



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου
κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών
απόδοσης

Ραφαήλ Ευστάθιος Μπουλίας

Επιβλέπων: Νικόλαος Θεμελής *Επίκουρος καθηγητής, ΕΜΠ*

Αθήνα, 2022

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου στην σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που διατηρούν το επίπεδο σπουδών υψηλό.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή **Νικόλαο Θεμελή** για την βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σύνοψη

Ένα βασικό ζήτημα για την παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Σημαντικό μέρος αποτελεί η συνεχή αύξηση της τιμής των καυσίμων, και κατ' επέκταση των συνολικών εξόδων του πλοίου. Αλλά και στο δραματικό αντίκτυπο στην ατμόσφαιρα, καθώς τόσο οι κινητήρες ντίζελ όσο και οι αεριοστρόβιλοι εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες αερίων θερμοκηπίου (GHG), συμβάλλοντας σημαντικά στην Κλιματική αλλαγή.

Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί δείκτες απόδοσης, οι οποίοι δρουν σαν εργαλείο παρακολούθησης, αποτύπωσης και υπολογισμού της ενεργειακής αποδοτικότητας του κάθε πλοίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται ανάλυση και υπολογισμός του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας κατά την λειτουργία ενός πλοίου (Energy Efficiency Operational Indicator EEOI), σύγκρισή του με τον Carbon Intensity Indicator (CII), και προτείνεται νέος δείκτης εξαρτώμενος της ισχύος (KPI_p). Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα Nooo reports και από σύστημα υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα για το υπό μελέτη πλοίο, για ένα διάστημα πέντε μηνών. Μετά από επεξεργασία τους έγινε υπολογισμός απαραίτητων μεγεθών για την ανάλυση, σύγκριση μεταξύ τους και αποκλεισμός κατάλληλων. Μετά την παρουσίαση των παραπάνω δεικτών, συμπεραίνεται κατά πόσο ο νέος δείκτης KPI_p είναι ανεξάρτητος από τον ήδη γνωστό EEOI.

Abstract

A key issue for the global shipping industry is improving the energy efficiency of ships. An important part is the continuous increase in the price of fuel, and by extension the total costs of the ship. But also, to the dramatic impact on the atmosphere, as both diesel engines and gas turbines emit large amounts of greenhouse gases (GHG), contributing significantly to climate change.

For this reason, performance indicators have been created, which act as a tool for monitoring, recording and calculating the energy efficiency of each ship. In this thesis, the Energy Efficiency Operational Indicator EEOI is analyzed and calculated, comparing it with the Carbon Intensity Indicator (CII), and a new power-dependent indicator is proposed (KPI_p). For the study, data from the Noon reports and from a high frequency sampling system were used which were available for the ship under study, for a period of five months. After processing them, the necessary sizes for the analysis were calculated, compared with each other and suitable ones were excluded. After the presentation of the above indicators, it is concluded whether the new KPI_p indicator is independent of the already known EEOI.

Περιεχόμενα

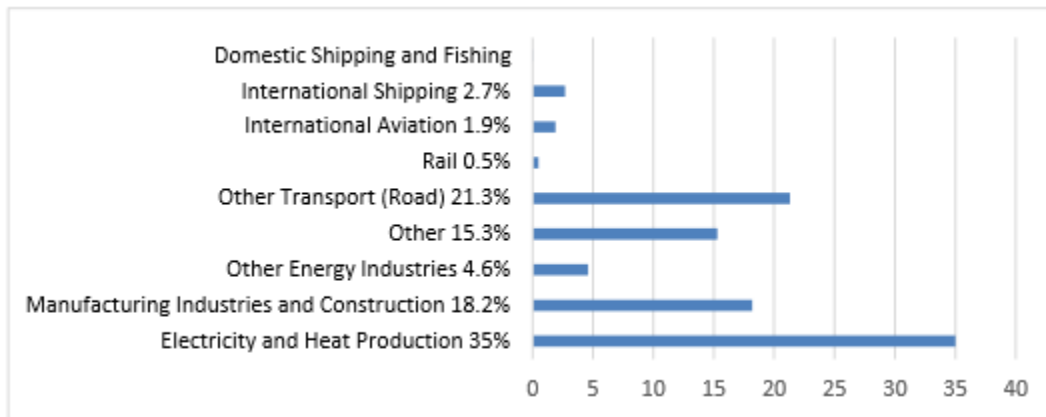
1	Εισαγωγή	10
1.1	Γενικά.....	10
1.2	Carbon Intensity Indicator.....	12
1.3	Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI).....	15
1.4	Ανασκόπηση άλλων εργασιών	16
1.5	Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	17
2	Βασικοί παράμετροι.....	19
2.1	Στοιχεία υπό μελέτη πλοίου	19
2.2	Συστήματα απόκτησης δεδομένων.....	20
2.2.1	Αισθητήρας Θερμοκρασίας Καυσαερίων	20
2.2.2	Αισθητήρας Πίεσης	21
2.2.3	Ταχύμετρο	21
2.2.4	Μέτρηση Ισχύος	21
2.2.5	Μετρητής ροής.....	22
3	Αρχικοί υπολογισμοί	24
4	Επεξεργασία δεδομένων.....	25
4.1	Noon reports	25
4.2	High Frequency.....	29
4.3	Σύγκριση noon με high frequency.....	33
5	Υπολογισμός EEOI	36
5.1	EEOI Noon reports.....	36
5.2	EEOI High-Frequency reports	38
5.3	Σύγκριση EEOI Noon - High frequency	40
6	Ανάλυση δείκτη EEOI για High-Frequency δεδομένα	42
6.1	Υπολογισμοί για δεδομένα χωρίς περιορισμό ταχύτητας.....	42
6.1.1	Υπολογισμός ανά ημέρα	42
6.1.2	Υπολογισμός ανά 6 ώρες.....	42
6.2	Επίδραση της ταχύτητας στον υπολογισμό EEOI.....	45
6.2.1	Υπολογισμός ανά ημέρα	45
6.2.2	Υπολογισμός ανά 6 ώρες.....	48
6.3	Υπολογισμός δείκτη EEOI ανά 6 ώρες λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις εκπομπές CO2 της κύριας μηχανής.....	50
6.3.1	Αποτελέσματα δείκτη EEOI μόνο με εκπομπές CO2 της κύριας μηχανής.....	50
6.3.2	Σύγκριση EEOI με EEOI εκπομπών κύριας μηχανής.....	52
6.4	Επίδραση δείκτη EEOI από παραμέτρους του καιρού.....	54

6.4.1	Επίδραση κατεύθυνσης ανέμου	54
6.4.2	Επίδραση ταχύτητας ανέμου	55
7	Δείκτης απόδοσης εξαρτώμενος της ισχύος (<i>KPIP</i>)	57
8	Παρουσίαση ανάλυσης ολόκληρης χρονικής περιόδου	59
8.1	Υπολογισμός ανά ημέρα	60
8.2	Υπολογισμός ανά 6ωρο	65
8.3	Υπολογισμός ανά 6ωρο με καταναλώσεις μόνο κύριας μηχανής	70
8.4	Επίδραση παραμέτρων καιρού	72
8.5	Σύγκριση των δεικτών CII και EEOI.....	76
8.6	Υπολογισμός KPI εξαρτώμενος της ισχύος	79
9	Συμπεράσματα	81
10	Βιβλιογραφία.....	82
11	Παράρτημα Α.....	83

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Παρόλο που η ναυτιλία αποτελεί ουσιαστικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία και είναι ένας από τους πιο ενεργειακά αποδοτικούς τρόπους μεταφοράς, είναι επίσης μια μεγάλη και αυξανόμενη πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τον διεθνή ναυτιλιακό οργανισμό (International Maritime Organization IMO)[1], το 2,7% των παγκόσμιων ατμοσφαιρικών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα οφείλεται στην ναυτιλία και οι ετήσιες εκπομπές CO₂ ενδέχεται να αυξηθούν κατά 1,5 με 3,5 φορές έως το 2050.



Εικόνα 1 Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ [1]

Το θέμα του ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα επιβλαβή αέρια των καυσαερίων των πλοίων συζητήθηκε από τον IMO ήδη από τη δεκαετία του 1970, αλλά τράβηξε μεγαλύτερη προσοχή το 1988 όταν η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) συμφώνησε να συμπεριλάβει το θέμα στο πρόγραμμα εργασίας της. Το 1991, ο IMO ενέκρινε ψήφισμα σχετικά με την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία. Το ψήφισμα καλούσε την MEPC να προετοιμάσει ένα νέο σχέδιο της MARPOL για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 1997, ήταν ένα σημαντικό βήμα στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Έθεσε σε λειτουργία σύμβαση στο πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική αλλαγή δεσμεύοντας τις βιομηχανικές χώρες να περιορίσουν και να μειώσουν σε μεταβατικό στάδιο τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), θέτοντας επιμέρους στόχους.

Το ίδιο έτος στη διάσκεψη MARPOL του 1997 [2], ο IMO ενέκρινε το παράρτημα VI της MARPOL σχετικά με κανονισμούς για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αυτό το ψήφισμα κάλεσε το MEPC να εξετάσει ποιες στρατηγικές μείωσης του CO₂ θα μπορούσαν να είναι εφικτές μεταξύ άλλων ατμοσφαιρικών και θαλάσσιων ρύπων. Καλούσε επίσης τον IMO, σε συνεργασία με την UNFCCC, να πραγματοποιήσει μελέτη των εκπομπών, με σκοπό τον καθορισμό της ποσότητας και του σχετικού ποσοστού των εκπομπών CO₂ από τα πλοία ως μέρος της παγκόσμιας απογραφής εκπομπών.

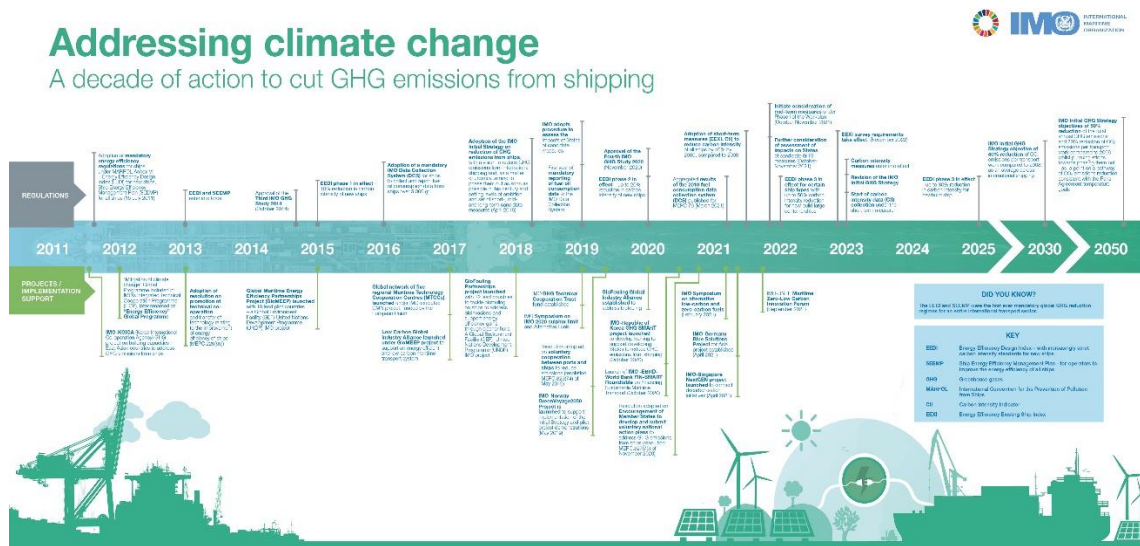
Η MEPC ανέπτυξε επιχειρησιακά και τεχνικά μέτρα και ο IMO συμφώνησε να συμπεριλάβει ένα νέο κεφάλαιο για την «ενεργειακή απόδοση» στο Παράρτημα VI [2] της MARPOL. Στις 15 Ιουλίου 2011, τα μέρη του παραρτήματος VI της MARPOL ενέκριναν υποχρεωτικούς κανονισμούς ενεργειακής απόδοσης για πλοία

- Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) για νέα πλοία
- Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης (SEEMP) για όλα τα πλοία.

Αυτό αντιπροσώπευε τα πρώτα υποχρεωτικά μέτρα ενεργειακής απόδοσης για κάθε τομέα μεταφορών. Το 2016, ο IMO υιοθέτησε το υποχρεωτικό Σύστημα Συλλογής Δεδομένων του IMO (DCS) ώστε να συλλέγονται και να αναφέρονται δεδομένα κατανάλωσης για πλοία άνω των 5.000 gt. Η πρώτη συλλογή δεδομένων ενός χρόνου ολοκληρώθηκε το 2019.

Τον Απρίλιο του 2018, ο IMO υιοθέτησε στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών GHG από τη ναυτιλία, ένα πλαίσιο πολιτικής που θέτει βασικές φιλοδοξίες, συμπεριλαμβανομένων των ετήσιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία τουλάχιστον κατά το ήμισυ έως το 2050, σε σύγκριση με το επίπεδό τους το 2008. Τη σταδιακή εξάλειψη αυτών το συντομότερο δυνατό μέσα σε αυτόν τον αιώνα, και τη μείωση του μέσου όρου άνθρακα (ανά μεταφορικό έργο) κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, συνεχίζοντας τις προσπάθειες σε 70% έως το 2050, συγκριτικά με το 2008.

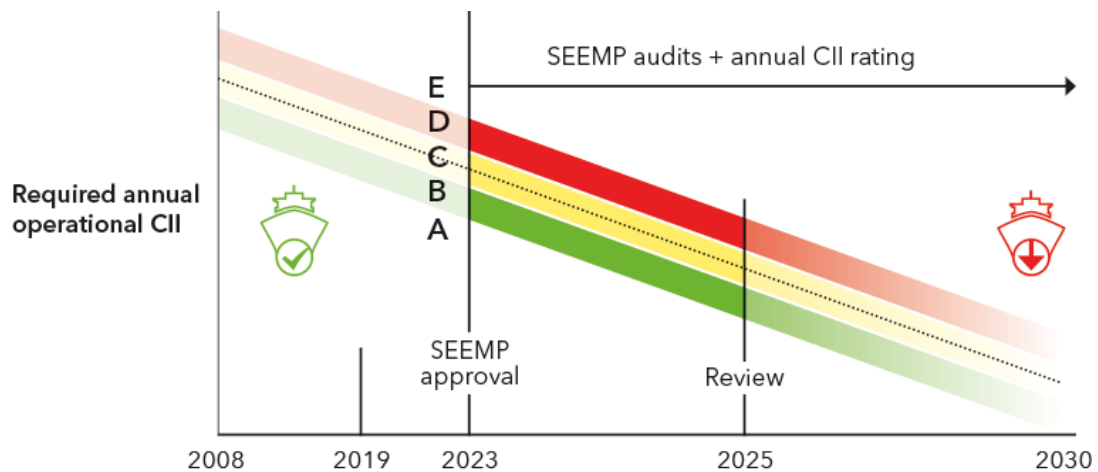
Η αρχική στρατηγική για τα GHG θα αναθεωρηθεί έως το 2023.



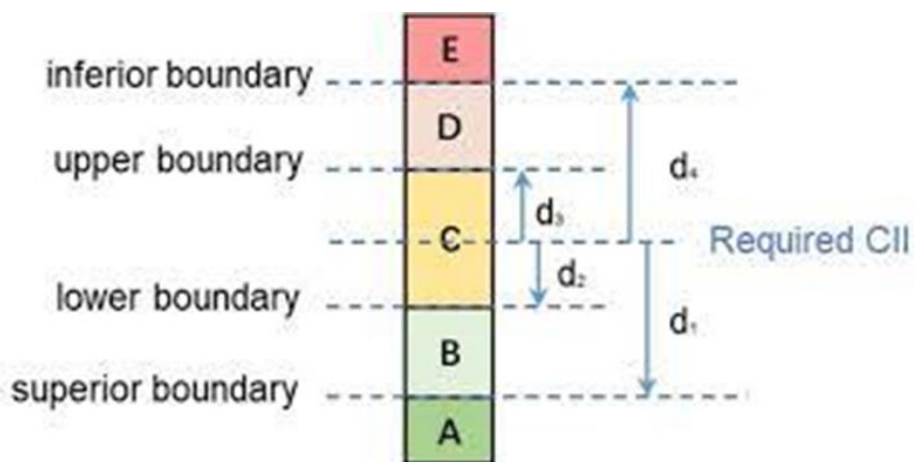
Εικόνα 2 Δράσεις και πλάνο του IMO για μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στη ναυτιλία[2]

Τον Ιούνιο του 2021, ο IMO ενέκρινε βασικά βραχυπρόθεσμα μέτρα με στόχο τη μείωση της περιεκτικότητας άνθρακα όλων των πλοίων κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, σύμφωνα με τις φιλοδοξίες που ορίζονται στην αρχική στρατηγική του IMO. Αυτά τα μέτρα συνδυάζουν τεχνικές και επιχειρησιακές προσεγγίσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Όλα τα πλοία θα πρέπει να υπολογίσουν τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης EEXI και τα πλοία άνω των 5.000 gt θα καθορίσουν τον ετήσιο δείκτη CII. Με άλλα λόγια, τα πλοία θα λάβουν βαθμολογία για την ενεργειακή τους απόδοση - A, B, C, D, E - (με το A να είναι το πιο αποδοτικό). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3 και Εικόνα 4.

¹ Figure from: imo.org



Εικόνα 3 Βαθμολογία ενεργειακής απόδοσης πλοίων²



Εικόνα 4 Όρια βαθμολογίας ενεργειακής απόδοσης πλοίων³

Είναι η πρώτη φορά που ο IMO καθιέρωσε επίσημο σύστημα αξιολόγησης για πλοία, στέλνοντας ισχυρό μήνυμα στην αγορά: Οι διοικήσεις, οι λιμενικές αρχές και άλλοι ενδιαφερόμενοι, ανάλογα με την περίπτωση, ενθαρρύνονται να παρέχουν κίνητρα σε πλοία με βαθμολογία A ή B. Ένα πλοίο με βαθμολογία D ή E για τρία συνεχόμενα έτη, απαιτείται να υποβάλει διορθωτικό σχέδιο δράσης, για να δείξει πώς θα επιτευχθεί ο απαιτούμενος δείκτης (C ή παραπάνω). Το παράρτημα VI της MARPOL αντιπροσωπεύει το 96,65% της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας ανά τόνο φορτίου.

1.2 Carbon Intensity Indicator

Συγκεκριμένα, ο δείκτης CII ορίζεται ως ο παρακάτω λόγος:

$$CII = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{Deadweight * Distance sailed} = \frac{\sum_j FC_j * C_{Fj}}{DWT * D} \quad [tonsCO_2 / (tons * nm)] \quad [3]$$

Εξ. 1.1

Όπου:

j : ο τύπος του καυσίμου

² Figure from: www.dnv.com

³ Figure from: www.classnk.or.jp

FC_j : η μάζα του καυσίμου τύπου j

CF_j : συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO_2 , ανά τύπο καυσίμου j

DWT : η μάζα DWT του πλοίου

D : η απόσταση που διανύεται σε ναυτικά μίλια.

Άλλος ένας τρόπος υπολογισμού του CII είναι και ο παρακάτω:

$$CII = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{m_{cargo} * \text{Distance sailed}} = \frac{\sum_j FC_j * C_{Fj}}{m_{cargo} * D} \text{ [tonsCO}_2\text{/(tons * nm)]}$$

Εξ. 1.2

Όπου:

j : ο τύπος του καυσίμου

FC_j : η μάζα του καυσίμου τύπου j

CF_j : συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO_2 , ανά τύπο καυσίμου j

m_{cargo} : η μάζα μεταφερόμενου φορτίου

D : η απόσταση που διανύεται σε ναυτικά μίλια, η οποία αντιστοιχεί για την μεταφορά του φορτίου.

Ο δείκτης CII κατά τον πρώτο τρόπο (Εξ. 1.1) διαφέρει από τον δείκτη ΕΕΟΙ στο DWT , όπου χρησιμοποιείται η μάζα του μεταφερόμενου φορτίου αντίστοιχα. Ενώ ο δεύτερος τρόπος (Εξ. 1.2) συμπίπτει με τον δείκτη ΕΕΟΙ.

Επίσης, για τους υπολογισμούς της βαθμολογίας ενεργειακής απόδοσης μέσω CII: αρχικά υπολογίζεται το όριο αναφοράς σύμφωνα με:

$$CII_{ref} = \alpha * Capacity^c \quad [7]$$

Εξ. 1.3

Όπου ανάλογα με τον τύπο πλοίου υπολογίζονται οι συντελεστές μέσω του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1):

Πίνακας 1.1 Συντελεστές του όριου αναφοράς δείκτη CII ανάλογα με τον τύπο πλοίου [7]

Ship Type		Capacity	a	c
Bulk Carrier	DWT ≥ 279,000	279,000	4745	0.622
	DWT < 279,000	DWT	4745	0.622
Gas Carrier	DWT ≥ 65,000	DWT	14405E+7	2.071
	DWT < 65,000	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container Ship		DWT	1984	0.489
General Cargo Ship	DWT ≥ 20,000	DWT	31948	0.792
	DWT < 20,000	DWT	588	0.389
Refrigerated Cargo Carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	40853	0.812
LNG Carrier	DWT ≥ 100,000	DWT	9.827	0
	100,000>DWT>-65,000	DWT	14479E+10	2.673
	DWT< 65,000	65,000	14479E+10	2.673
Ro-ro cargo ship (VC)		GT	5739	0.631
Ro-ro cargo ship		DWT	10952	0.637
Ro-ro passenger ship		GT	7540	0.587
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο απαιτούμενος δείκτης, όπως:

$$Required\ CII = \frac{100-Z}{100} * CII_{ref} \quad [7]$$

Εξ. 1.4

Όπου ο παράγοντας μείωσης Z θα ξεκινάει με 5% απο το 2023 και θα προστίθεται κατά 2% κάθε έτος.

Τέλος με βάση την Εικόνα 4 και τον Πίνακα 1.2 θα καθορίζεται το rating του κάθε πλοίου.

Πίνακας 1.2 Διανύσματα d καθορισμού ορίων βαθμολογίας των διάφορων τύπων πλοίου [7]

Ship Type		d1	d2	d3	d4
Bulk Carrier		0.86	0.94	1.06	1.18
Gas Carrier	≥ 65,000 DWT	0.81	0.91	1.12	1.44
	< 65,000 DWT	0.85	0.95	1.06	1.25
Tanker		0.82	0.93	1.08	1.28
Container ship		0.83	0.94	1.07	1.19
General cargo ship		0.83	0.94	1.06	1.19
Refrigerated cargo carrier		0.78	0.91	1.07	1.20
Combination carrier		0.87	0.96	1.06	1.14
LNG Carrier	≥ 100,000DWT	0.89	0.98	1.06	1.13
	< 100000DWT	0.78	0.92	1.10	1.37
Ro-ro cargo ship (VC)		0.86	0.94	1.06	1.16
Ro-ro cargo ship		0.66	0.9	1.11	1.37
Ro-ro passenger ship		0.72	0.90	1.12	1.41
Cruise passenger ship		0.87	0.95	1.06	1.16

1.3 Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)

Η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (ΜΕΡC), σε σύνοδο (13 έως 17 Ιουλίου 2009), συμφώνησε να κυκλοφορήσει τις κατευθυντήριες γραμμές για την **εθελοντική** χρήση του δείκτη ενεργειακής απόδοσης EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator). Ο EEOI είναι ένας δείκτης -μέτρο/εργαλείο από τον ΙΜΟ που εφαρμόζεται στα υπάρχοντα πλοία για την αξιολόγηση και παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης και των εκπομπών αερίων CO₂ στο περιβάλλον. Ο δείκτης δίνει τη δυνατότητα μέτρησης της κατανάλωσης καυσίμου κατά την λειτουργία και της αποτελεσματικότητας τυχόν αλλαγών. Όσο χαμηλότερος είναι ο EEOI, τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το πλοίο. Ο EEOI ορίζεται ως ο λόγος μάζας εκπομπών CO₂ ανά μονάδα μεταφορικού έργου, δηλαδή:

$$EEOI = \frac{M_{CO_2}}{\text{transport work}}$$

Εξ. 1.5

Η βασική έκφραση του EEOI για ένα ταξίδι είναι:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \cdot C_{Fj}}{m_{\text{cargo}} \cdot D} [\text{tonsCO}_2/(\text{tons} \cdot \text{nm})] \quad [4]$$

Εξ. 1.6

Όπου

j: ο τύπος του καυσίμου

FC_j: η μάζα του καυσίμου τύπου j

C_{Fj}: συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO₂, ανά τύπο καυσίμου j

m_{cargo}: η μάζα του μεταφερόμενου φορτίου

D: η απόσταση που διανύεται σε ναυτικά μίλια, η οποία αντιστοιχεί για την μεταφορά του φορτίου.

Οι τιμές του συντελεστή μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO₂, ανά τύπο καυσίμου (C_F), λαμβάνονται όπως στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3 Τιμές του συντελεστή μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO₂, ανά τύπο καυσίμου[4]

Type of fuel	Reference	Carbon content	C _F (t-CO ₂ /t-Fuel)
1. Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0.875	3.206000
2. Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.860	3.151040
3. Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0.850	3.114400
4. Liquified Petroleum Gas (LPG)	Propane Butane	0.819 0.827	3.000000 3.030000
5. Liquified Natural Gas (LNG)		0.750	2.750000

1.4 Ανασκόπηση άλλων εργασιών

Έγινε ανασκόπηση άλλων εργασιών σχετικών με την περιοχή της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα λήφθηκαν υπόψιν οι παρακάτω.

- “Ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού της λειτουργικής αποδοτικότητας πλοίου με χρήση δεικτών απόδοσης” [6], του Κατσιμάρδου Γεώργιου, η οποία είχε ως στόχο την δημιουργία δεικτών απόδοσης για τα υποσυστήματα του πλοίου. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένας γενικότερος δείκτης που αφορούσε την κατανάλωση του πλοίου σε σχέση με την απόσταση που διανύει. Στην συνέχεια, δείκτες για την απόδοση της προπέλας και την κατάσταση της γάστρας, την κύρια μηχανή, τις ηλεκτρογεννήτριες και το σύστημα του λέβητα. Με τους δείκτες αυτούς εξετάστηκε η απόδοση των υποσυστημάτων του πλοίου. Για να μπορέσει να εξεταστεί η αποδοτικότητα του πλοίου από τον δείκτη χρησιμοποιήθηκαν τιμές αναφοράς οι οποίες προκύπτουν από τα noon reports ή από τα Sea trials του πλοίου και τα Shop test της κύριας μηχανής. Έτσι, προκύπτουν συμπεράσματα για την κατάσταση των υποσυστημάτων του πλοίου. Τα δεδομένα που διατέθηκαν για την μελέτη περιλαμβάνουν μετρήσεις που λαμβάνονται με υψηλή δειγματοληψία από αισθητήρες για μια περίοδο 3 μηνών.
- “Ανάπτυξη δεικτών απόδοσης για την παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας ναυτικών κινητήρων Diesel” [5], του Κόντη Φώτη, όπου είχε σαν στόχο την μελέτη του ιστορικού ενός κινητήρα για ένα διάστημα 6 μηνών και μέσω αυτής της μελέτης να προκύψει ένα σύνολο δεικτών οι οποίοι να καθιστούν δυνατή την παρακολούθηση του συστήματος και την εκτίμηση της κατάστασής του. Συγκεντρωτικά, λήφθηκαν υπόψιν μεγέθη που αφορούν την κύρια μηχανή όπως την κατανάλωση καυσίμου, την θερμοκρασία στην εξαγωγή των καυσαερίων από τους κυλίνδρους, την θερμοκρασία στην έξοδο των καυσαερίων από τον στροβιλοσυμπιεστή, τις στροφές του κινητήρα, την ισχύ και την πίεση πλήρωσης των κυλίνδρων με αέρα. Έτσι, αναπτύχθηκαν οι δείκτες απόδοσης για την κατανάλωση καυσίμου ως προς τις στροφές του κινητήρα, για την θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του στροβιλοσυμπιεστή ως προς την πίεση στον θάλαμο των καυσαερίων, και για τον έλεγχο της θερμοκρασίας των καυσαερίων από τους κυλίνδρους μετά την καύση σε σύγκριση με την μέση θερμοκρασία. Τέλος, γίνεται σύγκριση συσχέτισης των δεικτών μεταξύ τους και με την θερμοκρασία καυσαερίων μέσω διαγραμμάτων.
- “Data acquisition and processing techniques for a novel performance monitoring system based on KPIs” [8], του Θεμελή Νικόλαου. Στο συγκεκριμένο paper γίνεται παρακολούθηση απόδοσης βασικών λειτουργιών του πλοίου, δηλαδή της ενεργειακής απόδοσης, της απόδοσης γάστρας και προπέλας, της αποτελεσματικότητας της κύριας μηχανής και ηλεκτρογεννητριών καθώς και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του πλοίου. Αρχικά, περιγράφεται το σύστημα απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων, το οποίο βασίζεται στο σύστημα LAROS. Στην συνέχεια ορίζεται ένα σύνολο KPIs , αναλύονται οι υπολογισμοί και δίνονται παραδείγματα. Έπειτα, γίνεται σύγκριση μεταξύ των χρησιμοποιούμενων KPI με γνωστές μετρήσεις. Τέλος, παρουσιάζεται μια διαδικασία βαθμονόμησης των KPI στοχεύοντας σε περαιτέρω ανάλυση.

- “Improving the Voyage Energy Efficiency by Using EEOI” [9], των Nicoleta Acomia και Ovidiu Cristian Acomi. Η εργασία παρουσιάζει μια μελέτη σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο το εμπορικό λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των της τιμής του EEOI πριν από ένα ταξίδι, σε σύγκριση με την πραγματική αξία που υπολογίζεται επί του πλοίου. Η μελέτη δείχνει ότι οι τιμές EEOI ανά ταξίδι μπορεί να διαφέρουν κατά 18-20% λόγω απρόβλεπτων παραγόντων που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, όπως η μεταβαλλόμενη ταχύτητα, οι ημέρες αγκυροβόλησης ή η περίοδος αναμονής για παραγγελίες. Συμπεραίνεται ότι αυτές οι απρόβλεπτες παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την τιμή του EEOI που εκτιμάται πριν από την εκτέλεση του ταξιδιού.
- “A Research on the Energy Efficiency Operational Indicator EEOI Calculation Tool on M/V NSU JUSTICE of VINIC Transportation Company, Vietnam” [10], του Ph.D. Researcher, Lecturer Tien Anh Tran. Η εργασία τονίζει την ανάγκη για έρευνα ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ιδιαίτερα στο Βιετνάμ. Παρουσιάζεται ένα μοντέλο για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης για πλοία και εφαρμόζεται το εργαλείο υπολογισμού EEOI σε ένα συγκεκριμένο πλοίο, το M/V NSU JUSTICE 250.000 DWT, μιας ναυτιλιακής εταιρείας με έδρα το Βιετνάμ. Το άρθρο υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την ενεργειακή απόδοση στη ναυτιλιακή βιομηχανία για την αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της ενεργειακής κρίσης.
- “Dynamic Prediction and Optimization of Energy Efficiency Operational Index (EEOI) for an Operating Ship in Varying Environments” [11], των Chao Sun, Haiyan Wang, Chao Liu 2 και Ye Zhao. Παρουσιάζεται ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της κύριας μηχανής ενός πλοίου προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση καυσίμου και να μειωθεί ο Λειτουργικός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης (EEOI) σε πραγματικές συνθήκες. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος κύματος και η ταχύτητα ροής του νερού ως εισοδοί και χρησιμοποιεί ένα νευρωνικό δίκτυο και έναν γενετικό αλγόριθμο για να προβλέψει την κατανάλωση καυσίμου και την ταχύτητα του πλοίου. Ελέγχεται χρησιμοποιώντας δεδομένα από εκπαιδευτικό πλοίο και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη χαμηλότερου EEOI σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και λειτουργικές ταχύτητες. Επισημαίνεται το γεγονός πως, η ιδέα και η μέθοδος βελτιστοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση του EEOI μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος στροφών κινητήρα και μια μελλοντική εργασία θα περιλαμβάνει τη δοκιμή διαφορετικών χρόνων κύκλων και την ενσωμάτωση ακριβέστερων μοντέλων ανέμου και κυμάτων στην προσομοίωση.

1.5 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου, χρησιμοποιώντας τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης EEOI και δημιουργώντας νέο KPI και σύγκριση αυτού με τον EEOI. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα που αντλήθηκαν από την πραγματική λειτουργία του πλοίου από τα ποση reports και από αυτόματο σύστημα υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας, για συγκεκριμένο διάστημα πέντε μηνών. Γίνεται αρχικά, αξιολόγηση των δεδομένων, επεξεργασία και αποκλεισμός

καταλλήλων με σκοπό τον ορθό υπολογισμό συγκεκριμένων μεγεθών. Αφού, γίνει ανάλυση, συγκριθούν μεταξύ τους και αποκλειστούν αυτά που χρειάζονται, καθίσταται ικανό να υπολογισθούν οι δείκτες ΕΕΟΙ. Πιο συγκεκριμένα γίνεται πιο αναλυτική μελέτη και με πιο συχνό υπολογισμό ομαλοποιώντας τον στο δεδομένο διάστημα. Επιπρόσθετα, αναλύεται κατά πόσο οι εκπομπές από το σύστημα πρόωσης καθαυτού επηρεάζει τον δείκτη ΕΕΟΙ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση των καιρικών συνθηκών στον παραπάνω δείκτη. Έπειτα, γίνεται σύγκριση του ΕΕΟΙ με τον δείκτη CII και τέλος, υπολογίζεται νέος δείκτης ΚΡΙρ και εκτιμάται η συσχέτισή του με τον ΕΕΟΙ.

2 Βασικοί παράμετροι

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικοί παράμετροι όσον αφορά το υπό μελέτη πλοίο και τα συστήματα απόκτησης δεδομένων.

2.1 Στοιχεία υπό μελέτη πλοίου

Παρακάτω γίνεται αναφορά στα βασικά στοιχεία του πλοίου που μελετάται, στην κύρια μηχανή του, στις συνθήκες και αποτελέσματα των speed trials.

Το πλοίο στο οποίο επιλέχθηκε να γίνει η ανάλυση της παρούσας εργασίας είναι ένα Product Oil Tanker με DWT=38500 t ναυπηγημένο στα ναυπηγεία της Guangzhou, με κύρια στοιχεία να παρουσιάζονται σε πίνακα (Πίνακας 2.1) και φέρει κύρια μηχανή B&W 6S50MC με στοιχεία σε πίνακα(Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.1 Κύρια στοιχεία πλοίου

Ship Particulars	
Ship name	“MEG”
Length overall	182,5 m
Length between P.	174,5 m
Breath molded	27,4 m
Depth molded	16,8 m
Design draught	9,55 m
Scantling draught	11,6 m
DWT	38500 t

Πίνακας 2.2 Στοιχεία κύριας μηχανής

Main Engine Particulars	
Type	B&W 6S50MC
Rated power	9480 kW
Rated revolution	131 rpm
Manufacturer	Dalian Marine Diesel Factory

Γίνεται επίσης αναφορά στις συνθήκες του πλοίου και του περιβάλλοντος των speed trials (Πίνακας 2.3 και Πίνακας 2.4 αντίστοιχα), καθώς επίσης και στα συμπεράσματα αυτών σε πίνακα «φόρτισης» (Πίνακας 2.5).

Πίνακας 2.3 Συνθήκες πλοίου κατά τα speed trials

Ship conditions	
Fwd. Draught	9,55 m
Mid. Draught	9,55 m
Aft. Draught	9,55m

Πίνακας 2.4 Συνθήκες θάλασσας κατά τα speed trials

Sea conditions	
Sea area	Domain of South China Sea
Sea water temperature	23,0° C
Sea water density	1,025 t/m ³
Wind speed	11,7 m/s
Wind direction	10°
Sea state	4

Πίνακας 2.5 Αποτελέσματα φόρτισης των speed trials

Shaft power (kW)	Delivery power (kW)	Ship speed (kn)	RPM
4520	4429,6	13,44	103,9
6906,5	6768,37	15,13	119
7892,5	7734,65	15,68	124,3
9144	8961,12	15,98	129,5

2.2 Συστήματα απόκτησης δεδομένων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η παρούσα μελέτη, λήφθηκαν δεδομένα από τα Noon reports του πλοίου και από όργανα υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας.

- ✓ Το διάστημα που μελετήθηκε είναι Φεβρουάριος 2018 – Ιούνιος 2018.
- ✓ Όσον αφορά τα δεδομένα υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας (High frequency), έγινε λήψη τους ανά λεπτό για το διάστημα αυτό.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω:

2.2.1 Αισθητήρας Θερμοκρασίας Καυσαερίων

Προκειμένου να προστατευτεί η κύρια μηχανή ενός πλοίου από την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων αλλά και για να επιτευχθεί καλύτερη παρακολούθηση της απόδοσής της γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας εντός του σωλήνα εξαγωγής καυσαερίων. Το όργανο που χρησιμοποιείται είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και είναι κατασκευασμένος από υλικό υψηλής αντοχής στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται.

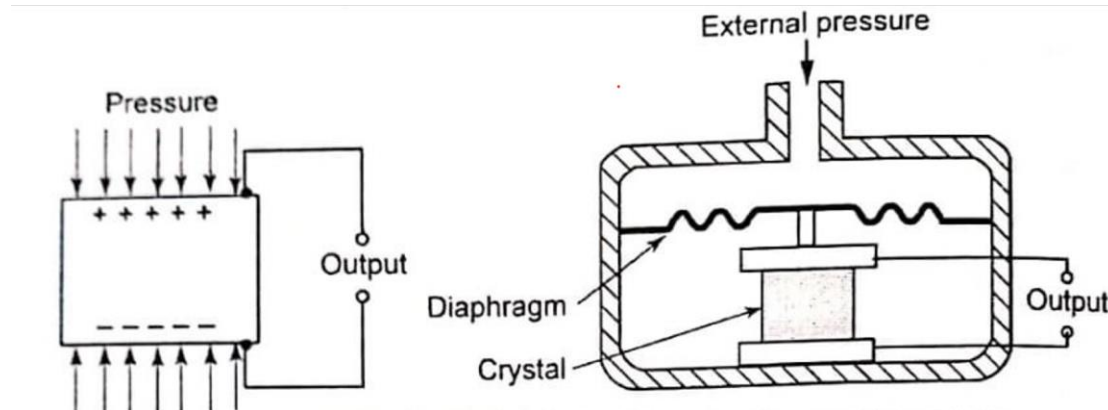


Εικόνα 5 Αισθητήρας Θερμοκρασίας Καυσαερίων ⁴

⁴ Figure from: siliconmarine.com

2.2.2 Αισθητήρας Πίεσης

Η λειτουργία και απόδοση του κινητήρα εξαρτάται από την ποιότητα της καύσης και κατ' επέκταση από την παροχή αέρα μέσα στον κύλινδρο. Είναι λοιπόν σημαντική η ύπαρξη ενός αισθητήρα πίεσης αέρα για την παρακολούθηση της παροχής του. Συγκεκριμένα, ο αισθητήρας λειτουργεί με τη βοήθεια ενός πιεζοηλεκτρικού κρύσταλλου.



Εικόνα 6 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (αριστερά), Αισθητήρας πίεσης με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (δεξιά)⁵

2.2.3 Ταχύμετρο

Το ταχύμετρο είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής οποιουδήποτε περιστρεφόμενου αντικειμένου, όπως ένας άξονας ή ένας κινητήρας. Γίνεται χρήση τέτοιων αισθητήριων οργάνων στο σύστημα πρόωσης του πλοίου.

