

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιολόγηση και Βελτιστοποίηση Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών Εμπορικού Πλοίου

Μουρτζίνος Τασόπουλος Γεώργιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Νικόλαος Θεμελής, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2021

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία και φτάνοντας έτσι στο τέλος της φοιτητικής μου ζωής, οφείλω να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην εκπόνησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον κ. Νικόλαο Θεμελή, Επίκουρο Καθηγητή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τη βοήθεια, την κατανόηση και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, οφείλω ένα ευχαριστώ στην εταιρεία "Πρίσμα Ηλεκτρονικά" για την παροχή των πρωτογενών δεδομένων της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Zoran Lajic για τις γενικότερες γνώσεις που μου έδωσε πάνω στην αξιολόγηση της απόδοσης ενός πλοίου.

Τέλος, θα ήθελα να κάνω και μια αναφορά τόσο στους γονείς μου, Αντώνη και Αντωνία όσο και στην αδερφή μου Παναγιώτα, για την συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για βελτιστοποίηση της χρήσης και συντήρησης των διαφόρων μηχανημάτων ενός πλοίου με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος έστρεψε τους μηχανικούς, σε παγκόσμιο επίπεδο, στην ανάπτυξη του τομέα της παρακολούθησης των σημαντικών παραμέτρων για την ομαλή λειτουργία τους (Performance Monitoring). Στη σύγχρονη εποχή, έχει δημιουργηθεί πληθώρα λογισμικών και μετρητικών οργάνων τα οποία, με τη συνδρομή και του εκάστοτε πληρώματος, συλλέγουν δεδομένα για μεγέθη όπως η ισχύς της κάθε μηχανής, η ταχύτητα πλοίου, η κατανάλωση καυσίμου κ.α. Στη συνέχεια, με κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων υπολογίζονται διάφοροι δείκτες οι οποίοι οδηγούν κάθε φορά στην αξιολόγηση της λειτουργίας της υπό μελέτη μηχανής. Πολύ σημαντικό εργαλείο στην όλη μελέτη αποτελεί η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών, η οποία με τα αλματώδη βήματα προόδου της τα τελευταία χρόνια προσφέρει φιλικά προς τον χρήστη προγράμματα ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων. Συμπερασματικά, η εξειδικευμένη μελέτη των διαφόρων δεδομένων επιτρέπει στους μηχανικούς να προβλέπουν πότε είναι απαραίτητη η συντήρηση κάποιου εξαρτήματος, γεγονός που οδηγεί στην εξοικονόμηση των χρημάτων μιας πλήρους επισκευής.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάται, με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab, η λειτουργία των τριών ηλεκτρομηχανών ενός εμπορικού πλοίου κατά το εξάμηνο 01/08/2018-01/02/2019. Αρχικά, αφού μελετήθηκαν οι συνθήκες χρήσης των εν λόγω μηχανών, πραγματοποιήθηκε η προσέγγιση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC) με τη χρήση του αναδρομικού αλγόριθμου ελαχίστων τεταγώνων. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας της κάθε ηλεκτρογεννήτριας.

Abstract

The ever-increasing need to optimize the use and maintenance of the various machinery of a ship at the lowest possible cost has turned engineers, globally, to developing the field of monitoring the important parameters for their smooth operation (Performance Monitoring). In modern times, a variety of software and metering gauges have been created and with the assistance of each crew, they collect data for values such as the power of each engine, vessel's speed, fuel consumption, etc. Then, with proper processing of the measurements, various indicators, which each time lead to the evaluation of the operation of the machine under study, are calculated. A very important tool in the whole survey is the use of computer technology, which with its leaps and bounds in recent years offers user-friendly programs for data processing and analysis. In conclusion, the specialized study of the various data, allows engineers to predict when the maintenance of a component is necessary, which leads to the saving of money for a complete repair. In this diploma thesis is studied, with the help of the Matlab program, the operation of the three diesel generators of a merchant ship, during the semester 01/08/2018-01/ 02/2019. Initially, after examining the conditions under which these engines have been functioning, the specific fuel consumption (SFOC) approach was performed using the recursive least squares algorithm. The results of this research were then used to evaluate and optimize the operation of each diesel generator.

Περιεχόμενα

1. Στόχος εργασίας και γενικές πληροφορίες για τις ηλεκτρογεννήτριες	8
1.1 Χαρακτηριστικά μιας τυπικής Ηλεκτρικής Εγκατάστασης.....	8
1.2 Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών.....	9
1.3 Παράλληλη Χρήση Ηλεκτρογεννητριών.....	10
2. Ανάλυση Δεδομένων	11
2.1 Συλλογή Δεδομένων.....	11
2.2 Αρχική Ανάλυση.....	13
2.2.1 Αφαίρεση Ακραίων Τιμών.....	14
2.3 Ανάλυση Ευαισθησίας μεταξύ φορτίων σε λιμάνι και εν πλω.....	17
2.4 Διαγράμματα απεικόνισης του φορτίου της κάθε γεννήτριας.....	22
3. Προσέγγιση της Ειδικής Κατανάλωσης Καυσίμου	26
3.1 Προσέγγιση SFOC με πολυώνυμο 2 ^{ου} βαθμού.....	26
3.1.1 Μαθηματική Μοντελοποίηση και Λειτουργία Αλγορίθμου.....	26
3.2 Αποτελέσματα της μεθόδου.....	29
3.2.1 Ηλεκτρογεννήτρια Νο.1.....	30
3.2.2 Ηλεκτρογεννήτρια Νο.2.....	36
3.2.3 Ηλεκτρογεννήτρια Νο.3.....	40
4. Βελτιστοποίηση Χρήσης Ηλεκτρομηχανών	43
4.1 Ορισμός του δείκτη απόδοσης (KPI).....	43
4.2 Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης.....	46
5. Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία	60
Παράρτημα Α	61
A.1 Προσέγγιση SFOC με διαίρεση της Ισχύος σε επιμέρους διαστήματα.....	61
A.2 Αποτελέσματα της μεθόδου για την DG1.....	61
A.3 Αποτελέσματα της μεθόδου για την DG2 και DG3.....	64
A.4 Παραγωγή ψεύτικου συνόλου δεδομένων και δοκιμή λειτουργίας αλγορίθμου.....	68
Παράρτημα Β	71
B.1 Σύγκριση Load μεταξύ της χρήσης των ηλεκτρογεννητριών στο λιμάνι και σε πορεία.....	71
B.2 Το Λήμμα Αντιστροφής Πινάκων.....	74
B.3 Κατανομές Load vs SFOC των DG2 και DG3.....	74
B.4 Συγκρίσεις μεγεθών κατά τη βελτιστοποίηση του Ιανουαρίου.....	77

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Πλευρική όψη τυπικής ηλεκτρογεννήτριας	10
Εικόνα 2: Δείγμα των δεδομένων	11
Εικόνα 3: Ποσοστιαία χρονική λειτουργία κάθε γεννήτριας το υπό μελέτη εξάμηνο	13
Εικόνα 4: Πρώτη εικόνα φορτίων λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών	14
Εικόνα 5: Κατανομή φορτίων κάθε γεννήτριας	15
Εικόνα 6: Σύγκριση μετρήσεων πριν και μετά την εκκαθάριση των δεδομένων	16
Εικόνα 7: Σύγκριση φορτίου ισχύος της DG2 όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν βρίσκεται στο λιμάνι	18
Εικόνα 8: Σύγκριση φορτίου ισχύος της DG1 όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν βρίσκεται στο λιμάνι	18
Εικόνα 9: Σύγκριση φορτίου ισχύος της DG3 όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν βρίσκεται στο λιμάνι	19
Εικόνα 10: Φορτία Λειτουργίας της DG1	22
Εικόνα 11: Φορτία Λειτουργίας της DG2	23
Εικόνα 12: Φορτία Λειτουργίας της DG3	24
Εικόνα 13: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 30'	30
Εικόνα 14: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 60'	30
Εικόνα 15: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 120'	31
Εικόνα 16: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.00001$	32
Εικόνα 17: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=1$	32
Εικόνα 18: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.92$	33
Εικόνα 19: Χρονική Μεταβολή των παραμέτρων a,b,c για $\lambda=0.92$	34
Εικόνα 20: Απεικόνιση της μείωσης της απόδοσης της DG1	35
Εικόνα 21: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 120'	36
Εικόνα 22: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.93$	37
Εικόνα 23: Χρονική Μεταβολή των παραμέτρων a,b,c για $\lambda=0.93$	38
Εικόνα 24: Απεικόνιση της απόδοσης της DG2	39
Εικόνα 25: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 120'	40
Εικόνα 26: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.99$	40
Εικόνα 27: Χρονική Μεταβολή των παραμέτρων a,b,c για $\lambda=0.99$	41
Εικόνα 28: Απεικόνιση της μείωσης της απόδοσης της DG3	42
Εικόνα 29: Χρονική Μεταβολή του KPI της DG1 στον χρόνο	44
Εικόνα 30: Χρονική Μεταβολή του KPI της DG2 στον χρόνο	44
Εικόνα 31: Χρονική Μεταβολή του KPI της DG3 στον χρόνο	44
Εικόνα 32: Σύγκριση δεικτών απόδοσης ηλεκτρομηχανών	45
Εικόνα 33: Υπολογισμοί πριν την Βελτιστοποίηση	47
Εικόνα 34: Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης	48
Εικόνα 35: Σύγκριση του φορτίου της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο	49
Εικόνα 36: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο	50
Εικόνα 37: Σύγκριση του φορτίου της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο	50
Εικόνα 38: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο	51
Εικόνα 39: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG2 Δεκέμβριος)	54

Εικόνα 40: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG3 Δεκέμβριος).....	55
Εικόνα 41: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG2 Ιανουάριος)	55
Εικόνα 42: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG3 Ιανουάριος)	56
Εικόνα 43: Κατανομή Φορτίου Ισχύος της DG1.....	61
Εικόνα 44: Τα δεδομένα της DG2 που χρησιμοποιήθηκαν στην 2 ^η Μέθοδο Προσέγγισης...	62
Εικόνα 45: Σύγκριση Real με Estimated SFOC για την DG1	63
Εικόνα 46: Κατανομή Φορτίου Ισχύος της DG2.....	64
Εικόνα 47: Κατανομή Φορτίου Ισχύος της DG3.....	64
Εικόνα 48: Τα δεδομένα της DG2 που χρησιμοποιήθηκαν στην 2 ^η Μέθοδο Προσέγγισης...	65
Εικόνα 49: Τα δεδομένα της DG3 που χρησιμοποιήθηκαν στην 2 ^η Μέθοδο Προσέγγισης .	65
Εικόνα 50: Σύγκριση Real με Estimated SFOC για την DG2	66
Εικόνα 51: Σύγκριση Real με Estimated SFOC για την DG3	67
Εικόνα 52: Σύγκριση Απόδοσης Ηλεκτρομηχανών	67
Εικόνα 53: Προσέγγιση του Fake Data Set.....	69
Εικόνα 54:Χρονική Μεταβολή των a,b,c Αποτελέσματα της προσέγγισης του Fake Data Set	69
Εικόνα 55:Σύγκριση φορτίου της DG1 όταν λειτουργεί με την DG2 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα	71
Εικόνα 56: Σύγκριση φορτίου της DG1 όταν λειτουργεί με την DG3 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα	71
Εικόνα 57:Σύγκριση φορτίου της DG2 όταν λειτουργεί με την DG1 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα	72
Εικόνα 58:Σύγκριση φορτίου της DG2 όταν λειτουργεί με την DG3 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα	72
Εικόνα 59: Σύγκριση φορτίου της DG3 όταν λειτουργεί με την DG1 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα	73
Εικόνα 60: Σύγκριση φορτίου της DG3 όταν λειτουργεί με την DG2 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα	73
Εικόνα 61: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG2 ανά 30'.....	74
Εικόνα 62:Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG2 ανά 30'	75
Εικόνα 63: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG3 ανά 60'.....	75
Εικόνα 64: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG3 ανά 60'.....	76
Εικόνα 65: Σύγκριση του φορτίου της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο	77
Εικόνα 66:Σύγκριση της κατανάλωσης της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο	77
Εικόνα 67: Σύγκριση του φορτίου της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο	78
Εικόνα 68: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο	78

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Πλοίου και Ηλεκτρογεννητριών	8
Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία για τα φορτία κάθε γεννήτριας	15
Πίνακας 3: Σύγκριση του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρομηχανών εν πλώ και στο λιμάνι	17
Πίνακας 4: Στατιστικά Στοιχεία των φορτιών ισχύος της DG1 όταν το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο και όταν βρίσκεται σε πορεία.	20
Πίνακας 5: Στατιστικά Στοιχεία των φορτιών ισχύος της DG2 όταν το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο και όταν βρίσκεται σε πορεία.	20
Πίνακας 6: Στατιστικά Στοιχεία των φορτιών ισχύος της DG2 όταν το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο και όταν βρίσκεται σε πορεία.	21
Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία για το φορτίο λειτουργίας στις DG1.....	23
Πίνακας 8: Στατιστικά Στοιχεία για το φορτίο λειτουργίας της DG2	24
Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία για το φορτίο λειτουργίας της DG3.....	25
Πίνακας 10: Στατιστικά στοιχεία του $\delta 1$ για το επιλεγμένο λ της 1 ^{ης} μεθόδου προσέγγισης για την DG1.....	34
Πίνακας 11: Στατιστικά στοιχεία του $\delta 1$ για $\lambda=0.96$ της 1 ^{ης} μεθόδου προσέγγισης για την DG2	37
Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία του $\delta 1$ για το επιλεγμένο λ της 1 ^{ης} μεθόδου προσέγγισης για την DG3.....	41
Πίνακας 13: Ώρες λειτουργίας της κάθε γεννήτριας	45
Πίνακας 14: Καταναλώσεις καυσίμου κάθε γεννήτριας.....	49
Πίνακας 15: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Δεκέμβριο πριν τη βελτιστοποίηση	52
Πίνακας 16: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Δεκέμβριο μετά τη βελτιστοποίηση	52
Πίνακας 17: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Ιανουάριο πριν τη βελτιστοποίηση	53
Πίνακας 18: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Ιανουάριο μετά τη βελτιστοποίηση	54
Πίνακας 19: Συνολικές Ημερήσιες Καταναλώσεις των Ηλεκτρομηχανών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (Δεκέμβριος).....	57
Πίνακας 20: Συνολικές Ημερήσιες Καταναλώσεις των Ηλεκτρομηχανών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (Ιανουάριος)	58

1. Στόχος εργασίας και γενικές πληροφορίες για τις ηλεκτρογεννήτριες

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται για πλοίο με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Πλοίου και Ηλεκτρογεννητριών

Τύπος Πλοίου	Bulk Carrier
Κατηγορία Μέγεθους	Capesize
Deadweight	205097.0 tons
Πλάτος (B)	50.0 m
Βύθισμα (T)	18.4 m
Ολικό Μήκος (LOA)	299.9 m
Τύπος Ηλεκτρογεννητριών	Hyundai 8H17/28 920 kW x 900 RPM

Οι στόχοι της συγκεκριμένης μελέτης είναι οι εξής:

- Η μελέτη της σχέσης μεταξύ του φορτίου ισχύος (Load) και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (specific fuel oil consumption-SFOC), σε ηλεκτρογεννήτριες.
- Η πρόταση μιας μεθοδολογίας για την ανάλυση και βελτιστοποίηση της χρήσης των ηλεκτρογεννητριών του πλοίου.

1.1 Χαρακτηριστικά μιας τυπικής Ηλεκτρικής Εγκατάστασης

Ο αριθμός των ηλεκτρομηχανών που εγκαθίστανται συνήθως σε ένα εμπορικό πλοίο είναι τέσσερις συμπεριλαμβανομένης και μίας γεννήτριας έκτακτης ανάγκης η οποία είναι τοποθετημένη σε διαφορετικό χώρο από τις υπόλοιπες που βρίσκονται στο μηχανοστάσιο. Επιπλέον, στο κύριο κατάστρωμα υπάρχει διάταξη για λήψη ρεύματος από την στεριά.

Η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου πρέπει να σχεδιάζεται με σκοπό να χαρακτηρίζεται απαραίτητως από:

1. **Αξιοπιστία**, δηλαδή να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία κάθε μέρους της εγκατάστασης ακόμα και στις πιο δύσκολες συνθήκες όπως υψηλές θερμοκρασίες, κλίσεις του πλοίου που οφείλονται στο κυματισμό της θάλασσας, μεγάλες ποσότητες υγρασίας κ.α.
2. **Ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς** με την χρήση άκαυστων ή τουλάχιστον βραδύκαυστων υλικών.
3. **Εξοικονόμηση χώρου και πόρων**, δηλαδή οι επιλεγμένες προς εγκατάσταση ηλεκτρογεννήτριες και οι υπόλοιπες συνιστώσες της εγκατάστασης θα πρέπει να ικανοποιούν αυστηρά τεχνοοικονομικά κριτήρια όπως το να χαρακτηρίζονται από το μικρότερο δυνατό βάρος και όγκο αλλά και από το ελάχιστο δυνατό κόστος.

4. **Απλή ηλεκτρική εγκατάσταση**, η οποία θα είναι εύκολη στην χρήση της ακόμα και όταν το τεχνικό προσωπικό δεν είναι πλήρως εκπαιδευμένο πάνω στην συγκεκριμένη εγκατάσταση.

1.2 Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρογεννητριών

Οι ηλεκτρογεννήτριες ή αλλιώς ηλεκτρομηχανές είναι οι πιο σημαντικές μηχανές πάνω στο πλοίο καθώς μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και έτσι παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα σε όλη την κατασκευή του πλοίου επιτρέποντας του έτσι να εκτελεί όλες τις βασικές λειτουργίες του.

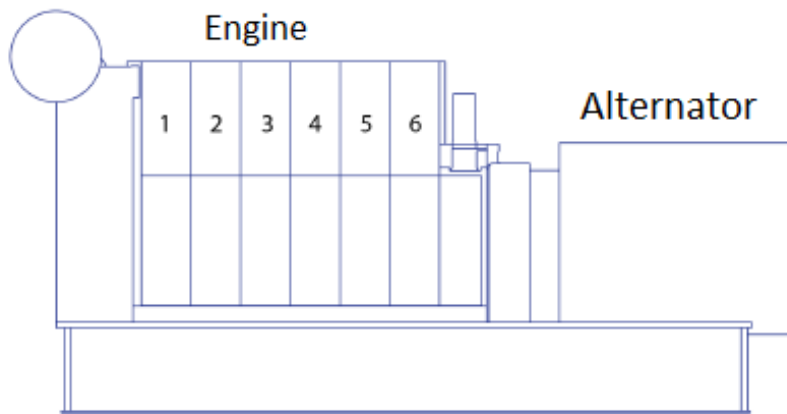
Όσο πραγματοποιείται καύση στους κυλίνδρους μιας ηλεκτρογεννήτριας, ενέργεια μεταφέρεται στον στρόφαλο της μηχανής ο οποίος με την σειρά του περιστρέφεται και παράγει μηχανική ισχύ, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στον εναλλακτήρα (alternator) της ηλεκτρογεννήτριας μέσω του φαινόμενου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή προκαλείται από την 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:

- Τον στάτη (Stator), που βρίσκεται στο εξωτερικό περίβλημα του εναλλακτήρα και συντίθεται από ηλεκτρικούς αγωγούς (π.χ. χάλκινα σύρματα) .
- Το δρομέα (Rotor), ο οποίος αποτελείται επίσης από χάλκινα σύρματα γύρω από πηνία και είναι ενσωματωμένος στον άξονα του στροφάλου.

Τα πηνία του δρομέα τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα και έτσι δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Το συνεχές ρεύμα παράγεται από μία μικρή γεννήτρια που ονομάζεται διεγέρτρια και τοποθετείται στην άκρη του άξονα της ηλεκτρογεννήτριας. Όμως ο δρομέας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με τον στρόφαλο και κατ' επέκταση μαγνητικό πεδίο στρέφεται μαζί του. Η περιστρεφόμενη μαγνητική ροή τέμνει τον στάτη και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι πηγές ενέργειας στα πλοία είναι, κατά κύριο λόγο, σύγχρονες, τριφασικές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 1: Πλευρική όψη τυπικής ηλεκτρογεννήτριας

1.3 Παράλληλη Χρήση Ηλεκτρογεννητριών

Κατά την εν πλώ κατάσταση του πλοίου αλλά και όταν αυτό βρίσκεται στο λιμάνι ένας συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτρομηχανών πρέπει να λειτουργεί έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η σωστή διαχείριση της ισχύος των ηλεκτρογεννητριών είναι ικανή να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης όλων λειτουργικών περιόδων του πλοίου (πλεύση, ελιγμοί, φόρτωση, εκφόρτωση κλπ). Για τον σκοπό αυτό ο πρώτος μηχανικός καλείται κάθε φορά να επιλέξει τον βέλτιστο συνδυασμό που θα χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες γεννήτριες.

Η απόφαση του, έχοντας ως δεδομένο ένα συνολικό φορτίο το οποίο πρέπει να καλυφθεί, κατευθύνεται από διάφορους παράγοντες με κυριότερους:

- Την τήρηση των ορίων ασφαλούς συνεχούς φόρτωσης με παράλληλη τη διατήρηση των αποθεμάτων ισχύος ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση διακοπής ρεύματος.
- Την κατανομή του δεδομένου φορτίου με βέλτιστο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της κάθε ηλεκτρογεννήτριας και ταυτόχρονα να γίνεται η ελάχιστη δυνατή κατανάλωση καυσίμου.
- Τη χρήση των γεννητριών απαραίτητα με τέτοιο τρόπο ώστε να ακολουθείται πιστά το πρόγραμμα συντήρησης που προτείνει ο κατασκευαστής.

2. Ανάλυση Δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα μελετάται ο τρόπος λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών. Αρχικά, γράφονται λίγα λόγια σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα, για την εργασία, δεδομένα, όπως για παράδειγμα ποια μεγέθη περιλαμβάνουν και τι μετρητικά όργανα χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή τους. Οι δεδομένες μετρήσεις καλύπτουν το χρονικό διάστημα 1/8/2017-1/2/2018. Προχωρώντας την ανάλυση, παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων, το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων και χαράσσεται μια μεθοδολογία για τον εντοπισμό και την εξάλειψη των ακραίων τιμών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις έγκυρες πλέον μετρήσεις των δεδομένων, συγκρίνεται ο τρόπος λειτουργίας των ηλεκτρομηχανών όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν είναι δεμένο στο λιμάνι. Τέλος, παρατίθενται ο τρόπος χρήσης της κάθε ηλεκτρογεννήτριας όσον αφορά το ποσοστό της ισχύος στο οποίο λειτουργεί. Πιο αναλυτικά, δημιουργήθηκαν γραφικές παραστάσεις τύπου box (ή whisker) τα οποία δείχνουν με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο σε τι φορτία χρησιμοποιήθηκαν οι ηλεκτρογεννήτριες. Σε αυτές τις απεικονίσεις παρατηρείται η διαφορά στην ισχύ σε συνθήκες όπου χρησιμοποιείται μόνο μία ηλεκτρογεννήτρια ή συνδυασμός δύο. Η δημιουργία των box plots συνοδεύτηκε με τον υπολογισμό διαφόρων χρήσιμων μεγεθών όπως το εύρος του φορτίου στο οποίο λειτούργησε η κάθε ηλεκτρομηχανή ανάλογα την κάθε περίπτωση κ.α.

2.1 Συλλογή Δεδομένων

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date	DG1 Power [KW]	DG2 Power [KW]	DG3 Power [KW]	DG1 FOC [tons/day]	DG2 FOC [tons/day]	DG3 FOC [tons/day]	SPEED [Knots]
2	1/8/2018 10:00	533.8	0	0	3.198	0	0	9.87
3	1/8/2018 10:05	519.8	0	0	3.198	0	0	9.87
4	1/8/2018 10:10	528.2	0	0	2.665	0	0	9.87
5	1/8/2018 10:15	521.1	0	0	2.931	0	0	9.87
6	1/8/2018 10:20	546.3	0	0	2.665	0	0	9.87
7	1/8/2018 10:25	554.4	0	0	2.665	0	0	9.87
8	1/8/2018 10:30	525.6	0	0	2.665	0	0	9.87
9	1/8/2018 10:35	569.5	0	0	2.931	0	0	9.87
10	1/8/2018 10:40	550.2	0	0	2.398	0	0	9.87
11	1/8/2018 10:45	530.1	0	0	2.398	0	0	9.87
12	1/8/2018 10:50	546.5	0	0	3.731	0	0	9.87
13	1/8/2018 10:55	557.7	0	0	2.931	0	0	9.87
14	1/8/2018 11:00	523.6	0	0	2.998	0	0	9.87
15	1/8/2018 11:05	528.8	0	0	2.665	0	0	9.87
16	1/8/2018 11:10	519.2	0	0	2.132	0	0	9.87
17	1/8/2018 11:15	559.2	0	0	3.198	0	0	9.87
18	1/8/2018 11:20	557.7	0	0	2.665	0	0	9.87
19	1/8/2018 11:25	525.6	0	0	2.399	0	0	9.87
20	1/8/2018 11:30	522.4	0	0	2.665	0	0	9.87
21	1/8/2018 11:35	536.9	0	0	2.665	0	0	9.87

Εικόνα 2: Δείγμα των δεδομένων

Το παραπάνω στιγμιότυπο (Εικόνα 2) αποτυπώνει την εικόνα που έχουν τα δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν μετρήσεις της ανά 5 λεπτά μέσης τιμής των μεγεθών και πέρα από την ισχύ (kW) και την κατανάλωση της κάθε γεννήτριας (tons/day) παρέχονται και πληροφορίες για την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει το πλοίο (knots). Η τελευταία παράμετρος αποτελεί δείκτη για το αν το πλοίο βρίσκεται εν πλω ή σε αγκυροβόλιο και χρησιμοποιήθηκε ώστε να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με το αν υπάρχουν διαφορές στη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών μεταξύ των δύο καταστάσεων.

Μετρητικά Όργανα

1. Μετρητής Ισχύος του Άξονα

Ο μετρητής ισχύος του άξονα είναι ένα εργαλείο που μετράει τη ροπή (Q) του άξονα της γεννήτριας. Επιπλέον, γνωρίζοντας τις στροφές (n σε RPM) στις οποίες λειτουργεί η μηχανή, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς που αποδίδει η ηλεκτρογεννήτρια. σύμφωνα με τον τύπο:

$$P = 2 \times \pi \times \frac{n}{60} \times Q \quad (2.1)$$

Η διάταξη υπολογισμού της ισχύος αποτελείται από μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges) οι οποίοι τοποθετούνται περιμετρικά του περιστρεφόμενου άξονα, με κατάλληλη συγκολλητική ουσία. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο τύπος μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι ο μετρητής με αντίσταση, η λειτουργία του οποίου στηρίζεται στην αλλαγή της ηλεκτρικής του αντίστασης που είναι αποτέλεσμα της μεταβολής των διαστάσεων του. Επομένως, 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}). Τελικά η ροπή του άξονα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = G \times \frac{\pi}{16} \times D^3 \times 2 \times \epsilon_{45} \quad (2.2)$$

όπου G: Ο συντελεστής διάτμησης και D: Η διάμετρος του άξονα

2. Μετρητής της Μάζας της Ροής

Ο μετρητής μάζας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου με βάση τη μέθοδο Coriolis. Σύμφωνα με αυτή, τοποθετούνται αισθητήρες (probes) στα άκρα των σωλήνων από τους οποίους διέρχεται το καύσιμο πριν εισέλθει στην ηλεκτρογεννήτρια προκειμένου να γίνει η καύση. Οι σωλήνες διεγείρονται με συγκεκριμένη συχνότητα, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του εκάστοτε ρευστού και οι αισθητήρες ανιχνεύουν τυχόν διαφορές στη δόνηση που οφείλονται στη ροή. Οι διαφορές στη δόνηση μεταφράζονται σε διαφορά φάσης μεταξύ των διάφορων σημείων του σωλήνα και αυτή η διαφορά σχετίζεται με την ποσότητα της μάζας καυσίμου που έχει περάσει μέσα από τον αγωγό.

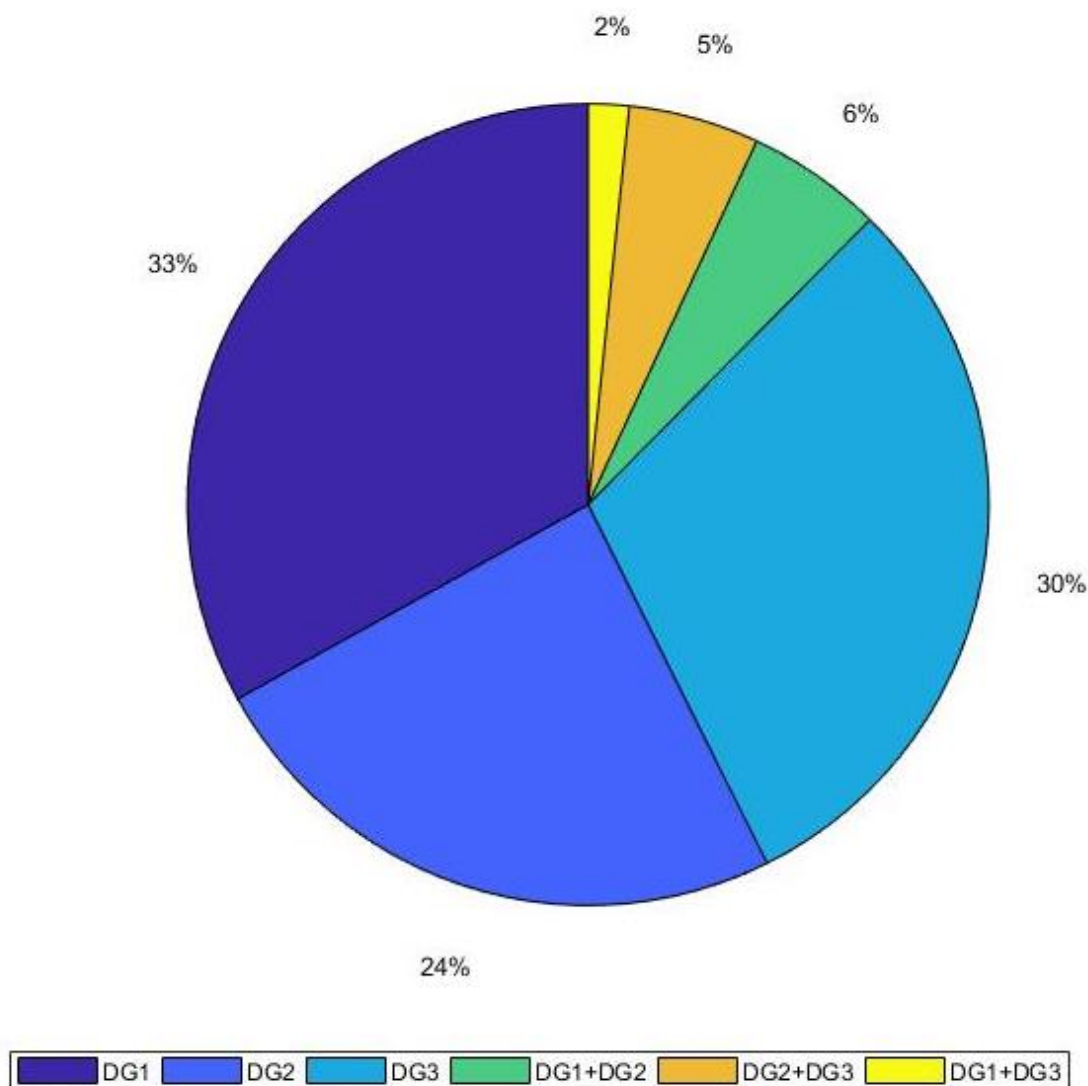
3. Μετρητής Ταχύτητας Πλοίου

Ένας τρόπος μέτρησης της ταχύτητας ενός πλοίου είναι με τη χρήση ενός ηλεκτρομαγνητικού μετρητή ο οποίος τοποθετείται κοντά στον βολβό. Ο μετρητής παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσα από το οποίο διέρχεται το θαλασσινό νερό που ως γνωστών αποτελεί αγωγός του ηλεκτρισμού και έτσι δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Το παραγόμενο ρεύμα είναι κάθετο στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και στην κίνηση του πλοίου. Ο αισθητήρας

καταγράφει την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος και τη μετατρέπει σε ταχύτητα πλοίου.

2.2 Αρχική Ανάλυση

Σαν πρώτο βήμα παράχθηκε το παρακάτω γράφημα πίτας που δίνει μια ξεκάθαρη εικόνα για τον χρόνο που χρησιμοποιήθηκε η κάθε γεννήτρια.



Εικόνα 3: Ποσοστιαία χρονική λειτουργία κάθε γεννήτριας το υπό μελέτη εξάμηνο

Η εικόνα 3 αποτυπώνει σε ποσοστά τον χρόνο λειτουργίας της κάθε ηλεκτρογεννήτριας το υπό μελέτη εξάμηνο. Παρατηρείται πως η DG1 χρησιμοποιείται περισσότερο από τις άλλες δύο ενώ την ακολουθεί σε χρόνο χρήσης η DG3. Επιπλέον, όταν απαιτείται η παράλληλη λειτουργία των μηχανών για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρικό ρεύμα το πλήρωμα επέλεξε, το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τον συνδυασμό των DG1 και DG2. Το χρονικό διάστημα που πραγματοποιήθηκε η μελέτη δεν υπήρξε χρήση και των τριών ηλεκτρομηχανών

ταυτόχρονα και για αυτό δεν εμφανίζεται σαν συνδυασμός και στο παραπάνω διάγραμμα.

2.2.1 Αφαίρεση Ακραίων Τιμών

Για την εξάλειψη των σημείων που αποκλίνουν από τη συμπεριφορά της πλειονότητας των μετρήσεων ως βασική παράμετρος θεωρήθηκε το φορτίο της κάθε ηλεκτρομηχανής και σαν δευτερεύουσα παράμετρος η κατανάλωση καυσίμου. Τα δύο μεγέθη ορίζονται ως εξής:

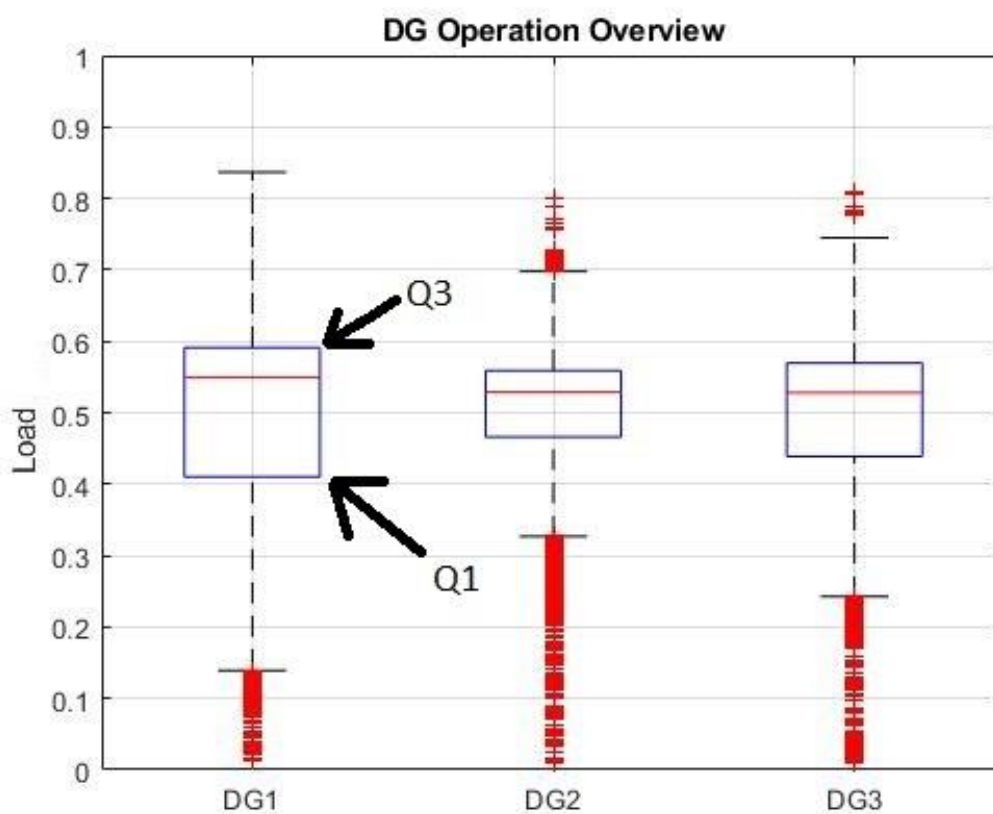
$$\text{Load} = \frac{P_{\text{avg}}}{P_{\text{max}}} \quad (2.3) \quad \text{και} \quad \text{SFOC}_{\text{REAL}} = \frac{\text{FOC}_{\text{avg}}}{P_{\text{avg}} \times 24} \times 10^6 \text{ [gr/kWh]} \quad (2.4)$$

όπου:

P_{avg} = Η ανά 5' μέση τιμή της ισχύος όπως αυτή δίδεται στα δεδομένα με μονάδες kW.

