



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος σε
Matlab για την βέλτιστη μεσοπρόθεσμη
διαχείριση ενέργειας σε πλοία**

Μουντάκης Σ. Στυλιανός

Επιβλέπων καθηγητής: Κανέλλος Φώτιος

Χανιά, Νοέμβριος 2014

Περιεχόμενα

Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος σε Matlab για την βέλτιστη μεσοπρόθεσμη διαχείριση Ενέργειας σε πλοία.....	1
Εικόνες και Πίνακες.....	4
Πρόλογος	6
Δομή της εργασίας	8
Κεφάλαιο 1	9
Ηλεκτρική πρόωση	9
1.1 Ηλεκτρική πρόωση πλωτών μέσων μεταφοράς	9
1.2 Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης.....	12
1.3 Περιγραφή του ηλεκτρικού δικτύου πλοίων	14
1.3.1 Συστήματα παραγωγής ενέργειας	14
1.3.2 Καταναλωτές Ενέργειας	15
1.4 Σχεδίαση Ηλεκτρικού Συστήματος Πρόωσης.....	18
1.5 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης	19
1.6 Συνεργασία έλικα και κινητήρα	20
1.6.1 Έλικα σταθερού βήματος.....	21
1.6.2 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος	21
1.7 Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης	23
1.7.1 Αξονική πρόωση (shaft propulsion)	23
1.7.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters).....	23
1.7.3 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod/azipod (podded propulsion).....	25
1.7.4 Σύστημα πρόωσης Voith Schneider.....	26
1.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	27
1.8.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	27
1.8.2 Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	28
Κεφάλαιο 2	29
Βέλτιστη διαχείριση ενέργειας σε πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο.....	29
2.1 Εισαγωγή	29
2.2 Δείκτες ενεργειακής απόδοσης	32
2.3 Περιγραφή συστήματος πλήρους εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES).....	33

2.3.1 Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	33
2.3.2 Χρονολογική καμπύλη φορτίου.....	34
2.3.3 Συνάρτηση Κατανάλωσης Καυσίμου	34
2.3.4 Συνάρτηση παραγόμενων εκπομπών	35
2.3.5 Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage System (ESS)).....	36
2.3.6 Καμπύλη ταχύτητας - ισχύς πρόωσης.....	37
2.4 Η γενική ιδέα της βελτιστοποίησης	38
2.4.1 Λειτουργικοί και τεχνικοί περιορισμοί.....	38
2.4.2 Μαθηματική Διατύπωση Αλγορίθμου Βέλτιστης Διαχείρισης Ενέργειας .39	
2.5 Επίλυση του προβλήματος.....	44
Κεφάλαιο 3	46
Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος σε Matlab για εισαγωγή δεδομένων και λήψη αποτελεσμάτων βελτιστοποιημένης διαχείρισης ενέργειας σε πλοία.....	46
3.1 Εισαγωγή	46
3.2 Εργαλειοθήκη του GUIDE	48
3.3 Μπάρα εργαλείων του GUIDE	51
3.4 Προγραμματισμός των αντικειμένων	54
3.5 Εισαγωγή κατάλληλων εργαλείων για την εισαγωγή δεδομένων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων	56
3.5.1 Οθόνη Central Screen	57
3.5.2 Οθόνη Ship Travel Scheduling	64
3.5.3 Οθόνη results	67
3.6 Παράδειγμα προσομοίωσης πλοίου	70
3.6.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης	75
3.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	81
3.8 Συμπεράσματα	82
Παραπομπές.....	83

Εικόνες και Πίνακες

Εικόνα 1. 1 Προωστήρας azimuth του παγοθραυστικού "Vitus Bering"

Εικόνα 1.2 Το πλοίο S/S Normandie χρησιμοποιούσε ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον ατλαντικό κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους.

Εικόνα 1.3 Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα (εσωτερικό)

Εικόνα 1.4 Εξελιγμένος επαγωγικός κινητήρας (Advanced Induction Motor-AIM) της ALSTOM.

Εικόνα 1.5 Έλικα ελεγχόμενου βήματος

Εικόνα 1.6 Διαφορά καταλαμβανόμενου χώρου στο πλοίο. Πάνω αζονικό σύστημα, κάτω ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης με rod ή azimuth προστήρες

Εικόνα 1.7 Έλικα σταθερού (αριστερά) και μεταβλητού (δεξιά) βήματος

Εικόνα 1.8 Αζονική πρόωση

Εικόνα 1.9 Αζιμουθιακός προωστήρας

Εικόνα 1.10 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης

Εικόνα 1.11 Προωστήρας τύπου Voith Schneider

Εικόνα 2. 1 Διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (AES).

Εικόνα 2.2 Πλέγμα δυναμικού προγραμματισμού

Εικόνα 3.1 Αρχική εικόνα όταν καλείται το GUIDE

Εικόνα 3.2 Χώρος σχεδιασμού της επιφάνειας διεπαφής, αφού έχει επιλεγεί κενό (Blank) GUI

Εικόνα 3. 3 Η εργαλειοθήκη του GUI

Εικόνα 3.4 Τα σημαντικότερα από τα κουμπιά στη γραμμή εργαλείων του GUI

Εικόνα 3.5 Το παράθυρο Align Objects

Εικόνα 3.6 Το παράθυρο "Menu Editor"

Εικόνα 3.7 Το παράθυρο "Property Inspector"

Εικόνα 3.8 Οι επιλογές στο View Callback

Εικόνα 3.9 Το παράθυρο του Editor

Εικόνα 3.10 Την οθόνη "Central Screen" όπως φαίνεται στο GUI (πριν τρέξει το πρόγραμμα)

Εικόνα 3. 11 Το στοιχείο panel με τίτλο "GHG Emissions Limits"

Εικόνα 3. 14 Το αντικείμενο panel με τίτλο "Power System Parameters"

Εικόνα 3. 12 Το αντικείμενο panel με τίτλο " Ship Parameters"

Εικόνα 3. 12 Το αντικείμενο panel με τίτλο "Fuel Prices"

Εικόνα 3.13 Η οθόνη "Central Screen" όπως φαίνεται αφού τρέξει το πρόγραμμα.