Το ηλεκτρονικό ταχύμετρο χρησιμοποιεί έναν μαγνητικό αισθητήρα τοποθετημένο κοντά στο περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα, για την παραγωγή ηλεκτρονικών παλμών σε συχνότητα ανάλογη με τη ταχύτητα του κινητήρα. Το κύκλωμα στον μετρητή μετατρέπει τη συχνότητα των παλμών σε στροφές ανά λεπτό το οποίο αποτέλεσμα εμφανίζεται είτε μέσω αναλογικής βελόνας ή με ψηφιακό τρόπο.

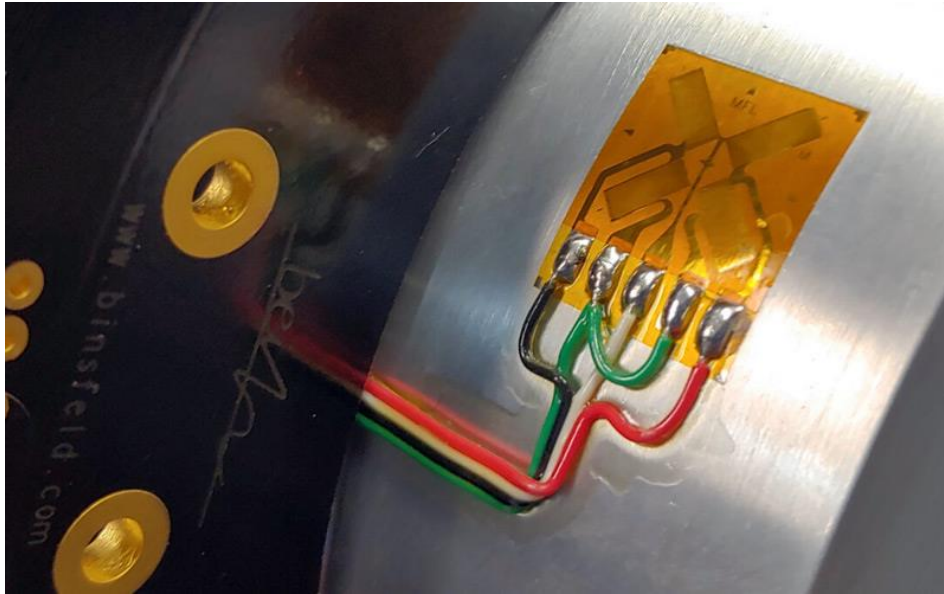
2.2.4 Μέτρηση Ισχύος

Ένας μετρητής ισχύος μετρά τη ροπή στρέψης, την ταχύτητα και την ισχύ σε πραγματικό χρόνο. Όταν εφαρμόζεται ροπή σε έναν άξονα, εμφανίζεται μια μικρή καταπόνηση ή στρέψη στην επιφάνειά του. Ένας μετρητής λοιπόν, μετρά αυτήν την καταπόνηση με έναν αισθητήρα και μεταδίδει ασύρματα το σήμα σε έναν σταθερό δέκτη, ο οποίος επεξεργάζεται και υπολογίζει μια τιμή ροπής με βάση τις μηχανικές ιδιότητες του άξονα. Στη συνέχεια, η μέτρηση της ροπής συνδυάζεται με μια μέτρηση ταχύτητας (συνήθως μετράται με ένα ενσωματωμένο στροφόμετρο) για τον υπολογισμό της ισχύος.

Ο αισθητήρας μπορεί να είναι:

- Οπτικός
- Μαγνητικός
- Strain Gauge (Εικόνα 7)

⁵ Figure from: Piezoelectric Pressure Sensor Working Principle, theteche.com



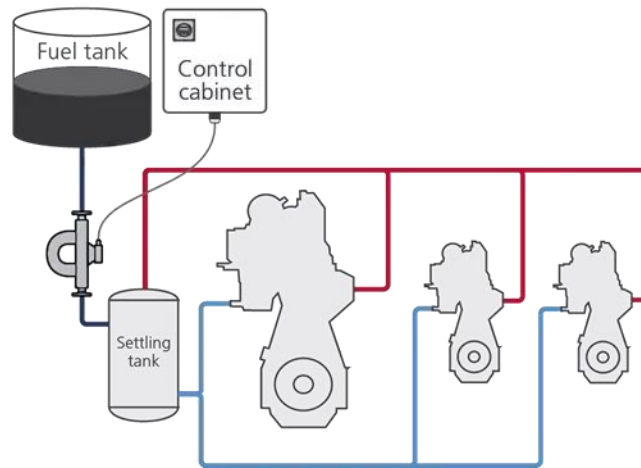
Εικόνα 7 Strain Gauge⁶

2.2.5 Μετρητής ροής

Ο απλούστερος τρόπος μέτρησης της κατανάλωσης καυσίμου είναι η εγκατάσταση ενός μετρητή ροής, ο οποίος μετρά το καύσιμο που μεταφέρεται από τη δεξαμενή καυσίμου στη δεξαμενή καθίζησης. Η στάθμη του καυσίμου στη δεξαμενή καθίζησης συνήθως διατηρείται από αισθητήρες στάθμης και επομένως η ροή προς τη δεξαμενή καθίζησης είναι ίση με αυτή που καταναλώνεται (Εικόνα 8). Για πιο λεπτομερή παρακολούθηση, μπορεί να εισαχθεί μια ρύθμιση 3 μετρητών. Με αυτό το σύστημα η συνολική κατανάλωση καυσίμου παρακολουθείται με ροή από τη δεξαμενή καυσίμου στη δεξαμενή καθίζησης. Ένα σύνολο μετρητών ροής, εγκατεστημένα στην γραμμή παροχής καυσίμου και στη γραμμή επιστροφής, θα παρέχει τη συνολική μέτρηση της κατανάλωσης, και σε περίπτωση ύπαρξης υπόλοιπων καταναλωτών, με αφαίρεση, μπορεί να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής (Εικόνα 9). Για την πλήρη κατανόηση της κατανάλωσης καυσίμου, γίνεται μέτρηση σε κάθε είσοδο και έξοδο καταναλωτή. Αυτό παρέχει μια πλήρη εικόνα για την κατανάλωση καυσίμου κάθε καταναλωτή, καθώς και ευκολότερο εντοπισμό σε τυχόν αποκλίσεις από τις προσδοκίες ή τα πρότυπα απόδοσης (Εικόνα 10).

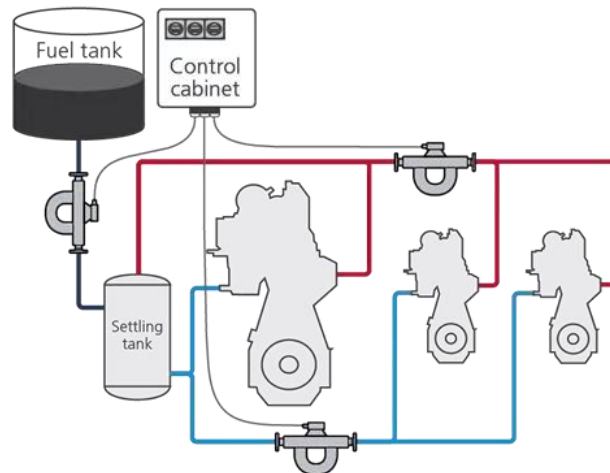
⁶ Figure from: Binsfeld Engineering, binsfeld.com

1-meter setup



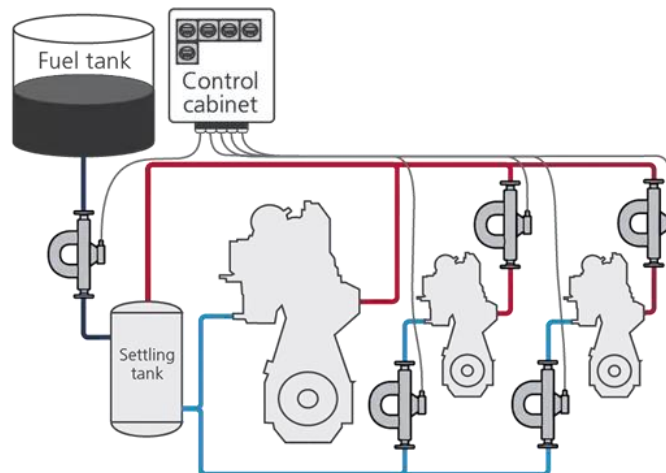
Εικόνα 8 Διάταξη ενός μετρητή ροής

3-meter setup



Εικόνα 9 Διάταξη τριών μετρητών ροής⁷

Full measurement setup



Εικόνα 10 Ολοκληρωμένη διάταξη

⁷ Figures from: Insatech Fuel Consumption System, insatechmarine.com

3 Αρχικοί υπολογισμοί

Ακολουθεί όλη η ανάλυση και οι υπολογισμοί αναλυτικά για ένα μήνα που επιλέχθηκε, και συγκεκριμένα για τον Απρίλιο, και σε τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα για όλο το χρονικό διάστημα που έχει αναφερθεί, στα οποία έγινε αντίστοιχη ανάλυση και υπολογισμοί. Παρακάτω γίνεται πίνακας με τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και σημειώνεται από που αντλήθηκαν (noon- high frequency reports).

Πίνακας 3.1 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Παράμετροι	Αυτόματο σύστημα δειγματοληψίας	Ημερήσιες αναφορές
Drafts [m]		✓
Speed over ground [knots]	✓	
Main engine HFO consumption [tn/hr]	✓	✓
DG FO flow mass [tn/hr]	✓	✓
Aux boiler consumption [tn/day]	✓	✓
Me power [kW]	✓	
DG total power [kW]	✓	
Steaming hours [hr]		✓
Wind direction [°]	✓	
Wind speed [m/s]	✓	
True ship heading [°]	✓	

Για τον υπολογισμό του ΕΕΟΙ τόσο για τα noon reports όσο και για τα high frequency χρειάστηκε ο υπολογισμός της μάζας του φορτίου m_{cargo} , καθώς δεν υπήρχαν στα αντίστοιχα δεδομένα των δυο παραπάνω reports. Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση (Εξ. 3.1) που χρησιμοποιήθηκε τελικά για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων ενώ πιο αναλυτικά παρουσιάζεται σε παράρτημα (Παράρτημα Α).

$$M_{cargo} = 4079 * Draft_{mean} - 4385 * Trim - 12939$$

Εξ. 3.1

$$\text{Για τιμές: } Draft_{mean} \in [7,12] \text{ και } Trim \in [0,2.5]$$

4 Επεξεργασία δεδομένων

4.1 Noon reports

Προκειμένου να υπολογισθεί ο ΕΕΟΙ χρειάστηκε να υπολογισθεί η ημερήσια διανυόμενη απόσταση καθώς ήταν ελλιπές δεδομένο στα noon reports.

Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της απόστασης που διανύθηκε ανά ημέρα χρησιμοποιήθηκε το άθροισμα των αποστάσεων ανά λεπτό από τα δεδομένα των High frequency , προσθέτοντας, δηλαδή την δεδομένη ταχύτητα ανά λεπτό εφόσον έχει μετατραπεί από knots σε nm/min, όπως φαίνεται παρακάτω. Επισημαίνεται πως δεν χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα στην ταχύτητα, καθώς αυτό γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

$$D = \sum_n (V * t * \mu) \quad [nm]$$

Εξ. 4.1

D: η απόσταση που διανύεται ανά ημέρα

V: η ταχύτητα μετρομένη ανά λεπτό, σε knots

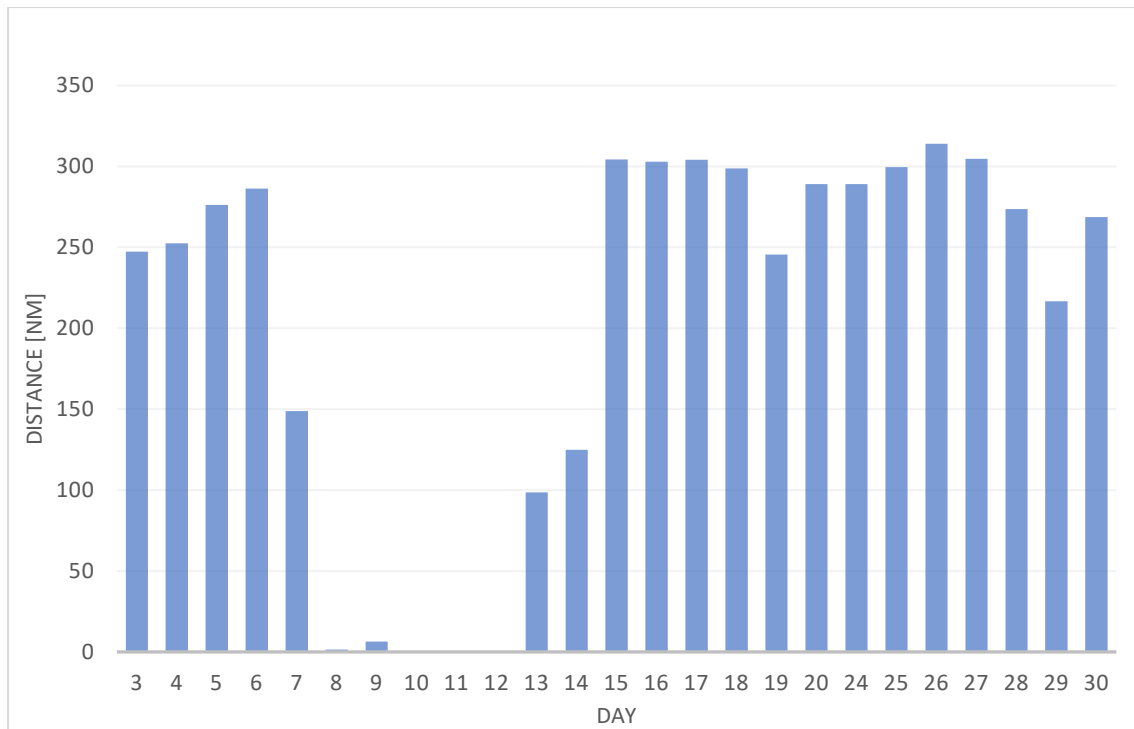
μ : $\mu=1/60$: Μετατρέπεται η ταχύτητα σε nm/min.

t: $t=1$ [min] ο χρόνος που ταξιδεύει στην αντίστοιχη ταχύτητα

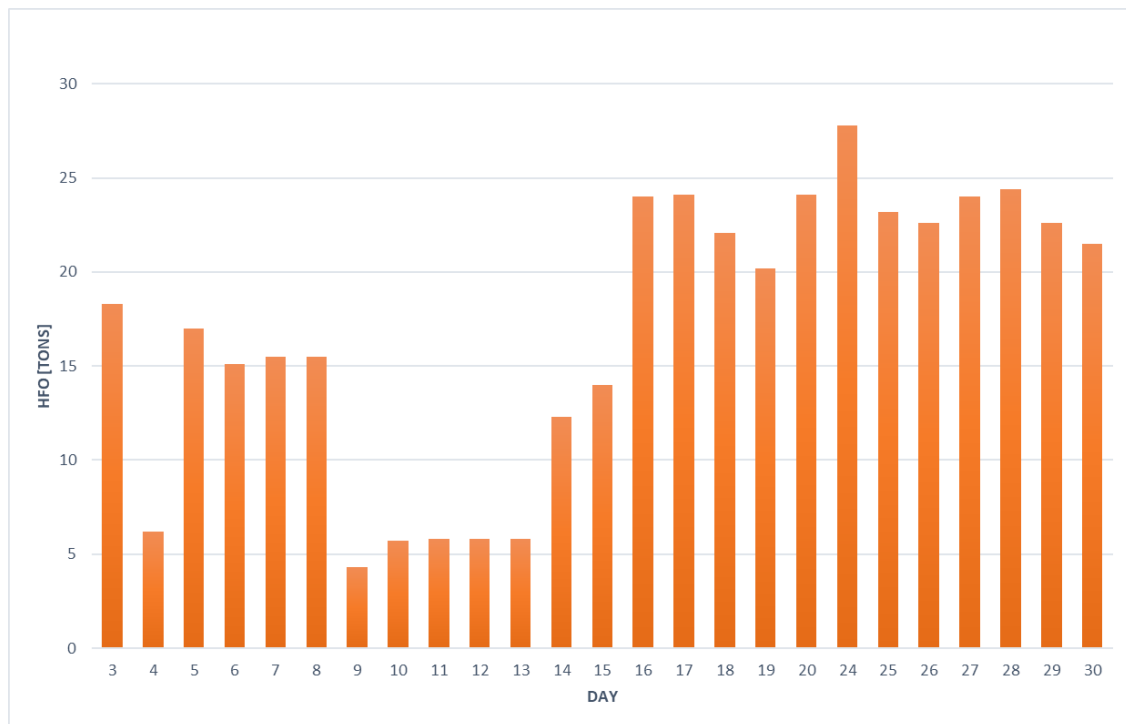
Όσον αφορά τις καταναλώσεις λήφθηκαν αυτές της κύριας μηχανής, των 3 ηλεκτρογεννητριών και του boiler όπως δίνονται.

Τέλος, σύμφωνα με τα δεδομένα σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου MDO σαν καύσιμο (μόνο HFO).

Στα Διάγραμμα 4.1 και Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζονται οι καταναλώσεις HFO καυσίμου ανά ημέρα σε τόνους και η απόσταση που διανύεται ανά ημέρα σε ναυτικά μίλια, αντίστοιχα.



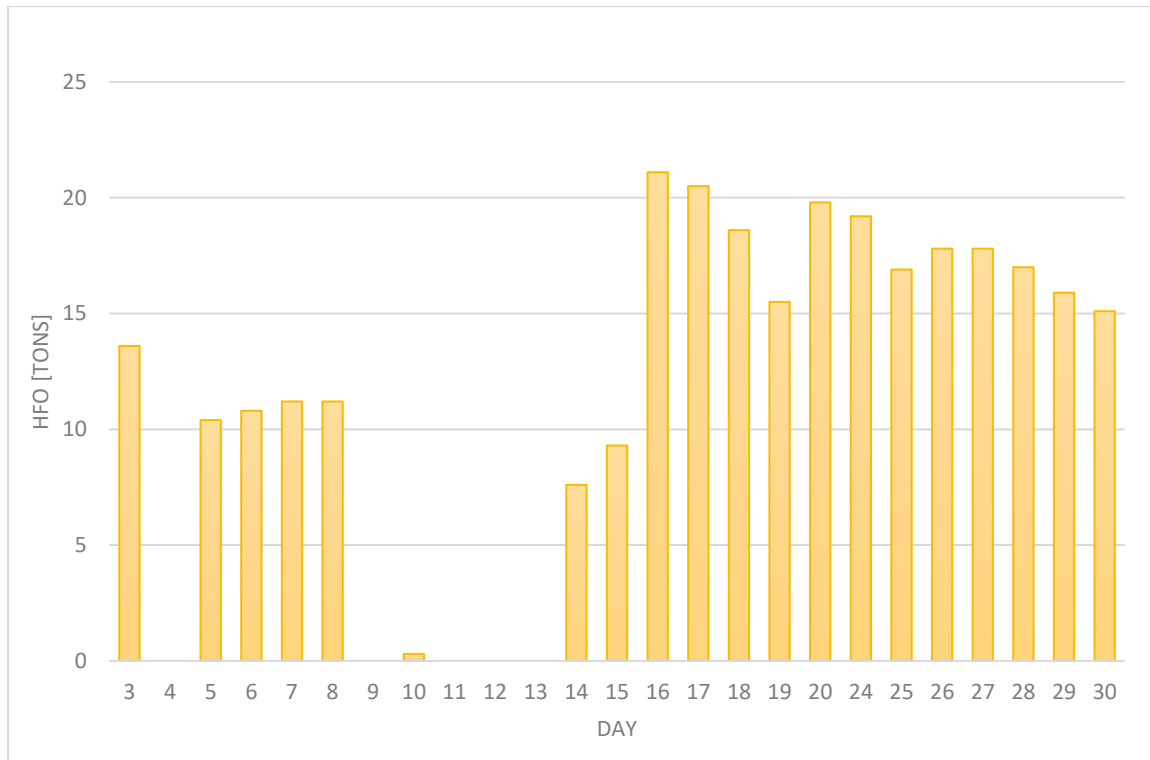
Διάγραμμα 4.1 Απόσταση που διανύεται ανά ημέρα (noon)



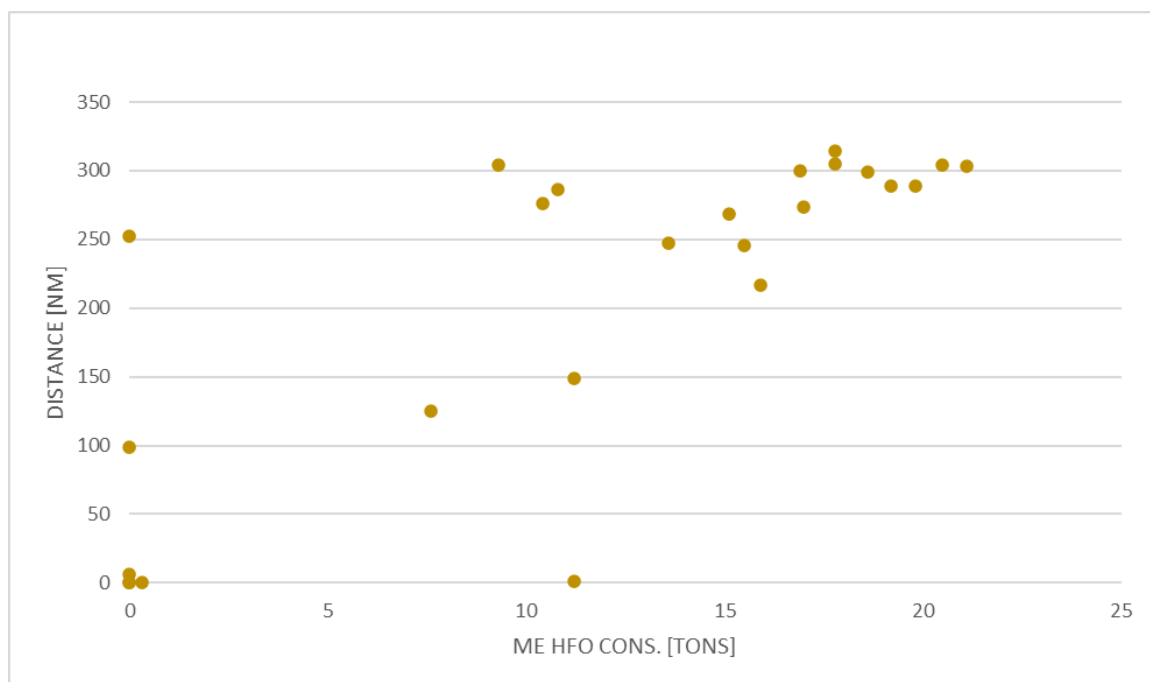
Διάγραμμα 4.2 Κατανάλωση HFO ανά ημέρα (noon)

Συγκρίνοντας τα δύο παραπάνω διαγράμματα και κάνοντας την αντιστοίχιση της κατανάλωσης με την απόσταση που διανύεται, είναι φανερό πώς τις ημέρες 10,11,12 το πλοίο είναι στο λιμάνι εφόσον διανύει σχεδόν μηδενική απόσταση και η κατανάλωση HFO είναι χαμηλή. Όσον αφορά την ημέρα 9 μπορεί να εκτιμηθεί ότι το πλοίο είναι και πάλι στο λιμάνι ασχέτως με την ελάχιστη διανυόμενη απόσταση που βγάλαμε από τα δεδομένα high

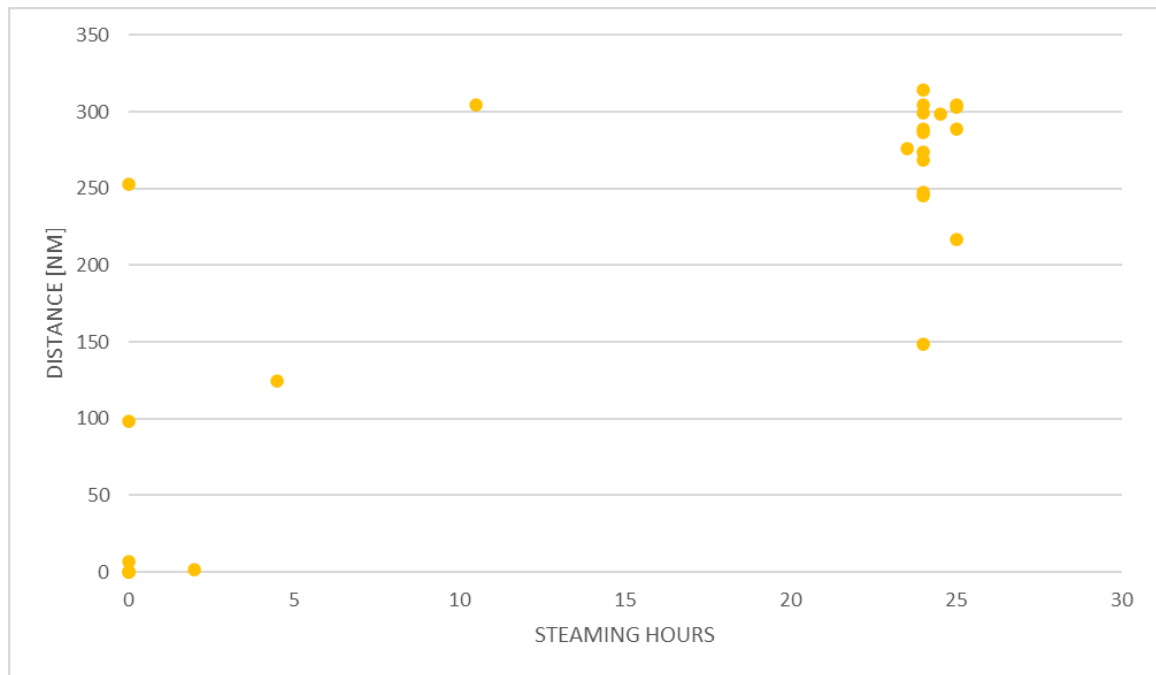
frequency, καθώς τόσο η κατανάλωση και, όπως προαναφέρθηκε, η απόσταση είναι πολύ μικρή. Μία ακόμη ημέρα που δεν συμβαδίζει η κατανάλωση με τα ναυτικά μίλια, είναι η ημέρα 4 στην οποία διανύεται μεγάλη απόσταση (252,39 nm) ενώ η κατανάλωση είναι σχετικά χαμηλή. Είναι λοιπόν χρήσιμο να γίνει ένα διάγραμμα με την κατανάλωση μόνο της κύριας μηχανής, αλλά και διάγραμμα κατανάλωσης κύριας μηχανής με διανυόμενη απόσταση, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Διάγραμμα 4.3, Διάγραμμα 4.4).



Διάγραμμα 4.3 Κατανάλωση HFO κύριας μηχανής ανά ημέρα (ποση)



Διάγραμμα 4.4 Κατανάλωση κύριας μηχανής- διανυόμενη απόσταση ανά ημέρα (ποση)



Διάγραμμα 4.5 Διανύομενη απόσταση με steaming hours

Παρατηρείται λοιπόν πως η κύρια μηχανή δεν καταναλώνει καθόλου καύσιμο και για την ημέρα 4, σύμφωνα με τα noon reports.

Τέλος, την ημέρα 8, παρατηρείται μεγάλη κατανάλωση χωρίς το πλοίο να διανύει καθόλου απόσταση. Λαμβάνοντας υπόψη και συγκρίνοντας τις ώρες λειτουργίας (steaming hours) που δίνονται στα noon reports και της κατανάλωσης, συμπεραίνεται η μεγάλη πιθανότητα ανθρώπινου λάθους καταγραφής δεδομένων της συγκεκριμένης ημέρας. Παρουσιάζεται και σε διάγραμμα (Διάγραμμα 4.5). Πιο συγκεκριμένα η κατανάλωση των ημερών 7 και 8 είναι ίδια ενώ οι ώρες λειτουργίας είναι 24 και 2 αντίστοιχα. Τέλος και για την ημέρα 13 η κατανάλωσης της κύριας μηχανής είναι μηδενική ενώ η απόσταση δεν είναι ασήμαντη.

Πριν βγει οποιοδήποτε συμπέρασμα, είναι καλό να υπολογισθούν τα αντίστοιχα μεγέθη και για high frequency δεδομένα, και μετά συγκρίνοντάς τα, να γίνουν οι κατάλληλες παραδοχές.

4.2 High Frequency

Για τον αντίστοιχο υπολογισμό της κατανάλωσης στα high frequency δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν από τα διαθέσιμα στοιχεία τα παρακάτω (όπως ακριβώς αναφέρονται στα δεδομένα):

- Aux Boiler Flow Mass (per day)
- DG FO Flow Mass (tn/hr)
- ME Flow Mass (tn/hr)

Σημειώνεται:

- ✓ Η κατανάλωση του Boiler θεωρήθηκε σε [tn/24h].

Έτσι, η κατανάλωση υπολογίστηκε αθροιστικά, εφόσον δίνεται σε tn/h ανά λεπτό διαιρείται με τα λεπτά (/60), και προστίθεται.

Δηλαδή:

$$\Sigma HFO_{CONS} = \Sigma_n \left(ME_{CONS} + DG_{CONS} + Boiler_{CONS} * \frac{1}{24} \right) * \frac{1}{60} [tons]$$

Εξ. 4.2

Ο υπολογισμός της απόστασης, γίνεται όμοια με αυτή των noon reports, ως δηλαδή το άθροισμα των αποστάσεων ανά λεπτό, προσθέτοντας την δεδομένη ταχύτητα ανά λεπτό εφόσον έχει μετατραπεί από knots σε nm/min. Και εδώ δεν χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα στην ταχύτητα αντίστοιχα με noon reports. Όπως:

$$D = \Sigma_n (V * t * \mu) [nm]$$

Εξ. 4.3

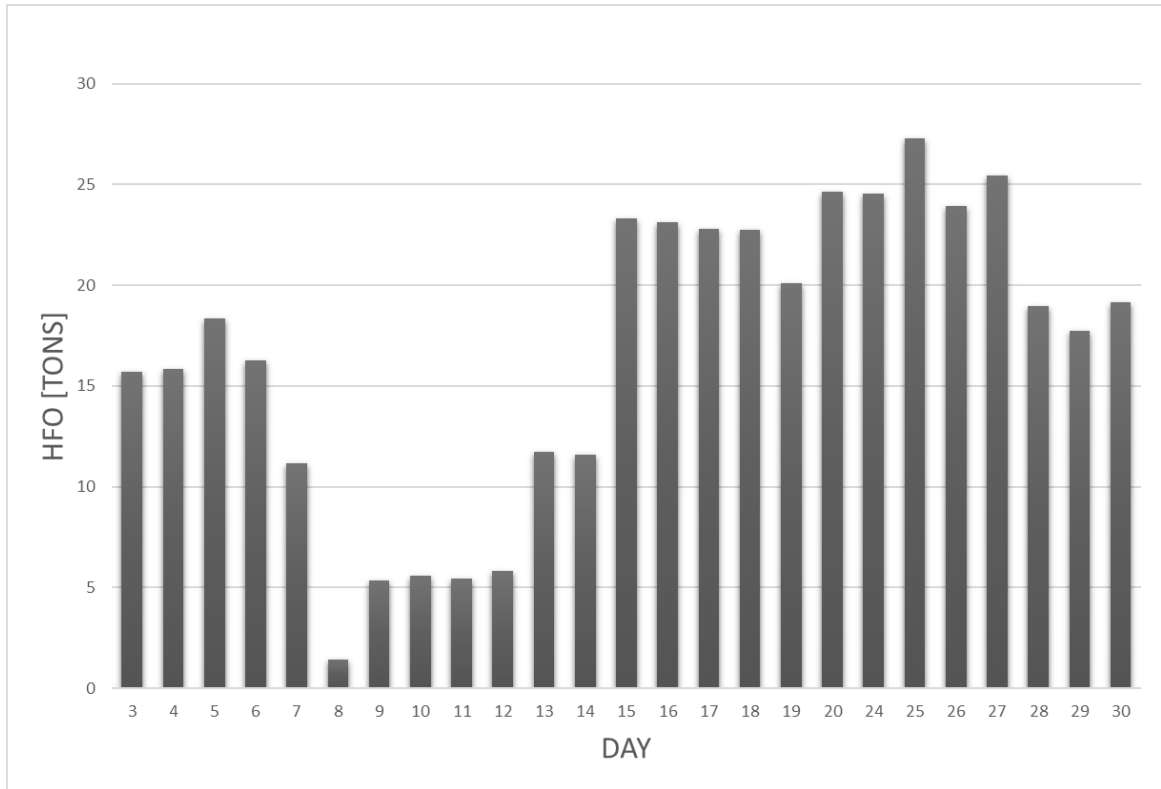
D: η απόσταση που διανύεται ανά ημέρα

V: η ταχύτητα μετρομένη ανά λεπτό, σε knots

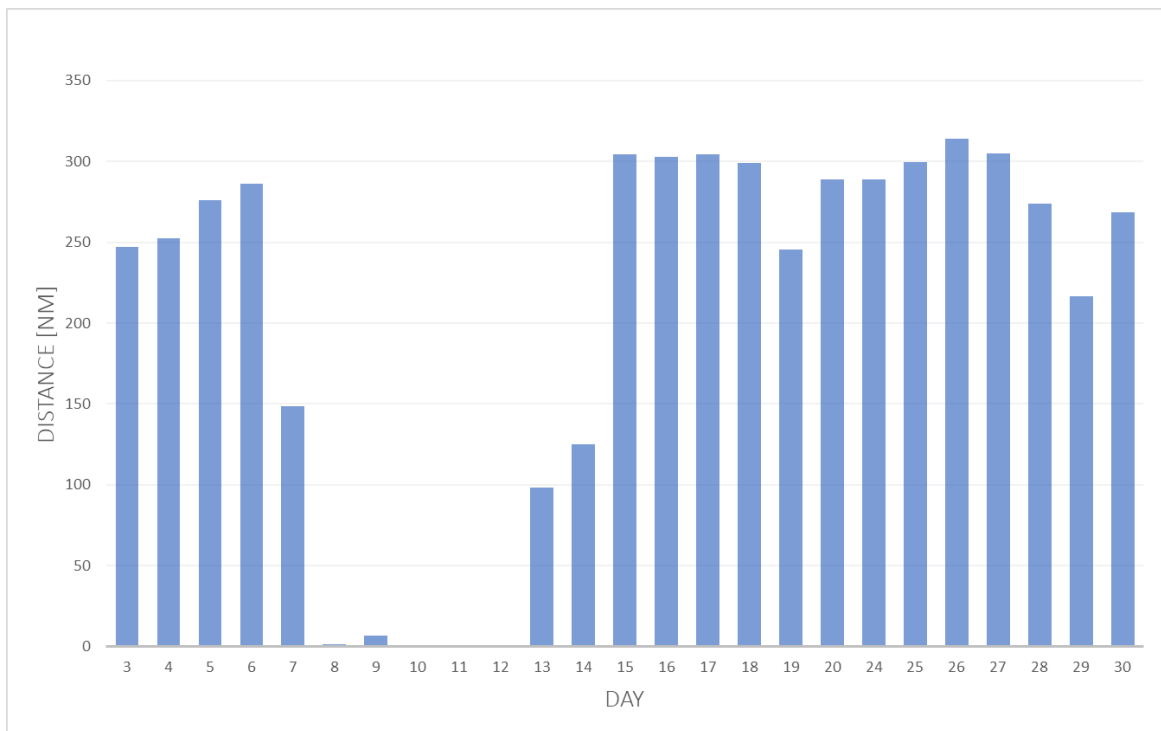
μ: $\mu=1/60$: Μετατρέπεται η ταχύτητα σε nm/min.

t: $t=1 [min]$ ο χρόνος που ταξιδεύει στην αντίστοιχη ταχύτητα

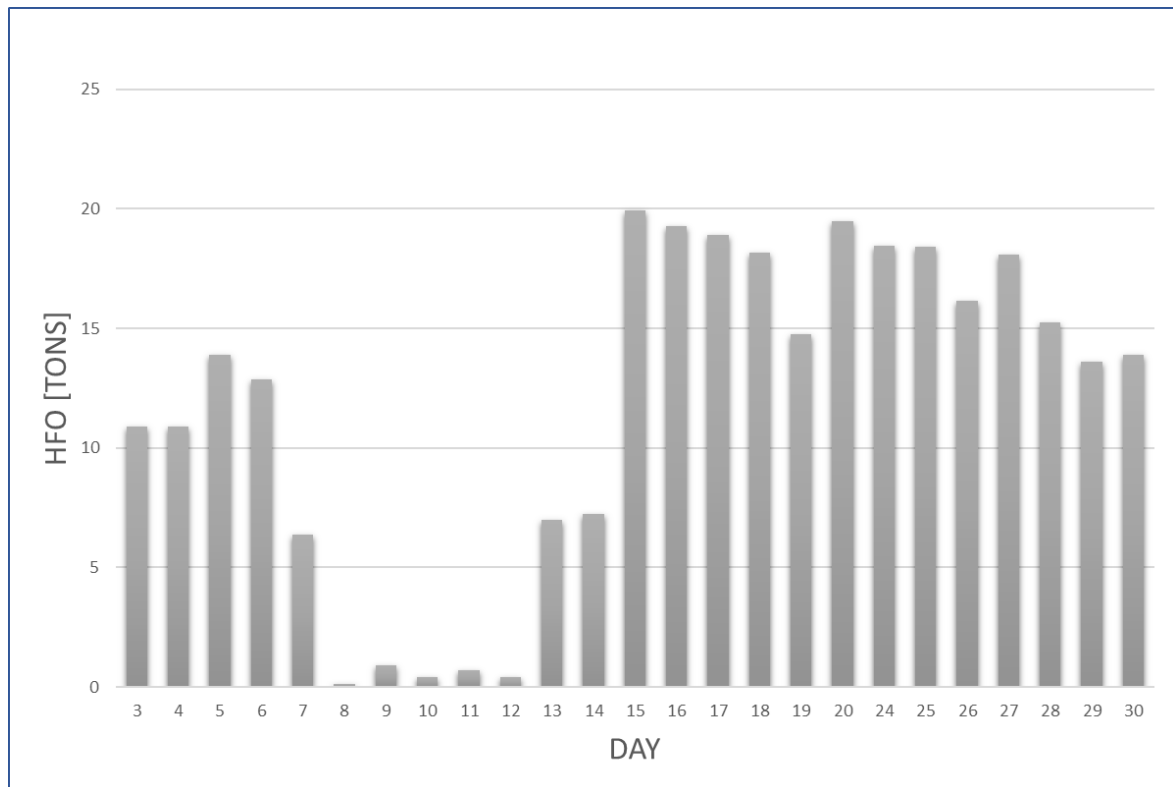
Στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 4.6) και (Διάγραμμα 4.7) παρουσιάζονται οι καταναλώσεις HFO καυσίμου ανά ημέρα σε τόνους και η απόσταση που διανύεται ανά ημέρα σε ναυτικά μίλια, αντίστοιχα. Επίσης, και σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται η κατανάλωση ανά ημέρα μόνο της κύριας μηχανής, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.8.