P_{max} = Το MCR των υπό μελέτη ηλεκτρογεννητριών (920 kW).

FOC_{avg} = Η ανά 5' μέση τιμή της κατανάλωσης καυσίμου όπως αυτή δίδεται στα δεδομένα με μονάδες τόνοι/ημέρα.



Εικόνα 4: Πρώτη εικόνα φορτίων λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 4), από το οποίο έχουν αφαιρεθεί τα διαστήματα στα οποία η κάθε γεννήτρια είναι ανενεργή, διαπιστώνεται πως υπάρχουν αρκετά ακραία σημεία. Για την εκλογή τους το μέγεθος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ενδοτεταρτημοριακό εύρος (Interquartile range-IQR) το οποίο ορίζεται ως εξής:

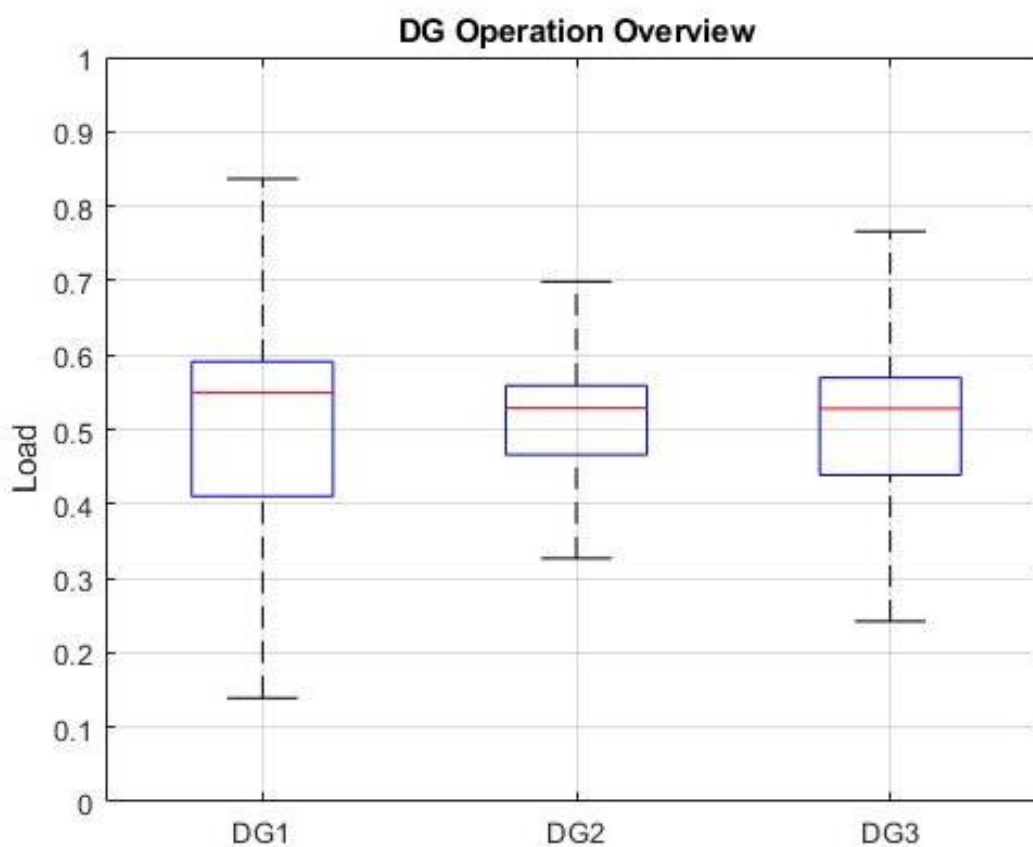
$$\text{IQR} = Q_3 - Q_1 \quad (2.5) ,$$

όπου Q_3 και Q_1 τα όρια που φαίνονται στην εικόνα 4.

Με λίγα λόγια, ως ακραίες τιμές χαρακτηρίζονται οποιαδήποτε σημεία τα οποία βρίσκονται εκτός από το εξής εύρος:

$$[Q_1 - 1.5 \times IQR, Q_3 + 1.5 \times IQR]$$

Σαν αποτέλεσμα, αφαιρέθηκαν από τα δεδομένα όλα τα σημεία εκτός του συγκεκριμένου διαστήματος μαζί με τις αντίστοιχες καταναλώσεις καυσίμου.



Εικόνα 5: Κατανομή φορτίων κάθε γεννήτριας

Η εικόνα κατανομής των φορτίων ισχύος της κάθε ηλεκτρογεννήτριας είναι πλέον αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 5. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα λαμβάνουμε τα παρακάτω στοιχεία.

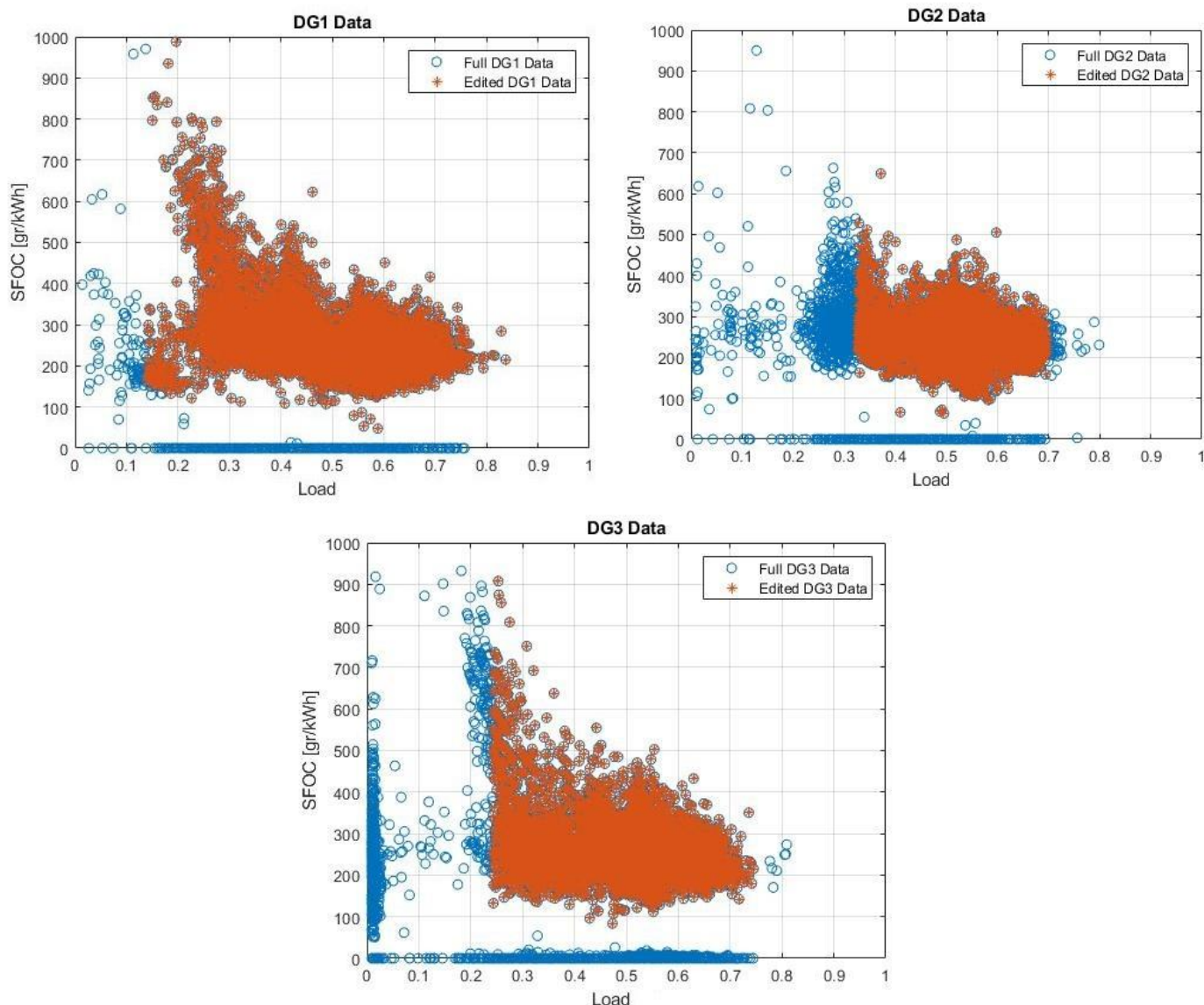
Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία για τα φορτία κάθε γεννήτριας

	DG₁	DG₂	DG₃
Ελάχιστο Φορτίο ¹	0.139	0.327	0.243
Διάμεσο Φορτίο	0.549	0.529	0.528
Μέση Τιμή Φορτίου	0.504	0.506	0.492
Μέγιστο Φορτίο	0.837	0.699	0.766
Εύρος Φορτίου (25%-75%) ²	0.410-0.591	0.466-0.559	0.439-0.570

¹ Όπου φορτίο εννοείται το Load έτσι όπως ορίζεται από την σχέση 2.3

² Αντιστοιχεί στην ισχύ στα άκρα του κάθε box plot [Q₁,Q₃].

Ο πίνακας 1 δίνει τα όρια του φορτίου κάθε ηλεκτρογεννήτριας μαζί με άλλα στατιστικά στοιχεία όπως η διάμεση τιμή ισχύος κ.α. Αφότου οριστικοποιήθηκε η σειρά δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί για να μελετηθεί η σχέση μεταξύ του φορτίου ισχύος των ηλεκτρογεννητριών και της αντίστοιχης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου δημιουργήθηκαν οι κάτωθι γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 6: Σύγκριση μετρήσεων πριν και μετά την εκκαθάριση των δεδομένων

Στην εικόνα 6 εκτίθενται τα διαγράμματα του φορτίου συναρτήσει του SFOC για κάθε ηλεκτρογεννήτρια προκειμένου να συγκριθούν οι τιμές των μετρήσεων πριν και μετά την εκκαθάριση των ακραίων τιμών. Παρατηρείται ότι πολλές μετρήσεις είναι εκτός των ορίων του διαστήματος που δόθηκε παραπάνω και έτσι αφαιρέθηκαν ώστε τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας να είναι πιο αξιόπιστα. Στην πλειονότητα των σημείων που αποκλείστηκαν από το υπόλοιπο της μελέτης περιλαμβάνονται μετρήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται είτε από πολύ χαμηλά φορτία και μεγάλες τιμές SFOC είτε από το αντίστροφο γεγονός το οποίο πρέπει να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα του μετρητικού οργάνου.

2.3 Ανάλυση Ευαισθησίας μεταξύ φορτίων σε λιμάνι και εν πλω

Για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας των ηλεκτρομηχανών πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με το αν θα πρέπει να γίνει ξεχωριστή προσέγγιση των καταναλώσεων των ηλεκτρογεννητριών ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση του πλοίου, δηλαδή ανάλογα με το αν αυτό βρίσκεται σε πορεία ή σε κάποιο λιμάνι. Πλέον, ύστερα από την εκκαθάριση των μετρήσεων και την αφαίρεση των κελιών που δεν περιείχαν δεδομένα, **το υπό μελέτη διάστημα περιορίζεται στις 147 ημέρες από τις αρχικές 184.**

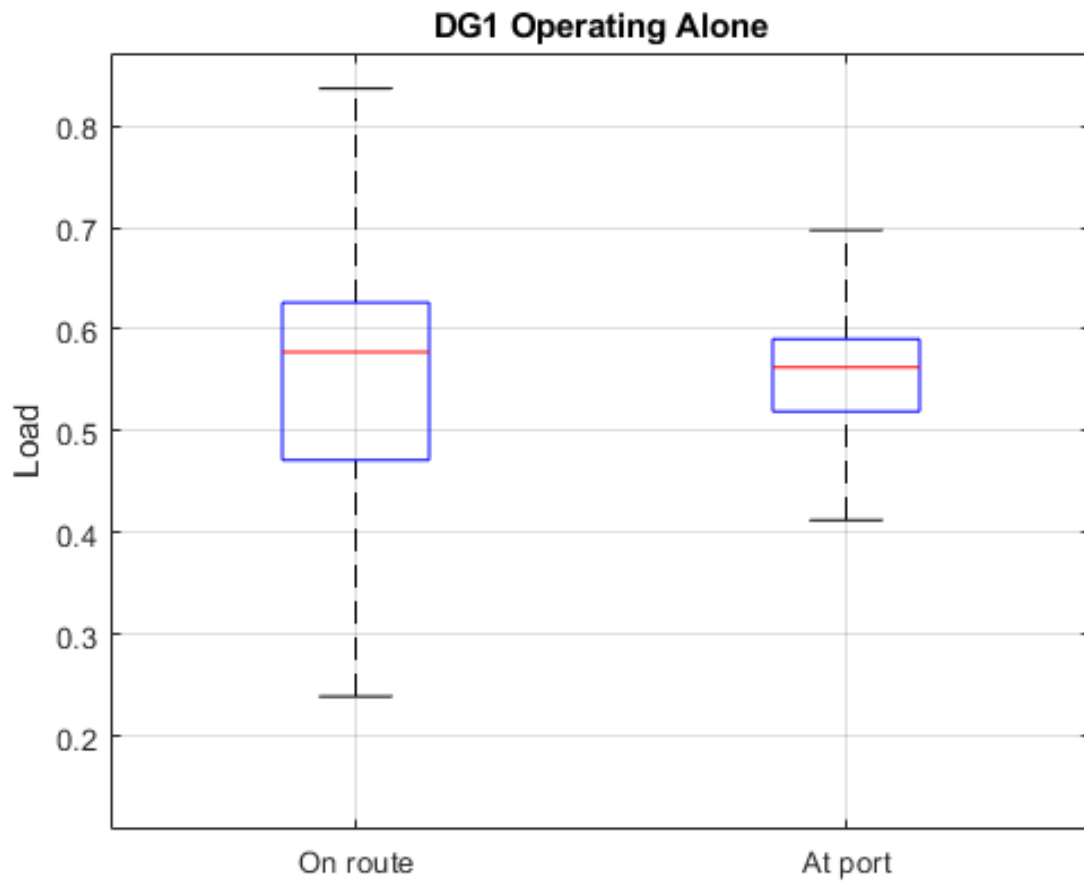
Η παράμετρος που υποδεικνύει αν το πλοίο βρίσκεται εν πλω ή σε αγκυροβόλιο, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, είναι η ταχύτητα του. Επομένως, θεωρήθηκε ότι όποτε αυτή είναι μικρότερη των 3 kn το πλοίο βρίσκεται δεμένο στο λιμάνι ενώ αντίστοιχα όταν είναι μεγαλύτερη των 3 kn το πλοίο πλέει στα ανοιχτά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί πως χρησιμοποιήθηκαν και οι αρνητικές ταχύτητες (κοντά στο μηδέν), που υπάρχουν στη σειρά δεδομένων, οι οποίες υποδεικνύουν την επίδραση του ρεύματος στο μετρητικό όργανο όταν το πλοίο είναι αγκυροβολημένο. Με αυτή τη λογική δημιουργήθηκε ο εξής πίνακας:

Πίνακας 3: Σύγκριση του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρομηχανών εν πλώ και στο λιμάνι

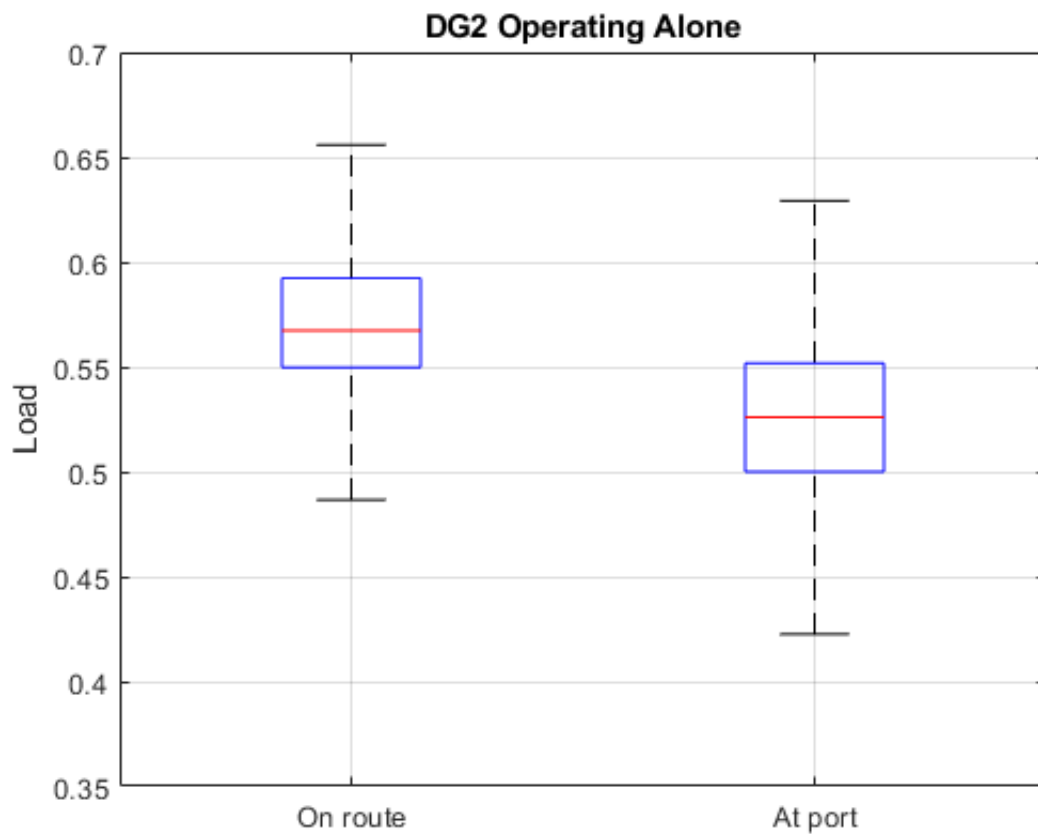
Λειτουργία Εν Πλω (79 ημέρες)		Λειτουργία στο Λιμάνι (68 ημέρες)	
Συνδυασμοί	Ποσοστά	Συνδυασμοί	Ποσοστά
DG1	42%	DG1	28%
DG2	19%	DG2	37%
DG3	24%	DG3	29%
DG1+DG2	5%	DG1+DG2	2%
DG2+DG3	2%	DG2+DG3	1%
DG1+DG3	8%	DG1+DG3	3%

Στον πίνακα 3 φαίνεται πόσο λειτούργησε ο κάθε συνδυασμός ενώ το πλοίο βρισκόταν σε πορεία και αντίστοιχα πόσο λειτούργησε ενώ το πλοίο ήταν δεμένο στο λιμάνι. Παράλληλα, υπολογίστηκε πόσες μέρες αντιστοιχούν στην κάθε κατάσταση λειτουργίας. Παρατηρείται ότι τα ποσοστά για κάθε μηχανή είναι σε κάθε περίπτωση σημαντικά και συγκρίσιμα.

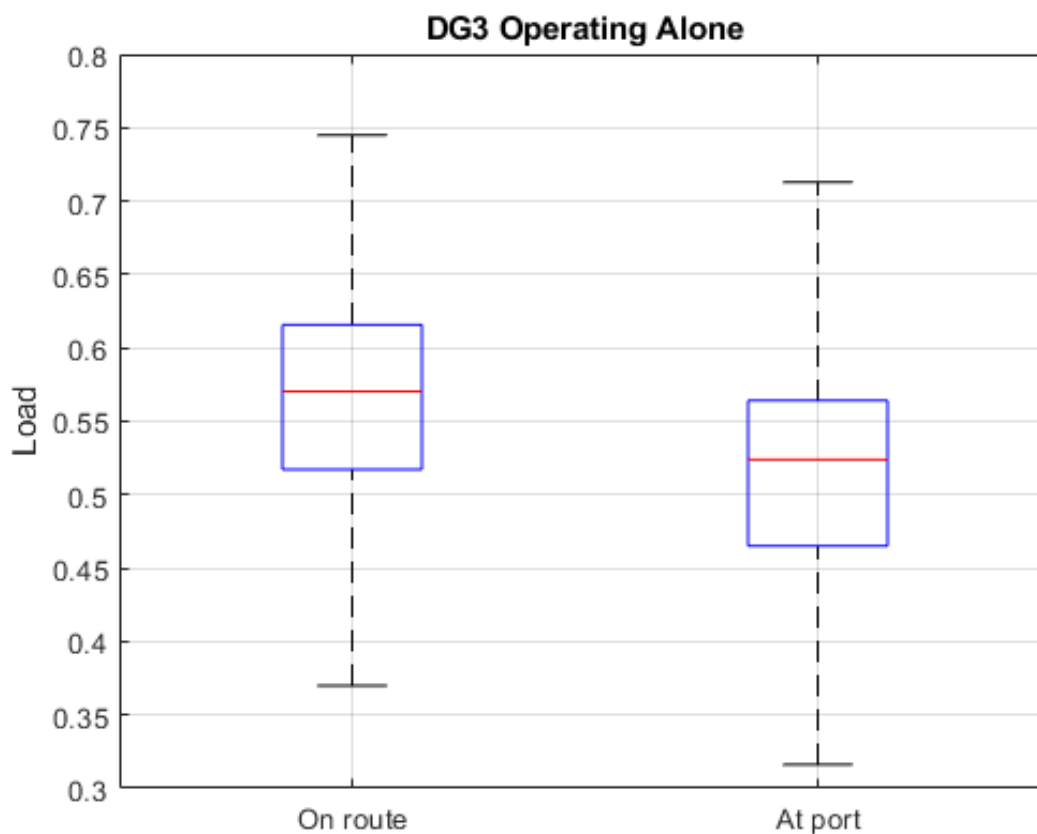
Στην παρούσα φάση μελετήθηκε αν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών του φορτίου σε κατάσταση εν πλώ και σε κατάσταση αγκυροβολίου για κάθε γεννήτρια ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν τα κάτωθι γραφήματα.



Εικόνα 8: Σύγκριση φορτίου ισχύος της DG1 όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν βρίσκεται στο λιμάνι



Εικόνα 7: Σύγκριση φορτίου ισχύος της DG2 όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν βρίσκεται στο λιμάνι



Εικόνα 9: Σύγκριση φορτίου ισχύος της DG3 όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω και όταν βρίσκεται στο λιμάνι

Οι εικόνες 7, 8 και 9 περιλαμβάνουν τα διαγράμματα τύπου box τα οποία στην προκειμένη περίπτωση δείχνουν την κατανομή του συνολικού φορτίου ισχύος, στο οποίο περιλαμβάνονται και οι πιθανοί συνδυασμοί της κάθε ηλεκτρομηχανής με τις υπόλοιπες, σε κατάσταση πορείας του πλοίου στην ανοικτή θάλασσα και σε κατάσταση παραμονής του στο λιμάνι. Με μια πρώτη ματιά φαίνεται να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο λειτουργικών περιπτώσεων³. Ακολουθούν οι παρακάτω πίνακες που δημιουργήθηκαν ώστε να βοηθήσουν στην οπτικοποίηση της παραπάνω φράσης.

³ Τα αποτελέσματα για τα φορτία ισχύος των ηλεκτρομηχανών όταν αυτές λειτουργούν σε συνδυασμούς τοποθετήθηκαν στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 4: Στατιστικά Στοιχεία των φορτιών ισχύος της DG1 όταν το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο και όταν βρίσκεται σε πορεία.

	Μέση Τιμή Φορτίου	Διάμεση Τιμή Φορτίου	Εύρος Φορτίου(25%-75%)	
Κατάσταση Λειτουργίας	Στο λιμάνι			
DG1	0,53	0,56	0,52	0,59
DG1+DG2	0,38	0,37	0,34	0,41
DG1+DG3	0,33	0,32	0,29	0,38
Κατάσταση Λειτουργίας	Εν πλω			
DG1	0,55	0,58	0,47	0,63
DG1+DG2	0,41	0,38	0,36	0,42
DG1+DG3	0,42	0,36	0,32	0,55
Κατάσταση Λειτουργίας	Διαφορές σε kW			
DG1	16,5	13,9	-43,9	33,0
DG1+DG2	27,0	5,0	16,7	9,7
DG1+DG3	77,2	40,3	32,8	155,1

Πίνακας 5: Στατιστικά Στοιχεία των φορτιών ισχύος της DG2 όταν το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο και όταν βρίσκεται σε πορεία.

	Μέση Τιμή Φορτίου	Διάμεση Τιμή Φορτίου	Εύρος Φορτίου(25%-75%)	
Κατάσταση Λειτουργίας	Στο λιμάνι			
DG2	0,53	0,53	0,50	0,55
DG2+DG1	0,38	0,37	0,34	0,40
DG2+DG3	0,42	0,44	0,41	0,45
Κατάσταση Λειτουργίας	Εν πλω			
DG2	0,57	0,57	0,55	0,59
DG2+DG1	0,42	0,38	0,36	0,43
DG2+DG3	0,48	0,52	0,40	0,53
Κατάσταση Λειτουργίας	Διαφορές σε kW			
DG2	39,99	38,05	45,80	37,30
DG2+DG1	32,43	11,00	15,88	23,05
DG2+DG3	50,64	73,25	-3,28	79,30

Πίνακας 6: Στατιστικά Στοιχεία των φορτίων ισχύος της DG2 όταν το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο και όταν βρίσκεται σε πορεία.

	Μέση Τιμή Φορτίου	Διάμεση Τιμή Φορτίου	Εύρος Φορτίου(25%-75%)	
Κατάσταση Λειτουργίας	Στο λιμάνι			
DG3	0,52	0,52	0,47	0,56
DG3+DG1	0,36	0,33	0,31	0,42
DG3+DG2	0,43	0,44	0,41	0,45
Κατάσταση Λειτουργίας	Εν πλω			
DG3	0,56	0,57	0,52	0,62
DG3+DG1	0,42	0,37	0,33	0,53
DG3+DG2	0,49	0,52	0,41	0,55
Κατάσταση Λειτουργίας	Διαφορές σε kW			
DG3	37,17	42,60	48,00	47,52
DG3+DG1	47,65	35,20	18,85	101,28
DG3+DG2	56,77	79,45	-5,25	89,10

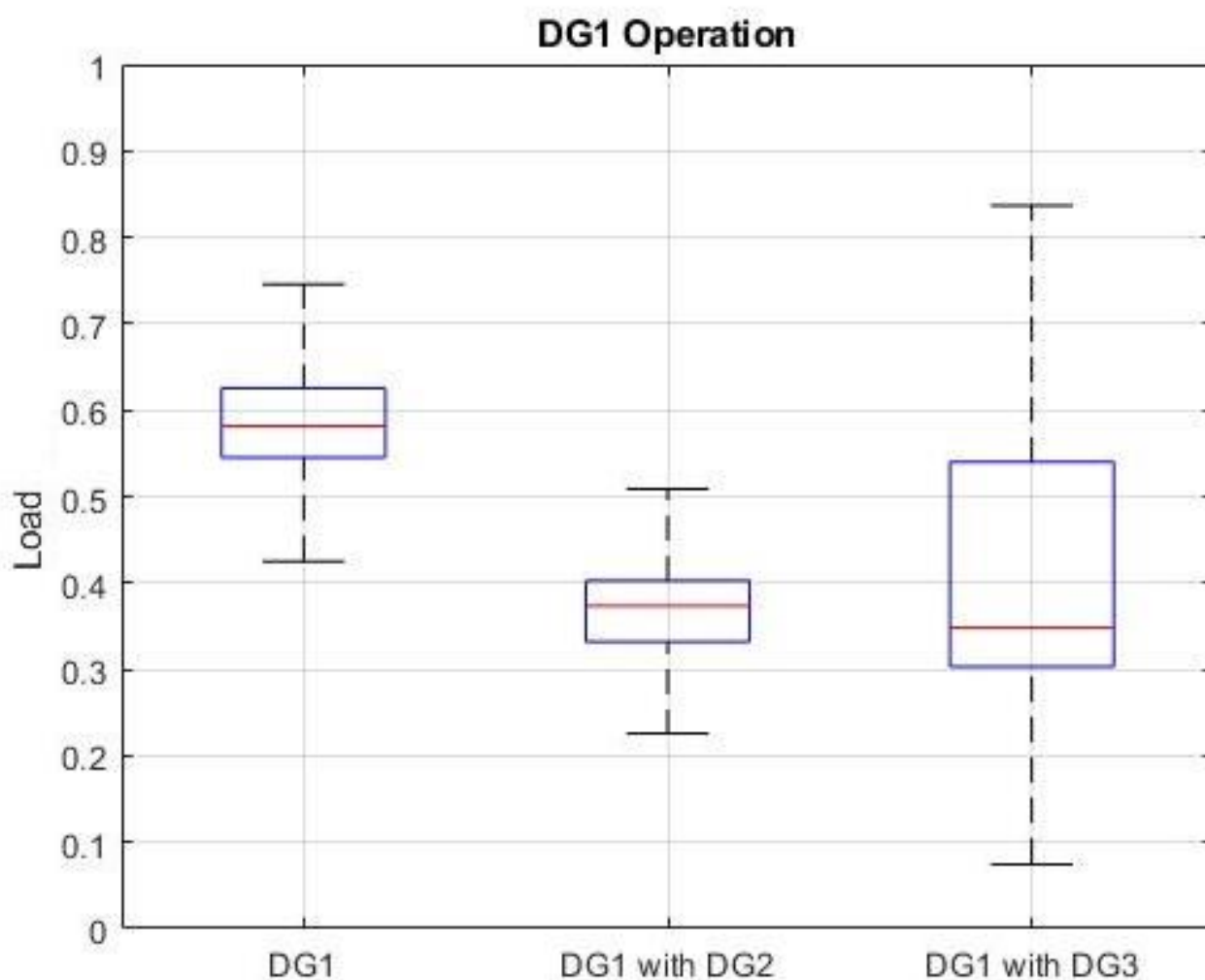
Οι πίνακες 4-6 εμπεριέχουν διάφορα χρήσιμα στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις τιμές του φορτίου που παράγει κάθε γεννήτρια (μέση, διάμεση τιμή φορτίου ισχύος κ.α.). Όπως αποδεικνύεται από τις τελευταίες τρεις σειρές του κάθε πίνακα, δεν εντοπίζονται μεγάλες διαφορές στα φορτία ισχύος των ηλεκτρομηχανών (μικρότερες των 160 kW) μεταξύ των δύο καταστάσεων. Επομένως, δεν κρίνεται αναγκαία η δημιουργία διαφορετικών αλγορίθμων για την προσέγγιση της κατανάλωσης καυσίμου.

2.4 Διαγράμματα απεικόνισης του φορτίου της κάθε γεννήτριας

Στη συγκεκριμένη ενότητα χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων, στα οποία περιλαμβάνονται και οι δύο καταστάσεις λειτουργίας (εν πλω και παραμονή στο λιμάνι) και δεν έχει πραγματοποιηθεί αφαίρεση των ακραίων τιμών, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1, ακόμη. Στόχος είναι να υπολογιστούν τα φορτία ισχύος παρήγαγαν οι τρεις γεννήτριες στις εξής περιπτώσεις:

1. Όταν λειτουργούσε η κάθε μία μόνη της.
2. Όταν λειτουργούσε σε συνδιασμό με κάποια από τις άλλες δύο.

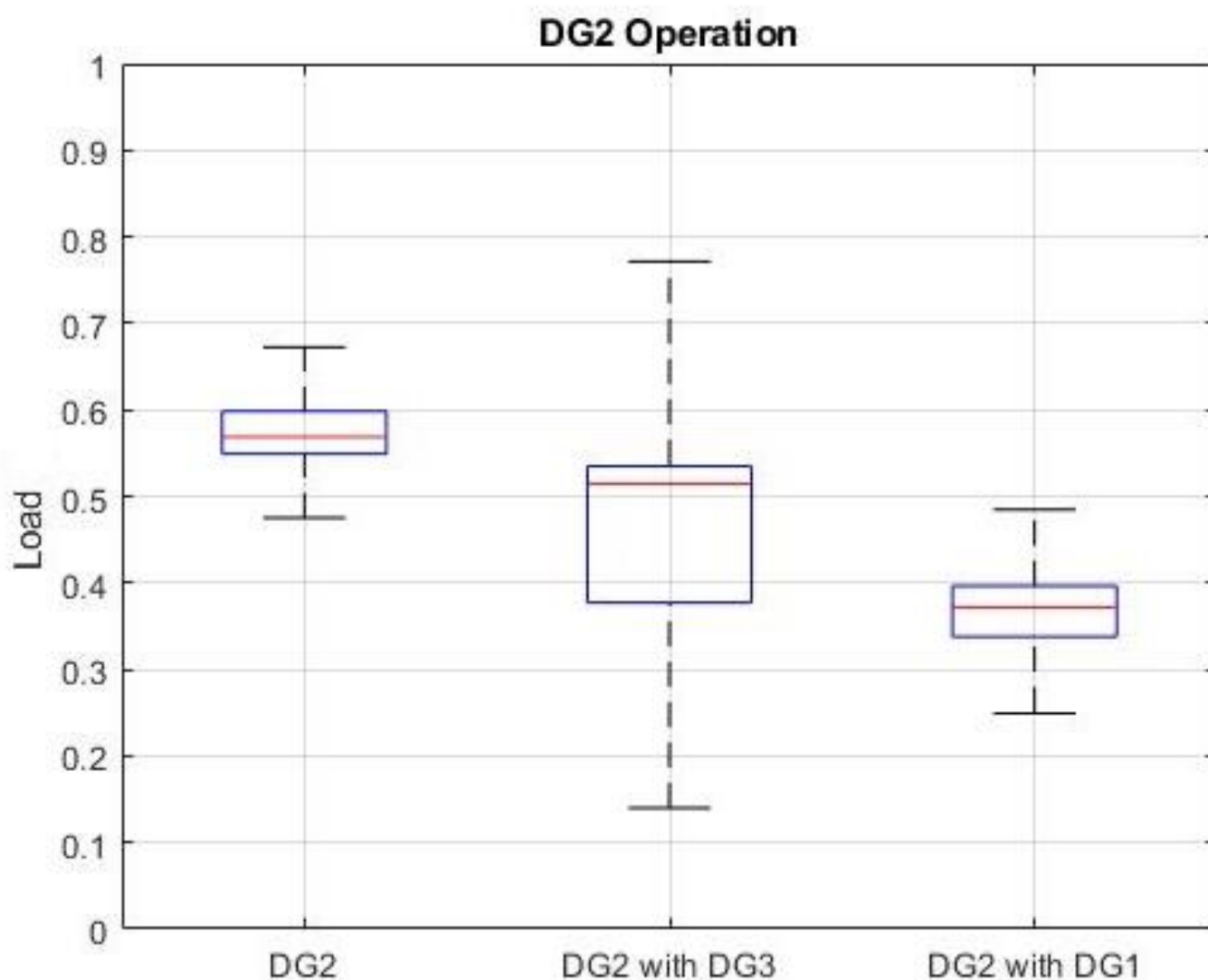
Επιλέχθηκε να μην αφαιρεθούν οι ακραίες τιμές διότι έτσι ίσως χάνονταν δεδομένα από την ταυτόχρονη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών, γεγονός που θα αλλοίωνε την ανάλυση της παρούσης ενότητας.



