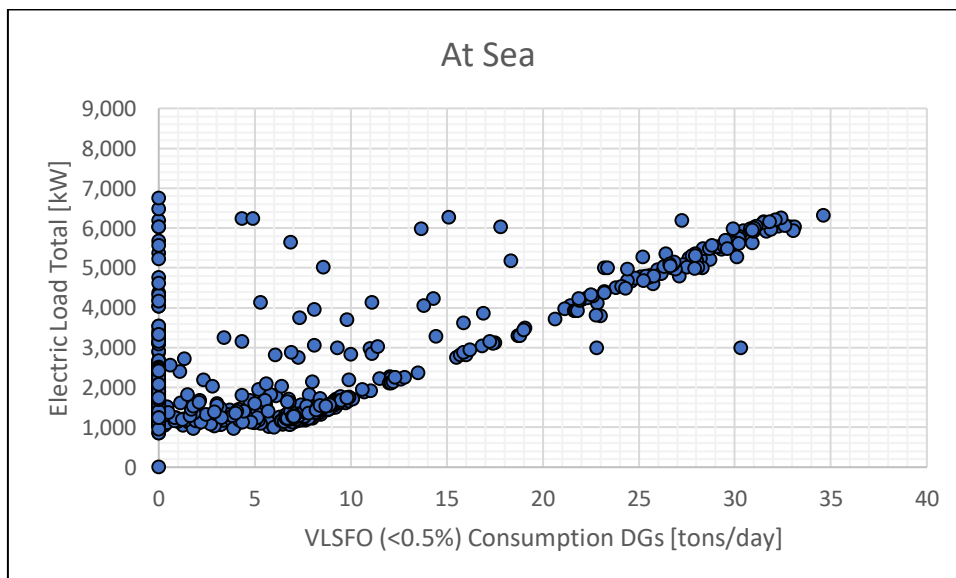
Διάγραμμα 11: Συσχέτιση των μεταβλητών VLSFO (<0.5%), Consumption DGs και Reefers/TEUs σε κατάσταση εν όρμω

Επειδή στο άνωθεν παραμετρικό διάγραμμα 11 τα σημεία είναι στενά ομαδοποιημένα, αυτό υποδηλώνει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Όσο πιο στενή είναι η συστάδα, τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση.



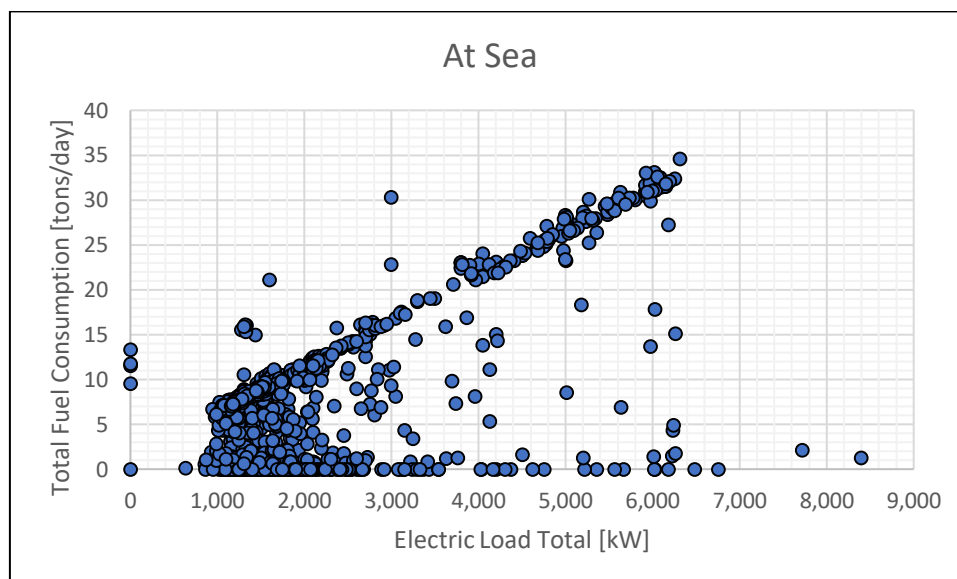
Διάγραμμα 12: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Running Hours και Reefers/TEUs, σε κατάσταση εν όρμω

Παρατηρώντας παραπάνω το διάγραμμα 12 γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει σημαντική και αναπτυσσόμενη συγκέντρωση σημείων στην κάτω – αριστερή περιοχή του διαγράμματος, το οποίο υποδικνύει ότι υπάρχει σχετικά αδύναμη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων, καθώς δεν φαίνεται κάποια τάση των σημείων για σχηματισμό συγκεκριμένου μοτίβου.



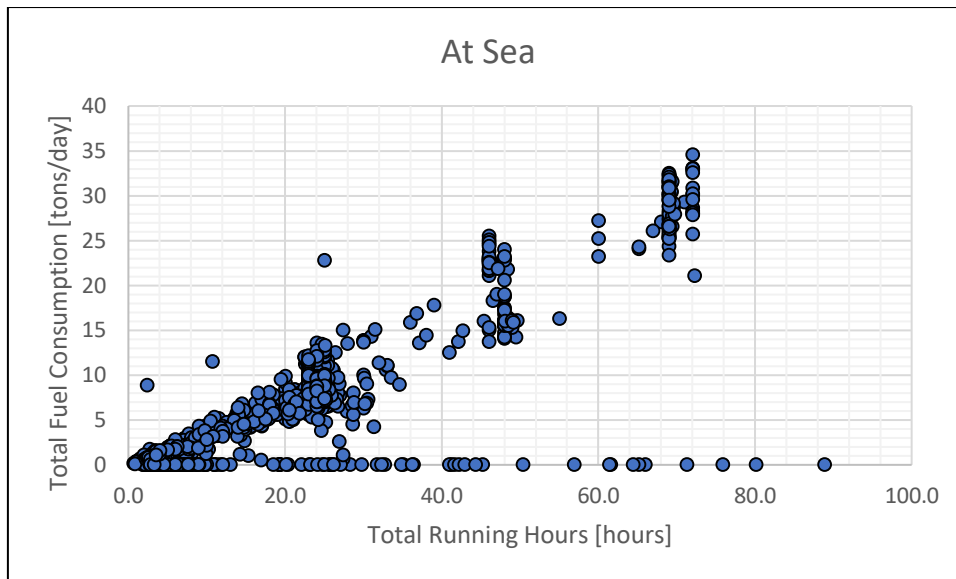
Διάγραμμα 13: Συσχέτιση των μεταβλητών VLSFO (<0.5%), Consumption DGs και Electric Load Total, σε κατάσταση θαλάσσης

Στην περίπτωση του διαγράμματος 13 τα σημεία στο παραμετρικό διάγραμμα σχηματίζουν μια διαγώνια γραμμή, που γενικά υποδηλώνει μια ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Αυτό σημαίνει ότι καθώς η τιμή της μίας μεταβλητής αυξάνεται, η τιμή της άλλης μεταβλητής τείνει επίσης να αυξηθεί.



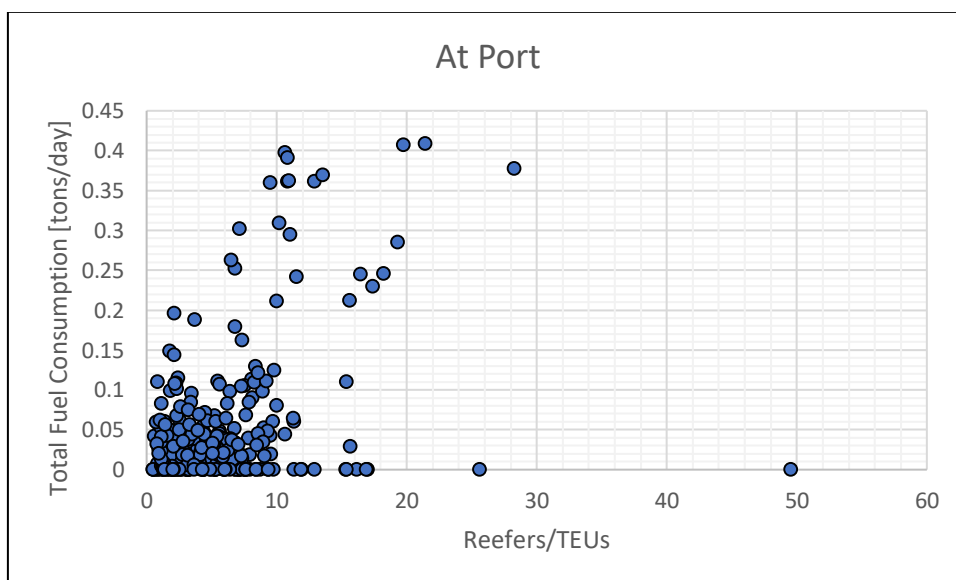
Διάγραμμα 14: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Fuel Consumption και Electric Load Total, σε κατάσταση θαλάσσης

Στο άνωθεν παραμετρικό διάγραμμα 14, όπως και σε προηγούμενο διάγραμμα τα σημεία είναι στενά ομαδοποιημένα και σε διαγώνια γραμμή. Αυτό το είδος παρουσίασης των σημείων υποδηλώνει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών.



Διάγραμμα 15: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Running Houts και Total Fuel Consumption, σε κατάσταση θαλάσσης

Όπως και σε προηγούμενη περίπτωση τα σημεία στο παραμετρικό διάγραμμα 15 σχηματίζουν μια διαγώνια γραμμή, που γενικά υποδηλώνει μια ισχυρή θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Αυτό σημαίνει ότι καθώς η τιμή μίας μεταβλητής αυξάνεται, η τιμή της άλλης μεταβλητής τείνει επίσης να αυξηθεί.



Διάγραμμα 16: Συσχέτιση των μεταβλητών Total Fuel Consumption και Reefers/TEUs, σε κατάσταση εν όρμω

Στο διάγραμμα 16 τα σημεία είναι στενά ομαδοποιημένα, πράγμα που υποδηλώνει στενή συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών Total Fuel Consumption και Reefers/TEUs, στην κατάσταση λειτουργίας εν όρμω.

Σύμφωνα με τα ευρήματα που έχουν προκύψει από τη γραμμική ανάλυση και τα διαγράμματα που προηγήθηκαν καθίσταται γνωστό ότι η μεταβλητή Total Fuel Consumption DGs, σχετίζεται με τις μεταβλητές: Electric Load Total, Reefers, Total Running Hours.

[This page intentionally left blank]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Προετοιμασία Δεδομένων για το Μοντέλο Γραμμικής Παλλινδρόμησης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε γραμμική συσχέτιση με χρήση του συντελεστή Pearson, έχοντας πραγματοποιήσει μια πρώτη επεξεργασία και απόρριψη ορισμένων μη αποδεκτών τιμών των μετρήσεων.

Προκειμένου να προχωρήσει η μελέτη σε αυτό το κεφάλαιο θα επιλεγούν οι μεταβλητές που θα συμμετάσχουν στην πρόβλεψη την κατανάλωσης και με σκοπό τα μοντέλα πρόβλεψης να δώσουν ποιοτικά αποτελέσματα θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν επιπλέον περιορισμοί στα δεδομένα. Θα ακολουθήσει μια διαδικασία, όπου θα γίνει ένας δεύτερος κύκλος εκκαθάρισης των δεδομένων ώστε τα μοντέλα πρόβλεψης που θα προκύψουν στο επόμενο κεφάλαιο να χαρακτηρίζονται από υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας.

Η εξαρτημένη μεταβλητή θα είναι η FOC (Fuel Oil Consumption), όπου στην ανάλυση στα προηγούμενα βρίσκεται ως Total Fuel Consumption (άθροισμα επιμέρους καταναλώσεων διαφορετικών τύπων καυσίμων). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι τρεις και προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης γραμμικής συσχέτισης με βάση το συντελεστή Pearson. Αυτές είναι οι εξής: η Electric Load (όπου στα προηγούμενα βρίσκεται ως Electric Load Total), τα Reefers (όπου στην προηγούμενη ανάλυση έχει ληφθεί με αναγωγή στα συνολικά TEUs), οι Running Time (όπου βρίσκεται ως Total Running Hours στα προηγούμενα, και προκύπτει ως το ημερήσιο σύνολο των working hours για κάθε ηλεκτρογεννήτρια).

Ισχύει ότι:

$$FOC = f(\text{Electric Load}, \text{Reefers}, \text{Running Time}) \quad (3.1)$$

Ο επαναδιοργάνωση των δεδομένων γίνεται χρησιμοποιώντας φίλτρα στο λογισμικό Microsoft Excel[®] απαλοφώντας για την εκάστοτε παράμετρο ορισμένες μη επιθυμητές μετρήσεις. Έτσι θέτωντας τους περιορισμούς του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 12), το σετ των δεδομένων που προκύπτει θα μειωθεί αρκετά.

3.1 Εκκαθάριση Δεδομένων

Ο δεύτερος κύκλος εκκαθάρισης δεδομένων γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω συγκεντρωτικό "Πίνακα 12". Οι περιορισμοί του πίνακα έχουν προκύψει έπειτα από εξέταση των διαγράμματος των διαθέσιμων δεδομένων.

Παράμετροι	Απορριφθείσες Τιμές
Electric Load [kW]	> 6,000
Electric Load [kW]	zeros
Reefers	zeros
FOC [tons/day]	zeros
FOC [tons/day]	< 2

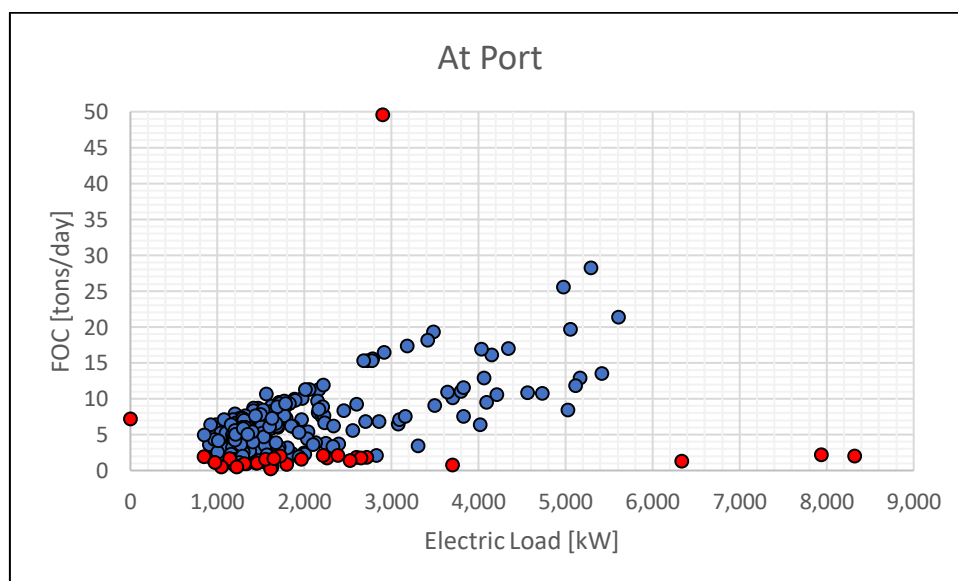
Πίνακας 12: Απόρριψη δεδομένων (outliers, zeros) που αλλοιώνουν τα τελικά αποτελέσματα

Όπως έχει διατυπωθεί στο πρώτο κεφάλαιο, οι τιμές για Electric Load που είναι μεγαλύτερες των 10,000 [kW], έχουν διαγραφεί προηγουμένως. Οι μηδενικές τιμές απαλείφονται, γιατί μπορεί να οδηγήσουν τη μελέτη σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Ακόμη απαλείφονται τιμές για FOC < 2 [tons/day], ενώ τελικά τίθεται ο περιορισμός Electric Load < 6000 [kW]. Όπως είναι φυσιολογικό λαμβάνεται υπόψιν το ενδεχόμενο να υπάρχουν στα data set λανθασμένες μετρήσεις, που οφείλονται σε ανθρώπινο σφάλμα, εφόσον βρίσκονται όμως σε επιτρεπτό range. Με αυτό ως δεδομένο, τονίζεται ότι η εκτίμηση των αποτελεσμάτων σίγουρα ενέχει ένα μικρό ποσοστό απόκλισης από πραγματικές συνθήκες εργασίας των μηχανημάτων όπως είναι φυσικό, εντούτις αυτό δεν μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τα τελικά αποτελέσματα.

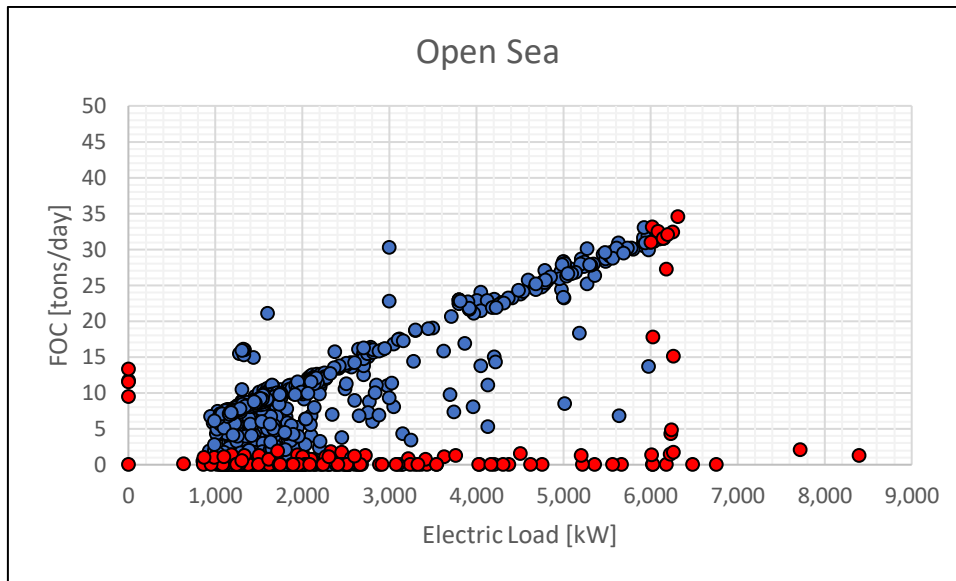
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα διασποράς για την παρουσίαση της αλληλεξάρτησης των βασικών μεγεθών που θα απασχολήσουν τη μελέτη. Με κόκκινο φαίνονται τα σημεία που απαλείφονται γιατί κρίνονται ως παρεκτρεπόμενα. Τα μπλε σημεία βρίσκονται εντός επιτρεπτών ορίων και παραμένουν στη μελέτη.

Διάγραμμα ισχύος – κατανάλωσης:

Με κόκκινο φαίνονται τα σημεία που απαλείφονται από τα διαγράμματα διασποράς Electric Load – FOC, γιατί κρίνονται ως παρεκτρεπόμενα. Μερικά από αυτά είναι αρκετά απομακρυσμένα από τη συγκέντρωση των υπολοίπων που είναι μια ακόμη ένδειξη ότι πρόκειται για παρεκτρεπόμενα σημεία.