Διάγραμμα 4.6 Κατανάλωση HFO ανά ημέρα (high-freq)

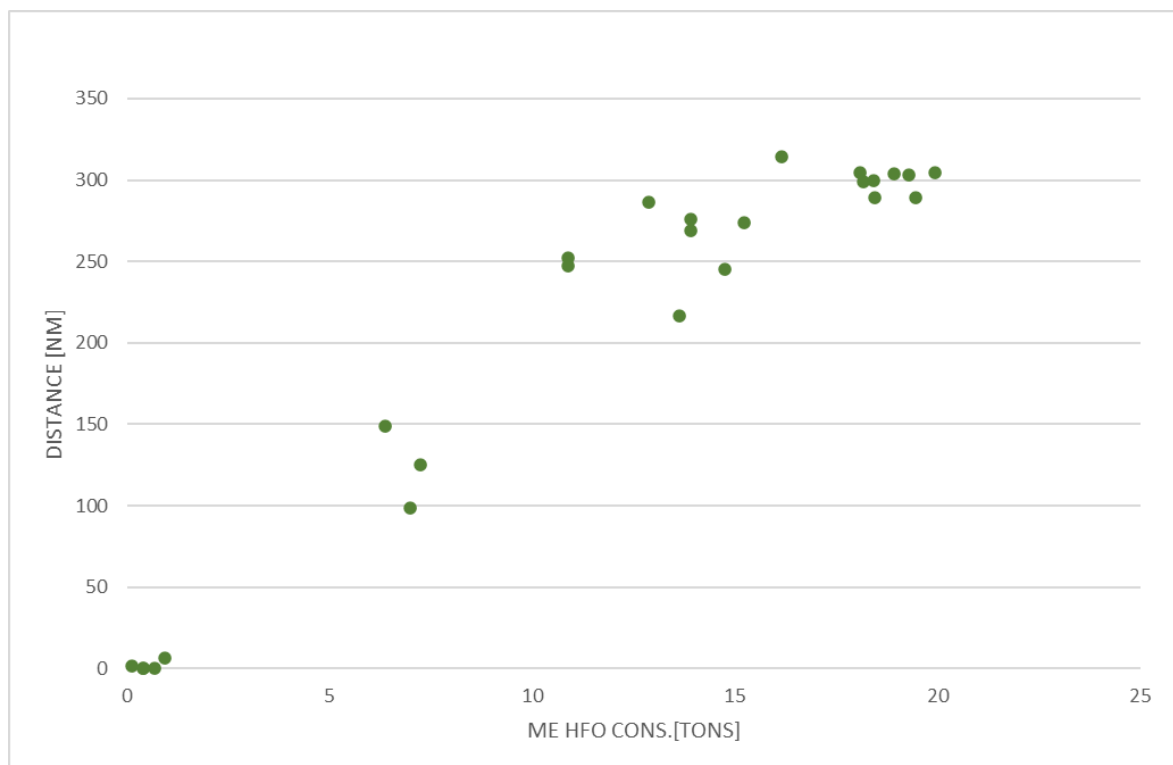


Διάγραμμα 4.7 Απόσταση που διανύεται ανά ημέρα (high-freq)



Διάγραμμα 4.8 Κατανάλωση HFO κύριας μηχανής ανά ημέρα (high-freq)

Γίνεται και εδώ διάγραμμα κατανάλωσης κύριας μηχανής και διανυόμενης απόστασης όπως φαίνεται παρακάτω στο Διάγραμμα 4.9 .



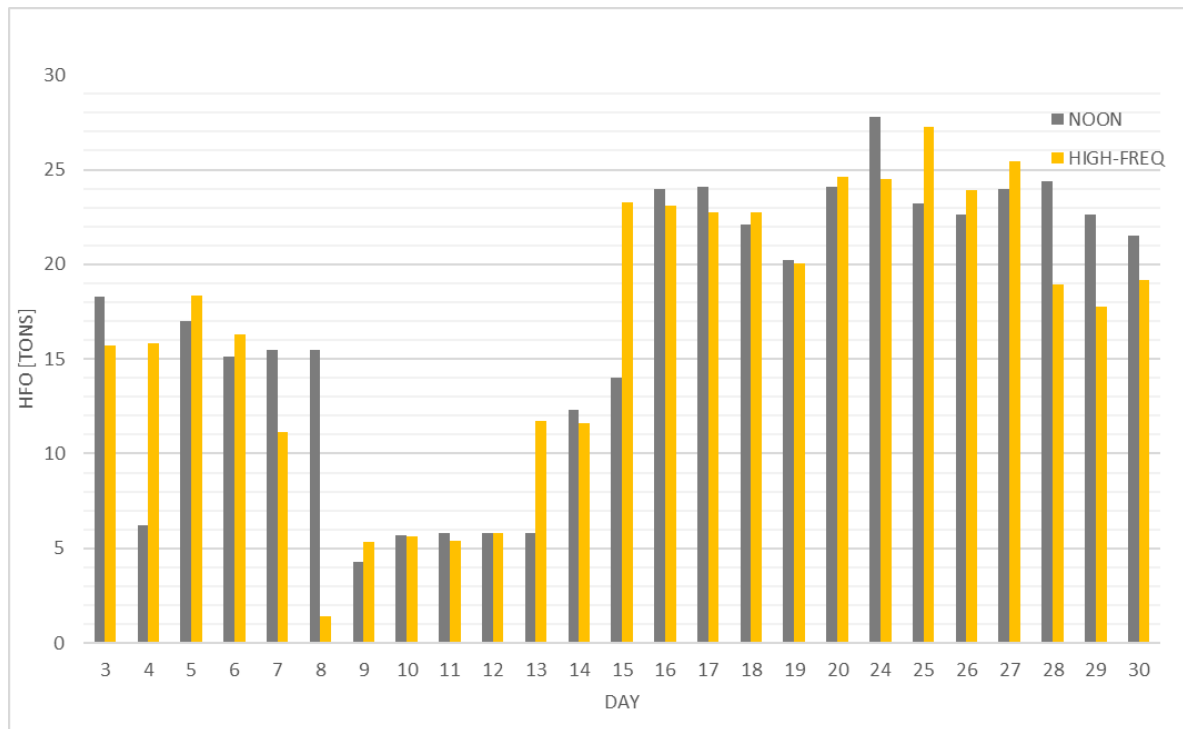
Διάγραμμα 4.9 Κατανάλωση κύριας μηχανής- διανυόμενη απόσταση ανά ημέρα (high-freq)

Παρατηρείται σχετική αντιστοίχιση της κατανάλωσης ΗFO με την απόσταση που διανύεται ανά ημέρα. Για τις ημέρες 8 έως 12 υπάρχει μικρή κατανάλωση της κύριας μηχανής ενώ το πλοίο δεν ταξιδεύει. Σε αυτή την περίπτωση το πιο πιθανό είναι να βασίζεται σε τυχόν ελιγμούς που έγιναν στο λιμάνι.

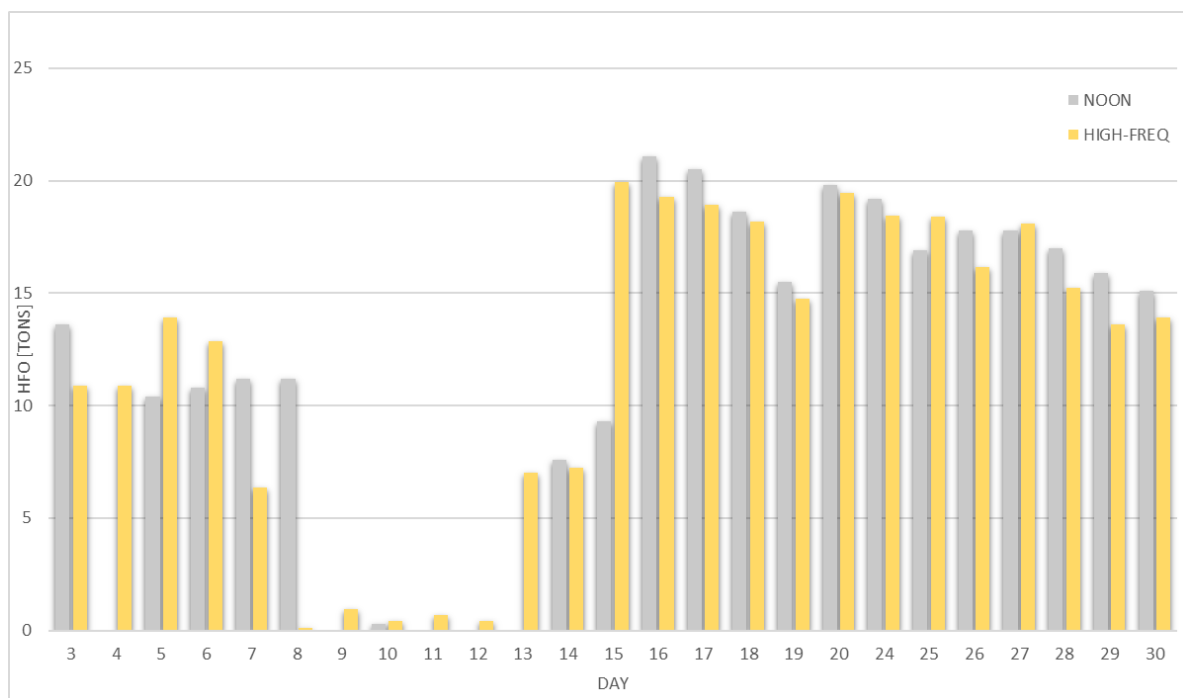
4.3 Σύγκριση noon με high frequency

Καλό είναι να γίνει σύγκριση της κατανάλωσης, συνολικής και μόνο κύριας μηχανής, μεταξύ των noon reports και high frequency reports. Έτσι παρουσιάζονται σε από κοινού διαγράμματα των παραπάνω για μεγαλύτερη ευκολία.

Προφανώς όσον αφορά την απόσταση δεν έχει νόημα σύγκρισης καθώς όπως έχει αναφερθεί υπολογίζεται ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

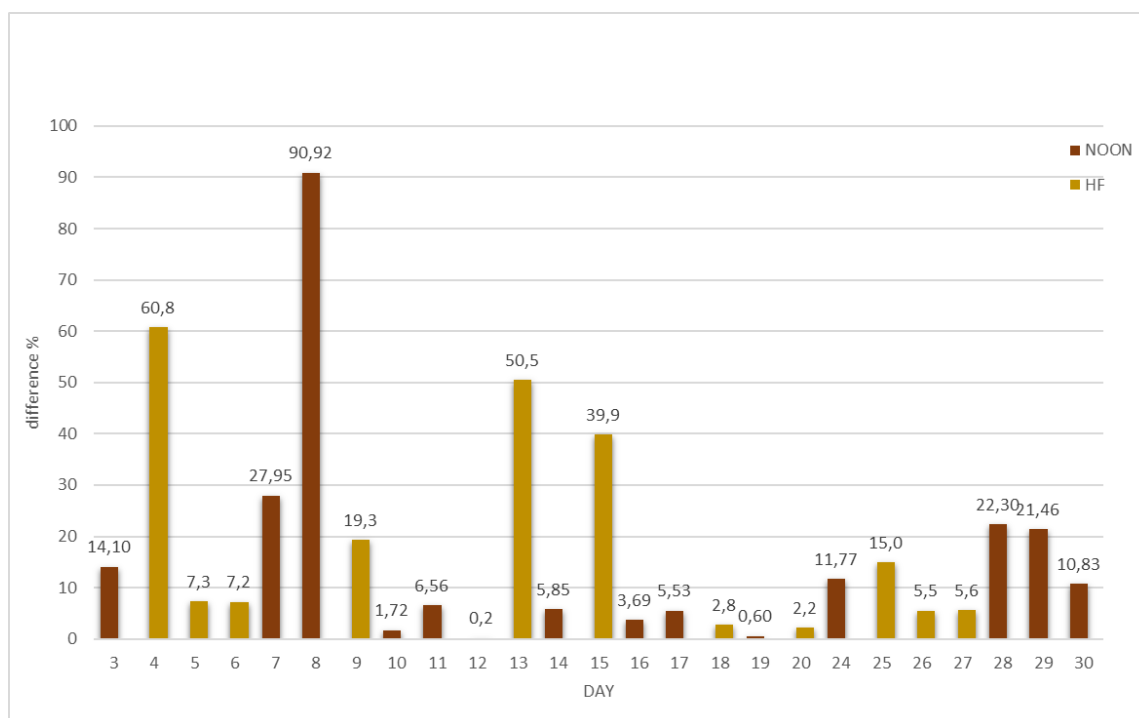


Διάγραμμα 4.10 Κατανάλωση HFO ανά ημέρα noon και high-freq



Διάγραμμα 4.11 Κατανάλωση HFO κύριας μηχανής ανά ημέρα noon και high-freq

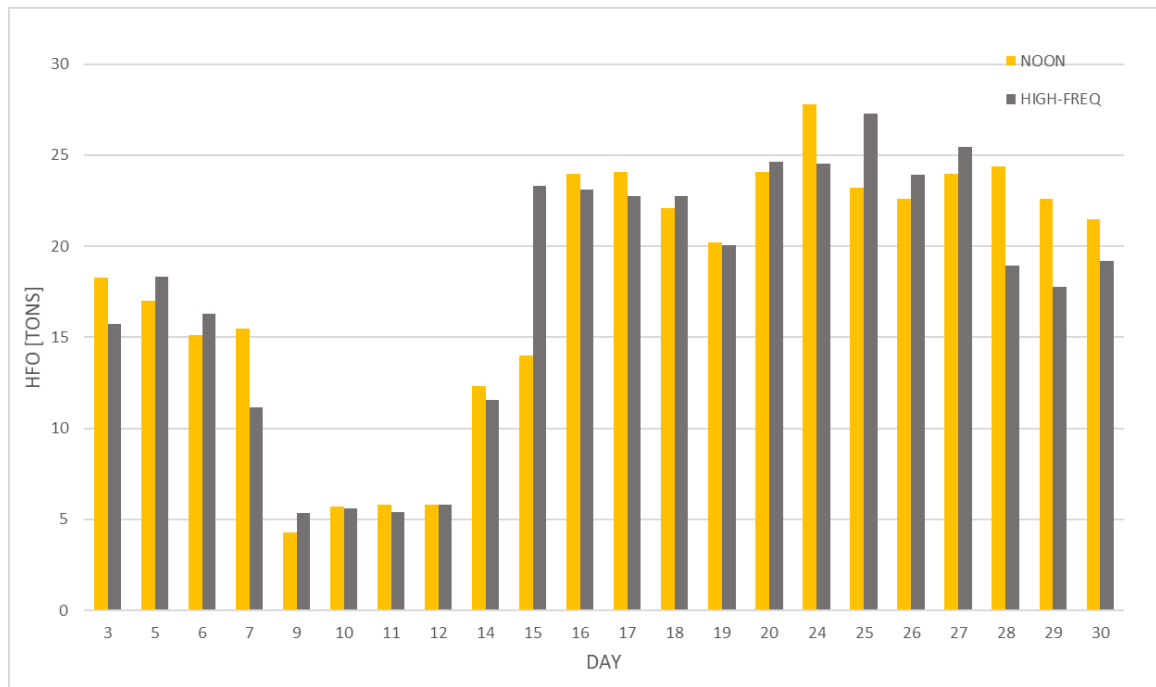
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα και κυρίως το Διάγραμμα 4.11 είναι αισθητές οι μεγάλες διαφορές κατανάλωσης HFO για τις ημέρες 4,8,13, που κυρίως βασίζονται σε πιθανά σφάλματα στα Noon reports. Τα δεδομένα για αυτές τις ημέρες θα πρέπει να αποκλειστούν στον υπολογισμό του ΕΕΟΙ εφόσον γίνεται σύγκριση μεταξύ Noon και High-frequency. Στην περίπτωση που γίνονται υπολογισμοί μόνο με τα δεδομένα από τα High-frequency θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν καθώς όπως αναφέρθηκε η κατανάλωση με την απόσταση έχουν λογικές τιμές κατ' αντιστοιχία. Προκυμμένου να γίνει πιο ευδιάκριτη η διαφορά τους υπολογίζεται η ποσοστιαία διαφορά της κατανάλωσης και παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.12.



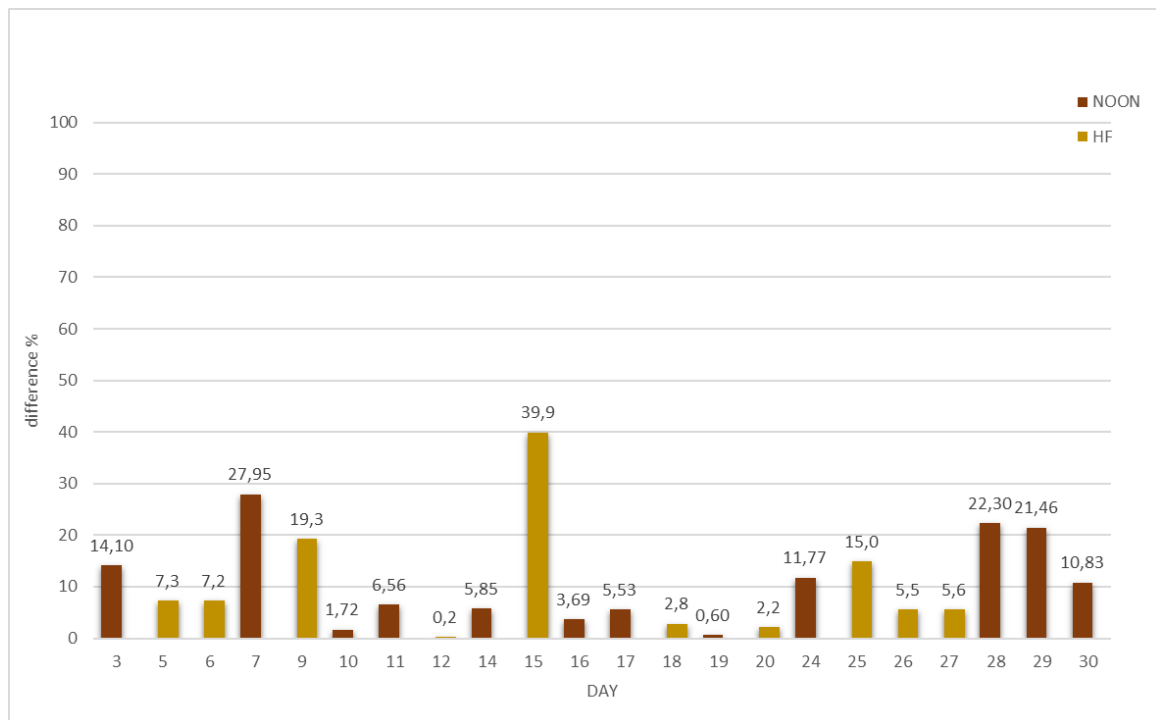
Διάγραμμα 4.12 Ποσοστιαία διαφορά κατανάλωσης HFO μεταξύ noon και high frequency

Αποκλείοντας λοιπόν τις 3 αυτές ημέρες το διάγραμμα της κατανάλωσης γίνεται όπως παρακάτω(Διάγραμμα 4.13), και η ποσοστιαία διαφορά τους φαίνεται στο Διάγραμμα 4.14.

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 4.13 Κατανάλωση HFO ανά ημέρα μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων ημερών



Διάγραμμα 4.14 Ποσοστιαία διαφορά κατανάλωσης HFO μεταξύ noon και high frequency μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων ημερών

5 Υπολογισμός ΕΕΟΙ

Έχοντας υπολογίσει την κατανάλωση και την απόσταση από τα δεδομένα, γίνεται εφικτός ο υπολογισμός ενός αρχικού ΕΕΟΙ, όπως παρακάτω.

5.1 ΕΕΟΙ Noon reports

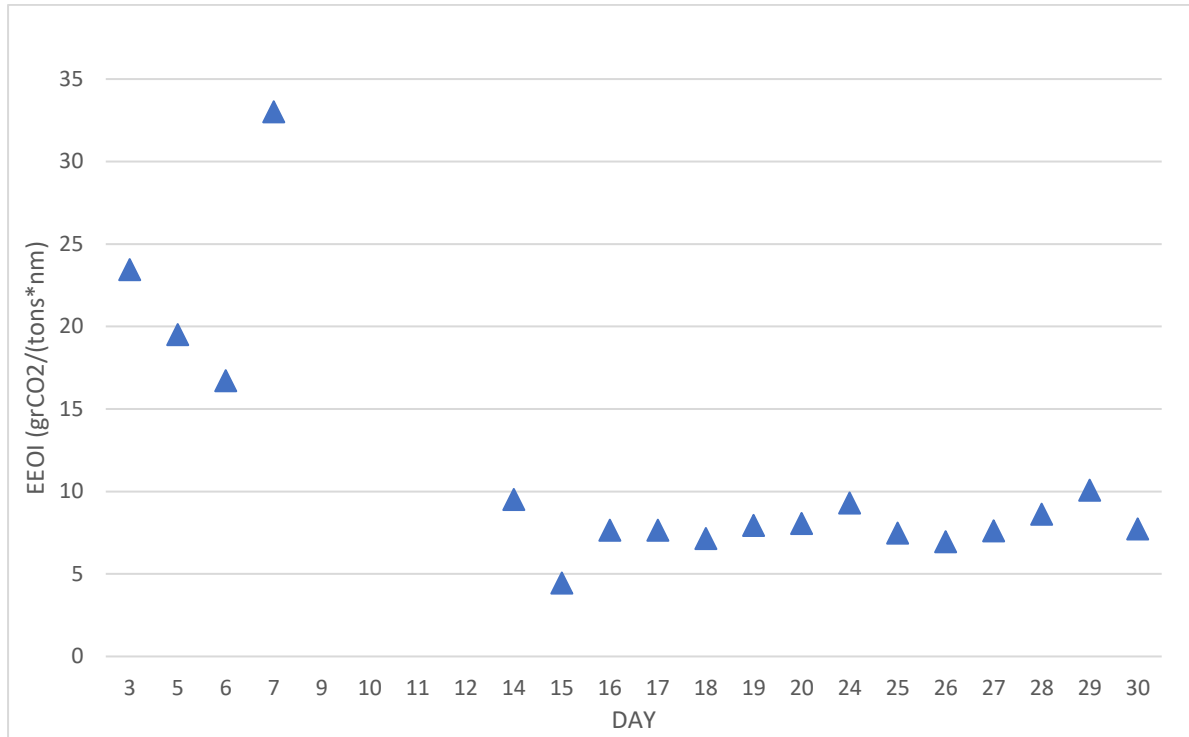
Ο ΕΕΟΙ υπολογίζεται ανά ημέρα και φαίνονται παρακάτω τα αποτελέσματα σε πίνακα (Πίνακας 5.1) και σε διάγραμμα (Διάγραμμα 5.1).

Καθώς χρησιμοποιήθηκε μόνο ΗFO ως καύσιμο, ο συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO₂, ανά τύπο καυσίμου (CF) λήφθηκε ως: CF= 3,1144 t-CO₂/t-fuel .

Πίνακας 5.1 ΕΕΟΙ Noon ημερησίως

DAY	ΕΕΟΙ (grCO ₂ /(tons*nm))
3	23,446
5	19,498
6	16,713
7	33,018
9	N/A
10	N/A
11	N/A
12	N/A
14	9,513
15	4,444
16	7,651
17	7,653
18	7,143
19	7,945
20	8,050
24	9,287
25	7,480
26	6,950
27	7,605
28	8,611
29	10,073
30	7,727

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 5.1 EEOI Νοση ημερησίως

5.2 EEOI High-Frequency reports

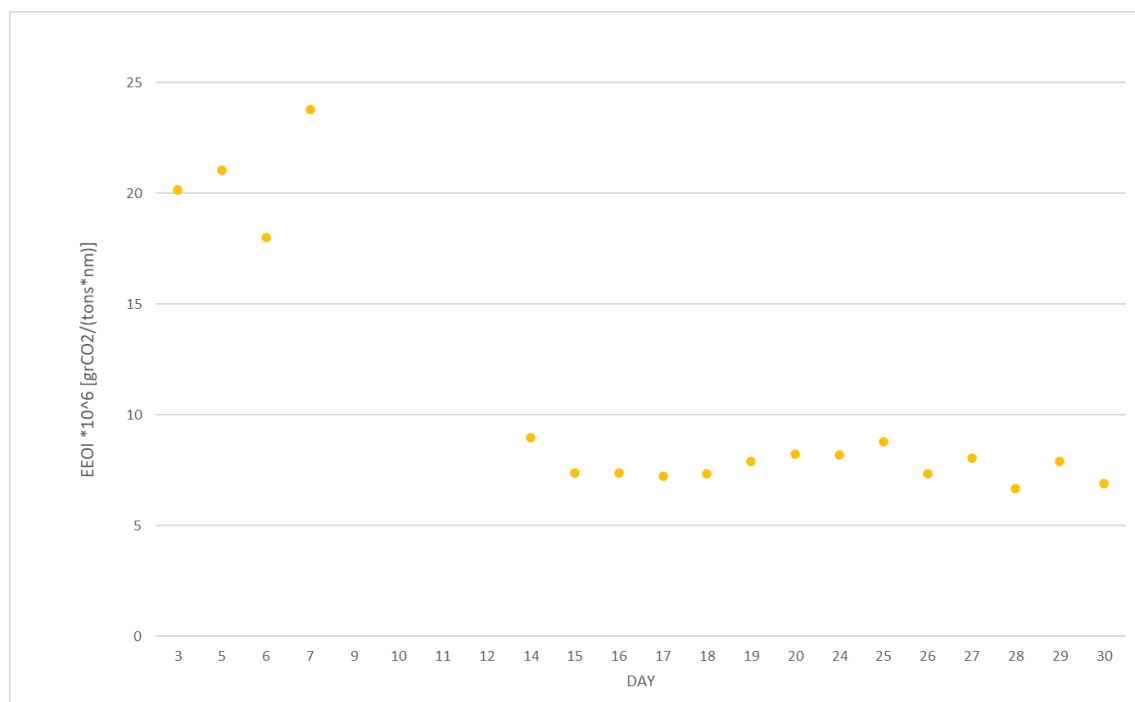
Και εδώ γίνεται αντίστοιχα με τα noon reports ο υπολογισμός ανά ημέρα. Τα αποτελέσματα φαίνονται σε πίνακα (Πίνακας 5.2) και σε διάγραμμα (Διάγραμμα 5.2).

Για όλες τις καταναλώσεις ο συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO₂, ανά τύπο καυσίμου (CF) λήφθηκε ως: CF= 3,1144 t-CO₂/t-fuel (Αντίστοιχα με noon reports).

Πίνακας 5.2 EEOI ανά ημέρα high-freq

DAY	EEOI [grCO ₂ /(tons*nm)]
3	20,140
5	21,027
6	18,016
7	23,790
9	N/A
10	N/A
11	N/A
12	N/A
14	8,957
15	7,395
16	7,369
17	7,230
18	7,350
19	7,897
20	8,229
24	8,194
25	8,795
26	7,356
27	8,059
28	6,691
29	7,911
30	6,891

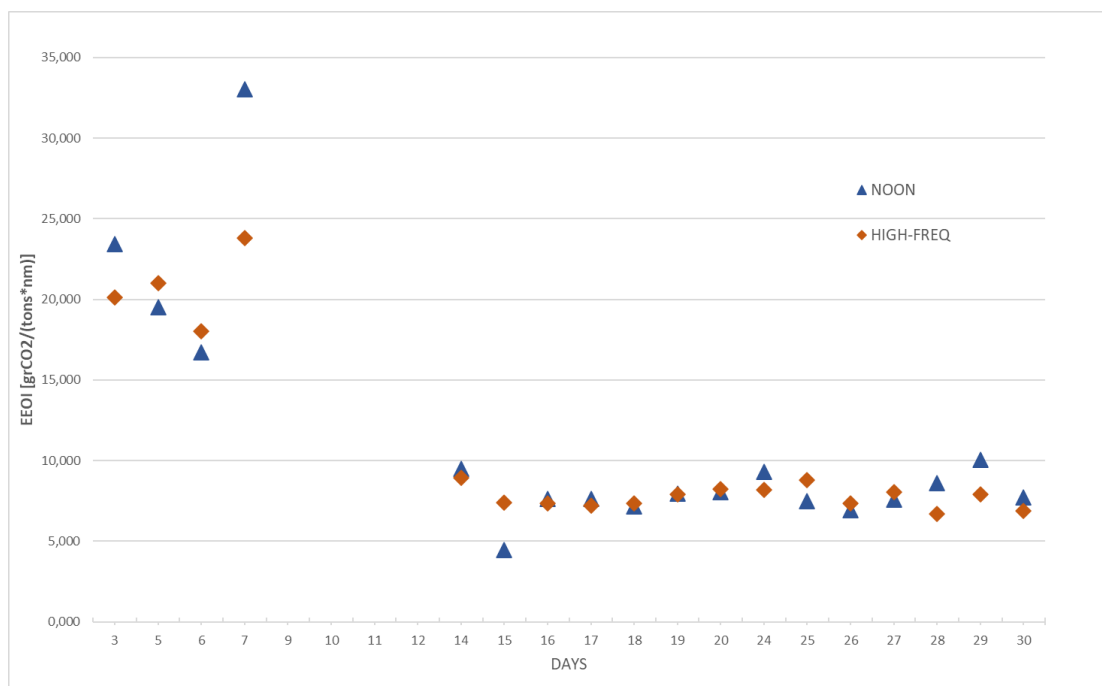
Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 5.2 EEOI για High frequency ημερησίως

5.3 Σύγκριση EEOI Noon - High frequency

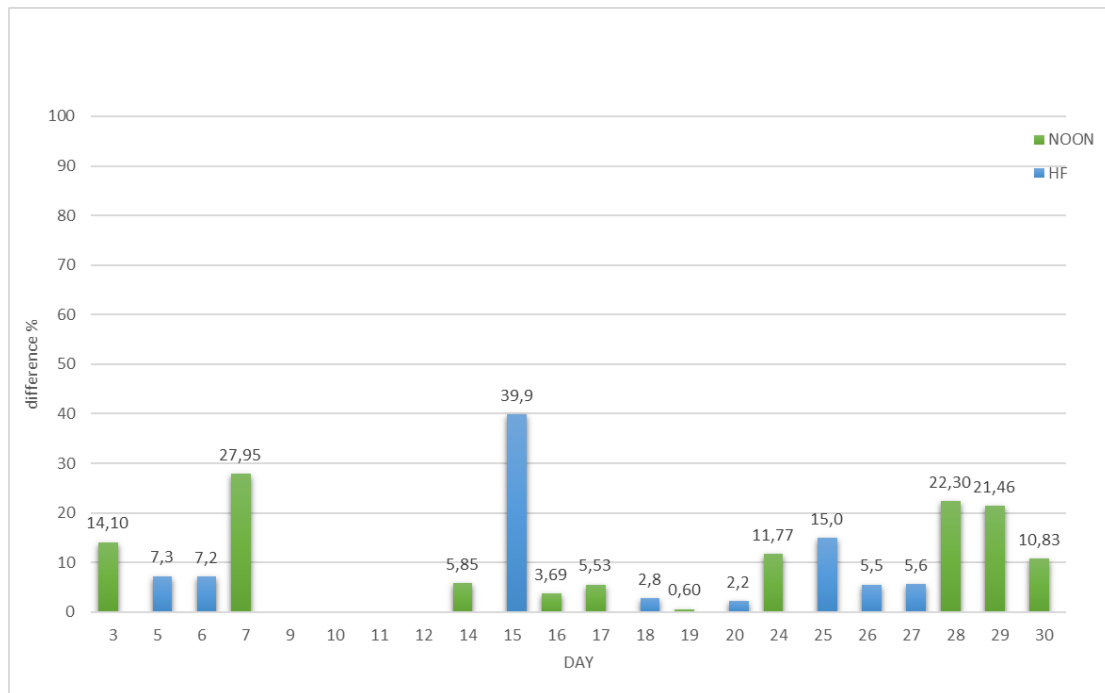
Για καλύτερη σύγκριση αποτελεσμάτων παρουσιάζεται ο δείκτης EEOI σε από κοινού διάγραμμα για Noon και High-freq.



Διάγραμμα 5.3 EEOI για Noon και High frequency reports

Παρατηρούνται σχετικά κοντινά αποτελέσματα μεταξύ των δύο δεδομένων εκτός από τις αποκλίσεις των ημερών 7 και 15, όπως ήταν αναμενόμενο, στις οποίες παρατηρείται αντίστοιχη διαφορά των καταναλώσεων ΗΦΟ. Δημιουργείται κατάλληλο διάγραμμα (Διάγραμμα 5.4) στο οποίο φαίνονται οι ποσοστιαίες διαφορές του δείκτη EEOI. (Σημειώνεται πως οι χρωματικές ενδείξεις του διαγράμματος δείχνουν ποιο είναι μεγαλύτερο κάθε φορά).

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 5.4 Ποσοστό ΕΕΟΙ noon και high frequency

6 Ανάλυση δείκτη ΕΕΟΙ για High-Frequency δεδομένα

Στη συνέχεια πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση του δείκτη ΕΕΟΙ κάνοντας χρήση μόνο τα δεδομένα high frequency.

6.1 Υπολογισμοί για δεδομένα χωρίς περιορισμό ταχύτητας

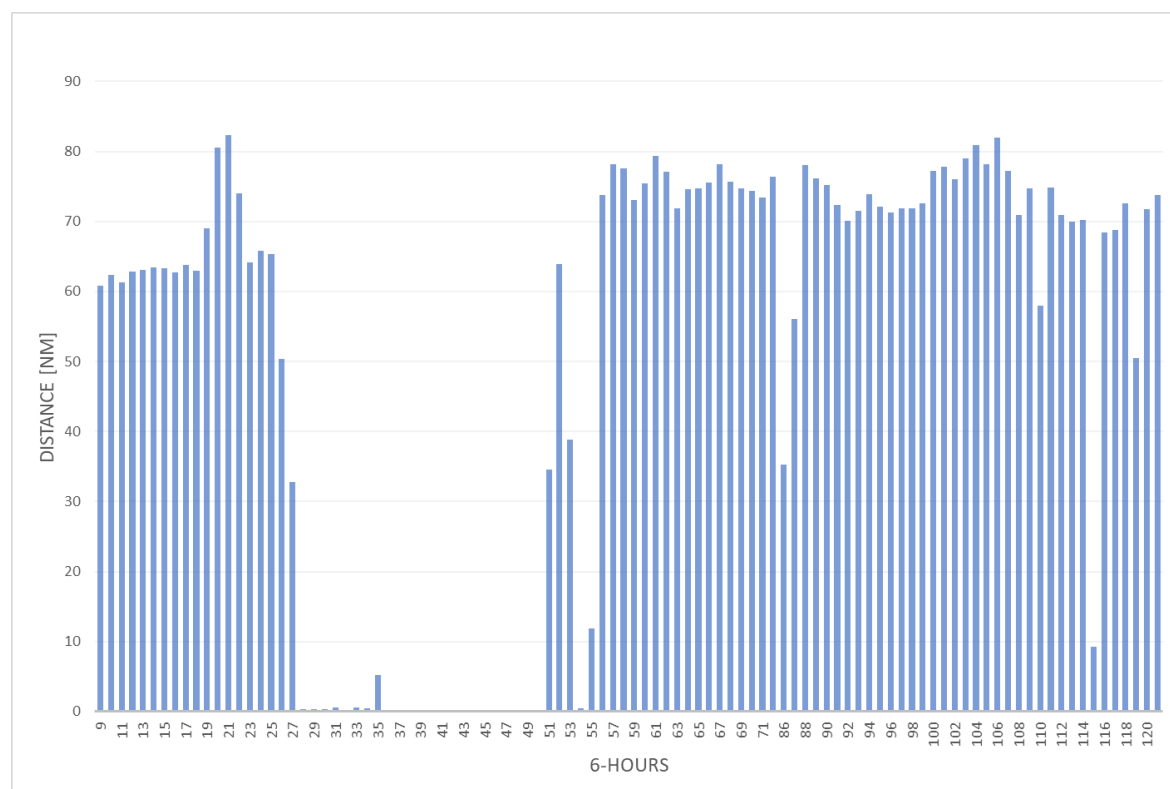
6.1.1 Υπολογισμός ανά ημέρα

Ένας πρακτικός τρόπος υπολογισμού του ΕΕΟΙ είναι ανά ημέρα, και ο υπολογισμός του πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.1.2 Υπολογισμός ανά 6 ώρες

Προκυμμένου να επιτευχθεί αναλυτικότερη παρακολούθηση του ΕΕΟΙ γίνεται ο υπολογισμός του ανά 6 ώρες. Ο τρόπος υπολογισμού της κατανάλωσης, της απόστασης και του ίδιου του δείκτη είναι ίδιος με αυτόν ανά ημέρα. Ακολουθούν λοιπόν παρακάτω τα αποτελέσματα σε πίνακες και διαγράμματα.

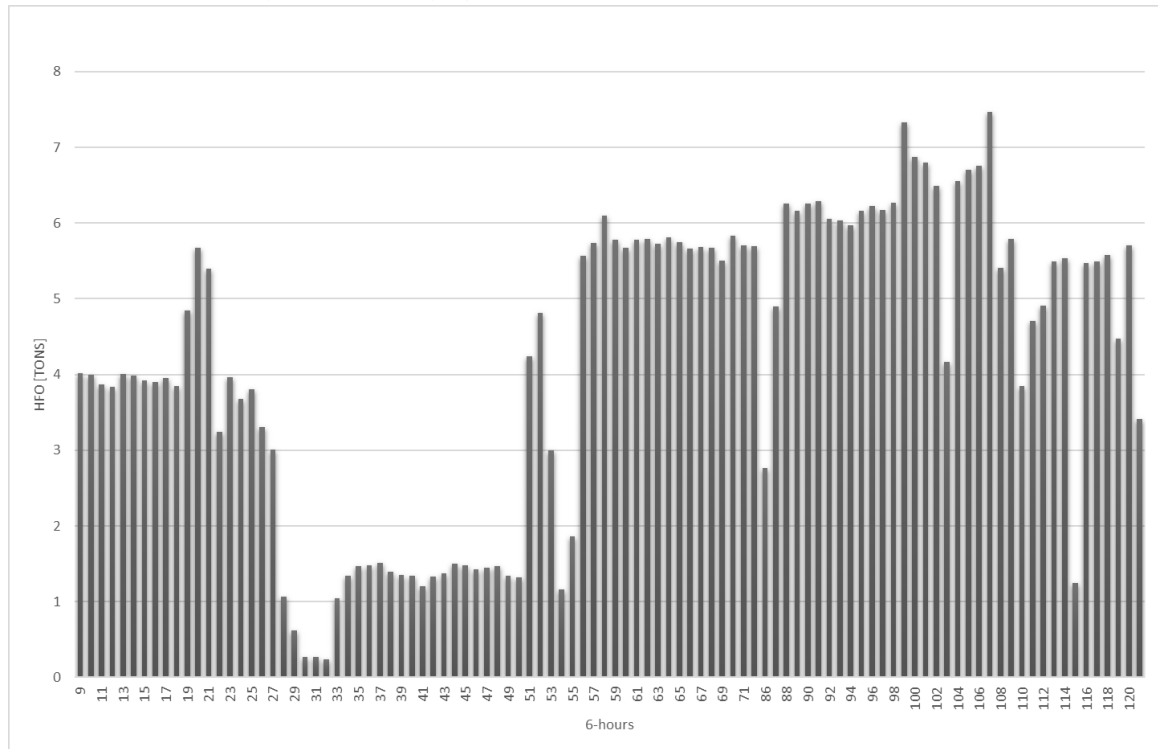
6.1.2.1 Απόσταση που διανύεται ανά 6 ώρες



Διάγραμμα 6.1 Απόσταση που διανύεται ανά 6 ώρες

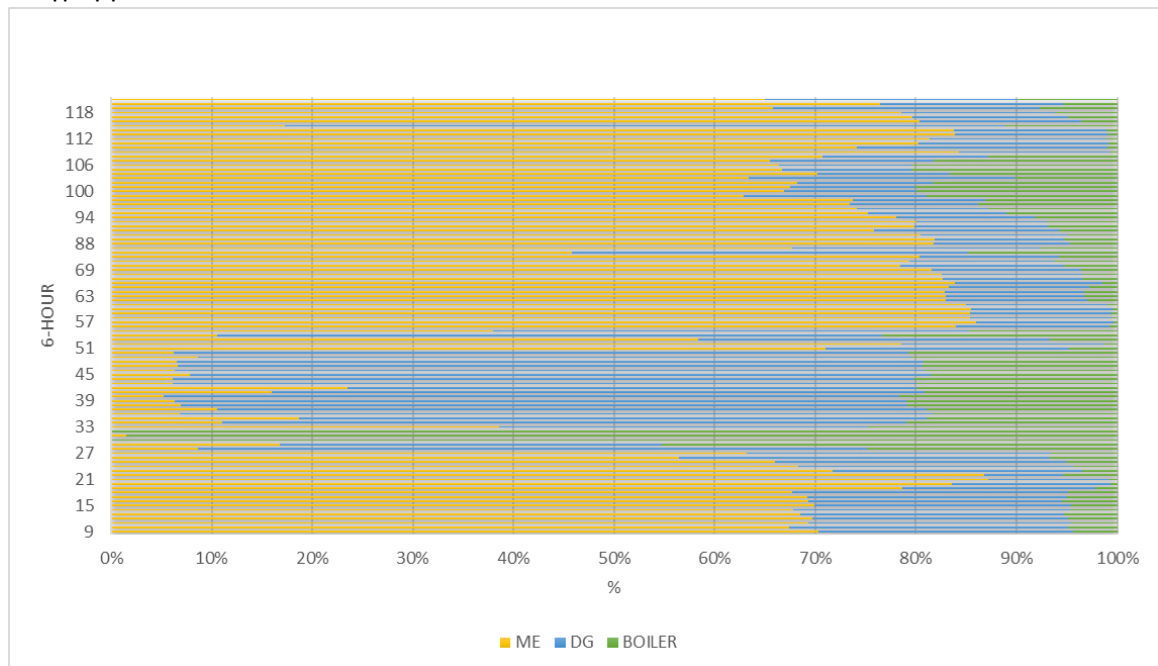
Είναι έντονα φανερό πως στα 28^ο μέχρι 50^ο βωρα το πλοίο δεν διανύει σημαντική απόσταση, συμπεραίνοντας ότι το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι. Στην παρούσα ανάλυση, τα βωρα δεν θα αποκλειστούν ακόμα, αλλά όπως είναι αναμενόμενο τα αποτελέσματα του δείκτη εεοί δεν θα είναι αντιπροσωπευτικά.