Εικόνα 10: Φορτία Λειτουργίας της DG1

Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία για το φορτίο λειτουργίας στις DG1

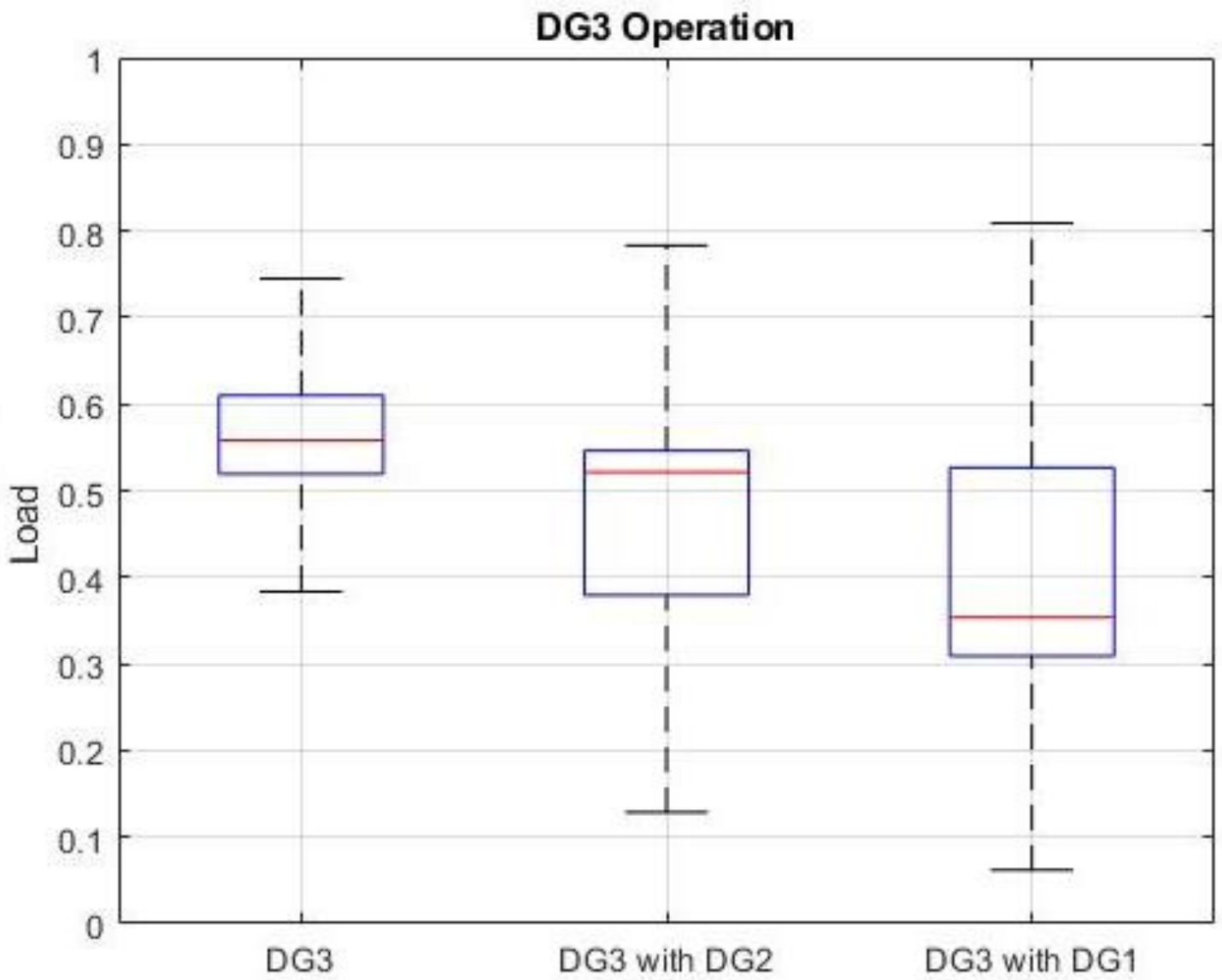
	DG ₁	DG ₁ όταν λειτουργεί μαζί με την DG ₂	DG ₁ όταν λειτουργεί μαζί με την DG ₃
Ελάχιστο Φορτίο	0.425	0.226	0.074
Διάμεσο Φορτίο	0.582	0.373	0.348
Μέση Τιμή Φορτίου	0.570	0.374	0.390
Μέγιστο Φορτίο	0.716	0.509	0.837
Εύρος Φορτίου (25%-75%)	0.545-0.625	0.332-0.403	0.303-0.540



Εικόνα 11: Φορτία Λειτουργίας της DG2

Πίνακας 8: Στατιστικά Στοιχεία για το φορτίο λειτουργίας της DG2

	DG ₂	DG ₂ όταν λειτουργεί μαζί με την DG ₃	DG ₂ όταν λειτουργεί μαζί με την DG ₁
Ελάχιστο Φορτίο	0.475	0.140	0.249
Διάμεσο Φορτίο	0.569	0.514	0.372
Μέση Τιμή Φορτίου	0.579	0.465	0.373
Μέγιστο Φορτίο	0.672	0.772	0.485
Εύρος Φορτίου (25%-75%)	0.549-0.598	0.377-0.535	0.338-0.397



Εικόνα 12: Φορτία Λειτουργίας της DG3

Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία για το φορτίο λειτουργίας της DG3

	DG ₃	DG ₃ όταν λειτουργεί μαζί με την DG ₂	DG ₃ όταν λειτουργεί μαζί με την DG ₁
Ελάχιστο Φορτίο	0.384	0.129	0.062
Διάμεσο Φορτίο	0.558	0.521	0.354
Μέση Τιμή Φορτίου	0.560	0.475	0.392
Μέγιστο Φορτίο	0.745	0.783	0.809
Εύρος Φορτίου (25%-75%)	0.519-0.610	0.379-0.546	0.309-0.527

Στις εικόνες 10, 11 και 12 απεικονίζονται μέσω των διαγραμμάτων οι περιοχές λειτουργίας, όσον αφορά το συνολικό φορτίο ισχύος, των τριών ηλεκτρομηχανών όταν αυτές καλύπτουν εξ' ολοκλήρου την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (η αριστερή στήλη κάθε σχήματος, όπου έχει για τίτλο το όνομα της εκάστοτε γεννήτριας) και όταν δουλεύουν παράλληλα μεταξύ τους (κεντρική και δεξιά στήλη). Παρατηρείται πως τα φορτία χρήσης μιας ηλεκτρογεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί μόνη της είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερα από ότι όταν υπάρχει παράλληλη χρήση δύο γεννητριών πράγμα που είναι λογικό καθώς στη δεύτερη περίπτωση λειτουργίας η ανάγκη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιμερίζεται.

Επίσης, στους πίνακες 7, 8 και 9 παρατίθενται και πάλι χρήσιμα στατιστικά στοιχεία όπως ελάχιστο, μέγιστο φορτίο ισχύος κ.α., που προκύπτουν από τα αντίστοιχα διαγράμματα ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μια ολοκληρωμένη άποψη για τα δεδομένα που παρουσιάζονται σε αυτά. Οι συγκεκριμένοι πίνακες έρχονται να επιβεβαιώσουν με νούμερα την πρόταση της προηγούμενης παραγράφου σχετικά με τη μείωση της ισχύος κάθε γεννήτριας όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με κάποια άλλη.

3. Προσέγγιση της Ειδικής Κατανάλωσης Καυσίμου

Έπειτα από τη στατιστική ανάλυση της λειτουργίας της κάθε ηλεκτρογεννήτριας που οδήγησε στον προσδιορισμό του εύρους του φορτίου ισχύος στο οποίο χρησιμοποιείται η κάθε μηχανή προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες για ηλεκτρικό ρεύμα πραγματοποιήθηκε η προσέγγιση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC).

Στο παρόν εδάφιο, ζητούμενο είναι η μάθηση της δυναμικής του υπό έλεγχο συστήματος. Κατά τη διαδικασία της μάθησης χρειάζεται να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της πραγματικής εξόδου του συστήματος και της εξόδου που προβλέπεται από το δημιουργημένο πρόγραμμα. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ο αναδρομικός αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων.

Έτσι, η ειδική κατανάλωση καυσίμου εκτιμάται με επαναλαμβανόμενο τρόπο από τα δεδομένα με δύο μεθόδους. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η υπόθεση ότι το SFOC δίνεται από ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού ενώ στη δεύτερη θεωρείται ότι παίρνει μια σταθερή τιμή για ένα μικρό εύρος του φορτίου της κάθε ηλεκτρομηχανής. Και στις δύο περιπτώσεις παράγεται στον προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab ο αντίστοιχος αναδρομικός αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων (Recursive Least Squares Algorithm-RLS).

3.1 Προσέγγιση SFOC με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ειδική κατανάλωση καυσίμου περιγράφεται σαν ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{SFOC} = a \times \text{Load}^2 + b \times \text{Load} + c \quad (3.1)$$

όπου:

a,b,c = Μεταβαλλόμενοι συντελεστές

Load= Η ανεξάρτητη μεταβλητή που υπολογίστηκε σύμφωνα με το δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας (εξίσωση 2.3).

3.1.1 Μαθηματική Μοντελοποίηση και Λειτουργία Αλγορίθμου

Σε αυτό το σημείο επιχειρείται μια σύντομη παρουσίαση του αλγορίθμου ο οποίος έχει διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να ανταποκρίνεται στα δεδομένα του προβλήματος.

Αρχικά, εισάγονται στο πρόγραμμα οι τιμές του φορτίου ισχύος (Load) και οι πραγματικές τιμές του SFOC_{REAL} τις οποίες πρέπει να προεγγίσει ο αλγόριθμος. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παράμετροι του συστήματος, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι τα a, b και c.

Όπως αναλύουν οι Simon Haykin (2002) και Γιώργος Λιδωρής (2004, Ε.Μ.Π.) οι αναδρομικές εφαρμογές της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων ξεκινούν με την προσέγγιση **για γνωστές αρχικές συνθήκες** και χρησιμοποιούν τους υπολογισμούς που περιέχονται στα νέα δεδομένα, τα οποία λαμβάνουν, προκειμένου να

ανανεωθούν οι προηγούμενες εκτιμήσεις. Επομένως, το πλήθος των παρατηρούμενων δεδομένων είναι μεταβλητό.

Αρχικά, δίνεται η συνάρτηση της προσέγγισης του SFOC σαν $y(n)$:

$$y(n) = \theta(n)^T \times H(n), n=0,1,2,\dots \quad (3.2)$$

όπου:

n : Μεταβλητή του χρόνου.

y : Η προσέγγιση της τιμής της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που παράγεται από τον αλγόριθμο.

$H = [\text{Load}^2 \text{ Load } 1]^T$, ο πίνακας των εισόδων.

$\theta = [a, b, c]^T$, ο πίνακας των παραμέτρων.

Μια συνθήκη που θα πρέπει να ικανοποιεί ο αλγόριθμος προκειμένου να υπολογίσει τις παραμέτρους $[\theta(0), \theta(1), \dots, \theta(n)]$ είναι η ελαχιστοποίηση του παρακάτω μεγέθους που αποκαλείται συνάρτηση κόστους.

$$\varepsilon(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \times |e(i)|^2, i=1,2,\dots,n \quad (3.3)$$

όπου:

$e(i)$: Η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής απόκρισης $SFOC_{\text{REAL}}(i)$ και της εξόδου που παράγεται από το σύστημα, του οποίου οι εισοδοί είναι $H(i), H(i-1), \dots$ τη χρονική στιγμή i . Δηλαδή το $e(i)$ ορίζεται ως:

$$e(i) = SFOC_{\text{REAL}}(i) - y(i) = SFOC_{\text{REAL}}(i) - \theta^T(n)H(i), \quad (3.4)$$

Επίσης, για την ελαχιστοποίηση του μεγέθους ε της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε και παράμετρος μνήμης λ (forgetting factor). Η παράμετρος μνήμης εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο διαβάζει τα δεδομένα ο αλγόριθμος προτού πραγματοποιήσει την προσέγγιση και η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 1 ($0 < \lambda \leq 1$). Η χρήση του παράγοντα λ γίνεται έτσι ώστε τα δεδομένα του μακρινού παρελθόντος να "ξεχαστούν" προκειμένου να μπορέσει η σύγκλιση να ακολουθήσει τη στατιστική μεταβολή των παρατηρούμενων δεδομένων.

Στην ειδική περίπτωση όπου $\lambda=1$, το πρόγραμμα έχει άπειρη μνήμη και έτσι η προσέγγιση των δεδομένων κάποιας περιόδου συμβαίνει βάσει των αρχικών μετρήσεων γεγονός που μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε μη επιθυμητά αποτελέσματα. Αντίθετα, όταν $\lambda \approx 0$ ο αλγόριθμος χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή μνήμη και ουσιαστικά απλά αντιγράφει τις τιμές που βλέπει από τη σειρά δεδομένων χωρίς να έχει τη δυνατότητα να προβλέψει νέες τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Αναλυτική επεξήγηση της λειτουργίας της παραμέτρου μνήμης (λ) αναμένεται στη συνέχεια.

Στην παρούσα εργασία, το λ επιλέγεται έτσι ώστε ο υπολογισμός των παραγόντων του πίνακα θ να γίνεται δίνοντας βαρύτητα κάθε φορά, όσο αυτό είναι δυνατόν, στα δεδομένα του τρέχοντος μήνα. Η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου επιλέχθηκε για την κάθε ηλεκτρογεννήτρια ύστερα από δοκιμές.

Η βέλτιστη τιμή του διανύσματος $\theta(n)$ για την οποία η συνάρτηση κόστους $\varepsilon(n)$ ελαχιστοποιείται ορίζεται από την εξίσωση

$$\theta(n) = [\Phi(n)]^{-1}\psi(n) \quad (3.5)$$

με τον $n \times n$ πίνακα συνέλιξης $\Phi(n)$ να είναι ο ακόλουθος.

$$\Phi(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-1} H(i) H^T(i) \quad (3.6)$$

Επιπλέον, ο πίνακας συνέλιξης $\psi(n)$ μεταξύ των εισόδων και της επιθυμητής απόκρισης έχει διαστάσεις $n \times 1$ και ορίζεται ως εξής:

$$\psi(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-1} H(i) SFOC_{\text{REAL}}^T(i) , \quad (3.7)$$

Για να πραγματοποιηθεί όμως η επιθυμητή προσέγγιση στον χρόνο θα πρέπει το διάνυσμα των παραμέτρων $\theta(n)$ να εκφραστεί με αναδρομικό τρόπο. Για τον σκοπό αυτό οι πίνακες $\Phi(n)$ και $\psi(n)$ θα πρέπει να γραφτούν συναρτήσει των $\Phi(n-1)$ και $\psi(n-1)$. Έτσι, ο όρος που αντιστοιχεί σε $i = n$ απομονώνεται από το υπόλοιπο του αθροίσματος της εξίσωσης (3.6) και γράφεται:

$$\Phi(n) = \lambda \left[\sum_{i=1}^{n-1} \lambda^{n-1-i} H(i) H^T(i) \right] + H(n) H^T(n) , \quad (3.8)$$

Από τον ορισμό φαίνεται ότι η έκφραση μέσα στις αγκύλες στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.8), αντιστοιχεί στον πίνακα $\Phi(n-1)$. Χρησιμοποιώντας όμοιο τρόπο για τον $\psi(n)$ προκύπτουν οι παρακάτω αναδρομικές σχέσεις:

$$\Phi(n) = \lambda \Phi(n-1) + H(n) H^T(n) , \quad (3.9)$$

όπου $\Phi(n-1)$ είναι η προηγούμενη τιμή του πίνακα συνέλιξης και το προϊόν του $H(n) H(n)^T$ παίζει το ρόλο του παράγοντα διόρθωσης στη διαδικασία της ανανέωσης.

και

$$\psi(n) = \lambda \psi(n-1) + H(n) SFOC_{\text{REAL}}(n) \quad (3.10)$$

Πλέον το μόνο που μένει για τον υπολογισμό των παραμέτρων $\theta(n)$, σύμφωνα με τη σχέση (3.5) είναι η αντιστροφή του τον πίνακα $\Phi(n)$. Ο πίνακας συνέλιξης $\Phi(n)$ είναι θετικός και σταθερός, επομένως μπορεί να εφαρμοστεί το λήμμα της αντιστροφής πινάκων⁴ στην αναδρομική εξίσωση (3.9), το οποίο οδηγεί στο εξής αποτέλεσμα:

$$\Phi^{-1}(n) = \lambda^{-1} \Phi^{-1}(n-1) - \frac{\lambda^{-2} \Phi^{-1}(n-1) H(n) H^T(n) \Phi^{-1}(n-1)}{1 + \lambda^{-1} H^T(n) \Phi^{-1}(n-1) H(n)} , \quad (3.11)$$

Για διευκόλυνση των υπολογισμών θεωρείται

$$P(n) = \Phi^{-1}(n) = \lambda^{-1} P(n-1) - \lambda^{-1} k(n) H^T(n) P(n-1) , \quad (3.12)$$

⁴ βλ. Παράρτημα Β

και

$$k(n) = \frac{\lambda^{-1}P(n-1)H(n)}{1+\lambda^{-1}H^T(n)P(n-1)H(n)}, \quad (3.13)$$

Ο $n \times n$ πίνακας $P(n)$ ονομάζεται αντίστροφος πίνακας συνέλιξης. Ο $n \times 1$ πίνακας $k(n)$ ονομάζεται πίνακας κέρδους.

Ύστερα από πράξεις που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος ο πίνακας των παραμέτρων θ δίνεται από τη σχέση:

$$\theta(n) = \theta(n-1) + k(n)a(n), \quad (3.14)$$

όπου $a(n) = SFOC_{REAL}(n) - H^T(n)\theta(n-1)$ και ονομάζεται το a priori λάθος εκτίμησης.

Προτού πραγματοποιηθεί η εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε παραπάνω, οι ανά 5' μετρήσεις (του Load και του SFOC) ομαδοποιήθηκαν ανά 30, 60 και 120 λεπτά και ταξινομούνται ανά μήνα (Αύγουστος-Ιανουάριος) προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση της κάθε ηλεκτρογεννήτριας. Η ομαδοποίηση έγινε έτσι ώστε να ομαλοποιηθεί η κατανομή των μεγεθών και προέκυψε από τον υπολογισμό της μέσης τιμής των μετρήσεων για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, το οποίο σταμάτησε να αυξάνεται στα 120 λεπτά καθώς από εκεί και πέρα μειώνονταν αισθητά τα δεδομένα σημεία.

Παράλληλα υπολογίζεται και ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για να καταδείξει πόσο καλή είναι κάθε φορά η σύγκλιση. Ο δείκτης υπολογίζεται με τον εξής τύπο:

$$\delta_1 = \frac{SFOC_{REAL}}{y(n)} \quad (3.15)$$

όπου:

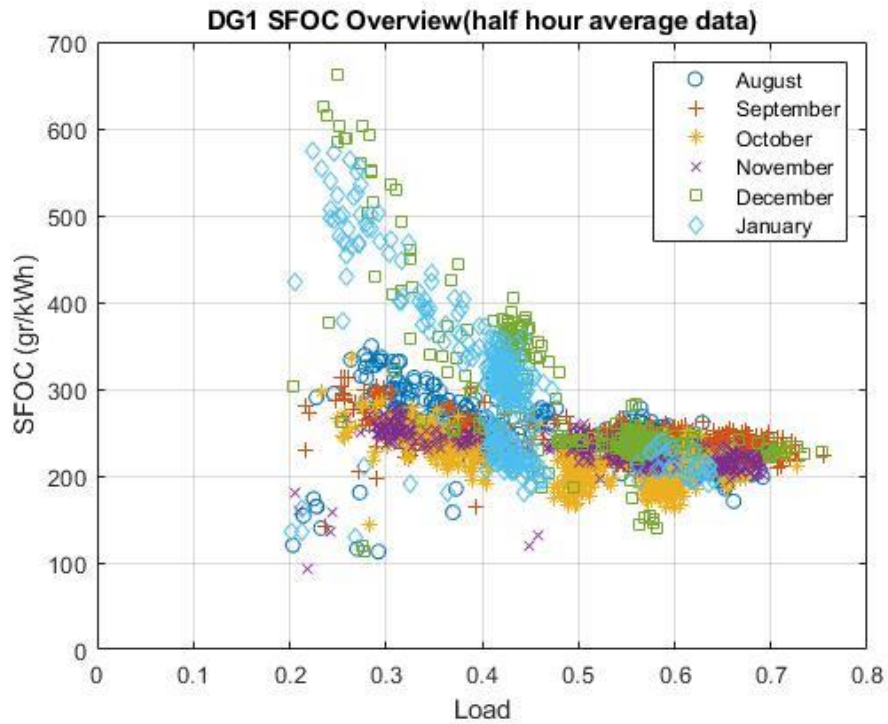
$SFOC_{REAL}$: Η μεταβλητή στον χρόνο ειδική κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει από τα δεδομένα. [gr/kWh]

$y(n)$: Η ειδική κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει από εκτέλεση του αλγορίθμου. [gr/kWh]

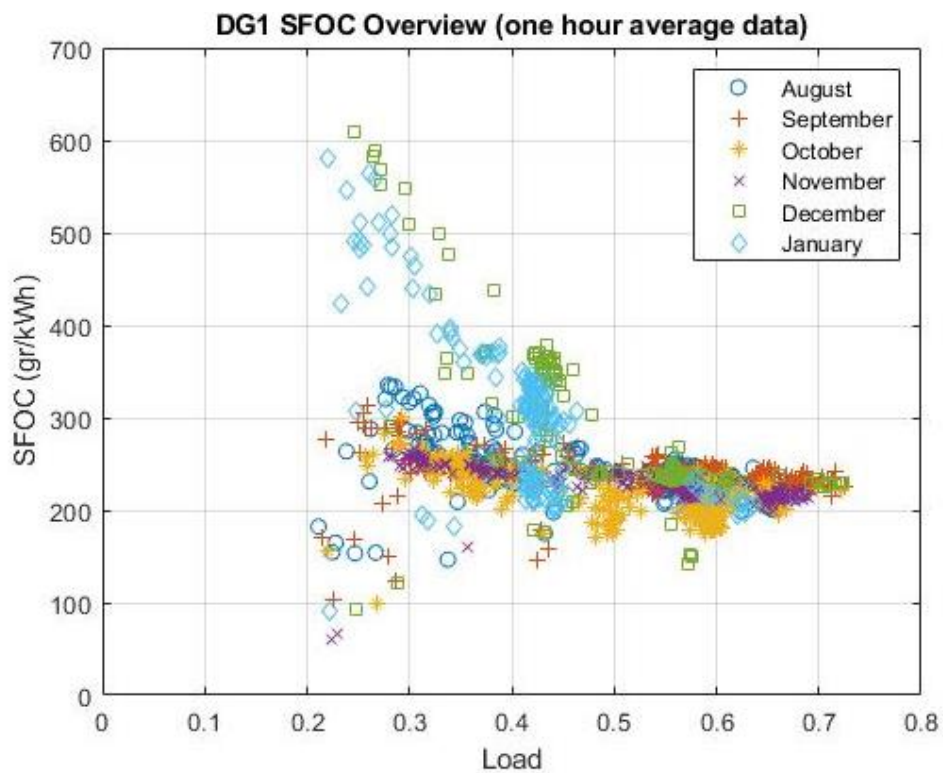
3.2 Αποτελέσματα της μεθόδου

Αρχικά, παρουσιάζεται η κατανομή των μετρήσεων του φορτίου της ισχύος με την αντίστοιχη ειδική κατανάλωση καυσίμου σύμφωνα με την ταξινόμηση και εξομάλυνση που έγινε. Στη συνέχεια, αφού επιλεχθεί ποια ταξινόμηση των μετρήσεων είναι καταλληλότερη, για την ανάγκη εύρεσης της κατάλληλης παραμέτρου μνήμης παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις της κάθε προσέγγισης, που χαρακτηρίζεται από διαφορετικό λ , σε κοινό διάγραμμα με τις πραγματικές τιμές του SFOC. Στο τέλος της κάθε ενότητας υπάρχει ένας πίνακας που περιέχει στατιστικά στοιχεία του δείκτη που χρησιμοποιείται για να καταδείξει πόσο καλή είναι η κάθε σύγκλιση.

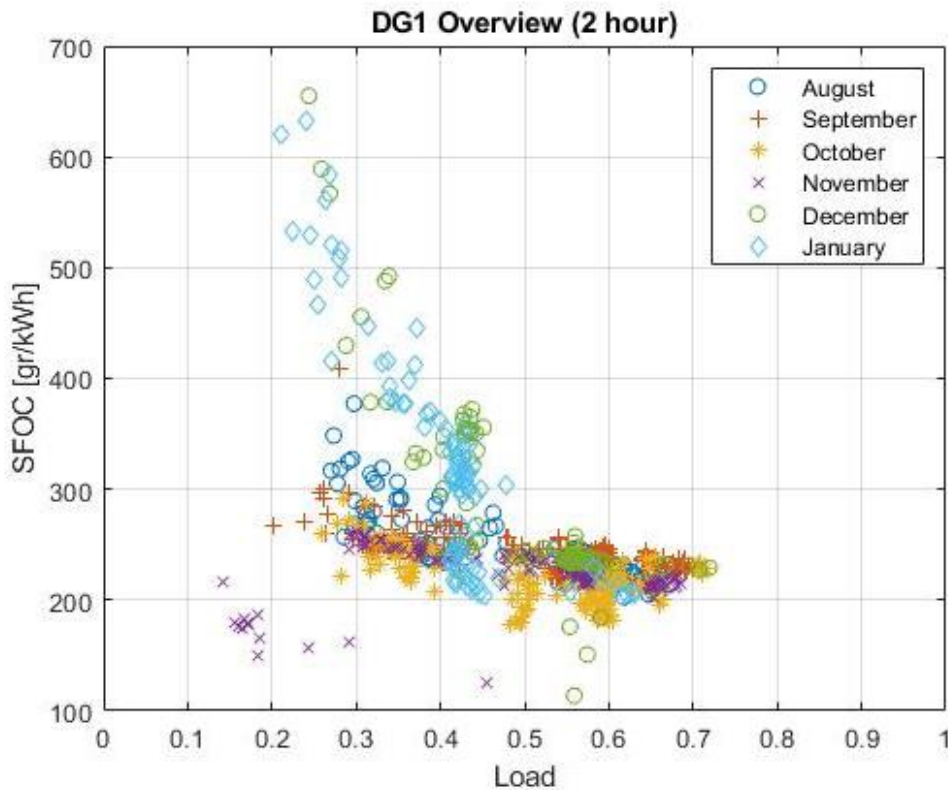
3.2.1 Ηλεκτρογεννήτρια Νο.1



Εικόνα 13: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 30'



Εικόνα 14: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 60'



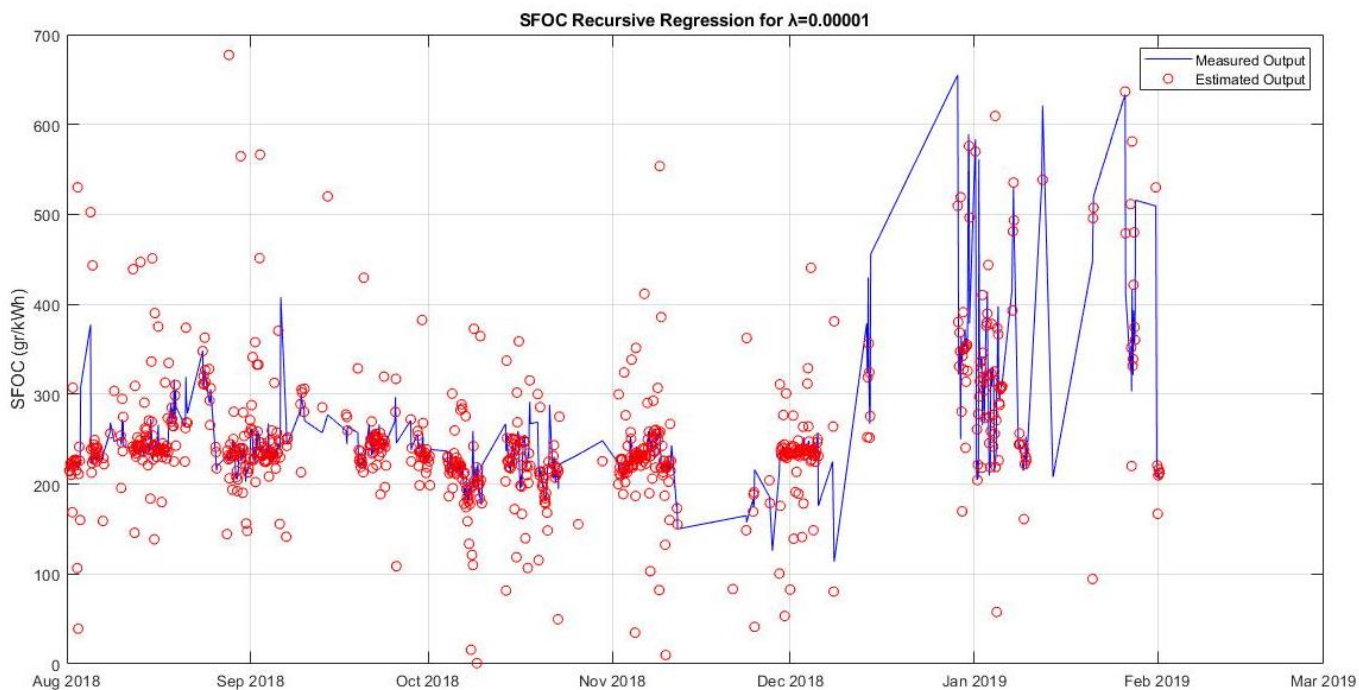
Εικόνα 15: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 120'

Στις εικόνες 13, 14 και 15 παρουσιάζονται η ομαδοποιημένες μετρήσεις ανά 30, 60 και 120 λεπτά αντίστοιχα της ηλεκτρογεννήτριας 1, οι οποίες απεικονίζουν τη χρονική μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου ισχύος⁵. Σαν μια πρώτη παρατήρηση πρέπει να αναφερθεί ότι τα περισσότερα σημεία χαρακτηρίζονται από τιμή του SFOC η οποία κινείται μεταξύ των τιμών 200-300 gr/kWh. Επίσης, όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα με το οποίο ομαδοποιούνται οι μετρήσεις τόσο πιο καθαρή διαφαίνεται η σχέση μεταξύ Load-SFOC αφού μειώνονται τα σημεία αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή των μετρήσεων όταν αυτές ομαδοποιούνται ανά 120 λεπτά δίνουν την πιο εξομαλυμένη κατανομή των δεδομένων. Συμπερασματικά, στον αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων θα εισαχθούν τα δεδομένα της εικόνας 14. Τέλος, μια παρατήρηση τεχνικής φύσεως, η οποία επιβεβαιώνεται και στη συνέχεια με την παράθεση της προσέγγισης της τιμής του SFOC της ηλεκτρογεννήτριας 1, είναι πως η ειδική κατανάλωση καυσίμου του μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο σε αρκετές περιπτώσεις λαμβάνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την πλειονότητα των μετρήσεων. Αυτή η απότομη αύξηση του SFOC τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο ίσως αποτελεί ένδειξη για το ότι απαιτούνται εργασίες συντήρησης.

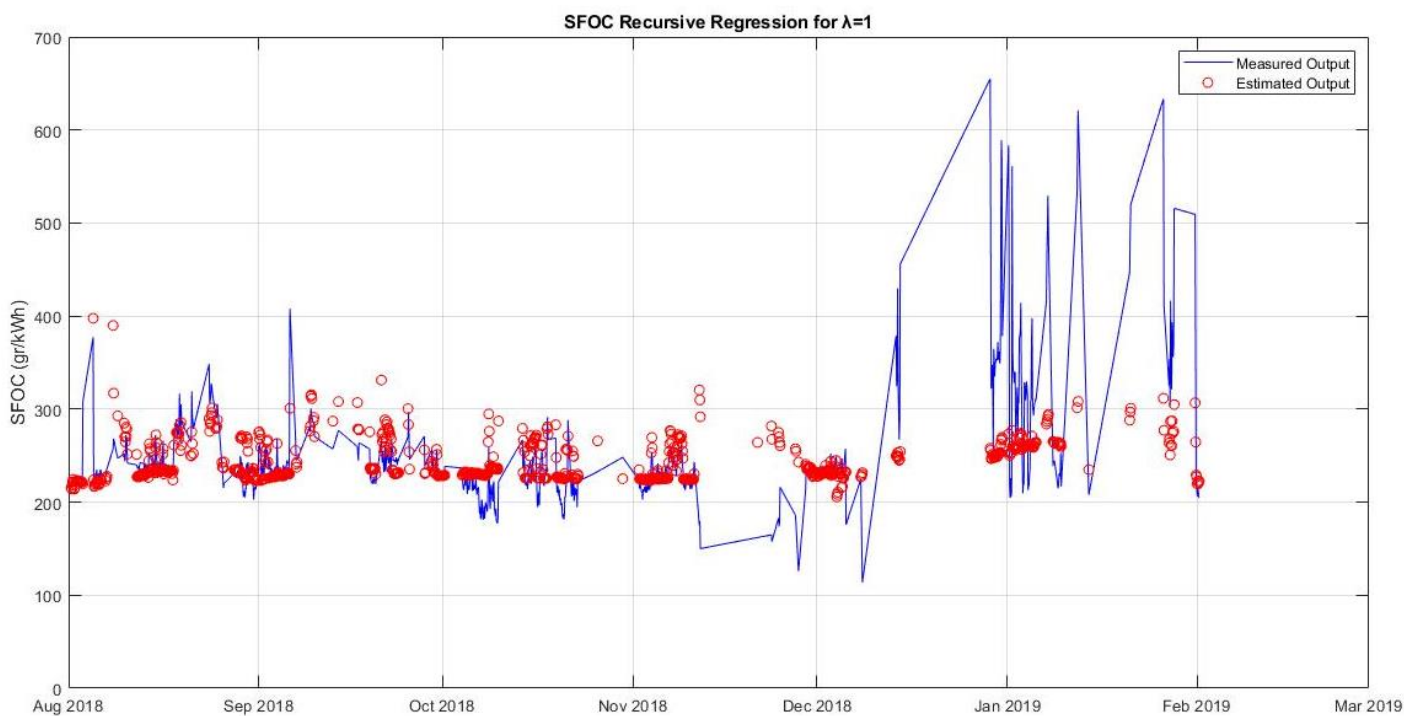
⁵ Λόγω της έντονης ανομοιομορφίας στην κατανομή SFOC-Load για φορτίο μικρότερο από 0.2 αφαιρέθηκαν τα συγκεκριμένα σημεία από τις παραπάνω απεικονίσεις.

3.2.1.1 Επιλογή της Παραμέτρου Μνήμης για την 1^η Μέθοδο Προσέγγισης

Στο συγκεκριμένο εδάφιο επιχειρείται η περιγραφή της επίδρασης της παραμέτρου μνήμης (ή αλλιώς forgetting factor) λ στον αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων και επιλέγεται αυτή που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για την DG1. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται η συμπεριφορά του αλγορίθμου για $\lambda \approx 0$ και $\lambda = 1$.