Διάγραμμα 17: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς μεταβλητών Electric Load Total, Total Fuel Consumption, At Port state

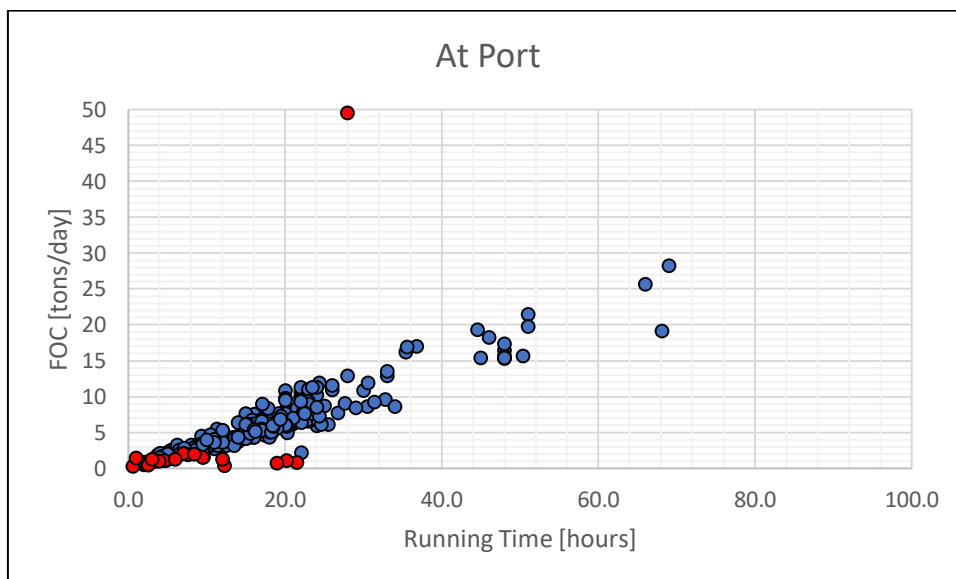


Διάγραμμα 18: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς μεταβλητών Electric Load Total, Total Fuel Consumption, Open Sea state

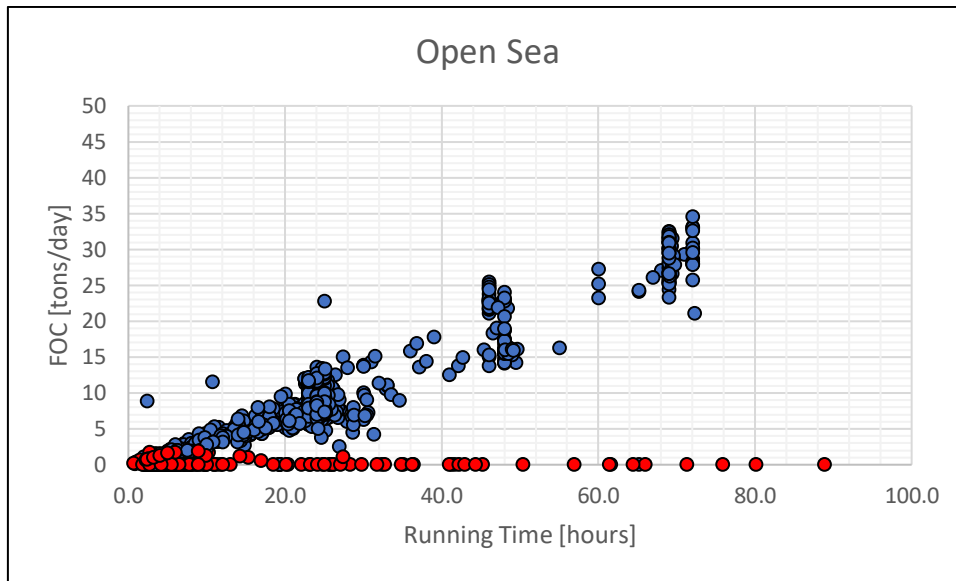
Στο διάγραμμα ισχύος – κατανάλωσης, παρουσιάζεται ικανοποιητική εκκαθάριση. Τα σημεία μηδενικής ισχύος, μηδενικής κατανάλωσης και μη ρεαλιστικής τιμής κατανάλωσης, απομακρύνονται.

Διάγραμμα χρόνου λειτουργίας – κατανάλωσης:

Με κόκκινο φαίνονται τα σημεία που απαλείφονται από το διάγραμμα διασποράς Running Time – FOC:



Διάγραμμα 19: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Running Hours, Total Fuel Consumption, At Port state

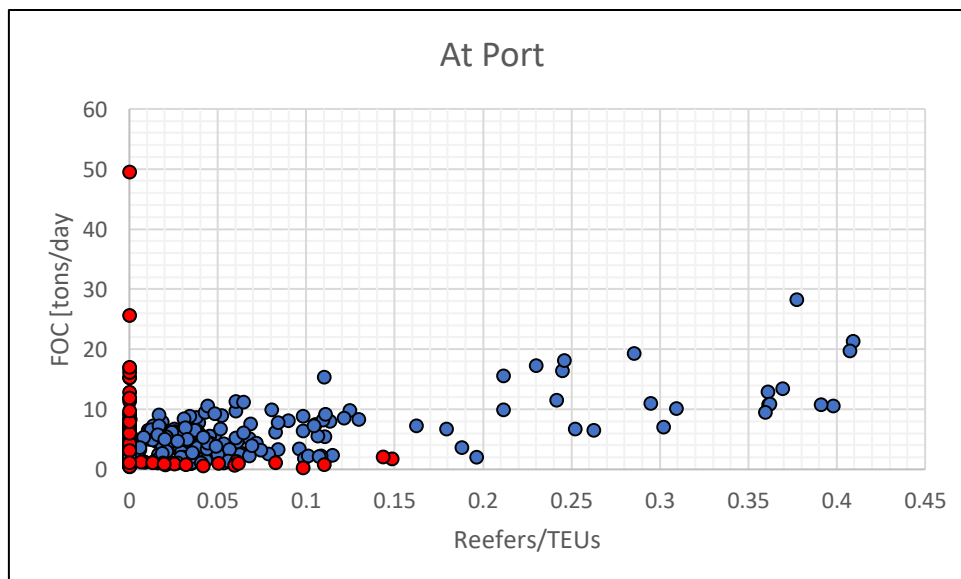


Διάγραμμα 20: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Running Hours, Total Fuel Consumption, Open Sea state

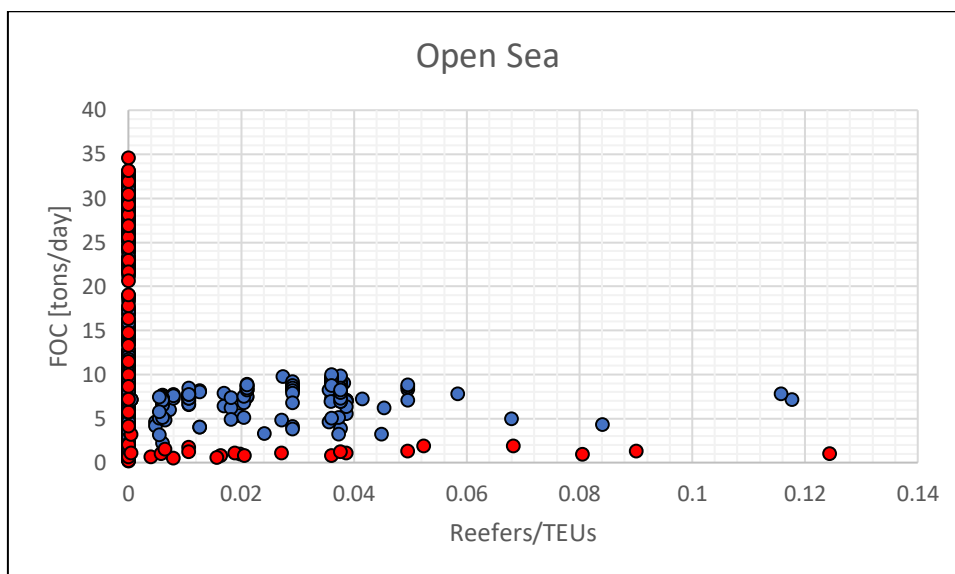
Στα διαγράμματα χρόνου λειτουργίας – κατανάλωσης, αφαιρούνται τα σημεία με μηδενικό χρόνο λειτουργίας, μη ρεαλιστικές τιμές κατανάλωσης και προκύπτει ένα αρκετά αποδεκτό διάγραμμα, αφού τα σημεία που παραμένουν οριοθετούν μια ευθεία, με θετική κλίση.

Διάγραμμα κατανάλωσης – αριθμού Reefer TEUs:

Παρακάτω παρουσιάζεται το διορθωμένο (με κόκκινο τα σημεία που χρίζουν απαλειφής) διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Fuel Consumption - Reefers/TEUs:



Διάγραμμα 21: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Fuel Consumption, Reefers/TEUs, At Port state



Διάγραμμα 22: Διορθωμένο διάγραμμα διασποράς των μεταβλητών Total Fuel Consumption, Reefers/TEUs, Open Sea state

Στα διαγράμματα αριθμού Reefers TEUs – κατανάλωσης, αφαιρούνται αρκετά σημεία μηδενικού αριθμού reefers.

Στα παραπάνω διαγράμματα 21-22 γίνεται φανερό πως η δεύτερη φάση της διόρθωσης που πραγματοποιείται στο σημείο αυτό, βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό τα συνολικά δεδομένα, καθώς απορρίπτεται ένα μεγάλο μέρος παρεκτρεπόμενων σημείων και μη λογικών τιμών που θα προκαλούσαν προβλήματα και ανομοιομορφίες στη μελέτη.

3.2 Εφαρμογή Περιορισμών στα Δεδομένα

Στη συγκεκριμένη ενότητα, δίνεται η περιγραφή των σημαντικότερων παραμέτρων, που προετοιμάζονται ώστε να χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα πρόβλεψης του επόμενου κεφαλαίου.

3.2.1 Electric Load

Η ηλεκτρική ισχύς αποτελεί ένα σημαντικό προς εξέταση μέγεθος και συνδέεται στενά με τις κύριες παραμέτρους των δεδομένων. Η ηλεκτρική ισχύς είναι πάντα μη μηδενική. Υψηλότερες σχετικά τιμές της παρατηρούνται όταν το πλοίο λειτουργεί σε κατάσταση θαλάσσης (open sea). Επιλέγεται να απορριφθούν τα σημεία με τιμή κοντά στα 8,000 [kW], διότι δεν φαίνεται να ικανοποιούν σε καμία περίπτωση τα συνήθη φορτία που αποδίδουν συνολικά οι γεννήτριες.

3.2.2 FOC

Η συνολική κατανάλωση καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών είναι το σημαντικότερο μέγεθος στην παρούσα εργασία. Είναι πάντα θετικός αριθμός και από ότι φαίνεται κυμαίνεται σε ένα εύρος από μηδέν έως περίπου 35 [tons/day]. Η πολύ υψηλή τιμή των 49.53 [tons/day], απορρίπτεται από τη μελέτη, καθώς κρίνεται μη ρεαλιστική.

3.2.3 Επιλογή καταστάσεων μελέτης

Όπως έχει γίνει σαφές, η μελέτη θα βασιστεί σε δύο μοντέλα πρόβλεψης. Το πρώτο αφορά την at port state, ενώ το δεύτερο την open sea state, δηλαδή θα υπάρχει μια πρόβλεψη FOC σε κατάσταση at port και μια πρόβλεψη για open sea.

3.2.4 Εφαρμογή περιορισμών και σύγκριση

Με την εφαρμογή των προαναφερθεισών αλλαγών τα συνολικά δεδομένα διορθώνονται σε ένα βαθμό, καθώς πραγματοποιήθηκε εκκαθάριση των απομακρυσμένων σημείων, και των τιμών χωρίς φυσικό νόημα, όπως μηδενικών τιμών. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 13) με το πλήθος των αρχικών δεδομένων και το πλήθος των δεδομένων μετά την εφαρμογή των περιορισμών. Λόγω προβληματικών μετρήσεων της κατανάλωσης και αριθμού reefers και τις πολλές μη ρεαλιστικές τιμές της ηλεκτρικής ισχύος και κατανάλωσης που αλλοίωσαν το data set, λαμβάνεται πάρα πολύ μικρό δείγμα για κατάσταση open sea. Η εκκαθάριση αποτελεί μια κυκλική διαδικασία, καθώς τα δεδομένα εξετάζονται και ξανά διορθώνονται στην προσπάθεια κατασκευής έγκυρων μοντέλων πρόβλεψης (θετικός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης με βάση το συντελεστή Pearson Coefficient).

Εφαρμογή Περιορισμών	Πλήθος Δεδομένων	
	At Port	Open Sea
State		
Προ εκκαθάρισης	324	1,183
Μετά εκκαθάρισης	225	68

Πίνακας 13: Μείωση πλήθους δεδομένων μελέτης

[This page intentionally left blank]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης

4.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στη Στατιστική, η γραμμική παλινδρόμηση είναι μια μέθοδος για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ μιας βαθμωτής εξαρτημένης μεταβλητής y , όπου αποτελεί την απόκριση του συστήματος και μιας ή περισσότερων επεξηγηματικών μεταβλητών (ή ανεξάρτητων μεταβλητών) x , που αποτελούν τους δείκτες πρόβλεψης. Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει προσπάθεια ώστε να παρουσιαστούν δύο μοντέλα πρόβλεψης της εξάρτησης της κατανάλωσης καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών (απόκριση), λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες παραμέτρους που σχετίζονται με την ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται, και συγκεκριμένα το ηλεκτρικό φορτίο, του αριθμού των κιβωτίων ψυγείων και του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών (δείκτες πρόβλεψης).

Το μοντέλο που επιλέγεται είναι πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης λόγω της απλότητας αυτού και των καθαρών ερμηνειών που παράγει κατά τη σύζευξη των μεταβλητών. Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα έχουν προκύψει στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, έπειτα από αρκετούς κύκλους εκκαθάρισης.

4.2 Υπολογισμός Μοντέλων

4.2.1 Πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης

Το μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που συσχετίζει μια μεταβλητή y με p x μεταβλητές, έχει τη μορφή:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_p x_{i,p} + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

όπου:

- ❖ y_i : η i -οστή τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y ,
- ❖ $x_{i,j}$: η i -οστή τιμή της j -οστής ανεξάρτητης μεταβλητής x_j ,
- ❖ β_0 : τεταγμένη (intercept) της παλινδρόμησης,
- ❖ β_j : κλίση (slope) της παλινδρόμησης,
- ❖ ε_j : ανεξάρτητη τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή

Είναι φανερό ότι το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής y και των ανεξάρτητων τιμών πρόβλεψης x . Η τεταγμένη β_0 , είναι ένας όρος που αντιπροσωπεύει τη μέση απόκριση του συστήματος όταν όλες η ανεξάρτητες μεταβλητές είναι ίσες με μηδέν. Κάθε ένας από τους συντελεστές β εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της απόκρισης του συστήματος και ρυθμίζει τη μεταβολή ανά μονάδα αύξησης στην εκάστοτε τιμή x όταν όλες οι άλλες τιμές παραμένουν σταθερές.

Η τελευταία σχέση μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{i,1} + b_2 x_{i,2} + \dots + b_p x_{i,p} \quad (4.2)$$

όπου:

- ❖ \hat{y}_i : η τιμή πρόβλεψης του i-οστού σημείου των εξαρτημένων δεδομένων,
- ❖ $x_{i,j}$: η i-οστή τιμή της j-οστής ανεξάρτητης μεταβλητής x_j ,
- ❖ b_j : οι δειγματολογικές εκτιμήσεις των συντελεστών β_j .

Έστω το σύστημα δύο μεταβλητών πρόβλεψης ενός μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης. Το μοντέλο έχει τη μορφή:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \varepsilon_i \quad (4.3)$$

Σε μορφή μητρώου γράφεται ως εξής:

$$Y = X B + E \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{i,1} & x_{i,2} \\ 1 & x_{i+1,1} & x_{i+1,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

με $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$ όπου X είναι ο πίνακας σχεδιασμού (μητρώο ανεξάρτητων μεταβλητών) και Y είναι το μητρώο της παρατηρούμενης εξαρτημένης μεταβλητής.

Το υπολειπόμενο σφάλμα, με άλλα λόγια η διαφορά ανάμεσα στην εξαρτημένη μεταβλητή και την προβλεπόμενη, μπορεί να υπολογιστεί για κάθε σετ τιμών ως εξής:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.5)$$

4.2.2 Βασικά χαρακτηριστικά και μεταβλητές

Σε αυτό το σημείο, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά που συνθέτουν τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης καθώς και οι κύριες μεταβλητές οι οποίες τα χαρακτηρίζουν. Με βάση τις μεταβλητές αυτές θα παρουσιαστούν και τα τελικά μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν για τη βεβαίωση της εγκυρότητας των δύο μοντέλων (At Port, Open Sea).

4.2.3 Συντελεστής προσδιορισμού

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι η αναλογία της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής που εξηγείται από την παλινδρόμηση, δηλαδή η ποσότητα της διακύμανσης που μπορεί να εξηγηθεί από τη διακύμανση της απόκρισης των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ο συντελεστής προσδιορισμού, που ονομάζεται επίσης R^2 , αντανακλά την καλή προσαρμογή ενός μοντέλου στη μεταβλητή που σκοπεύει να εξηγήσει. Ουσιαστικά, εξηγεί πόσα από τα υπό μελέτη δεδομένα πέφτουν στην καμπύλη του μοντέλου παλινδρόμησης. Αν παραδείγματος χάριν είναι $R^2 = 90\%$, έχουμε ένα ισχυρό μοντέλο παλινδρόμησης και υποδηλώνει ότι το 90% της διακύμανσης των τιμών y γύρω από τη μέση τιμή, εξηγούνται από τη διακύμανση των τιμών x και επομένως το 90% είναι τοποθετημένο πάνω στην καμπύλη.

Έστω ότι y είναι η εξαρτημένη μεταβλητή και f η προσαρμοσμένη τιμή της υπολογισμένη από το μοντέλο παλινδρόμησης. Εάν \hat{y} είναι η μέση τιμή του y , το R^2 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (4.6)$$

όπου:

- ❖ $SS_{tot} = \sum (y_i - \bar{y})^2$, το σύνολο των τετραγώνων των εξαρτημένων μεταβλητών,
- ❖ $SS_{res} = \sum (y_i - f_i)^2$, το υπόλοιπο σύνολο των τετραγώνων των εξαρτημένων μεταβλητών.

Ο συντελεστής προσδιορισμού (determination coefficient) R^2 κυμαίνεται από 0 έως 1, πράγμα που ερμηνεύεται για το μοντέλο παλινδρόμησης ως εξής:

- ❖ $R^2 = 0 \Rightarrow$ Το μοντέλο προβλέπει πάντα τη μέση τιμή \hat{y} και η έκβαση δεν μπορεί να προβλεφθεί από καμία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές,
- ❖ $R^2 = 1 \Rightarrow$ Το μοντέλο πάντα προβλέπει την τιμή y_i και δεν υπάρχουν υπόλοιπα, ενώ το αποτέλεσμα μπορεί να προβλεφθεί από τις ανεξάρτητες μεταβλητές χωρίς σφάλμα.

Όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών πρόβλεψης στο μοντέλο, τόσο περισσότερο η τιμή του R^2 τείνει στη μονάδα. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι το αποτέλεσμα πιθανόν να κρίνεται από χαμηλότερη ακρίβεια, παρά την αύξηση του R^2 . Εισάγοντας πολλές μεταβλητές πρόβλεψης στο μοντέλο, αυτό γίνεται υπερβολικά προσαρμοσμένο για να ταιριάζει στην απόκριση, γεγονός που οδηγεί σε ευαισθησία σε τυχαία αλλαγή του δείγματος. Η υπερβολική προσαρμοστικότητα αποτελεί πρόβλημα στη γραμμική παλινδρόμηση.

Ενίοτε χρησιμοποιείται ένα προσαρμοσμένο R^2 ώστε να συμπεριληφθεί η αύξηση του συντελεστή προσδιορισμού όταν προστίθενται επιπλέον προγνωστικοί παράγοντες στο μοντέλο. Για ένα μοντέλο με n σημεία δεδομένων και p ανεξάρτητες μεταβλητές, το προσαρμοσμένο R^2 δίνεται από τη σχέση:

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad (4.7)$$

όπου:

- ❖ p : οι ανεξάρτητες μεταβλητές,
- ❖ n : ο συνολικός αριθμός των δεδομένων

4.2.4 Πολυσυγγραμικότητα

Σε ένα ιδανικό πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχετίζονται με την εξαρτημένη αλλά όχι μεταξύ τους. Πρακτικά, αυτό δεν συμβαίνει καθώς σε κάποιο βαθμό οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχετίζονται και μεταξύ τους. Υπάρχει πολυσυγγραμικότητα όταν μια από τις ανεξάρτητες μεταβλητές προκύπτει γραμμικά από τις υπόλοιπες, με σημαντική ακρίβεια. Η παρουσία της γραμμικότητας προκαλεί την άτακτη μεταβολή των συντελεστών του μοντέλου ανταποκρινόμενη σε μικρή αλλαγή των δεδομένων. Μολονότι αυτό δε μειώνει την αξιοπιστία του μοντέλου στο υπό μελέτη σετ δεδομένων, υπάρχει περίπτωση να οδηγήσει σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης το οποίο παράγει μη έγκυρα αποτελέσματα για μεμονωμένες μεταβλητές πρόβλεψης και δεν μπορεί να αναγνωρίσει ποιες μεταβλητές είναι περιττές σε σχέση με άλλες.

4.2.5 Τυπική απόκλιση

Για την ανάλυση παλινδρόμησης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης s , της απόστασης μεταξύ των τιμών των δεδομένων (y) και προσαρμοσμένων τιμών (f) (τυπικό σφάλμα). Το s μετριέται σε μονάδες απόκρισης συστήματος, εν προκειμένω [tons/day].