Εικόνα 3.14 Η οθόνη "Ship Travel Scheduling" όπως φαίνεται στο GUI (πριν τρέξει το πρόγραμμα)

Εικόνα 3. 15 Η οθόνη "Ship Travel Scheduling" αφού τρέξει το πρόγραμμα.

Εικόνα 3. 16 Η οθόνη "results"

Εικόνα 3. 17 Η οθόνη "CentralScreen" με τα δεδομένα του πλοίου

Εικόνα 3. 18 Η οθόνη "ShipTravelSchedule" με τα δεδομένα του ταξιδιού του πλοίου

Εικόνα 3. 19 Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης όπως φαίνονται στην οθόνη "results"

Εικόνα 3. 20 Γραφική παράσταση της ισχύος των γεννητριών

Εικόνα 3. 21 Γραφική παράσταση της ισχύος φορτίου εξυπηρέτησης, της ισχύος πρόωσης και της συνολικής ισχύος

Εικόνα 3. 23 Γραφική παράσταση της ισχύος των γεννητριών και της συνολικά παραγόμενης ισχύος

Εικόνα 3. 22 Γραφική παράσταση της βέλτιστης ταχύτητας του πλοίου και του αρχικού πλάνου

Εικόνα 3. 24 Γραφική παράσταση των δεικτών EEOI1 και EEOI2

Πίνακας 2.1 Δομή διαγράμματος δυναμικού προγραμματισμού

Πίνακας 3. 2 Παράμετροι γεννητριών του πλοίου

Πίνακας 3. 3 Γενικές παράμετροι του πλοίου

Πίνακας 3. 4 Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για το πλάνο του ταξιδιού

Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για την παραγόμενη ισχύ των γεννητριών

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον Οκτώβριο του 2013 έως τον Νοέμβριο του 2014 στη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αντικείμενο της εργασίας είναι η δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη (graphical user interface GUI) στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής των δεδομένων ενός πλήρους εξηλεκτρισμένου πλοίου π.χ. δεδομένα γεννητριών, κόστους καυσίμων, ηλεκτρικού φορτίου, φορτίου του πλοίου κ.α.. Τα δεδομένα που θα συλλεχτούν από το γραφικό περιβάλλον θα αποτελέσουν είσοδο εξειδικευμένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης της λειτουργίας του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου που έχει αναπτυχθεί από τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας Δρ. Κανέλλο Φώτιο και έχει δημοσιευτεί στην [1]. Για την ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος έγινε χρήση της Matlab και συγκεκριμένα του εργαλείου GUIDE (graphical user interface development environment). Συνοπτική περιγραφή του αλγορίθμου, βασισμένη σε μετάφραση της [1], δίνεται στο κεφάλαιο 2. Το γραφικό περιβάλλον που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα πλήρους απεικόνισης των δεδομένων εισόδου, υπολογισμού χαρακτηριστικών καμπυλών και επίσης των δεδομένων που υπολογίζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης (παραγωγή των γεννητριών, κόστος λειτουργίας, ταχύτητα πλεύσης του πλοίου κ.α.). Επίσης, ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει τα δεδομένα αλλά και να φορτώνει δεδομένα που έχει εισάγει στο πρόγραμμα σε παλαιότερες προσομοιώσεις.

Το περιβάλλον διεπαφής που δημιουργήθηκε αποτελείται από τρεις βασικές οθόνες. Την κύρια οθόνη στην οποία ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα των γεννητριών του πλοίου, τη δεύτερη (προγραμματισμός ταξιδιού) είναι αυτή στην οποία θα εισάγονται δεδομένα του πλάνου του ταξιδιού και την τρίτη στην οποία θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ταξιδιού.

Στην κύρια οθόνη καλείται ο χρήστης να συμπληρώσει πεδία (αριθμητικά) που αφορούν τα δεδομένα του πλοίου. Τα δεδομένα που θα εισαχθούν είναι ομαδοποιημένα ως εξής: υπάρχουν δύο πίνακες δεδομένων τα πεδία των οποίων αν και έχουν αρχικές τιμές μπορούν να τροποποιούνται από το χρήστη. Στον πρώτο πίνακα εισάγονται η γεννήτριες με τα χαρακτηριστικά τους (μεγίστη/ελάχιστη παραγωγή, κόστος παραγωγής, κόστος έναρξης κ.α.). Στον δεύτερο πίνακα εισάγονται δεδομένα που αφορούν τα καύσιμα (τιμές και εκπομπές). Εκτός των πεδίων που συμπληρώνονται από τον χρήστη στην κύρια οθόνη έχει επίσης ένα χώρο για την απεικόνιση γραφικών συναρτήσεων.

Στην οθόνη για τον προγραμματισμό του ταξιδιού γίνεται εισαγωγή παραμέτρων (σε έναν πίνακα) που αφορούν το ταξίδι του πλοίου (επιβάτες, ταχύτητα, οχήματα).

Επίσης, και σε αυτήν την οθόνη υπάρχει ένας χώρος για γραφικές παραστάσεις μεγεθών που επιλέγονται από τον χρήστη μέσω μιας ομάδας κουμπιών.

Το τελικό παράθυρο των αποτελεσμάτων απεικονίζει τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης όπου, και εδώ, με ένα μενού κουμπιών επιλογής ο χρήστης θα μπορεί να επιλέξει για να προβάλει γραφικά τα αποτελέσματα αυτά.