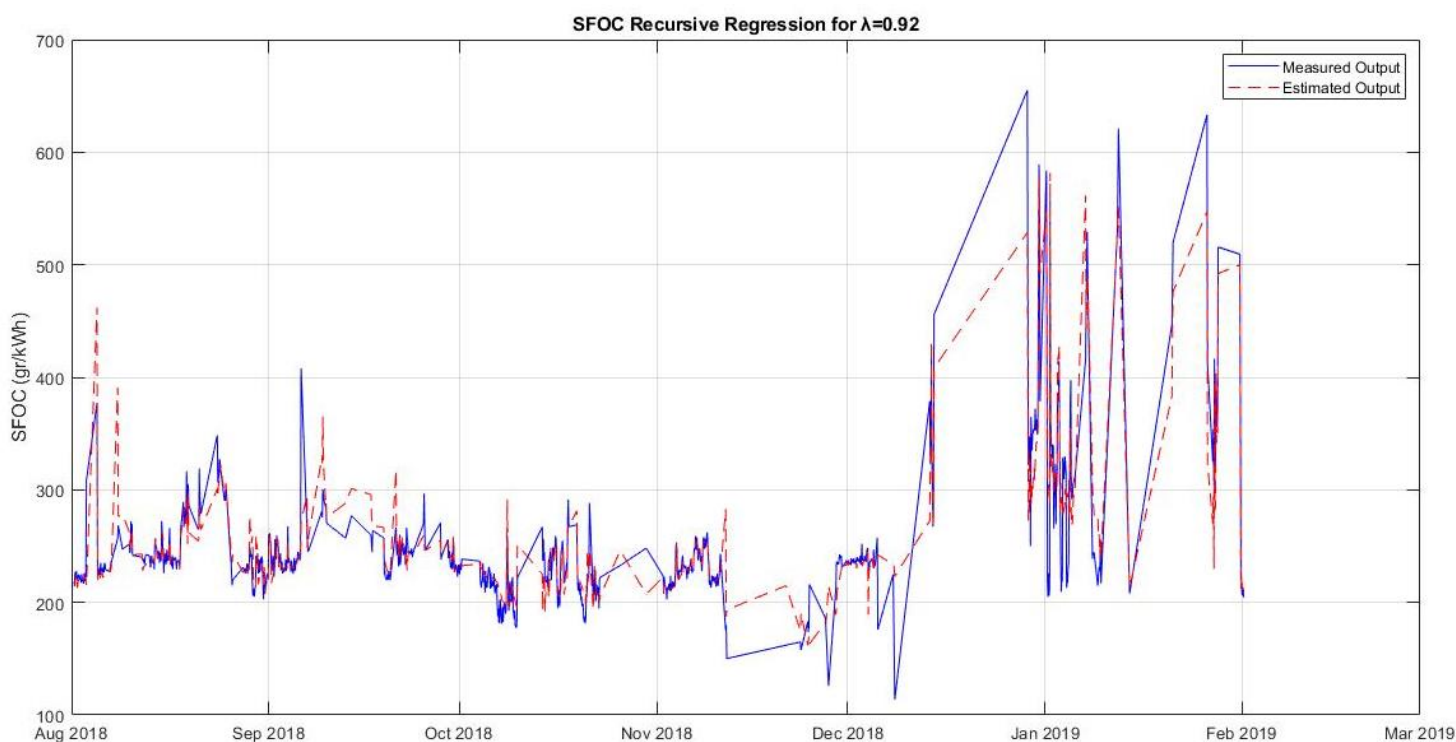


Εικόνα 16: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.00001$



Εικόνα 17: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=1$

Στην εικόνα 16 και 17 φαίνεται η προσέγγιση της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από το δημιουργημένο πρόγραμμα για $\lambda=0.00001$ και $\lambda=1$ αντίστοιχα. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι αναδρομικοί αλγόριθμοι λειτουργούν χρησιμοποιώντας τους υπολογισμούς που προκύπτουν από τα νέα δεδομένα, τα οποία λαμβάνουν, προκειμένου να ανανεώσουν τις προηγούμενες εκτιμήσεις. Τα νέα δεδομένα που διαβάζει ο αλγόριθμος εξαρτώνται από τη μνήμη του η οποία καθορίζεται από την τιμή της παραμέτρου λ . Έτσι, στην πρώτη περίπτωση για $\lambda=0.00001$ παρατηρείται πως ο αλγόριθμος έχει πολύ μικρή μνήμη και για αυτό τον λόγο σπάει το υπό μελέτη διάστημα σε πολλά επιμέρους μικρά διαστήματα. Την εναλλαγή από το ένα διάστημα στο άλλο την σηματοδοτεί η εμφάνιση των σημείων προσέγγισης που έχουν πολύ μεγάλη διαφορά από την αντίστοιχη μέτρηση του πραγματικού SFOC. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση για $\lambda=1$ φαίνεται ότι το σύστημα χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη (άπειρη) μνήμη και έτσι πραγματοποιεί την προσέγγιση με πολύ πιο ομαλό τρόπο "χάνοντας" όμως κάποιες ανωμαλίες της κατανομής του πραγματικού SFOC. Συμπερισματικά, η μικρή μνήμη δίνει πολλά σημεία τα οποία στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν συγκλίνουν με το επιθυμητό μέγεθος αλλά ξέχωρα από αυτό το γεγονός, ακολουθεί καλύτερα την κατανομή του SFOC όταν σε αυτή εμφανίζονται απότομες διακυμάνσεις πράγμα που αδυνατεί να πραγματοποιήσει ο αλγόριθμος έχοντας άπειρη μνήμη ($\lambda=1$). Το βέλτιστο λ βρίσκεται κάπου στη μέση και προσδιορίζεται ύστερα από δοκιμές.



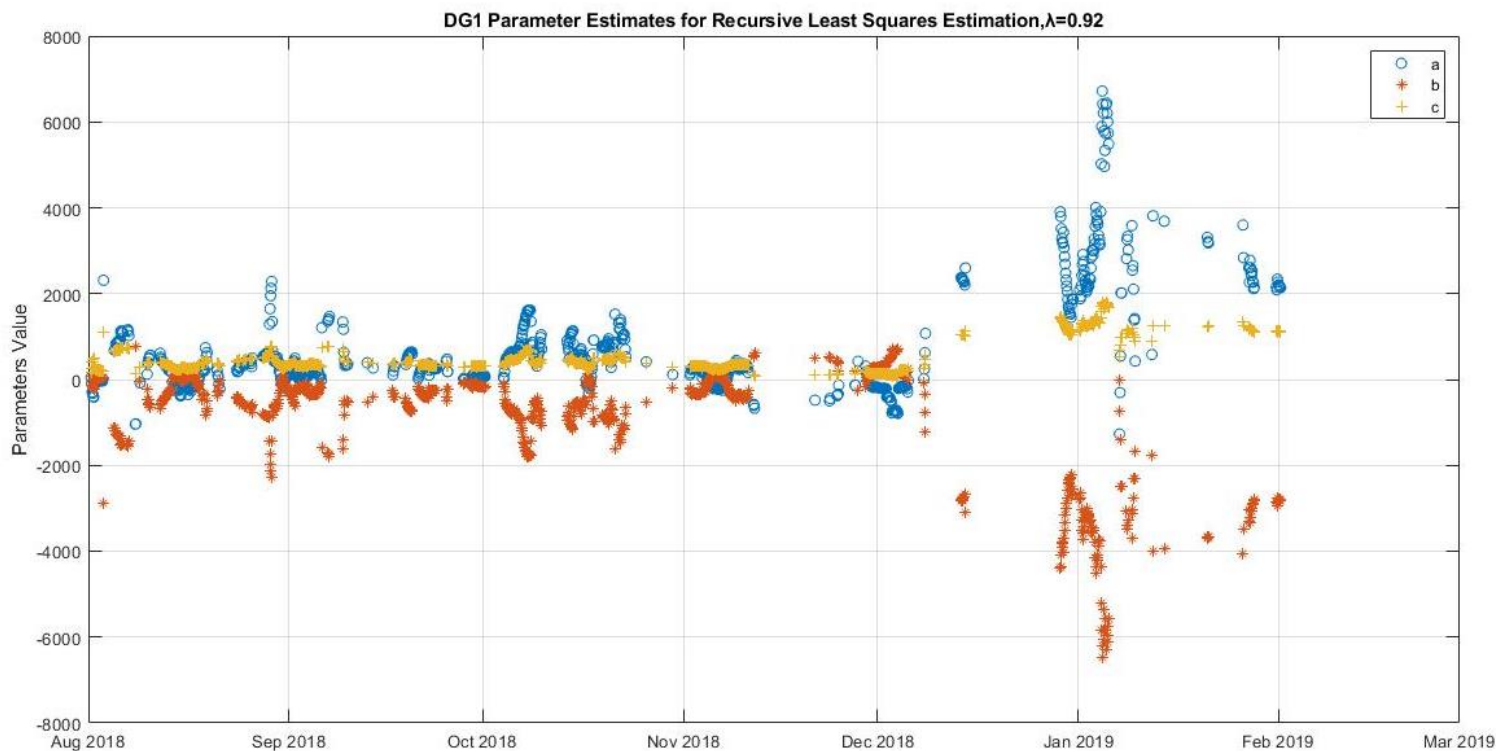
Εικόνα 18: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.92$

Στην εικόνα 18 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσέγγισης (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (μπλε καμπύλη). Παρατηρείται αρκετά καλή σύγκλιση στα δεδομένα για $\lambda=0.92$. Για τη συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου μνήμης υπολογίστηκε και ο δείκτης $\delta 1$ ώστε να φανεί αν όντως η προσέγγιση μπορεί να κριθεί ικανοποιητική. Στον πίνακα 10 παρατίθενται σημαντικά στοιχεία σχετικά με τον δείκτη $\delta 1$ ο οποίος αποδεικνύει ότι με το λ που επιλέχθηκε επιτυγχάνεται μια αποδεκτή προσέγγιση της πραγματικής

ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, ενώ με περαιτέρω αύξηση της παραμέτρου η σύγκλιση αρχίζει να χαλάει.

Πίνακας 10: Στατιστικά στοιχεία του δ_1 για το επιλεγμένο λ της 1^{ης} μεθόδου προσέγγισης για την DG1

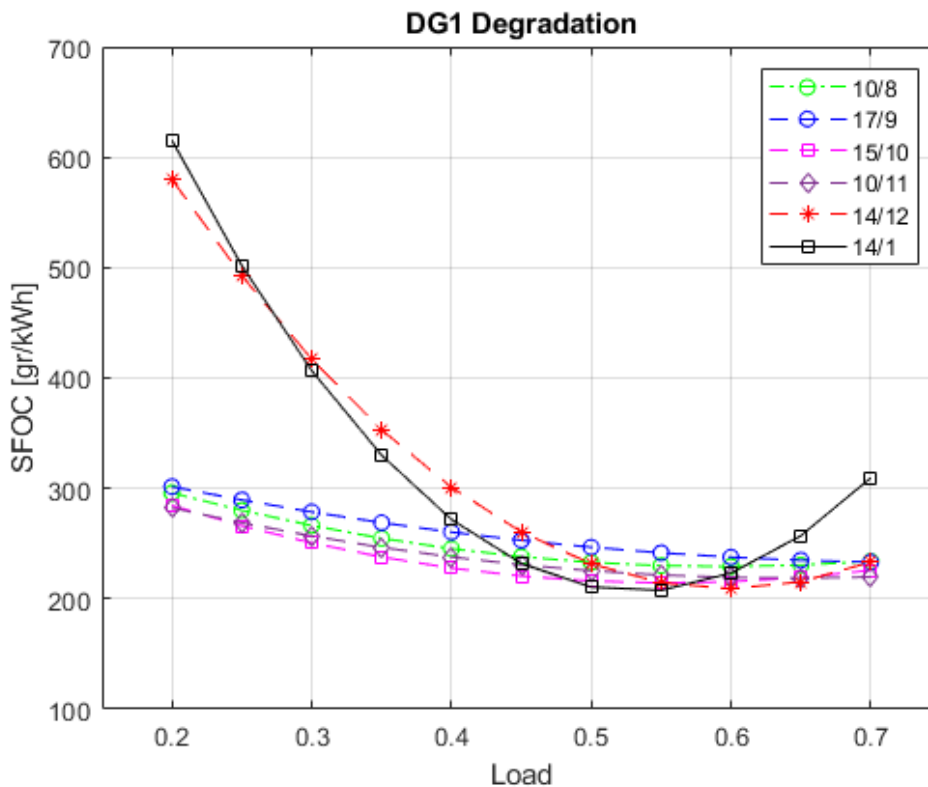
Συντελεστής Μνήμης λ	Διάμεση Τιμή δ_1	Εύρος Τιμών δ_1 (25%-75%)		Μέση Τιμή δ_1	Ελάχιστη Τιμή δ_1	Μέγιστη Τιμή δ_1
0.92	1.00346	0.97646	1.02839	1.00083	0.50943	1.50458
0.93	1.00421	0.97511	1.02965	1.00080	0.50468	1.51540



Εικόνα 19: Χρονική Μεταβολή των παραμέτρων a,b,c για $\lambda=0.92$

Έχοντας καταλήξει πλέον στην παράμετρο μνήμης λ , στην εικόνα 19 παρατίθενται η χρονική μεταβολή των παραμέτρων a, b, c του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού (σχέση 3.1). Τα κενά που εμφανίζονται στο γράφημα δείχνουν τις περιόδους όπου η ηλεκτρογεννήτρια βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Το εν λόγω διάγραμμα αποτελεί μια ένδειξη ότι ο δημιουργημένος αλγόριθμος λειτουργεί σωστά καθώς η μειωμένη απόδοση της ηλεκτρογεννήτριας No.1 τους μήνες Δεκέμβριο (προς τα τέλη) και Ιανουάριο, όπου φαίνονται ασυνήθιστα μεγάλες τιμές SFOC (500-600 gr/kWh), αποτυπώνεται και στην τάση μεταβολής των παραμέτρων το ίδιο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι με την απότομη μεταβολή του estimated SFOC στα τέλη Δεκεμβρίου μεγαλώνουν σημαντικά οι τιμές της παραμέτρου a ενώ την ίδια στιγμή μειώνονται οι τιμές του b. Γενικότερα, αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συνοδεύεται με αύξηση των τιμών του a αλλά και με ταυτόχρονη μείωση του b ενώ μείωση του SFOC έχει αντίστροφο αντίκτυπο στις παραμέτρους του πολυωνύμου δευτέρου βαθμού.

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση για την DG1 δημιουργείται το παρακάτω γράφημα.

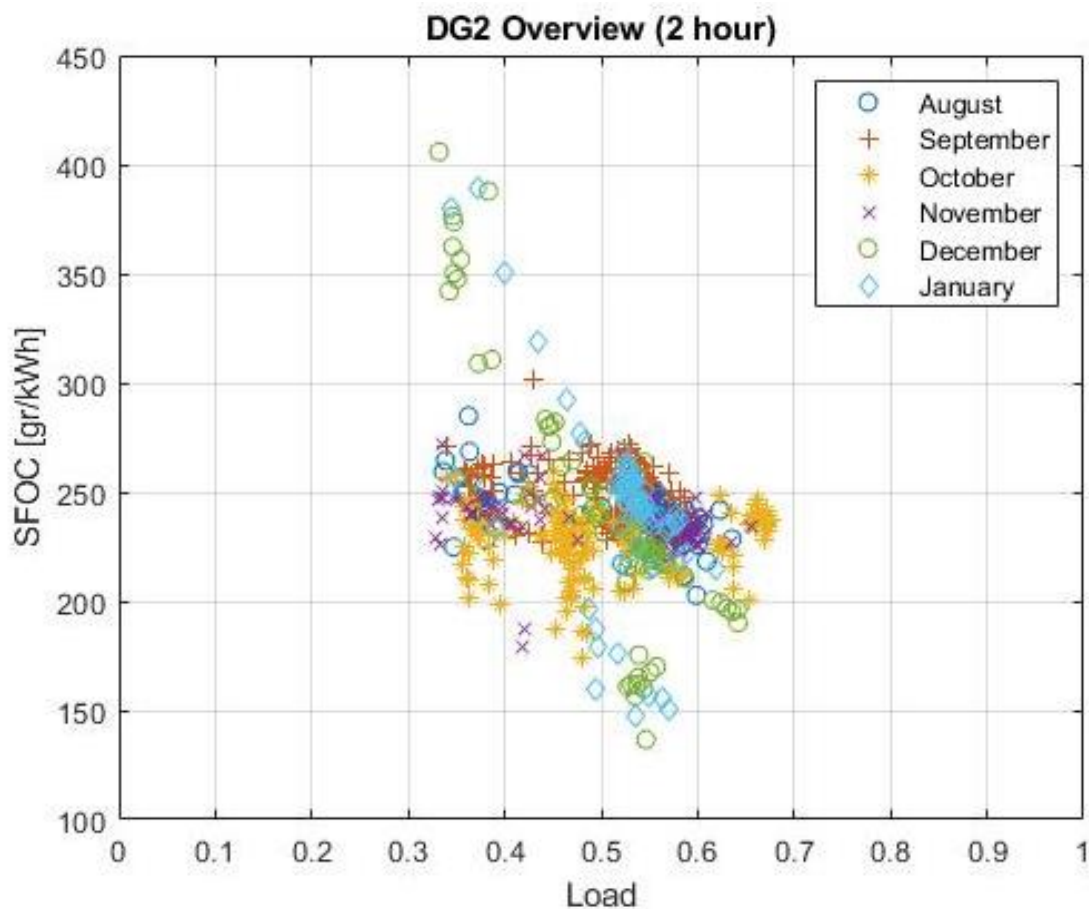


Εικόνα 20: Απεικόνιση της μείωσης της απόδοσης της DG1

Για την παραγωγή του διαγράμματος της εικόνας 20 υπολογίστηκε η μέση τιμή των παραμέτρων a, b, c του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού ανά ημέρα. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν κάποιες ενδεικτικές ημερομηνίες λειτουργίας της κάθε γεννήτριας (εδώ της DG1) και χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων δημιουργήθηκε, σύμφωνα με την εξίσωση 3.1, το γράφημα της παραπάνω εικόνας για το εύρος του φορτίου ισχύος της κάθε ηλεκτρομηχανής. Στόχος του συγκεκριμένου γραφήματος είναι να αναδείξει τη μείωση της απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας No.1 την περίοδο Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου καθώς, όπως είναι φανερό, οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για χαμηλά φορτία αυξάνονται αρκετά και ξεφεύγουν από τη γενική τάση των υπολοίπων μετρήσεων που κυμαίνονται μεταξύ 200-300 gr/kWh.

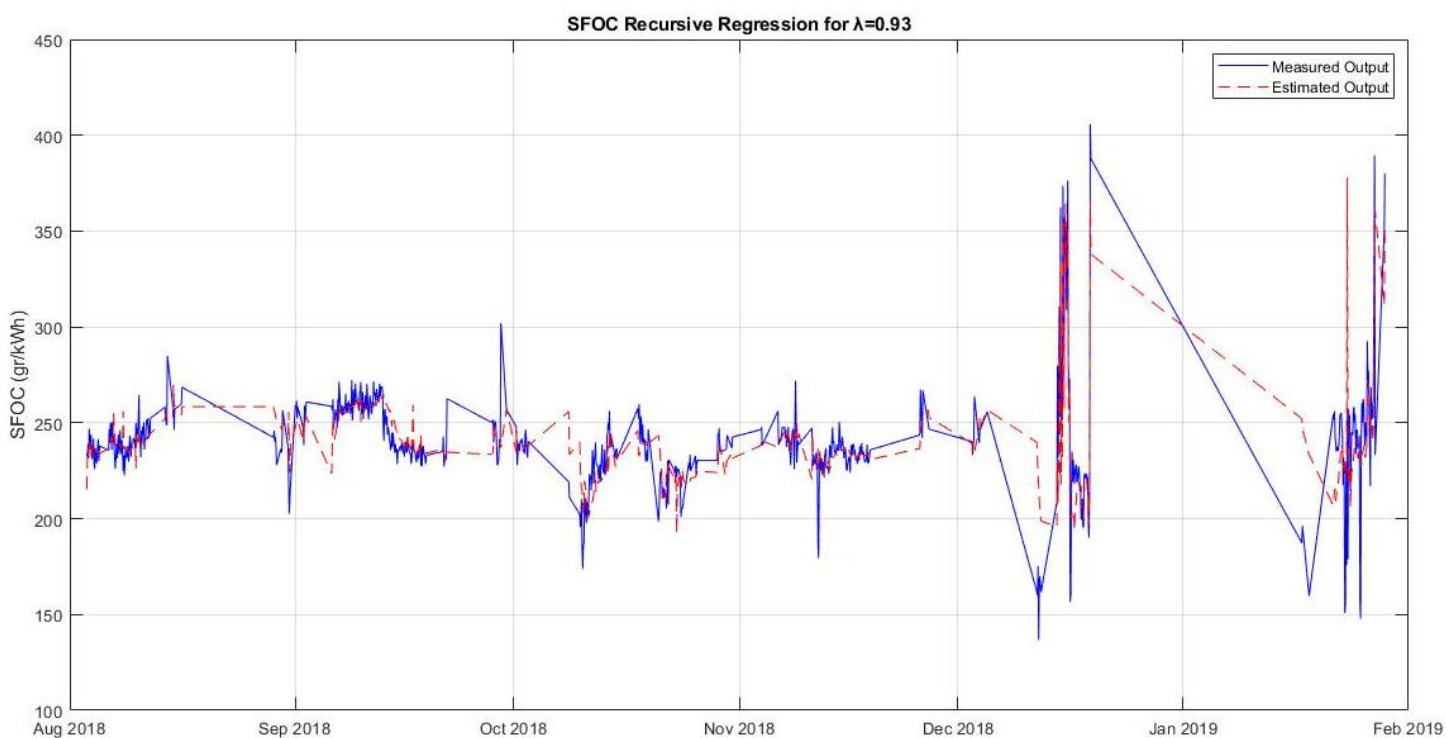
Στη συνέχεια, εφόσον η πρώτη μέθοδος προσέγγισης του SFOC αναλύθηκε και επεξηγήθηκε για την ηλεκτρογεννήτρια No.1 για τις άλλες δύο παρατίθενται απλά τα αντίστοιχα αποτελέσματα μαζί με τους απαραίτητους σχολιασμούς.

3.2.2 Ηλεκτρογεννήτρια Νο.2



Εικόνα 21: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 120'

Στην εικόνα 21 απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου ισχύος η οποία έχει ταξινομηθεί ανά μήνα. Τα δεδομένα της 2^{ης} ηλεκτρογεννήτριας έχουν ομαδοποιηθεί ανά 120' έτσι ώστε να ομαλοποιηθεί η εν λόγω κατανομή. Στην εικόνα 21 παρατηρείται, σε αντίθεση με το αντίστοιχο διάγραμμα της DG1 (εικόνα 15), ότι ελάχιστες μετρήσεις ξεφεύγουν από την τάση της πλειονότητας των σημείων τα οποία κινούνται μεταξύ 100-300 gr/kWh. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του αναδρομικού αλγόριθμου ελαχίστων τετραγώνων, για την ηλεκτρογεννήτρια Νο.2, στον οποίο εισήχθησαν τα δεδομένα της εικόνας 21.



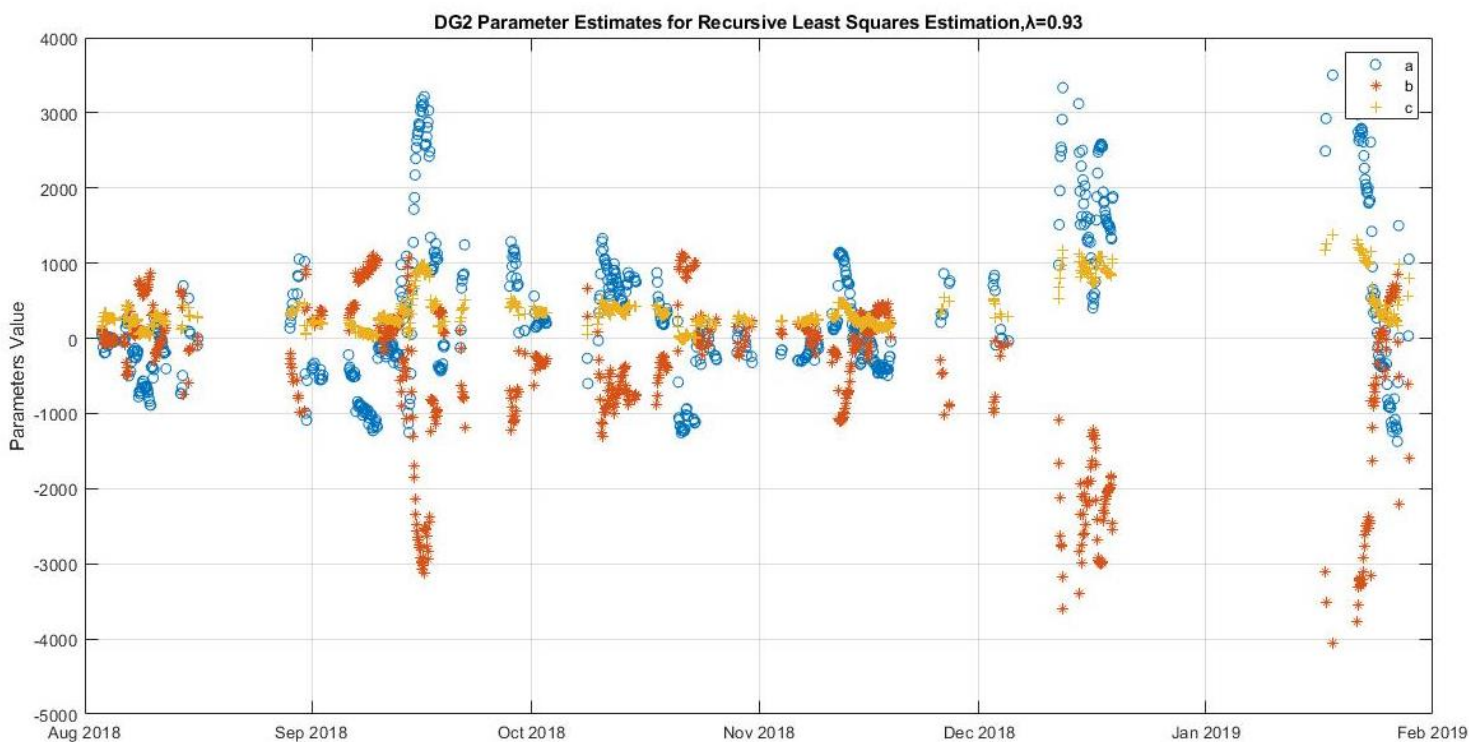
Εικόνα 22: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.93$

Στην εικόνα 22 παρατίθενται μαζί η πραγματική τιμή του SFOC με την εκτίμηση του αλγορίθμου για $\lambda=0.93$. Η επιλεγμένη τιμή της παραμέτρου μνήμης λ οδηγεί σε καλά αποτελέσματα καθώς παρά τις πολλές διακυμάνσεις των μετρήσεων του SFOC στη διάρκεια του χρόνου η σύγκλιση που παράγει το πρόγραμμα είναι αρκετά ικανοποιητική. Παρατηρείται ότι, όπως και στην DG1, τους τελευταίους μήνες του εξαμήνου η απόδοση της ηλεκτρομηχανής πέφτει καθώς οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου μεγαλώνουν σημαντικά. Βέβαια σε σχέση με την DG1 αυξάνονται σε μικρότερο βαθμό (μέγιστη τιμή ≈ 400 gr/kWh).

Πίνακας 11: Στατιστικά στοιχεία του $\delta 1$ για $\lambda=0.96$ της 1^{ης} μεθόδου προσέγγισης για την DG2

Συντελεστής Μνήμης λ	Διάμεση Τιμή $\delta 1$	Εύρος Τιμών $\delta 1$ (25%-75%)		Μέση Τιμή $\delta 1$	Ελάχιστη Τιμή $\delta 1$	Μέγιστη Τιμή $\delta 1$
0.93	1.00554	0.98052	1.03311	1.00277	0.62888	1.27470
0.94	1.00609	0.98014	1.03467	1.00262	0.62247	1.27536

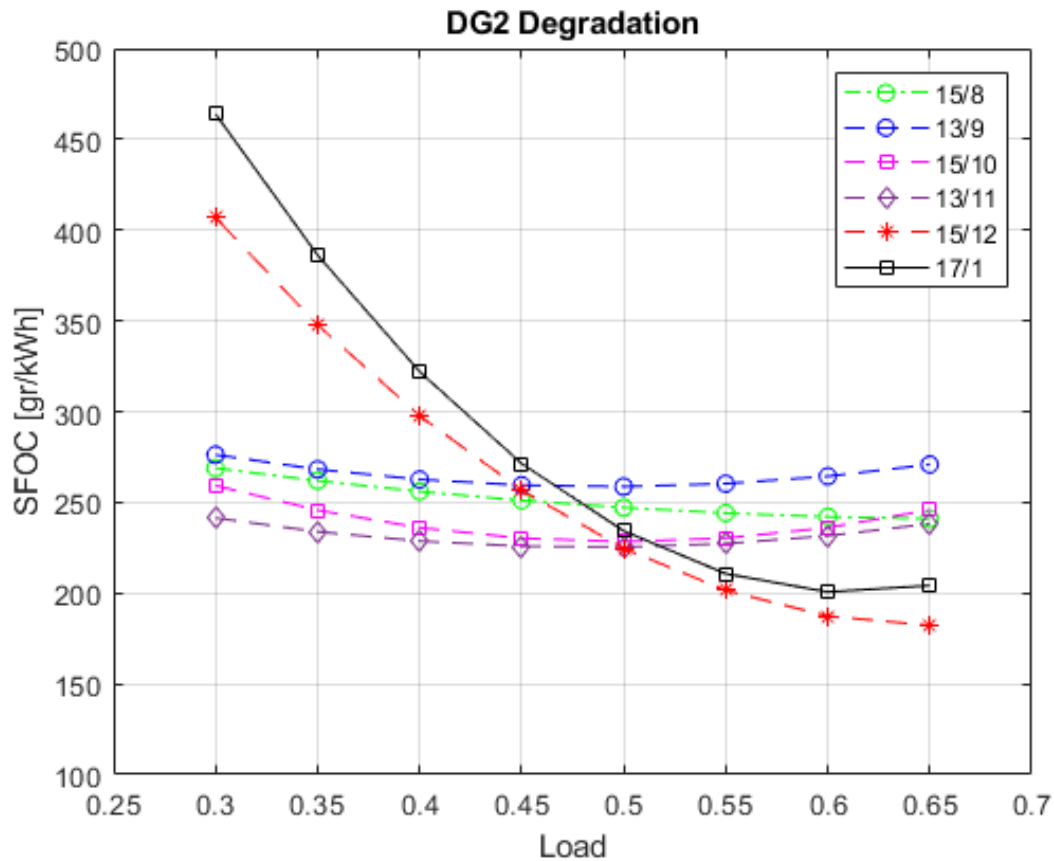
Στον πίνακα 11 παρατίθενται σημαντικά στοιχεία σχετικά με τον δείκτη $\delta 1$ ο οποίος αποδεικνύει ότι με το λ που επιλέχθηκε επιτυγχάνεται μια αρκετά καλή προσέγγιση της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου όπως υποδεικνύουν τόσο το εύρος τιμών όσο και η διάμεση τιμή του $\delta 1$. Από εκεί και πέρα, με αύξηση της παραμέτρου μνήμης η προσέγγιση δεν ακολουθεί τόσο καλά τη μεταβολή του SFOC κάτι που αποτυπώνεται και στα διάφορα στατιστικά μεγέθη του $\delta 1$ (αύξηση τις διάμεσης τιμής αλλά και του εύρους του $\delta 1$).



Εικόνα 23: Χρονική Μεταβολή των παραμέτρων a,b,c για $\lambda=0.93$

Παραπάνω (εικόνα 23) παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των παραμέτρων a, b και c του πολωνύμου 2^{ου} βαθμού, σύμφωνα με το οποίο προσεγγίζεται το SFOC. Οι πολλές μεταβολές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που φάνηκαν στην εικόνα 22 αποτυπώνονται και στους συντελεστές όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Εδώ, ενδιαφέρον προκαλεί η εναλλαγή στο πρόσημο της παραμέτρου a κατά τη διάρκεια του Σεπτεμβρίου. Στα μέσα του συγκεκριμένου μήνα, όπως υπαγορεύει και η εικόνα 22, η κατανομή του SFOC εμφανίζει μια απότομη αλλά μικρή αύξηση. Για το λόγο αυτό εντοπίζεται και αυτή η αύξηση της παραμέτρου a με ταυτόχρονη πτώση των τιμών του b. Το ίδιο συμβαίνει στα μέσα του μήνα Δεκεμβρίου και στις αρχές του Ιανουαρίου. Η βίαιη αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του a ενώ συνάμα μειώνεται αισθητά το b. Γενικότερα και τις τρεις φορές που υπήρξε απότομη αύξηση του SFOC επηρεάστηκαν σημαντικά οι τιμές των παραμέτρων a και b.

Κλείνοντας την ανάλυση για την DG2 παράγεται η κάτωθι γραφική παράσταση.

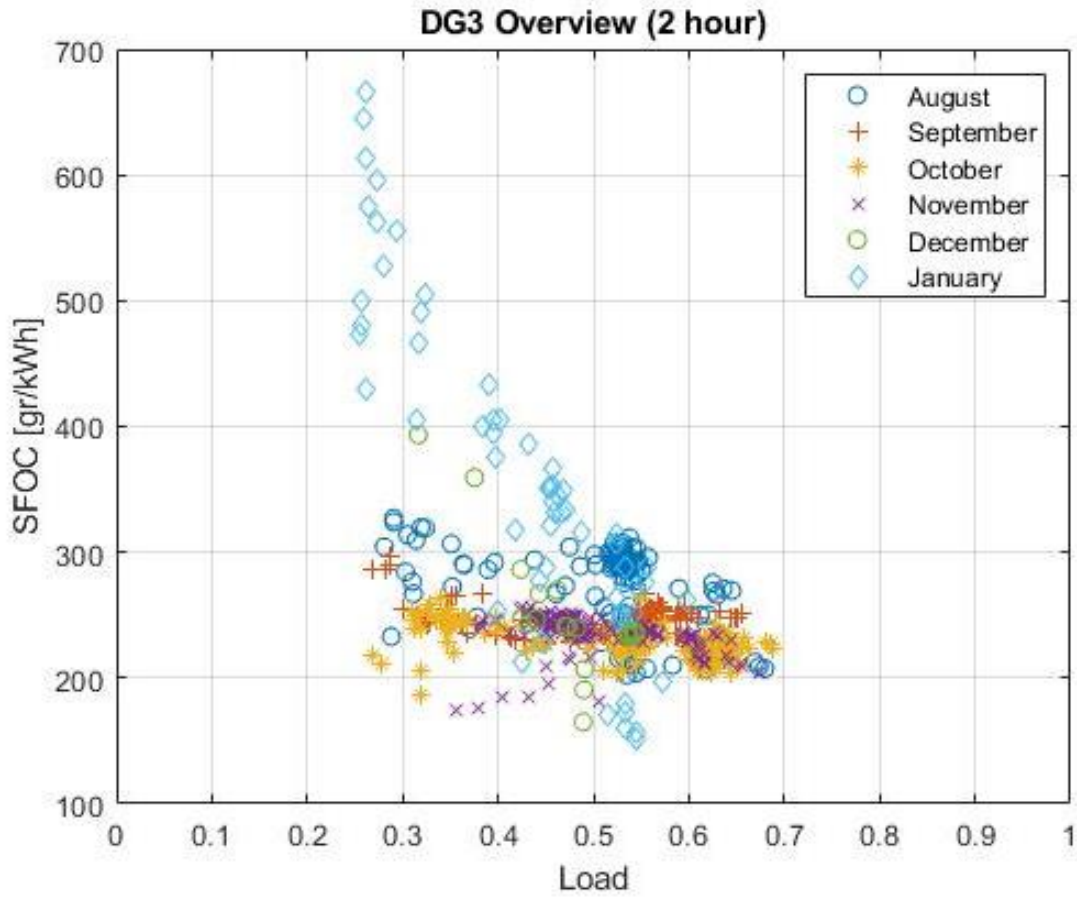


Εικόνα 24: Απεικόνιση της απόδοσης της DG2

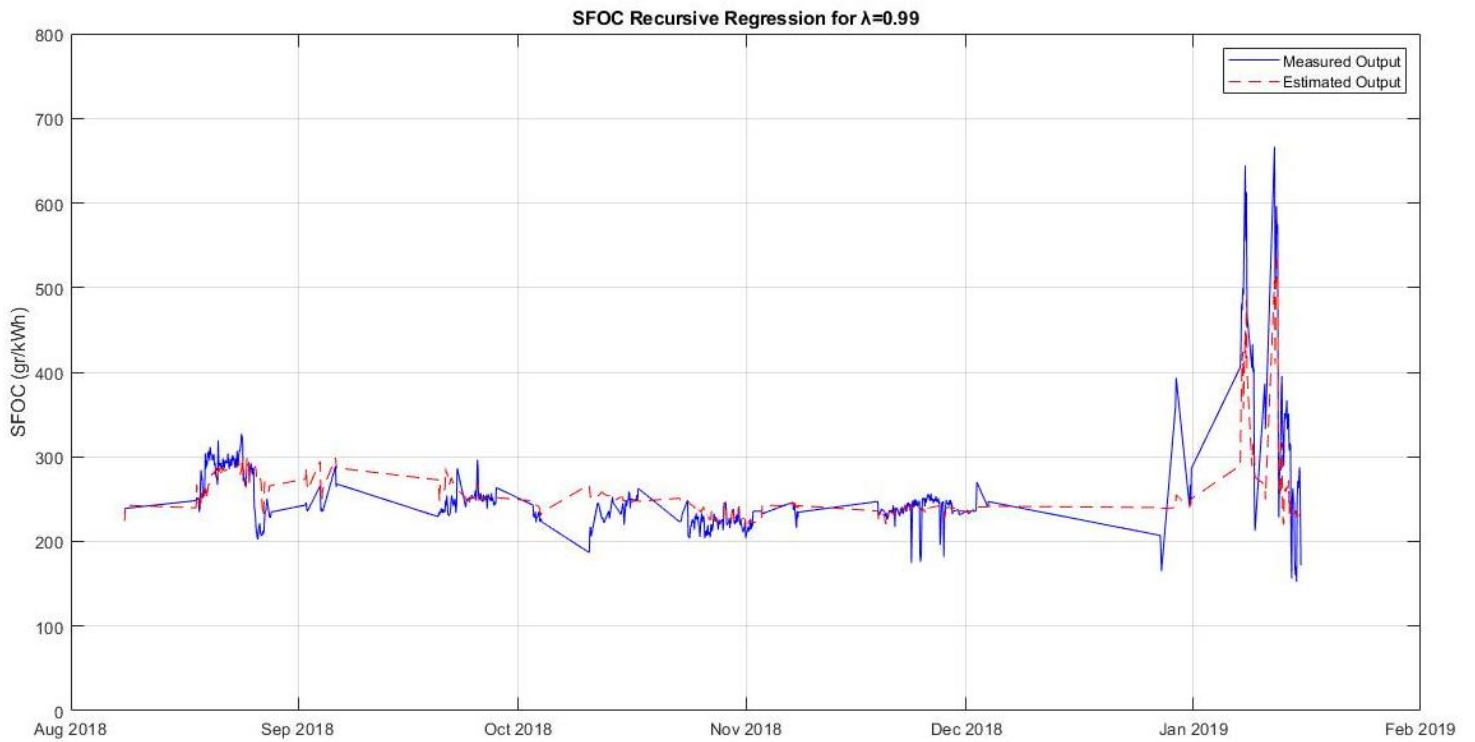
Η εικόνα 24 παρουσιάζει το αντίστοιχο διάγραμμα με την εικόνα 20 (3.2.1) αλλά για την ηλεκτρογεννήτρια No.2. Εδώ, σε αντίθεση με την DG1, όπου στα μέσα του Γενάρη η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου άγγιζε τα 600 gr/kWh, η αύξηση των τιμών του SFOC, το οποίο έχει προκύψει από την εξίσωση 3.1⁶, δεν κρίνεται σημαντική. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως η ολική μελέτη της ηλεκτρογεννήτριας No.2 ανέδειξε πως κατά τη λειτουργία της, είχε καλή απόδοση με, κοντινές σε αυτές που δίνει ο κατασκευαστής (193 gr/kWh για Load=1, 100% MCR), τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Η καλή λειτουργία της DG2 αναμένεται να αξιοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας που θα αφορά τη βελτιστοποίηση της χρήσης των ηλεκτρομηχανών.