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.8)$$

όπου: $x = y - f$ και n το πλήθος των τιμών του παραδείγματος.

4.2.6 Τυπικό σφάλμα συντελεστή

Στο μοντέλο παλινδρόμησης, το τυπικό σφάλμα συντελεστή (SE) υπολογίζεται για κάθε μεταβλητή πρόβλεψης x βάση της σχέσης:

$$SE = \frac{s}{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.9)$$

όπου: s είναι το τυπικό σφάλμα του μοντέλου.

Το τυπικό σφάλμα του συντελεστή είναι πάντα θετικό και υπολογίζει τα επίπεδα της ακρίβειας με την οποία το μοντέλο εκτιμά την άγνωστη τιμή του συντελεστή. Όσο μικρότερο είναι το σφάλμα τόσο υψηλότερη ακρίβεια χαρακτηρίζει την εκτίμηση.

4.2.7 T-value

Η τιμή T (T-value) είναι στατιστικό και ορίζεται ως ο λόγος της απομάκρυνσης της εκτιμώμενης τιμής μιας παραμέτρου από την τυπική τιμή προς το τυπικό σφάλμα του. Στα μοντέλα παλινδρόμησης, η τιμή T χρησιμοποιείται για να μετράει για κάθε μεταβλητή, ακόμα και το σταθερό όρο, το λόγο ανάμεσα στο συντελεστή b και το τυπικό σφάλμα (SE).

$$T\text{-value} = \frac{b}{SE} \quad (4.10)$$

4.2.8 F-value

Έστω ότι η μεταβλητή y εκφράζει την εξαρτημένη μεταβλητή και η f παρουσιάζει την προσαρμοσμένη τιμή την οποία προβλέπει το μοντέλο παλινδρόμησης. Η τιμή F του μοντέλου υπολογίζεται ως εξής:

$$F\text{-value} = \frac{SS_{reg}/DF_{reg}}{SS_{res}/DF_{res}} = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{n-p-1}{p} \quad (4.11)$$

όπου:

- ❖ $SS_{reg} = \sum (f_i - \bar{y})^2$: το άθροισμα των τετραγώνων της παλινδρόμησης,
- ❖ $DF_{reg} = p$: οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου παλινδρόμησης και p είναι ο αριθμός των παραγόντων πρόβλεψης του μοντέλου,

- ❖ $SS_{res} = \sum (y_i - f_i)^2$: το υπόλοιπο άθροισμα των τετραγώνων,
- ❖ $DF_{res} = n - 1 - p$: οι βαθμοί ελευθερίας των υπολοίπων (σφάλματος) και n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων.

Η τιμή F υπολογίζεται επίσης για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή ως εξής:

$$F\text{-value} = \frac{SS_{adj,reg}}{SS_{res}/DF_{res}} = \frac{SS_{adj,reg}}{S^2} \quad (4.12)$$

όπου:

- ❖ $SS_{adj,reg}$: το προσαρμοσμένο άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης της ανεξάρτητης μεταβλητής,
- ❖ $SS_{res} = \sum (y_i - f_i)^2$: το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων,
- ❖ $DF_{res} = n - 1 - p$: οι βαθμοί ελευθερίας των υπολοίπων (σφάλματος) και n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων.

Το προσαρμοσμένο άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής έχει ως εξής:

- ❖ Η αντίστοιχη μεταβλητή αφαιρείται από το μοντέλο και σχηματίζεται ένα νέο μοντέλο με τις υπόλοιπες μεταβλητές ως παράγοντες πρόβλεψης,
- ❖ Για το νέο μοντέλο, υπολογίζεται το νέο άθροισμα τετραγώνων για την παλινδρόμηση,
- ❖ Η διαφορά μεταξύ των αθροισμάτων των τετραγώνων της παλινδρόμησης των δύο μοντέλων είναι το προσαρμοσμένο άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης του αφαιρεθέντος παράγοντα πρόβλεψης.

Γίνεται κατανοητό ότι το $SS_{adj,reg}$ ποσοτικοποιεί τη διακύμανση στα δεδομένα απόκρισης που εξηγείται από τον αντίστοιχο όρο του μοντέλου.

4.2.9 P-value

Η τιμή P (P-value) είναι η δεσμευμένη πιθανότητα να αποκτήσει το μοντέλο ως αποτέλεσμα μια τιμή σαν αυτή που έχει υπολογιστεί από το δείγμα, με δεδομένη την ορθότητα της μηδενικής υπόθεσης (ότι δηλαδή δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των σχετιζόμενων παραμέτρων). Μια πολύ μικρή τιμή P , σημαίνει ένα τέτοιο αποτέλεσμα είναι απίθανο υπό την έννοια της μηδενικής υπόθεσης.

Προκειμένου να κριθεί εάν κάθε κύρια επίδραση ή έμμεσα η επίδραση της αλληλεπίδρασης έχει στατιστική σημασία, η τιμή P για κάθε όρο συγκρίνεται με ένα επίπεδο σημασίας α το οποίο συνήθως είναι ίσο με 0.05. Η τιμή του α υποδεικνύει την πιθανότητα που ενέχει η υπόθεση της ύπαρξης ενός αποτελέσματος όταν αυτό δεν υπάρχει. Εάν η τιμή P είναι μεγαλύτερη από την επιλεγμένη τιμή του επιπέδου τότε η επίδραση δεν θεωρείται στατιστικά σημαντική ενώ όταν ισούται με α ή είναι μικρότερη τότε θεωρείται στατιστικά σημαντική.

Η τιμή P του μοντέλου, όπως και κάθε μεταβλητής πρόβλεψης υπολογίζεται με χρήση της τιμής T ακολουθώντας τον παρακάτω τύπο:

$$P\text{-value} = 2(1 - T(x|v)) = 2 \left[1 - \int_{-\infty}^x \frac{\Gamma(\frac{v+1}{2})}{\Gamma(\frac{v}{2})} \frac{1}{\sqrt{v}\pi} \frac{1}{(1 + \frac{t^2}{v})^{\frac{v+1}{2}}} dt \right] \quad (4.13)$$

όπου:

- ❖ $x = T\text{-value}$, η απόλυτη T τιμή του μοντέλου ή της ανεξάρτητης μεταβλητής,
- ❖ $v = n - 1 - p$, οι βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος για μοντέλο με n πλήθος δεδομένων και p μεταβλητές πρόβλεψης,
- ❖ T : η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της T κατανομής,
- ❖ $\Gamma(x) = (x - 1)!$, η συνάρτηση γάμμα.

Εναλλακτικά η τιμή P του μοντέλου αλλά και κάθε μιας από τις μεταβλητές πρόβλεψης υπολογίζεται με τη βοήθεια της τιμής F βάση του παρακάτω τύπου:

$$P\text{-value} = 1 - F(x|v_1, v_2) = 1 - \int_0^x \frac{\Gamma(\frac{v_1+v_2}{2})}{\Gamma(\frac{v_1}{2})\Gamma(\frac{v_2}{2})} \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{v_1/2} \frac{1}{(1 + \frac{v_1}{v_2}t)^{\frac{v_1+v_2}{2}}} dt \quad (4.14)$$

όπου:

- ❖ $x = F\text{-value}$, η απόλυτη τιμή F του μοντέλου ή της ανεξάρτητης μεταβλητής,
- ❖ v_1 : οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου (ίσοι με το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών),
- ❖ $v_2 = n - 1 - p$, οι βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος για μοντέλο με πλήθος n δεδομένων και p μεταβλητών πρόβλεψης,
- ❖ F : η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της F κατανομής,
- ❖ $\Gamma(x) = (x - 1)!$, η συνάρτηση γάμμα

4.3 Σενάρια Πρόβλεψης

4.3.1 Παρουσίαση μοντέλων

Για την ανάπτυξη των μοντέλων θα ληφθούν υπόψη οι δυο καταστάσεις λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών και κατ' επέκταση του πλοίου όπως έχουν διαχωριστεί στις κύριες καταστάσεις "At Port" και "Open Sea". Επομένως, θα υπολογιστούν δύο μοντέλα, ένα για την κάθε κατάσταση λειτουργίας.

Τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη είναι η κατανάλωση καυσίμου (FOC) μετρούμενη σε μονάδες [tons/day] και αποτελεί την απόκριση του συστήματος, το ηλεκτρικό φορτίο των γεννητριών (Electric Load) που μετριέται σε [kW], ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων ψύξης (Reefers) που είναι αδιάστατο μέγεθος και ο συνολικός χρόνος λειτουργίας (Running Time) των μηχανημάτων που αφορά η εργασία ανά ημέρα που μετριέται σε [hours].

Κατά τις πρώτες δοκιμές και προκειμένου να είναι ορθή η επικείμενη ανάλυση, τρεις επιπρόσθετες μετρήσεις μέσω του Minitab® κρίθηκαν ως outliers και αφαιρέθηκαν (ο συγκεντρωτικός πίνακας του προηγούμενου κεφαλαίου περιέχει τις σωστές και διορθωμένες ποσότητες).

1st Model: "At Port" State:

$$FOC = -0.558 + 0.000382 \cdot Electric\ Load + 0.00241 \cdot Reefers + 0.325 \cdot Running\ Time \quad (4.15)$$

Η άνωθι έχει πεδίο ορισμού:

$$\begin{cases} 907 [kW] \leq Electric\ Load \leq 5,607 [kW] \\ 1 \leq Reefers \leq 1,176 \\ 4 [hours] \leq Running\ Time \leq 69 [hours] \end{cases}$$

Όρος	Συντελεστής	T-value	Τιμή P	Τυπικό Σφάλμα
Electric Load	0.000382	2.338	0.0203	0.000163
Reefers	0.00241	3.745	0.000230	0.000643
Running Time	0.324	35.742	8.130 ⁻⁹⁴	0.00908

Πίνακας 14: Στατιστικά ανάλυσης 1^{ου} μοντέλου παλινδρόμησης που αφορούν τις μεταβλητές πρόβλεψης

R ²	R ² _{adj}	Τυπικό Σφάλμα
0.935	0.934	1.074

Πίνακας 15: Συντελεστές προσδιορισμού και τυπικό σφάλμα 1^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Πηγή	Βαθμοί Ελευθερίας	SS	Importance F
Παλινδρόμηση	3	3,668.693	7.956 ⁻¹³¹
Υπόλοιπο	221	255.115	
Σύνολο	224	3,923.807	

Πίνακας 16: Ανάλυση διακύμανσης 1^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

2nd Model: "Open Sea" State:

$$FOC = -4.315 + 0.00172 \cdot Electric\ Load + 0.00658 \cdot Reefers + 0.392 \cdot Running\ Time \quad (4.16)$$

Η άνωθι έχει πεδίο ορισμού:

$$\begin{cases} 1,018 [kW] \leq Electric\ Load \leq 1,947 [kW] \\ 1 \leq Reefers \leq 127 \\ 14.9 [hours] \leq Running\ Time \leq 25.5 [hours] \end{cases}$$

Όρος	Συντελεστής	T-value	Τιμή P	Τυπικό Σφάλμα
Electric Load	0.00172	4.980	5.0936 ⁻⁶	0.000345
Reefers	0.00658	3.904	0.000230	0.00169
Running Time	0.392	14.772	2.697 ⁻²²	0.0265

Πίνακας 17: Στατιστικά ανάλυσης 2^{ου} μοντέλου παλινδρόμησης που αφορούν τις μεταβλητές πρόβλεψης

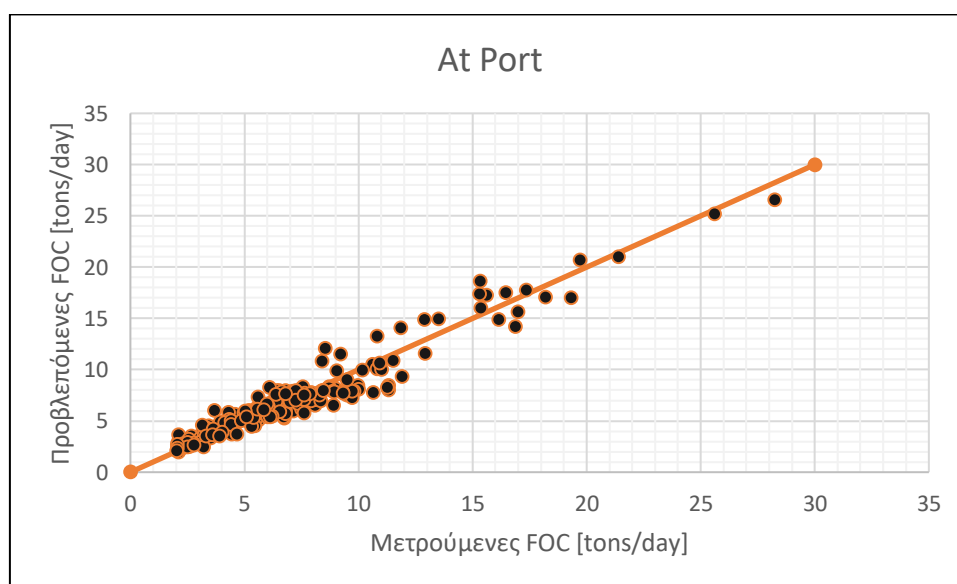
R^2	R^2_{adj}	Τυπικό Σφάλμα
0.801	0.792	0.397

Πίνακας 18: Συντελεστής προσδιορισμού και τυπικό σφάλμα 2^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

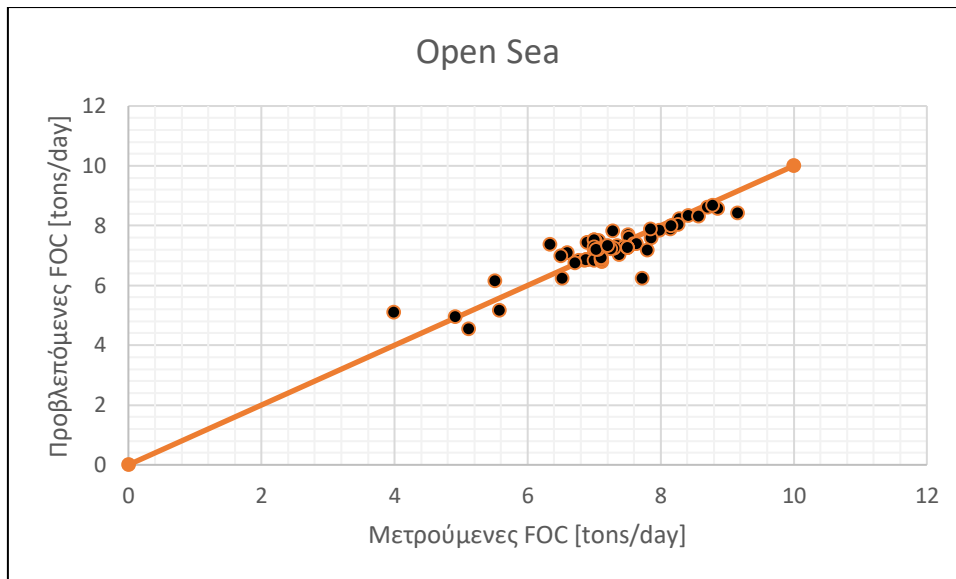
Πηγή	Βαθμοί Ελευθερίας	SS	Importance F
Παλινδρόμηση	3	40.745	1.995 ⁻²²
Υπόλοιπο	64	10.098	
Σύνολο	67	50.843	

Πίνακας 19: Ανάλυση διακύμανσης 2^{ου} μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Ακολουθεί γραφική αναπαράσταση της εφαρμογής του επιλεγμένου μοντέλου για κάθε κατάσταση (At Port και Open Sea). Για λόγους υψηλότερης ευκρίνειας της εφαρμογής του μοντέλου, στα διαγράμματα συμπεριλαμβάνεται και η ευθεία $y = x$ με πορτοκαλί χρώμα, ενώ τα σημεία επισημαίνονται με πορτοκαλί περίγραμμα και μαύρο γέμισμα.



Διάγραμμα 23: Μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές κατανάλωσης σύμφωνα με το 1^ο μοντέλο παλινδρόμησης, κατάσταση at port



Διάγραμμα 24: Μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές κατανάλωσης σύμφωνα με το 2^ο μοντέλο παλινδρόμησης, κατάστασης open sea

Στα διαγράμματα της κατανομής των σημείων των μοντέλων παλινδρόμησης στο άξονα x βρίσκονται η μετρούμενες τιμές κατανάλωσης και στον άξονα y, οι προβλεπόμενες τιμές κατανάλωσης.

Στο μοντέλο που περιγράφει την κατάσταση λειτουργίας του πλοίου επί του λιμένα παρατηρούμε (Διάγραμμα 23) μια καλή απόδοση του μοντέλου. Στην περίπτωση του δεύτερου μοντέλου (Διάγραμμα 24) η απόδοση είναι σχετικά καλή.

Οι εξισώσεις και τα στατιστικά και για τα δύο μοντέλα επιβεβαιώθηκαν και προέκυψαν ίδια και με το στατιστικό πακέτο Minitab®, το οποίο αναπτύχθηκε στο “University of Pennsylvania (B. Ryan, 1972)”.

Προκαταρκτική σύγκριση ακρίβειας μοντέλων:

Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί σύγκριση της ακρίβειας των δύο μοντέλων αρχικά σε προκαταρκτικό επίπεδο.

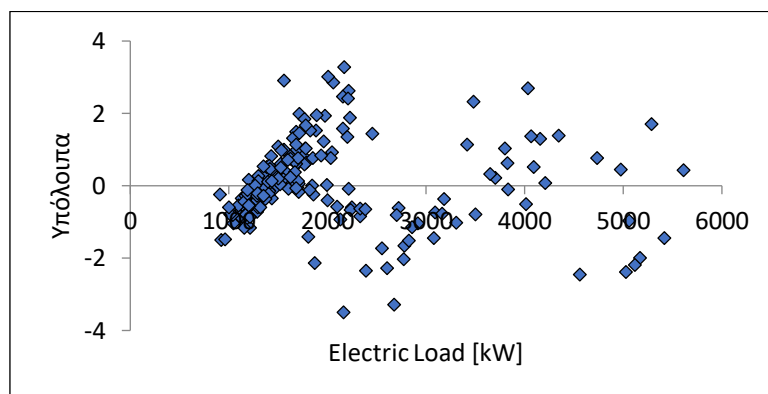
- ❖ Για τη σύνθεση του πρώτου μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ένα περισσότερο αντιπροσωπευτικό δείγμα δεδομένων σε σχέση με το δεύτερο μοντέλο.
- ❖ Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα παρατηρούμε ότι το πρώτο έχει μεγαλύτερο R^2 και R^2_{adj} σε σχέση με το δεύτερο, πράγμα που υποδεικνύει καλύτερο fitting στα δεδομένα.
- ❖ Εξετάζοντας τις εξισώσεις που περιγράφουν την πρόβλεψη του FOC, στις δύο περιπτώσεις δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές στο μέγεθος των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών.
- ❖ Η διακύμανση και των δύο μοντέλων φαίνεται να μην έχει ιδιαίτερες αυξομειώσεις δηλαδή τα μοντέλα δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο που ονομάζεται ετεροσκεδαστικότητα (ή θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι υπάρχει σε χαμηλά επίπεδα) όπου θα μπορούσε να μεταφραστεί ως μη αποδεκτό αποτέλεσμα. Μια ακόμη

ένδειξη προβληματικού μοντέλου είναι η ύπαρξη αυτοσυσχέτισης, που όμως δεν φαίνεται να υπάρχει έντονα στην προκειμένη περίπτωση, διότι ενώ βλέποντας στα διαγράμματα υπολοίπων ένα ήπια συστηματικό μοτίβο συγκέντρωσης σημείων γύρω από συγκεκριμένα εύρη τιμών δεν υπάρχει μοτίβο στη σειρά παρουσίασης των παρατηρήσεων (τα διαγράμματα υπολοίπων παρουσιάζονται παρακάτω).

- ❖ Πολύ μικρότερη τιμή σημαντικότητας F έχει το πρώτο μοντέλο που σημαίνει μικρότερη πιθανότητα μη έγκυρου μοντέλου.
- ❖ Το πρώτο μοντέλο ακόμη παρουσιάζει μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα από ότι το δεύτερο μοντέλο, παρά του μεγαλύτερου δείγματος τιμών, παρέχοντας καλύτερη ακρίβεια.