6.1.2.2 Κατανάλωση HFO ανά 6 ώρες



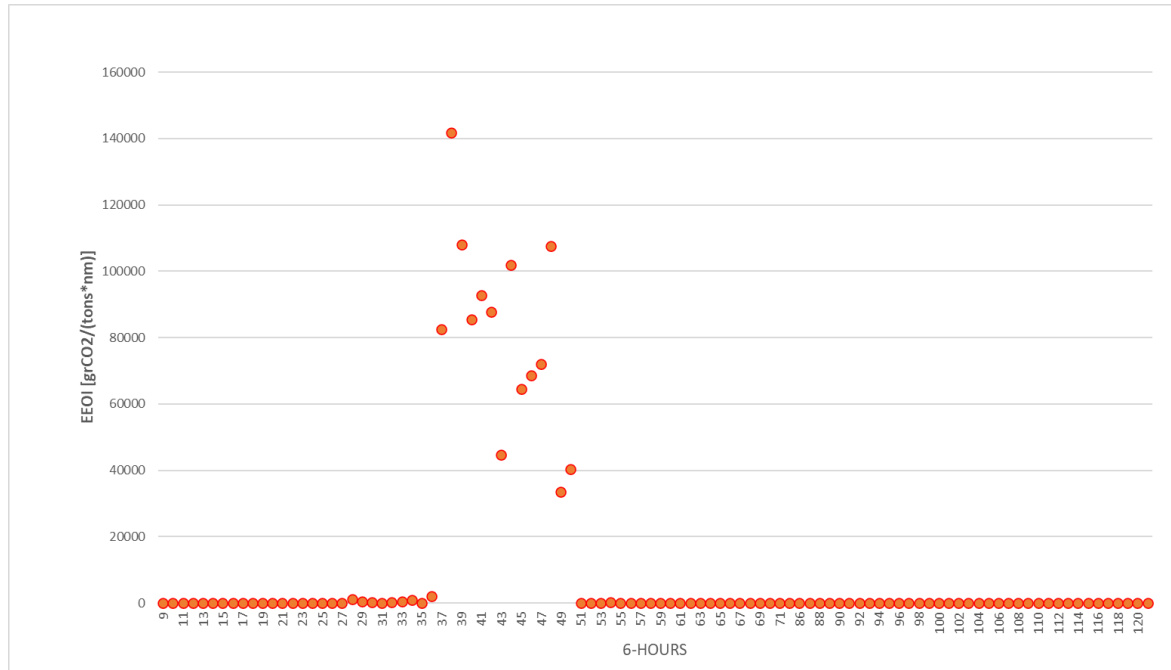
Διάγραμμα 6.2 Κατανάλωση HFO ανά 6 ώρες

Θα είχε ενδιαφέρον η δημιουργία ενός διαγράμματος με τα ποσοστά κατανάλωσης της κύριας μηχανής -ηλεκτροκινητήρων- boiler ανά δωρο, να γίνει δηλαδή απεικόνιση ο διαχωρισμός της κατανάλωσης του κάθε παραπάνω καταναλωτή. Παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.3



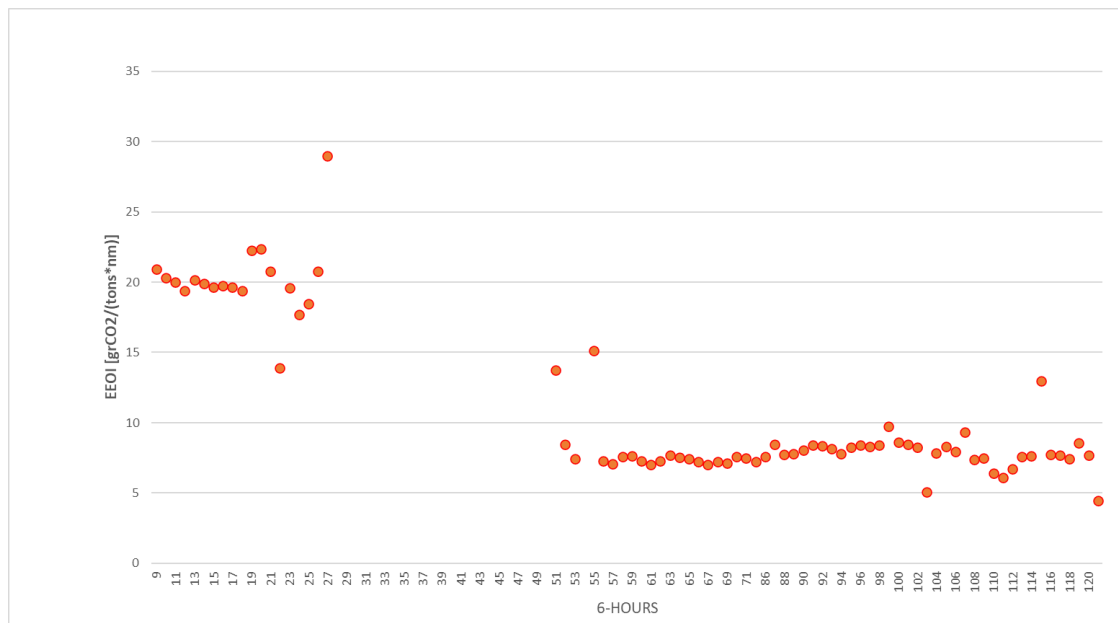
Διάγραμμα 6.3 Ποσοστό κατανάλωσης κύριας μηχανής, ηλεκτροκινητήρων και boiler

6.1.2.3 Υπολογισμός ΕΕΟΙ



Διάγραμμα 6.4 EEOI high frequency ανά 6 ώρες

Παρατηρείται, λοιπόν, η «εκτόξευση» του δείκτη ΕΕΟΙ στα ύψη, για τα βωρα που προαναφέρθηκαν, καθιστώντας τον περιορισμό της ταχύτητας για τα δεδομένα που λήφθηκαν υπόψη αναγκαία. Γίνεται όμως νέο διάγραμμα αποκλείοντας τα βωρα αυτά, πριν να εφαρμοστούν τα κατάλληλα φίλτρα/περιορισμοί (Διάγραμμα 6.5).



Διάγραμμα 6.5 EEOI high frequency ανά 6 ώρες μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων βωρων

6.2 Επίδραση της ταχύτητας στον υπολογισμό ΕΕΟΙ

6.2.1 Υπολογισμός ανά ημέρα

Όπως είναι φανερό η ταχύτητα μπορεί να παίρνει πολύ μικρές τιμές, κυρίως όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι, δηλαδή δεν υπολογίζεται αντιπροσωπευτικά η απόσταση και συνεπώς ο δείκτης ΕΕΟΙ. Είναι καλό λοιπόν να τεθούν κάποια φίλτρα στην ταχύτητα, όπως για $V_s > 1$ knot και $V_s > 3$ knot.

6.2.1.1 Περιορισμός δεδομένων για ταχύτητες μεγαλύτερες του 1 knot

Για τον υπολογισμό, της απόστασης που διανύθηκε χρησιμοποιήθηκε το άθροισμα των αποστάσεων ανά λεπτό από τα δεδομένα των High frequency όπως και στους προηγούμενους υπολογισμούς, λαμβάνοντας υπόψη την προστιθέμενη ταχύτητα όταν είναι μεγαλύτερη του 1 knot. Δηλαδή:

$$D = \sum_n (V * t * \mu) \quad [nm], \text{ με } V > 1 \text{ knot}$$

Εξ. 6.1

D: η απόσταση που διανύεται ανά ημέρα

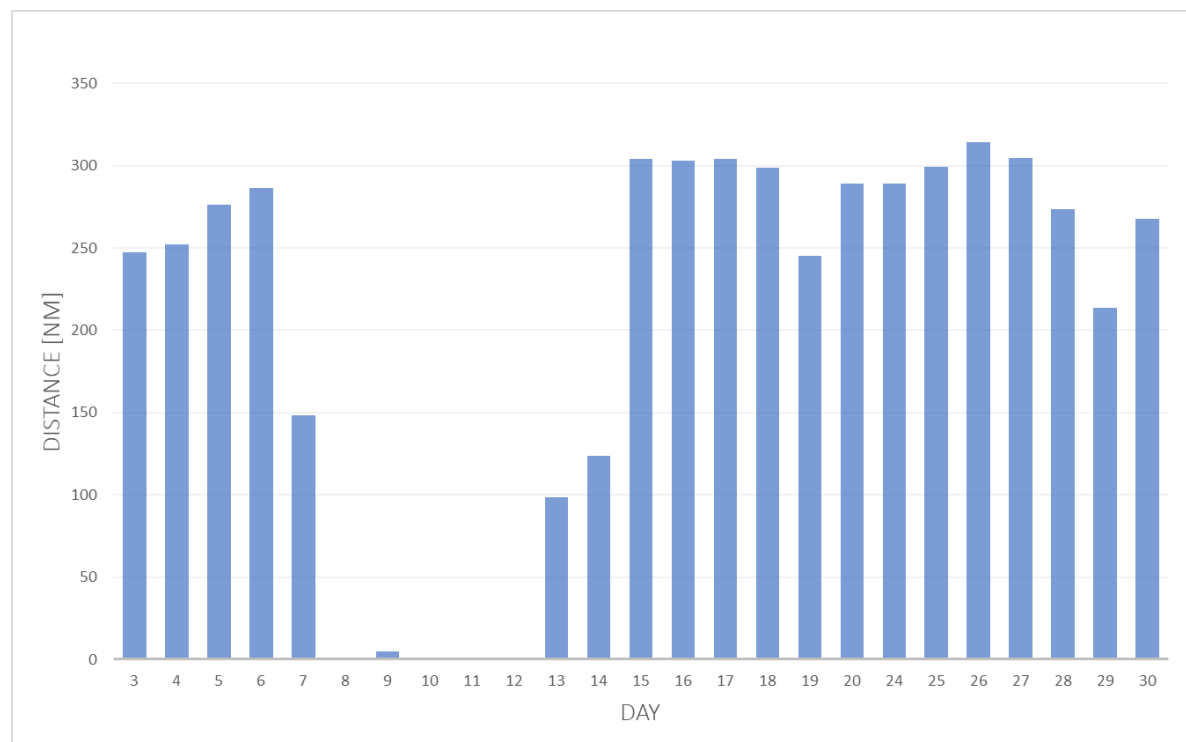
V: η ταχύτητα μετρούμενη ανά λεπτό, σε knots

μ : $\mu = 1/60$: Μετατρέπεται η ταχύτητα σε nm/min.

t: $t = 1$ [min] ο χρόνος που ταξιδεύει στην αντίστοιχη ταχύτητα

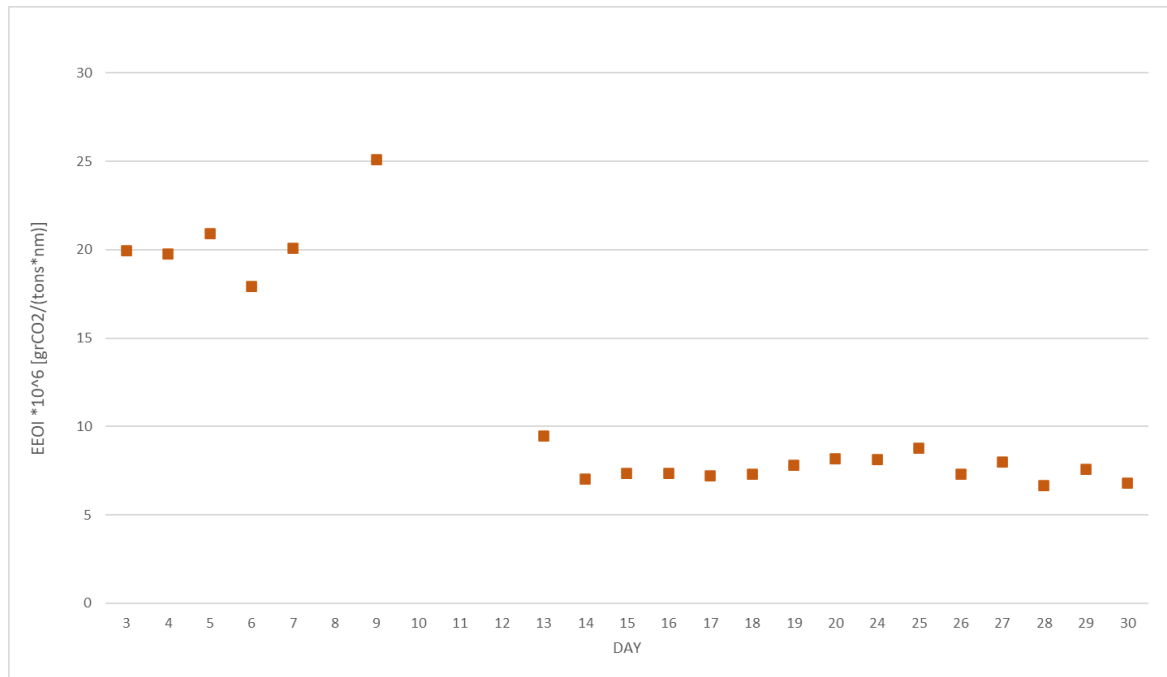
Ο υπολογισμός της κατανάλωσης έγινε αντίστοιχα, δηλαδή λήφθηκε υπόψη όταν $V > 1$ knot, και ο τρόπος του ΕΕΟΙ παρέμεινε ο ίδιος.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα της απόστασης (Διάγραμμα 6.6) και του δείκτη ΕΕΟΙ (Διάγραμμα 6.7) που προκύπτουν μετά τον περιορισμό στις ταχύτητες.



Διάγραμμα 6.6 Απόσταση που διανύεται ανά ημέρα για ταχύτητες $V > 1$ knot

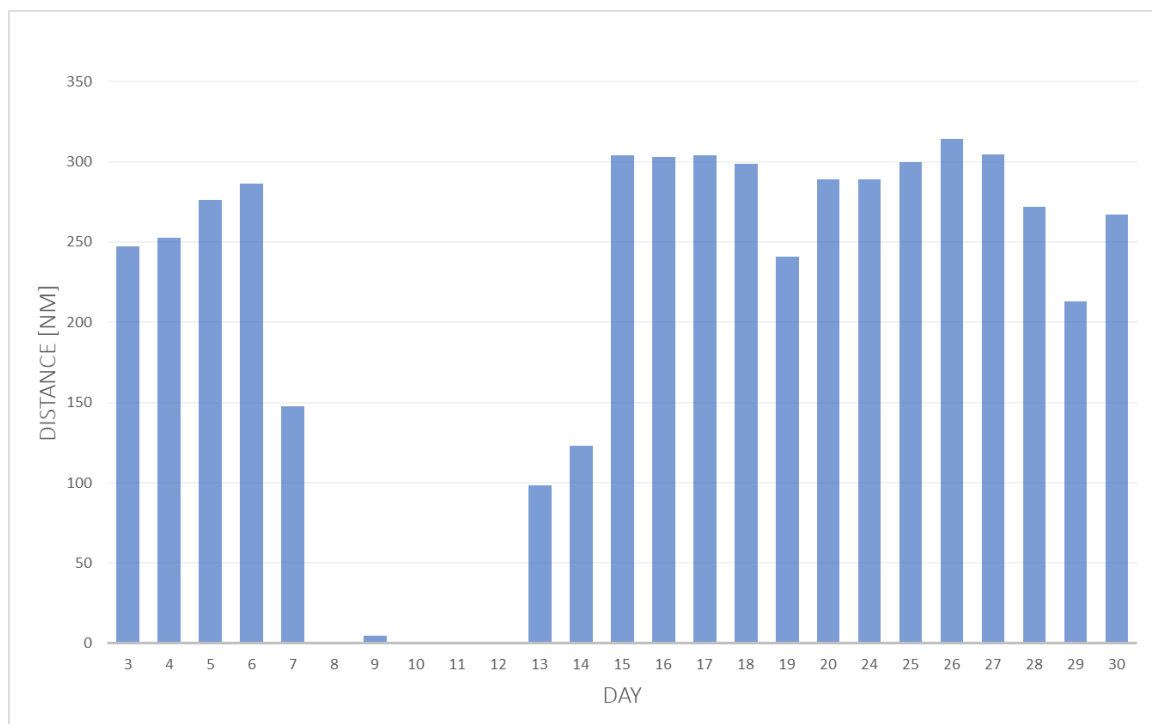
Και εδώ υπάρχει ελάχιστη απόσταση (~5 ναυτικά μίλια) την ημέρα 9, που θεωρείται ότι το πλοίο δεν κάλυψε κάποια απόσταση.



Διάγραμμα 6.7 Δείκτης EEOI για ταχύτητες >1 knot

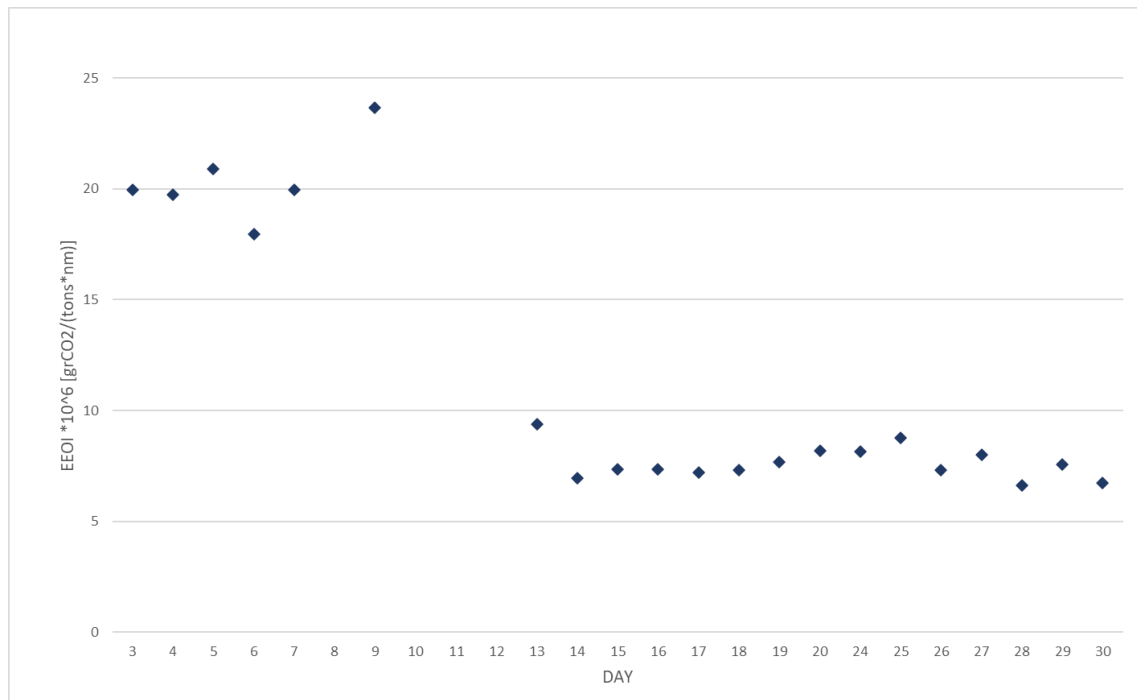
6.2.1.2 Περιορισμός δεδομένων για ταχύτητες μεγαλύτερες των 3 knots

Και εδώ όπως είναι αναμενόμενο οι υπολογισμοί είναι ίδιοι με παραπάνω με διαφορά του περιορισμού της απόστασης για V>3 knot.



Διάγραμμα 6.8 Απόσταση που διανύεται για ταχύτητες >3 knots

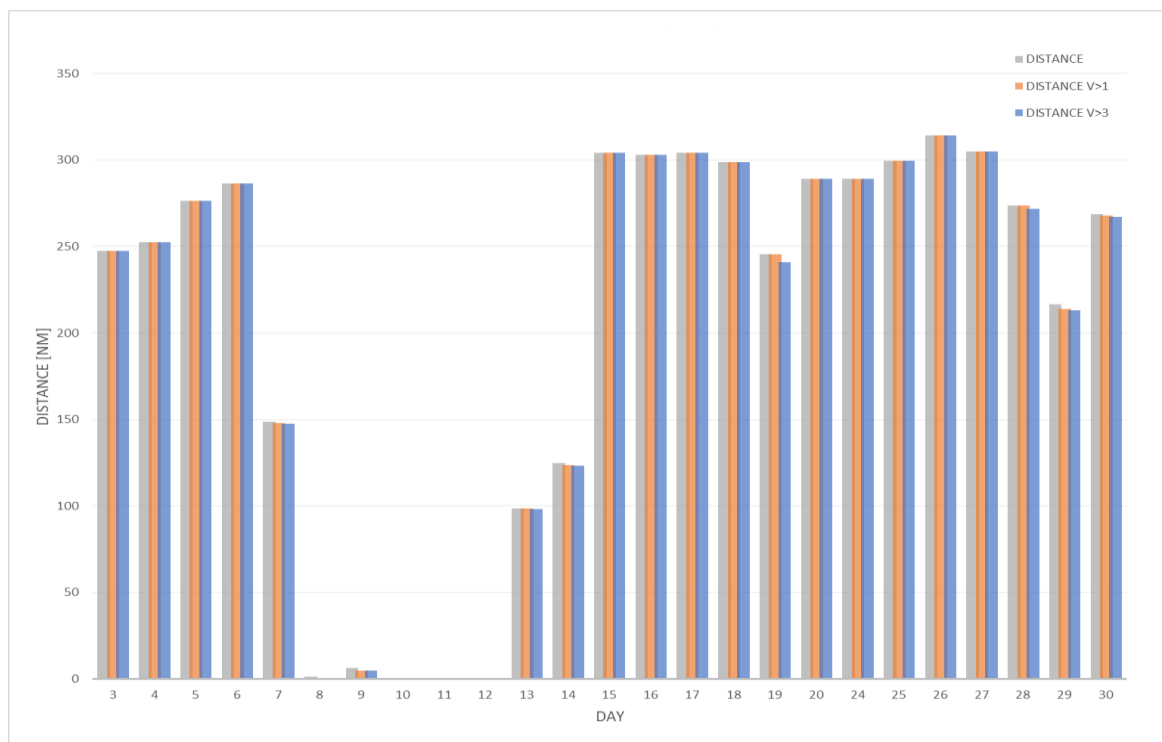
Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 6.9 Δείκτης EEOI για ταχύτητες > 3 knots

6.2.1.3 Σύνοψη

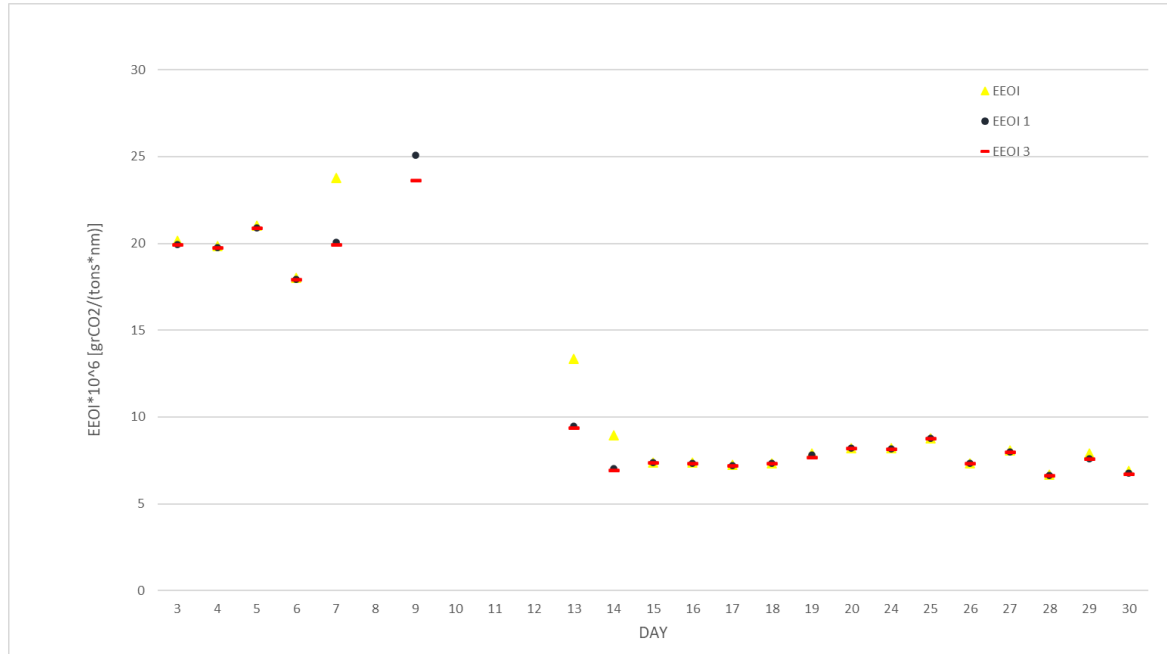
Φαίνονται από κοινού οι αποστάσεις και οι δείκτες EEOI, χωρίς περιορισμό και με περιορισμό δεδομένων για ταχύτητες 1,3 knots που έχουν υπολογισθεί.



Διάγραμμα 6.10 Απόσταση που δανύεται, απόσταση για V>1 knot και για V>3 knots

Όπως παρατηρείται οι αποστάσεις υπολογισμένες με δεδομένα με περιορισμό ταχύτητας και χωρίς, δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

Όπως έχει προαναφερθεί ο δείκτης ΕΕΟΙ λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές στις ημέρες που το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι, και δεν μπορεί να συγκριθεί με τους δείκτες όπου έχουν ληφθεί υπόψη δεδομένα για ταχύτητες $V > 1 \text{ knot}$ και $V > 3 \text{ knots}$. Γίνεται δηλαδή αισθητή η ανάγκη των χρησιμοποιούμενων περιορισμών/φίλτρων. Παρακάτω γίνεται διάγραμμα (Διάγραμμα 6.11) στο οποίο αποκλείονται οι συγκεκριμένες ημέρες χειροκίνητα, καθιστώντας δυνατή μια πιο λεπτομερή απεικόνιση των διαφορών του δείκτη στις υπόλοιπες ημέρες.

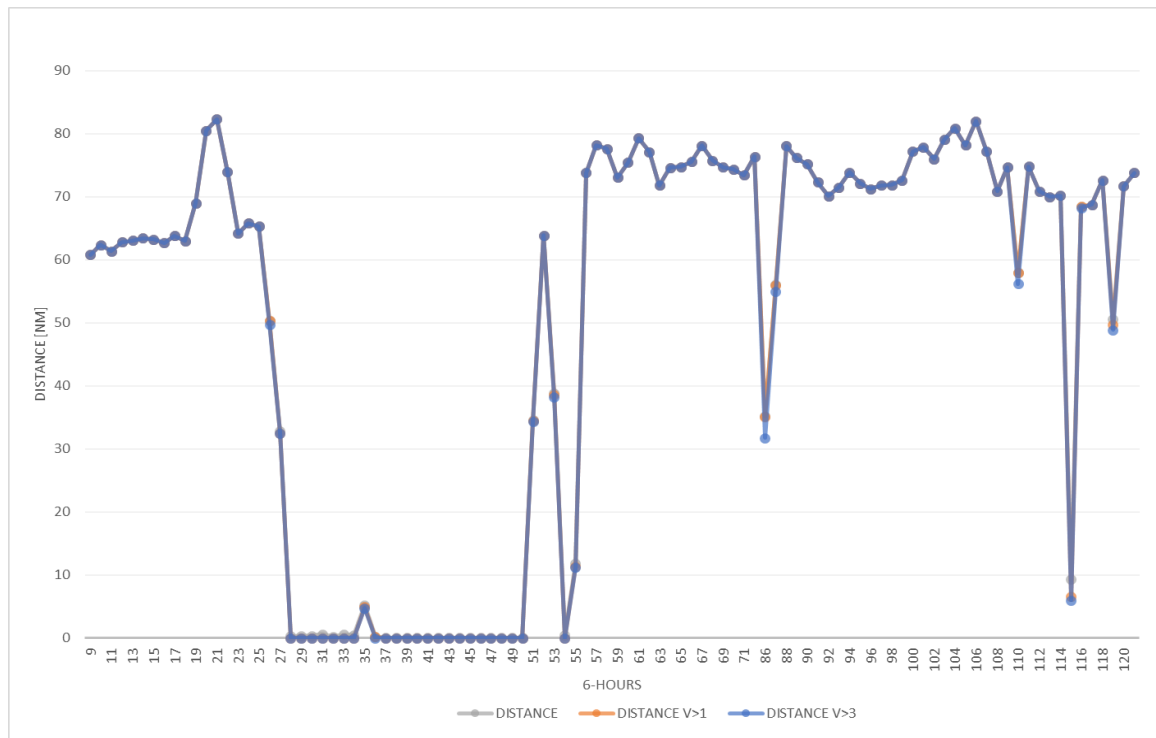


Διάγραμμα 6.11 Δείκτης ΕΕΟΙ και ΕΕΟΙ για $V > 1 \text{ knot}$ και για $V > 3 \text{ knots}$, χωρίς τις κατάλληλες ημέρες

6.2.2 Υπολογισμός ανά 6 ώρες

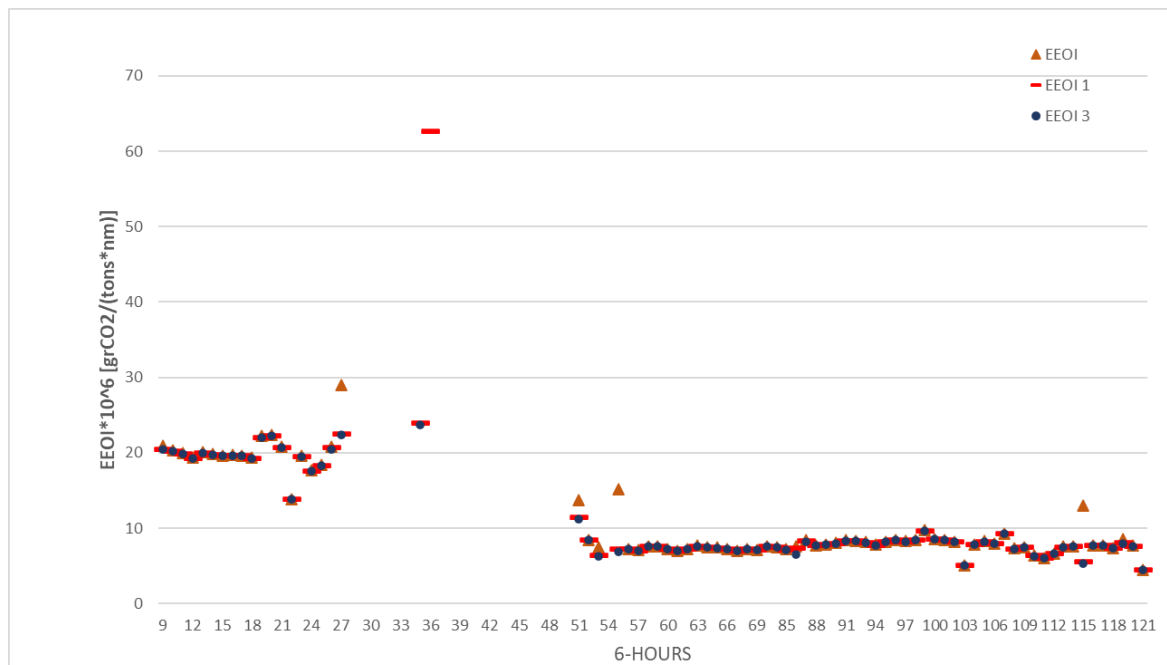
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για τους υπολογισμούς ανά 6 ώρες και παρουσιάζονται σε από κοινού διαγράμματα.

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 6.12 Απόσταση που δανύεται, απόσταση υπολογισμένη για $V > 1$ knot και για $V > 3$ knots

Παρατηρούνται, κάποια ωρα με υπερβολικά αυξημένο δείκτη, όμοια με τον δείκτη ΕΕΟΙ ανά ημέρα, στα οποία το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι. Γίνεται κι εδώ αποκλεισμός αυτών, για καλύτερη απεικόνιση.



Διάγραμμα 6.13 Δείκτης ΕΕΟΙ, ΕΕΟΙ για $V > 1$ knot και για $V > 3$ knots μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων ωρων

6.3 Υπολογισμός δείκτη ΕΕΟΙ ανά 6 ώρες λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις εκπομπές CO2 της κύριας μηχανής

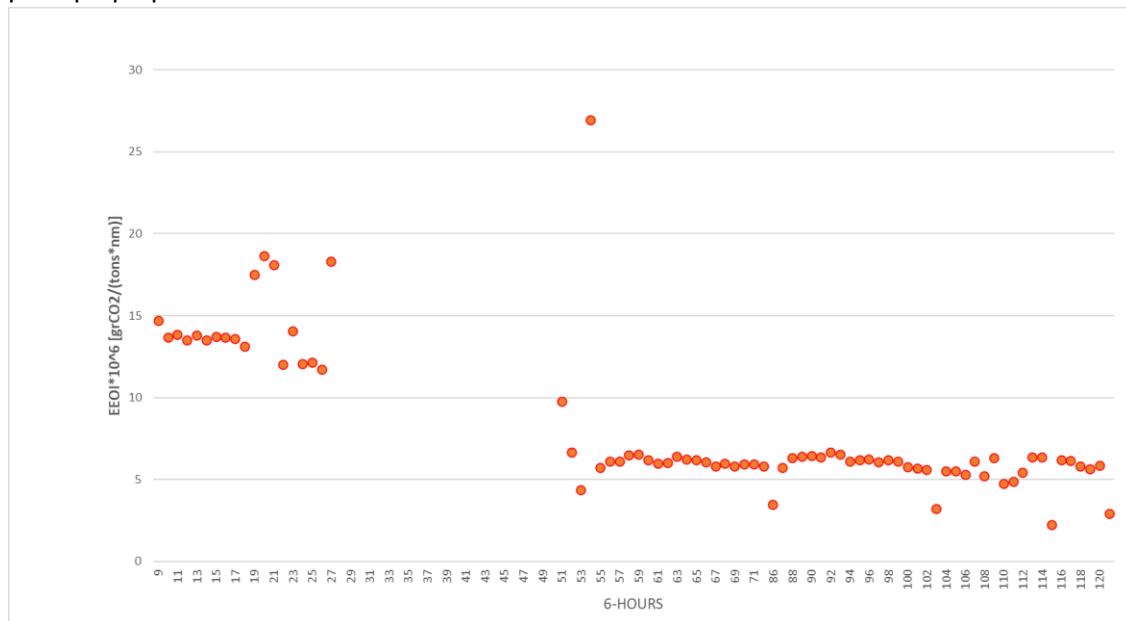
Στην συγκεκριμένη ενότητα σαν κατανάλωση χρησιμοποιείται μόνο αυτή της κύριας μηχανής, δηλαδή:

$$HFO_{CONS} = ME_{CONS} * \frac{1}{60} [tons]$$

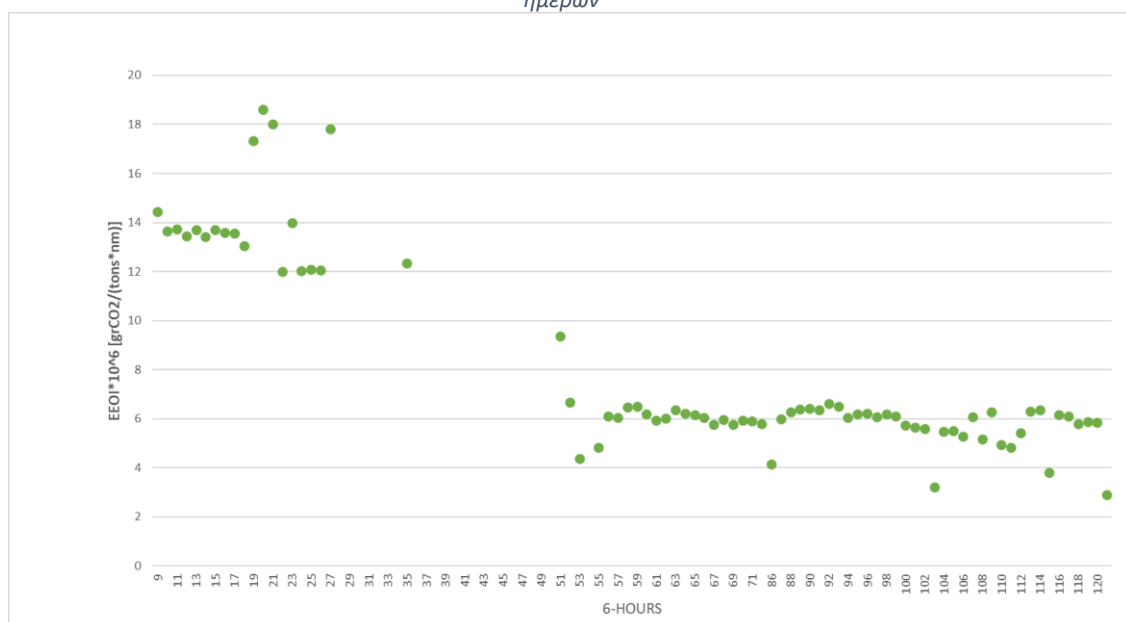
Εξ. 6.2

Και ο υπολογισμός του δείκτη ΕΕΟΙ πραγματοποιείται αντίστοιχα.