⁶ Όπου στην θέση των παραμέτρων μπήκαν οι ημερήσιες μέσες τιμές τους για κάποιες συγκεκριμένες ημερομηνίες.

3.2.3 Ηλεκτρογεννήτρια Νο.3



Εικόνα 25: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) ανά 120'



Εικόνα 26: Προσέγγιση Πραγματικού SFOC για $\lambda=0.99$

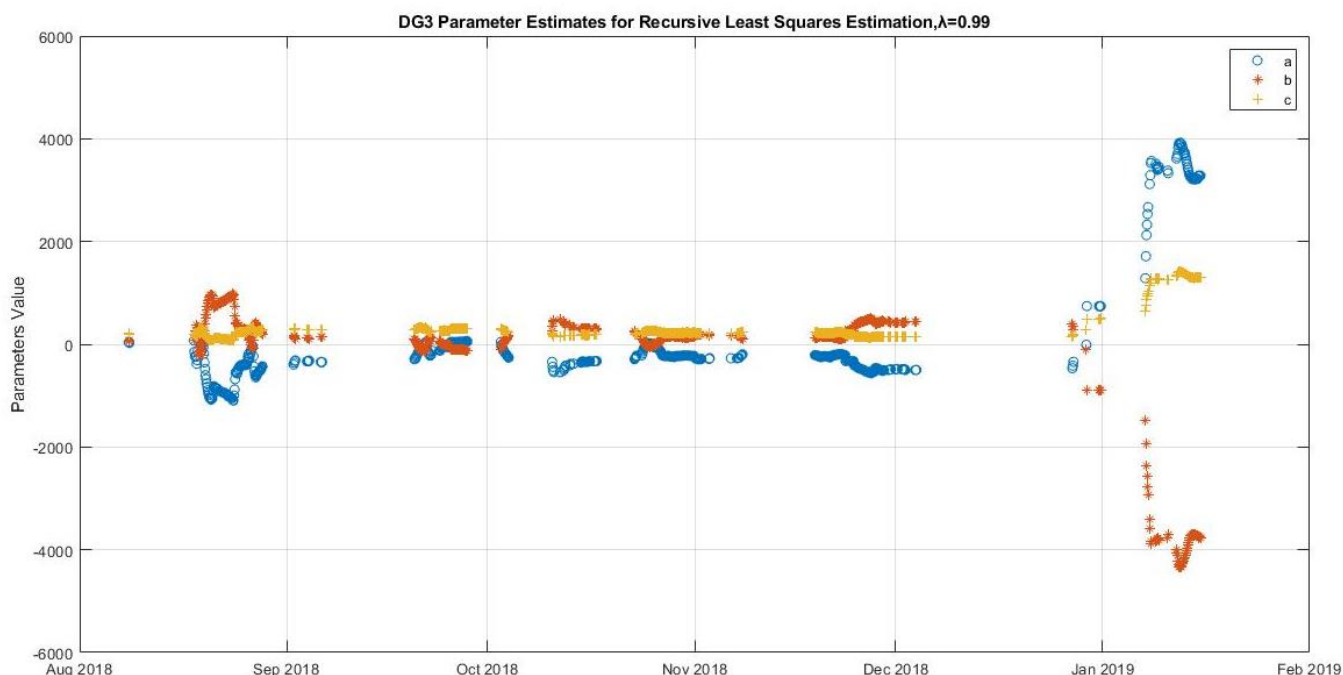
Στην εικόνα 25 απεικονίζεται η χρονική μεταβολή (ανά μήνα) της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου ισχύος. Εδώ, αντίστοιχα με την ηλεκτρογεννήτρια Νο.1 παρατηρείται μια μείωση στην απόδοση της γεννήτριας τον μήνα Ιανουάριο καθώς οι μετρήσεις του SFOC αρχίζουν και αποκλίνουν αισθητά από την πλειονότητα των τιμών.

Η εικόνα 26 παρουσιάζει την εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου της ηλεκτρογεννήτριας Νο.3 για $\lambda=0.99$ για το υπό μελέτη εξάμηνο. Παρατηρείται πως ο αλγόριθμος ανταποκρίνεται πολύ καλά στις συνεχείς εναλλαγές της τιμής του SFOC ακόμα και όταν αυτές είναι εξαιρετικά απότομες (όπως συμβαίνει την περίοδο του Ιανουαρίου). Όπως και προηγουμένως, έτσι και τώρα η επιλογή της παραμέτρου μνήμης συνοδεύεται από διάφορα στατιστικά μεγέθη του δείκτη δ_1 (σχέση 3.15).

Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία του δ_1 για το επιλεγμένο λ της 1^{ης} μεθόδου προσέγγισης για την DG3

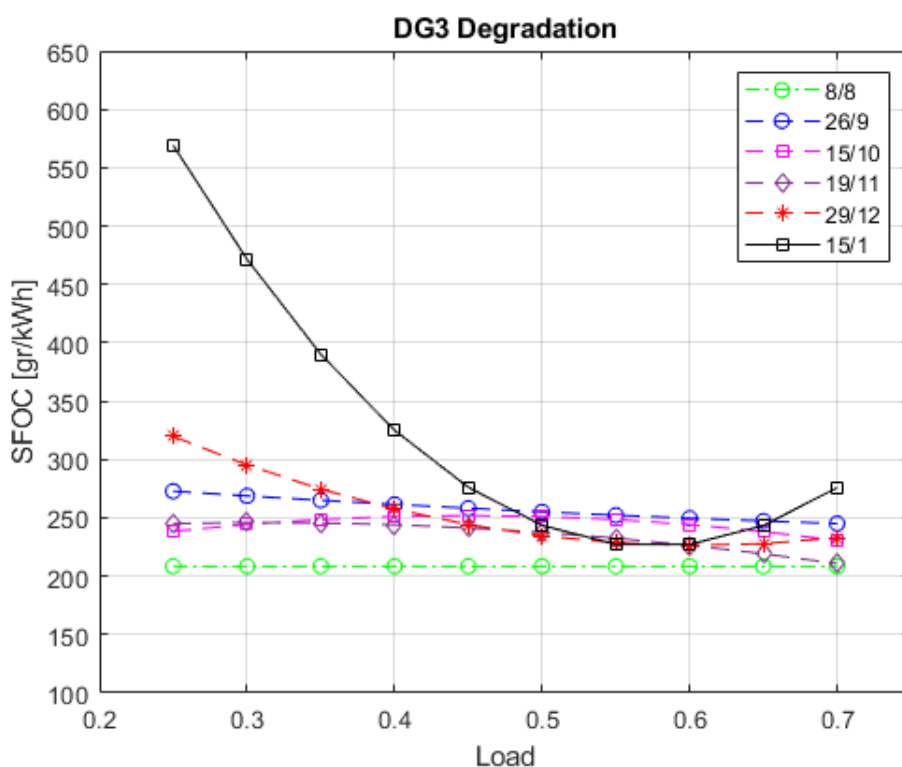
Συντελεστής Μνήμης λ	Διάμεση Τιμή δ_1	Εύρος Τιμών δ_1 (25%-75%)		Μέση Τιμή δ_1	Ελάχιστη Τιμή δ_1	Μέγιστη Τιμή δ_1
0.99	0.99703	0.94328	1.02883	0.99811	0.67000	1.54171
1	0.95920	0.90977	1.00050	0.98588	0.64100	2.18461

Στον πίνακα 12 παρατίθενται σημαντικά στοιχεία σχετικά με τον δείκτη δ_1 ο οποίος αποδεικνύει ότι με το λ που επιλέχθηκε επιτυγχάνεται μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου καθώς τόσο η διάμεση τιμή όσο και το εύρος του λόγου πραγματικό SFOC προς εκτιμώμενο SFOC είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Η περαιτέρω αύξηση του λ επηρεάζει αισθητά τη διάμεση τιμή και το εύρος του δ_1 καθώς αυτά δείχνουν πως η προσέγγιση αρχίζει να αποκλίνει από το πραγματικό SFOC της ηλεκτρογεννήτριας 3.



Εικόνα 27: Χρονική Μεταβολή των παραμέτρων a,b,c για $\lambda=0.99$

Στο παραπάνω γράφημα (εικόνα 27) διαγράφεται η χρονική μεταβολή των παραμέτρων a , b και c του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού, σύμφωνα με το οποίο προσεγγίζεται το SFOC από τον αναδρομικό αλγόριθμο. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται πως τα κενά στο γράφημα αντικατοπτρίζουν τις περιόδους όπου η εν λόγω ηλεκτρογεννήτρια δεν λειτουργεί. Η απότομη μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που φάνηκε στην εικόνα 26 να συμβαίνει στις αρχές του Ιανουαρίου αποτυπώνεται και στους συντελεστές όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Εκείνη την περίοδο, τα διάφορα a είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα b .



Εικόνα 28: Απεικόνιση της μείωσης της απόδοσης της DG3

Στην απεικόνιση της εικόνας 28 φαίνεται η τάση μείωσης της απόδοσης (degradation) της ηλεκτρογεννήτριας No.3 το διάστημα Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου. Σε αυτή την περίπτωση η τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για χαμηλά φορτία αυξάνεται αρκετά πάνω από τις τιμές που χαρακτηρίζουν την πλειονότητα των μετρήσεων του SFOC (200-300 gr/kWh).

4. Βελτιστοποίηση Χρήσης Ηλεκτρομηχανών

Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιήθηκαν τα διάφορα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσέγγιση της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αναδρομικού αλγόριθμου ελαχίστων τετραγώνων. Αναλυτικότερα, οι παράμετροι του τριωνύμου της εξίσωσης 3.1 του προηγούμενου κεφαλαίου αξιοποιήθηκαν έτσι ώστε να υπολογιστεί ένας καίριος δείκτης απόδοσης ή αλλιώς KPI (key performance indicator) όπως είναι ευρύτερα γνωστός. Η μεταβολή του συγκεκριμένου δείκτη υποδεικνύει τον τρόπο που θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση της χρήσης των ηλεκτρομηχανών με την περιγραφή της οποίας κλείνει και το παρόν κεφάλαιο.

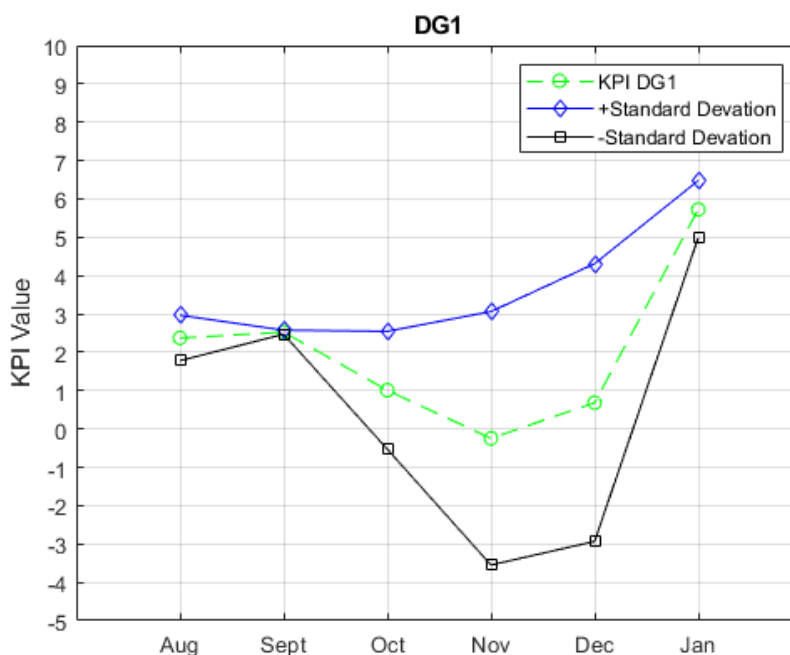
4.1 Ορισμός του δείκτη απόδοσης (KPI)

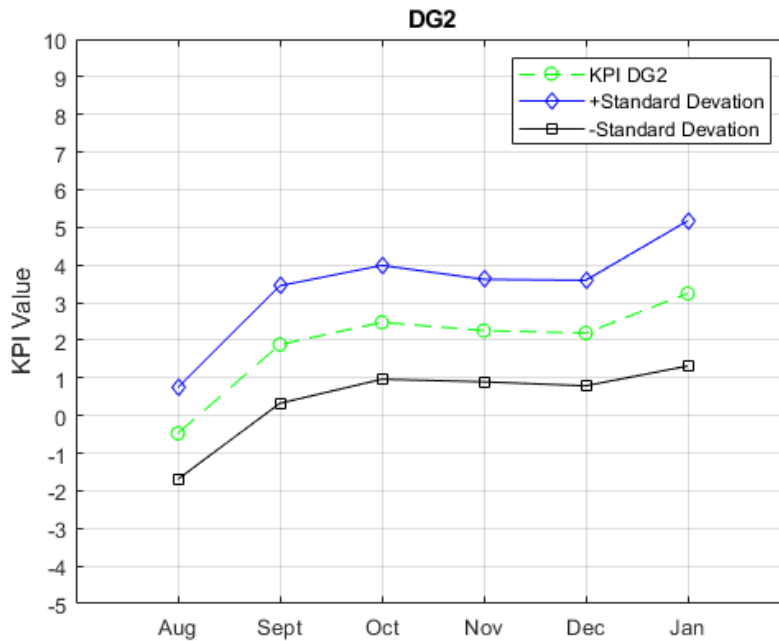
Σε πρώτη φάση ορίζεται ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη απόδοσης.

$$KPI = \frac{a-b}{c} \quad (4.1)$$

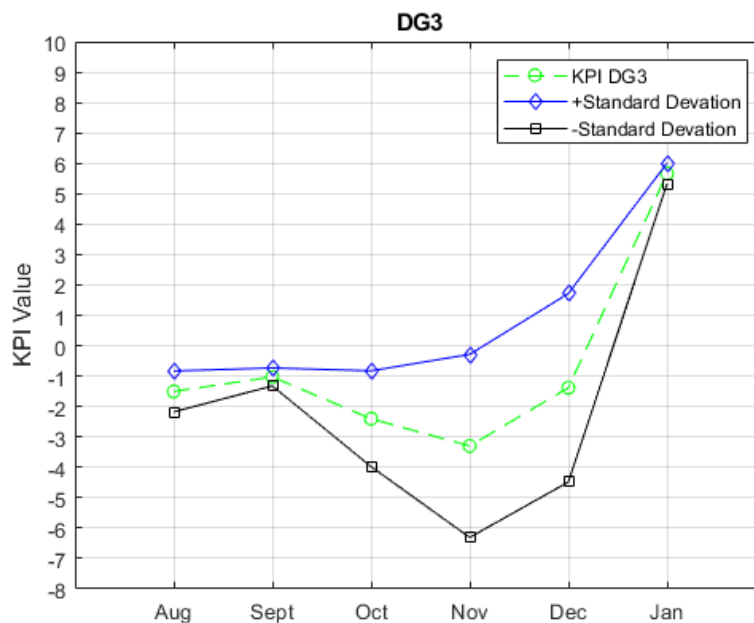
όπου a, b, c οι παράμετροι του τριωνύμου της σχέσης 3.1.

Η μέθοδος υπολογισμού που υπαγορεύει η εξίσωση 4.1 δίνει θετικές και αρνητικές τιμές του KPI. Πράγματι, αν παρατηρήσει κανείς τις χρονικές μεταβολές των παραμέτρων a, b, c έτσι όπως αυτές παρατίθενται στο εδάφιο 3, εύκολα θα αντιληφθεί πως ισχύει διαρκώς η συνθήκη ότι όταν το a είναι θετικό το b είναι αρνητικό και το αντίστροφο. Η πρώτη περίπτωση οδηγεί σε θετικά KPI's ενώ η δεύτερη σε αρνητικά. Το c είναι πάντα θετικός αριθμός και βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές των a και b . Όπως έχει αναλυθεί, οι αλλαγές της τιμής του a είναι ανάλογες με τη μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Αυτή η τάση, όπως αποδεικνύουν τα παρακάτω γραφήματα, μεταφέρεται και στον δείκτη απόδοσης. Για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε ως τρόπος υπολογισμού του η εξίσωση 4.1 με τη συγκεκριμένη μορφή.





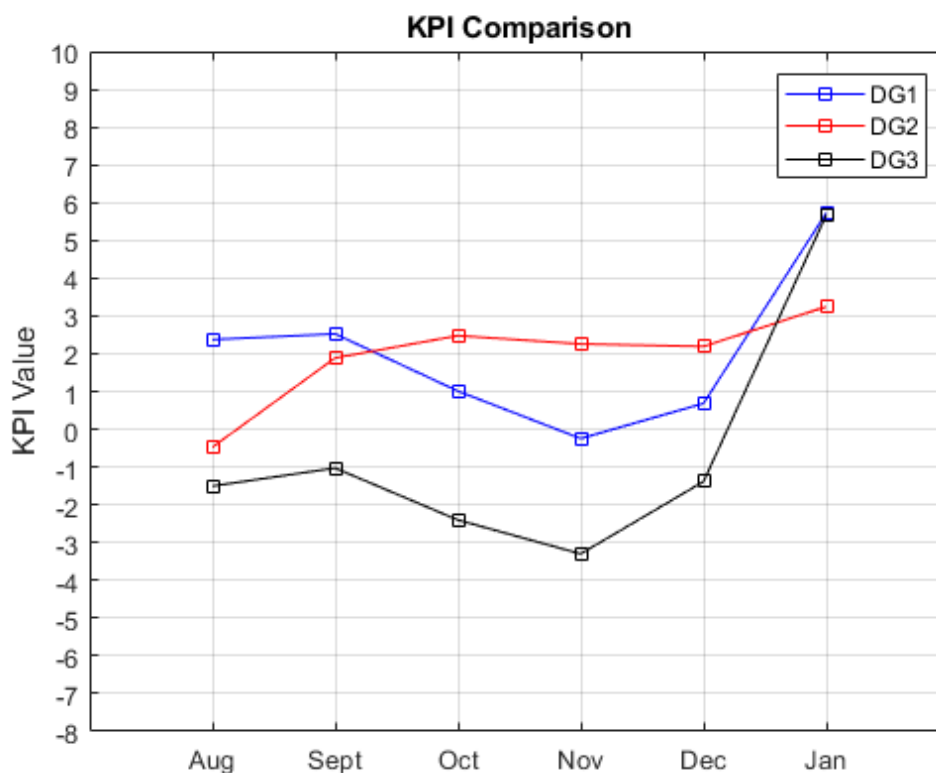
Εικόνα 30: Χρονική Μεταβολή του KPI της DG2 στον χρόνο



Εικόνα 31: Χρονική Μεταβολή του KPI της DG3 στον χρόνο

Στις εικόνες 29, 30 και 31 παρατίθενται η χρονική μεταβολή του KPI για κάθε ηλεκτρογεννήτρια. Για την παραγωγή των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται στις συγκεκριμένες εικόνες βρέθηκαν οι δείκτες απόδοσης ανά εβδομάδα από τη μέση τιμή των παραμέτρων του τριωνύμου (a, b, c). Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η τυπική αποκλίση που προκύπτει από τις εβδομαδιαίες τιμές του KPI μαζί με την αντίστοιχη τιμή του δείκτη απόδοσης για κάθε μήνα. Στα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η συνάρτηση του KPI με τον χρόνο ακολουθεί τις αλλαγές της τιμής της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ηλεκτρογεννήτριας No.1, όπως υπαγορεύεται από το γράφημα της εικόνας 18 η ειδική κατανάλωση καυσίμου χαρακτηρίζεται, από σχετικά σταθερές τιμές στην αρχή του υπό μελέτη

εξαμήνου και μια σταδιακή πτώση τον μήνα Οκτώβριο (εξ' ου και η μικρή αρνητική τιμή του KPI), η οποία ακολουθείται από τη ραγδαία αύξηση του το δίμηνο Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου, όπου έχει παρατηρηθεί η μείωση της απόδοσης (degradation) της DG1. Αντίστοιχα, κινούνται και οι δείκτες των άλλων δύο ηλεκτρογεννητριών. Με λίγα λόγια, η χρήση της εξίσωσης 4.1 πετυχαίνει τον σκοπό της που δεν είναι άλλος από το να εκφράσει μέσω των συντελεστών a,b,c τη γενική εικόνα της μεταβολής της εκάστοτε ειδικής κατανάλωσης καυσίμου στο χρόνο.



Εικόνα 32: Σύγκριση δεικτών απόδοσης ηλεκτρομηχανών

Πίνακας 13: Ώρες λειτουργίας της κάθε γεννήτριας

Ώρες Λειτουργίας DG			
Μήνας	DG1	DG2	DG3
Αύγουστος	392	218	244
Σεπτέμβριος	286	338	174
Οκτώβριος	312	256	294
Νοέμβριος	268	228	294
Δεκέμβριος	168	124	26
Ιανουάριος	168	126	100

Η εικόνα 32 μαζί με τον πίνακα 13 αποτελούν σημαντικά στοιχεία για το πότε και το πως θα πραγματοποιηθεί η επικείμενη βελτιστοποίηση. Στην εικόνα παρατίθενται οι καμπύλες των δεικτών απόδοσης όλων των ηλεκτρογεννητριών προκειμένου να φανεί ποιες μηχανές επιδέχονται βελτίωση στη χρήση τους. Το συμπέρασμα είναι ίδιο με αυτό που είχε προκύψει στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, ότι δηλαδή η DG1 και η DG3 απαιτούν καλύτερη διαχείριση προκειμένου να επιτευχθεί αρχικά ποιοτικότερη καύση και κατ'επέκταση οικονομία καυσίμου. Τα στοιχεία του πίνακα 10, ο οποίος περιλαμβάνει τις ώρες λειτουργίας κάθε DG, υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να συμβεί η βελτιστοποίηση. Τελικά αποφασίζεται για τους

μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο, το φορτίο ισχύος της DG1 να μοιραστεί στις DG2 και DG3, με την ηλεκτρογεννήτρια Νο.2 να παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του. Η επιλογή αυτή έγινε με τη σκέψη ότι μπορεί τον Ιανουάριο η DG3 να είναι το ίδιο επιβαρυσμένη με την DG1 αλλά η δεύτερη έχει λειτουργήσει συνολικά περισσότερες ώρες (336 έναντι 126 ωρών) τους δύο τελευταίους μήνες.

4.2 Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης

Η βελτίωση χρήσης της ηλεκτρογεννήτριας Νο.1, που αποφασίστηκε, θα αποφέρει τη συνολική βελτιστοποίηση λειτουργίας των ηλεκτρομηχανών καθώς θα υπάρξει οικονομικότερη κατανάλωση του ναυτιλιακού καυσίμου. Αυτό επιτεύχθηκε με τον εξής τρόπο:

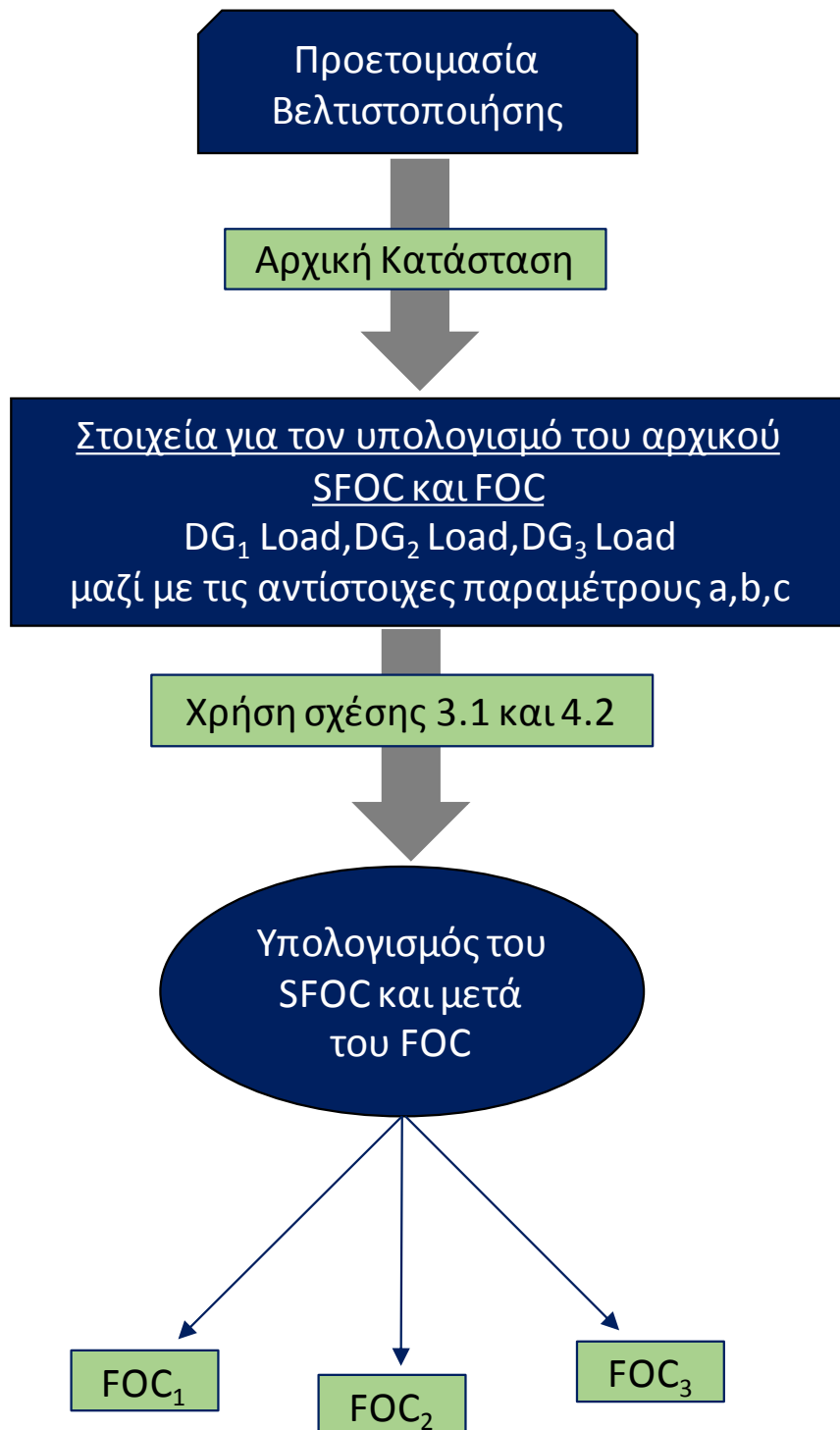
1. Συγκεντρώθηκαν, για το σύνολο των γεννητριών, οι ομαδοποιημένες ανά δύο ώρες μετρήσεις του φορτίου ισχύος και των παραμέτρων a, b και c που παράγονται από τον αναδρομικό αλγόριθμο, για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο.
2. Από την εξίσωση 3.1 προκύπτει η κάθε ειδική κατανάλωση καυσίμου ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται και η μέση τιμή των παραμέτρων του τριωνύμου (εξίσωση 3.1) για κάθε μήνα.
3. Από τη σχέση, $\text{Fuel Oil Consumption}^7 = (\text{Power} \times \text{SFOC} \times 24) / 10^6$ [tons/day] (4.2), βρίσκεται η κατανάλωση καυσίμου ανά δύο ώρες ενώ στη συνέχεια γίνεται η αναγωγή ανά ημέρα⁸. Η **συνολική κατανάλωση** καυσίμου του διμήνου προκύπτει ίση με **168.3 tons** (Δεκέμβριος 75.4 tons, Ιανουάριος 92.9 tons).
4. Έπειτα, πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση, με το φορτίο ισχύος της DG1, το υπό μελέτη δίμηνο, να μοιράζεται ως εξής:
 - Όποτε δεν είναι σε λειτουργία η DG2, το παραλαμβάνει εξ ολοκλήρου αυτή χωρίς να επηρεάζεται το φορτίο της DG3 (εάν αυτή λειτουργεί).
 - Όταν λειτουργεί η DG2 το φορτίο της DG1 μοιράζεται εξίσου στις DG2 και DG3.

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών Νο.2 και Νο.3 για τα φορτία μετά τον διαμοιρασμό της ισχύος της ηλεκτρογεννήτριας Νο.1 γίνεται σύμφωνα με τη σχέση 3.1 για τη μέση τιμή των παραμέτρων a,b και c του τριωνύμου η οποία όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχει υπολογιστεί για κάθε ένα από τους δύο υπό μελέτη μήνες.

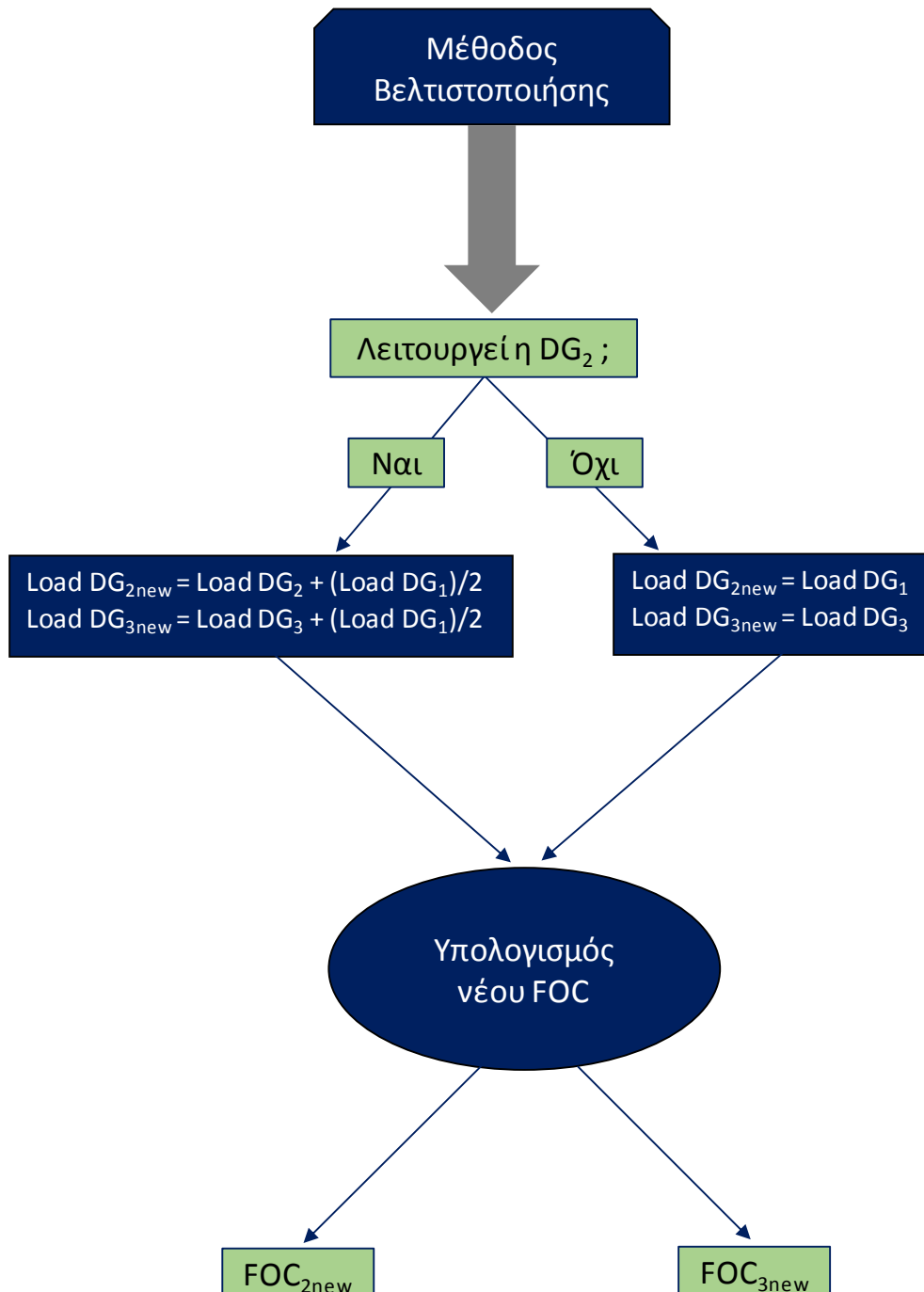
5. Οι παραπάνω αλλαγές οδηγούν σε οικονομία καυσίμου κατά **44.7 tons** γεγονός που αποδεικνύει ότι ο προτεινόμενος τρόπος βελτιστοποίησης δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η **συνολική κατανάλωση πλέον φτάνει τους 123.6 tons** (Δεκέμβριος 54.1 tons, Ιανουάριος 62.5 tons).

⁷ FOC:Fuel Oil Consumption

⁸ Για την ημερήσια κατανάλωση καυσίμου ανά ηλεκτρογεννήτρια βλ. Παράρτημα Β



Εικόνα 33:Υπολογισμοί πριν την Βελτιστοποίηση



Εικόνα 34:Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης

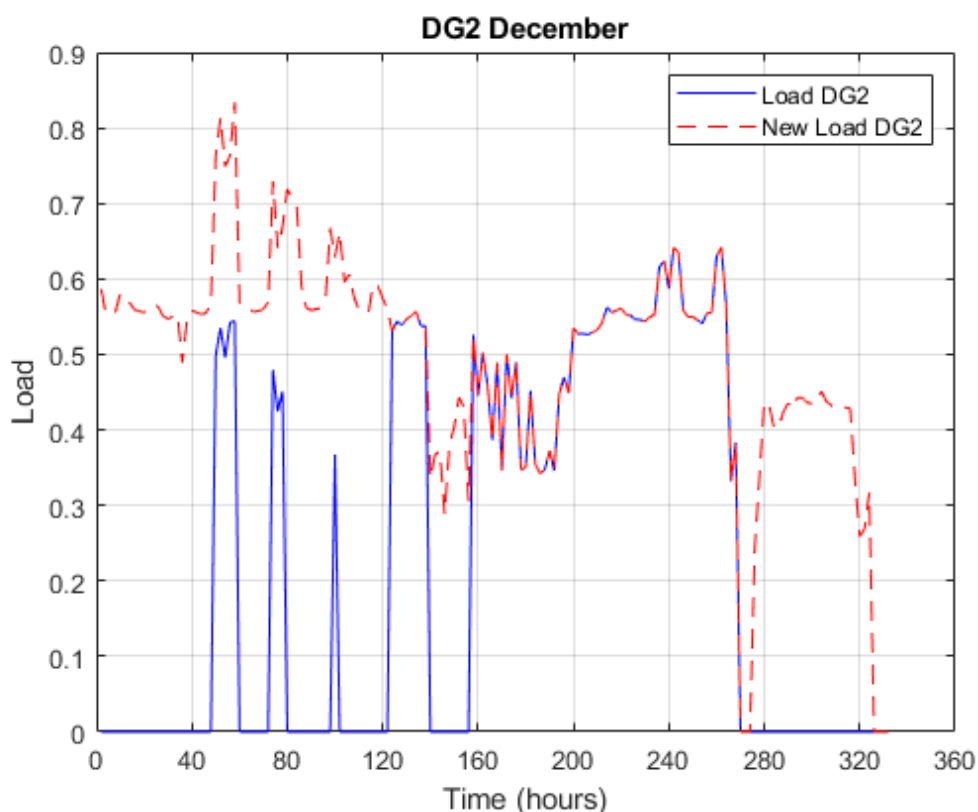
Τα γραφήματα ροής των εικόνων 33 και 34 δημιουργήθηκαν με σκοπό να βοηθήσουν τον αναγνώστη να οπτικοποιήσει και συνεπώς να καταλάβει ευκολότερα τη μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκε η τροποποίηση της λειτουργίας των τριών ηλεκτρομηχανών με στόχο την οικονομικότερη και πιο συμφέρουσα χρήση τους.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αριθμητικά στοιχεία σχετικά με τη βελτιστοποίηση που περιγράφηκε παραπάνω καθώς και γραφήματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας.