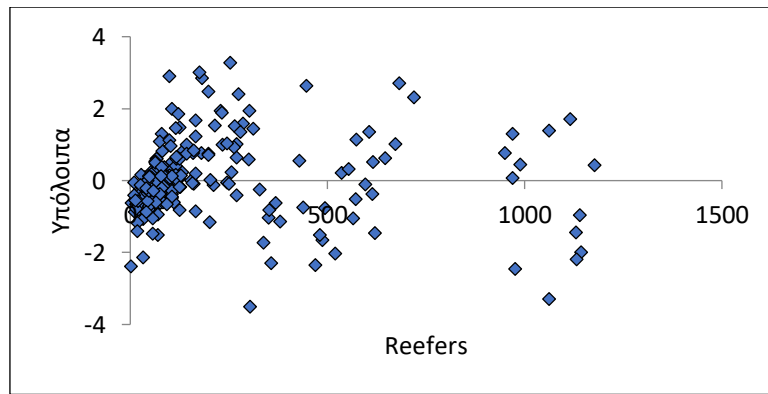
Παρακάτω δίδονται τα διαγράμματα υπολοίπων με σκοπό να δικαιολογηθούν οι παραπάνω ισχυρισμοί σύμφωνα με τους οποίους δεν υπάρχει έντονη ετεροσκεδαστικότητα και αυτοσυσχέτιση.

1st Model: "At Port" State:



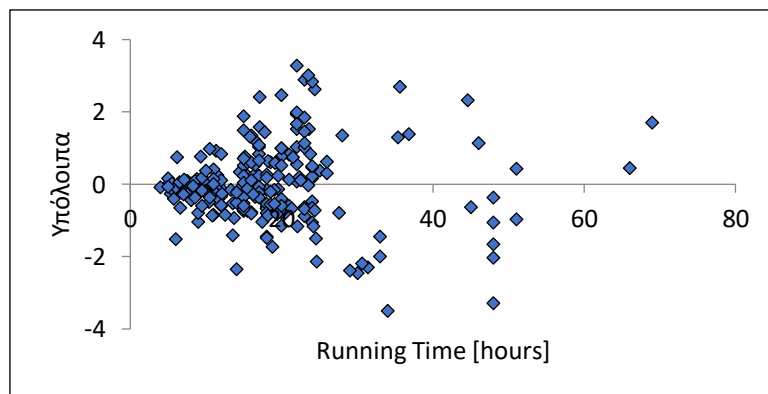
Διάγραμμα 25: Electric Load - διάγραμμα υπολοίπων, 1st model

Στο διάγραμμα 25 παρατηρείται συγκέντρωση σημείων σε ένα πολύ μεγάλο εύρος, δηλαδή στο [1000, 2000] και όχι ιδιαίτερη αυξομείωση διακύμανσης. Αυτά τα στοιχεία δεν υποδεικνύουν πρόβλημα.



Διάγραμμα 26: Reefers - διάγραμμα υπολοίπων, 1st model

Στο διάγραμμα 26 τα σημεία κατανέμονται σε ένα μεγάλο εύρος με μια υψηλότερη τάση συγκέντρωσης στο $[0, 100]$, που όμως δεν αποτελεί ζήτημα, διότι δεν παρατηρούνται μεγάλες αυξομειώσεις ή κάποιο μοτίβο συγκέντρωσης σημείων μονάχα σε κάποιο εύρος τιμών.

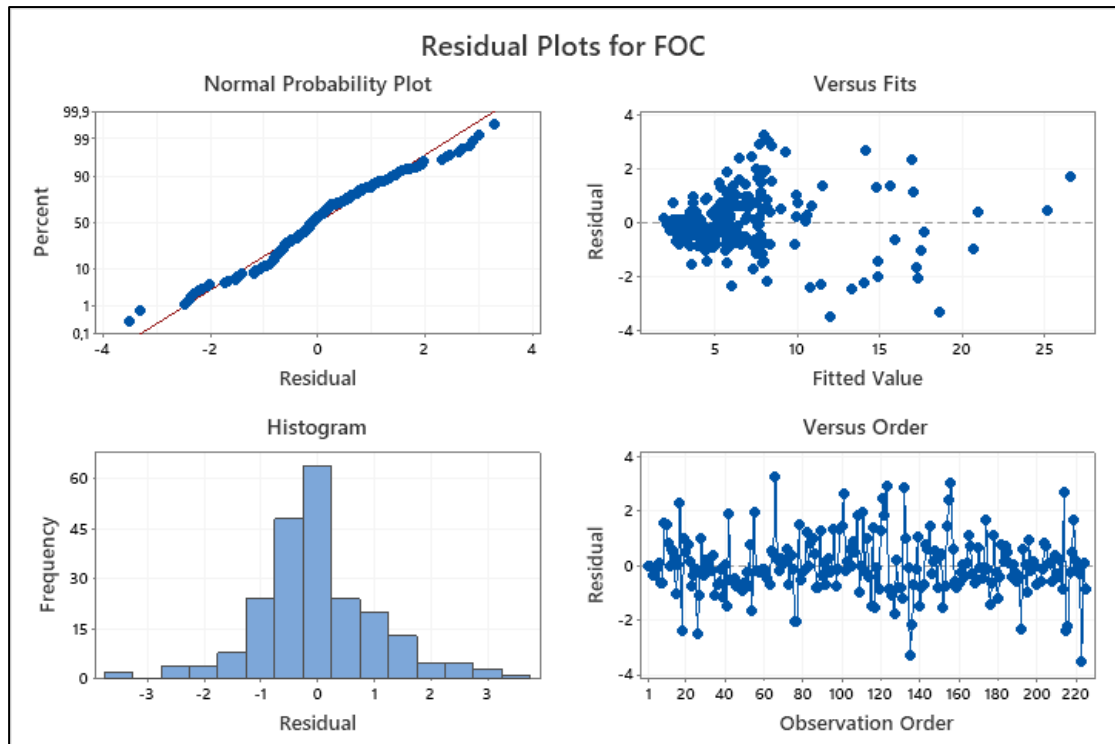


Διάγραμμα 27: Running Time - διάγραμμα υπολοίπων, 1st model

Στο διάγραμμα 27 παρομοίως δεν υπάρχει έντονο μοτίβο παρουσίασης των σημείων που να αποτελεί σημαντική αντίρρηση ως προς την ακρίβεια του μοντέλου.

Για να αποφασιστεί αν υπάρχει ετεροσκεδαστικότητα, δεν μπορεί κάποιος να βασιστεί μόνο στην υπόθεση ότι μια αναλογία των αποτελεσμάτων βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος και μέσω της παρατήρησης της διακύμανσης. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν διαγνωστικά εργαλεία και στατιστικές δοκιμές για να καθοριστεί η παρουσία ή μη του φαινομένου στην προκειμένη ανάλυση.

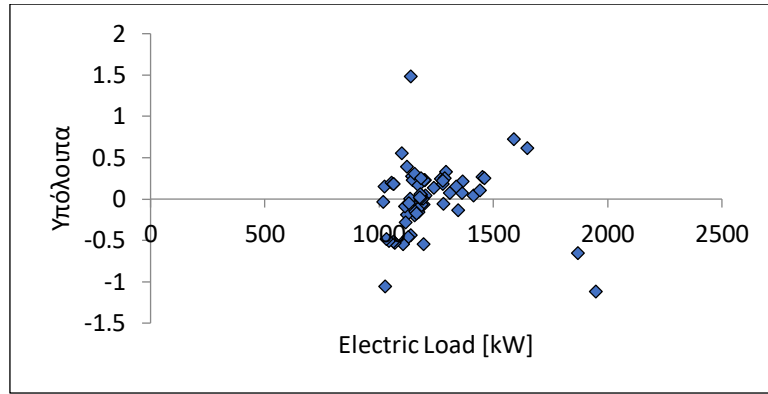
Οι στατιστικές δοκιμές υλοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού Minitab® και σχολιάζονται στη συνέχεια του παρακάτω διαγράμματος (Ομάδα διαγραμμάτων 1).



Ομάδα διαγραμμάτων 1: Διαγράμματα υπολοίπων απόκρισης, κατάστασης at port, από Minitab®

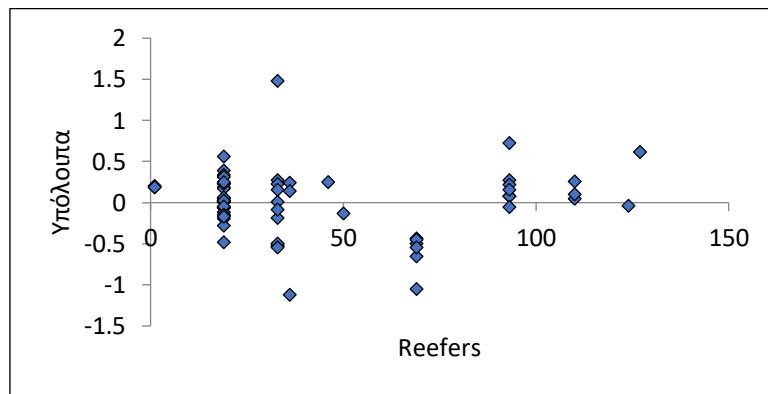
Στην ομάδα διαγραμμάτων 1, ενώ φαίνεται ότι υπάρχει μια τάση συγκέντρωσης σε περιορισμένο εύρος τιμών στο διάγραμμα Versus Fits, βλέποντας το Versus Order γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχει μοτίβο παρουσίασης στη σειρά των παρατηρήσεων. Στο άνω και αριστερά διάγραμμα (Normal Probability Plot) φαίνονται τα σημεία που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Και στο διάγραμμα κάτω και αριστερά (Histogram) φαίνεται η κατανομή των υπολοίπων να τείνει προς την κανονική κατανομή.

2nd Model: "Open Sea" State:



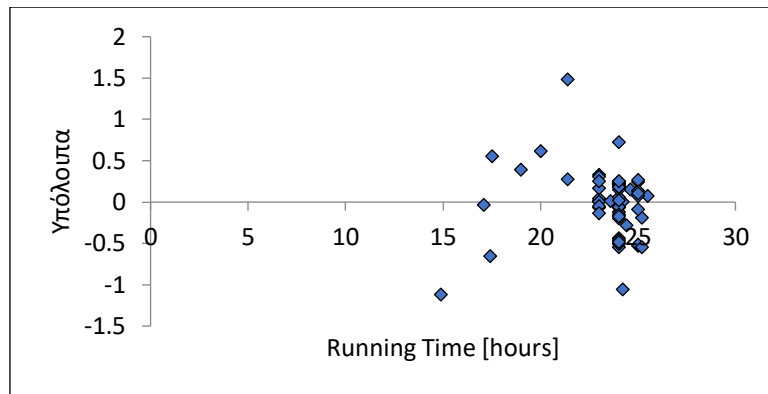
Διάγραμμα 28: Electric Load - διάγραμμα υπολοίπων, 2nd model

Στο διάγραμμα 28, δεν υπάρχει μεγάλη τάση συγκέντρωσης σε κάποιο στενό εύρος (συγκέντρωση στο ευρύ διάστημα [1000, 1500]), ούτε έντονες αυξομειώσεις διακύμανσης.



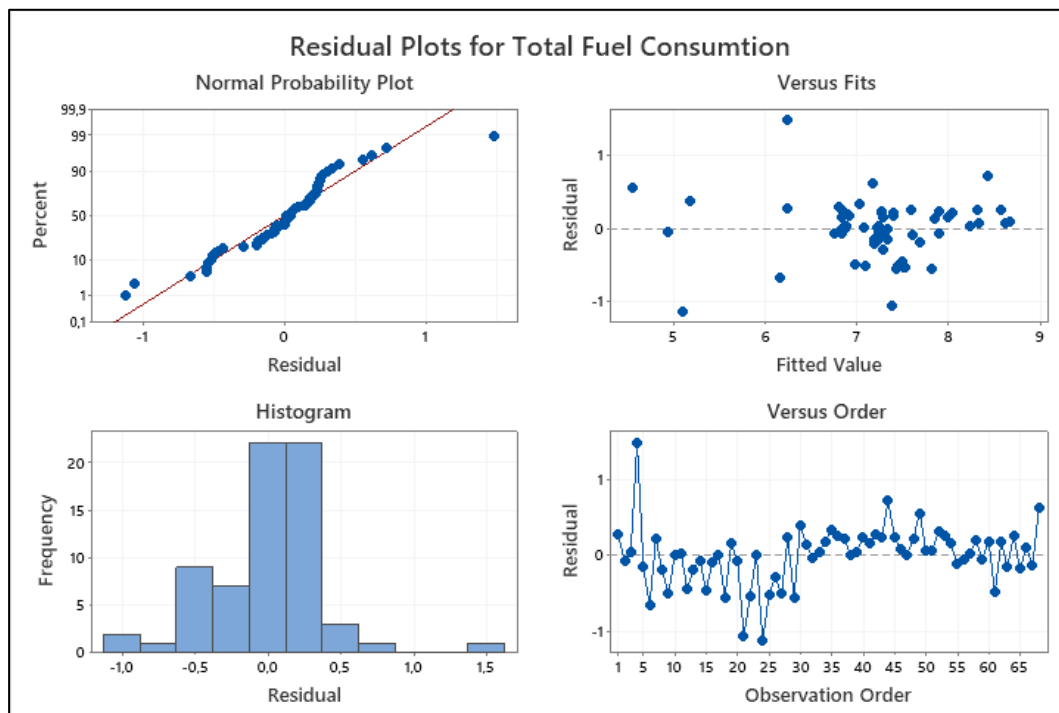
Διάγραμμα 29: Reefers - διάγραμμα υπολοίπων, 2nd model

Στο διάγραμμα 29 παρομοίως δεν υπάρχει έντονη συστάδα σημείων σε συγκεκριμένο εύρος του αριθμού των Reefers. Φαίνεται να σχηματίζεται κάποιο μοτίβο στον τρόπο παρουσίασης των σημείων, που όμως δεν θα μπορούσε να θεωρηθεί πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό.



Διάγραμμα 30: Running Time - διάγραμμα υπολοίπων, 2nd model

Στο διάγραμμα 30 δεν υπάρχει πολύ έντονη συστάδα σημείων σε συγκεκριμένο εύρος του αριθμού Reefers, ενώ δεν παρατηρούνται μεγάλες αυξομειώσεις διακύμανσης. Δεν υπάρχει ανεπάρκεια ακρίβειας στη συγκεκριμένη περίπτωση.



Ομάδα διαγραμμάτων 2: Διαγράμματα υπολοίπων απόκρισης, κατάστασης open sea, από Minitab®

Οι ενδείξεις υποδεικνύουν ότι το δεύτερο μοντέλο δεν πρόκειται για προβληματικό μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Ομάδα διαγραμμάτων 2), παρατηρώντας τα διαγράμματα Versus Fits και Versus Order, όπως στην περίπτωση της ομάδας διαγραμμάτων 1.

4.3.2 Πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου για διάφορα σενάρια

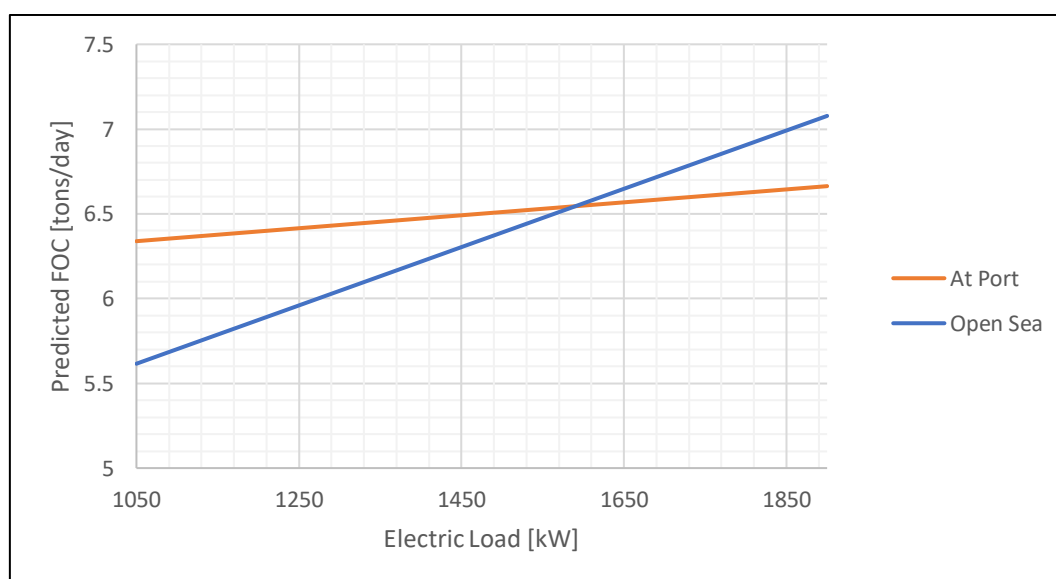
Είναι φανερό ότι στη σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης, το πρώτο, δηλαδή το μοντέλο που αναφέρεται στην κατάσταση at port, είναι ακριβέστερο και εν γένει καλύτερο σε όλα τα σημεία της σύγκρισης. Όμως και τα δύο μοντέλα είναι έγκυρα και θα συγκριθούν ως προς τη βέλτιστη λειτουργία. Είναι αναγκαίο να παρουσιαστούν διαγραμματικά πληροφορίες για μια πληθώρα καταστάσεων όπου θα συγκρίνονται τα δύο μοντέλα και με αυτό τον τρόπο θα υπάρξει πιο σαφής εικόνα για αυτό που φέρει την ελάχιστη κατανάλωση.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν από κοινού διαγράμματα για τις δύο καταστάσεις, όπου θα μεταβάλλεται κάθε φορά μια από τις τρεις παραμέτρους του προβλήματος, ενώ οι άλλες δύο θα παραμένουν σταθερές. Επιπλέον, θα αποσαφηνιστούν οι διαφορές των καταστάσεων. Με τη συγκεκριμένη προσέγγιση γίνεται περισσότερο κατανοητός ο τρόπος που μια παράμετρος επηρεάζει την προβλεπόμενη FOC σε κάθε περίπτωση.