Δομή της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αρχικά μία σύντομη αναφορά στο κεφάλαιο 1 στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και κίνησης πλοίων καθώς και στα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία. Συγκεκριμένα, αρχίζει με μια ιστορική αναδρομή της ηλεκτρικής πρόωσης και ακολουθεί η περιγραφή του ηλεκτρικού δικτύου των πλοίων. Μετά γίνεται αναφορά στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης και τελειώνει το κεφάλαιο 1 με μία αναφορά των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της ηλεκτρικής πρόωσης και κατ' επέκταση των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων.

Έπειτα, στο κεφάλαιο 2 παρατίθεται απλοποιημένη απόδοση στα Ελληνικά τμημάτων της επιστημονικής δημοσίευσης του επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας Δρ. Φώτιου Κανέλλου,

F. D. Kanellos, “*Optimal Power Management with GHG Emissions Limitation in All Electric Ship Power Systems comprising Energy Storage Systems*”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, issue 1, pages: 330 -339, January 2014.

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας γίνεται η περιγραφή του αλγορίθμου βέλτιστης διαχείρισης της ενέργειας σε ηλεκτροκίνητο πλοίο, παρατίθενται όλες οι μαθηματικές εξισώσεις του αλγόριθμου που αναπτύχθηκε από τον επιβλέποντα της εργασίας και ο οποίος θα καλείται από το γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μία σύντομη περιγραφή του εργαλείου GUIDE που διαθέτει η Matlab και των δυνατοτήτων που παρέχει στο χρήστη. Έπειτα περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που έγιναν για την ανάπτυξη του περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη. Τέλος, παρατίθενται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, τα συμπεράσματα και ιδέες για την επέκταση της εργασίας.

Κεφάλαιο 1

Ηλεκτρική πρόωση

1.1 Ηλεκτρική πρόωση πλωτών μέσων μεταφοράς

Τα ηλεκτρικά συστήματα κίνησης είναι επωφελή σε πολλές εφαρμογές πλοίων με διαφορετικά προφίλ ταχύτητας, όπως σκάφη εφοδιασμού, πλωτά σκάφη παραγωγής, πλοία-γεωτρύπανα, δεξαμενόπλοια, παγοθραυστικά, πολεμικά πλοία και κρουαζιερόπλοια. Η βασική ιδέα με τέτοια συστήματα είναι η αντικατάσταση των κύριων πετρελαιομηχανών πρόωσης με ηλεκτρικούς κινητήρες, και ο διαχωρισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές μικρότερες γεννήτριες. Οι ηλεκτρικοί προωστήρες μπορούν να σχεδιαστούν για πολύ υψηλές αποδόσεις σε όλο το φάσμα της λειτουργίας τους όσο αφορά την ταχύτητα και την ιπποδύναμη, σε αντίθεση με τους κλασικούς πετρελαιοκινητήρες που έχουν μια σαφή καθορισμένη αιχμή στην απόδοση τους γύρω ονομαστικό σημείο λειτουργίας τους. Ένα πλοίο του οποίου ποικίλλει η ταχύτητά του θα είναι σε θέση να λειτουργεί με υψηλή απόδοση σε όλο το φάσμα της λειτουργίας του, επιλέγοντας το βέλτιστο αριθμό των γεννητριών για την παροχή της επιθυμητής ζήτησης ισχύος. Για ένα συμβατικό σύστημα πρόωσης με ντίζελ η απόδοση θα μειωθεί σημαντικά για τη λειτουργία έξω από την ονομαστική του λειτουργία [2]. Η ηλεκτρική πρόωση αποτελεί μια νέα τεχνολογία πάνω στα πλοία και το γεγονός ότι έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πολύ πρόσφατα αποτελεί περιοχή έρευνας για διάφορους κλάδους της μηχανικής. [3]

Στην ηλεκτροπρόωση η κίνηση των προωστήρων γίνεται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Οι συμβατικοί κινητήρες εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως. Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της (αυξομείωση στροφών ή αλλαγή φοράς των ηλεκτρικών κινητήρων).

Επίσης σε κάθε είδους σκάφος (επιβατικό, εμπορικό, τάνκερ, πλοίο ή πλατφόρμα εργασιών/διάτρησης κ.α.), οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι παρούσες, εκτός από την εγκατάσταση υψηλής ισχύος για την ηλεκτρική πρόωση για την πλεύση, για την τροφοδότηση του εξοπλισμού των εργασιών (π.χ. εξοπλισμός γεωτρήσεων), την λειτουργία διάφορων συστημάτων και την λειτουργία του πλοίου (φορτία διανομής).

Για μεγάλο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρικά συστήματα των πλοίων ήταν συνεχούς ρεύματος. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται την δεκαετία του 1950 όμως τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης συνεχίζουν να βασίζονται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Κατά την τελευταία 25ετία, με την ανάπτυξη κατάλληλης τεχνολογίας (διατάξεις και τεχνικές ελέγχου κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος), δόθηκε η δυνατότητα για την ευρεία διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης εφόσον, πλέον, ικανοποιούνταν οι απαιτήσεις τόσο από πλευράς ευελιξίας όσο και από κατανάλωσης καυσίμου.



Εικόνα 1. 1 Προωστήρας azimuth του παγοθραυστικού "Vitus Bering" [10]

Μία νέα έννοια η οποία ήταν πολύ επιτυχής από την δεκαετία του '90, ήταν η εισαγωγή αξιμουθιακών προωστήρων (εικόνα 1.1), η οποία προσέφερε στα πλοία ευελιξία στις κινήσεις, ευκολία στις διελεύσεις από περιοχές υψηλής κινητικότητας και τη δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησής τους (dynamic positioning – DP). [2]

Στην αρχή η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε εφαρμογές σε συγκεκριμένα πλοία εφαρμογών (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων). Όμως κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κ.λπ.. Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

- α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων (π.χ. πλοία διάτρησης).
- β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- γ. Σκάφη με έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.

δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.

ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Επίσης οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών που επαυξάνουν την ελκτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων). [3]

1.2 Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης

Κατά τα τέλη του 19^{ου} αιώνα σε Ρωσία και Γερμανία έλαβαν χώρα πειραματικές εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης τροφοδοτούταν απευθείας από συστοιχίες συσσωρευτών. Γύρω στα 1920, λόγω του μεγάλου ανταγωνισμού για την μείωση εκτέλεσης υπερατλαντικών ταξιδιών από τις ναυτιλιακές εταιρίες επιβατικών πλοίων, εφαρμόζεται η πρώτη γενιά ηλεκτροπρόωσης. Η μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης καλύπτονταν τότε στρόβιλο-ηλεκτρικά συστήματα.



Εικόνα 1.2 Το πλοίο S/S Normandie χρησιμοποιούσε ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον ατλαντικό κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους. (πηγή en.wikipedia.com)

Οι σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες τροφοδοτούνταν από ατμογεννήτριες και η περιστροφική ταχύτητα δινόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Σε κανονική λειτουργία, συνήθως, οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν κάθε μηχανή πρόωσης ξεχωριστά, υπήρχε όμως και η δυνατότητα τροφοδότησης δύο μηχανών από μία γεννήτρια για ταξίδι χαμηλότερης ταχύτητας.

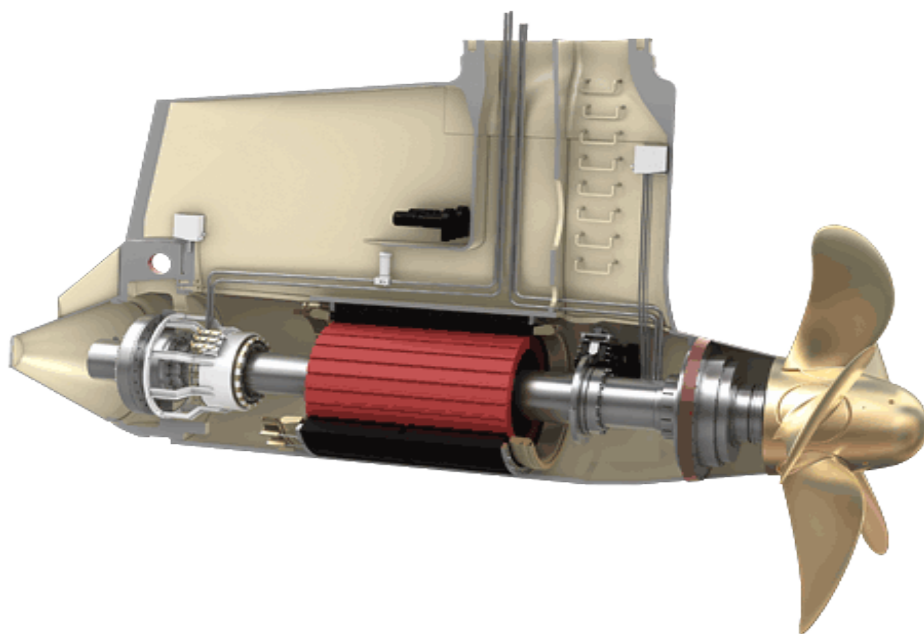
Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα η εισαγωγή των μηχανών diesel, σήμανε το τέλος της τεχνολογίας στρόβιλων ατμού και της ηλεκτρικής πρόωσης, τουλάχιστον μέχρι τη δεκαετία του '80.

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα επανήλθαν με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και κυρίως των συστημάτων οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων. Η δεύτερη γενιά ηλεκτροπρόωσης πραγματοποιείται μέσω των ανορθωτών (E.P./Σ.Ρ.) για τον έλεγχο προωστικών μηχανών Σ.Ρ., περί το 1970 και με τη χρήση των μετατροπέων E.P./E.P. για τον έλεγχο μηχανών το 1980. Το προωστήριο σύστημα τροφοδοτείται πλέον από ένα ισχυρό δίκτυο σταθερής τάσης

και συχνότητας. Μέσω του ελέγχου των στροφών των ηλεκτρικών κινητήρων στρέφονται οι έλικες σταθερού βήματος (fixed pitch propellers (FPP)).

Αν και αυτές οι λύσεις αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε ειδικές κατηγορίες πλοίων όπως ερευνητικά και παγοθραυστικά από το 1975 μετατρέπονται σε ηλεκτροκίνητα και άλλα πλοία όπως κρουαζιερόπλοια, τάνκερ κ.α. (Queen Elizabeth II, Fantasy, Princess). Σημειώνεται ότι στην άμεσα οδηγούμενη πετρελαιοκίνητη πρόωση η ώση ελέγχεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος αλλαγής του βήματος των ελίκων. Οι έλικες αυτές είναι γνωστές ως έλικες μεταβλητού βήματος (controllable pitch propellers (CPP)). [3]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα (podded propulsion) εμφανίστηκε στις αρχές του 1990. Βάσει αυτού ο ηλεκτροκινητήρας είναι τοποθετημένος εντός ενός βυθισμένου λοβοειδούς εξωτερικού περικαλύμματος (pod) με ένα πολύ κοντό άξονα στην προπέλα ή είναι απευθείας η προπέλα συνδεδεμένη με τον κινητήρα (εικόνα 1.3). Το εξωτερικό περικάλυμμα μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα κατά 360° , προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία και ευελιξία (maneuverability) και η έλικα είναι σταθερού βήματος. Τα εξωτερικά περικαλύμματα αντικαταστούν τα συμβατικά πηδάλια και η συνολική υδροδυναμική απόδοση αυξάνεται για το σκάφος. [2],[3],[5],[7]