6.3.1 Αποτελέσματα δείκτη ΕΕΟΙ μόνο με εκπομπές CO2 της κύριας μηχανής
Ακολουθούν αποτελέσματα των υπολογισμών χωρίς κάποιο περιορισμό στην ταχύτητα και με περιορισμό V>6 knots.

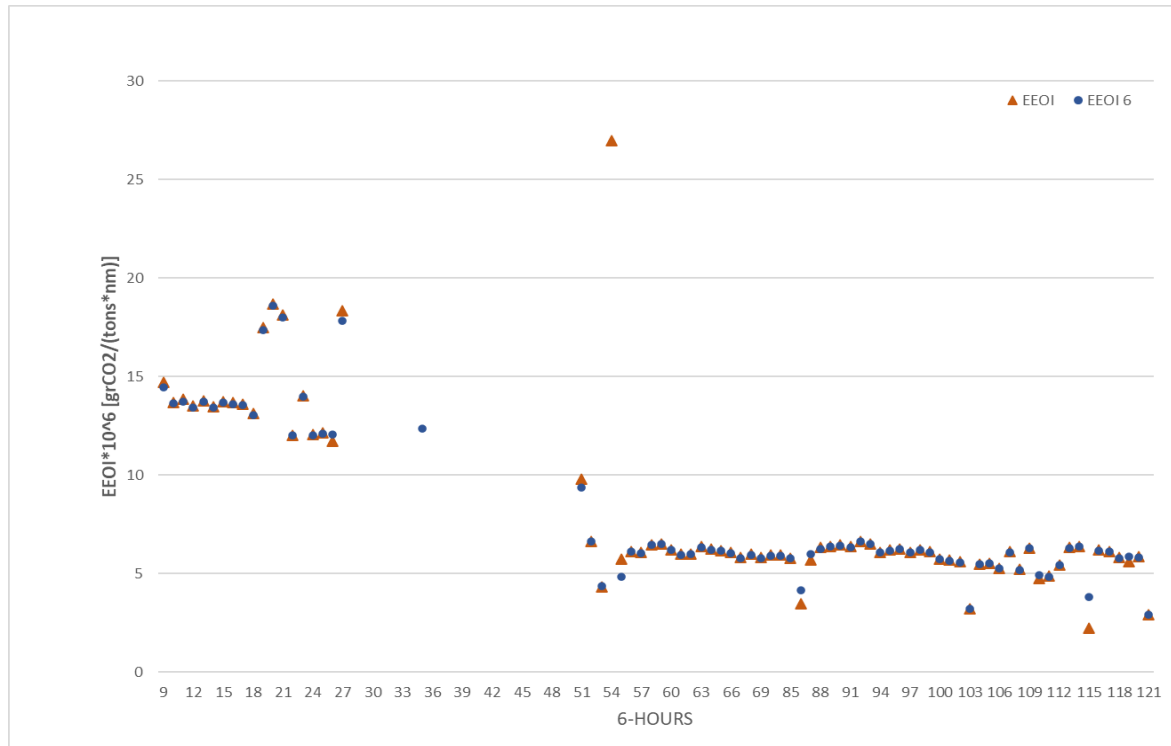


Διάγραμμα 6.14 Δείκτης ΕΕΟΙ με κατανάλωση μόνο της κύριας μηχανής μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων ημερών



Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης

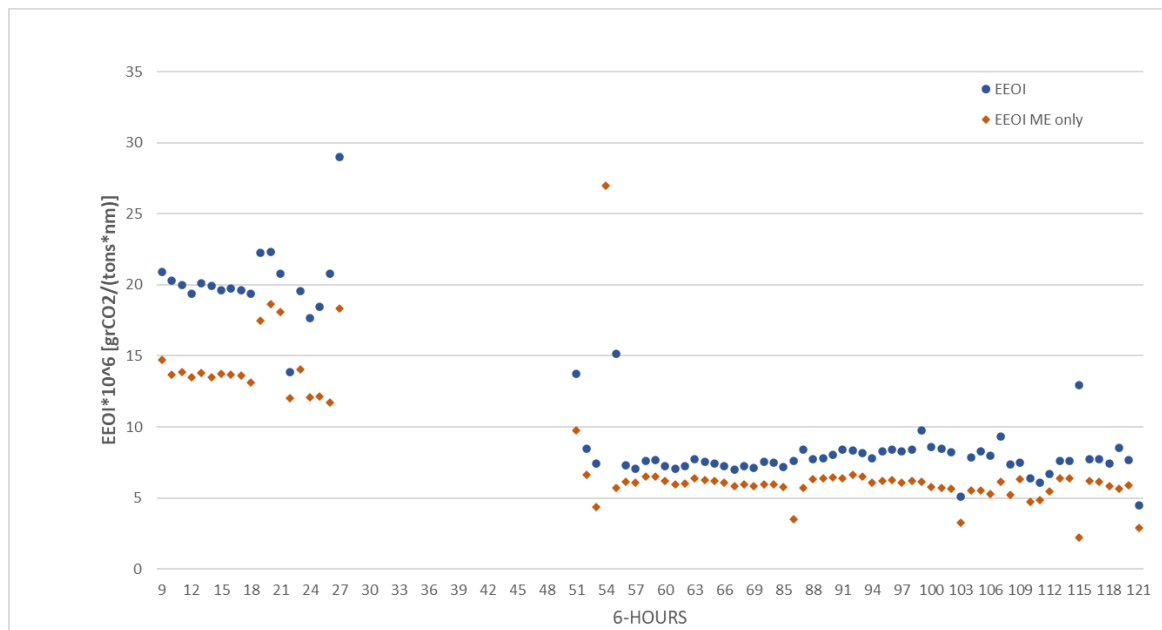
Διάγραμμα 6.15 Δείκτης EEOI με κατανάλωση μόνο της κύριας μηχανής λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα για $V > 6$ knots



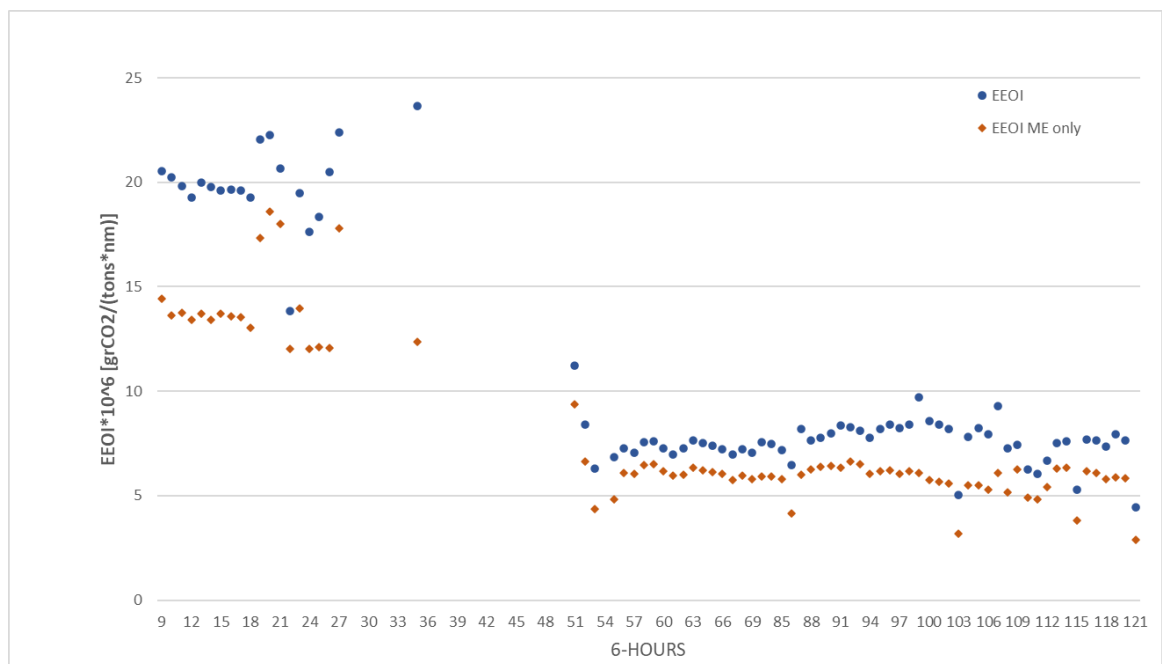
Διάγραμμα 6.16 Δείκτης EEOI με κατανάλωση μόνο της κύριας μηχανής και ίδιος δείκτης με $V > 3$ knots

Παρατηρούνται και εδώ μεγάλες διαφορές στον EEOI όπου δεν υπάρχει περιορισμός στην ταχύτητα, σε σύγκριση με τον EEOI υπολογισμένο με περιορισμό, για τις ημέρες που το πλοίο είναι στο λιμάνι. Μετά τον αποκλεισμό αυτών κατά κύριο λόγο ο EEOI είναι λίγο υψηλότερος από αυτούς, για ορισμένα βωρα ενώ στα υπόλοιπα οι διαφορές είναι μικρές.

6.3.2 Σύγκριση EEOI με EEOI εκπομπών κύριας μηχανής



Διάγραμμα 6.17 Δείκτης EEOI και EEOI με κατανάλωση μόνο της κύριας μηχανής



Διάγραμμα 6.18 Δείκτης EEOI για ταχύτητες >6 και EEOI με κατανάλωση μόνο της κύριας μηχανής για ταχύτητες >6 knots

Όπως είναι αναμενόμενο ο δείκτης EEOI με καταναλώσεις μόνο αυτές της κύριας μηχανής παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές από ότι ο EEOI, καθώς δεν προσμετράται η κατανάλωση των ηλεκτροκινητήρων και του boiler.

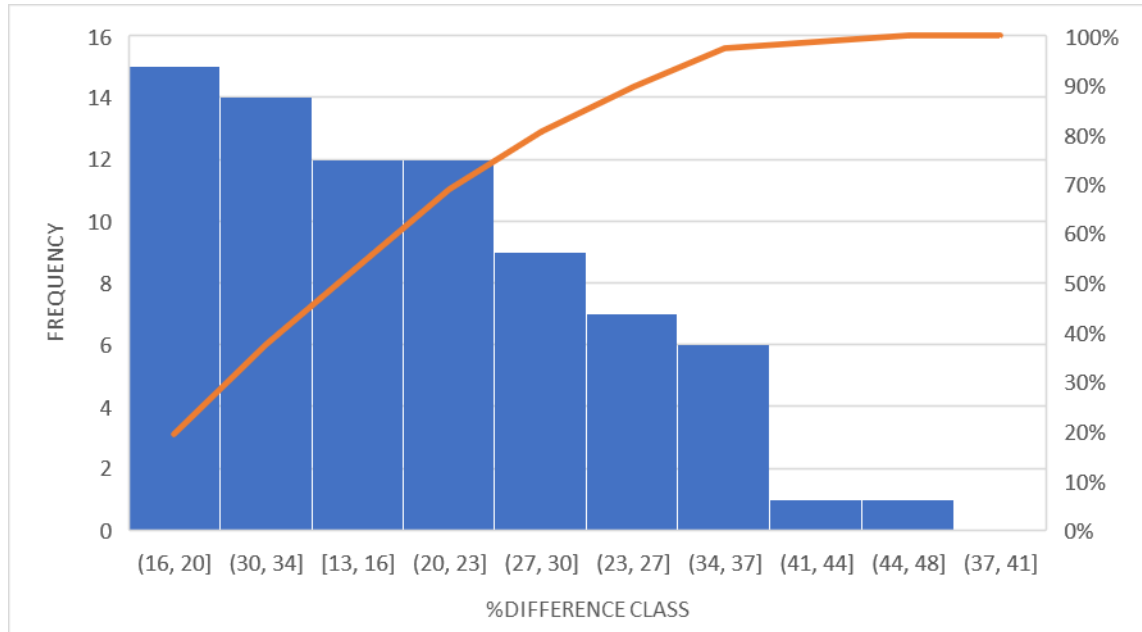
Ιδιαίτερα ξεχωρίζει το 36^ο δωρο αυτού του μήνα στον δείκτη με δεδομένα για ταχύτητες μεγαλύτερες του 1knot, το οποίο έχει αρκετά υψηλή τιμή. Συγκρίνοντάς το λοιπόν στο

Διάγραμμα 6.18 γίνεται και εδώ αντιληπτή η αυξημένη κατανάλωση που προέρχεται από τους ηλεκτροκινητήρες και το boiler.

Αναλύοντας, τις διαφορές του ΕΕΟΙ ($v > 6$ knots) με του ΕΕΟΙ ME only ($v > 6$ knots) και συγκεκριμένα τις ποσοστιαίες διαφορές τους, συμπεραίνονται τα εξής:

- Κατά μέσο όρο η ποσοστιαία διαφορά τους είναι $D_{AVRG} = 18,86\%$
- Η τυπική απόκλιση αυτών είναι $SD = 12,37\%$

Παρουσιάζεται παρακάτω το ιστόγραμμα με την συχνότητα για τις ποσοστιαίες διαφορές τους.



Διάγραμμα 6.19 Συχνότητα ποσοστιαίας διαφοράς του δείκτη ΕΕΟΙ και ΕΕΟΙ με κατανάλωση μόνο κύριας μηχανής και αθροιστική συνάρτηση (πορτοκαλί καμπύλη).

6.4 Επίδραση δείκτη ΕΕΟΙ από παραμέτρους του καιρού

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η επίδραση του δείκτη ΕΕΟΙ από παραμέτρους του καιρού, πιο συγκεκριμένα από την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.

6.4.1 Επίδραση κατεύθυνσης ανέμου

Αρχικά, για τον υπολογισμό της σχετικής κατεύθυνσης του ανέμου (*relative wind direction*) χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα:

- ❖ Wind Direction
- ❖ True Ship Heading

Και οι τελικές κατευθύνσεις του ανέμου και του πλοίου προέκυψαν από τον μέσο όρο των παραπάνω δεδομένων ανά βωρο, και έπειτα υπολογίσθηκε η σχετική κατεύθυνση ανέμου ως η διαφορά τους, με διόρθωση όταν αυτή είναι μεγαλύτερη των 180 μοιρών, δηλαδή:

$$Wind_{dir} = \frac{\sum_n Wind\ Direction}{n}, Ship_{dir} = \frac{\sum_n True\ Ship\ Heading}{n}$$

$$Wind_{rel.dir} = Wind_{dir} - Ship_{dir},$$

με διόρθωση αν $Wind_{rel.dir} > 180^\circ$ τότε

$$Wind_{rel.dir} = Wind_{dir} - Ship_{dir} - 360$$

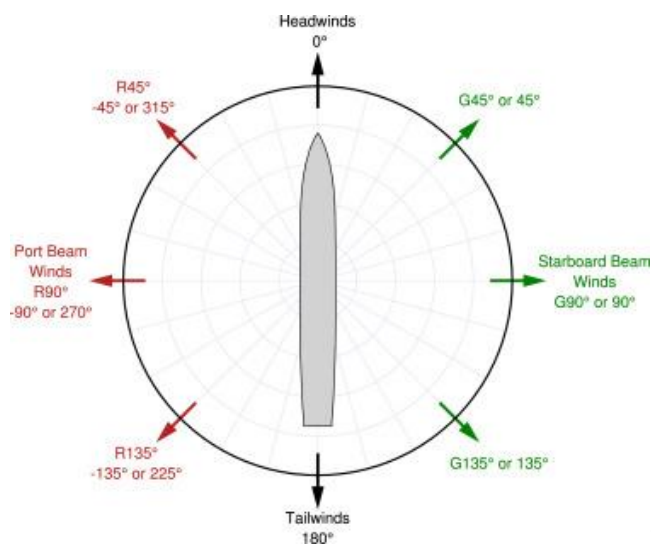
Εξ. 6.3

Όπου

$Wind_{dir}$: τελική κατεύθυνση του ανέμου ανά βωρο

$Ship_{dir}$: τελική κατεύθυνση του πλοίου ανά βωρο

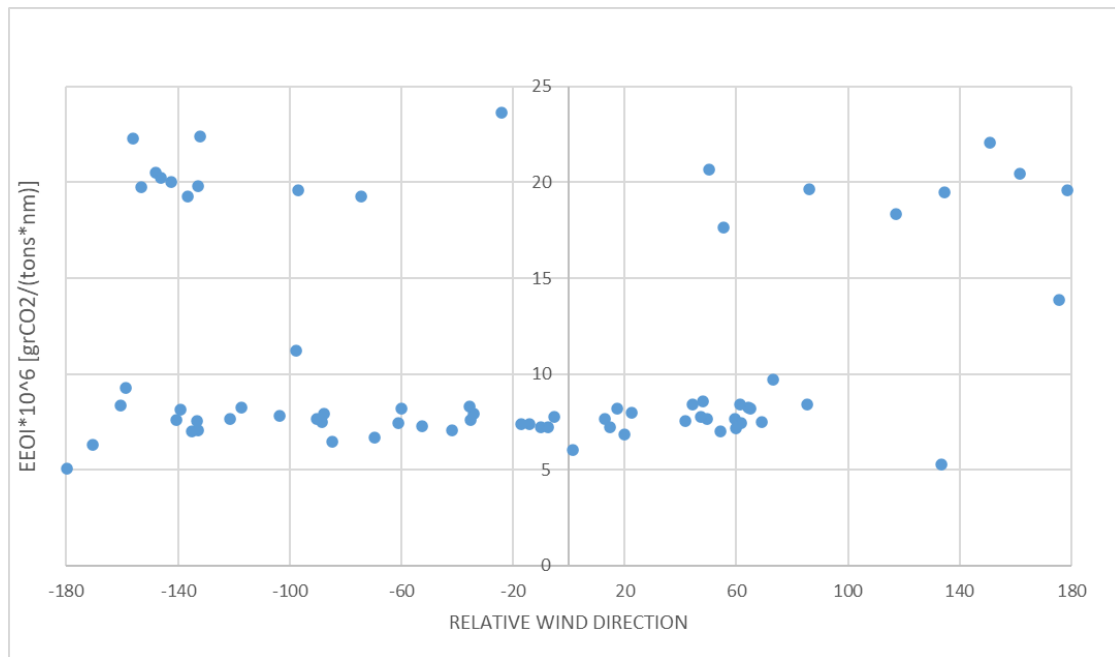
$Wind_{rel.dir}$: σχετική κατεύθυνση του ανέμου



8

Εικόνα 11 Ονοματολογία γωνιών σχετικού ανέμου (τα βελάκια δείχνουν την κατεύθυνση από την οποία έρχεται ο άνεμος)

⁸ Figure from: Ship anemometer bias management, Ocean Engineering 216 (2020) 107843

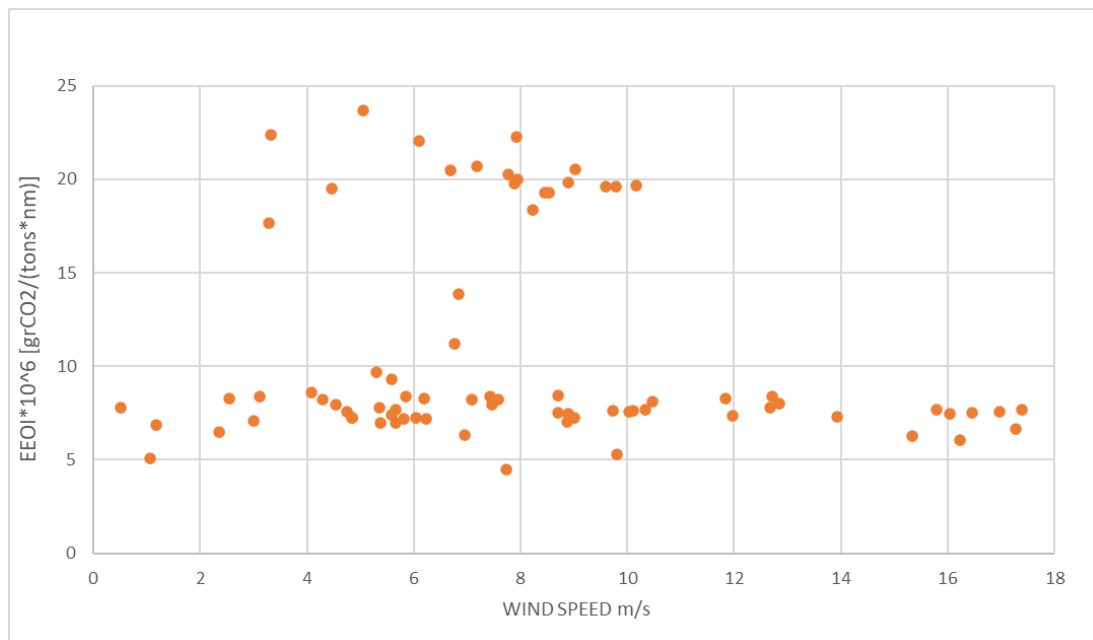


Διάγραμμα 6.20 Δείκτης EEOI για $V > 3$ knots και σχετική κατεύθυνση ανέμου

6.4.2 Επίδραση ταχύτητας ανέμου

Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα EEOI (λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα με $V > 3$ knots) και ταχύτητα ανέμου. Επισημαίνεται πως και εδώ η ταχύτητα του ανέμου ανά δωρο υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των μετρήσεων ανά λεπτό, από τα δεδομένα.

$$Wind_{speed} = \frac{\sum_n Wind\ Speed}{n}$$



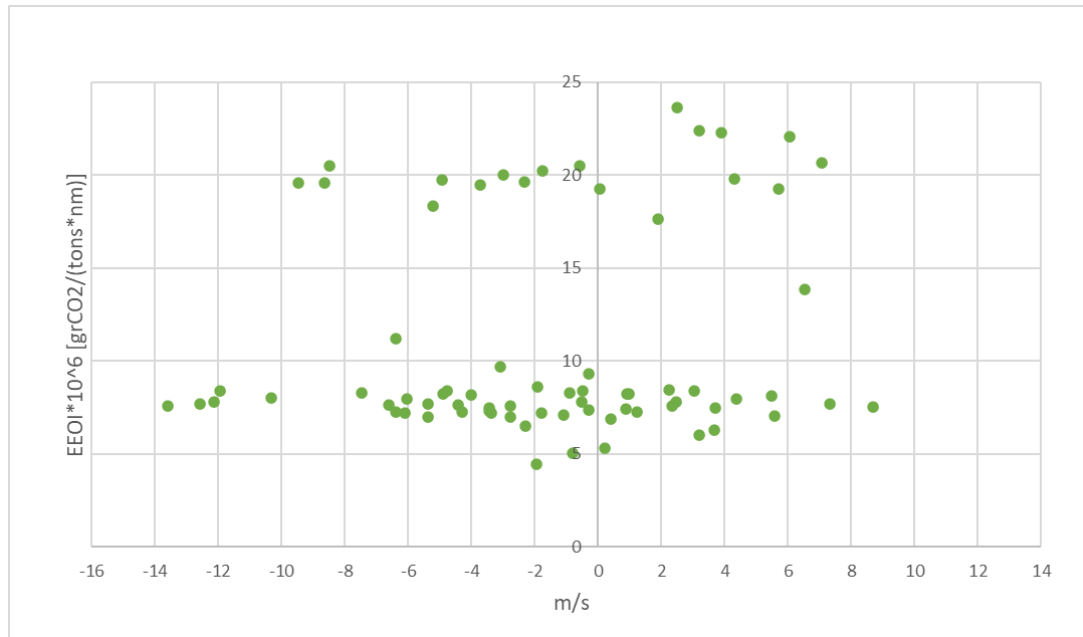
Διάγραμμα 6.21 Δείκτης EEOI για $V > 3$ knots και ταχύτητα ανέμου

Τέλος, γίνεται υπολογισμός της παραμέτρου:

$$F = Wind_{speed} * \cos Wind_{rel.dir}$$

Εξ. 6.4

και πραγματοποιείται διάγραμμα με τον δείκτη ΕΕΟΙ.



Διάγραμμα 6.22 Δείκτης ΕΕΟΙ για $V > 3$ knots και παράμετρος F

Παρατηρούνται αυξήσεις του δείκτη ΕΕΟΙ σε εύρος πλεύσεων ως προς των παραμέτρων του καιρού, και δεν συμπεραίνονται συγκεκριμένες πλεύσεις όσον αφορά την συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

7 Δείκτης απόδοσης εξαρτώμενος της ισχύος (KPI_P)

Γίνεται υπολογισμός ενός δείκτη απόδοσης (kpi) που εξαρτάται από την ισχύ της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών, την απόσταση που διανύεται και το φορτίο που μεταφέρεται σε αυτήν. Δηλαδή:

$$KPI_P = \frac{P}{m_{cargo} * D} [kW/(tons * nm)]$$

Εξ. 7.1

Όπου

P: η ισχύς της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών

m_{cargo} : η μάζα του μεταφερόμενου φορτίου

D: η απόσταση που διανύεται σε ναυτικά μίλια, η οποία αντιστοιχεί για την μεταφορά του φορτίου.

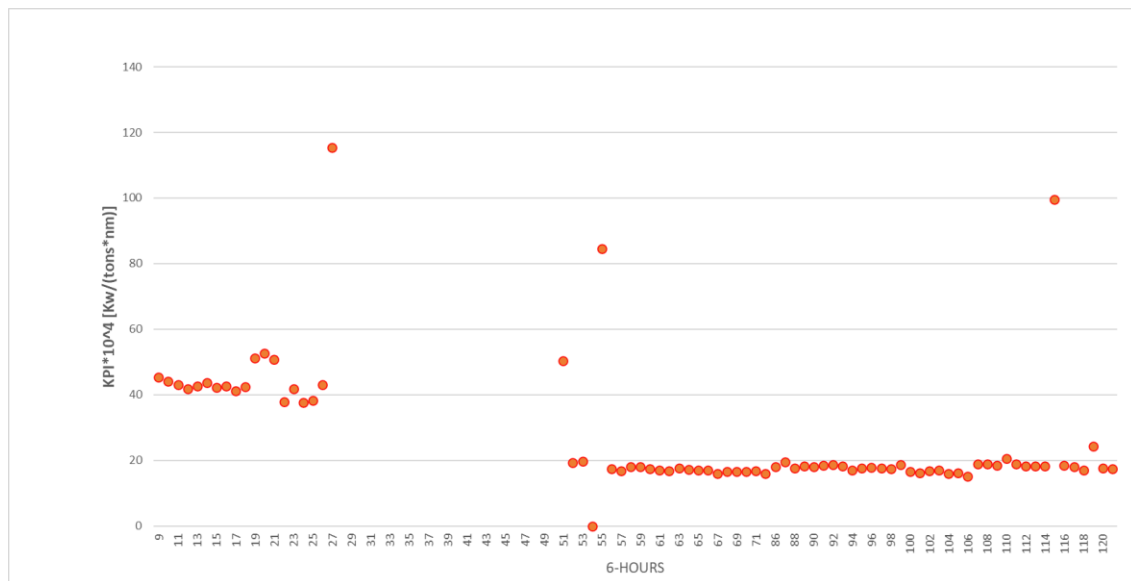
Η μάζα και η απόσταση υπολογίσθηκε όπως στα προηγούμενα κεφάλαια , η ισχύς υπολογίστηκε ανά 6ωρο από τον μέσο όρο της ισχύος ανά λεπτό από τα δεδομένα:

$$P = \frac{\sum n(P_i)}{n} [kW]$$

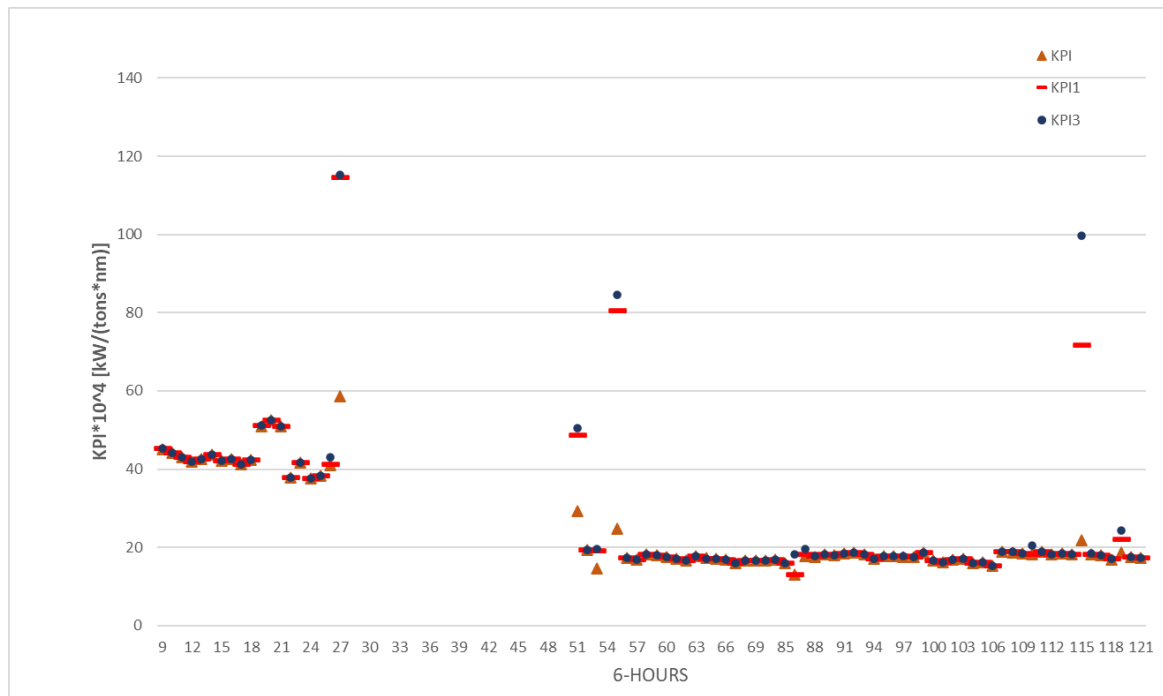
Εξ. 7.2

Σημειώνεται, όπως και στον δείκτη ΕΕΟΙ , έγιναν και εδώ υπολογισμοί χωρίς περιορισμό δεδομένων από την ταχύτητα, και με περιορισμό των 1 knots και 3 knots (kpi, kpi1, kpi3 αντίστοιχα).

Αποκλείοντας τις πολύ ψηλές τιμές του δείκτη , δηλαδή τα 6ωρα στα οποία θεωρήθηκε και ότι το πλοίο είναι στο λιμάνι, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα (fixed).



Διάγραμμα 7.1 kpi για $V > 3$ knots μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων 6ώρων



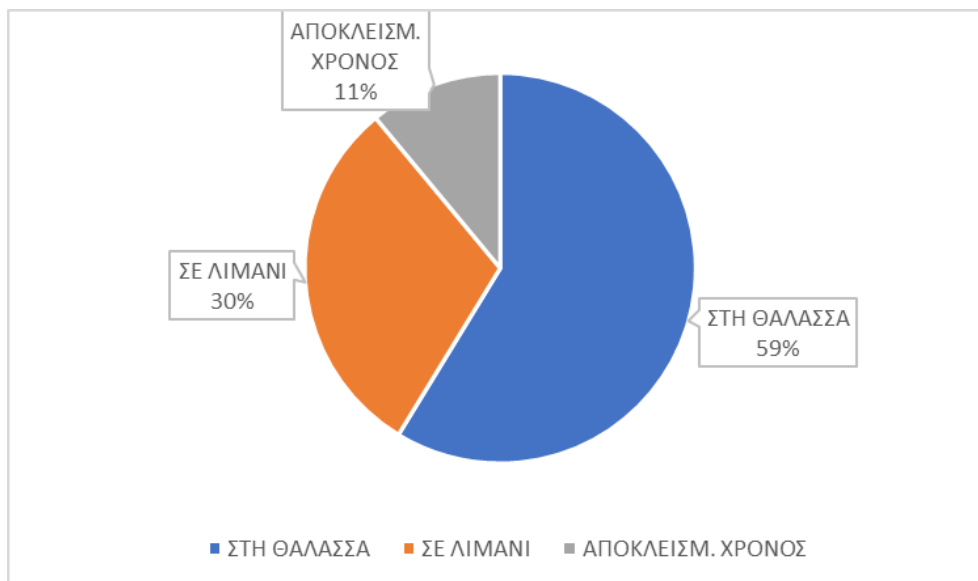
Διάγραμμα 7.2 k_{PI} , k_{PI} για $V > 1$ knots και για $V > 3$ knots μετά τον αποκλεισμό κατάλληλων βώρων

Παρατηρούνται, όπως είναι αναμενόμενο, μικροδιαφορές του δείκτη σε διάφορα βωρα.

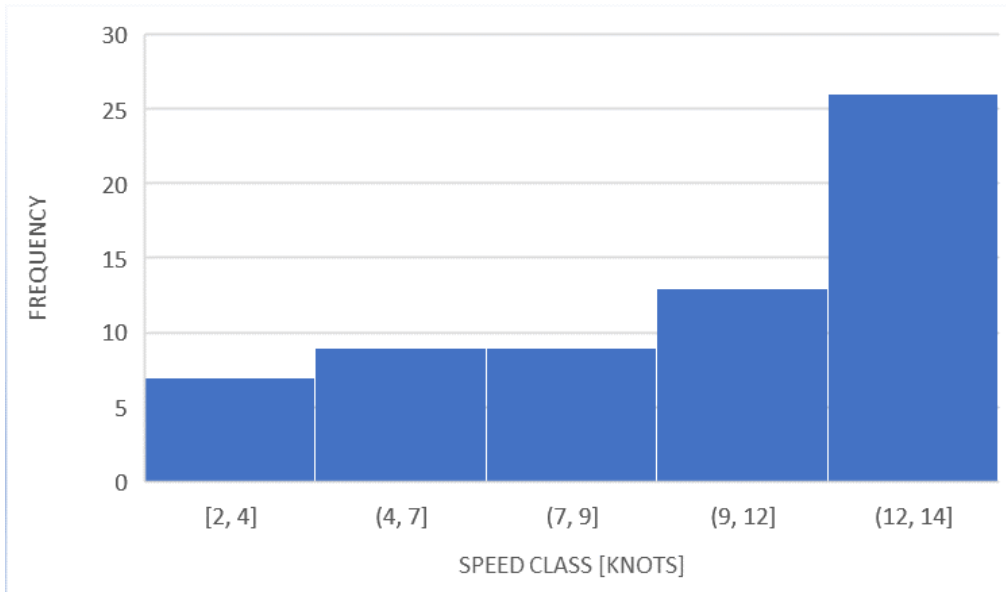
8 Παρουσίαση ανάλυσης ολόκληρης χρονικής περιόδου

Πραγματοποιείται αντίστοιχη ανάλυση για τους υπόλοιπους μήνες όπως προηγήθηκε για τον μήνα Απρίλιο, και παρουσιάζονται συνολικά αποτελέσματα για όλο το χρονικό διάστημα.

Επίσης, υπολογίζεται το ποσοστό του χρόνου που μελετάται, όπου το πλοίο βρίσκεται στη θάλασσα ή σε λιμάνι, αλλά και το ποσοστό του χρόνου που αποκλείστηκε, το οποίο σημειώνεται ως «αποκλεισμένος χρόνος» (Διάγραμμα 8.1). Σημειώνεται πως ο αποκλεισμένος χρόνος οφείλεται στην ύπαρξη μη αποδεκτών μεγεθών, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται μεγάλη κατανάλωση με πολύ μικρή αντίστοιχη διανυόμενη απόσταση ή μεγάλη διανυόμενη απόσταση με αντίστοιχη μικρή κατανάλωση. Στο Διάγραμμα 8.2, φαίνεται το ιστόγραμμα συχνότητας των ταχυτήτων για το χρονικό διάστημα.



Διάγραμμα 8.1 Ποσοστό του χρόνου σε θάλασσα, σε λιμάνι και που αποκλείστηκε

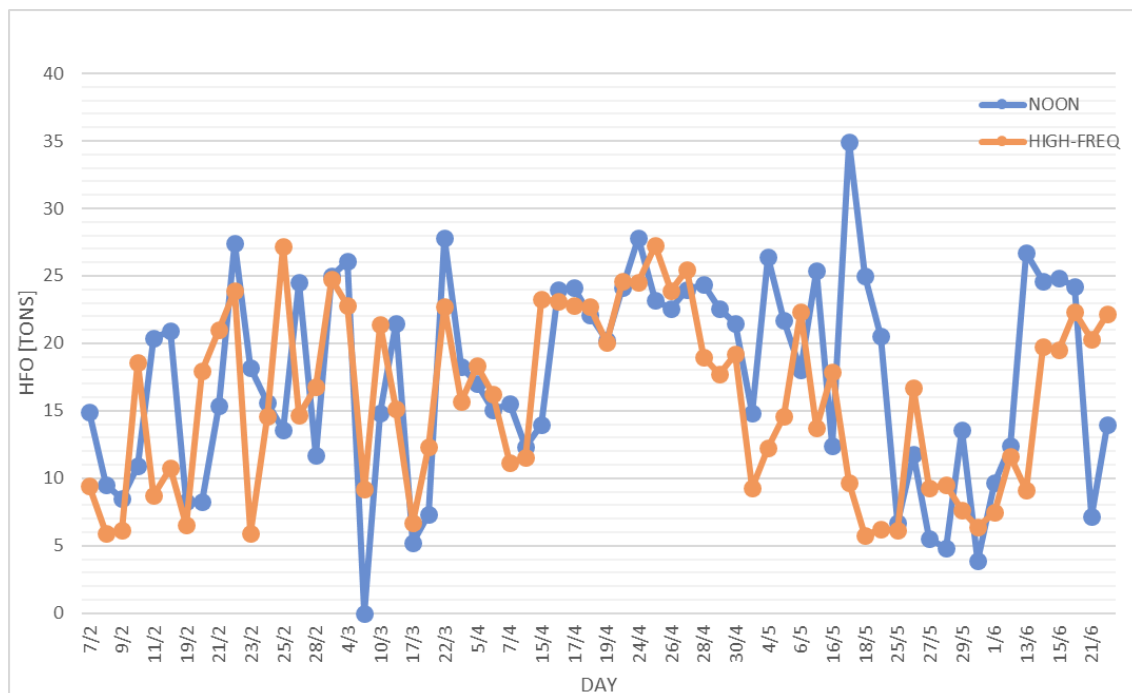


Διάγραμμα 8.2 Συχνότητα ταχυτήτων υπολογισμένων ανά ημέρα

8.1 Υπολογισμός ανά ημέρα

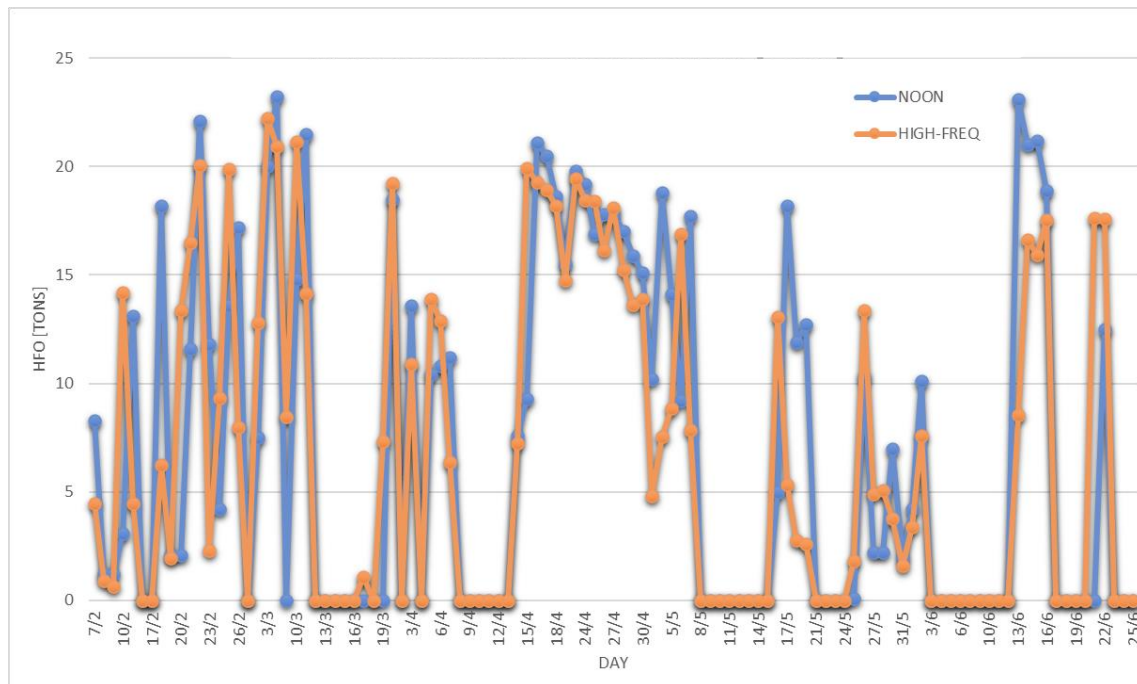
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και υπολογισμών ανά ημέρα.