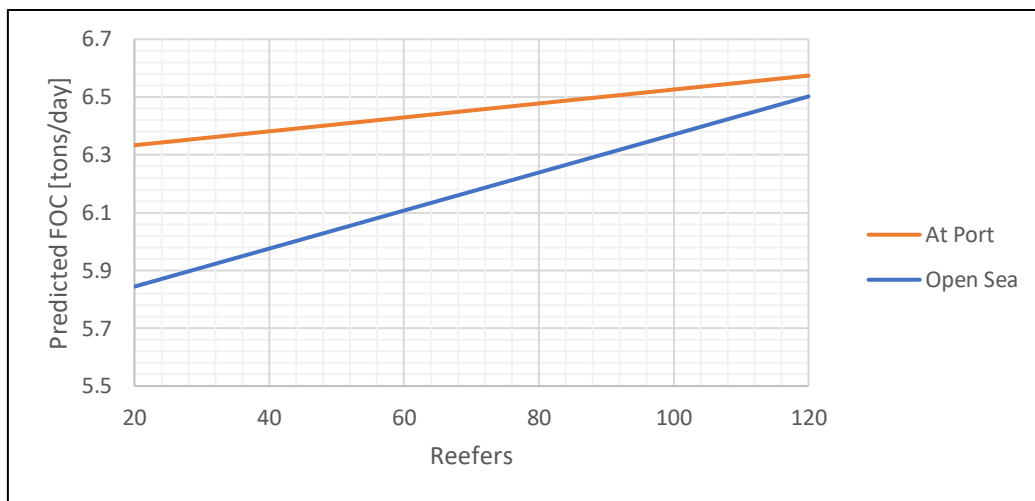
Σε πρώτη φάση, στις παρακάτω απεικονίσεις των σχέσεων των μεταβλητών επιλέγονται ως τιμές σύγκρισης των μεταβλητών οι διάμεσες του συνολικού εκκαθαρισμένου σετ δεδομένων καθώς παρέχουν ένα κεντρικό σημείο για τη σύγκριση. Σε επόμενη φάση, θα ακολουθήσουν περαιτέρω συγκρίσεις με επιπρόσθετες πληροφορίες για ένα εύρος καταστάσεων. Οι διάμεσες τιμές για τις τρεις παραμέτρους υπολογίζονται μέσω εντολής του Microsoft Excel® και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Διάμεσος
Electric Load [kW]	1,408.6
Reefers	79
Running Time [hours]	19.4

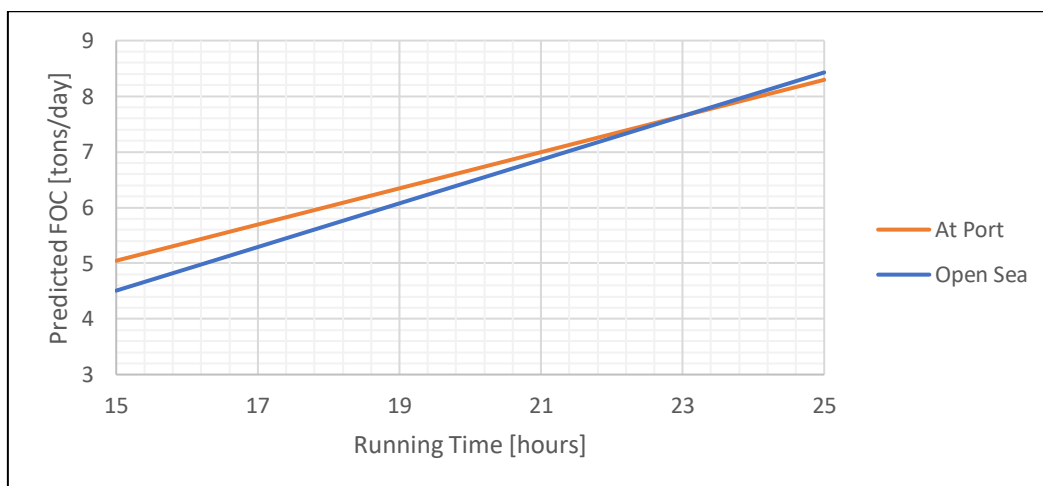
Πίνακας 20: Διάμεσοι παραμέτρων από συνολικό σετ δεδομένων πρόβλεψης



Διάγραμμα 31: Προβλεπόμενη κατανάλωση σε σχέση με Running Time για τις δύο καταστάσεις, με Reefers = 79 και Running Time = 19.4 [hours]



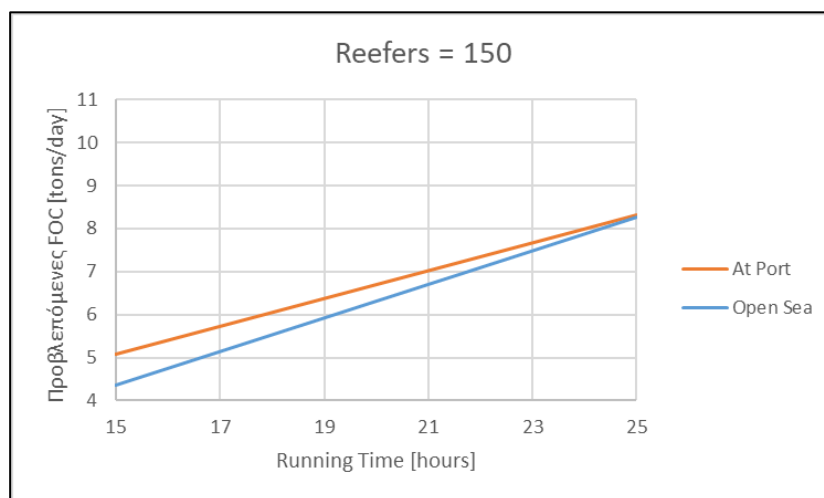
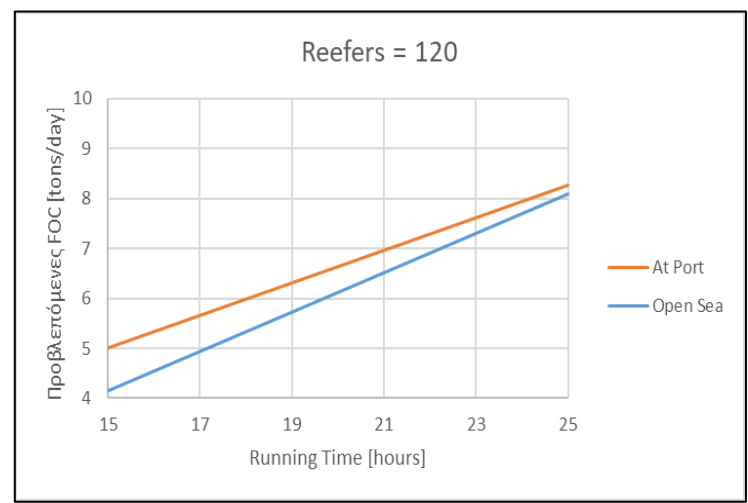
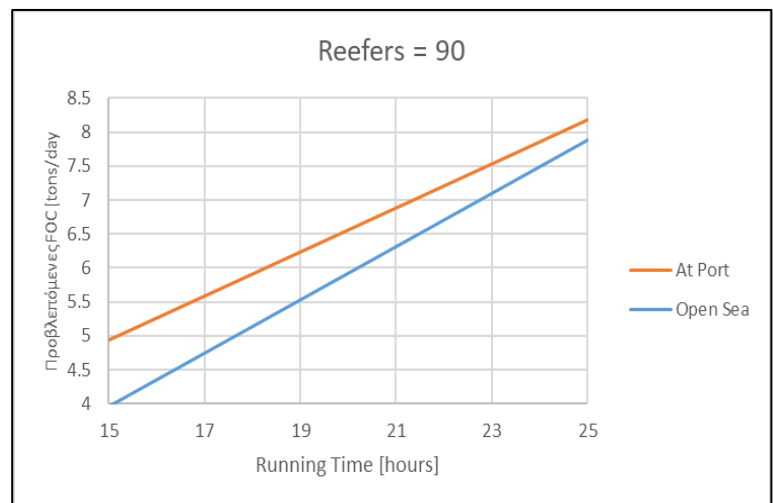
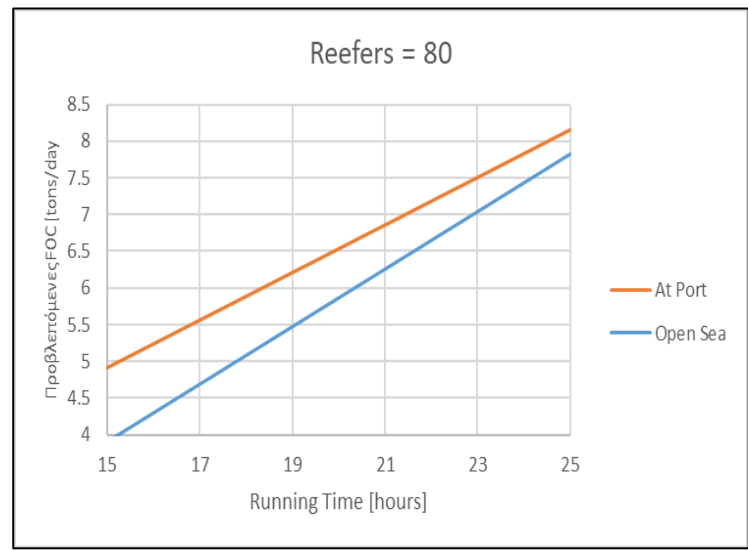
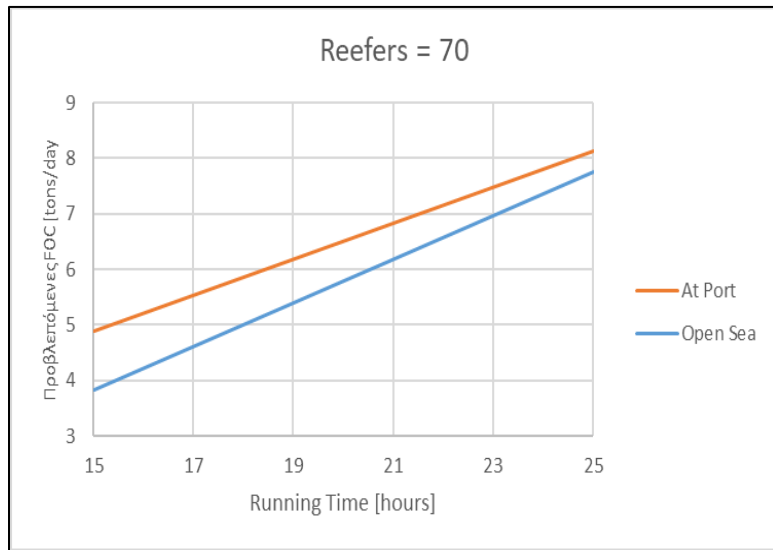
Διάγραμμα 32: Προβλεπόμενη κατανάλωση σε σχέση με Reefers για τις δύο καταστάσεις, με Electric Load = 1408.6 [kW] και Running Time = 19.4 [hours]



Διάγραμμα 33: Μεταβολή προβλεπόμενης FOC σε σχέση με Electric Load για τις δύο καταστάσεις, με Electric Load = 1408.6 [kW] και Reefers = 79

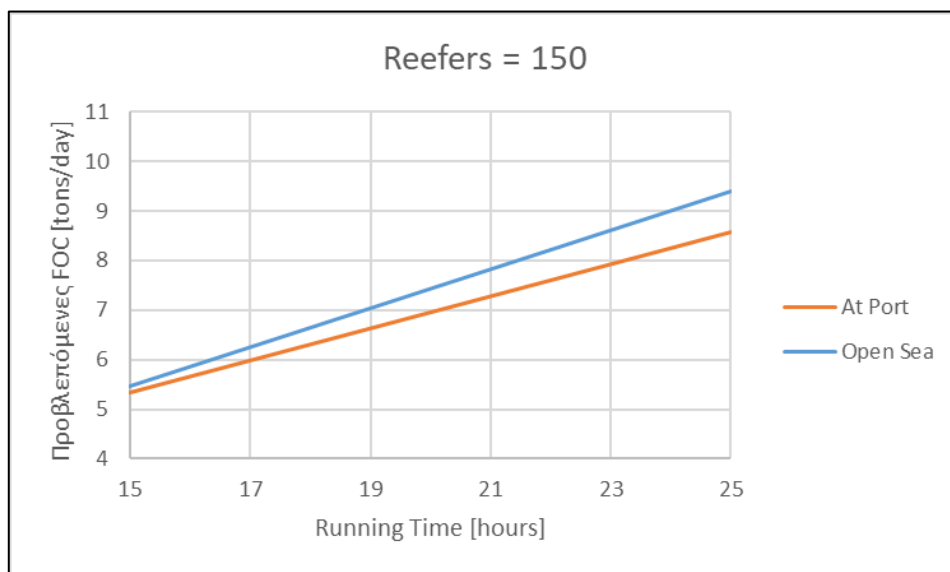
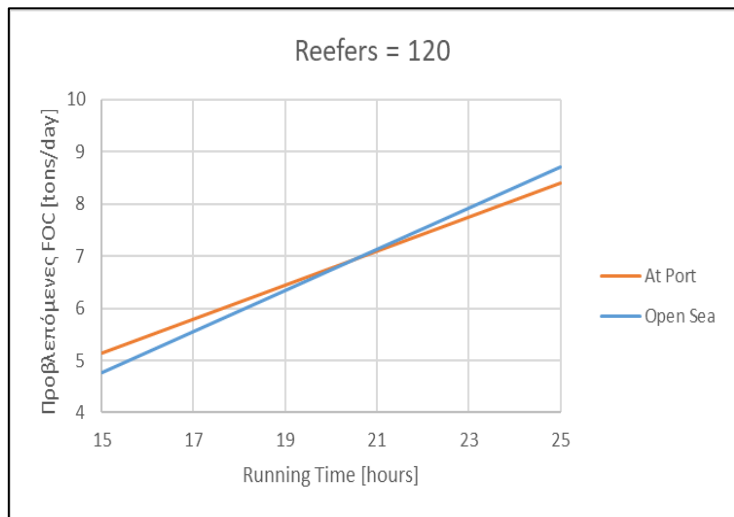
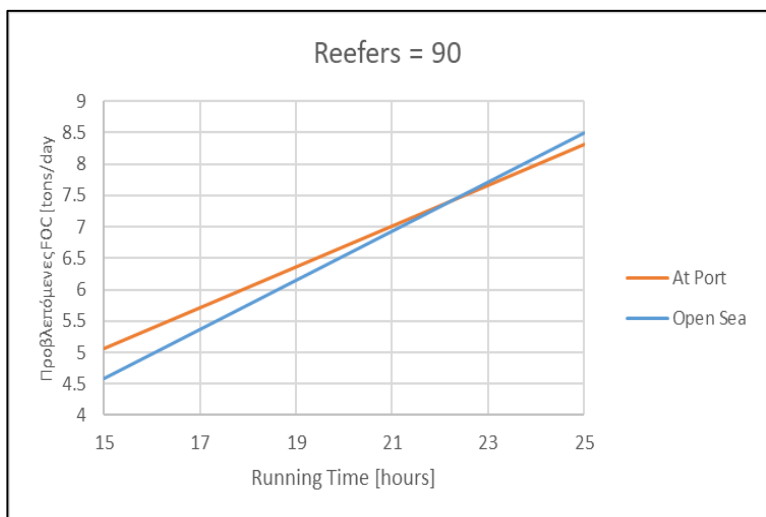
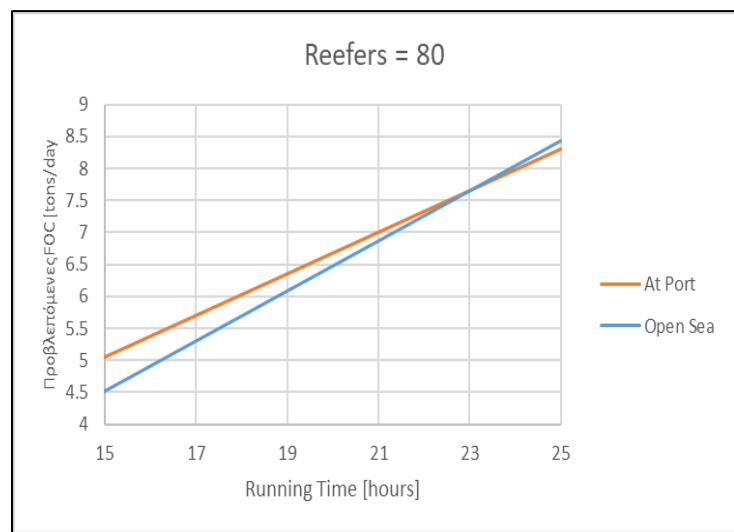
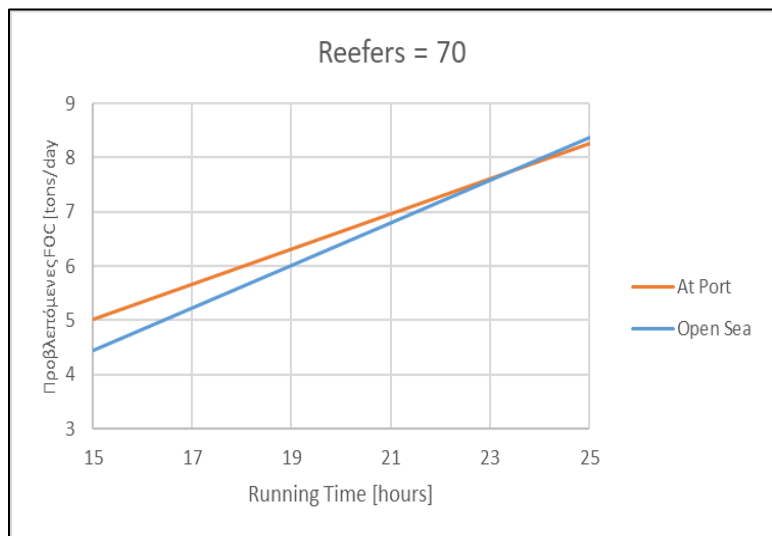
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι συγκρίσεις για μια πληθώρα συνδυασμού δεδομένων, προκειμένου να είναι δυνατή η κατανόηση της επίδρασης των μεταβλητών πρόβλεψης στη συνολική κατανάλωση ανά κατάσταση λειτουργίας. Για τρία σενάρια ηλεκτρικής ισχύος (Electric Load) γύρω από τη διάμεσο τιμή που εμπίπτουν στην τομή των πεδίων ορισμού των δύο καταστάσεων και ταυτόχρονα αντιπροσωπεύουν το σημαντικότερο πλήθος τιμών ηλεκτρικής ισχύος, παρουσιάζονται πέντε υποπεριπτώσεις φόρτωσης του πλοίου με συγκεκριμένους αριθμούς εμπορευματοκιβωτίων ψυγείων. Στον άξονα x θα υπάρχει η μεταβλητή Running Time (όπου εμφανίζει το μεγαλύτερο συντελεστή Pearson με τη FOC, από το δεύτερο κεφάλαιο) με πεδίο ορισμού [10, 50] σε [hours], ενώ στον άξονα y, η προβλεπόμενες FOC σε [tons/day].

Electric Load = 1,050 [kW]:



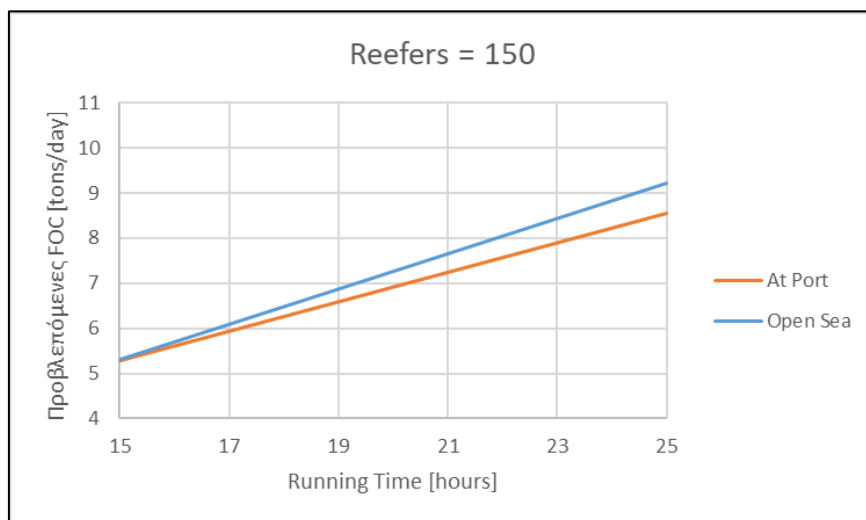
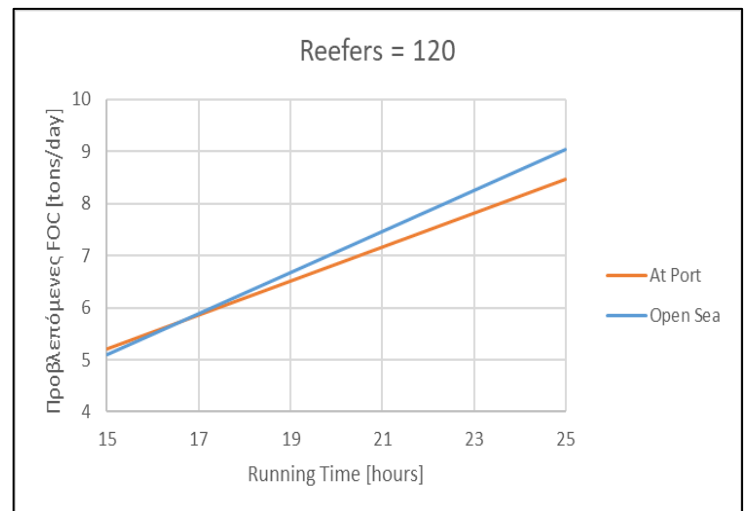
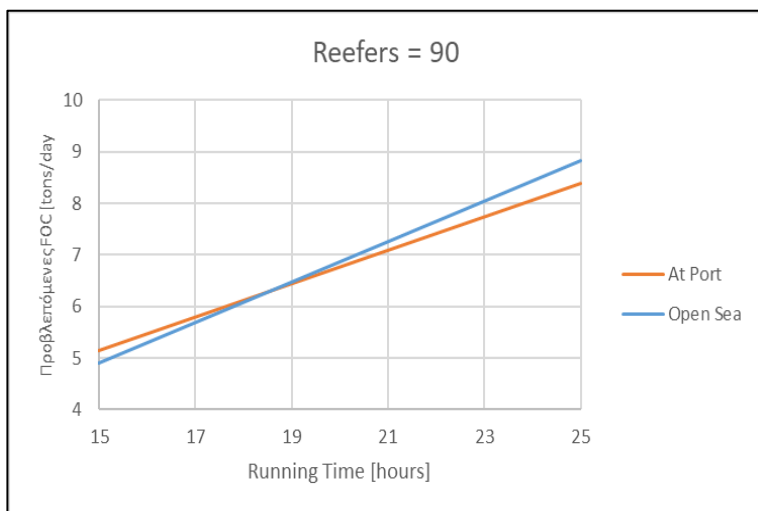
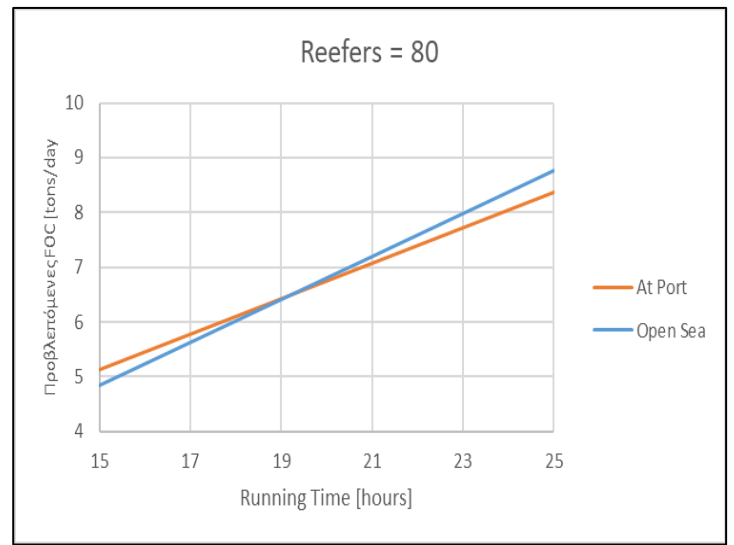
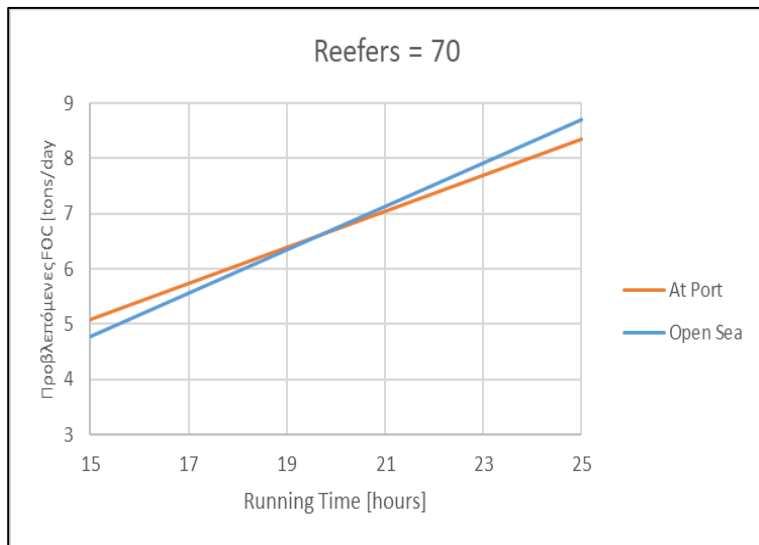
Ομάδα διαγραμμάτων 3: Καταστάσεις για 1,050 [kW]