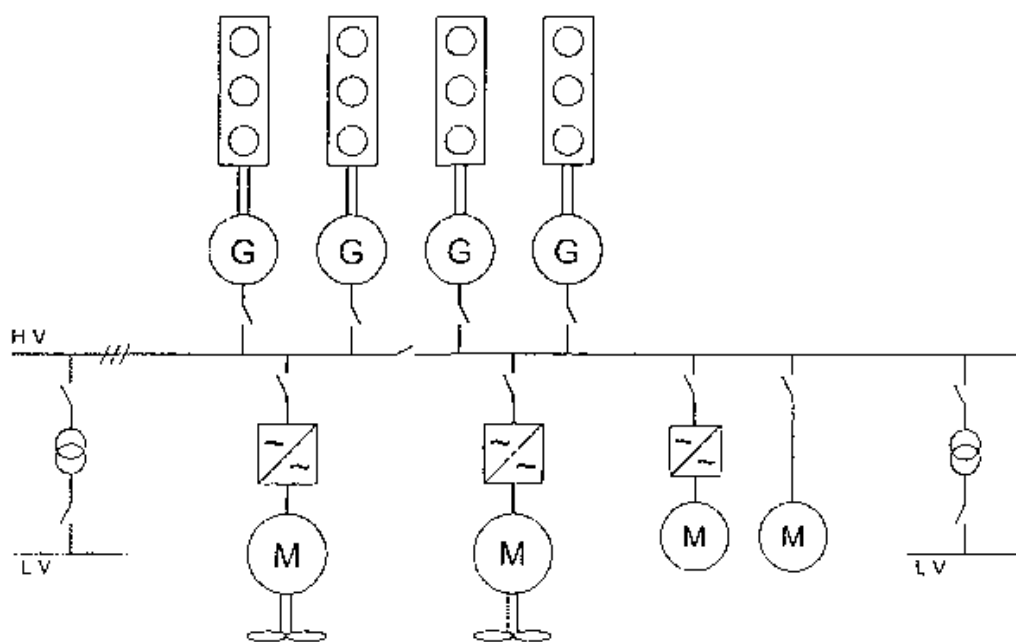
Εικόνα 1.3 Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα (εσωτερικό)

1.3 Περιγραφή του ηλεκτρικού δικτύου πλοίων

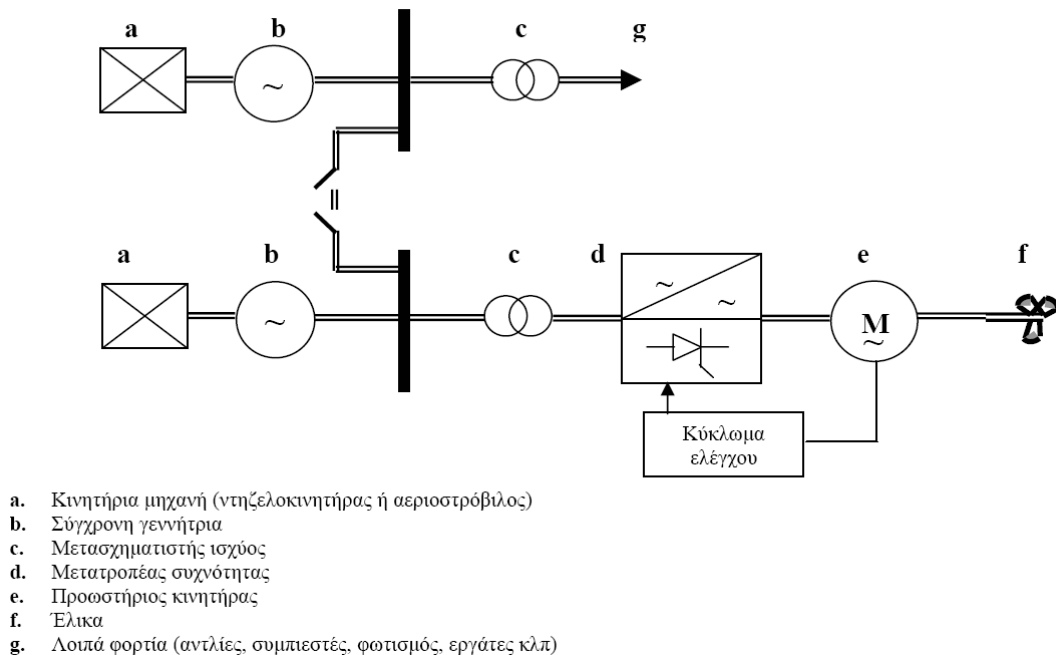
1.3.1 Συστήματα παραγωγής ενέργειας

Το σχήμα 1.1 δείχνει μια τυπική διαμόρφωση ενός πετρελαιο-ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης, με μερικά από τα συστατικά του. Συνήθως χρησιμοποιούνται Ντίζελογεννήτριες με σύγχρονες μηχανές (συνήθως 3-8 μονάδες) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται αεριοστρόβιλοι ως κύριοι κινητήρες (ή σε συνδυασμό με κινητήρες ντίζελ), συνήθως για μεγάλες απαιτήσεις ισχύος, με κυμαινόμενη παραγωγή και/ή όταν το φυσικό αέριο είναι εύκολα διαθέσιμο. Οι γεννήτριες παρέχουν ενεργή (P) και άεργη (Q) ισχύ στον κύριο πίνακα. Αυτός ο πίνακας διαιρείται σε δύο ή περισσότερα τμήματα για την εξασφάλιση πλεονάσματος. Το επίπεδο τάσης θα ποικίλει με την εγκατεστημένη ισχύ, συνήθως 11kV για εγκατεστημένη ισχύ άνω των 20 MW. Η υψηλή τάση είναι αναγκαία για να διατηρηθεί το ρεύμα βραχυκυκλώματος και το ρεύμα φορτίου χαμηλά. [2]

Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα, αυτό της ηλεκτροπρόωσης κι εκείνο των υπόλοιπων ηλεκτρικών φορτίων (σχήμα 1.2). [3]



Σχήμα 1.1 Μια τυπική διάταξη ενός πετρελαιο-ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης, με ντίζελογεννήτριες, μονάδες προωθητήρα μεταβλητής ταχύτητας, συμβατικά φορτία κινητήρα και δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. [7]



Σχήμα1. 2 Γενικό διάγραμμα συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου. [7]

Μια ειδική περίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες (shaft generators) που στρέφονται από την κύρια μηχανή πρόωσης του πλοίου τα οποία βρίσκονται σε πλοία με συμβατική πρόωση. Οι γεννήτριες αυτές μπορεί είτε να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο Σ.Ρ. (DC link) είτε να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης (bow thrusters). Σπανιότερα και σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημία στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλ. ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό. [3]

Σημαντικά διαφορετικό είναι το ηλεκτρικό σύστημα της νέας γενιάς υποβρυχίων στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από κυψέλες καυσίμου (fuel cells) (και αποθηκεύεται συστοιχίες συσσωρευτών Σ.Ρ.) για να τροφοδοτήσει καταναλώσεις Σ.Ρ. αλλά και Ε.Ρ. μέσω μετατροπέων Σ.Ρ./Ε.Ρ.. Ηλεκτρογεννήτριες Ε.Ρ. που κινούνται με κινητήρες diesel υφίστανται μεν, αλλά δεν αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι κινητήρες πρόωσης είναι Ε.Ρ.. [3]

1.3.2 Καταναλωτές Ενέργειας

Οι κύριοι καταναλωτές ενέργειας είναι συνήθως το σύστημα πρόωσης και οι μονάδες προωθητήρων, η οποίες μπορεί να είναι διαφόρων τύπων. Οι προπέλες μπορεί να

έχουν είτε σταθερό είτε μεταβλητό βήμα. Για την πρόωση χρησιμοποιούνται ασύγχρονοι ή σύγχρονοι κινητήρες, όπου οι δεύτεροι χρησιμοποιούνται για την υψηλότερη ονομαστική τους ισχύ. Συνήθως, για μεγάλα πλοία, όπως τα μεγάλα οχηματαγωγά ή τα κρουαζιερόπλοια τα οποία έχουν ένα ζευγάρι των κύριων προωθητήρων (προπελών) και αρκετούς άλλους μικρότερους χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες για την κύρια πρόωση και ασύγχρονοι κινητήρες για τους βοηθητικούς προωθητήρες. Άλλα πλοία, με πολλούς μεσαίου μεγέθους προωθητήρες, μπορεί να έχουν ασύγχρονους κινητήρες για όλους τους προωθητήρες. Για τις μονάδες πρόωσης οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, είναι:

- **οι μετατροπείς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού (Pulse Width Modulated (PWM)converters)**, όπου διατηρείται σταθερή τη συχνότητα έναυσης και σβέσης του στοιχείου και μεταβάλλεται ο χρόνος αγωγής. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να έχουμε αμφίδρομη ροή ρεύματος αλλά η πολικότητα της τάσης θα πρέπει να παραμείνει η ίδια.
- **οι Αναστροφείς Μεταγωγών Φορτίων (Load Commutated Inverters (LCI)** οι οποίοι πρόκειται για ειδική περίπτωση μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI) στην οποία όμως οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνον με τη βοήθεια του φορτίου τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημά τους καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσεως. και
- **οι κυκλομετατροπείς (cycloconverters)** όπου με τις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή Ε.Ρ. συγκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή Ε.Ρ. διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Στην περίπτωση των προωστήριων συστημάτων πλοίων, λαμβάνει χώρα υποβιβασμός συχνότητας (από 50/60 Hz σε 2-3 Hz). [2]

Θεωρητικά όλοι οι συνδυασμοί των προπελών, των κινητήρων πρόωσης και των μετατροπέων μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά πλέον η μεταβλητή ταχύτητα και το σταθερό βήμα της μονάδας του προωθητήρα είναι τα πιο κοινά και στην πράξη οι μετατροπείς PWM χρησιμοποιούνται με ασύγχρονους κινητήρες και οι αναστροφείς μεταγωγών φορτίων (LCI) ή οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται με τους σύγχρονους κινητήρες. [2]

Άλλοι καταναλωτές μπορούν να είναι φορτία για συστήματα αντλιών, συμπιεστών, γεωτρήσεων, κ.λπ. συνήθως με σταθερή ταχύτητα ή μεταβλητή ταχύτητα ασύγχρονων κινητήρων, το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης για βοηθητικά μέσα και το φορτίο διαμονής (hotel load). [2]

Για τα πλοία ειδικού σκοπού όπως πλωτά σκάφη παραγωγής, πλοία ή εξέδρες διάτρησης κ.λπ. με υψηλή ζήτηση ενέργειας για τις διάφορες εργασίες, οι μονάδες των προωθητήρων μπορούν να είναι οι μικροί καταναλωτές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν το πλοίο είναι αγκυροβολημένο και οι προωθητήρες χρησιμοποιούνται μόνο για λόγους διευκόλυνσης πρόσδεσης.[2]

Για κρουαζιερόπλοια, το φορτίο διαμονής μπορεί να αποτελεί ένα μεγάλο μέρος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο, η ζήτηση ενέργειας για την προώθηση είναι συνήθως ο κύριος καταναλωτής.[2]