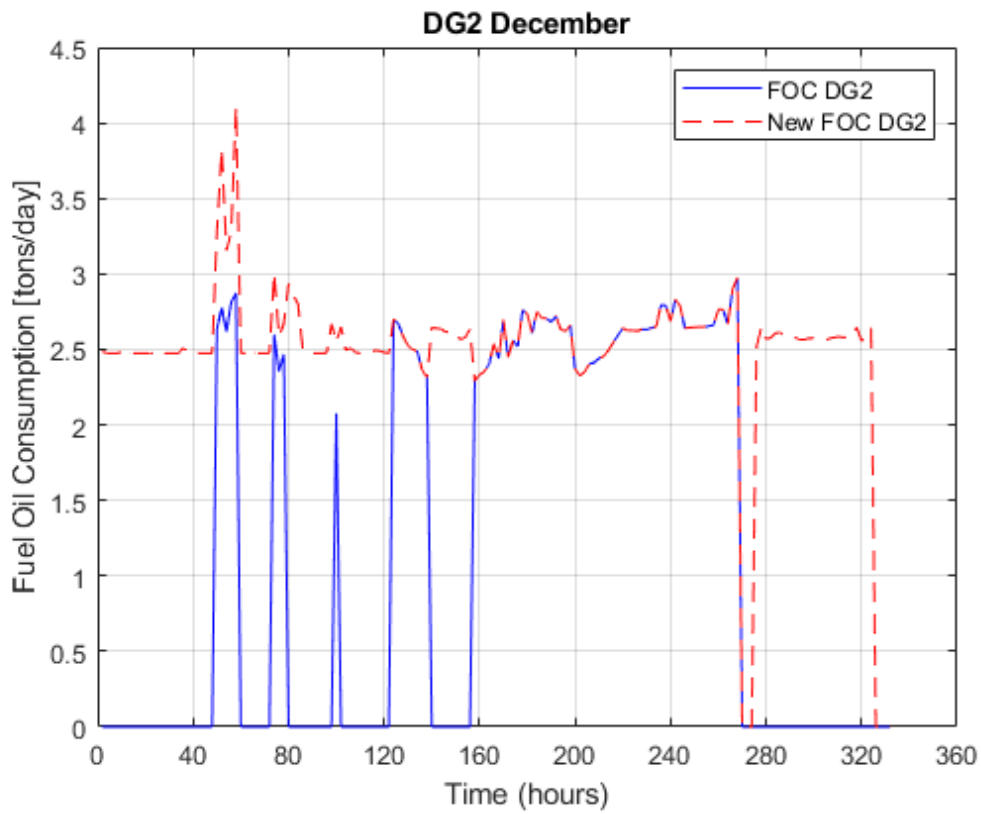
Πίνακας 14: Καταναλώσεις καυσίμου κάθε γεννήτριας

Δεκέμβριος			Ιανουάριος		
Κατανάλωσεις Καυσίμου προ Βελτιστοποίησης					
DG1	DG2	DG3	DG1	DG2	DG3
FOC ₁ [tons]	FOC ₂ [tons]	FOC ₃ [tons]	FOC ₁ [tons]	FOC ₂ [tons]	FOC ₃ [tons]
32.43	28.07	14.93	44.42	27.10	21.38
Κατανάλωσεις Καυσίμου μετά τη Βελτιστοποίηση					
FOC ₁ [tons]	FOC ₂ [tons]	FOC ₃ [tons]	FOC ₁ [tons]	FOC ₂ [tons]	FOC ₃ [tons]
-	45.59	8.48	-	50.23	19.25

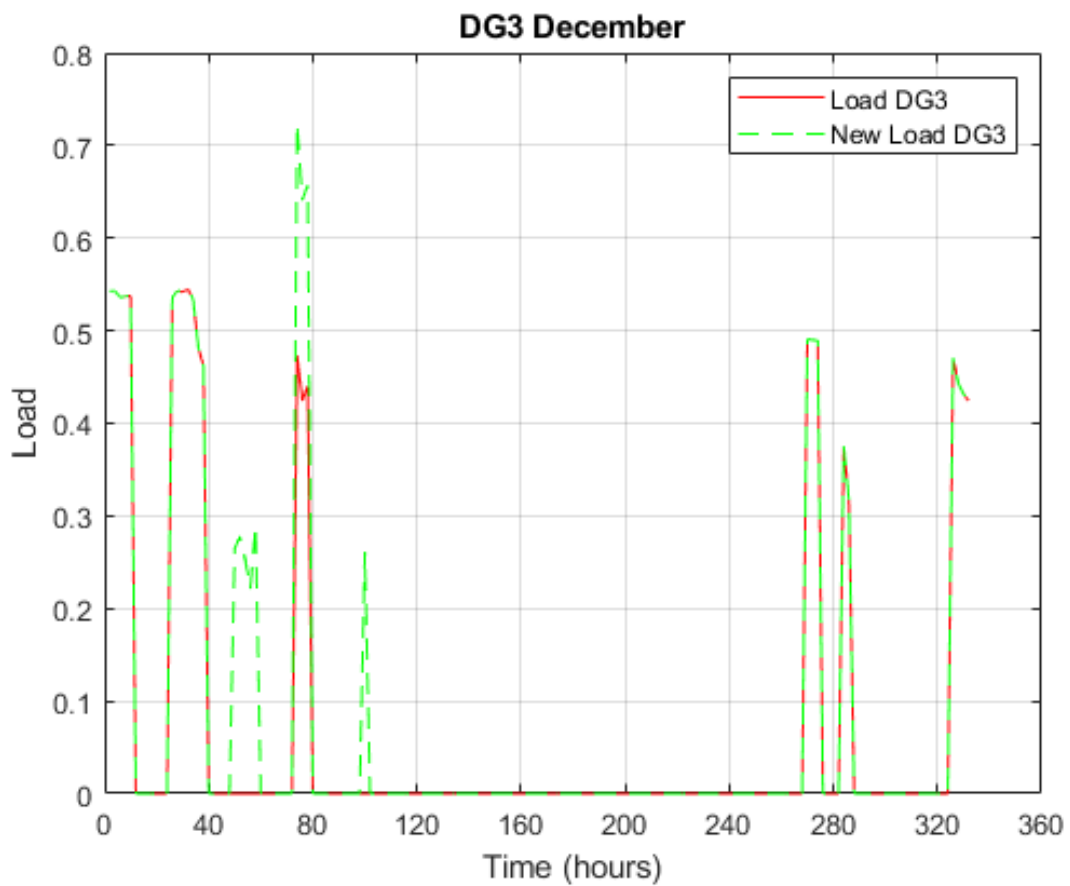
Στον πίνακα 14 φαίνονται οι καταναλώσεις καυσίμου για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο κάθε ηλεκτρογεννήτριας. Όπως είναι λογικό, οι μηνιαίες καταναλώσεις της ηλεκτρομηχανής No.2 αυξάνονται ραγδαία καθώς παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου ισχύος της No.1 ενώ στη No.3 παρατηρείται μια μικρή μείωση στην κατανάλωση του κάθε μήνα αφού αυξάνεται το μέσο φορτίο ισχύος της και όπως φαίνεται στην εικόνα 28 σε υψηλότερα φορτία το διάστημα Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου έχει καλύτερη απόδοση.



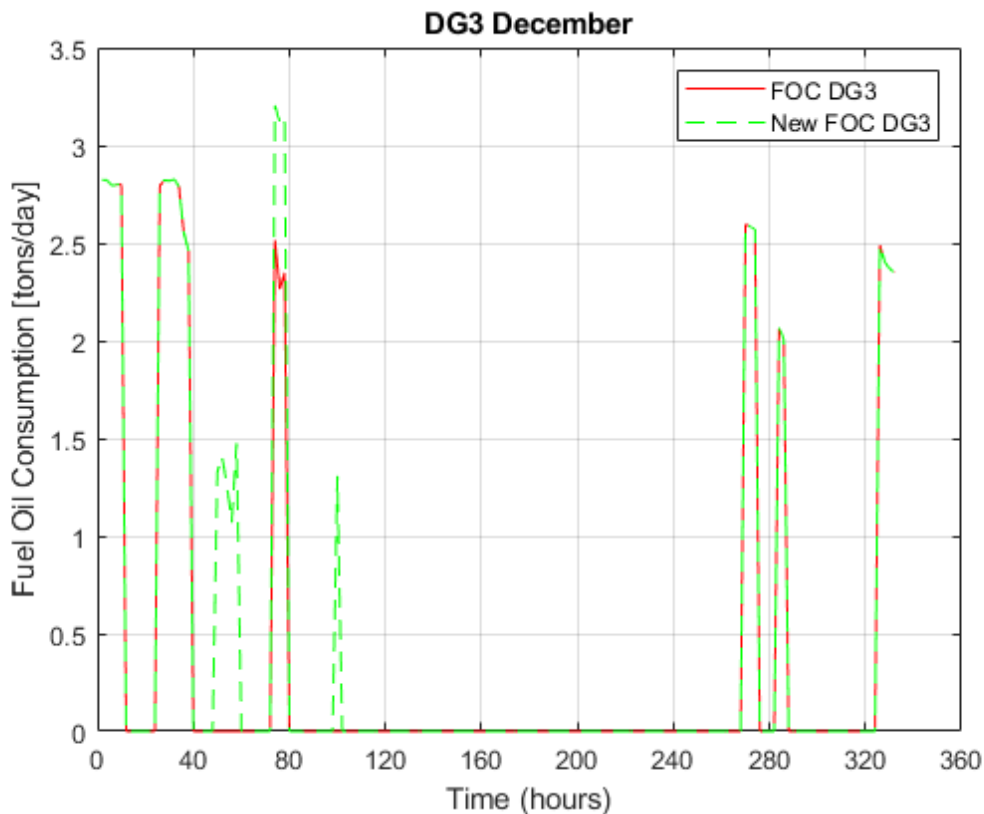
Εικόνα 35: Σύγκριση του φορτίου της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο



Εικόνα 36: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο



Εικόνα 37: Σύγκριση του φορτίου της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο



Εικόνα 38: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Δεκέμβριο

Τα γραφήματα δείχνουν τη σύγκριση πριν και μετά την βελτιστοποίηση του φορτίου και της κατανάλωσης καυσίμου της DG2 και της DG3 αντίστοιχα για τον μήνα Δεκέμβριο⁹. Είναι μεταξύ τους πανομοιότυπα καθώς όπως φαίνεται και από την σχέση 4.2 η κατανάλωση είναι ανάλογη του φορτίου. Αρχικά, αναδεικνύεται η μεθοδολογία της βελτιστοποίησης καθώς φαίνεται πως η DG2 λειτουργεί πλέον όλο το δίμηνο και είτε παραλαμβάνει όλο το φορτίο της DG1 είτε το μοιράζεται με την DG3, η οποία χρησιμοποιείται περίπου με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν, με τη διαφορά ότι λειτουργεί σε κάποιες περιπτώσεις παραπάνω (λόγω της απουσίας της DG1) σε συνδυασμό με την DG2 για την κάλυψη των αναγκών για ηλεκτροδότηση. Επιπλέον, η συνολική αύξηση των απεικονιζόμενων μεγεθών της DG2 και η αντίστοιχη πτώση της DG3, η οποία αναδείχθηκε στον πίνακα 12 φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα.

⁹ Τα αντίστοιχα διαγράμματα για το μήνα Ιανουάριο που χαρακτηρίζονται από τα ίδια συμπεράσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Β

Πίνακας 15: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Δεκέμβριο πριν τη βελτιστοποίηση

Date	FOC DG1 [tons/day]	FOC DG2 [tons/day]	FOC DG3 [tons/day]
1/12/2018	2,92	0,00	2,81
2/12/2018	2,86	0,00	2,72
3/12/2018	2,86	2,74	0,00
4/12/2018	2,99	2,47	2,38
5/12/2018	3,08	2,08	0,00
8/12/2018	2,87	0,00	0,00
11/12/2018	0,00	2,70	0,00
12/12/2018	0,00	2,49	0,00
13/12/2018	2,74	0,00	0,00
14/12/2018	2,69	2,34	0,00
15/12/2018	0,00	2,62	0,00
16/12/2018	0,00	2,51	0,00
17/12/2018	0,00	2,60	0,00
18/12/2018	0,00	2,70	0,00
19/12/2018	0,00	2,81	0,00
27/12/2018	0,00	0,00	2,58
29/12/2018	2,92	0,00	2,04
30/12/2018	3,14	0,00	0,00
31/12/2018	3,36	0,00	2,40
Total Consumption per DG	32,43	28,07	14,93

Πίνακας 16: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Δεκέμβριο μετά τη βελτιστοποίηση

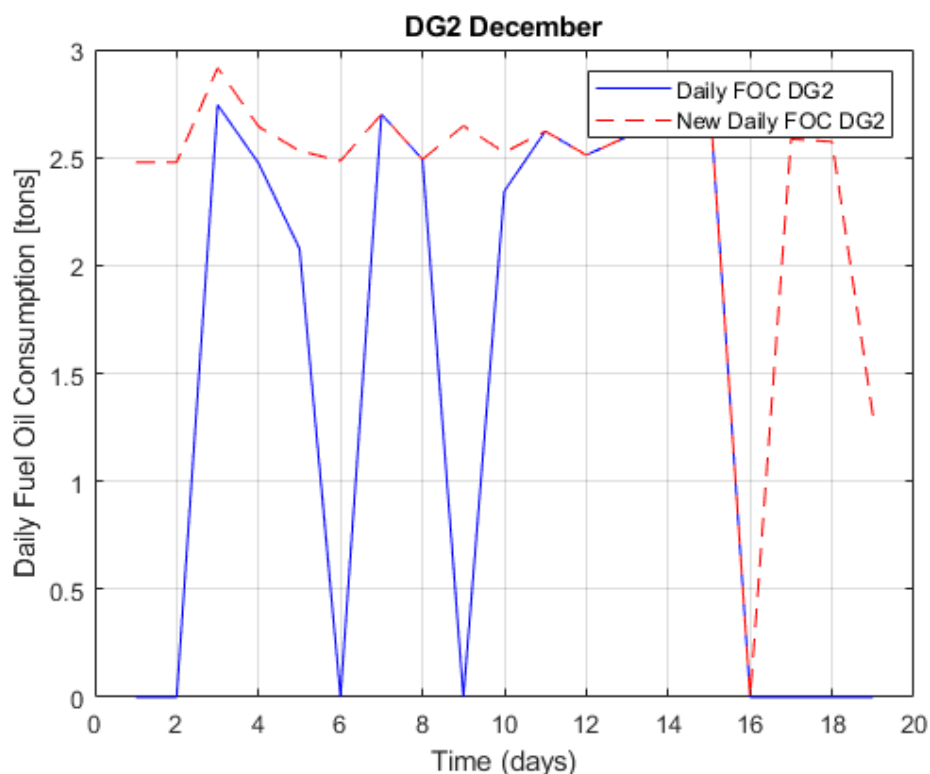
Date	FOC DG1 [tons/day]	FOC DG2 [tons/day]	FOC DG3 [tons/day]
1/12/2018	0,00	2,48	1,17
2/12/2018	0,00	2,48	1,59
3/12/2018	0,00	2,91	0,54
4/12/2018	0,00	2,64	0,79
5/12/2018	0,00	2,53	0,15
8/12/2018	0,00	2,48	0,00
11/12/2018	0,00	2,70	0,00
12/12/2018	0,00	2,49	0,00
13/12/2018	0,00	2,65	0,00
14/12/2018	0,00	2,52	0,00
15/12/2018	0,00	2,62	0,00
16/12/2018	0,00	2,51	0,00
17/12/2018	0,00	2,60	0,00
18/12/2018	0,00	2,70	0,00
19/12/2018	0,00	2,81	0,00
27/12/2018	0,00	0,00	2,58
29/12/2018	0,00	2,59	0,45
30/12/2018	0,00	2,57	0,00
31/12/2018	0,00	1,30	1,20
Total Consumption per DG	0	45,59	8,48

Πίνακας 17: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Ιανουάριο πριν τη βελτιστοποίηση

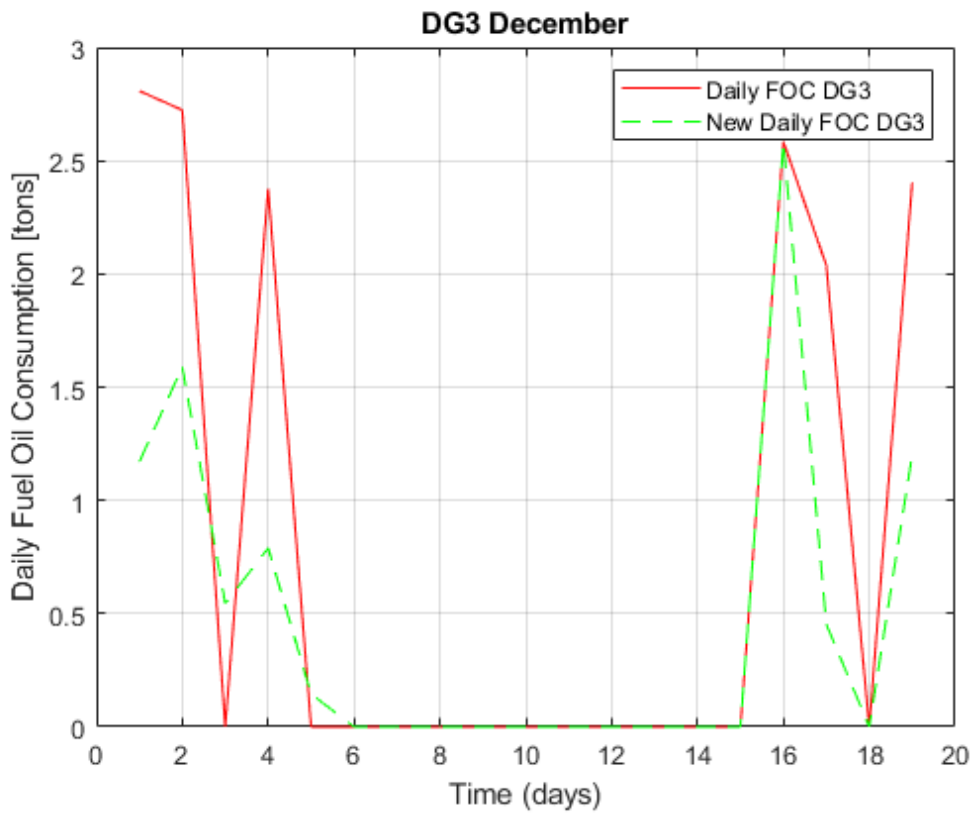
Date	FOC DG1 [tons/day]	FOC DG2 [tons/day]	FOC DG3 [tons/day]
1/1/2019	3,05	0,00	0,00
2/1/2019	2,92	0,00	0,00
3/1/2019	2,86	0,00	0,00
4/1/2019	2,68	0,00	0,00
5/1/2019	2,74	0,00	0,00
7/1/2019	2,63	0,00	2,36
8/1/2019	2,62	0,00	2,80
9/1/2019	2,38	0,00	2,63
10/1/2019	0,00	0,00	2,56
12/1/2019	2,68	0,00	2,86
13/1/2019	0,00	0,00	2,67
14/1/2019	2,54	0,00	2,74
15/1/2019	0,00	0,00	2,76
17/1/2019	0,00	2,60	0,00
18/1/2019	0,00	2,44	0,00
21/1/2019	2,82	2,54	0,00
22/1/2019	0,00	2,77	0,00
23/1/2019	0,00	2,64	0,00
24/1/2019	0,00	2,77	0,00
25/1/2019	0,00	2,77	0,00
26/1/2019	2,87	2,84	0,00
27/1/2019	2,79	2,90	0,00
28/1/2019	3,00	2,82	0,00
31/1/2019	2,95	0,00	0,00
1/2/2019	2,88	0,00	0,00
Total Consumption per DG	44,42	27,10	21,38

Πίνακας 18: Ημερήσιες Καταναλώσεις Καυσίμου για τον μήνα Ιανουάριο μετά τη βελτιστοποίηση

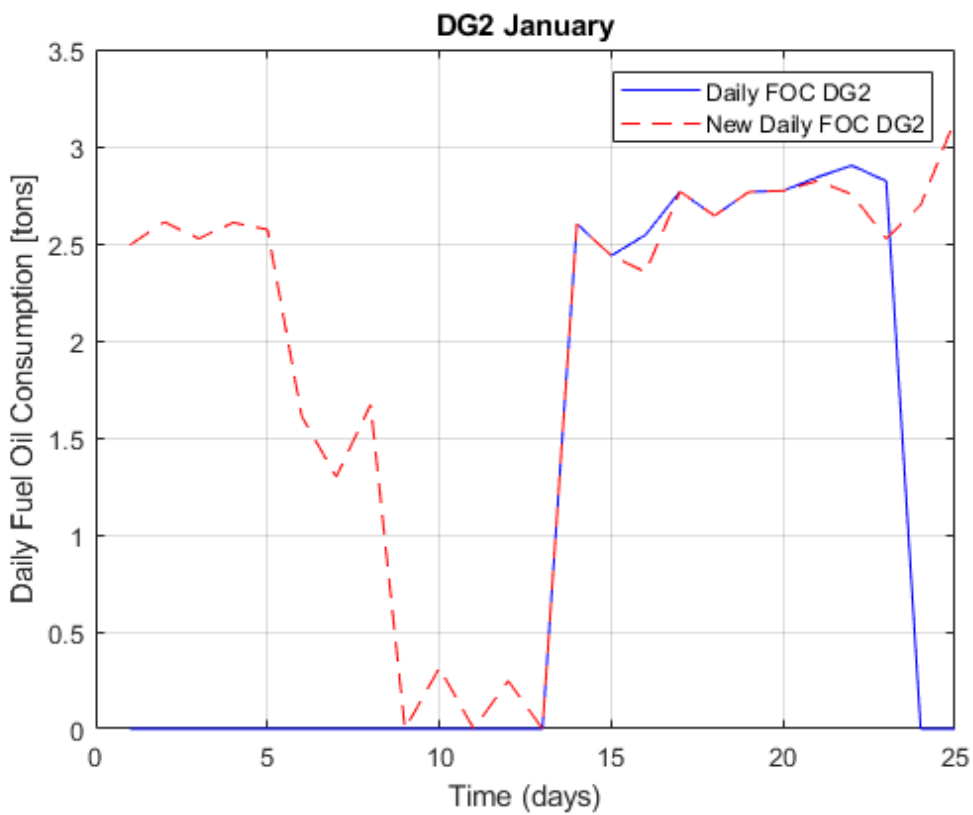
Date	FOC DG1 [tons/day]	FOC DG2 [tons/day]	FOC DG3 [tons/day]
1/1/2019	0,00	2,49	0,00
2/1/2019	0,00	2,61	0,00
3/1/2019	0,00	2,53	0,00
4/1/2019	0,00	2,61	0,00
5/1/2019	0,00	2,57	0,00
7/1/2019	0,00	1,61	2,36
8/1/2019	0,00	1,30	1,40
9/1/2019	0,00	1,67	1,44
10/1/2019	0,00	0,00	2,56
12/1/2019	0,00	0,31	2,86
13/1/2019	0,00	0,00	2,67
14/1/2019	0,00	0,25	2,74
15/1/2019	0,00	0,00	2,76
17/1/2019	0,00	2,60	0,00
18/1/2019	0,00	2,44	0,00
21/1/2019	0,00	2,35	0,00
22/1/2019	0,00	2,77	0,00
23/1/2019	0,00	2,64	0,00
24/1/2019	0,00	2,77	0,00
25/1/2019	0,00	2,77	0,00
26/1/2019	0,00	2,82	0,22
27/1/2019	0,00	2,75	0,25
28/1/2019	0,00	2,53	0,00
31/1/2019	0,00	2,70	0,00
1/2/2019	0,00	3,14	0,00
Total Consumption per DG	0	50,23	19,25



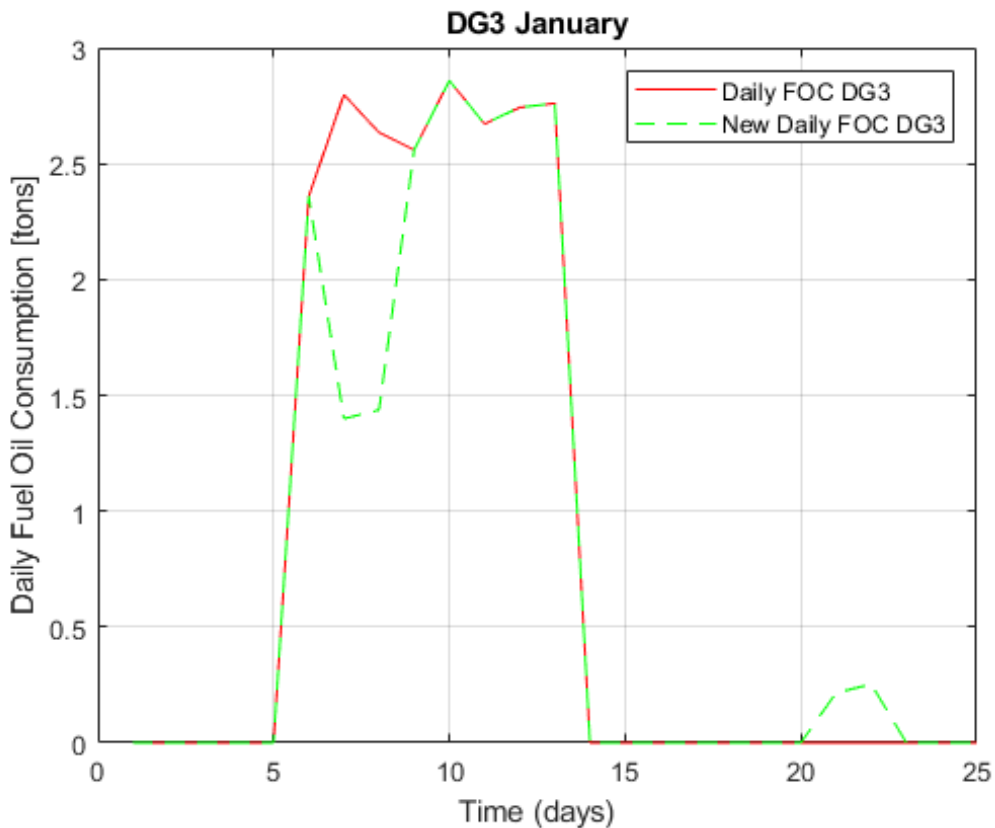
Εικόνα 39: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG2 Δεκέμβριος)



Εικόνα 40: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG3 Δεκέμβριος)



Εικόνα 41: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG2 Ιανουάριος)



Εικόνα 42: Σύγκριση ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (DG3 Ιανουάριος)

Στις εικόνες 39-42 παρατίθενται, στο ίδιο διάγραμμα, η ημερήσια κατανάλωση των γεννητριών No.2 και No.3 για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο προτού και αφού πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Τα αριθμητικά δεδομένα για την παραγωγή των διαγραμμάτων περιλαμβάνονται στους πίνακες 15-18. Σαν παρατήρηση, πρέπει να τονιστεί πως η αύξηση που σημειώθηκε στις καταναλώσεις της DG2 αποτυπώνεται ξεκάθαρα στα γραφήματα που την αφορούν ενώ η καλύτερη απόδοση της DG3 σε υψηλά φορτία (μικρότερο SFOC) οδηγεί σε συνολική πτώση της δικής της κατανάλωσης. Υπενθυμίζεται, πως η δεύτερη ηλεκτρογεννήτρια κατά τη βελτιστοποίηση παραλαμβάνει το μεγαλύτερο φορτίο ισχύος της DG1.

Παρακάτω, στους πίνακες 19 και 20 γίνεται η σύγκριση μεταξύ των συνολικών ημερησίων καταναλώσεων κάθε ηλεκτρογεννήτριας πριν και μετά την τροποποίηση της χρήσης τους για το διάστημα Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου. Στην 4^η στήλη των συγκεκριμένων πινάκων φαίνεται η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{Deviation} = \text{FOC Before Optimization} - \text{FOC After Optimization}, \quad (4.3)$$

Πίνακας 19: Συνολικές Ημερήσιες Καταναλώσεις των Ηλεκτρομηχανών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση
(Δεκέμβριος)

Total Daily Consumption of December [tons]			
Date	FOC Before Optimization	FOC After Optimization	Deviation (Before - After)
1/12/2018	5,73	3,65	2,09
2/12/2018	5,58	4,07	1,52
3/12/2018	5,60	3,46	2,14
4/12/2018	7,84	3,43	4,41
5/12/2018	5,15	2,68	2,48
8/12/2018	2,87	2,48	0,38
11/12/2018	2,70	2,70	0,00
12/12/2018	2,49	2,49	0,00
13/12/2018	2,74	2,65	0,09
14/12/2018	5,04	2,52	2,51
15/12/2018	2,62	2,62	0,00
16/12/2018	2,51	2,51	0,00
17/12/2018	2,60	2,60	0,00
18/12/2018	2,70	2,70	0,00
19/12/2018	2,81	2,81	0,00
27/12/2018	2,58	2,58	0,00
29/12/2018	4,96	3,04	1,92
30/12/2018	3,14	2,57	0,57
31/12/2018	5,77	2,50	3,26
Total	75,43	54,07	21,36

Πίνακας 20: Συνολικές Ημερήσιες Καταναλώσεις των Ηλεκτρομηχανών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση
(Ιανουάριος)

Total Daily Consumption of January [tons]			
Date	FOC Before Optimization	FOC After Optimization	Deviation (Before - After)
1/1/2019	3,05	2,49	0,56
2/1/2019	2,92	2,61	0,31
3/1/2019	2,86	2,53	0,33
4/1/2019	2,68	2,61	0,08
5/1/2019	2,74	2,57	0,17
7/1/2019	4,99	3,97	1,02
8/1/2019	5,41	2,70	2,72
9/1/2019	5,02	3,11	1,91
10/1/2019	2,56	2,56	0,00
12/1/2019	5,54	3,17	2,37
13/1/2019	2,67	2,67	0,00
14/1/2019	5,29	2,99	2,30
15/1/2019	2,76	2,76	0,00
17/1/2019	2,60	2,60	0,00
18/1/2019	2,44	2,44	0,00
21/1/2019	5,36	2,35	3,01
22/1/2019	2,77	2,77	0,00
23/1/2019	2,64	2,64	0,00
24/1/2019	2,77	2,77	0,00
25/1/2019	2,77	2,77	0,00
26/1/2019	5,72	3,04	2,68
27/1/2019	5,69	3,01	2,68
28/1/2019	5,82	2,53	3,30
31/1/2019	2,95	2,70	0,26
1/2/2019	2,88	3,14	-0,26
Total	92,90	69,48	23,42

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, πέρα από τις εισαγωγικές πληροφορίες του πρώτου κεφαλαίου σχετικά με την αρχή λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρογεννητριών που χρησιμοποιούνται στα πλοία προτείνεται ένας τρόπος μελέτης, αξιολόγησης και βελτιστοποίησης της απόδοσης των γεννητριών οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε εμπορικό πλοίο που μεταφέρει φορτίο τύπου χύδιν.

Αρχικά, η διαθέσιμη σειρά δεδομένων υφίσταται την απαραίτητη επεξεργασία έτσι ώστε να αποκλειστούν μετρήσεις που αποτελούν σφάλματα των μετρητικών οργάνων και να αφαιρεθούν τα διαστήματα που δεν λειτουργεί η κάθε ηλεκτρομηχανή έτσι ώστε να μην αλλοιωθούν τα αποτελέσματα της μελέτης στη συνέχεια. Έπειτα, αρχίζει μια σειρά υπολογισμών που δίνουν την ολική εικόνα σχετικά με τη χρήση των μηχανών, όπως σε τι φορτία ισχύος χρησιμοποιήθηκε από το πλήρωμα η κάθε DG, σε τι συνδυασμούς (π.χ DG1+DG2 κ.λ.π), πόσες μέρες παρέμεινε στο λιμάνι το πλοίο και πόσες ήταν σε πορεία και με ποιο τρόπο αξιοποιήθηκαν οι ηλεκτρομηχανές σε κάθε περίπτωση κ.α.

Εν συνεχεία, στο 3^ο κεφάλαιο, η πραγματική ειδική κατανάλωση καυσίμου προσεγγίζεται από ένα τριώνυμο (σχέση 3.1) με τη χρήση του αναδρομικού αλγόριθμου ελαχίστων τετραγώνων. Με λίγα λόγια, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος υπολογίζει, ανάλογα με τη μεταβολή των πραγματικών μετρήσεων του SFOC, τις παραμέτρους (a,b,c) του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γιατί δίνει σαφώς πιο ακριβή αποτελέσματα από μια απλή εκθετική ή πολυωνυμική προσέγγιση, ειδικά για δεδομένα με τόσο μεγάλο όγκο.

Οι διάφοροι συντελεστές που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ενός δείκτη απόδοσης (KPI, σχέση 4.1) , ο οποίος ουσιαστικά εκφράζει τη χρονική μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κάθε ηλεκτρογεννήτριας και υποδεικνύει ποιες από αυτές χρειάζονται βελτίωση στη χρήση τους. Τέλος, παρατίθεται μια μεθοδολογία βελτιστοποίησης των ηλεκτρογεννητριών το χρονικό διάστημα που χρειάζεται σύμφωνα με τον δείκτη απόδοσης.

Βιβλιογραφία

Αριστείδης Γ. Βλάχου (2018). *Ηλεκτρικές Μηχανές, Τόμος Α*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου.

Αριστείδης Γ. Βλάχου (2018). *Ηλεκτρικές Μηχανές, Τόμος Β*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου.

Γεώργιος Λ. Λιδωρής (2004). *Νευρονικός Προσαρμοστικός Έλεγχος Πραγματικού Χρόνου, εφαρμογή σε ρομπότ Khepera*. Αθήνα.

Νίκος Θεμελής (2019). *Αξιολόγηση Συμπεριφοράς και Απόδοσης Πλοίων. Σημειώσεις Μαθήματος*.

Χ. Φραγκόπουλος- Ι.Προυσαλίδης (2019). *Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου*. Αθήνα: Εκδόσεις da Vinci.

Michael Lundh, Winston Garcia-Gabin, Kalevi Tervo, Rickard Lindkvist (2016). *Estimation and Optimization of Vessel Fuel Consumption*. Trondheim.

Simon Haykin (2002). *Adaptive Filtering Theory*.

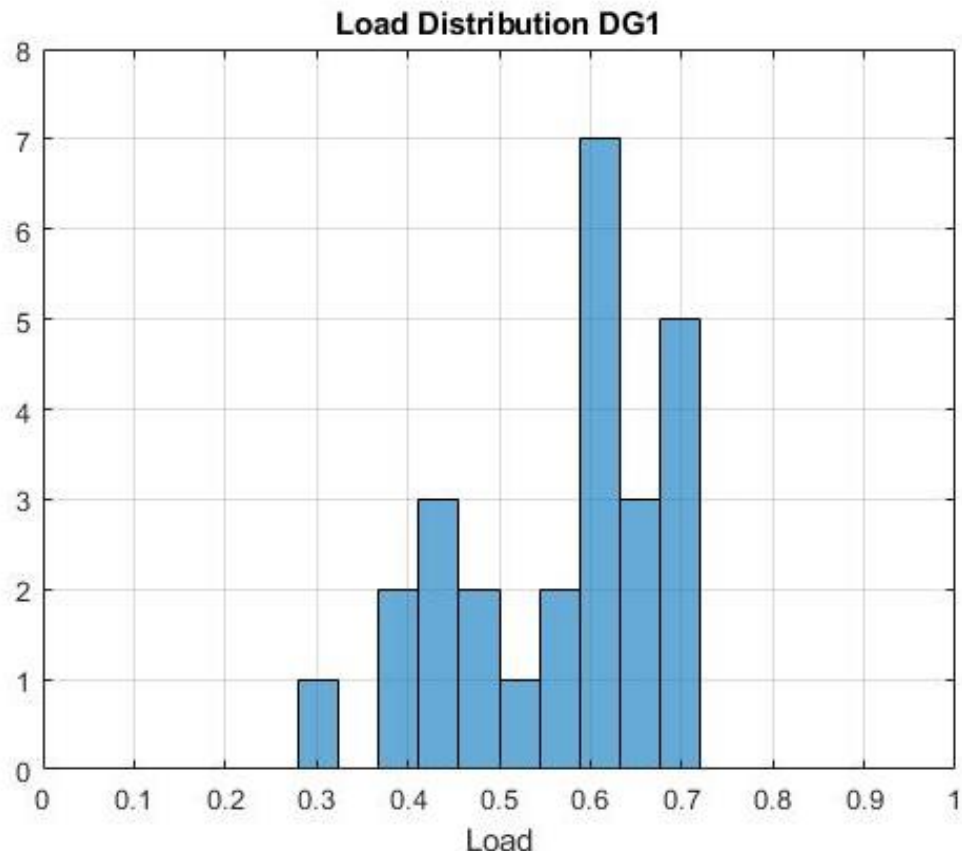
Παράρτημα Α

Α.1 Προσέγγιση SFOC με διαίρεση της Ισχύος σε επιμέρους διαστήματα

Για λόγους πληρότητας και επαλήθευσης των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μέθοδο προσέγγισης της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, αυτή προσεγγίστηκε και από άλλη μία μέθοδο. Σε αυτή την ενότητα, το SFOC περιγράφεται από μία σειρά τιμών κάθε μία από τις οποίες εκπροσωπεί ένα διάστημα όπου το φορτίο ισχύος της υπό μελέτη γεννήτριας παραμένει σταθερό. Για τον σκοπό αυτό το φορτίο της κάθε ηλεκτρογεννήτριας χωρίζεται σε n διαστήματα, ανάλογα την εκάστοτε κατανομή φορτίου και σε κάθε διάστημα αντιστοιχεί μία και μοναδική τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Στη συνέχεια, τα ζευγάρια τιμών (Load και SFOC) εισάγονται στον αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων, ο οποίος έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να αποδίδει n αριθμό προσεγγίσεων του SFOC, δηλαδή μία και μοναδική εκτίμηση για κάθε διάστημα.