Electric Load = 1,408.6 [kW]:



Ομάδα διαγραμμάτων 4: Καταστάσεις για 1,454.5 [kW]

Electric Load = 1,600 [kW]:



Ομάδα διαγραμμάτων 5: Καταστάσεις για 1,700 [kW]

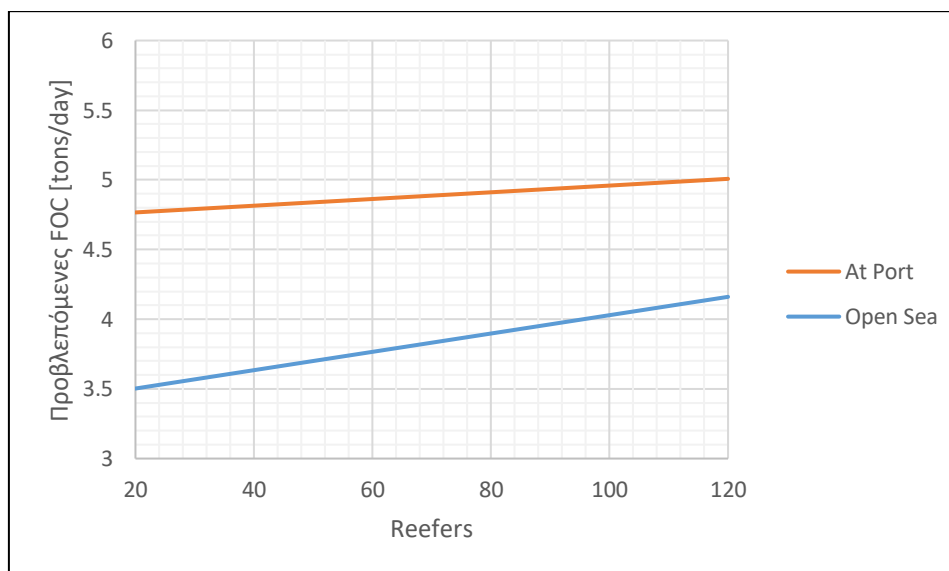
Στα διαγράμματα παρατηρείται μια μικρή αύξηση της κλίσης αυξάνοντας την ηλεκτρική ισχύ. Η αύξηση αυτή συμβαίνει για όλες τις περιπτώσεις πλήθους των Reefers με αύξηση των προβλεπόμενων FOC για την κατάσταση open sea από ένα σημείο ισχύος και άνω.

Στη συνέχεια και σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, θα ακολουθήσουν διαγράμματα για τρεις μεμονωμένες τιμές όσον αφορά τη Running Time και για τρεις τιμές της Electric Load, ενώ τα Reefers θα κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η εξέταση ενός νέου συνδυασμού παραμέτρων. Όλες οι τιμές των παραμέτρων θα βρίσκονται και πάλι εντός του κοινού πεδίου ορισμού των δύο μοντέλων. Οι διακριτές τιμές που θα εξεταστούν όσον αφορά το συνολικό χρόνο λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών ανά ημέρα είναι οι 15 [hours], 20 [hours] και 25 [hours].

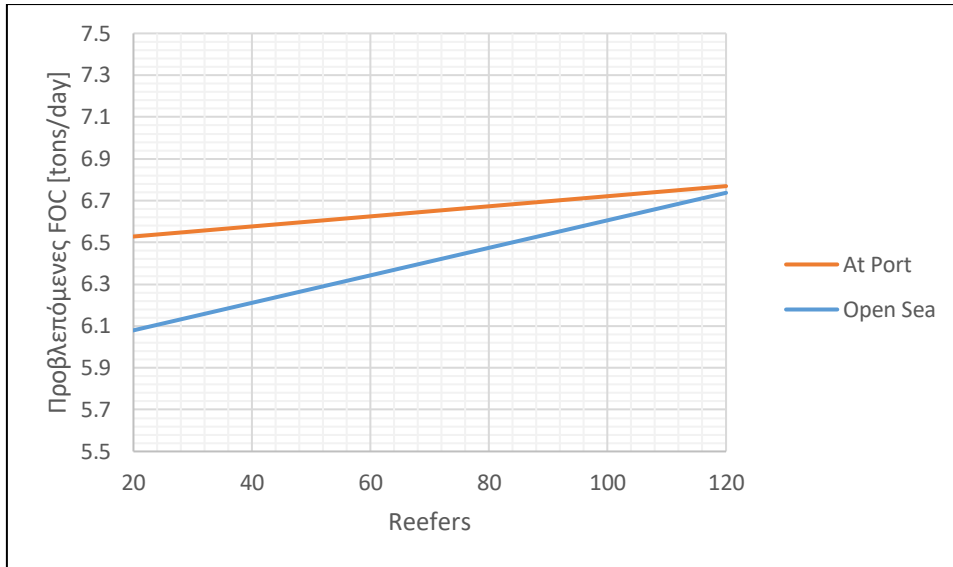
Οι διαφορές του παρακάτω σεναρίου(Διάγραμμα 34), με αυτό του “Διαγράμματος 32” είναι ότι αναφέρεται σε διαφορετικό πεδίο ορισμού και οι τιμές του χρονικού διαστήματος λειτουργίας, είναι υψηλότερες. Ουσιαστικά στις δύο περιπτώσεις, γίνεται μια διερεύνηση κοντινών καταστάσεων λειτουργίας των μηχανημάτων.

Παράμετρος	Τιμή		
Running Time [hours]	15	20	25
Electric Load [kW]	1,050	1,408.6	1,700
Reefers	1 ≤ Reefers ≤ 127		

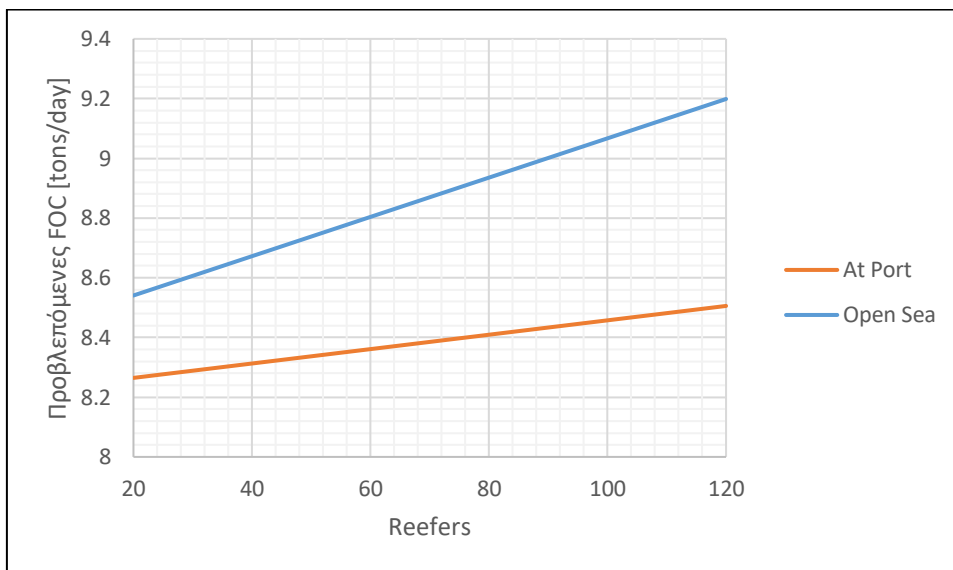
Πίνακας 21: Νέοι συνδυασμοί παραμέτρων



Διάγραμμα 34: Διάγραμμα Reefers – Predicted FOC, για Electric Load = 1,050 [kW] και Running Time = 15 [hours]



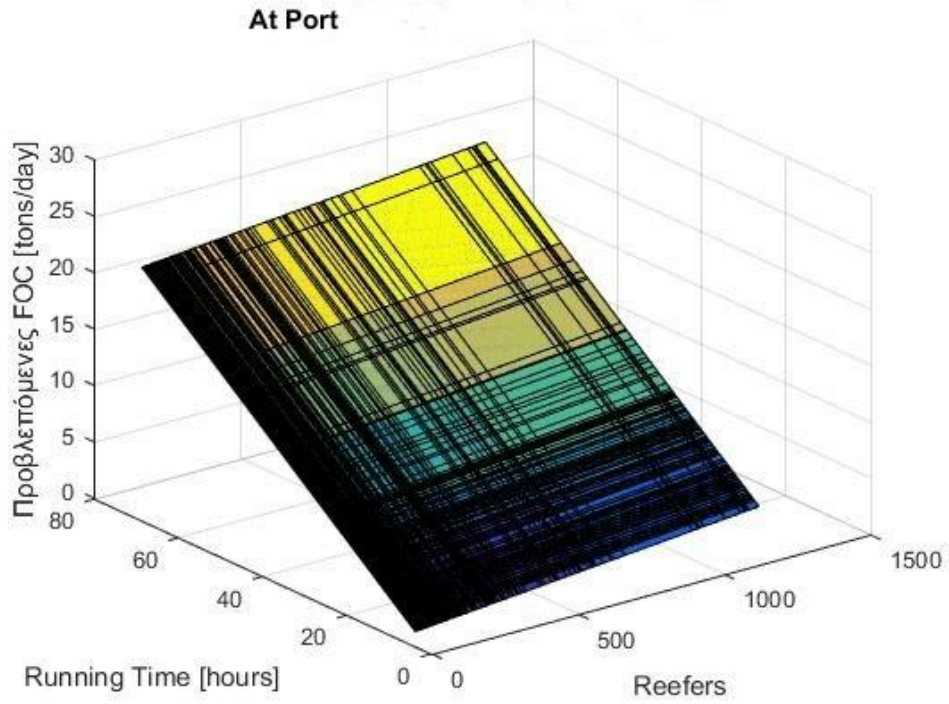
Διάγραμμα 35: Διάγραμμα Reefers – Predicted FOC, για Electric Load = 1,408.6 [kW] και Running Time = 20 [hours]



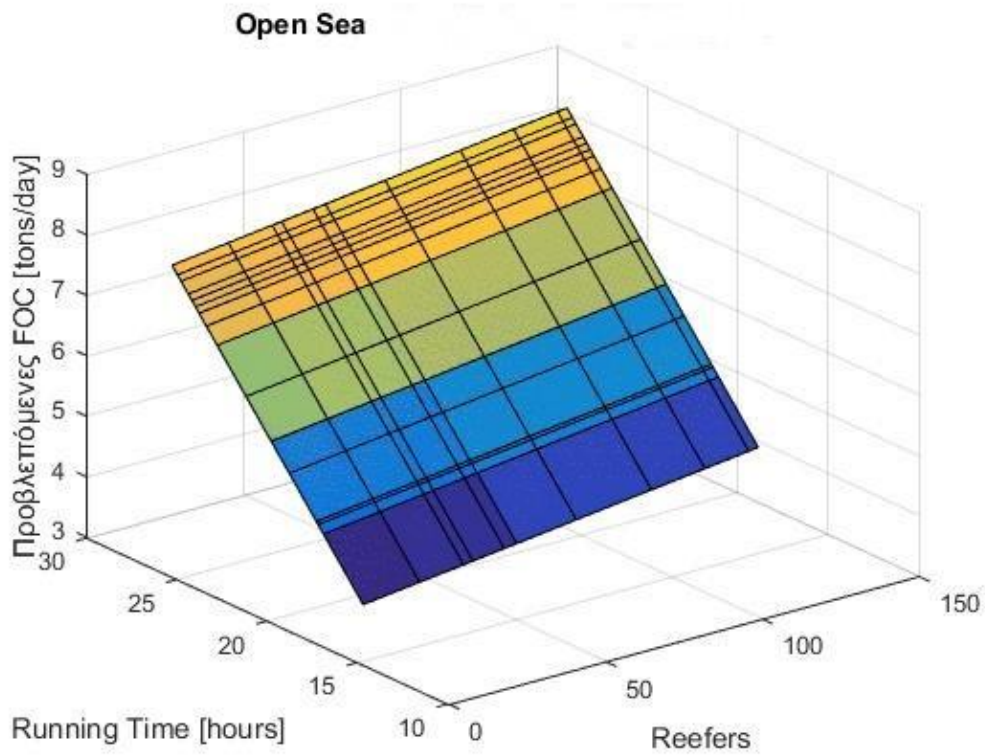
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα Reefers – Predicted FOC, για Electric Load = 1,700 [kW] και Running Time = 25 [hours]

Στα παραπάνω διαγράμματα (Διαγράμματα 34, 35, 36) παρατηρείται μια σχέση αύξησης της προβλεπόμενης FOC με τη Running Time και της προβλεπόμενης FOC με τα Reefers. Επίσης υπάρχει αύξηση του ρυθμού μεταβολής της προβλεπόμενης FOC σε κατάσταση open sea και αύξηση ελαφρώς της ίδιας παραμέτρου απόκρισης για την κατάσταση at Port.

Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB® για Electric Load = 1,408.6 [kW] (για κάθε μοντέλο), ενώ οι υπόλοιπες δύο παράμετροι πρόβλεψης μεταβάλλονται. Με αυτό τον τρόπο παράγονται δύο flat surfaces σε τρισδιάστατο χώρο.



Εικόνα 4: 1^ο μοντέλο σε MATLAB®, Electric Load = 1,408.6 [kW]



Εικόνα 5: 2^ο μοντέλο σε MATLAB®, Electric Load = 1,408.6 [kW]

Από τα παραπάνω αποτελέσματα των εικόνων 7 και 8, παρατηρούμε ότι το 1^ο μοντέλο λαμβάνει υψηλότερες τιμές υπό την έννοια του άξονα z (προβλεπόμενες FOC), σε σχέση με το 2^ο μοντέλο. Τα αποτελέσματα δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας εντολή “mesh” για διαμόρφωση πλέγματος εισάγοντας σημεία της μορφής (x, y, z) ή (Reefers, Running Time, Predicted FOC) στο MATLAB®.

Παρατηρήσεις:

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα ανωτέρω αποτελέσματα, αποσαφηνίζεται ότι η κατάσταση λειτουργίας του πλοίου, at port state, λαμβάνει εν γένει υψηλότερες προβλέψεις (στην πλειονότητα των καταστάσεων λειτουργίας του πλοίου). Δηλαδή, η κατάσταση λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου **επί του λιμένα** χαρακτηρίζεται ως **δυσμενέστερη**. Η κατάσταση λειτουργίας **εν πλω** κρίνεται ως **βέλτιστη**.

Τυπικά, το αποτέλεσμα που αναμένεται είναι ότι σε κατάσταση λειτουργίας σε λιμένα (το πλοίο δεν είναι idle, αλλά μπορεί και να βρίσκεται σε φάση εκτέλεσης στροφής, όπου ο κινητήρας και πολλά μηχανήματα λειτουργούν), οι γεννήτριες να υπόκεινται σε υψηλή κατανάλωση καυσίμου. Αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει λόγω της περίπτωσης ενός πλοίου με πολλά εμπορευματοκιβώτια ψύξης καθώς και λόγω της χρήσης των bow thrusters εντός του λιμένα.

[This page intentionally left blank]

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε η μελέτη και η αξιολόγηση της απόδοσης των γεννητριών οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε εμπορικό πλοίο που μεταφέρει εμπορευματοκιβώτια ψυγεία με βάση επιχειρησιακά δεδομένα που καταγράφονται σε ημερήσιες αναφορές.

Μετά από την παρουσίαση των απαραίτητων εισαγωγικών στοιχείων και τη λήψη απαραίτητων πληροφοριών ως προς την κατάσταση λειτουργίας των γεννητριών, πραγματοποιήθηκε διερευνητική στατιστική ανάλυση για τη λειτουργία τους. Στη συνέχεια, τα δεδομένα φιλτραρίστηκαν έτσι ώστε να αποκλειστούν οι εσφαλμένες μετρήσεις καθώς και οι μετρήσεις που αντιστοιχούν σε διαστήματα που οι ηλεκτρογεννήτριες δεν φαίνεται να λειτουργούν, ώστε να μην αλλοιωθούν τα αποτελέσματα της μελέτης. Έπειτα ακολούθησε η διαδικασία της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και των μεταβλητών που την επηρεάζουν. Ο στόχος των μοντέλων παλινδρόμησης ήταν η πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου των γεννητριών με βάση την ηλεκτρική ισχύ, τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων ψύξης και του χρόνου λειτουργίας των γεννητριών για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας που θεωρήθηκαν (εν πλω, στο λιμάνι). Η ακρίβεια των μοντέλων καθορίστηκε από πολλούς παράγοντες και προέκυψε ότι το μοντέλο της πρώτης κατάστασης λειτουργίας του πλοίου έχει μεγαλύτερη ακρίβεια, όμως πρόκειται εν γένει για δύο καλές αποδόσεις μοντέλων πρόβλεψης. Με βάση τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης όπου υποδεικνύεται η συσχέτιση των μεταβλητών με την κατανάλωση καυσίμου, προτείνεται μια μεθοδολογία σύγκρισης της λειτουργίας των γεννητριών και αποφασίζεται η βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας του πλοίου. Από τη σύγκριση αυτή, η κατάσταση λειτουργίας εν πλω αναδεικνύεται και η βέλτιστη, από άποψη κατανάλωσης καυσίμου.

Τονίζεται ότι για εκτενέστερη μελέτη του προβλήματος θα πρέπει να υπάρχει γνώση της ύπαρξης υποβοήθησης της ηλεκτρικής εγκατάστασης από σύστημα τροφοδοσίας ρεύματος μέσω της στεριάς. Ακόμη, θα πρέπει να υπάρχει γνώση της κατάστασης συντήρησης των μηχανημάτων από το εξειδικευμένο προσωπικό. Ακόμη απαραίτητο θα ήταν ένα σύστημα αυτόματης λήψης δεδομένων ώστε να μην υπάρχουν προβληματικές μετρήσεις. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι τα διαθέσιμα δεδομένα αποκλειστικά δεν είναι σε θέση να προσδιορίσουν πλήρως τη βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας του πλοίου, καθώς πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα που απαιτεί τη γνώση πολυάριθμων ακόμη παραγόντων.