Αρχικά παρουσιάζονται τα από κοινού διαγράμματα κατανάλωσης HFO (Διάγραμμα 8.3) και κατανάλωσης μόνο της κύριας μηχανής (Διάγραμμα 8.4) για τα noon και high-frequency reports, και γίνονται ιστογράμματα με τις ποσοστιαίες διαφορές τους (Διάγραμμα 8.5) (Διάγραμμα 8.6). Στις ποσοστιαίες διαφορές τους έχουν ληφθεί οι αρνητικές τιμές όταν στα high-frequency είναι μεγαλύτερα από τα noon, ενώ θετικές όταν noon > high-frequency.

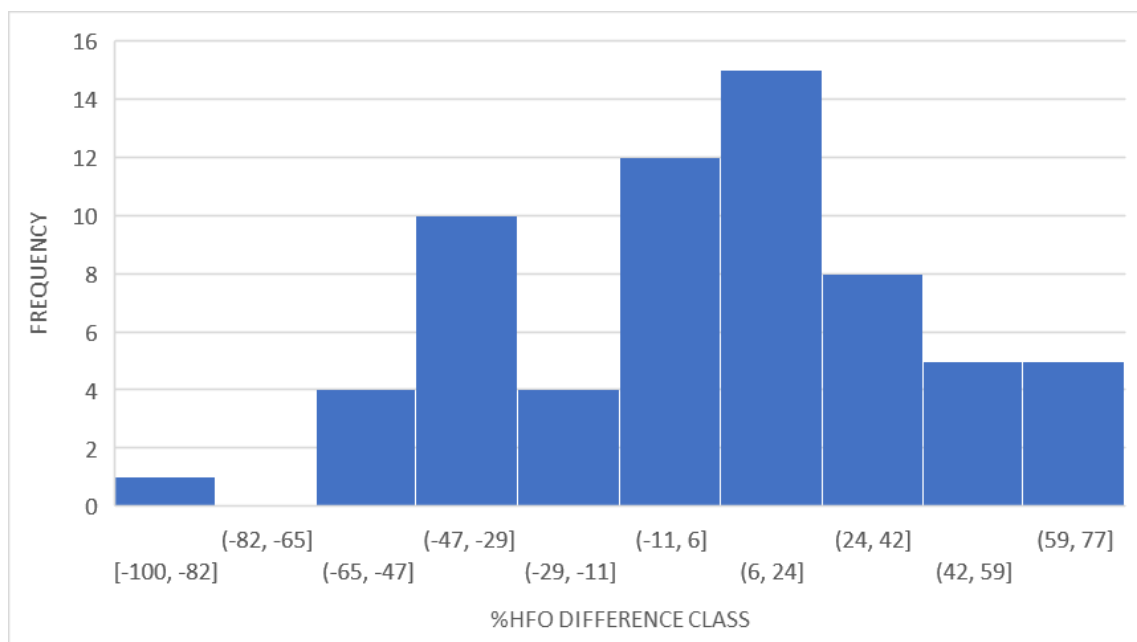


Διάγραμμα 8.3 Κατανάλωση συνολικού HFO για noon και high-freq reports ανά ημέρα

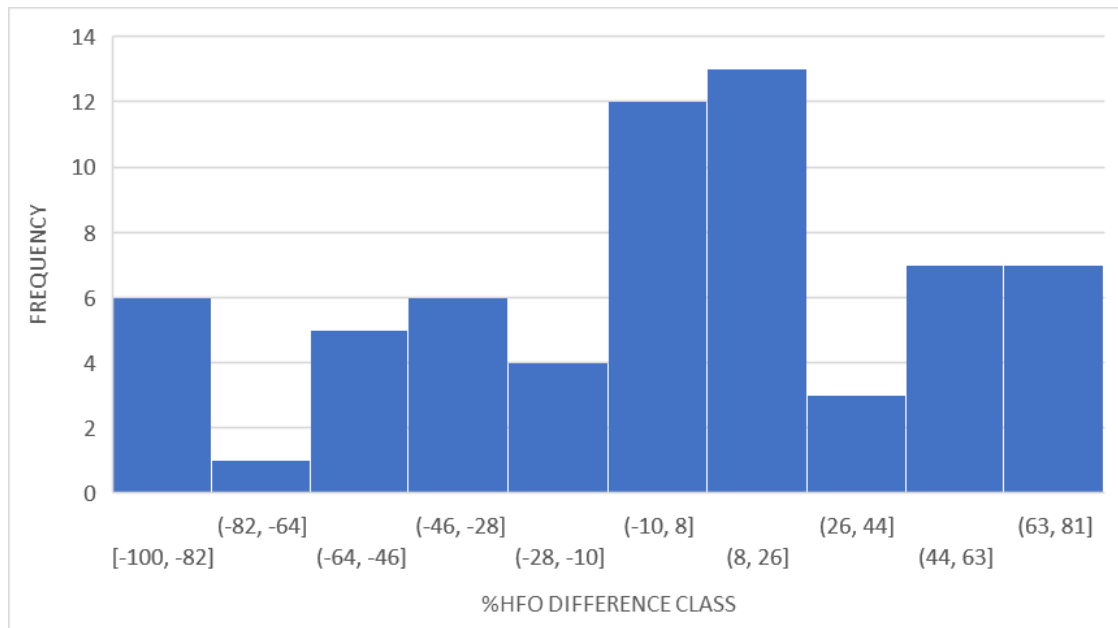
Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



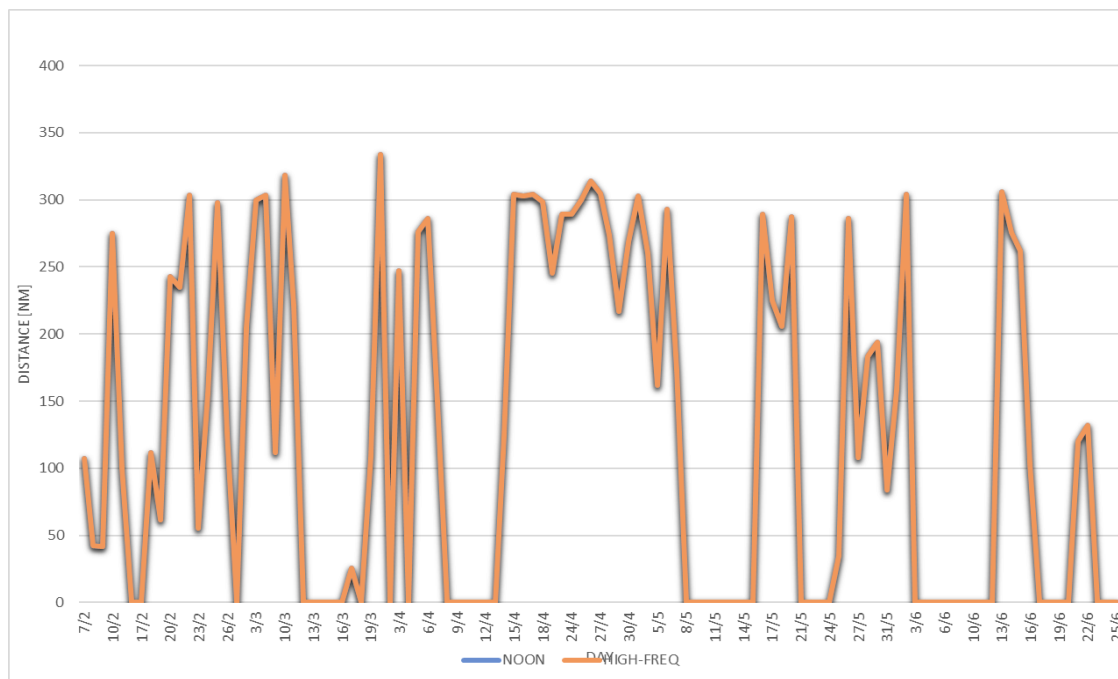
Διάγραμμα 8.4 Κατανάλωση HFO κύριας μηχανής για noon και high-freq reports ανά ημέρα



Διάγραμμα 8.5 Ιστόγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς κατανάλωσης HFO noon και high-freq ανά ημέρα.



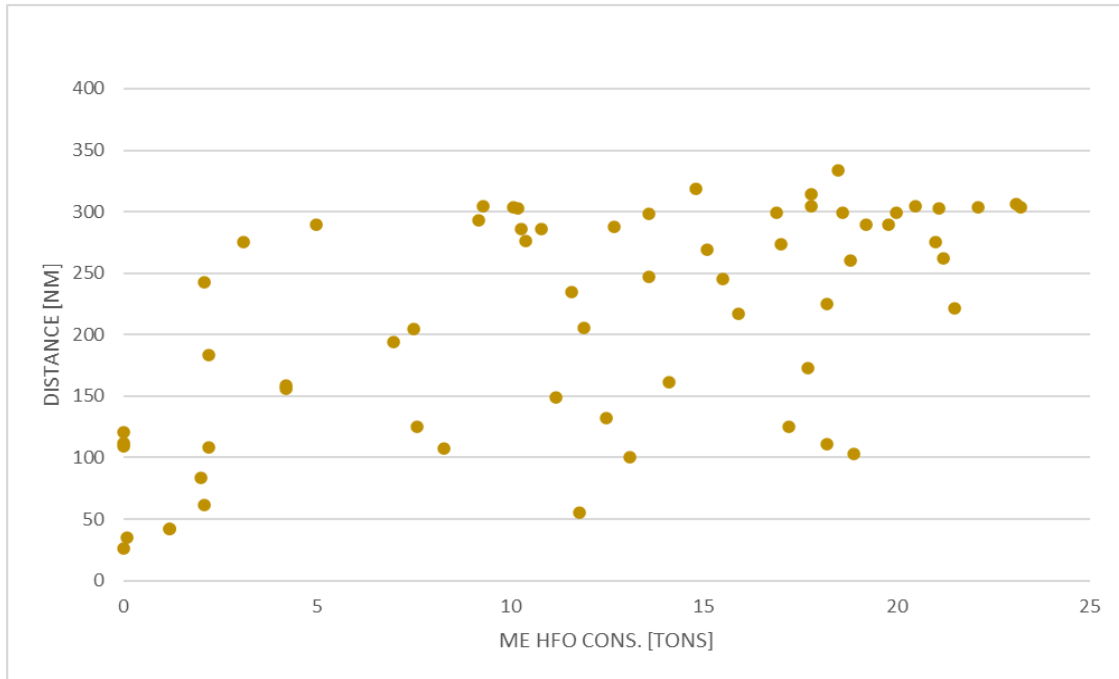
Διάγραμμα 8.6 Ιστόγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς κατανάλωσης HFO κύριας μηχανής noon και high-freq ανά ημέρα.



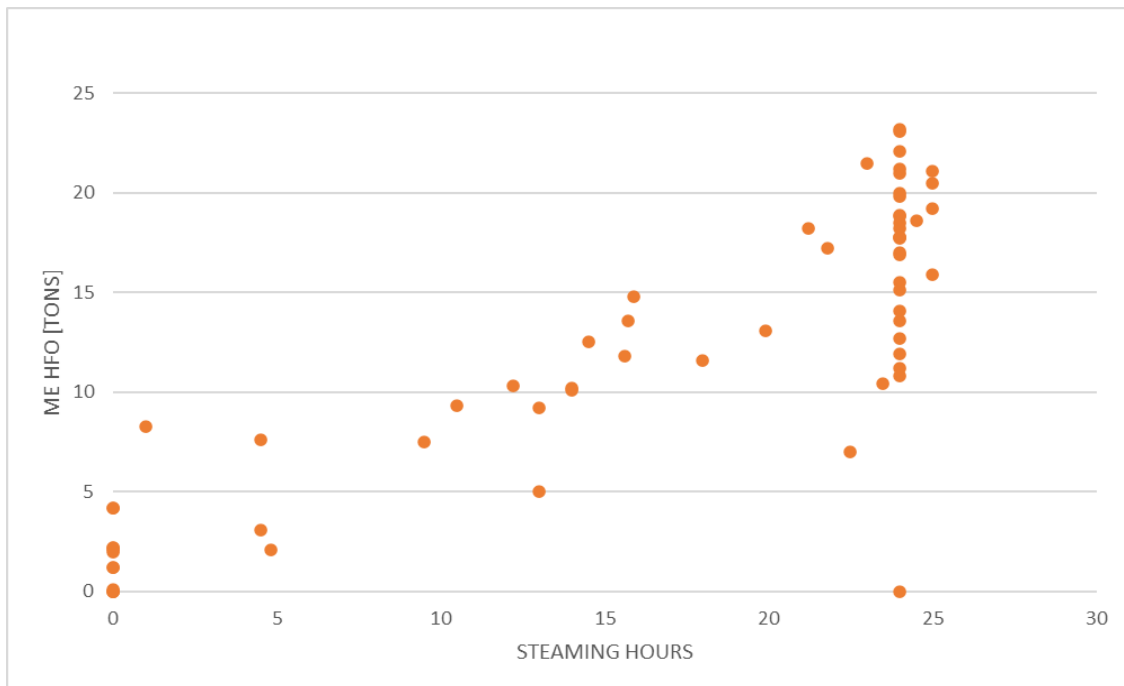
Διάγραμμα 8.7 Απόσταση που διανύεται ανά ημέρα για noon και high-freq reports

Πραγματοποιούνται διαγράμματα διανυόμενης απόστασης-κατανάλωσης κύριας μηχανής για noon(Διάγραμμα 8.8) και high-freq reports(Διάγραμμα 8.10), και σύγκριση κατανάλωσης κύριας μηχανής με steaming hours που υπήρχαν στα noon reports(Διάγραμμα 8.9).

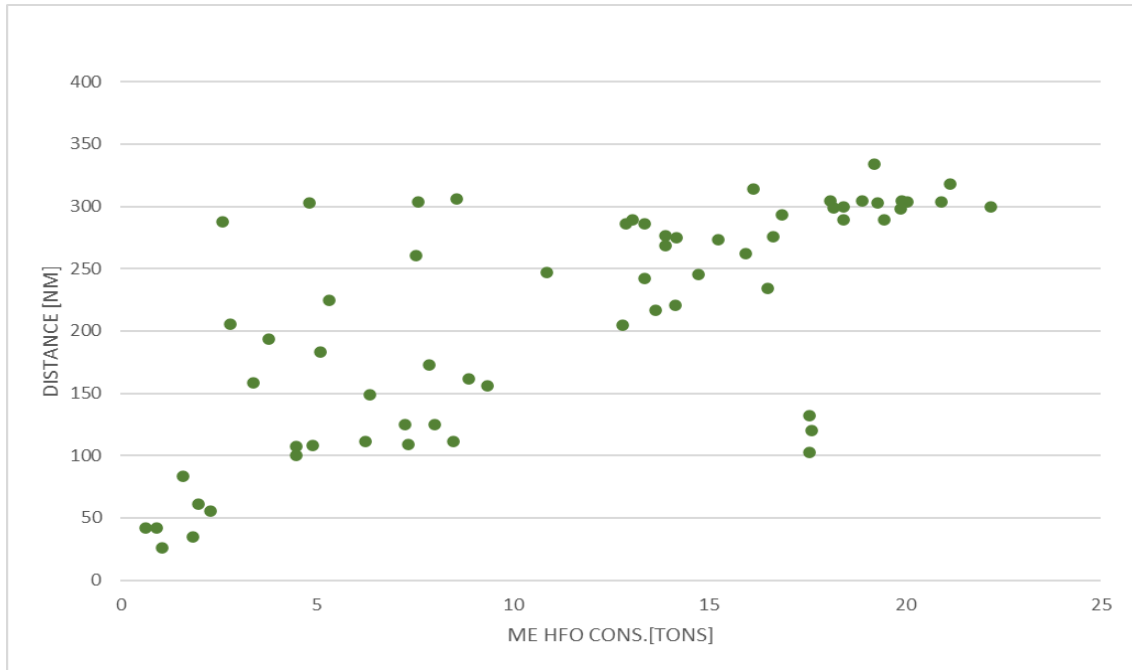
Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 8.8 Διανυόμενη απόσταση με κατανάλωση HFO κύριας μηχανής για 200 reports ανά ημέρα

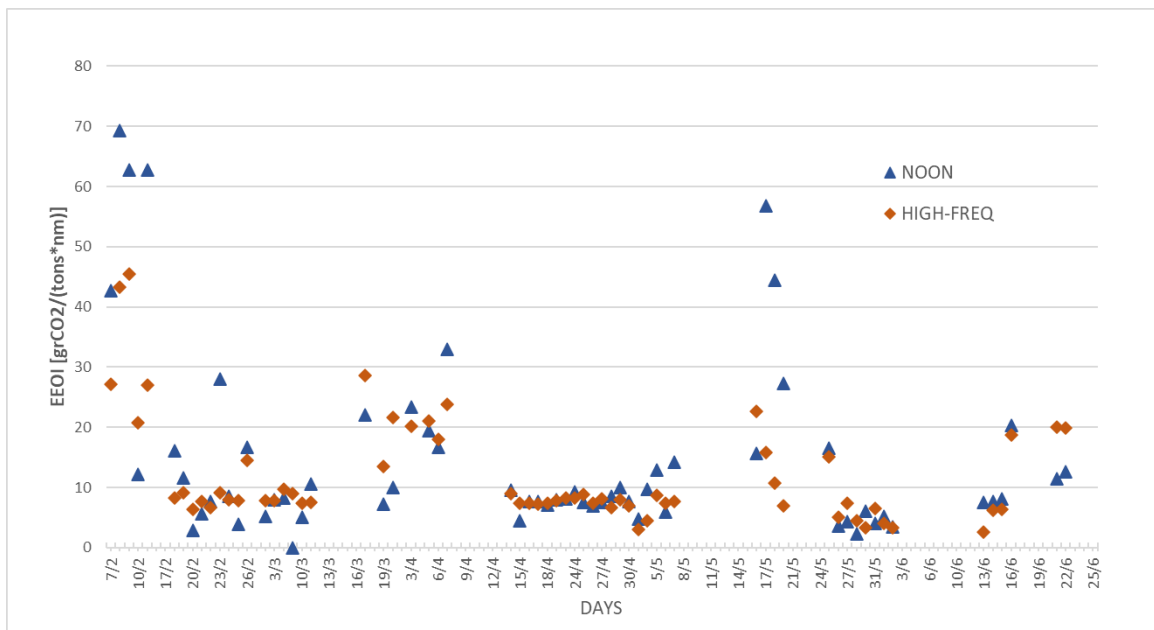


Διάγραμμα 8.9 Κατανάλωση HFO κύριας μηχανής και steaming hours για 200 reports ανά ημέρα

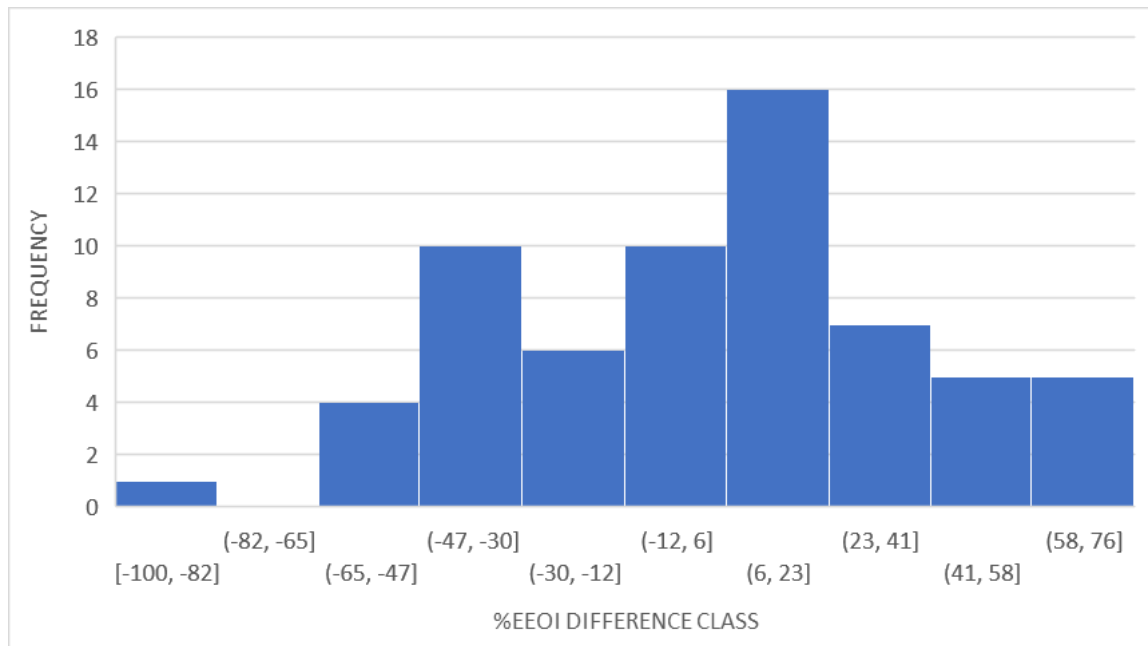


Διάγραμμα 8.10 Κατανάλωση HFO κύριας μηχανής και διανύσιμη απόσταση για high-freq reports ανά ημέρα

Τέλος, υπολογίζεται ο δείκτης ΕΕΟΙ (Διάγραμμα 8.11) και παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά του μεταξύ ποση και high-freq (Διάγραμμα 8.12). Όμοια και εδώ, στις ποσοστιαίες διαφορές, όταν ο δείκτης στα high-freq είναι μεγαλύτερος από τα ποση είναι το πρόσημο είναι αρνητικό, ενώ όταν ποση > high-freq είναι θετικό.



Διάγραμμα 8.11 Δείκτης ΕΕΟΙ ανά ημέρα για ποση και high-freq



Διάγραμμα 8.12 Ιστόγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς δείκτη EEOI noon και high-freq ανά ημέρα.

Επίσης, γίνεται υπολογισμός του μέσου όρου του δείκτη EEOI για όλο το χρονικό διάστημα για τους δύο τύπους δεδομένων (noon και high-freq).

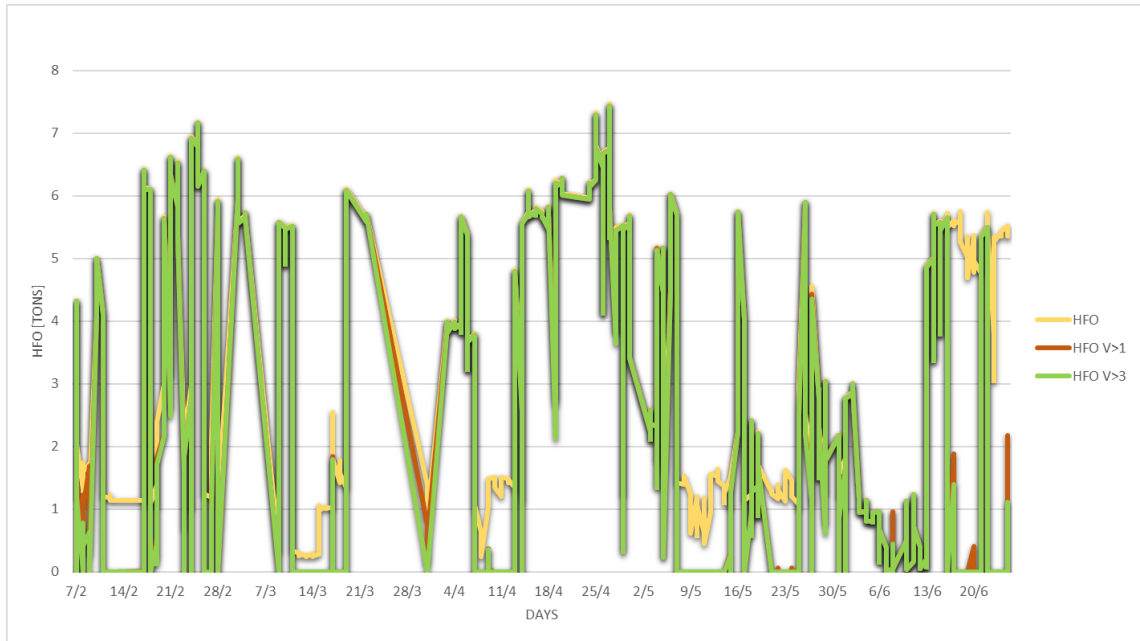
Πίνακας 3 Μέσος όρος EEOI για high-freq και noon

EEOI _{avg}	
High-freq	Noon
11,82	14,62

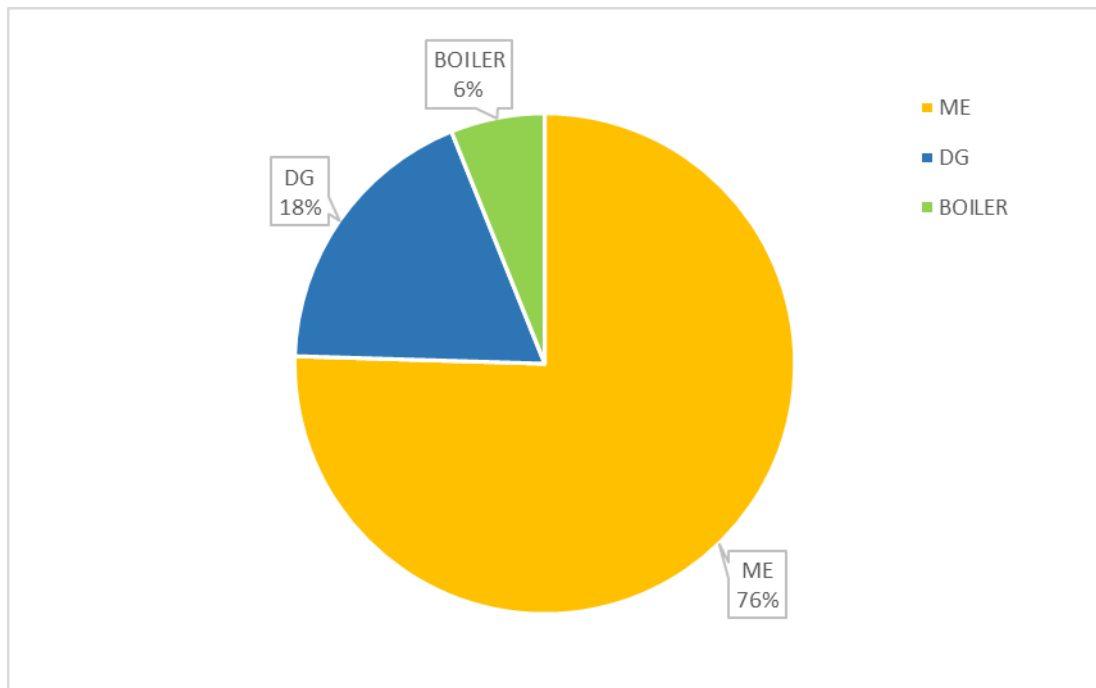
Φαίνεται λοιπόν πως κατά μέσο όρο ο δείκτης EEOI υπολογισμένος με τα δεδομένα των noon reports είναι κατά 21,18% μεγαλύτερος από αυτόν με high-freq.

8.2 Υπολογισμός ανά δωρο

Πραγματοποιούνται, λοιπόν, υπολογισμοί και ανάλυση ανά δωρο, για τα high-frequency reports. Γίνονται υπολογισμοί χωρίς περιορισμό δεδομένων από την ταχύτητα, με περιορισμό 1 Knot και με 3 Knots. Στο Διάγραμμα 8.13 φαίνεται η κατανάλωση HFO ανά 6 ώρες στην οποία περιλαμβάνεται οι καταναλώσεις κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών και boiler. Ενώ στο Διάγραμμα 8.14 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση για όλο το διάστημα που αφορά τους καταναλωτές ξεχωριστά, και στο Διάγραμμα 8.15 φαίνονται οι καταναλώσεις ξεχωριστά πως μεταβάλλονται στο υπό μελέτη χρονικό διάστημα. Στο Διάγραμμα 8.16 απεικονίζεται η απόσταση που διανύεται στο διάστημα αυτό.

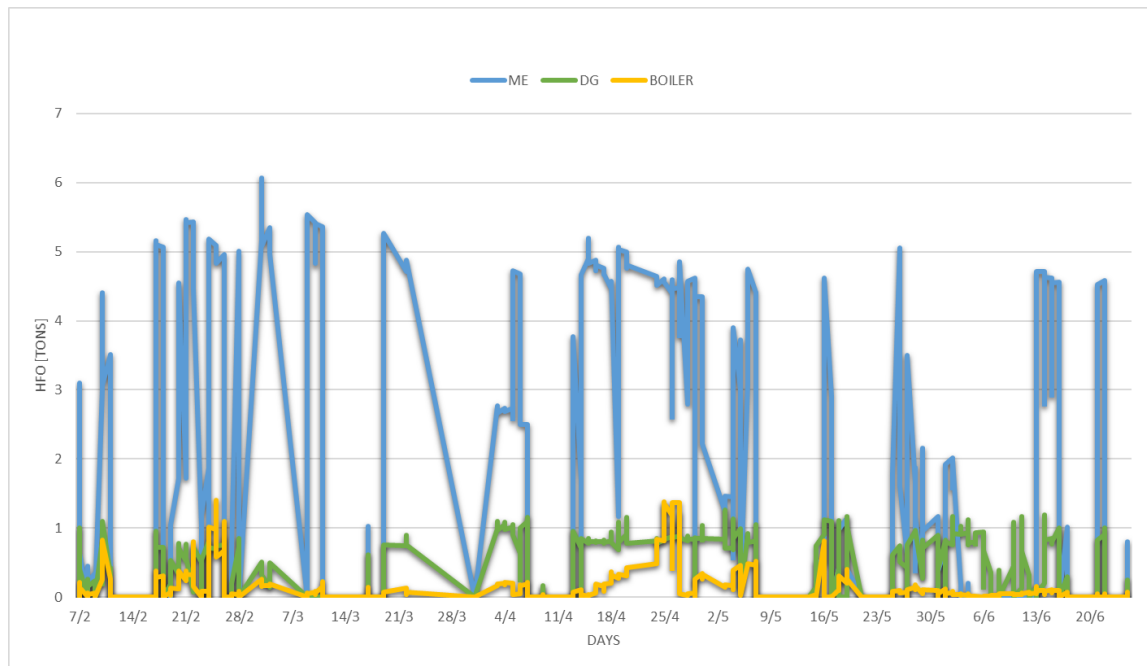


Διάγραμμα 8.13 Κατανάλωση HFO, HFO για V>1 κνот και για V>3 knots υπολογισμένη ανά διάστημα 6 ωρών

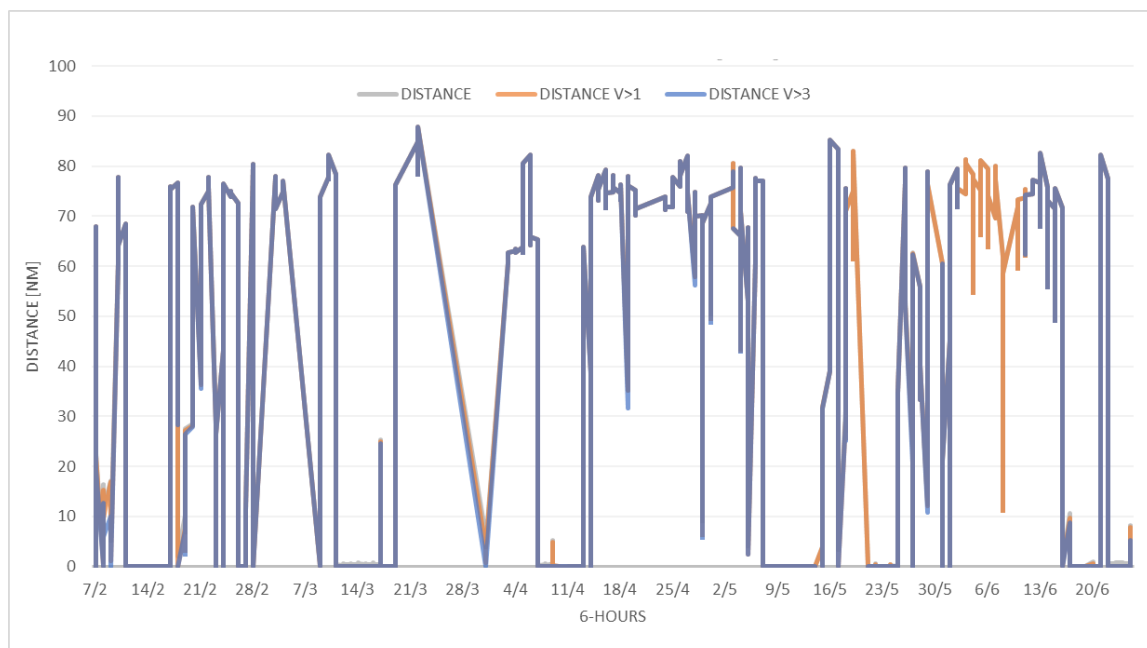


Διάγραμμα 8.14 Κατανάλωση κύριας μηχανής-ηλεκτρομηχανών-boiler συνολικά για όλο το χρονικό διάστημα

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 8.15 Κατανάλωση κύριας μηχανής-ηλεκτρομηχανών-boiler για $V > 3$ Knots, υπολογισμένη ανα διάστημα 6 ωρών

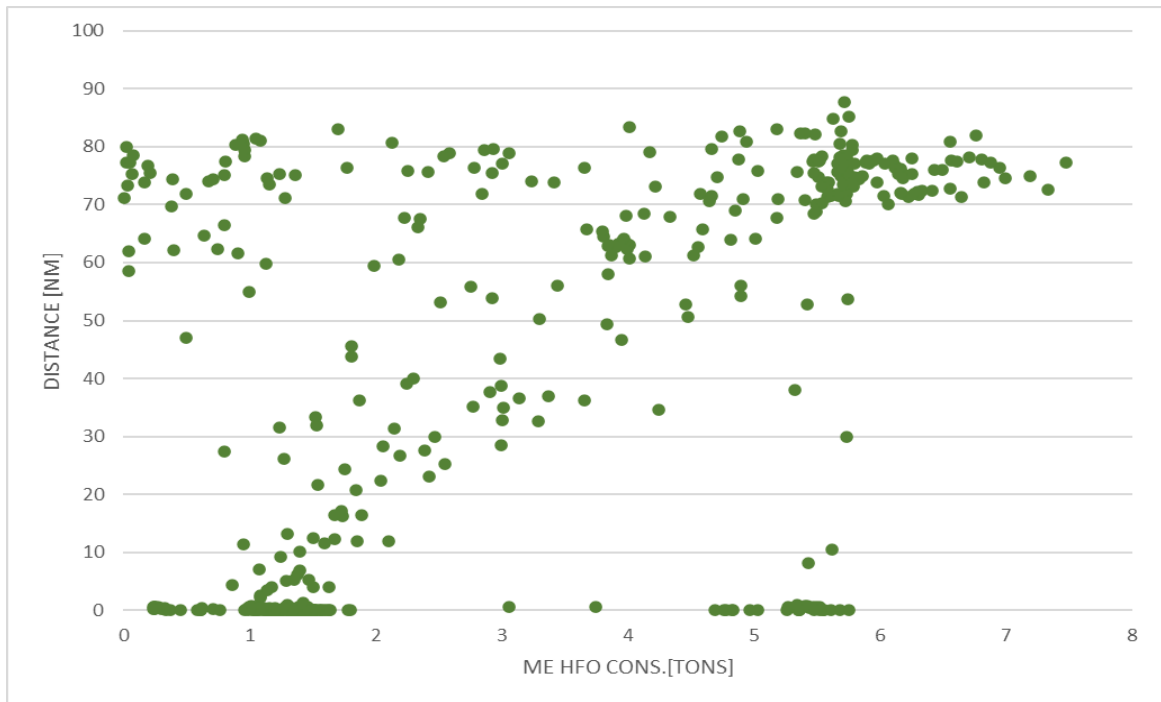


Διάγραμμα 8.16 Διανυόμενη απόσταση ανά 6 ώρες

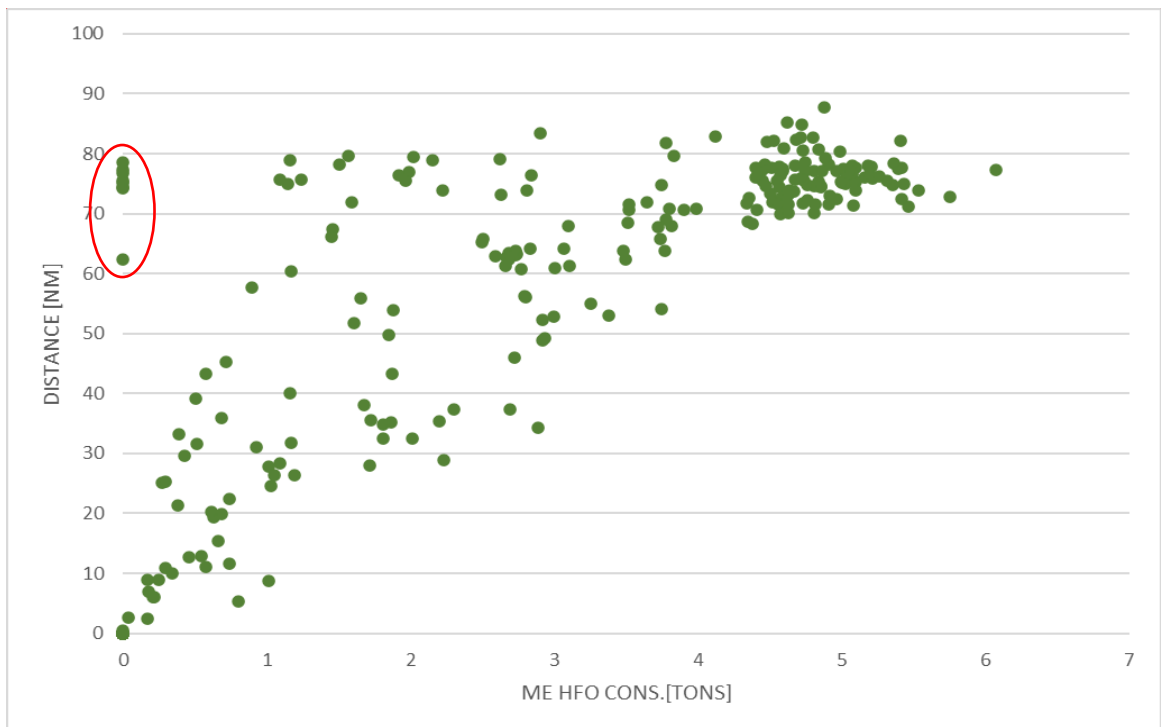
Καλό είναι και εδώ να πραγματοποιηθεί διάγραμμα για την συσχέτιση της κατανάλωσης κύριας μηχανής με την απόσταση (Διάγραμμα 8.19).