Για εμπορικά πλοία, δεξαμενόπλοια κ.α. η ζήτηση ενέργειας για πρόωση είναι το κυρίαρχο φορτίο. Ωστόσο, οι μεγάλες εγκαταστάσεις που έχουν για την φόρτωση και την εκφόρτωσή τους όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι ή δυναμικά τοποθετημένο μακριά από την στεριά (dynamic position dp) κάνουν την ισχύ για την πρόωση να είναι χαμηλή. [2]

1.4 Σχεδίαση Ηλεκτρικού Συστήματος Πρόωσης

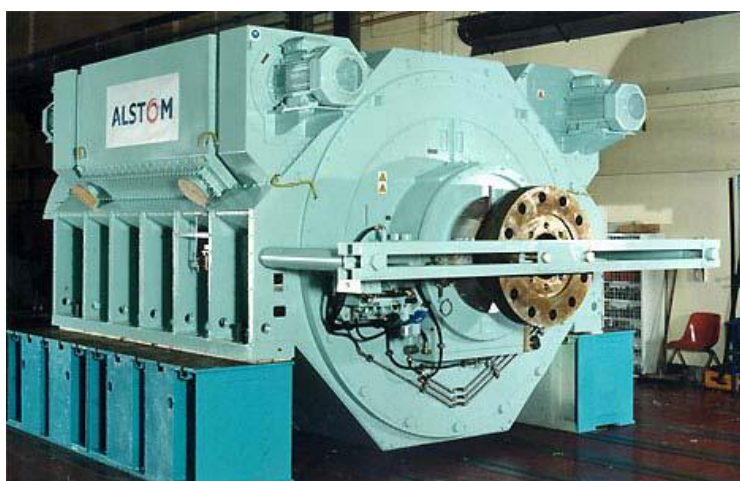
Για τον σχεδιασμό ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτροπρόωσης θα πρέπει να ορίζονται:

1. Το είδος των κινητήριων μηχανών. Πετρελαιοκινητήρες, αεριοστρόβιλοι (για πιο αθόρυβη λειτουργία), ατμοστρόβιλοι (κυρίως για πυρηνοκίνητα σκάφη), συσσωρευτές ή/και ηλεκτροχημικές κυψέλες καυσίμου (fuel-cells) (για υποβρύχια).
2. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, όπως το είδος (DC, AC) και η τιμή της τάσης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος.
3. Ο αριθμός και το είδος των γεννητριών.
4. Η παράλληλη ή μη λειτουργία των γεννητριών.
5. Το ποσοστό αυτοματισμού στη λειτουργία, φόρτωση, παραλληλισμό και κράτηση των γεννητριών.
6. Ο αριθμός και το είδος των κινητήρων προώσεως. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι η μέγιστη ισχύς, ο όγκος και το βάρος ανά μονάδα ισχύος, ο μέσος χρόνος μεταξύ επισκευών και βλαβών και η αποδοτικότητα (βαθμός αποδόσεως).
7. Το είδος ελέγχου-χειρισμού των κινητήρων προώσεως.
8. Ελάχιστες απαιτήσεις σε καταστάσεις ανάγκης .
9. Ο τρόπος έδρασης των μηχανημάτων, καθώς και ο (φυσικός) διαχωρισμός τους, όπως για παράδειγμα των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου προώσεως και χρήσεως, των κινητήρων προώσεως και των ηλεκτρονικών διατάξεων οδήγησής τους.
10. Τοποθέτηση γεννητριών έτσι ώστε να μην παραβιάζονται κλασσικοί κανόνες που σχετίζονται με την ευστάθεια του πλοίου, την ισοκατανομή των φορτίων στο πλοίο, την ακουστική υπογραφή και την ευκολία επισκευής. [3]

1.5 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης

Η ηλεκτροπρόωση αρχικά εφαρμόστηκε με ηλεκτρικούς κινητήρες (συνεχούς ρεύματος), οι οποίοι είχαν και έχουν ακόμα ευρεία χρήση. Πλέον η ηλεκτροπρόωση εφαρμόζεται με σύγχρονους κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τους ασύγχρονους (96 – 98% έναντι 92 – 95%). Ακόμα μεγαλύτερη απόδοση έχουν οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (πάνω από 98%) οι οποίοι αποτελούν μία καινούρια κατηγορία σύγχρονων κινητήρων.

Στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται στο χώρο σύγχρονα με τον δρομέα. Για την ανάπτυξη αυτής της κατηγορίας κινητήρων σημαντικό ρόλο έπαιξε η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων “μονίμων μαγνητών”.

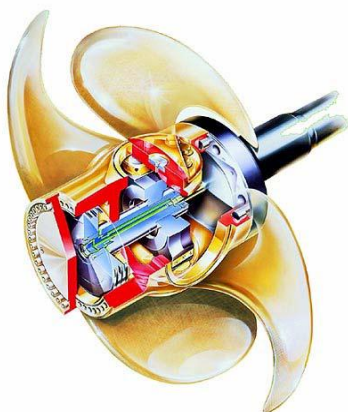


Εικόνα 1.4 Εξελιγμένος επαγωγικός κινητήρας (Advanced Induction Motor-AIM) της ALSTOM. [9]

Άλλοι τύποι κινητήρων είναι οι κινητήρες αξονικής ροής, στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση, δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές, οι πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors) και οι πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors). Οι πρώτοι έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής ενώ οι δεύτεροι έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική). [3]