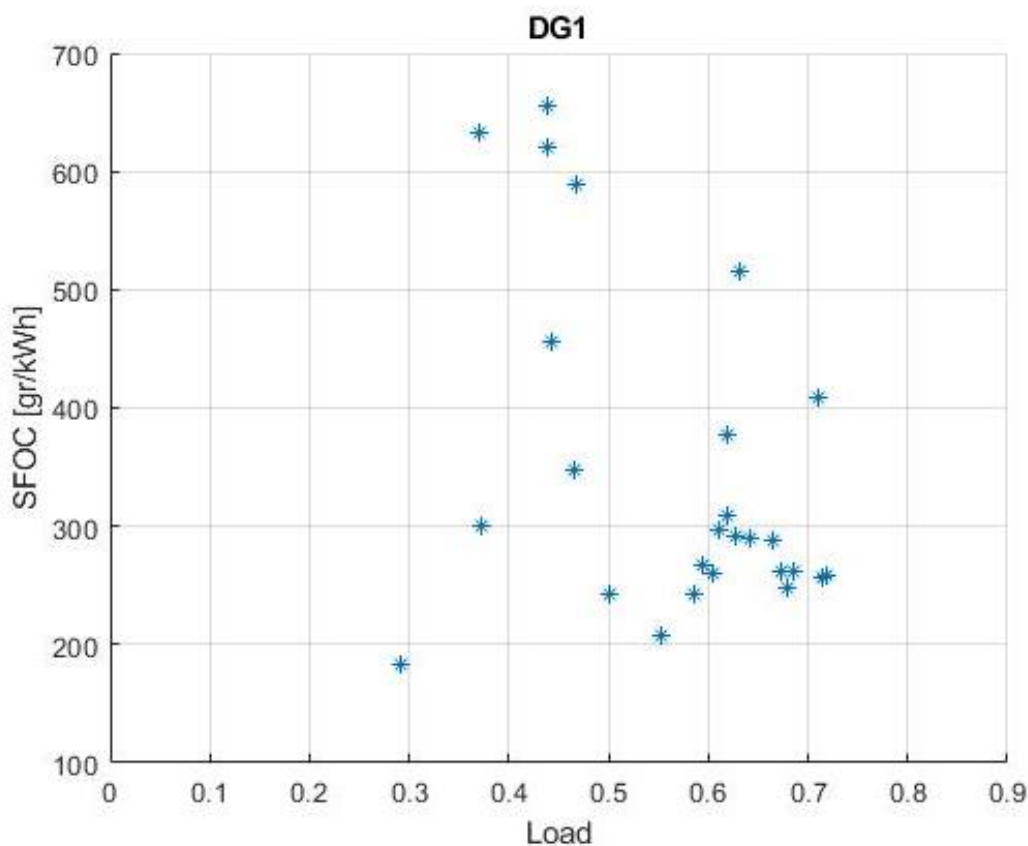
Και σε αυτή την ενότητα, όπως και προηγουμένως, αφού παρατεθεί η κάθε κατανομή φορτίου πραγματοποιείται για την ηλεκτρομηχανή No.1 μια ανάλυση από την οποία προκύπτει η παράμετρος μνήμης που οδηγεί στη βέλτιστη προσέγγιση του πραγματικού SFOC. Για τις υπόλοιπες δύο ηλεκτρογεννήτριες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου μαζί με τις απαραίτητες επεξηγήσεις.

Α.2 Αποτελέσματα της μεθόδου για την DG1



Εικόνα 43: Κατανομή Φορτίου Ισχύος της DG1

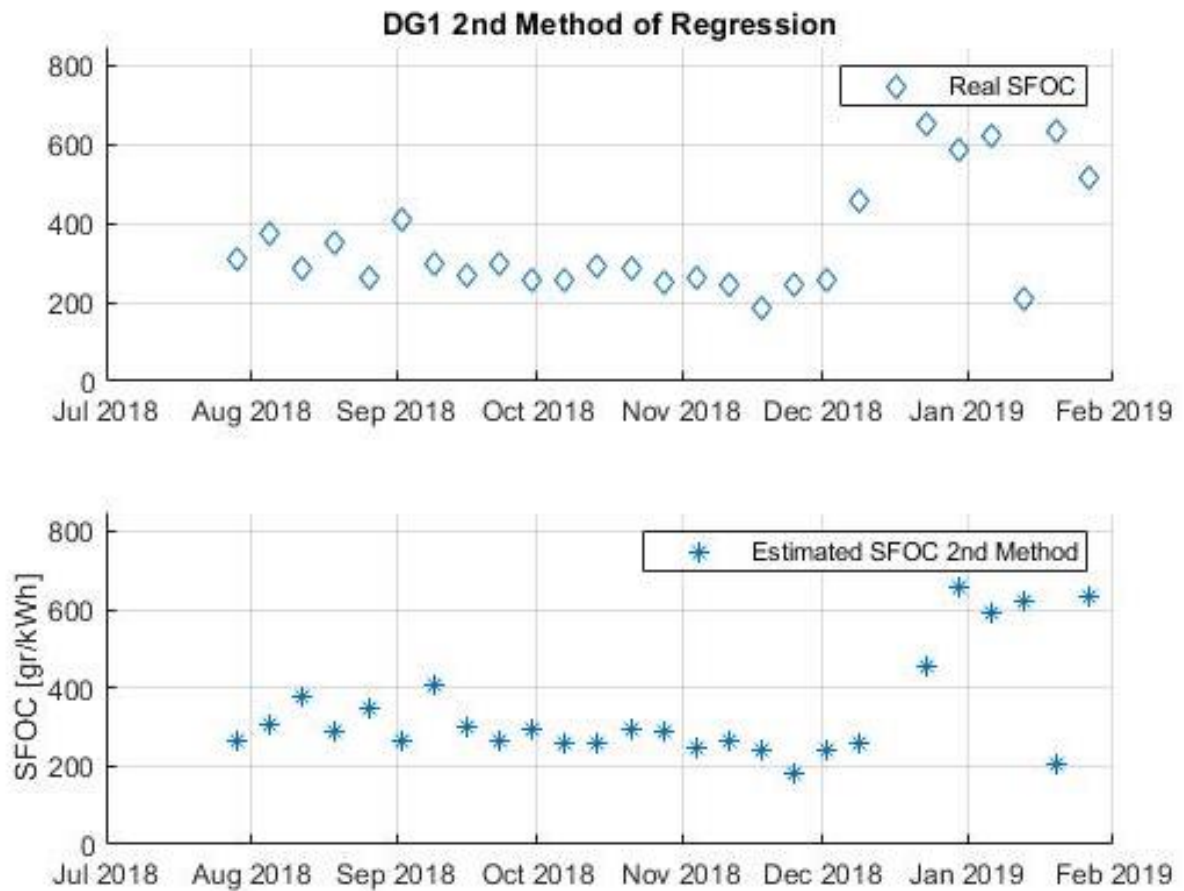
Στην εικόνα 43 παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου της ηλεκτρογεννήτριας No.1. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται το φορτίο και στον κάθετο άξονα η συχνότητα εμφάνισης μιας τιμής του φορτίου στα υπό επεξεργασία δεδομένα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη μέθοδο προσέγγισης εδώ ομαδοποιήθηκαν ανά βδομάδα οπότε σύμφωνα και με τον χρόνο λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας No.1 το φορτίο ισχύος επιμερίστηκε σε 26 διαστήματα. Τα δεδομένα αυτά αφού



Εικόνα 44: Τα δεδομένα της DG2 που χρησιμοποιήθηκαν στην 2^η Μέθοδο Προσέγγισης

καταχωρηθούν σε πίνακα 26x2 εισάγονται στον αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων όπου οι δοκιμές ως προς την παράμετρο μνήμης οδηγούν στα κάτωθι συμπεράσματα.

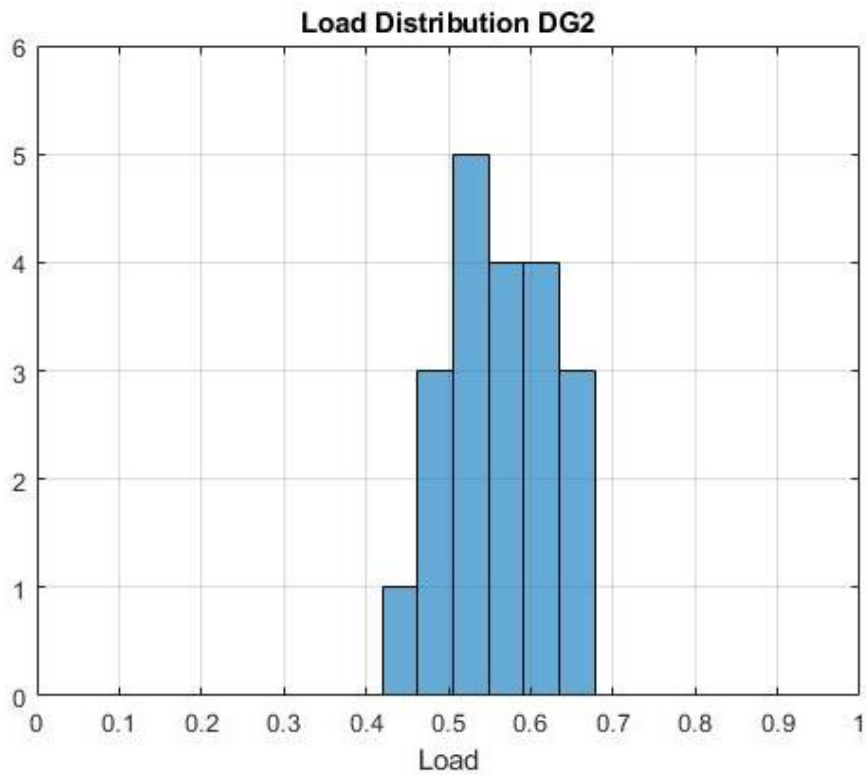
Στην εικόνα 44 απεικονίζονται τα εβδομαδιαία σημεία λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας No.1 σε γράφημα SFOC συναρτήσεως φορτίου ισχύος. Όπως είχε παρατηρηθεί και προηγουμένως, κάποια περίοδο όπου χρησιμοποιείται η DG1 η απόδοση της μειώνεται σημαντικά καθώς οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου αυξάνονται σημαντικά.



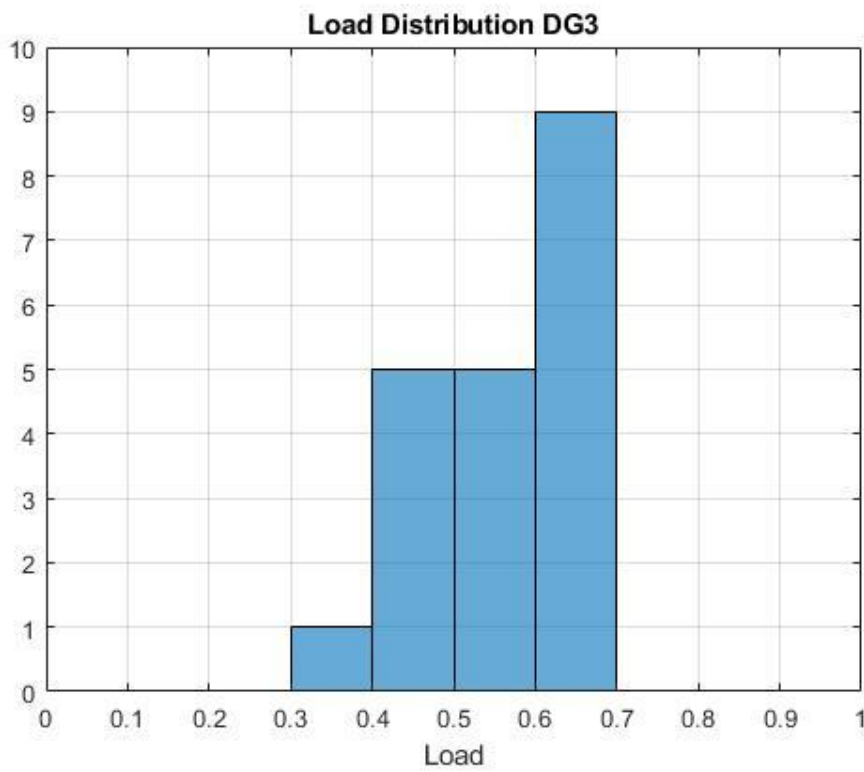
Εικόνα 45: Σύγκριση Real με Estimated SFOC για την DG1

Τα δύο διαγράμματα εικόνας 45 δείχνουν τη χρονική μεταβολή του πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και αυτής που παράχθηκε από τον αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων για $\lambda=0.00001$. Το degradation που αναφέρθηκε αποτυπώνεται ξεκάθαρα και σε αυτή την προσέγγιση του SFOC.

Α.3 Αποτελέσματα της μεθόδου για την DG2 και DG3

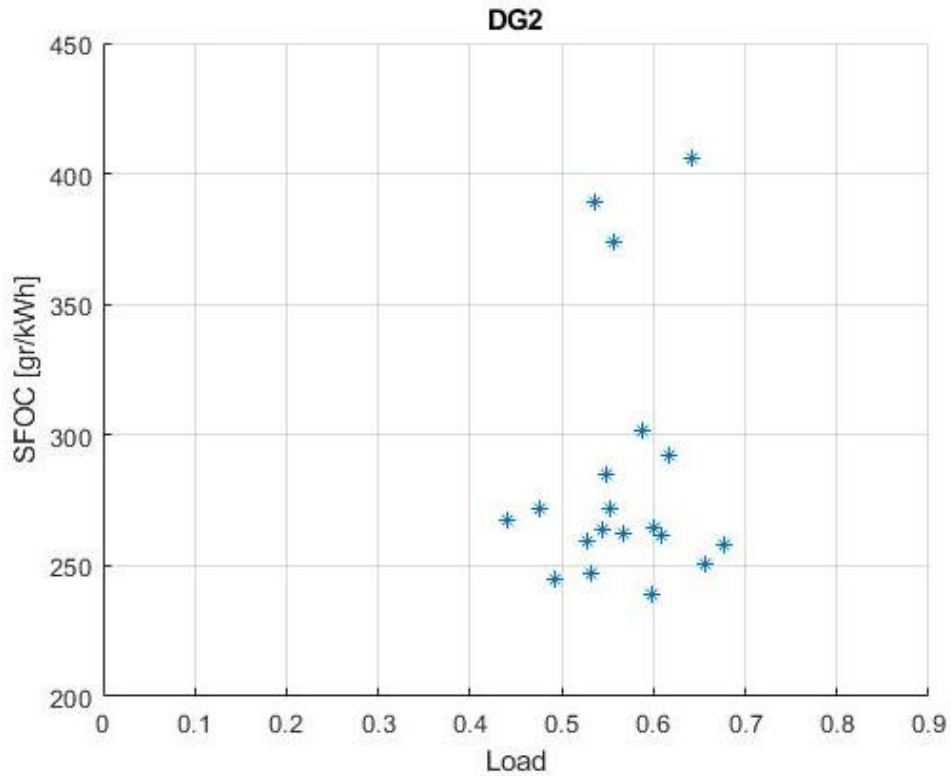


Εικόνα 46: Κατανομή Φορτίου Ισχύος της DG2

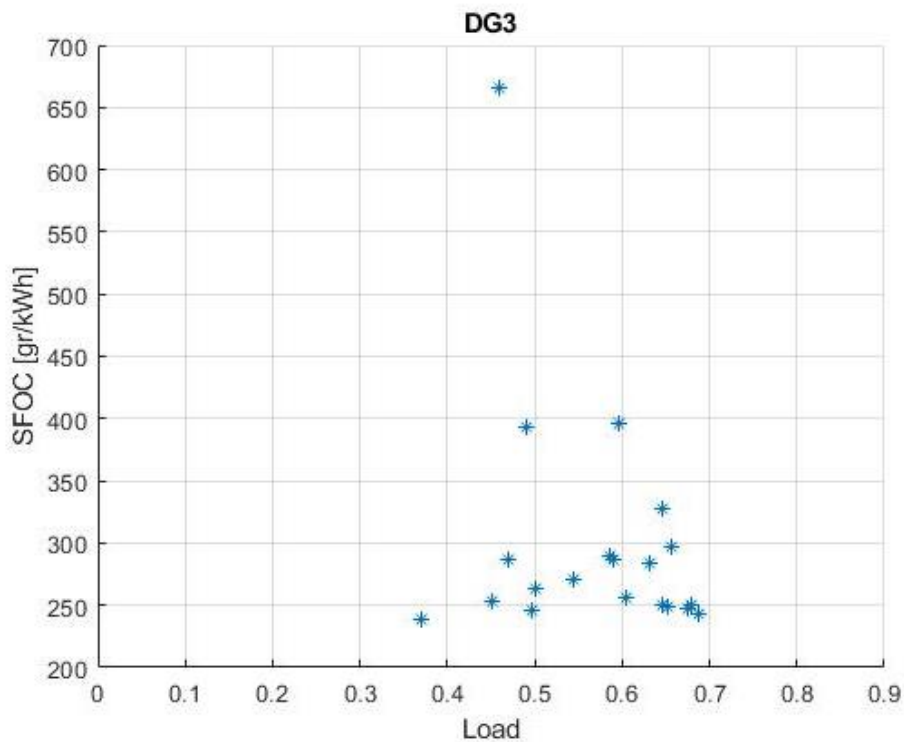


Εικόνα 47: Κατανομή Φορτίου Ισχύος της DG3

Στις εικόνες 46 και 47 απεικονίζονται οι κατανομές του φορτίου ισχύος των ηλεκτρογεννητριών Νο.2 και Νο.3. Τόσο το φορτίο της DG2 όσο και της DG3 ομαδοποιήθηκαν ανά βδομάδα και χωρίστηκαν σε 20 επιμέρους διαστήματα.

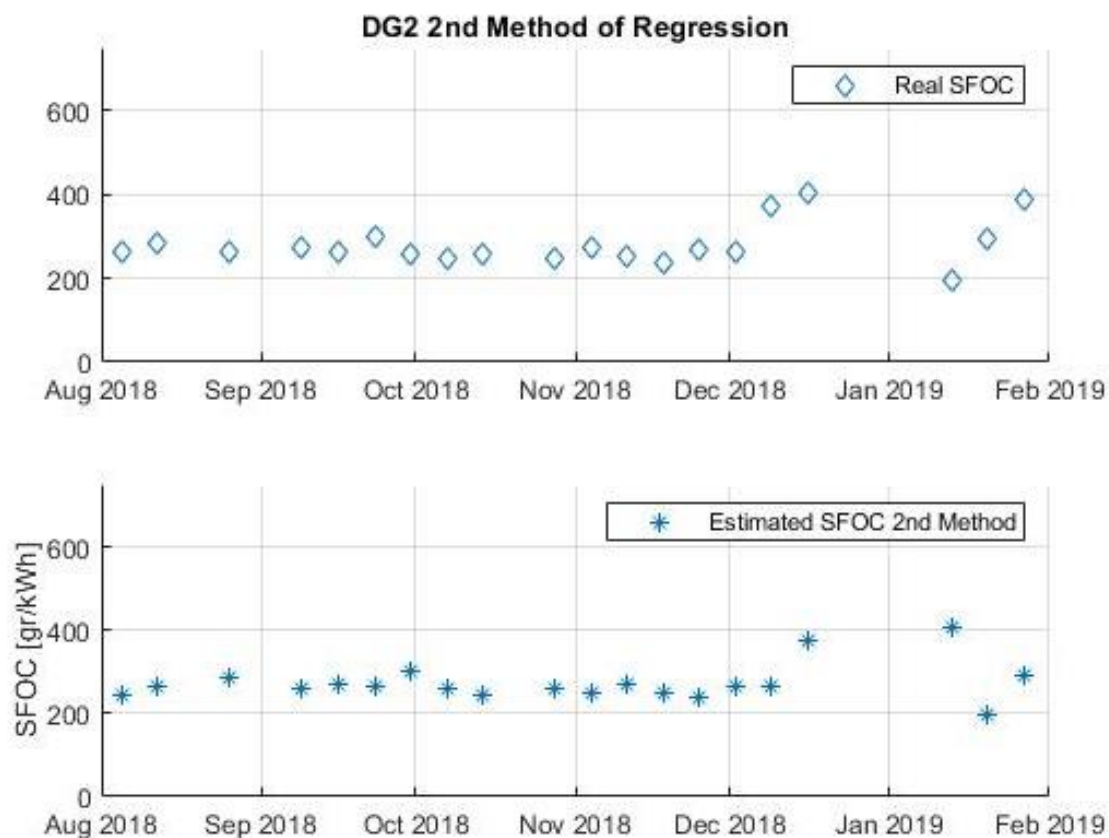


Εικόνα 48: Τα δεδομένα της DG2 που χρησιμοποιήθηκαν στην 2^η Μέθοδο Προσέγγισης

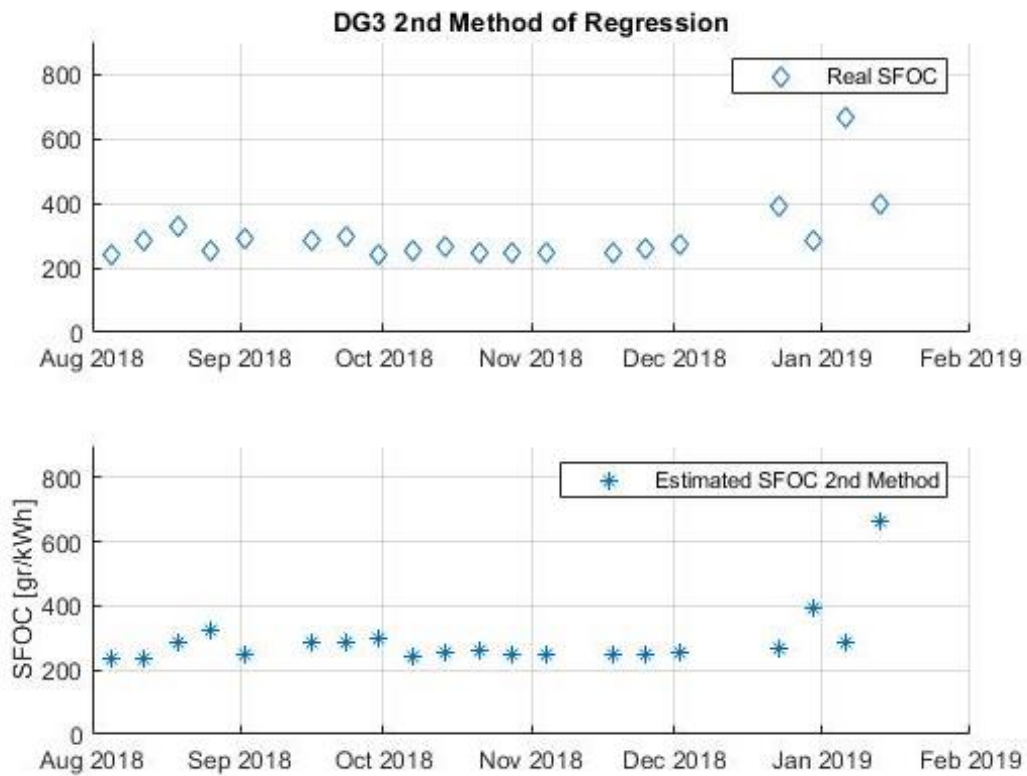


Εικόνα 49: Τα δεδομένα της DG3 που χρησιμοποιήθηκαν στην 2^η Μέθοδο Προσέγγισης

Στις παραπάνω εικόνες τα δεδομένα των ηλεκτρομηχανών 2 και 3 απεικονίζονται σε διάγραμμα SFOC συναρτήσεως Load. Παρατηρείται πως, όπως είχε αναδείξει και η ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, η απόδοση της DG2 μπορεί να μειώνεται με τη μικρή αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου αλλά δεν φτάνει στην κατάσταση της DG3 της οποίας το αντίστοιχο μέγεθος αυξάνεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό.

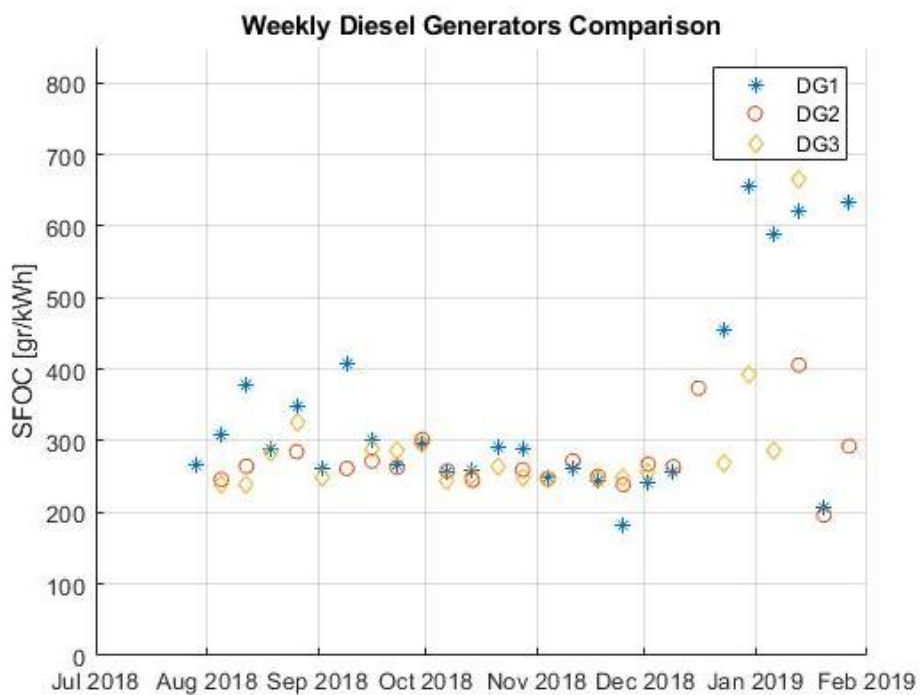


Εικόνα 50: Σύγκριση Real με Estimated SFOC για την DG2



Εικόνα 51: Σύγκριση Real με Estimated SFOC για την DG3

Τα δύο παραπάνω γραφήματα δείχνουν τη χρονική μεταβολή του πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και αυτής που παράχθηκε από τον αναδρομικό αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων για $\lambda=0.00001$. Τα αποτελέσματα της μεθόδου φαίνονται πολύ καλά καθώς τα σημεία των δύο διαγραμμάτων δείχνουν να συγκλίνουν.



Εικόνα 52: Σύγκριση Απόδοσης Ηλεκτρομηχανών

Σε αυτό το γράφημα του εδαφίου (εικόνα 52) πραγματοποιείται υπέρθεση των αποτελεσμάτων της δεύτερης μεθόδου προσέγγισης όλων των ηλεκτρομηχανών στον χρόνο. Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από την παραπάνω εικόνα συμπίπτουν με αυτά της προηγούμενης μεθόδου. Με λίγα λόγια, παρατηρείται πως μέχρι το τελευταίο δίμηνο του υπό μελέτη εξαμήνου οι ηλεκτρογεννήτριες έχουν την ίδια καλή απόδοση από εκεί και πέρα γίνεται κακή χρήση των DG1 και DG3 καθώς το SFOC που παράγουν είναι αφύσικα υψηλό. Το SFOC της DG2 είναι και αυτό ελαφρώς αυξημένο αλλά δεν φτάνει στα επίπεδα των άλλων δύο.

A.4 Παραγωγή ψεύτικου συνόλου δεδομένων και δοκιμή λειτουργίας αλγορίθμου

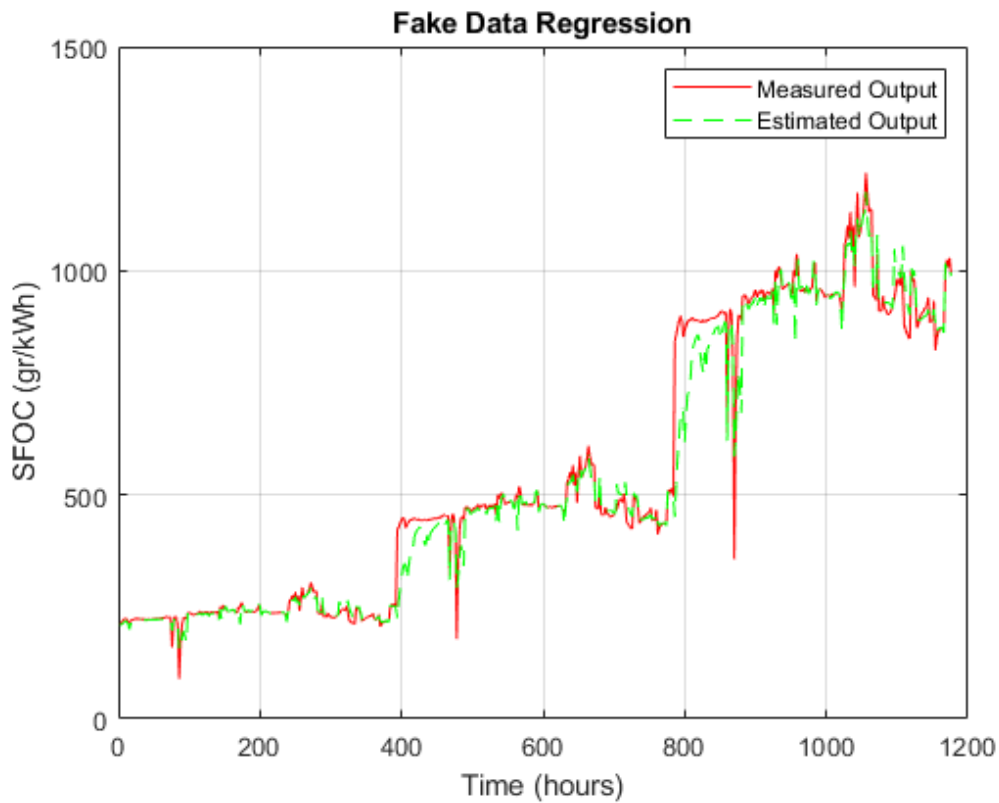
Προκειμένου να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία του αναδρομικού αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων δημιουργήθηκε μια σειρά δεδομένων τα οποία αντιπροσώπευαν χρονική διάρκεια τριών μηνών. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από την εξής επεξεργασία των μετρήσεων (φορτίου και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου) του μήνα Αυγούστου.

- Ουσιαστικά τα στοιχεία για τον μήνα Αύγουστο καταχωρήθηκαν σε ένα πίνακα τρεις φορές.
- Σε αυτή τη σειρά των δεδομένων το φορτίο ισχύος κάθε μήνα είναι ίδιο κάθε χρονική στιγμή.
- Η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξήθηκε για τον δεύτερο μήνα κατά 200% και για τον τρίτο μήνα κατά 400% σε σχέση με την αρχική.

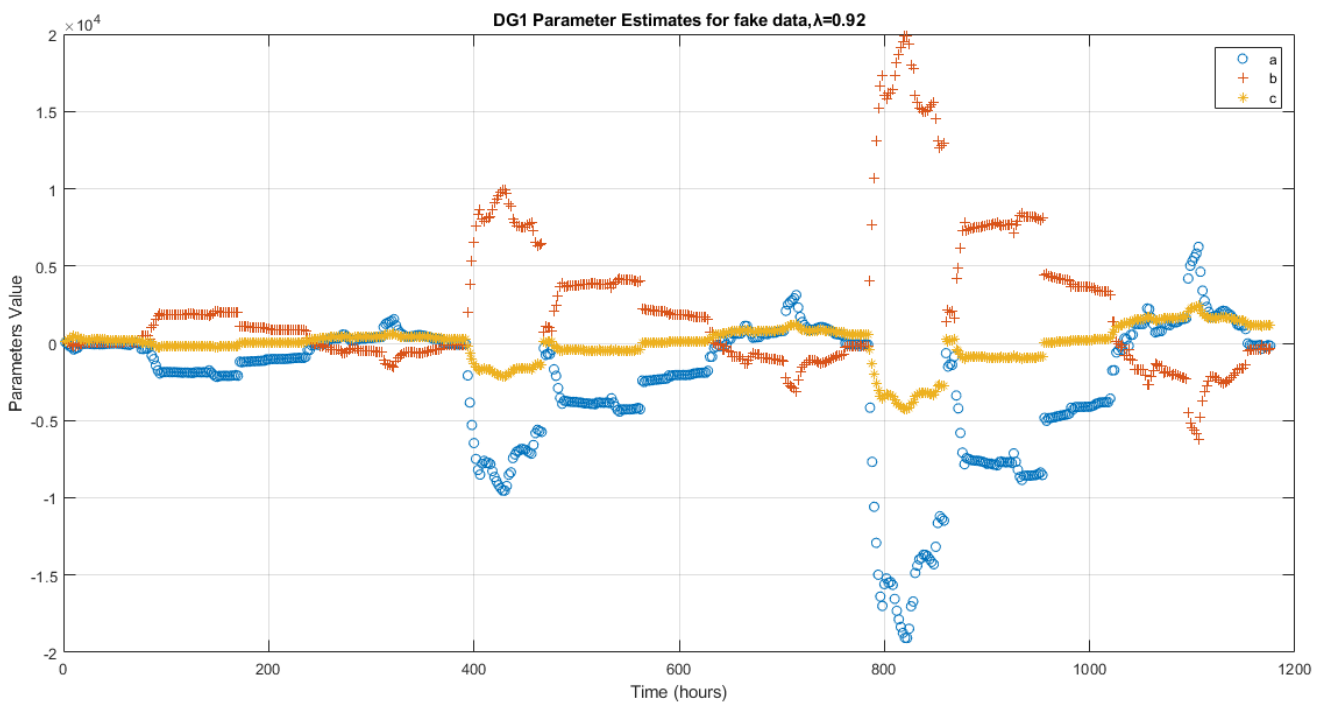
Συμπερασματικά, ο πίνακας [Fake Data Set] που περιλάμβανε το ψεύτικο σύνολο δεδομένων είχε την εξής μορφή:

$$\begin{array}{l} \text{Load August} \quad \text{SFOC August} \\ \text{[Fake Data Set]} = \text{Load August} \quad 2 \times \text{SFOC August} \\ \text{Load August} \quad 4 \times \text{SFOC August} \end{array}$$

Ο δημιουργημένος πίνακας εισήχθη στο πρόγραμμα μαζί με τα άλλα απαραίτητα στοιχεία (αρχικές συνθήκες και παράμετρος μνήμης) και μελετήθηκαν τα κάτωθι διαγράμματα που παρήγαγε ο αλγόριθμος.