Σε αυτό το σημείο, είναι άξιο αναφοράς η επεξεργασία δεδομένων και παρουσιάζεται παρακάτω, πιο συγκεκριμένα: Αρχικά, στο Διάγραμμα 8.17 τα δεδομένα δεν έχουν υποστεί καμία επεξεργασία ή αποκλεισμό, ενώ στο Διάγραμμα 8.18 αφορά τα μεγέθη με ταχύτητα μεγαλύτερη των 3 κόμβων και τα υπόλοιπα έχουν αποκλειστεί. Τέλος, στο Διάγραμμα 8.19 παρουσιάζονται τα τελικά μεγέθη, όπου έχουν αποκλειστεί δεδομένα χειροκίνητα μετά τον

αποκλεισμό τους από την ταχύτητα μεγαλύτερη των 3 κόμβων, καθώς υπήρχαν σημεία με μεγάλες αποστάσεις κι ελάχιστη κατανάλωση, όπως φαίνονται σημειωμένα.

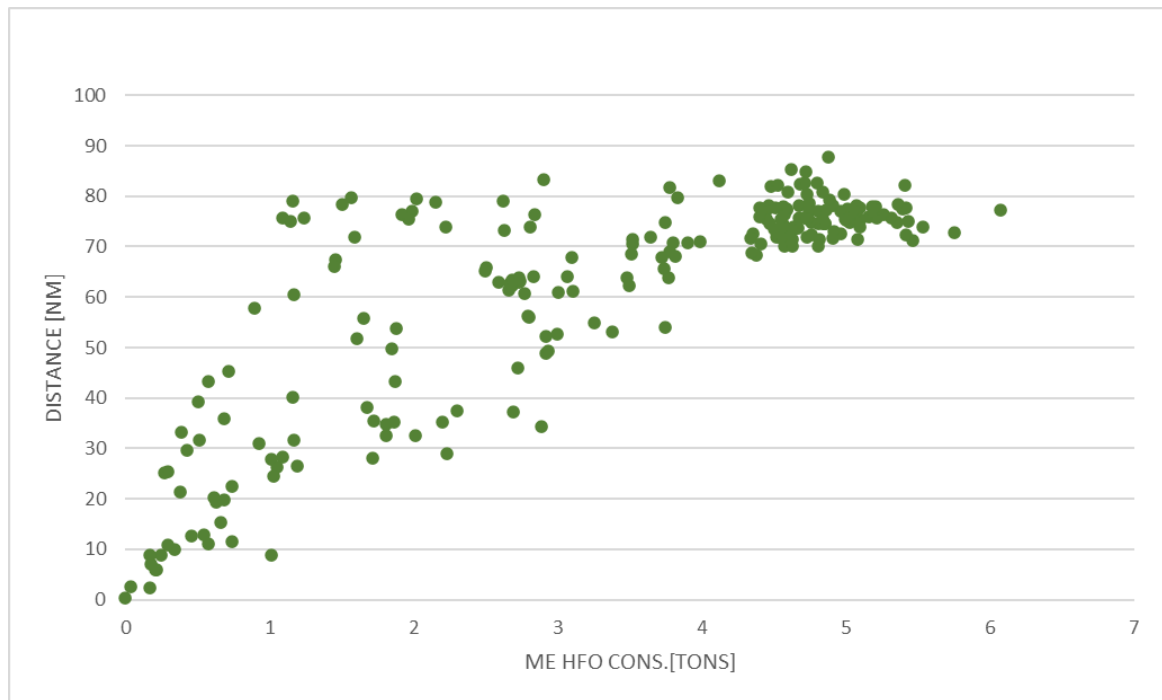


Διάγραμμα 8.17 Διανυόμενη απόσταση με κατανάλωση κύριας μηχανής



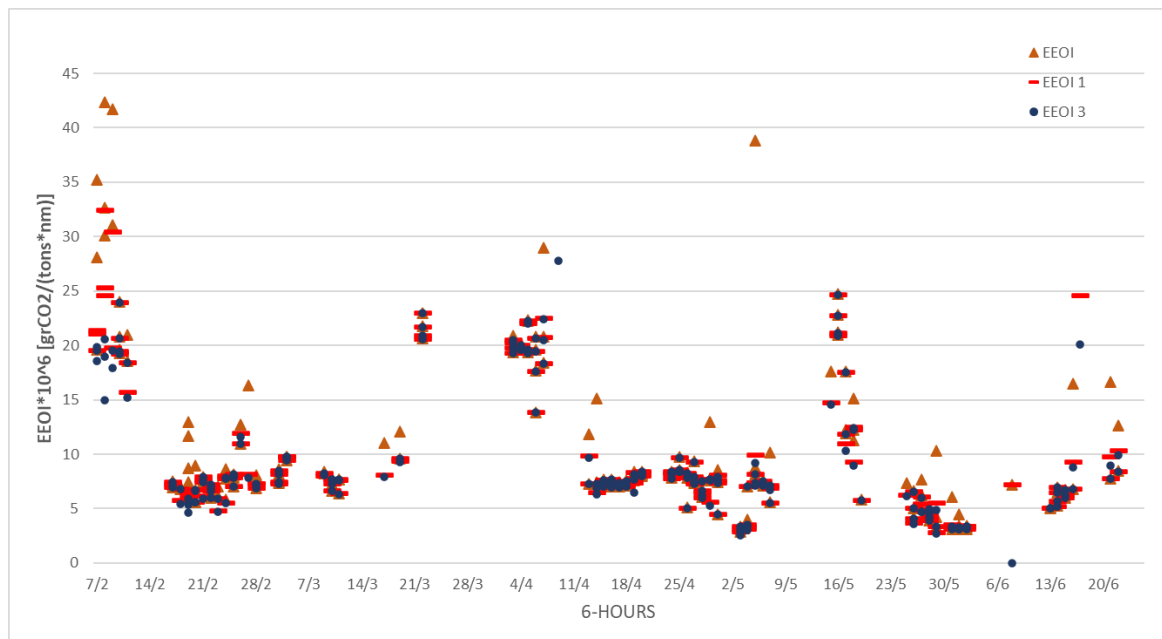
Διάγραμμα 8.18 Διανυόμενη απόσταση με κατανάλωση κύριας μηχανής για ταχύτητα $V > 3$ Knots

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 8.19 Διανυόμενη απόσταση με κατανάλωση κύριας μηχανής για ταχύτητα $V > 3$ Knots, και χειροκίνητο αποκλεισμό δεδομένων (τελικό)

Στη συνέχεια μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του δείκτη ΕΕΟΙ (Διάγραμμα 8.20).

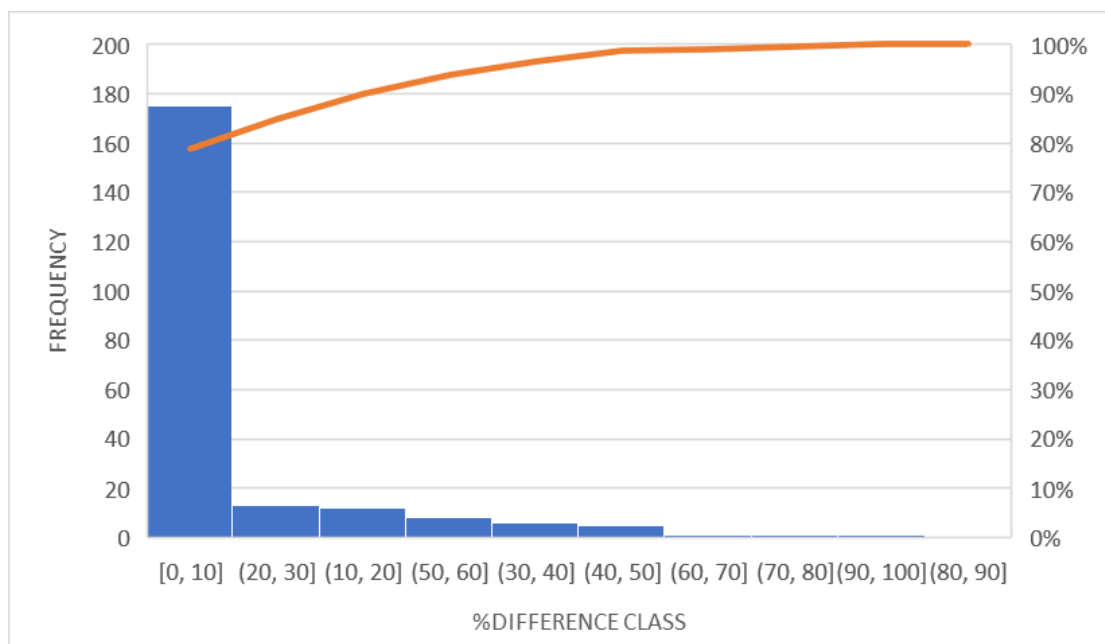


Διάγραμμα 8.20 Δείκτης ΕΕΟΙ υπολογισμένος σε διάστημα ανά 6 ώρες

Παρατηρούνται οι διαφορές μεταξύ του δείκτη ΕΕΟΙ και ΕΕΟΙ3, όπως είναι επόμενο άλλωστε και τονίζεται ιδιαίτερα η χρησιμότητα του φίλτρου ταχύτητας στον υπολογισμό του. Κάνοντας και εδώ ανάλυση διαφορών μεταξύ ΕΕΟΙ και ΕΕΟΙ3 προκύπτουν τα εξής:

- Κατά μέσο όρο η ποσοστιαία διαφορά τους είναι $D_{AVRG} = 7,86\%$
- Η τυπική απόκλιση αυτών είναι $SD = 16,23\%$

Και το Διάγραμμα 8.21, όπου φαίνεται η συχνότητα των ποσοστιαίων διαφορών τους.



Διάγραμμα 8.21 Συχνότητα ποσοστιαίας διαφοράς ΕΕΟΙ-ΕΕΟΙ3 και αθροιστική συνάρτηση (πορτοκαλί καμπύλη).

Πραγματοποιείται υπολογισμός του μέσου όρου του δείκτη ΕΕΟΙ για όλο το χρονικό διάστημα και του δείκτη ΕΕΟΙ έχοντας λάβει υπόψη δεδομένα για $V > 3$ Knots.

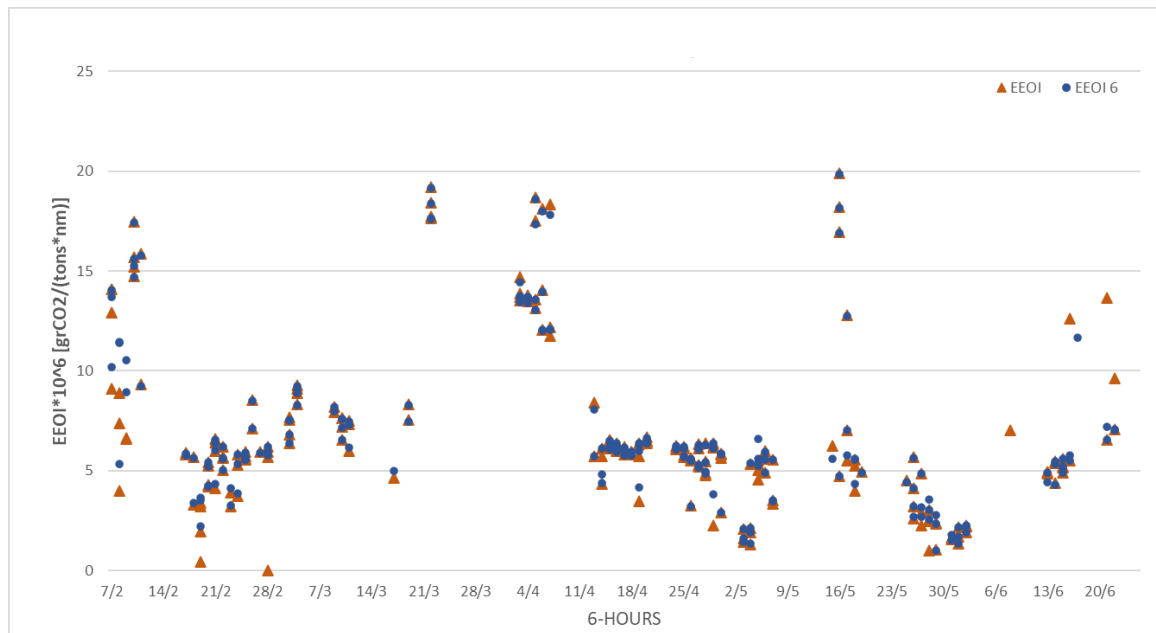
Πίνακας 4 Μέσος όρος ΕΕΟΙ και ΕΕΟΙ [$V > 3$ Knots]

ΕΕΟΙ _{avg}	ΕΕΟΙ _{avg} [$V > 3$ Knots]
10,66	9,47

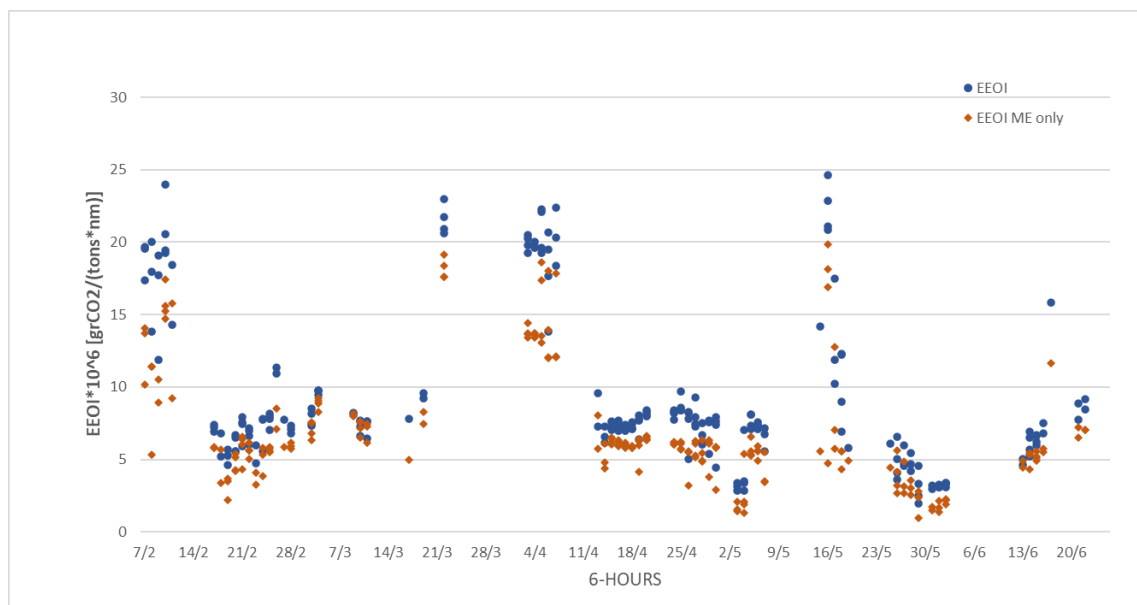
8.3 Υπολογισμός ανά δωρο με καταναλώσεις μόνο κύριας μηχανής

Κάνοντας χρήση της κατανάλωσης της κύριας μηχανής μόνο, υπολογίζεται δείκτης ΕΕΟΙ ME ONLY για όλο το υπό μελέτη χρονικό διάστημα. Αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 8.22 για στοιχεία χωρίς περιορισμό και με περιορισμό ταχύτητας $V > 6$ Knots, και στο Διάγραμμα 8.23 φαίνεται ο ΕΕΟΙ [$V > 6$ Knots] με τον δείκτη ΕΕΟΙ ME ONLY [$V > 6$ Knots].

Μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου κατά την λειτουργία του με χρήση δεικτών απόδοσης



Διάγραμμα 8.22 Δείκτης EEOI λαμβάνοντας υπόψη μόνο την κατανάλωση κύριας μηχανής

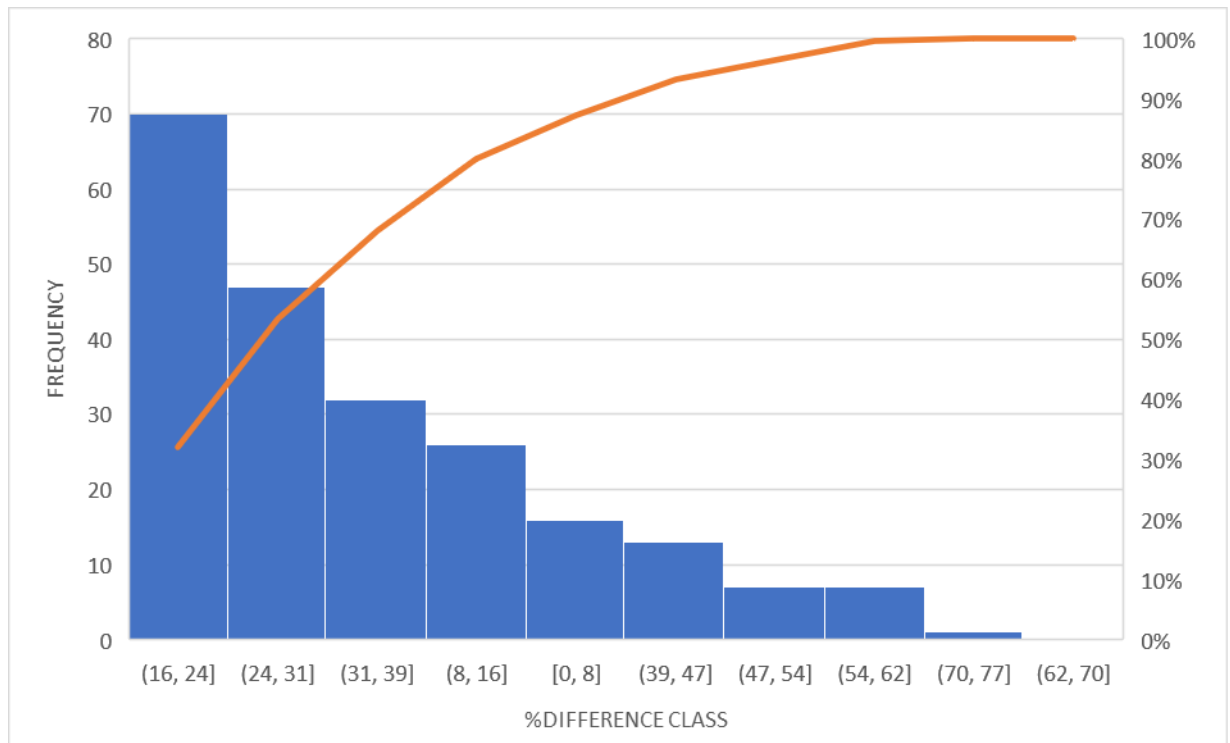


Διάγραμμα 8.23 Δείκτης EEOI και EEOI με κατανάλωση μόνο κύριας μηχανής, λαμβάνοντας υπόψη για V>6 Knots.

Αναλύοντας, τις διαφορές του EEOI (v>6 knots) με του EEOI ME only (v>6knots) και συγκεκριμένα τις ποσοστιαίες διαφορές τους, συμπεραίνονται τα εξής:

- Κατά μέσο όρο η ποσοστιαία διαφορά τους είναι $D_{AVRG} = 25,44\%$
- Η τυπική απόκλιση αυτών είναι $SD = 12,87\%$

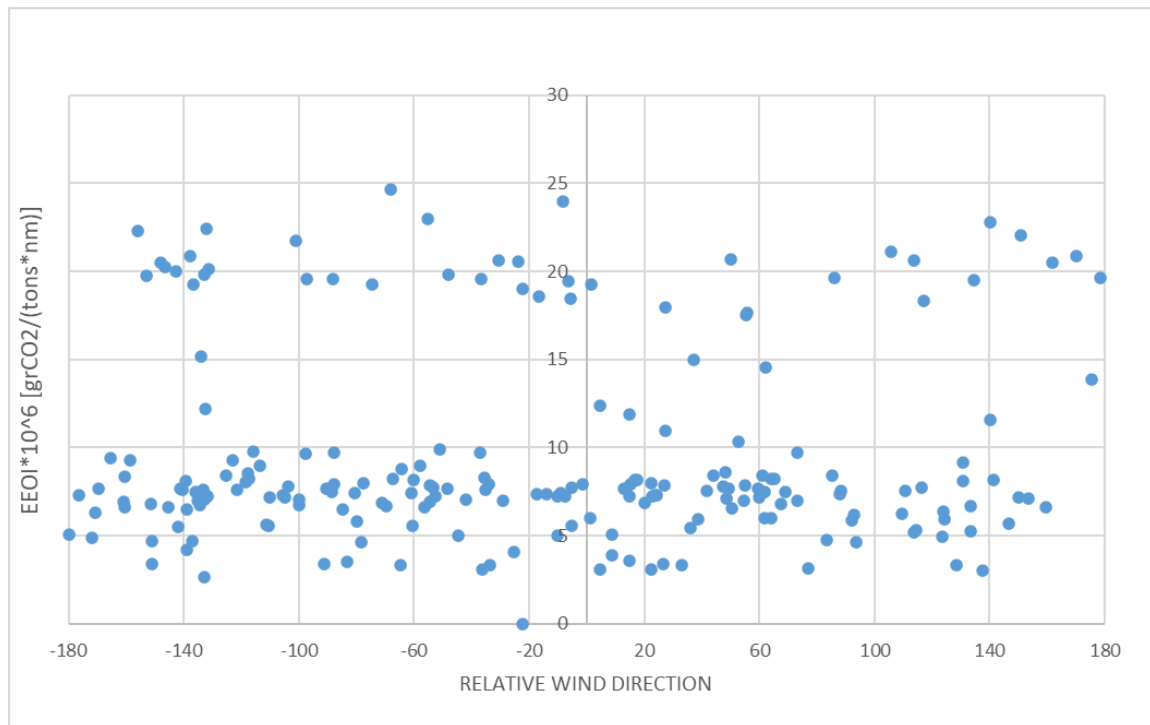
Παρουσιάζεται, επίσης, το ιστόγραμμα με την συχνότητα για τις ποσοστιαίες διαφορές τους (Διάγραμμα 8.24).



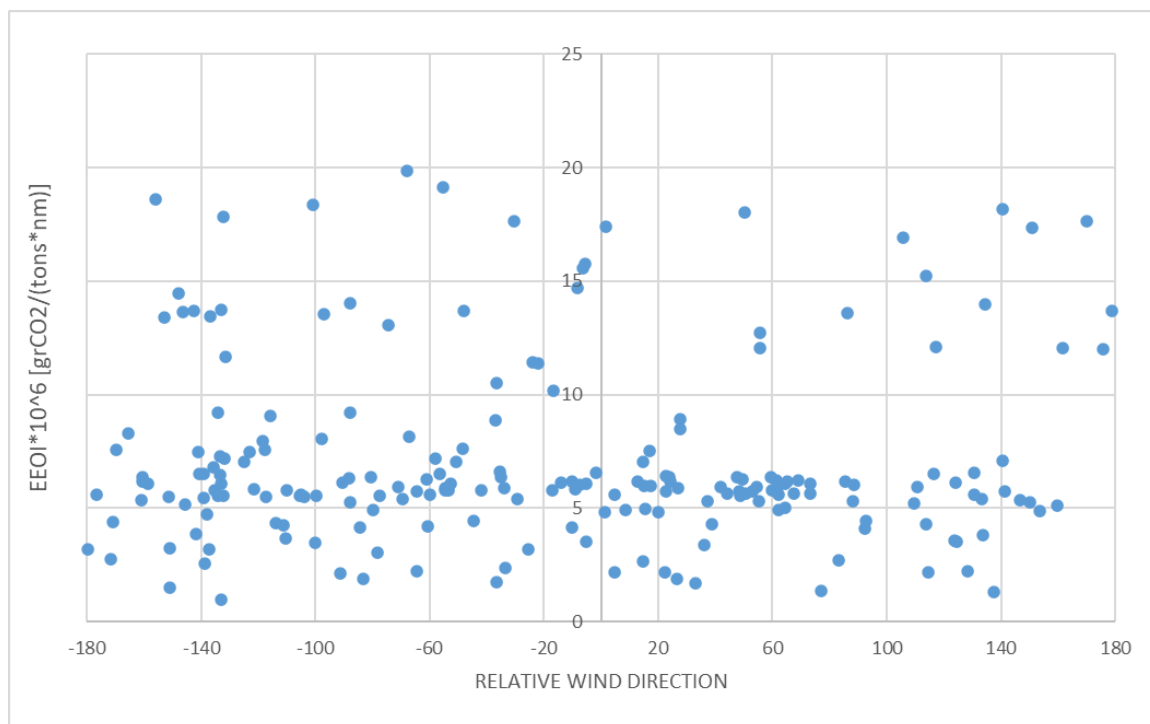
Διάγραμμα 8.24 Ιστόγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς δείκτη ΕΕΟΙ [$V > 6$ Knots] και ΕΕΟΙ μόνο κύριας μηχανής [$V > 6$ Knots] και αθροιστική συνάρτηση (πορτοκαλί καμπύλη).

8.4 Επίδραση παραμέτρων καιρού

Γίνεται και εδώ συσχέτιση του δείκτη ΕΕΟΙ (με $V > 3$ Knots), και της σχετικής διεύθυνσης του ανέμου (Διάγραμμα 8.25). Αλλά και του ΕΕΟΙ με καταναλώσεις μόνο κύριας μηχανής με $V > 6$ Knots (Διάγραμμα 8.26).

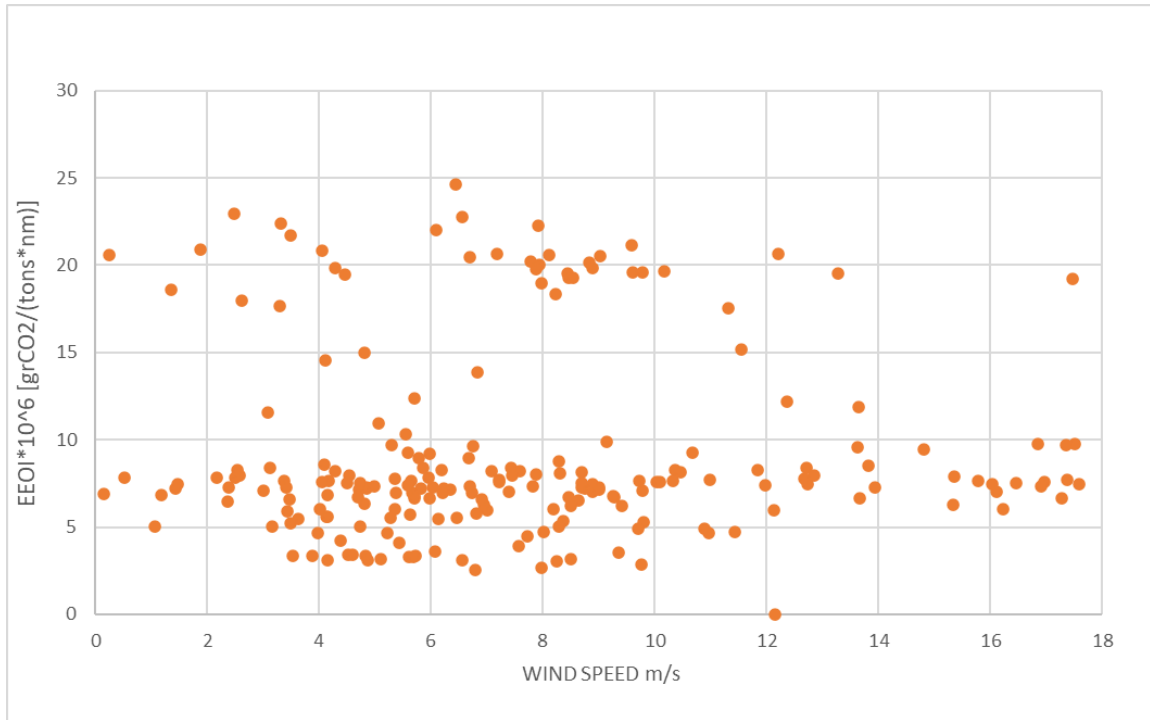


Διάγραμμα 8.25 Δείκτης EEOI3 με σχετική διεύθυνση ανέμου

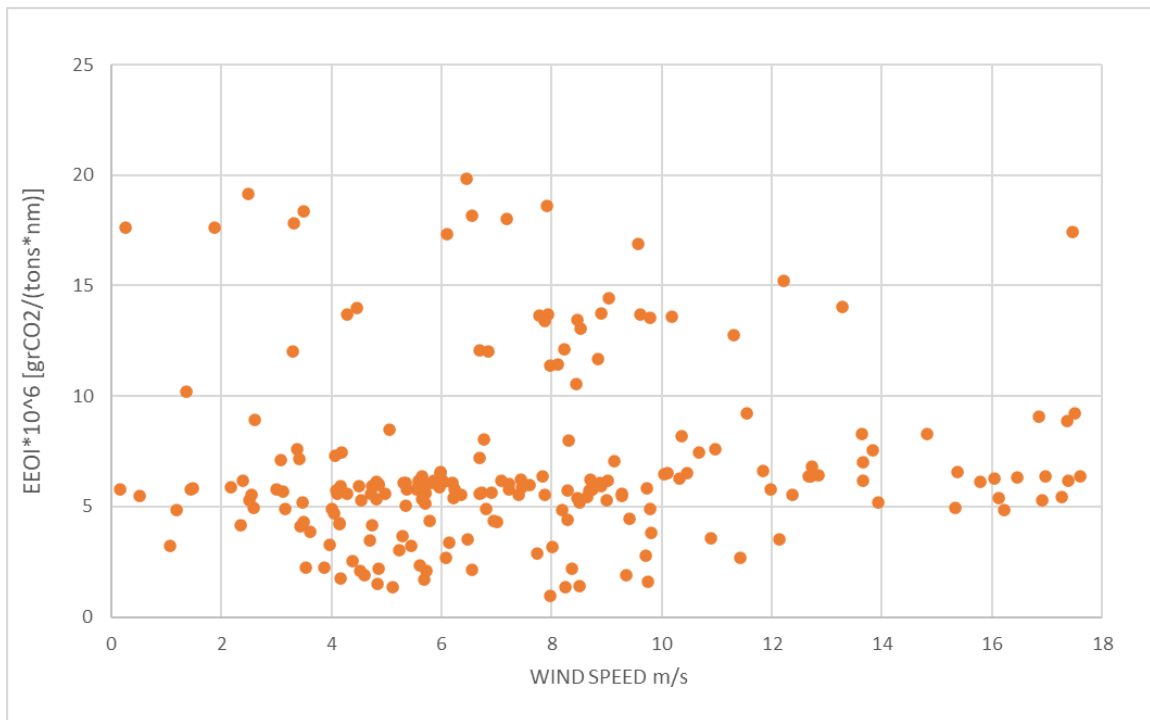


Διάγραμμα 8.26 Δείκτης EEOI με καταναλώσεις κύριας μηχανής για $V > 6$ Knots με σχετική διεύθυνση ανέμου

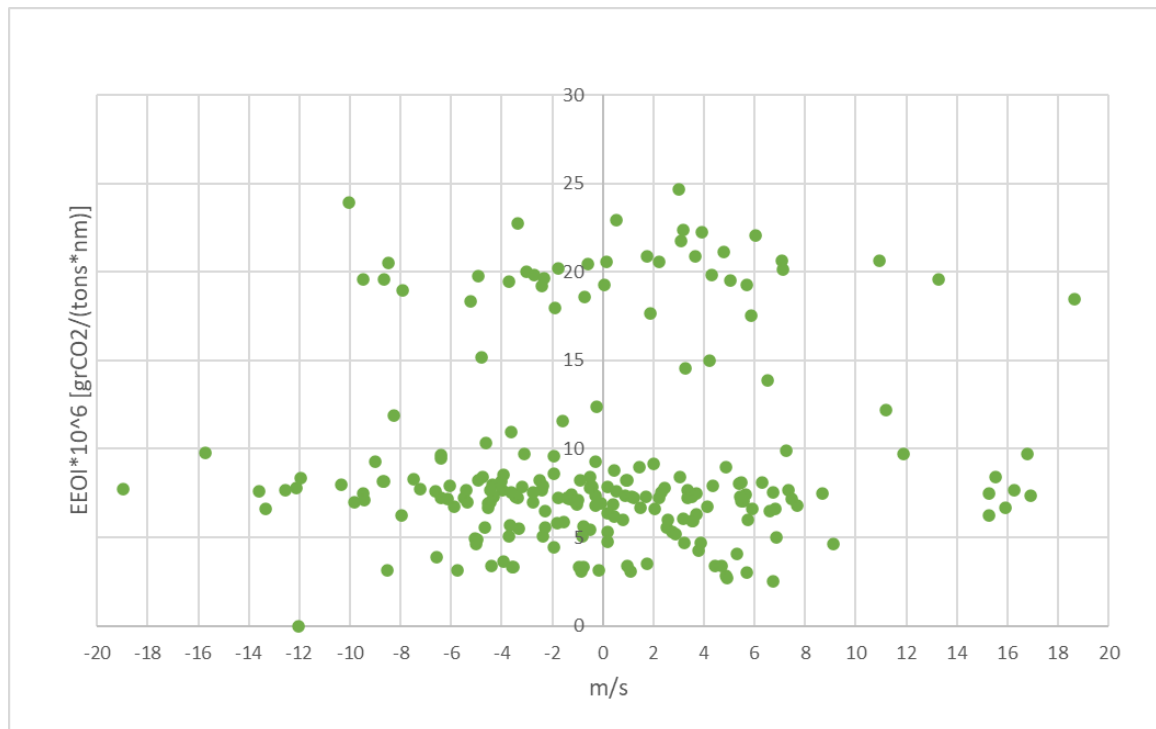
Επίσης, στο Διάγραμμα 8.27 φαίνεται η συσχέτιση του EEOI ($V > 3$ Knots) με την ταχύτητα του ανέμου, στο Διάγραμμα 8.28 η συσχέτιση του EEOI με καταναλώσεις μόνο κύριας μηχανής ($V > 6$ Knots) και έπειτα δημιουργείται η προαναφερθείσα παράμετρος $F = Wind_{speed} * \cos Wind_{rel.dir}$, και πραγματοποιούνται διαγράμματα με τους ίδιους δείκτες (Διάγραμμα 8.29) και (Διάγραμμα 8.30).



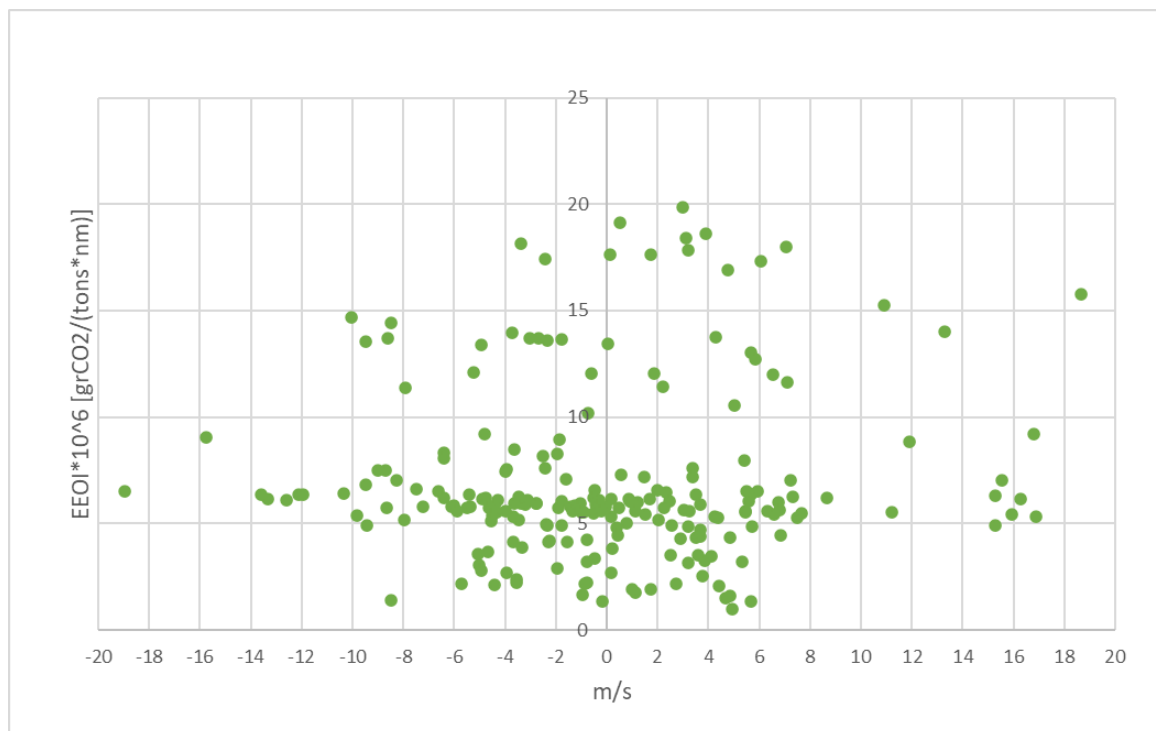
Διάγραμμα 8.27 Δείκτης EEOI3 με ταχύτητα ανέμου



Διάγραμμα 8.28 Δείκτης EEOI με καταναλώσεις κύριας μηχανής για $V > 6$ knots με ταχύτητα ανέμου



Διάγραμμα 8.29 Δείκτης EEOI3 με παράμετρο F

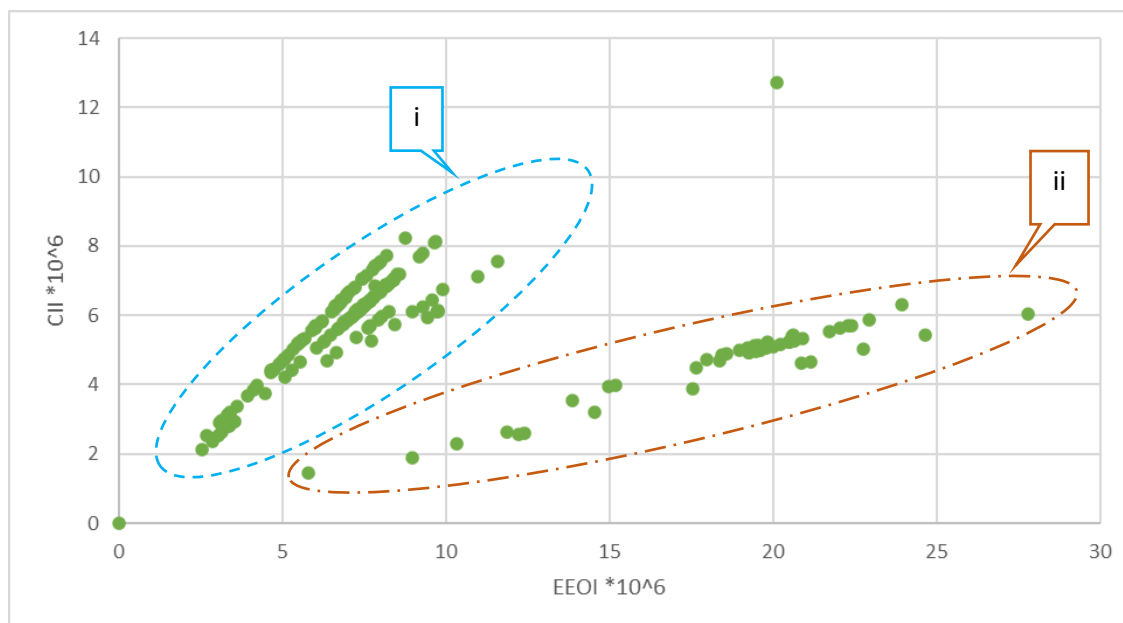


Διάγραμμα 8.30 Δείκτης EEOI με καταναλώσεις κύριας μηχανής για V>6Knots με παράμετρο F

Από τα παραπάνω 6 διαγράμματα του δείκτη EEOI με καιρικές παραμέτρους, δεν μπορούμε άμεσα να συμπεράνουμε την κρίσιμη επίδραση του καιρού σε αυτόν, που όπως θα ήταν λογικό να αναμένουμε αύξηση του δείκτη σε συγκεκριμένες πλεύσεις.