Τέλος, παρουσιάζονται σύντομες προτάσεις για μελλοντικές εργασίες. Τα δεδομένα στην παρούσα διατριβή αφορούν καύσιμα που παράγονται από υδρογονάνθρακες. Προτείνεται η μελέτη της κατανάλωσης για εναλλακτικά καύσιμα όπως LNG, ammonia, biofuels. Ενδιαφέρον επίσης θα είχε και η προσπάθεια βελτιστοποίησης της λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών του πλοίου λαμβάνοντας υπόψιν νέα καύσιμα. Ακόμη, προτείνεται η χρήση περισσότερο σύνθετων στατιστικών μεθόδων στις παραπάνω προτάσεις.

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία σε Ελληνική Γλώσσα

Βλάχου Αριστείδης Γ. (2018), Ηλεκτρικές Μηχανές, Τόμος Α, Αθήνα, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου, URL: https://www.eef.edu.gr/media/3459/hlmixanes_toma.pdf

Βλάχου Αριστείδης Γ. (2020), Ηλεκτρικές Μηχανές, Τόμος Β, Αθήνα, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου, https://www.eef.edu.gr/media/6167/hliektrikes_mixanes_tomos_b.pdf

Θεμελής Νικόλαος (2019), Αξιολόγηση της Συμπεριφοράς και Απόδοσης Πλοίων, URL: <https://helios.ntua.gr/course/view.php?id=2293>

Καραγκούνης Χρήστος (2022) Εξέταση της απόδοσης ηλεκτρογεννητριών με χρήση δεικτών απόδοσης και λειτουργικών δεδομένων

Μουρτζίνος Γεώργιος (2021), Αξιολόγηση και Βελτιστοποίηση Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών Εμπορικού Πλοίου

Ξουρίδα Ειρήνη (2023), Επίδραση της Βελτιστοποίησης της Διαγωγής στην Αποδοτικότητα των Πλοίων με Χρήση Επιχειρησιακών Δεδομένων

Φραγκόπουλος Χρήστος - Προυσαλίδης Ιωάννης (2019), Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Αθήνα, Εκδόσεις da Vinci

Βιβλιογραφία σε Αγγλική Γλώσσα

Byongug Jeong, Hyeonmin Jeon, Seongwan Kim, Jongsu Kim, Peilin Zhou (2020), Evaluation of the Lifecycle Environmental Benefits of Full Battery Powered Ships Comparative Analysis of Marine Diesel and Electricity, URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/8/580>

IMO (2016), Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation, Module 4 – Ship Board Energy Management

IMO (2022), International Association of Classification Societies, Requirements concerning Electrical and Electronic Installations

Michael Lundh, Winston Garcia-Gabin, Kalevi Tervo, Rickard Lindkvist (2016), Estimation and Optimization of Vessel Fuel Consumption, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316320249>

Steven S. Skiena, The Data Science Design Manual, page 168-211, URL: <https://www.webpages.uidaho.edu/~stevl/517/The%20Data%20Science%20Design%20Manual.pdf>

Zalachoris, Anastasios (2020) Evaluation of the Efficiency of a Mewis Duct by performance monitoring, Diploma Thesis NTUA, URL: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/51359/Evaluation%20of%20t>

he%20efficiency%20of%20a%20Mewis%20duct%20by%20performance%20monitoring.pdf?
sequence=1&isAllowed=y

ιστότοποι

DNV, URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/How-newbuilds-can-comply-with-IMOs-2030-CO2-reduction-targets.html>

European Union (2015) "Regulation 2015/757 on monitoring, URL:
https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-07/02_guidance_monitoring_reporting_parameters_en.pdf

Kuehne+Nagel®, URL: <https://home.kuehne-nagel.com/-/knowledge/what-is-a-reefer-container>

MAN Energy Solutions® (2023), URL: <https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines/genset>

Marine Engineering Online, URL: <https://marineengineeringonline.com/parallel-operation-procedure-marine-diesel-generators-ships/>

Marine Insight, URL: <https://www.marineinsight.com/tech/generator/10-important-points-marine-engineers-must-know-while-handling-ship-generator/>

Maritime Electrical Installations, Notes on Design Requirements, URL:
<http://www.iqytechnicalcollege.com/JEE129-MarineElectricalSystems.pdf>

Ni Solutions®, URL: <https://www.ni.com/en-us.html>

Sole Diesel®, URL: https://www.solediesel.com/datos_publicos/Fichas/FA1397EN000002.pdf

Wärtsilä Marine® (2023), URL: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/generating-sets/wartsila-gensets>

What is Marine Electricity and how it is Generated (2021), Marine Insight, URL:
<https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/>

WikiMotors, URL: <https://www.wikimotors.org/>

Wikipedia, Autocorrelation, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Autocorrelation>

Wikipedia, Heteroskedasticity, URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Homoscedasticity_and_heteroscedasticity

Wikipedia, Linear Regression, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regression

Wikipedia, Pearson correlation coefficient, URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient

[This page intentionally left blank]

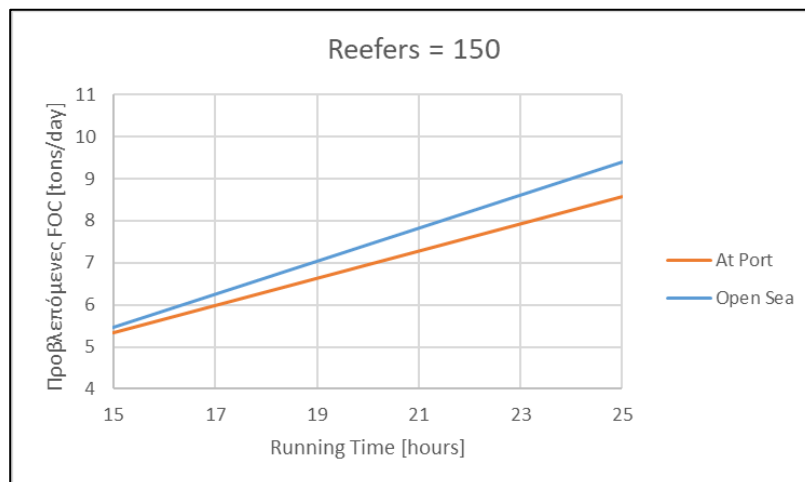
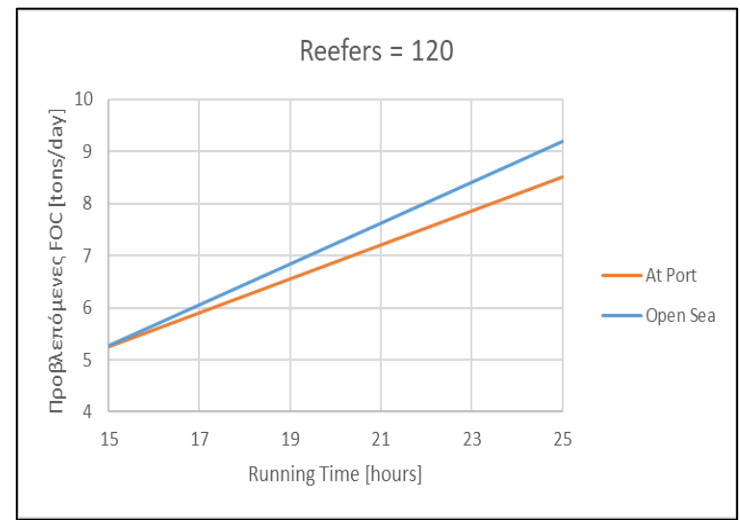
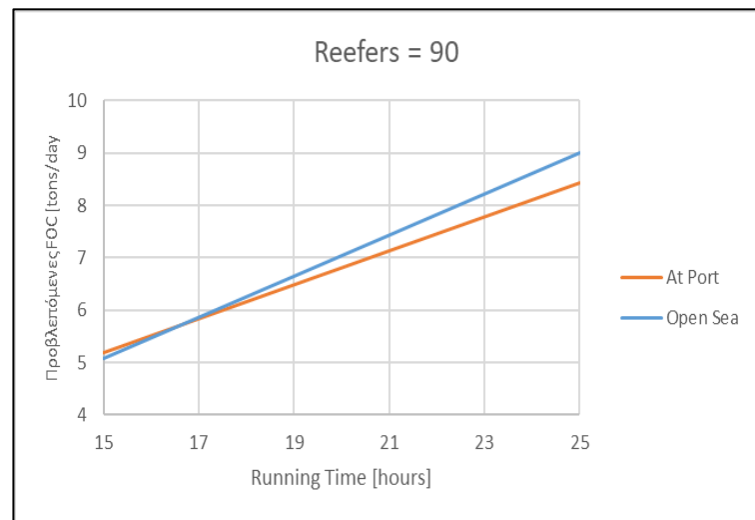
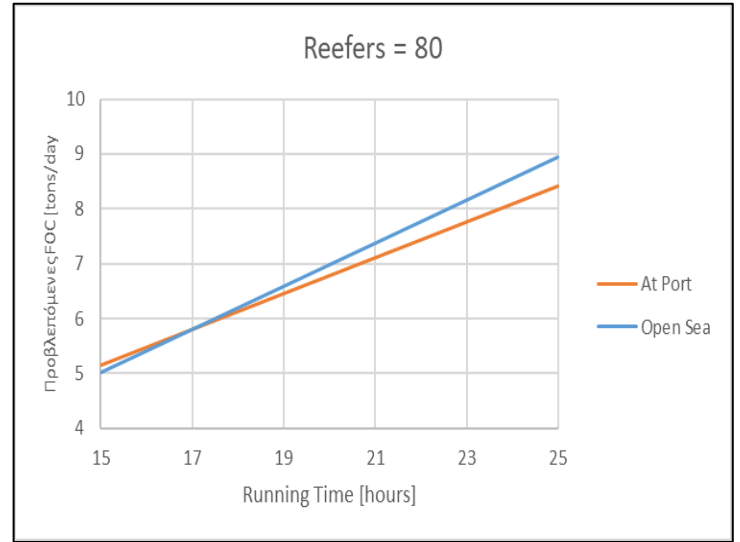
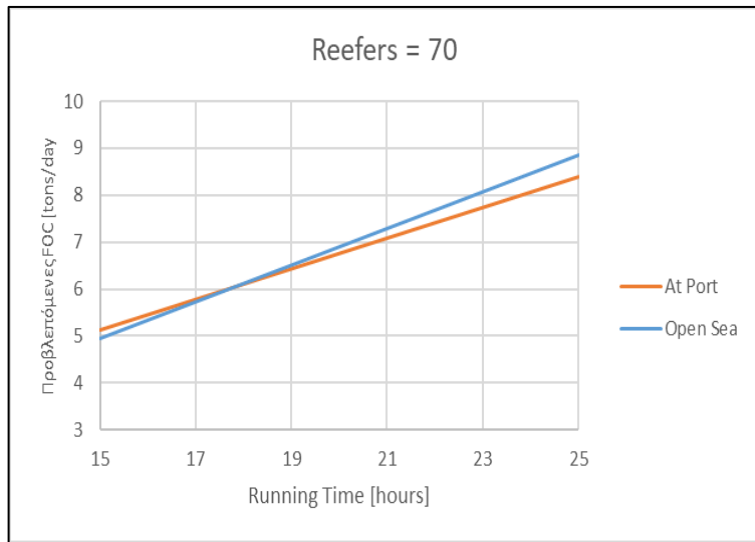
Παράρτημα Α

Στο συγκεκριμένο παράρτημα, παρουσιάζονται περαιτέρω πληροφορίες για τιμές ηλεκτρικού φορτίου που αφορούν τα άκρα του κοινού πεδίου ορισμού των δύο μοντέλων. Αυτές οι τιμές όμως δεν εμφανίζονται τόσο συχνά στο τελικό (εκκαθαρισμένο) data set, είναι αποτελέσματα παράλληλης λειτουργίας συνήθως δύο ηλεκτρογεννητριών και κατατάσσονται σε υψηλότερα επίπεδα τιμών του εύρους. Το παράρτημα αυτό, αποτελεί μια μικρή επέκταση της μελέτης. Ειδικότερα, σε αυτό το σημείο θα ακολουθήσουν πεντάδες διαγραμμάτων καταστάσεων φόρτωσης του υπό μελέτη πλοίου με container ψυγεία που αντιστοιχούν σε κάθε μια από τρεις επιλεγμένες καταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος των ηλεκτρογεννητριών, οι οποίες θα είναι: 1,700 [kW], 1,800 [kW] και 1,900 [kW].

Στις καταστάσεις αυτές, σύμφωνα με τα παρακάτω διαγράμματα, το δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης φαίνεται ότι προβλέπει υψηλότερες τιμές κατανάλωσης καυσίμου σε σύγκριση με το πρώτο μοντέλο. Όμως, όπως προαναφέρθηκε αυτές οι συνθήκες λειτουργίας δεν είναι οι πιο συνηθισμένες με βάση τα δεδομένα.

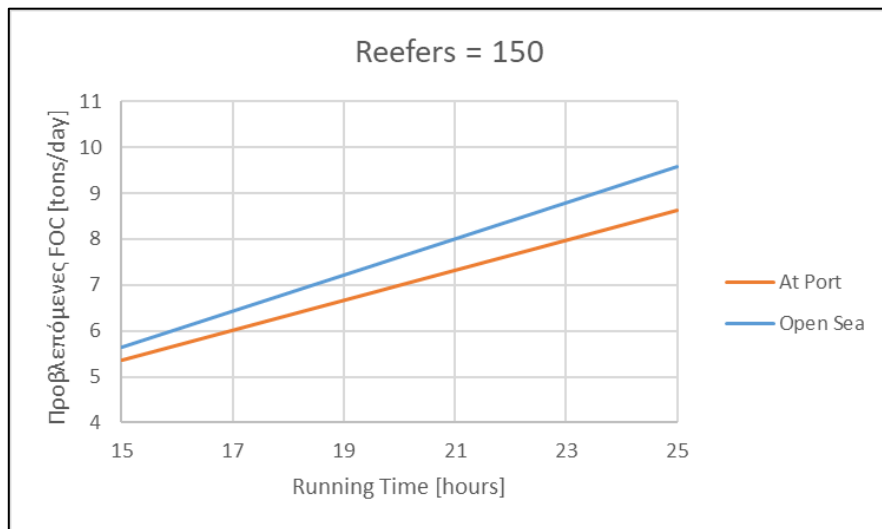
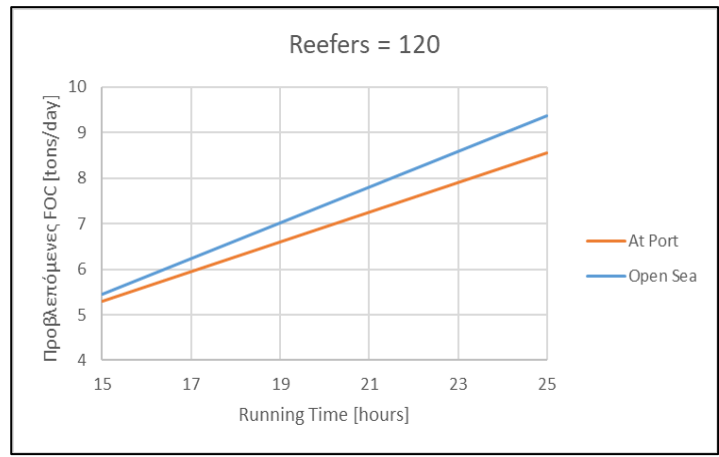
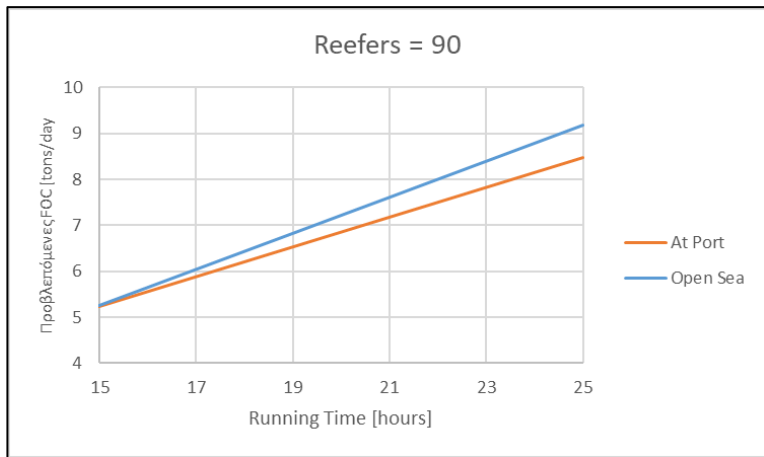
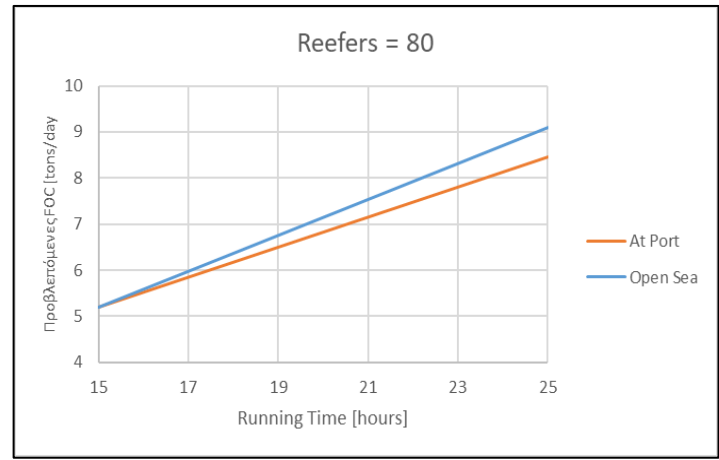
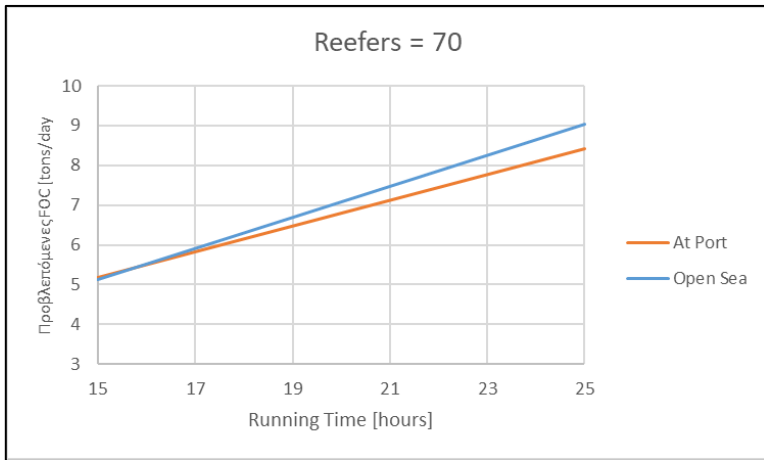
Γίνεται σαφές, ότι η αξιολόγηση λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών για ένα μεγάλο πλοίο container είναι μια διαδικασία πολυπαραμετρική, συνεπώς υπογραμμίζεται ότι δεν είναι εύκολη υπόθεση η απόφαση σχετικά με το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Electric Load = 1,700 [kW]:



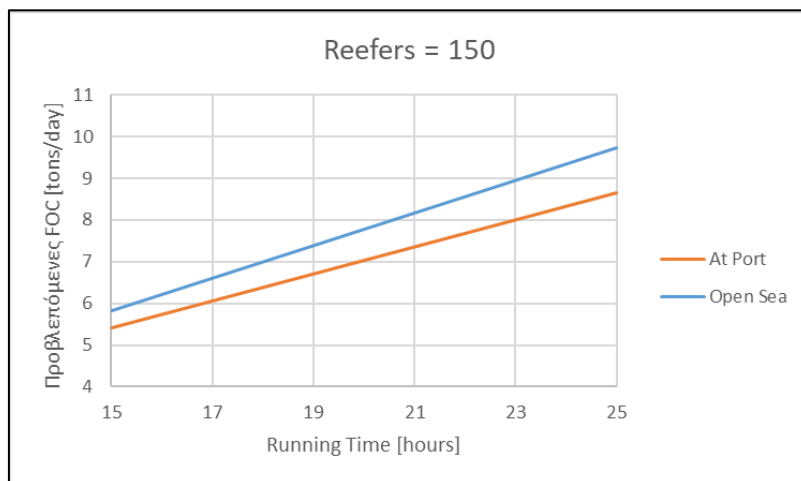
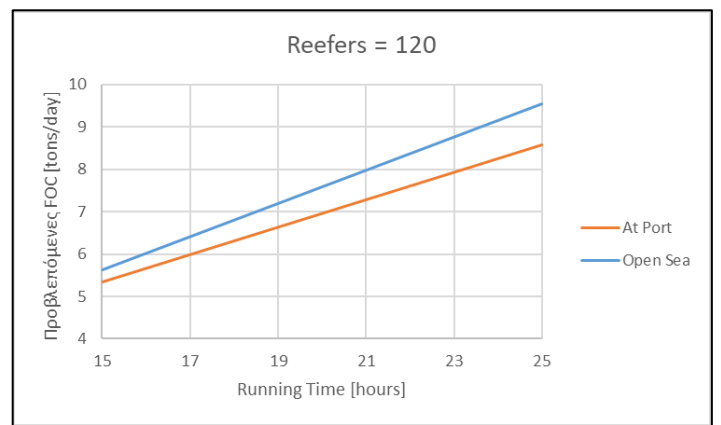
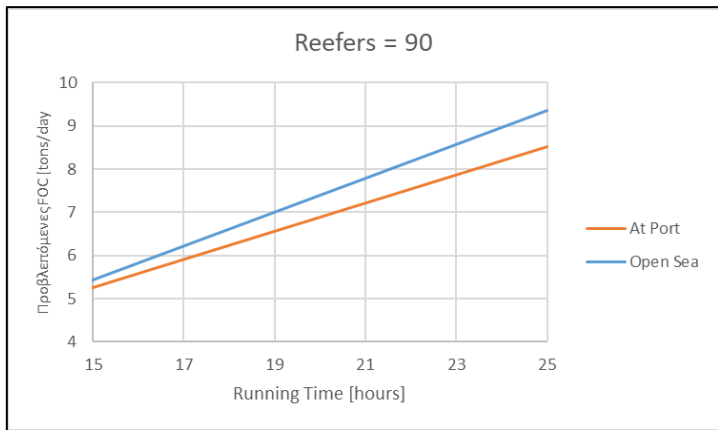
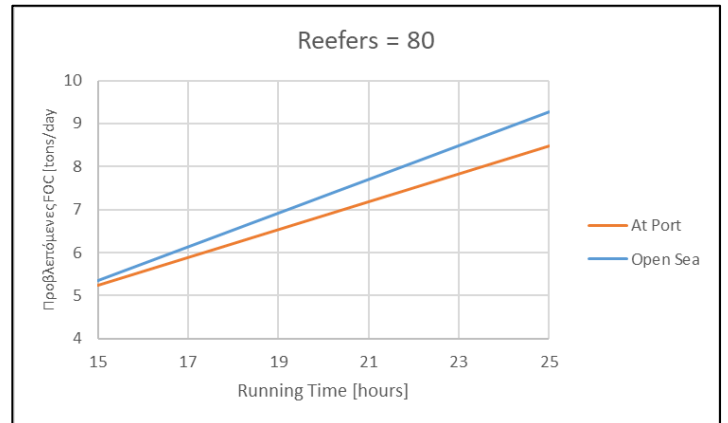
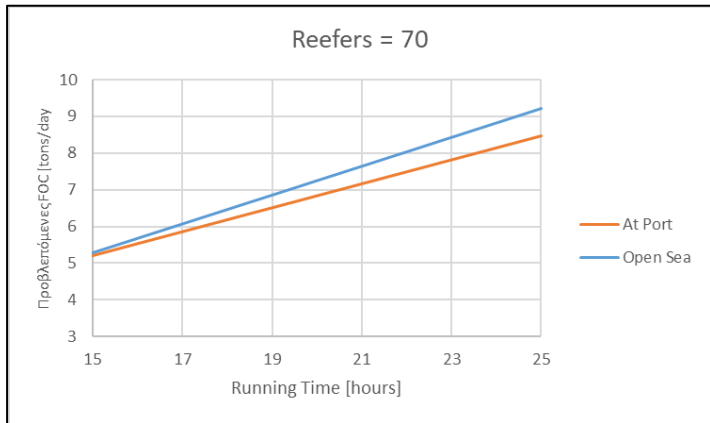
Ομάδα διαγραμμάτων 6: Καταστάσεις για 1,700 [kW]

Electric Load = 1,800 [kW]:



Ομάδα διαγραμμάτων 7: Καταστάσεις για 1,800 [kW]

Electric Load = 1,900 [kW]:



Ομάδα διαγραμμάτων 8: Καταστάσεις για 1,900 [kW]

Παράρτημα Β

Β.1 Χαρακτηριστικά Τυπικής Ηλεκτρογεννήτριας

Συνήθως σε ένα εμπορικό πλοίο ο αριθμός των ηλεκτρογεννητριών που είναι εγκατεστημένος είναι τρεις ή τέσσερις συμπεριλαμβανομένης και μιας γεννήτριας έκτακτης ανάγκης η οποία βρίσκεται σε διαφορετική τοποθεσία από το μηχανοστάσιο. Και σε ένα πλοίο τύπου containership που φέρει εμπορευματοκιβώτια ψυγεία υπάρχουν αυξημένες ενεργειακές ανάγκες (πχ λόγω διατήρησης φορτίου σε χαμηλή θερμοκρασία/ψύξη). Επιπροσθέτως, στο κύριο κατάστρωμα μπορεί να υπάρχει διάταξη για λήψη ρεύματος από τη στεριά.

Η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου πρέπει να σχεδιάζεται με σκοπό να αντέχει στις προκλήσεις που αφορούν ειδικά τις θαλάσσιες εφαρμογές. Πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- ❖ Αξιοπιστία και ανθεκτικότητα: Θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία κάθε μέρους της εγκατάστασης ακόμα και στις πιο δύσκολες συνθήκες όπως υψηλές θερμοκρασίες, κλίσεις του πλοίου που οφείλονται σε κυματισμούς της θάλασσας, μεγάλες ποσότητες υγρασίας, ενώ πρέπει να είναι ικανές να λειτουργούν συνεχώς για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να αντέχουν στις αντιξοότητες των θαλάσσιων συνθηκών χωρίς συχνή συντήρηση ή βλάβες,
- ❖ Αντοχή σε πιθανότητα πυρκαγιάς με τη χρήση άκαυστων ή τουλάχιστον βραδύκαυστων και πυρίμαχων υλικών,
- ❖ Αντιμετώπιση δονήσεων και κρούσεων: Οι γεννήτριες πρέπει να είναι κατασκευασμένες για να αντιμετωπίζουν τις δονήσεις και τις κρούσεις που παρατηρούνται στη θάλασσα, καθώς το σκάφος κινείται μέσα από τα κύματα και συναντά δύσκολες συνθήκες,
- ❖ Έλεγχος θορύβου: Οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί απαιτούν οι ναυτικές γεννήτριες να διαθέτουν αποτελεσματικά συστήματα ελέγχου θορύβου, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα εκπομπών και ελαχιστοποιώντας τα επίπεδα θορύβου,
- ❖ Προστασία από διάβρωση και υγρασία: Τα εξαρτήματα της γεννήτριας είναι σχεδιασμένα ώστε να αντιστέκονται στη διάβρωση από την έκθεση σε θαλασσινό νερό και την υγρασία. Γι' αυτό, χρησιμοποιούνται προστατευτικές επιστρώσεις και υλικά για να διασφαλιστεί η μακροζωία σε θαλάσσια περιβάλλοντα,
- ❖ Απλή ηλεκτρική εγκατάσταση: Ευκολία στη χρήση της ακόμα και όταν το τεχνικό προσωπικό δεν είναι πλήρως εκπαιδευμένο πάνω στη συγκεκριμένη εγκατάσταση,
- ❖ Συνδυασμό εξοικονόμησης χώρου και οικονομικών πόρων: Οι ηλεκτρογεννήτριες θα πρέπει να ικανοποιούν αυστηρά τεchnοοικονομικά κριτήρια όπως το να χαρακτηρίζονται από το μικρότερο δυνατό βάρος και όγκο αλλά και από το ελάχιστο δυνατό κόστος, δηλαδή να έχουν μια compact σχεδίαση και να ταιριάζουν στη χωροταξία του μηχανοστασίου ως προς όλες τους τις διαστάσεις.

Συνολικά, οι ναυτικές γεννήτριες ντίζελ είναι ειδικά κατασκευασμένες για να ανταποκρίνονται στις μοναδικές προκλήσεις των θαλάσσιων εφαρμογών, παρέχοντας αξιόπιστη και αποδοτική ηλεκτρική ισχύ για τα διάφορα συστήματα και τον εξοπλισμό ενός σκάφους.

B.2 Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών⁶

Η ναυτική γεννήτρια ντίζελ είναι ένας τύπος γεννήτριας που έχει σχεδιαστεί ειδικά για χρήση σε πλοία και άλλα θαλάσσια σκάφη. Είναι παρόμοια με μια τυπική γεννήτρια ντίζελ, αλλά με πρόσθετα χαρακτηριστικά και τροποποιήσεις ώστε να αντέχει στο αντίξοο θαλάσσιο περιβάλλον και να ανταποκρίνεται στις ειδικές απαιτήσεις των θαλάσσιων εφαρμογών.

Οι ναυτικές γεννήτριες ντίζελ έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα πρόωσης του πλοίου, το φωτισμό και άλλα ηλεκτρικά συστήματα εν πλω. Έχουν επίσης σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε θαλασσινό νερό, κραδασμούς και διαβρωτικό αλμυρό αέρα.

Τα ναυτικά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ντίζελ (gensets) έχουν συνήθως συμπαγή σχεδιασμό, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εγκατάσταση σε στενούς χώρους επί των πλοίων. Συχνά διαθέτουν επίσης πρόσθετα χαρακτηριστικά, όπως ηχομονωτικά περιβλήματα, συστήματα απόσβεσης κραδασμών και εφεδρικά συστήματα ψύξης.

Η γεννήτρια τροφοδοτείται με ντίζελ, το οποίο αποθηκεύεται σε δεξαμενές καυσίμων επί του σκάφους. Το καύσιμο τροφοδοτείται στον κινητήρα της γεννήτριας μέσω ενός συστήματος καυσίμου. Κατά την καύση στους κυλίνδρους μιας ηλεκτρογεννήτριας, η χημική ενέργεια μετατρέπεται μέσω των καυσαερίων, όπου βρίσκονται σε υψηλή πίεση, σε μηχανική ενέργεια στο στρόφαλο. Εν συνέχεια, μετατρέπεται σε ηλεκτρική στον εναλλακτήρα (alternator) της ηλεκτρογεννήτριας μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή προκαλείται από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, που διέρχεται από την επιφάνεια που την ορίζει και οδηγεί στην εμφάνιση τάσης στα άκρα ενός αγωγού (νόμος Faraday).

Οι εναλλακτήρες αποτελούνται από δύο βασικά μέρη (παρατηρούνται στην εικόνα 2):

- ❖ Το στάτη (Stator), που βρίσκεται στο εξωτερικό περίβλημα του εναλλακτήρα και συντίθεται από ηλεκτρικούς αγωγούς (χάλκινα σύρματα) και περιβάλλει το ρότορα. Ο στάτης χρησιμεύει για τη συλλογή και τη διανομή της ηλεκτρικής εξόδου της γεννήτριας στα συνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα ή φορτία του σκάφους.
- ❖ Το δρομέα (Rotor), ο οποίος αποτελείται επίσης από χάλκινα σύρματα γύρω από πηνία και είναι ενσωματωμένος στον άξονα του στροφάλου. Όταν ο ρότορας περιστρέφεται, επάγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στα τυλίγματα του στάτη, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης και ρεύματος.

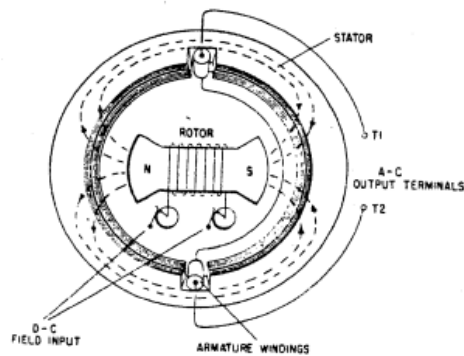
Σε αυτό το σημείο περιγράφεται αναλυτικότερα η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στη γεννήτρια. Τα πηνία του δρομέα τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα και έτσι δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Μία μικρή γεννήτρια που ονομάζεται διεγέρτρια, τοποθετείται στην άκρη του άξονα της ηλεκτρογεννήτριας και παράγει το συνεχές ρεύμα. Όμως ο δρομέας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με το στρόφαλο και κατ' επέκταση το μαγνητικό πεδίο στρέφεται μαζί του. Η περιστρεφόμενη μαγνητική ροή τέμνει το στάτη και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

⁶Maritime Electrical Installations, Notes on Design Requirements, URL:

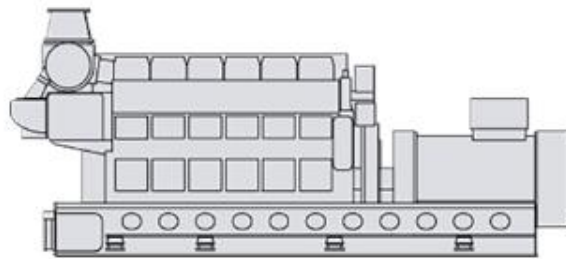
[<http://www.iqytechnicalcollege.com/JEE129-MarineElectricalSystems.pdf>], WikiMotors, URL:

[<https://www.wikimotors.org/>], Φραγκόπουλος Χρήστος - Προυσαλίδης Ιωάννης (2019), Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Αθήνα, Εκδόσεις da Vinci

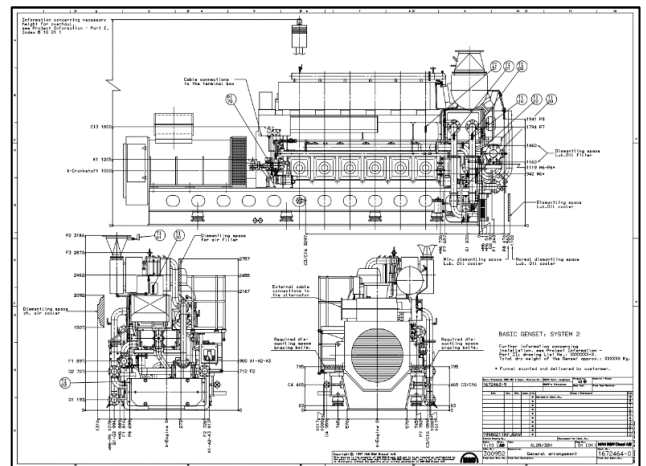
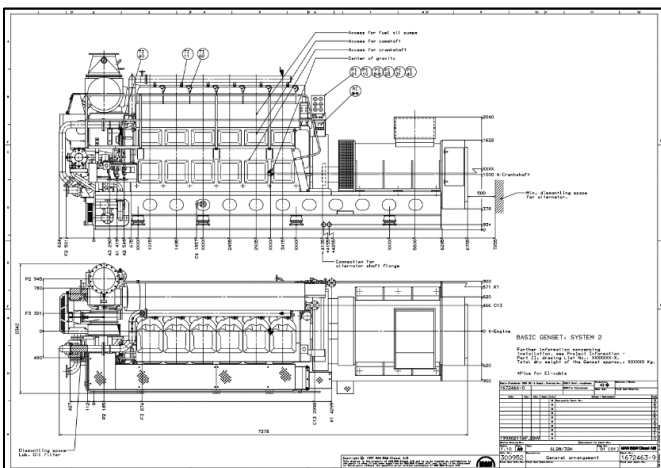
Οι πηγές ενέργειας στα πλοία είναι, κατά κόρον, σύγχρονες, τριφασικές γεννήτριες εναλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 6: Stator and Rotor⁷



Εικόνα 8: Πλευρική όψη τυπικής ηλεκτρογεννήτριας⁸



Εικόνες 7: Σχέδια γενικής διάταξης*

⁷Figure: Maritime Electrical Installations, Notes on Design Requirements, URL: [http://www.iqytechnicalcollege.com/JEE129-MarineElectricalSystems.pdf],

⁸Figure: μοντέλο MAN L28/32, MAN Energy Solutions®, URL: [https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines/genset]

*Σχέδια γενικής διάταξης MAN L28/32, MAN Energy Solutions®, URL: [https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines/23-30-28-32df]

Παράρτημα Γ

Μετρητικά Όργανα⁹

Στο παράρτημα αυτό, επισημαίνονται μερικοί από τους τύπους μετρητικών οργάνων, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ισχύος, της κατανάλωσης και της μέτρησης του χρόνου λειτουργίας των γεννητριών.

- 1 Μετρητής ισχύος του άξονα: Αυτού του είδους ο μετρητής είναι ένα εργαλείο που μετράει τη ροπή (Q) του άξονα της γεννήτριας. Γνωρίζοντας τις στροφές (n, σε [RPM]) στις οποίες λειτουργεί η μηχανή, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ισχύς που αποδίδει η ηλεκτρογεννήτρια, ως εξής:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot 60 \cdot Q \quad (\Gamma.1)$$

Η διάταξη μέτρησης ισχύος αποτελείται από μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges), όπου τοποθετούνται περιμετρικά του περιστρεφόμενου άξονα, μέσω συγκολλητικής ουσίας. Κατά κόρον, το είδος μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι ο μετρητής με αντίσταση, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην αλλαγή της ηλεκτρικής του αντίστασης που είναι αποτέλεσμα της μεταβολής των διαστάσεων του. Συνεπώς, η παραμόρφωση του άξονα οδηγεί στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης των μετρητών η οποία μπορεί αρχικά να μετατραπεί με τη βοήθεια μιας γέφυρας wheatstone σε μετρήσιμη διαφορά δυναμικού και στη συνέχεια σε τάση (ϵ_{45}). Η ροπή του άξονα υπολογίζεται στη συνέχεια, σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

$$Q = G \cdot \pi \cdot 16 \cdot D^3 \cdot 2 \cdot \epsilon_{45} \quad (\Gamma.2)$$

όπου:

- ❖ G: ο συντελεστής διάτμησης και
 - ❖ D: η διάμετρος του άξονα
- 2 Μετρητές κατανάλωσης καυσίμου: Η κατανάλωση καυσίμου στα πλοία καταγράφεται συνήθως με μετρητές ροής ή με συστήματα παρακολούθησης καυσίμου. Τα συστήματα αυτά εγκαθίστανται στις γραμμές τροφοδοσίας καυσίμου και παρέχουν συνεχή παρακολούθηση και μέτρηση του ρυθμού ροής του. Οι μετρητές ροής είναι συσκευές που μετρούν τον ογκομετρικό ρυθμό ροής που διέρχεται από ένα συγκεκριμένο σημείο του συστήματος καυσίμου. Μπορούν να βασίζονται σε διάφορες αρχές, όπως οι μετρητές ροής στροβίλου, οι ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές ροής ή οι μετρητές ροής υπερήχων. Οι μετρητές αυτοί παρέχουν ακριβείς μετρήσεις της κατανάλωσης μαζούτ σε όρους όγκου (παραδείγματος χάριν κυβικά μέτρα ή γαλόνια).
 - 3 Μετρητές χρόνου λειτουργίας: Ο χρόνος λειτουργίας των γεννητριών ντίτζελ (DG) σε ένα πλοίο μετράται συνήθως με τη χρήση ωρομέτρων ή συστημάτων ελέγχου. Οι ωρομετρητές είναι συσκευές που παρακολουθούν τις συνολικές ώρες λειτουργίας της γεννήτριας. Συχνά εγκαθίστανται στον πίνακα ελέγχου ή στο ταμπλό της γεννήτριας και καταγράφουν συνεχώς το χρόνο λειτουργίας της. Οι ωρομετρητές παρέχουν έναν βολικό

⁹European Union (2015), Regulation 2015/757 on monitoring, page 15-18, URL: [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-07/02_guidance_monitoring_reporting_parameters_en.pdf] και [https://www.ni.com/en-us.html]

τρόπο παρακολούθησης του χρόνου λειτουργίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προγραμματισμό της συντήρησης, τους υπολογισμούς της κατανάλωσης καυσίμου και τη συνολική ανάλυση της απόδοσης του συστήματος.