Εικόνα 53: Προσέγγιση του Fake Data Set



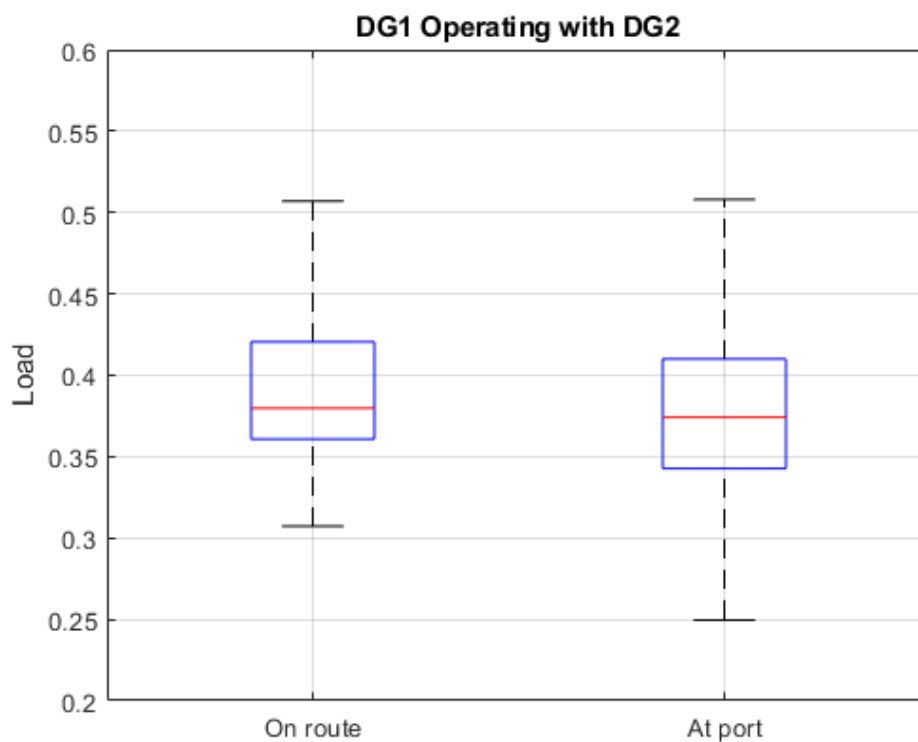
Εικόνα 54: Χρονική Μεταβολή των a,b,c Αποτελέσματα της προσέγγισης του Fake Data Set

Στην εικόνα 53 απεικονίζεται η σύγκλιση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου του πίνακα Fake Data Set. Η παράμετρος μνήμης είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την αντίστοιχη προσέγγιση των μεγεθών της DG1 ($\lambda=0.92$). Στην εικόνα 54 φαίνεται η χρονική μεταβολή των παραμέτρων του τριωνύμου (a,b,c). Ένα χαρακτηριστικό που δείχνει την εύρυθμη λειτουργία του αλγόριθμου είναι ο τρόπος

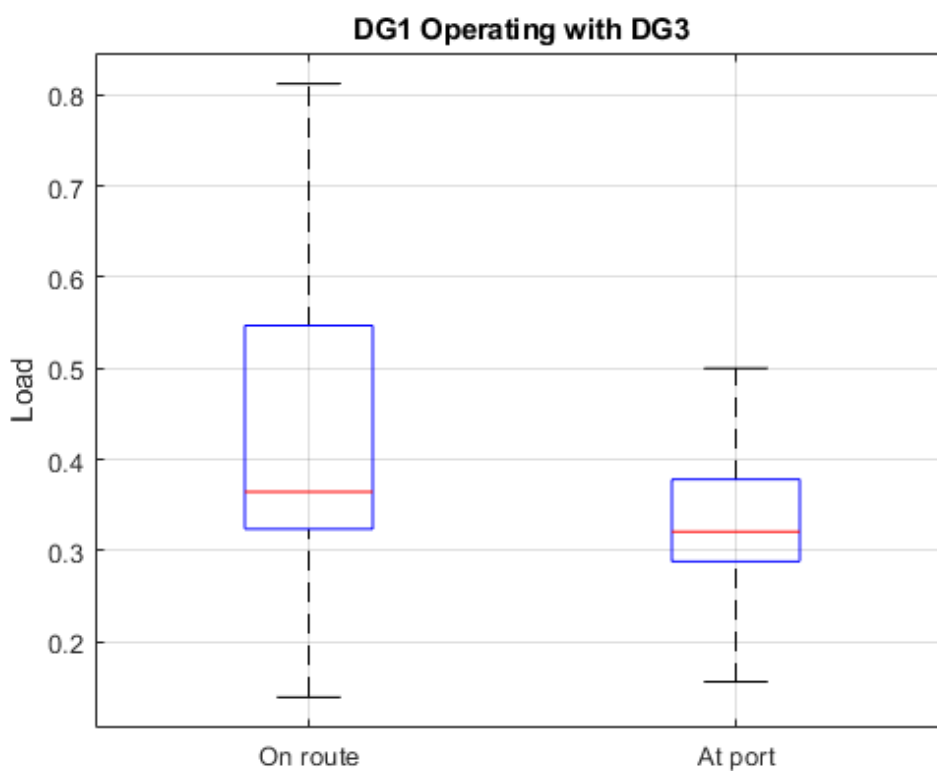
που μεταβάλλονται τα a και b τις στιγμές που παρατηρούνται οι απότομες πτώσεις του SFOC της εικόνας 39. Αρχικά, προφανώς κατά τη διάρκεια του πρώτου μήνα, η εν λόγω μεταβολή στις παραμέτρους δεν είναι τόσο έντονη. Τον δεύτερο και τρίτο μήνα πού έγινε τεχνητός διπλασιασμός και τετραπλασιασμός του SFOC αντίστοιχα, η ίδια βίαια αλλαγή αντικατοπτρίζεται με όλο και πιο δριμύ τρόπο στους συντελεστές. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά του προγράμματος μαρτυρά πως αυτό δουλεύει με σωστό τρόπο και ανταποκρίνεται στις διάφορες μεταβολές που συναντά.

Παράρτημα Β

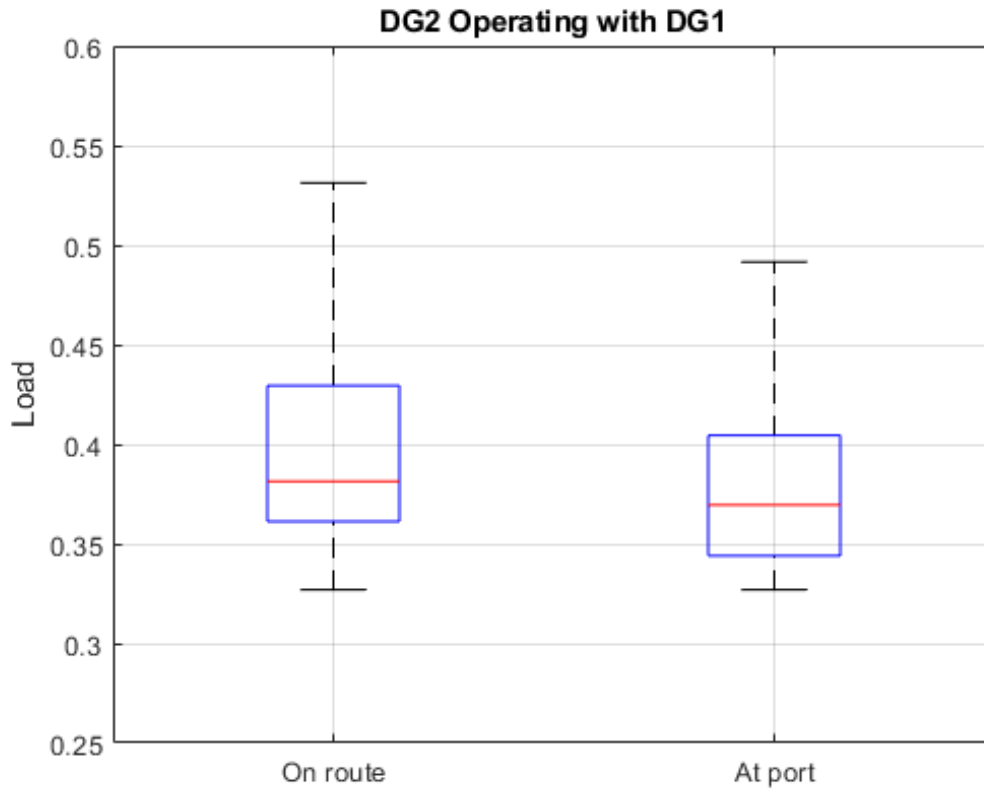
Β.1 Σύγκριση Load μεταξύ της χρήσης των ηλεκτρογεννητριών στο λιμάνι και σε πορεία



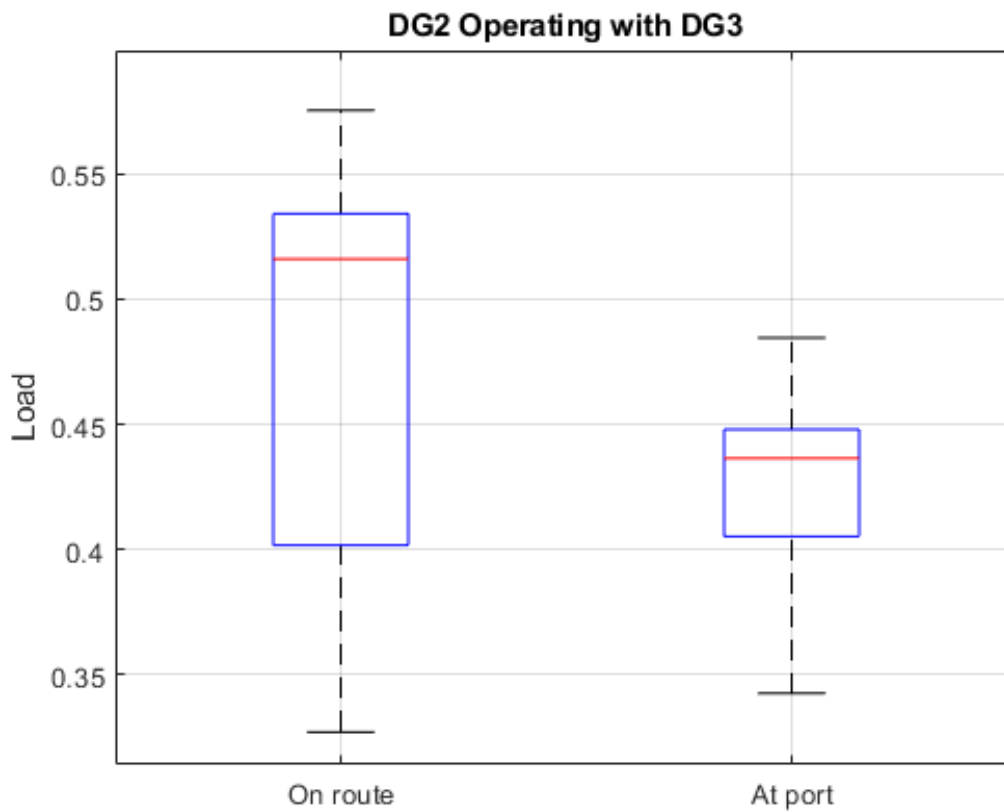
Εικόνα 55: Σύγκριση φορτίου της DG1 όταν λειτουργεί με την DG2 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα



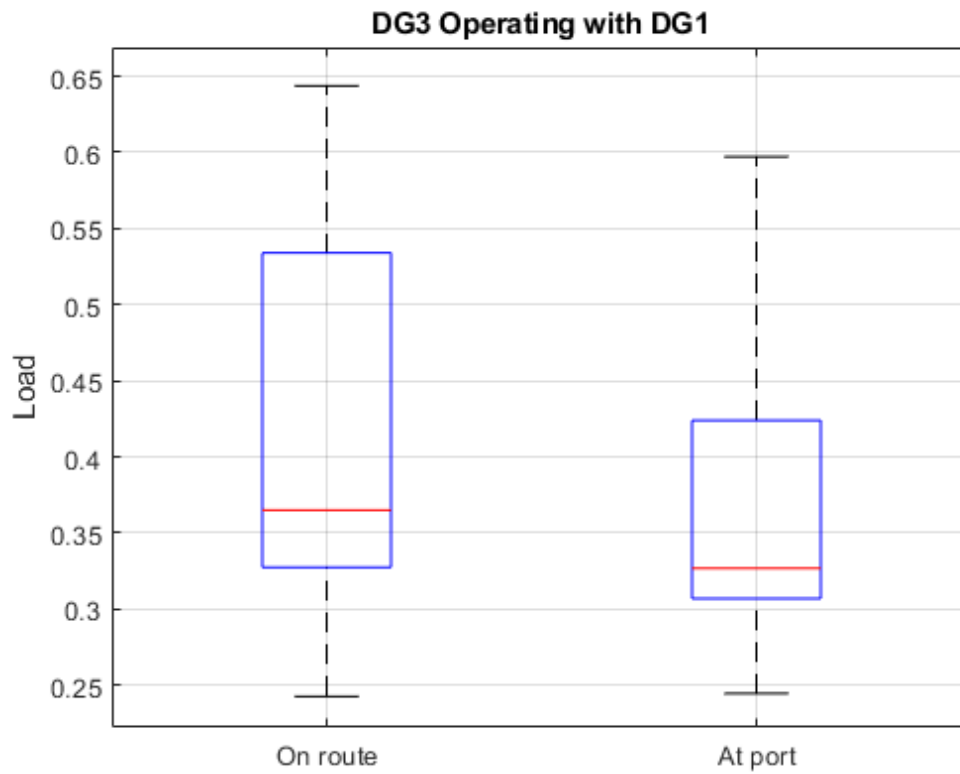
Εικόνα 56: Σύγκριση φορτίου της DG1 όταν λειτουργεί με την DG3 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα



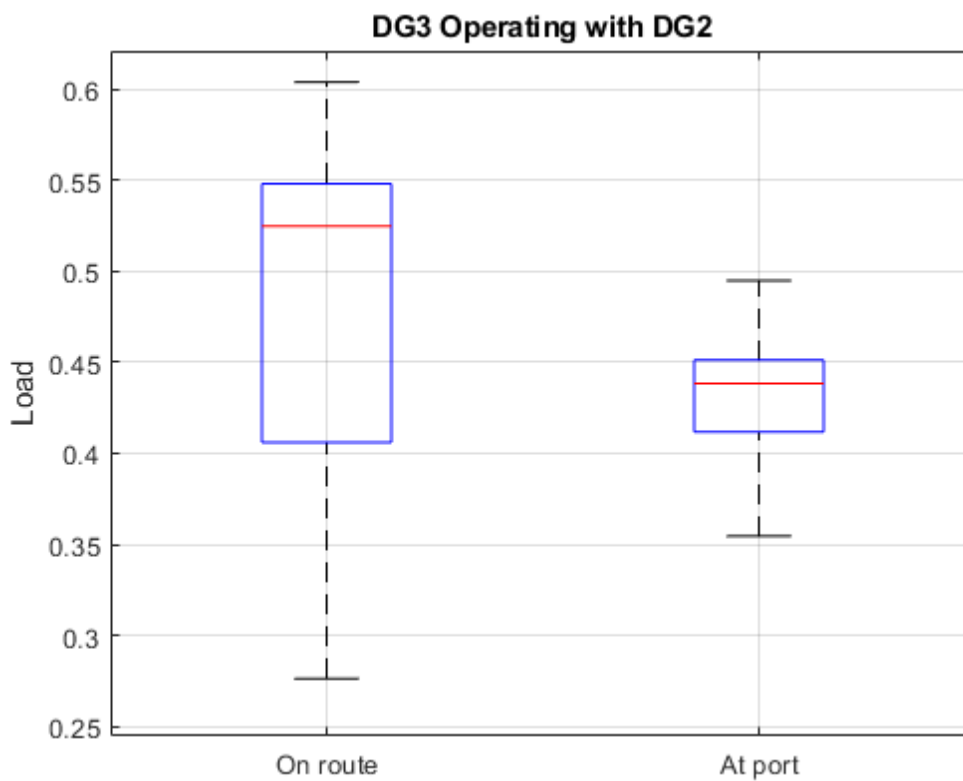
Εικόνα 57: Σύγκριση φορτίου της DG2 όταν λειτουργεί με την DG1 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα



Εικόνα 58: Σύγκριση φορτίου της DG2 όταν λειτουργεί με την DG3 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα



Εικόνα 59: Σύγκριση φορτίου της DG3 όταν λειτουργεί με την DG1 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα



Εικόνα 60: Σύγκριση φορτίου της DG3 όταν λειτουργεί με την DG2 σε πορεία και στο λιμάνι αντίστοιχα

B.2 Το Λήμμα Αντιστροφής Πινάκων

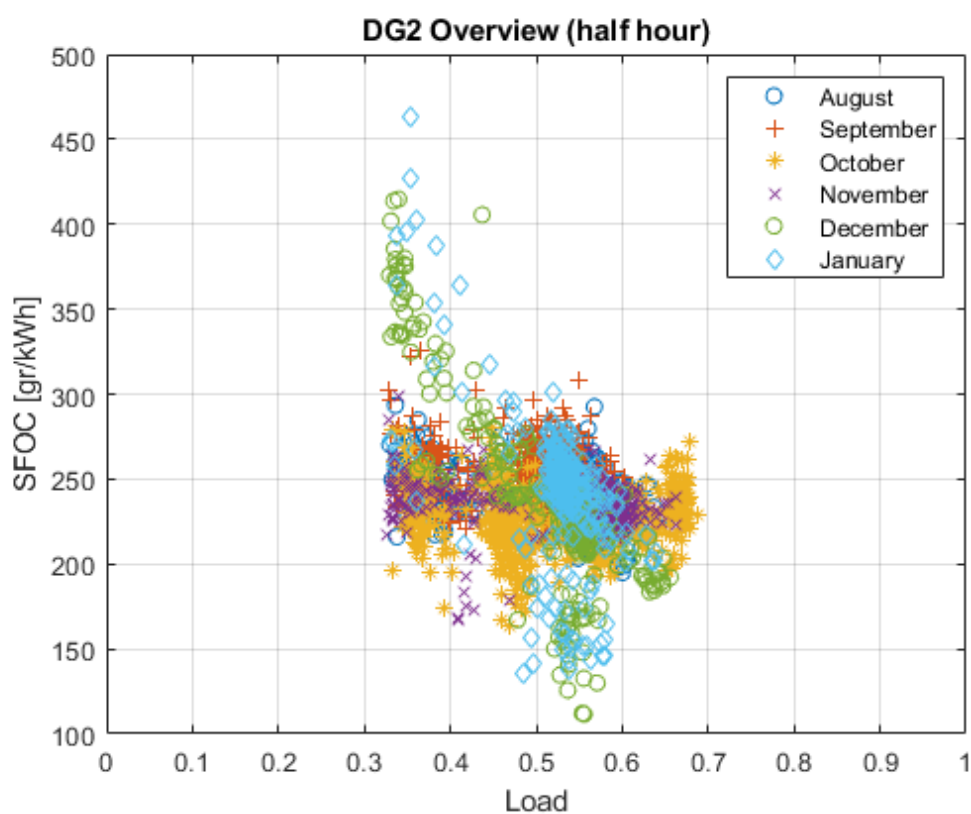
Έστω **A** και **B** δύο θετικοί, σταθεροί πίνακες $M \times M$ που συνδέονται με την κάτωθι σχέση:

$$\mathbf{A} = \mathbf{B}^{-1} + \mathbf{C}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C}^T \quad (\text{B.1})$$

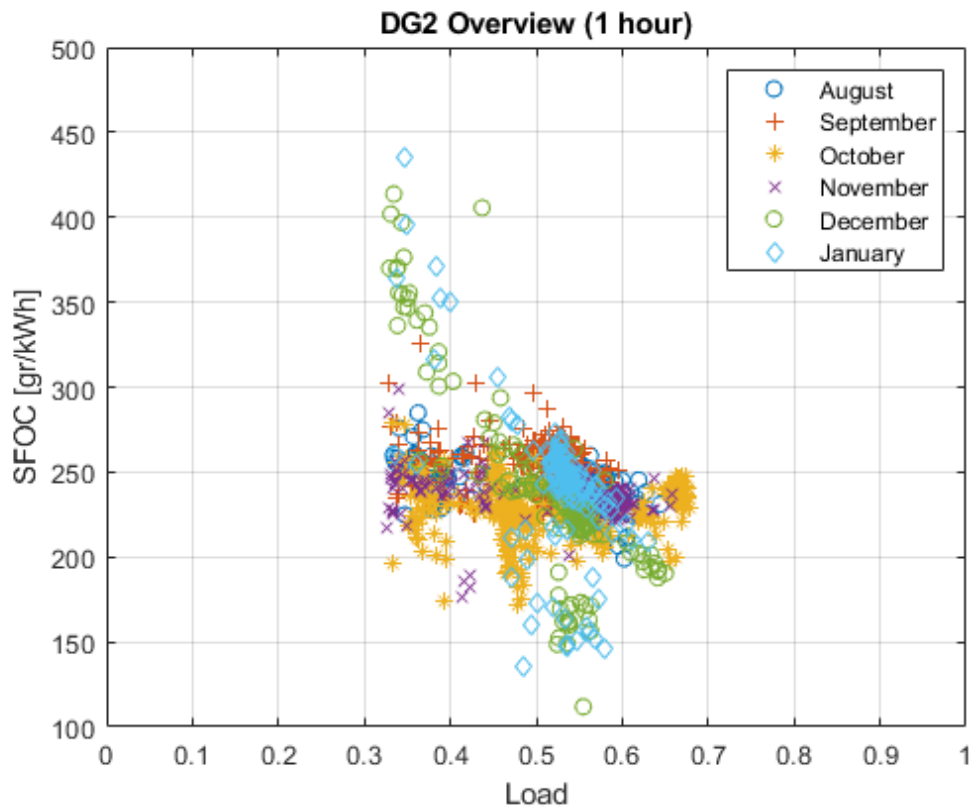
όπου: **D** είναι θετικός, σταθερός $N \times N$ και ο **C** είναι $M \times N$ πίνακας. Σύμφωνα με το λήμμα της αντιστροφής πινάκων, ο αντίστροφος πίνακας του **A** μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{B} - \mathbf{B}\mathbf{C}(\mathbf{D} + \mathbf{C}^T\mathbf{B}\mathbf{C})^{-1}\mathbf{C}^T\mathbf{B} \quad (\text{B.2})$$

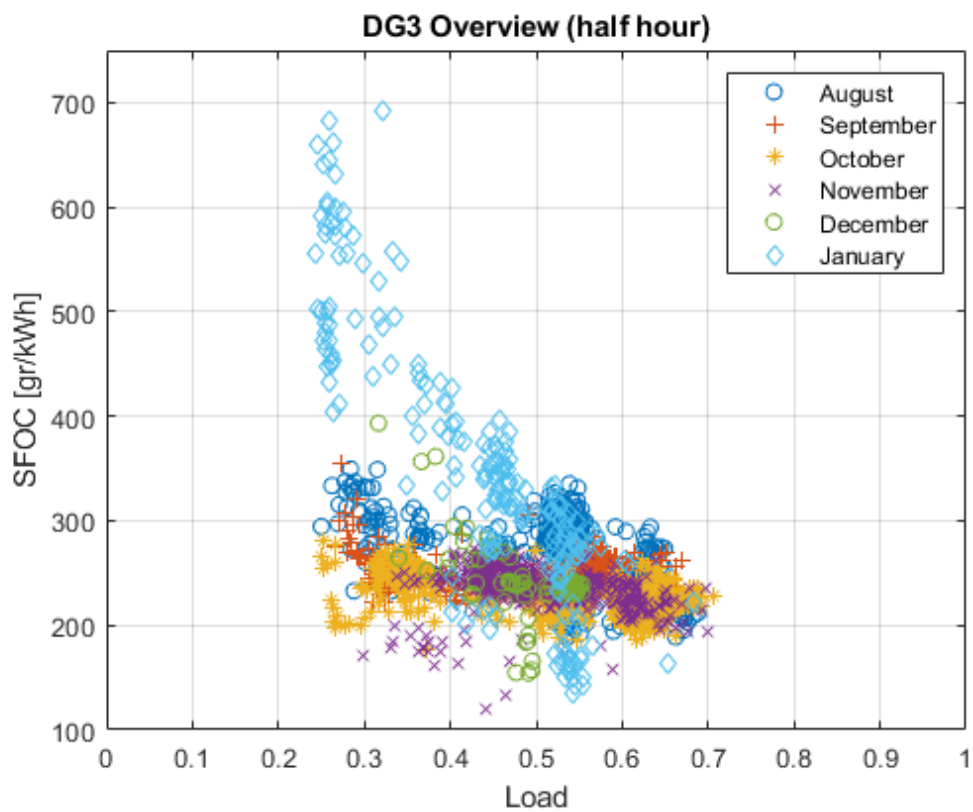
B.3 Κατανομές Load vs SFOC των DG2 και DG3



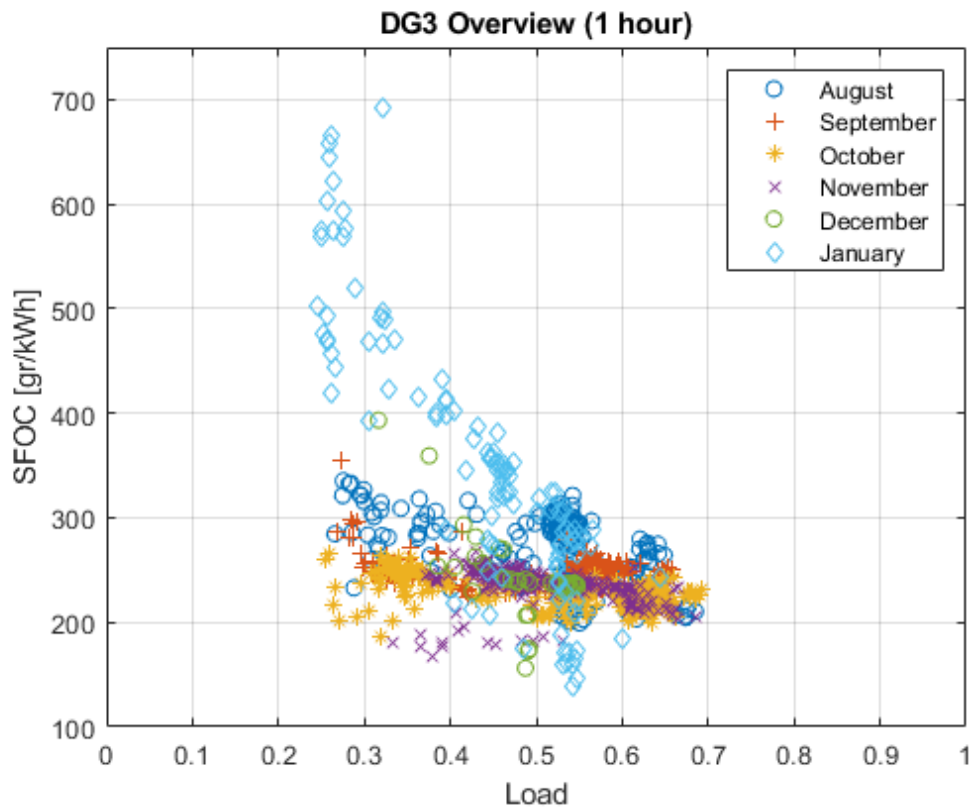
Εικόνα 61: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG2 ανά 30'



Εικόνα 62: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG2 ανά 30'

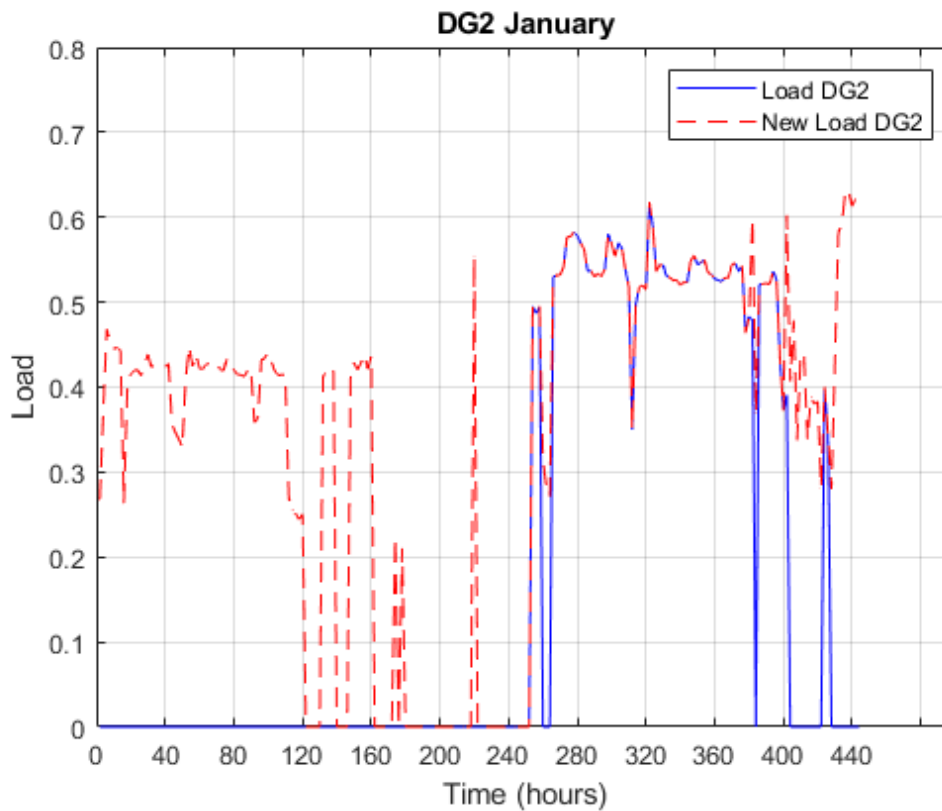


Εικόνα 63: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG3 ανά 60'

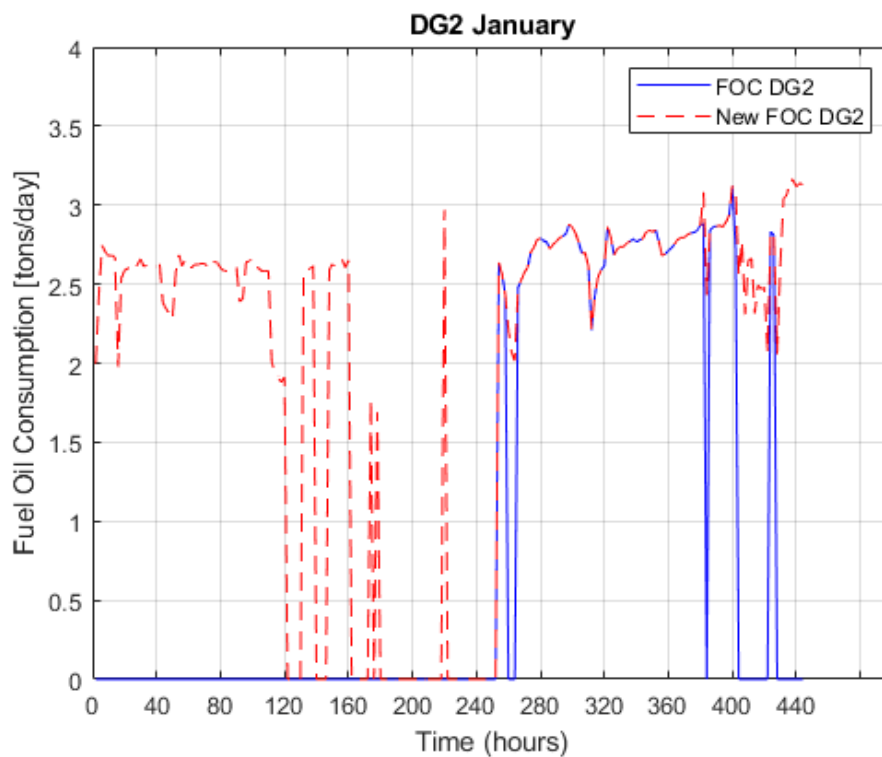


Εικόνα 64: Κατανομή μετρήσεων Φορτίου-SFOC (Real) της DG3 ανά 60'

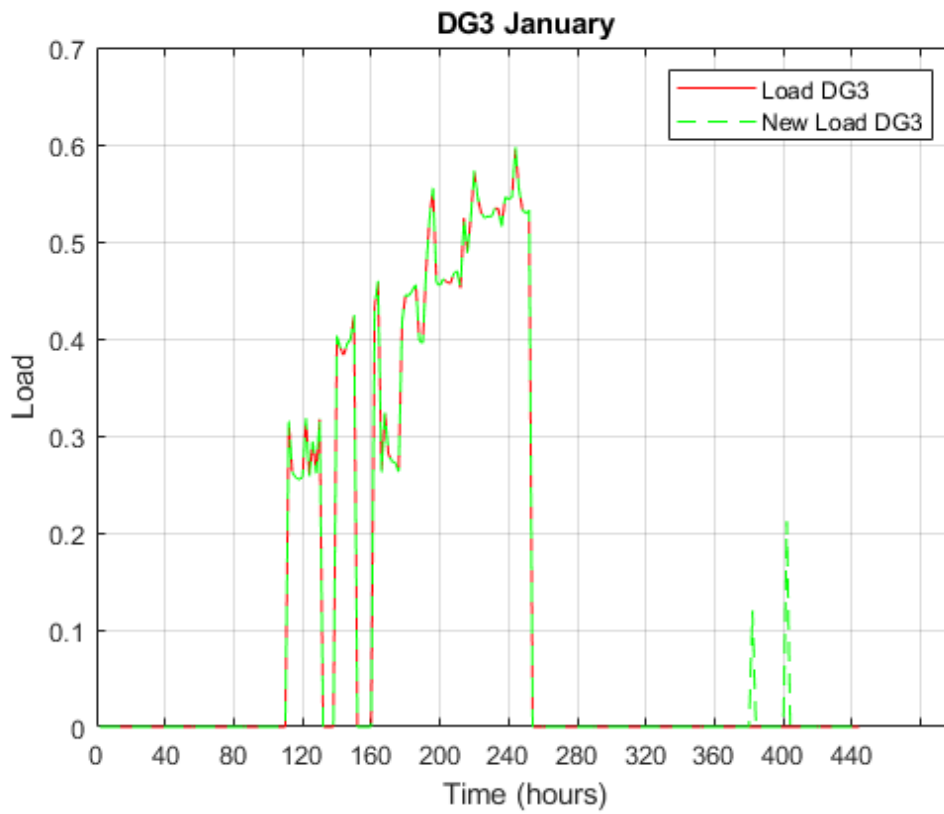
Β.4 Συγκρίσεις μεγεθών κατά τη βελτιστοποίηση του Ιανουαρίου



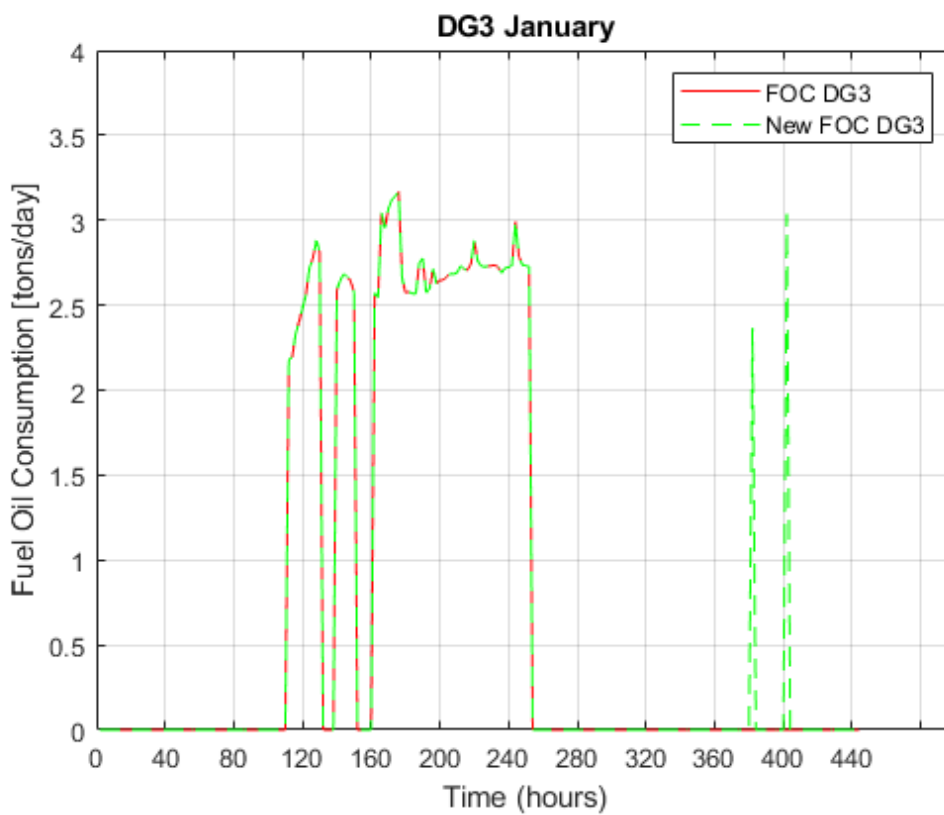
Εικόνα 65: Σύγκριση του φορτίου της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο



Εικόνα 66: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG2 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο



Εικόνα 67: Σύγκριση του φορτίου της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο



Εικόνα 68: Σύγκριση της κατανάλωσης της DG3 πριν και μετά τη βελτιστοποίηση τον Ιανουάριο