8.5 Σύγκριση των δεικτών CII και ΕΕΟΙ

Πραγματοποιείται κοινό διάγραμμα (Διάγραμμα 8.31) του δείκτη CII υπολογισμένου με τον πρώτο τρόπο όπως στην Εξ. 1.1 και του δείκτη ΕΕΟΙ, υπολογισμένοι και εδώ ανά διαστήματα 6 ωρών, έχοντας λάβει δεδομένα για $V > 3$ Knots.



Διάγραμμα 8.31 Δείκτης CII με δείκτη ΕΕΟΙ, για $V > 3$ Knots, υπολογισμένοι σε διάστημα 6 ωρών

Παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, γραμμική σχέση μεταξύ των δεικτών για δύο διαφορετικές «ομάδες» (i και ii) που σχηματίζονται, οπότε δεν συμπεραίνεται η ανεξαρτησία τους. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται έλεγχος στις καταστάσεις φόρτωσης για τις παραπάνω «ομάδες», και συμπεραίνεται πως η «ομάδα i» αντιστοιχεί σε καταστάσεις Laden (φόρτωσης) ενώ η «ομάδα ii» σε Ballast (ερματισμού).

Όπως είναι επόμενο, στις καταστάσεις ερματισμού ο δείκτης ΕΕΟΙ αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τον CII, ενώ όσο οι τιμές της μάζας φορτίου πλησιάζουν το DWT, ο δείκτης ΕΕΟΙ πλησιάζει τις τιμές του CII.

Παρακάτω, γίνεται ο καθορισμός του rating του δείκτη CII. Αρχικά υπολογίζεται το όριο αναφοράς σύμφωνα με την Εξ. 1.3.

Όπου για το υπό μελέτη πλοίο (tanker), (Πίνακας 1.1):

- Capacity= DWT
- $a=5247$
- $c=0,610$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο απαιτούμενος δείκτης, όπως στην Εξ. 1.4. Όπου το Z για το 2023 θα είναι $Z=5\%$. Έτσι το rating προκύπτει με βάση την Εικόνα 4 και από Πίνακας 1.2, έχουμε για tanker:

- $d1=0,82$
- $d2=0,93$
- $d3=1,08$
- $d4=1,28$

Οπότε:

$$CII_{ref} = 8,37 [grCO_2/(tons*nm)]$$

$$Required\ CII = 7,95 [grCO_2/(tons*nm)]$$

Και στον Πίνακα 8.5 φαίνονται τα όρια της βαθμολογίας ενεργειακής απόδοσης:

Πίνακας 8.5 Όρια ενεργειακής απόδοσης υπό μελέτη πλοίου

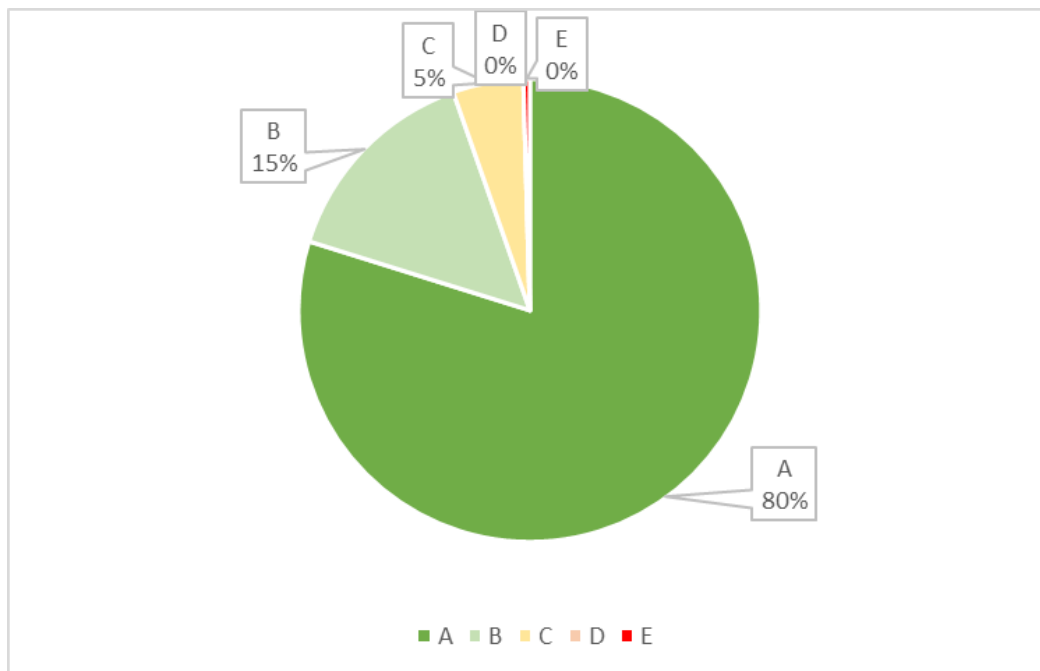
Rating	CII Limits
A	(-,6.52]
B	(6.52,7.40]
C	(7.40,8.59]
D	(8.59,10.18]
E	(10.18,-)

Υπολογίζεται ο μέσος όρος του δείκτη CII για όλο το χρονικό διάστημα.

$$CII_{AVRG} = 5,52 [grCO_2/(tons*nm)]$$

Άρα το υπό μελέτη πλοίο κατά μέσο όρο έχει rating ενεργειακής απόδοσης **A**.

Γίνεται επίσης κατανομή του rating σε όλο το χρονικό διάστημα ανά 6 ώρες και παρουσιάζεται σε μορφή «πίτσας» παρακάτω.



Διάγραμμα 8.32 Κατανομή του χρόνου της βαθμολογίας ενεργειακής απόδοσης

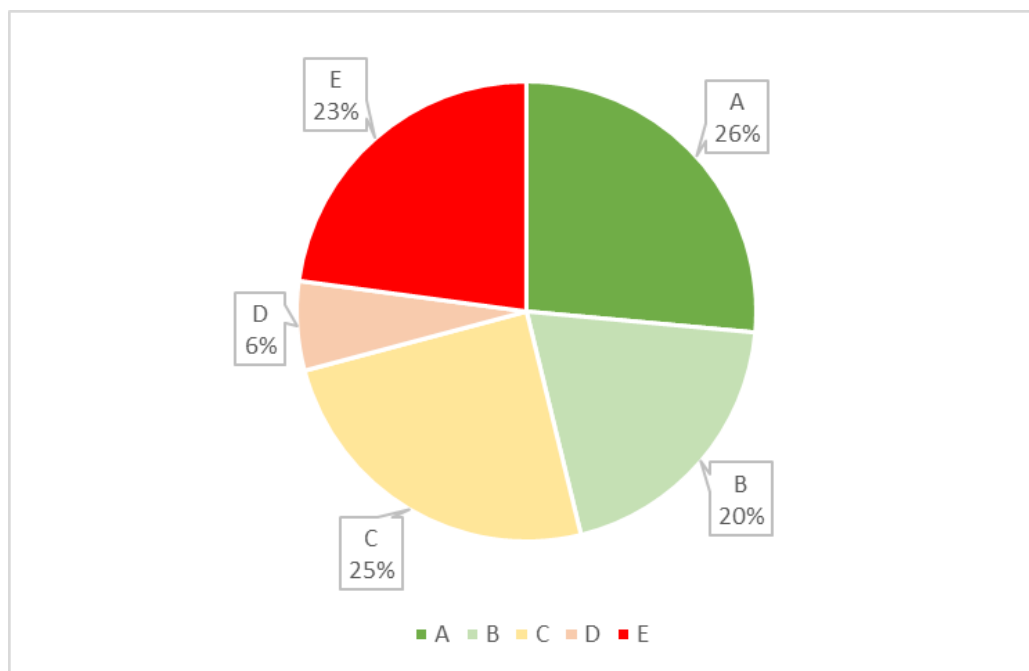
Όπως φαίνεται το 80% του χρόνου λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου είναι με rating A, το 15% με B και το 5% με C, ενώ δεν παρουσιάζονται καθόλου βαθμολογίες D και E.

Γίνεται αντίστοιχος καθορισμός βαθμολόγησης ενεργειακής απόδοσης για τον ΕΕΟΙ, με τα ίδια όρια:

$$EEOI_{AVRG} = 9,47 [grCO_2/(tons*nm)]$$

Οπότε το υπό μελέτη πλοίο, βάσει τον δείκτη ΕΕΟΙ, κατά μέσο όρο έχει rating ενεργειακής απόδοσης **D**.

Παρουσιάζεται και εδώ κατανομή του rating βάσει του ΕΕΟΙ σε μορφή «πίτας»:



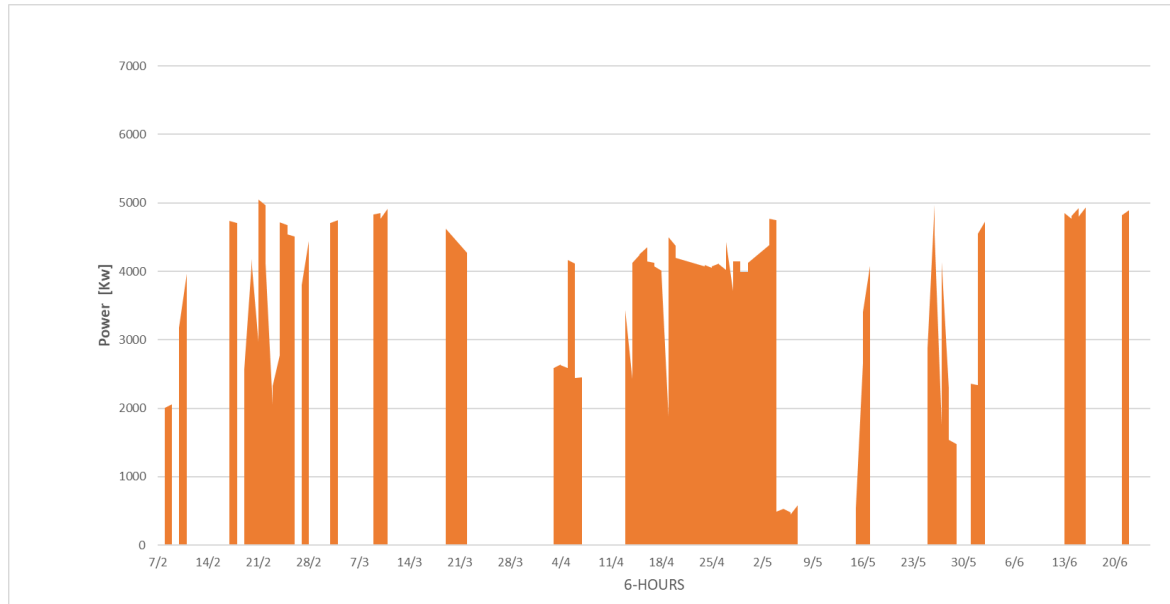
Διάγραμμα 8.33 Κατανομή του χρόνου της βαθμολογίας ενεργειακής απόδοσης κατά ΕΕΟΙ.

Όπως φαίνεται, περίπου το 26% του χρόνου λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου είναι με rating A, το 20% με B, το 25% με C, το 6% με D και το 23% με E.

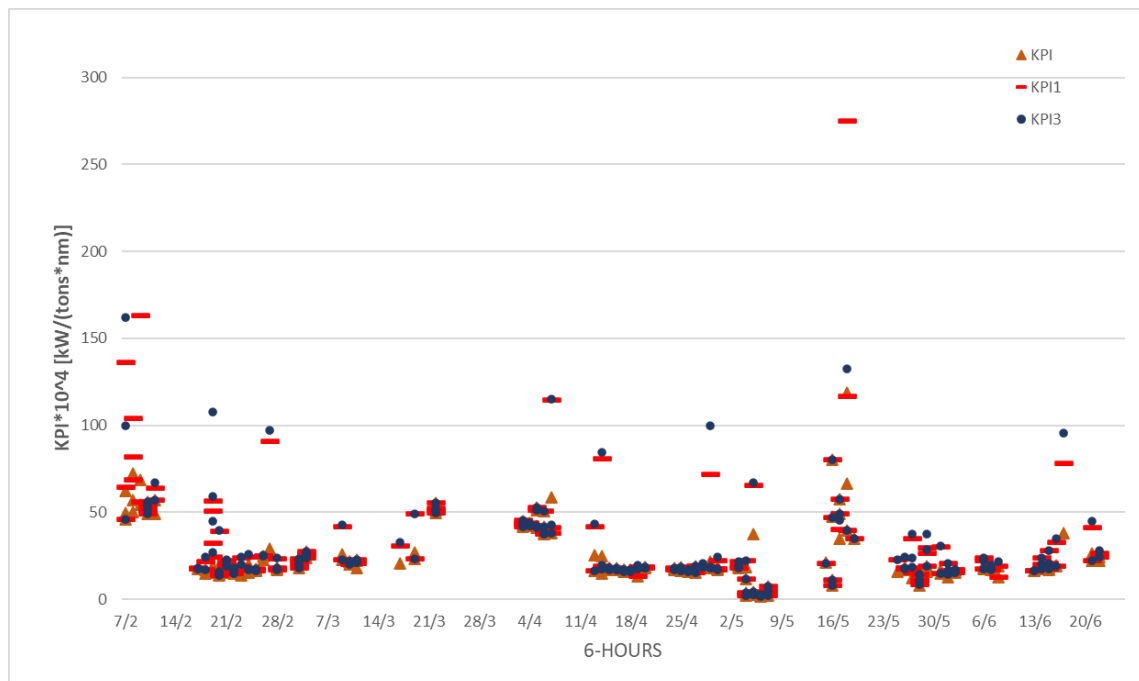
Είναι φανερό οι διαφορές στην βαθμολογία ενεργειακής απόδοσης μεταξύ των CII και ΕΕΟΙ, όπως άλλωστε είναι λογικό, καθώς όπως έχει προαναφερθεί, στον CII χρησιμοποιείται το DWT (σαν να έχει το πλοίο το μέγιστο φορτίο), ενώ στον ΕΕΟΙ χρησιμοποιείται η μάζα φορτίου κάθε φορά (όπως συμβαίνει, το πλοίο δεν φέρει πάντα το μέγιστο φορτίο του).

8.6 Υπολογισμός ΚΡΙ εξαρτώμενος της ισχύος

Παρουσιάζεται ο νέος δείκτης ΚΡΙρ για όλο το χρονικό διάστημα. Στο Διάγραμμα 8.34 φαίνεται η συνολική ισχύς της κύριας μηχανής και των ηλεκτρομηχανών ανά 6 ώρες, έχοντας λάβει δεδομένα υπόψη για ταχύτητες μεγαλύτερες των 3 Κνots, ενώ στο Διάγραμμα 8.35 ο υπολογισμένος δείκτης εξαρτώμενος της ισχύος, χωρίς φίλτρο ταχύτητας και με φίλτρα 1 Κνοt και 3 Κνοts, δηλαδή: ΚΡΙρ, ΚΡΙρ1 και ΚΡΙρ3 αντίστοιχα. Σημειώνεται, πως κι εδώ έχουν αποκλειστεί οι κατάλληλες ημέρες αντίστοιχα με τον δείκτη ΕΕΟΙ.

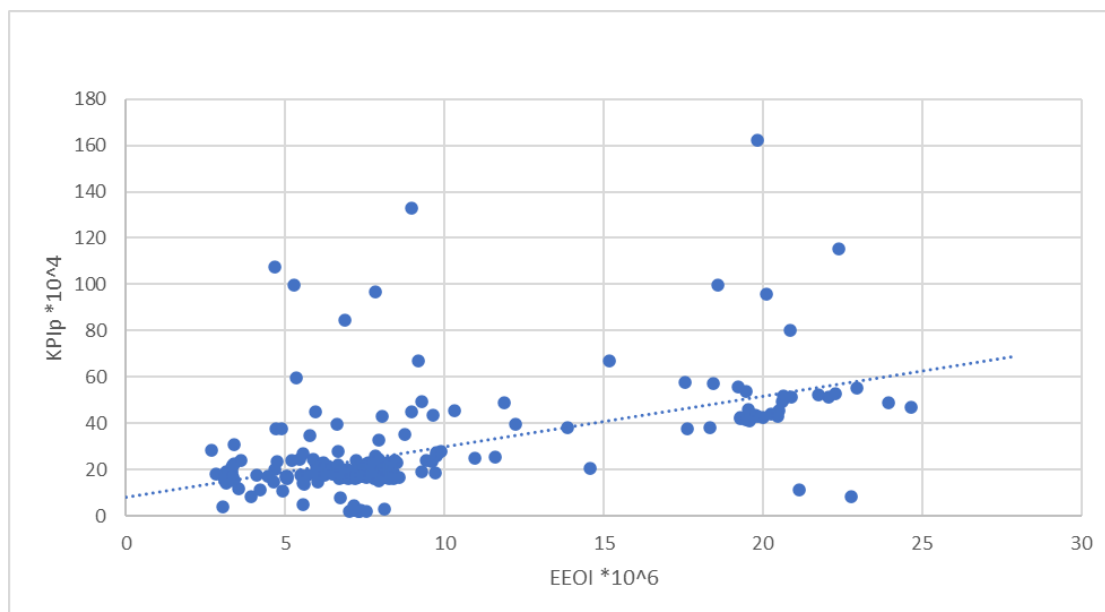


Διάγραμμα 8.34 Συνολική ισχύς ανά 6 ώρες για V>3 knots



Διάγραμμα 8.35 Δείκτης εξαρτώμενος της ισχύος Κρι και κρι με V>1 Knots και V>3 Knots

Απεικονίζοντας τον ΚΡΙρ με τον δείκτη ΕΕΟΙ μπορούμε να αξιολογήσουμε και κατά πόσο είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Γίνεται, λοιπόν το παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 8.36):



Διάγραμμα 8.36 Δείκτης ΕΕΟΙ και ΚΡΙρ για $V > 3$ Knots

Κατά κύριο λόγο τα σημεία απεικόνισής τους στο παραπάνω διάγραμμα ακολουθούν την ευθεία $y=ax+b$, (όπως είναι γνωστό η ισχύς συνδέεται με την κατανάλωση). Υπολογίζεται λοιπόν, ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson: **$r=0,52$** . Άρα παρατηρείται μέτρια συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών.

9 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται λοιπόν, η ναυτιλία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το παγκόσμιο εμπόριο και συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην οικονομία. Όμως, για την ορθότερη λειτουργία ενός πλοίου τόσο ως προς το περιβάλλον αλλά και ως προς την βελτίωση της απόδοσής του, είναι βασικό να υπάρχουν τρόποι παρακολούθησης διαφόρων παραμέτρων του. Επιπρόσθετα, το τελευταίο διάστημα βασικό θέμα στις συνεδριάσεις του IMO είναι η μείωση των αέριων ρύπων σε σχέση με την συνεχή αύξηση του παγκόσμιου στόλου. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η μελέτη και βελτίωση της αποδοτικότητάς των πλοίων, μέσω δημιουργίας δεικτών απόδοσης. Για την πραγματοποίηση υπολογισμού τέτοιων δεικτών είναι σαφές πως αρχικά θα πρέπει να υπάρχει γνώση του συστήματος που μελετάται, των αισθητήριων μέσω των οποίων και της συχνότητας δειγματοληψίας τους ή αν χρειάζεται και ο συγχρονισμός τους. Καθίσταται αναγκαία η επεξεργασία των δεδομένων, οι συγκρίσεις τους και αποκλεισμός ορισμένων.

Συγκεκριμένα, για τον δείκτη EEOI, παρόλο που δεν μπορεί να αποδώσει ακριβείς αλλαγές για την κατάσταση της γάστρας και της προπέλας, αν και ακόμη προαιρετικός, είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός πλοίου, και ανταποκρίνεται στις ανάγκες παρακολούθησης τόσο περιβαλλοντικής σημασίας (εκπομπές CO₂) αλλά και οικονομικής (έμμεσα, κατανάλωση καυσίμων). Μάλιστα, σε περιπτώσεις όπου το έκαστο υπό μελέτη πλοίο εκτελεί όμοια δρομολόγια για αρκετό διάστημα (Liner), συλλέγοντας έτσι περισσότερα δεδομένα για σχεδόν ίδιες διαδρομές και πιθανόν παρόμοιους εξωτερικούς παράγοντες (πχ καιρικές συνθήκες), είναι δυνατό να επιτευχθεί ορθότερη σύγκριση μεταξύ αυτών και βέλτιστη αξιολόγηση της λειτουργίας του.

Όσον αφορά τον δείκτη CII, είναι φανερό η χρησιμότητά του σαν σύστημα βαθμολόγησης ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων, καθώς μπορεί να γίνει ευκολότερα η παρακολούθηση της απόδοσης ενός πλοίου και η κατηγοριοποίησή του, έχοντας αντίκτυπο στο περιβάλλον αλλά και στην εξοικονόμηση των καυσίμων. Σε αντίθεση με τον EEOI, είναι ένας υποχρεωτικός δείκτης, και τα πλοία οφείλουν να συμμορφωθούν στις απαιτήσεις κα ετήσιες αλλαγές του. Βέβαια, όπως έχει προαναφερθεί ο δείκτης EEOI είναι μία προέκταση του CII και δεν αποκλείεται να γίνει κι αυτός υποχρεωτικός στο άμεσο μέλλον.

Τέλος, για τον υπολογισμένο νέο δείκτη KPI_p, παρακολουθείται ουσιαστικότερα ο ρυθμός μεταβολής έργου, απεικονίζοντας άμεσα την απόδοση του πλοίου, καθώς λαμβάνεται υπ' όψη η ισχύς που αποδίδει η κύρια μηχανή στον άξονα και αυτή που αποδίδουν οι ηλεκτροκινητήρες. Παρόλο που δεν παρουσιάζεται απόλυτη ανεξαρτησία με τον EEOI, θα μπορούσε να αποβεί σε χρήσιμο εργαλείο για έλεγχο απόδοσης των μηχανών σε σχέση με την απόσταση που το πλοίο ταξιδεύει και τη μάζα φορτίου του.

10 Βιβλιογραφία

- [1] IMO, "Prevention of air pollution from ships", Second IMO GHG Study, 2009.
- [2] "www.imo.org."
- [3] IMO, "2022 Guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII guidelines, G1)", MEPC 78/WP.6, 2022.
- [4] IMO, "Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)," MEPC.1/Circ.68417, 2009.
- [5] Φ. Κόντης, "Ανάπτυξη δεικτών απόδοσης για την παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας ναυτικών κινητήρων Diesel", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.
- [6] Γ. Κατσιμάρδος, "Ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού της λειτουργικής αποδοτικότητας πλοίου με χρήση δεικτών απόδοσης.", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.
- [7] "https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/CII_en.pdf"
- [8] Themelis, N., Spandonidis, C. C., & Giordamlis, C. (2019), "Data acquisition and processing techniques for a novel performance monitoring system based on KPIs", Proceedings, 18th Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2019), 9-11 September 2019, Varna, Bulgaria.
- [9] N. Acomi and O. C. Acomi, "Improving the Voyage Energy Efficiency by Using EEOI", The 9th International Conference on Traffic & Transportation Studies (ICTTS'2014), Constanta Maritime University, Nemo Shipping Constanta, Romania, 2014.
- [10] T. A. Tran, "A research on the energy efficiency operational indicator EEOI calculation tool on M/V NSU JUSTICE of VINIC transportation company, Vietnam", School of Energy and Power Engineering Wuhan University of Technology, Vietnam Maritime University, 2017.
- [11] C. Sun, H. Wang, C. Liu, and Y. Zhao, "Dynamic prediction and optimization of Energy Efficiency Operational Index (EEOI) for an operating ship in varying environments", Marine Engineering College Dalian Maritime University, Systems Engineering Research Institute, Merchant Marine College Shanghai Maritime University, Shanghai Rail Transportation Equipment Co., 2019.

11 Παράρτημα Α

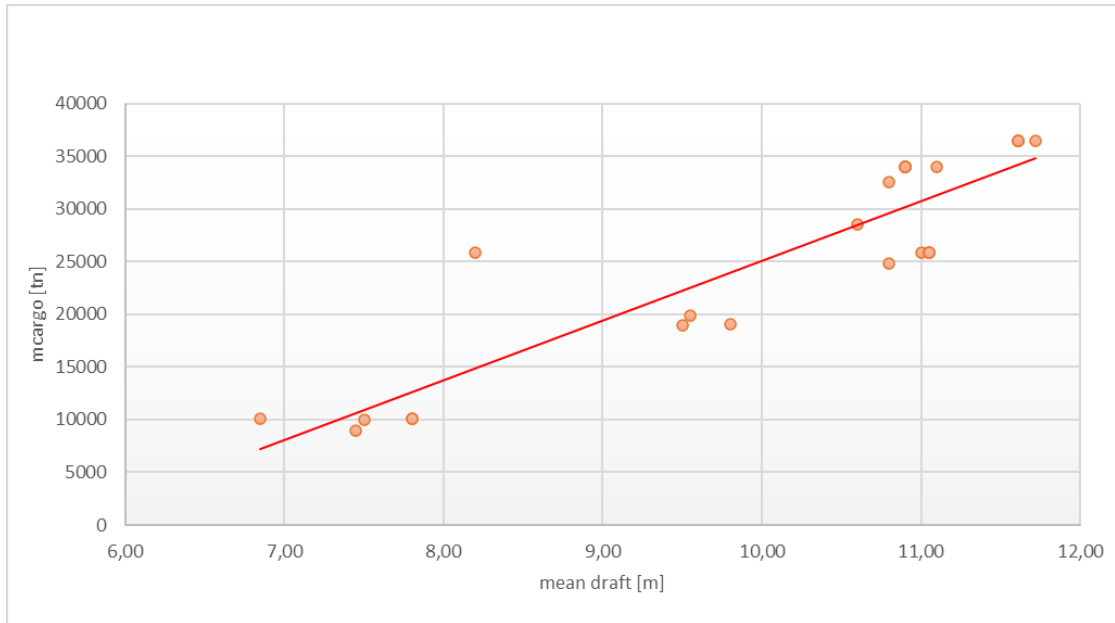
Ο υπολογισμός μάζας φορτίου έγινε μέσω διαφορετικών στοιχείων φόρτωσης (μάζα φορτίου - βύθισμα) του ίδιου πλοίου τα οποία φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 11.1 . Σημειώνεται ότι η μάζα δεν περιλαμβάνεται στα ηχογράφημα ή high-frequency reports, γι' αυτό λαμβάνονται και επεξεργάζονται δεδομένα από μία γενική λίστα αναφορών του πλοίου (δηλώσεις μάζας φορτίου) η οποία ήταν διαθέσιμη για την παρούσα ανάλυση.

Πίνακας 11.1 Στοιχεία φόρτωσης πλοίου από τις δηλώσεις μάζας φορτίου

Cargo [tons]	FWD [m]	MID [m]	AFT [m]	TRIM [m]
34000	10,9	10,9	10,9	0
34000	10,9	10,9	10,9	0
34000	10,9	10,9	10,9	0
34000	10,9	10,9	10,9	0
34000	11,1	11,1	11,1	0
10000	7	7,5	8	1
19000	9,5	9,5	9,5	0
9000	6,2	7,45	8,7	2,5
19850	9,55	9,55	9,55	0
25850	10,8	11	11,2	0,4
25850	10,6	11,05	11,5	0,9
25850	10,6	11,05	11,5	0,9
25850	10,7	11,05	11,4	0,7
24850	10,2	10,8	11,4	1,2
19050	9,2	9,8	10,4	1,2
10050	6,6	7,8	9	2,4
10050	6,6	7,8	9	2,4
10050	6,2	6,85	7,5	1,3
36500	11,72	11,72	11,72	0
36500	11,61	11,61	11,61	0
36500	11,61	11,61	11,61	0
36500	11,61	11,61	11,61	0
32550	10,7	10,8	10,9	0,2
28550	10,6	10,6	10,6	0
25900	8,2	8,2	8,2	0

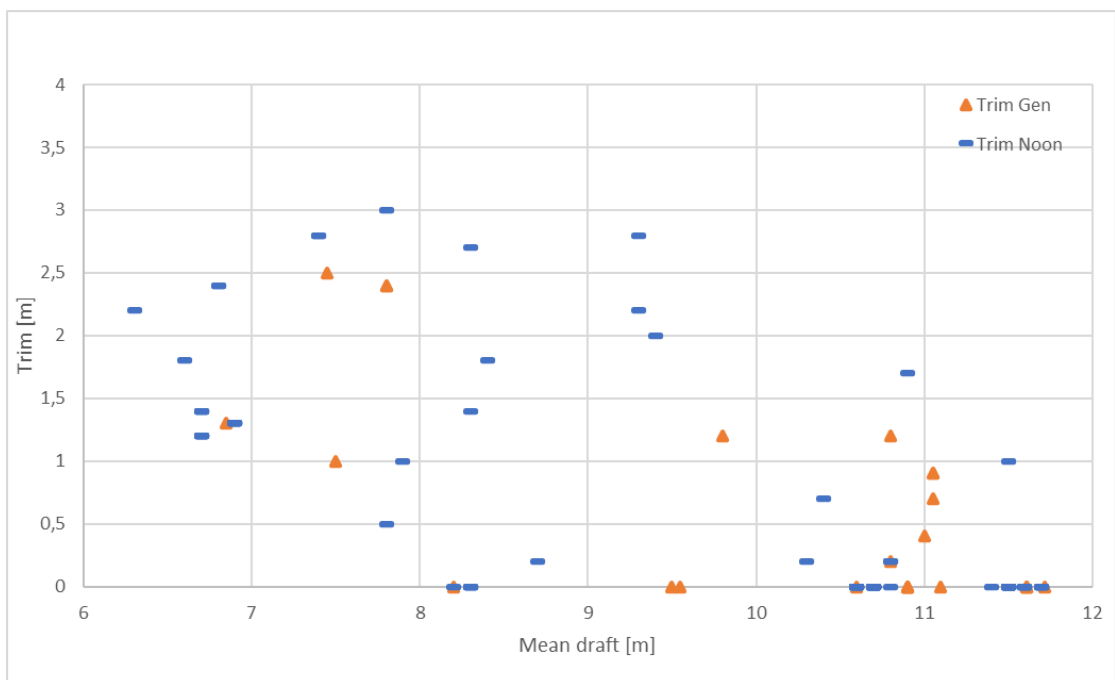
Λήφθηκε : trim=T_A-T_F

Παρατηρούνται ορισμένες διαφορές από την αναμενόμενη καμπύλη της μάζας φορτίου - βυθίσματος, καθώς το λογικό θα ήταν να αυξάνεται η μάζα φορτίου όσο αυξάνεται το βύθισμα, ενώ είναι φανερή η ύπαρξη αυξομειώσεων του φορτίου όσο το βύθισμα αυξάνεται. Αυτό προφανώς οφείλεται κυρίως στην διαγωγή του πλοίου, και ίσως κάποια μέτρηση να οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος. Γίνεται διάγραμμα διασποράς μάζας φορτίου-μέσου βυθίσματος (Διάγραμμα 11.1).



Διάγραμμα 11.1 Μάζα φορτίου με μέσο βύθισμα

Επίσης έγινε διάγραμμα διασποράς του trim σε σχέση με το βύθισμα για τα δεδομένα από τις δηλώσεις μάζας φορτίου (Trim Gen) και για τα δεδομένα των noon reports (Trim Noon) από κοινού (Διάγραμμα 11.2).



Διάγραμμα 11.2 Διαγωγή με μέσο βύθισμα από δηλώσεις μάζας φορτίου και από noon reports

Χρησιμοποιήθηκαν τα βυθίσματα από τα noon reports και για τις δύο μεθόδους (καθώς δεν υπήρχαν στοιχεία από τα high-freq) έγινε αντιστοίχιση με αυτά του Πίνακα 11.1 (υπήρχαν πολύ κοντινά αντίστοιχα βυθίσματα), και τελικώς, υπολογίστηκε η ζητούμενη μάζα φορτίου συσχετίζοντας μέσο βύθισμα και διαγωγή, με την βοήθεια της πολλαπλής παλινδρόμησης καταλήγοντας στην παρακάτω εξίσωση (Εξ. 11.1).

$$M_{cargo} = 4079 * Draft_{mean} - 4385 * Trim - 12939 \text{ [tons]}$$

Εξ. 11.1

Για τιμές: $Draft_{mean} \in [7,12]$ και $Trim \in [0,2.5]$

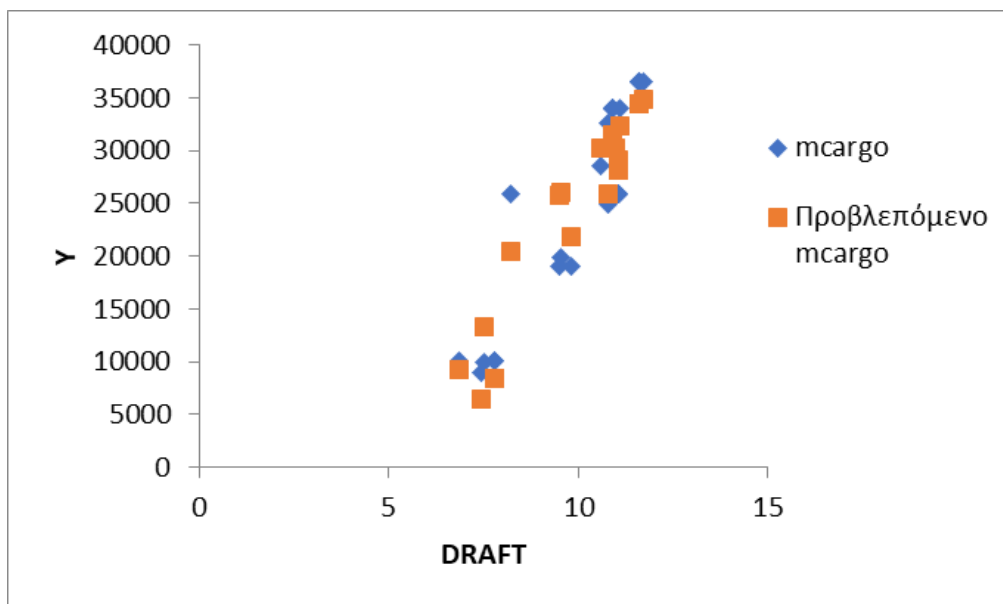
Όπου

M_{cargo} : η ζητούμενη μάζα

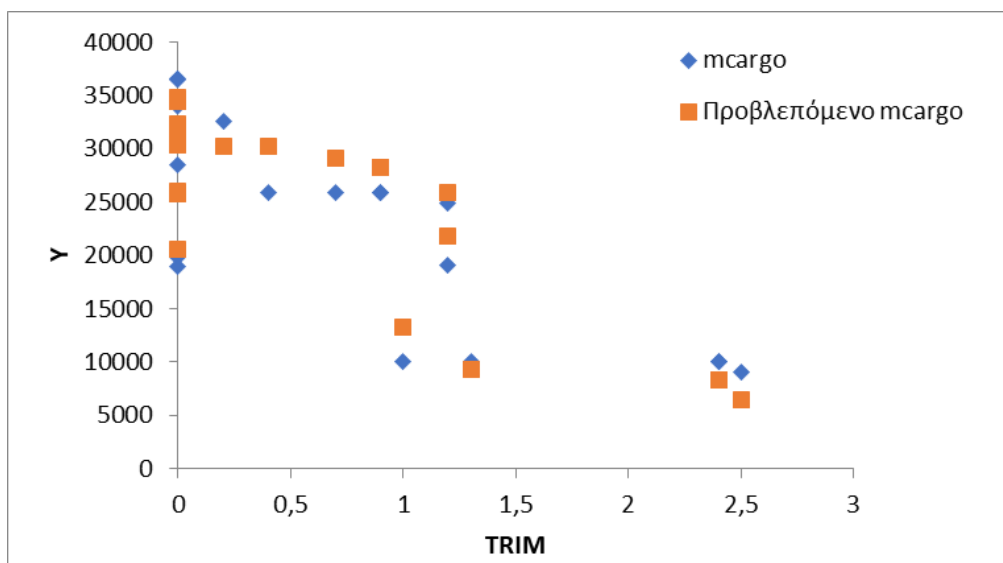
$Draft_{mean}$: το μέσο βύθισμα που αντιστοιχεί στην ζητούμενη μάζα

Trim: Η διαγωγή που αντιστοιχεί στην ζητούμενη μάζα

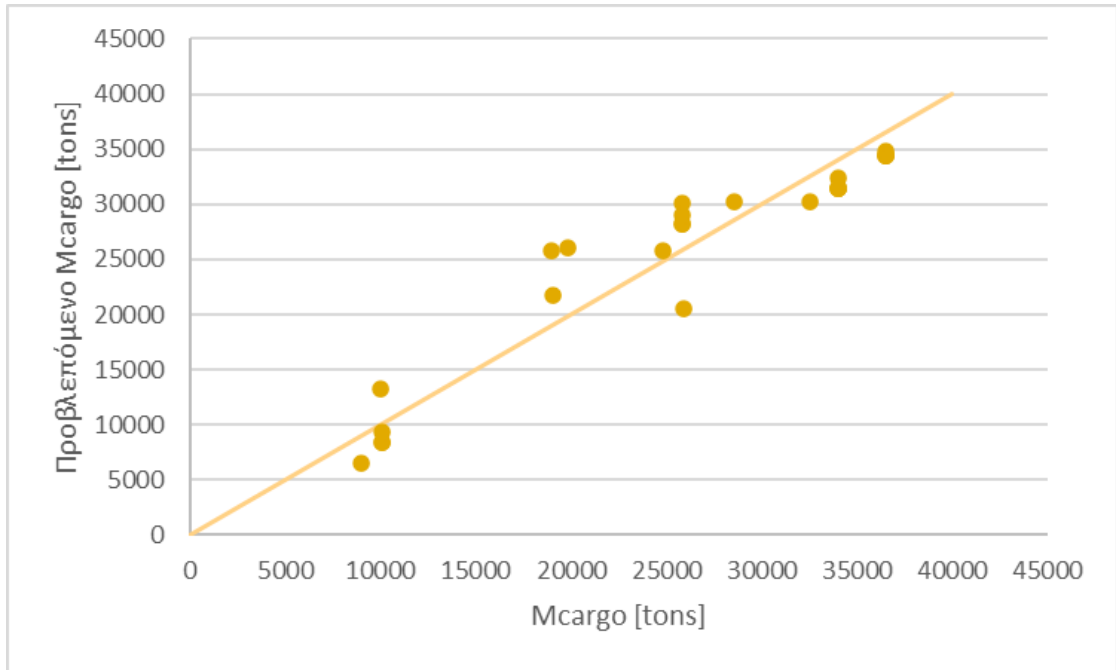
Επίσης, από την παλινδρόμηση προέκυψαν το $R^2=0,895$ και τα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 11.3 Προσαρμογής γραμμής μέσου βυθίσματος



Διάγραμμα 11.4 Προσαρμογής γραμμής διαγωγής



Διάγραμμα 11.5 Μάζα φορτίου και προβλεπόμενη μάζα φορτίου, με την ευθεία $y=x$.