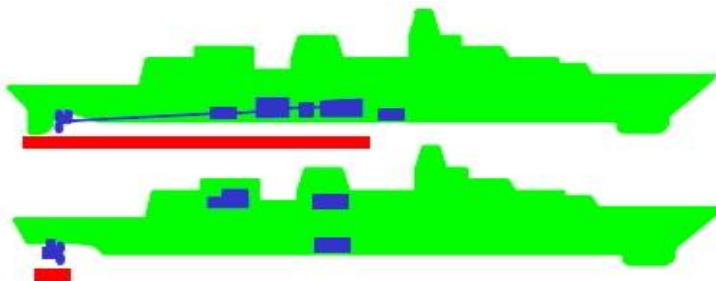
1.6 Συνεργασία έλικα και κινητήρα

Για την εγκατάσταση συστήματος δυναμικής τοποθέτησης σε πλοία (dynamic positioning DP) η ηλεκτρική πρόωση πλέον κυριαρχεί. Κάθε σύστημα DP, σχεδόν, που εφαρμόζεται στα σύγχρονα πλοία οδηγείται από μια ηλεκτρική μηχανή. Αρχικά η χρήση της τεχνολογίας της δυναμικής τοποθέτησης γίνονταν με προωστήρες με έλικες ελεγχόμενου ή μεταβλητού βήματος CPP (controllable pitch propellers (CPP)) ή με προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος FPP (fixed pitch propellers (FPP)) με μεταβλητές στροφές/λεπτό. [2]



Εικόνα 1.5 Έλικα ελεγχόμενου βήματος [4]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι η μείωση του όγκου που καταλαμβάνει το σύστημα πρόωσης στο πλοίο σε σχέση με το αξονικό σύστημα. Επίσης τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν συνεχώς της στροφές. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν στο μέγιστο της ροπής τους σε όλη την διάρκεια λειτουργίας τους. Συνήθως και για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο και πάνω ηλεκτροκινητήρες περίπου ίδιας ισχύος. Η μηχανική ροπή της έλικας είναι ανάλογη του τετραγώνου της μηχανικής ταχύτητας παρόμοια με τις φυγοκεντρικές αντλίες και τους ανεμιστήρες.



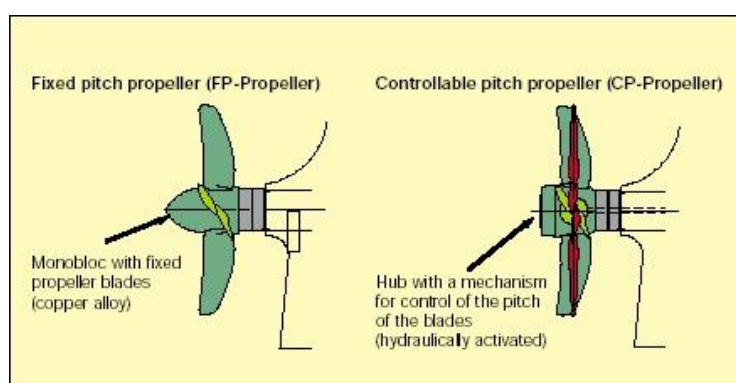
Εικόνα 1.6 Διαφορά καταλαμβανόμενου χώρου στο πλοίο. Πάνω αξονικό σύστημα, κάτω ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης με pod ή azimuth προωστήρες [7]

1.6.1 Έλικα σταθερού βήματος

Οι έλικες σταθερού βήματος είναι ενιαία χυτά κομμάτια και συνήθως κατασκευάζονται από κράμα χαλκού. Η θέση των πτερυγίων (και συνεπώς το βήμα της έλικας) είναι ίση και σταθερή για όλα, με ένα δεδομένο βήμα που δεν μπορεί να αλλάξει κατά την λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι όταν η έλικα λειτουργεί σε συνθήκες, για παράδειγμα άσχημου καιρού, οι καμπύλες απόδοσης της έλικας, δηλαδή ο συνδυασμός ισχύος και ταχύτητας (r/min), θα αλλάζουν ακολουθώντας τους φυσικούς νόμους, και η πραγματική καμπύλη της έλικας δεν μπορεί να μεταβληθεί από το πλήρωμα. Τα περισσότερα πλοία που δεν χρειάζονται ειδικά καλές ελιγκτικές ικανότητες είναι εφοδιασμένα με έλικες σταθερού βήματος. [6]

1.6.2 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος

Οι έλικες μεταβλητού βήματος έχουν μεγαλύτερη πλύμνη σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος, επειδή η πλύμνη πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου της γωνίας (βήματος) των πτερυγίων. Οι έλικες μεταβλητού βήματος είναι σχετικά ακριβές, ίσως 3 με 4 φορές ακριβότερες σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης πλύμνης, η απόδοση της έλικας είναι ελαφρώς χαμηλότερη.



Εικόνα 1.7 Έλικα σταθερού (αριστερά) και μεταβλητού (δεξιά) βήματος [6]

Οι έλικες μεταβλητού βήματος συνήθως χρησιμοποιούνται στα κρουαζιερόπλοια και στα ferries που απαιτούν υψηλές ελεγκτικές ικανότητες. Για τα συνηθισμένα πλοία, όπως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτίου χύδην και τα δεξαμενόπλοια, που πλέουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε κανονική θάλασσα και με δεδομένη ταχύτητα, θα ήταν γενικά αντιοικονομικό να εγκατασταθούν έλικες μεταβλητού βήματος αντί για σταθερού. Επίσης, μια έλικα μεταβλητού βήματος είναι πιο περίπλοκη και συνοδεύεται από υψηλότερο ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατά την λειτουργία. [6]

1.7 Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

1.7.1 Αξονική πρόωση (shaft propulsion)

Σε αυτό το είδος πρόωσης οι έλικες οδηγούνται συνήθως από κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας. Οι ηλεκτρικές μηχανές συνδέονται είτε άμεσα στον άξονα της έλικας, τρόπος απλός και στιβαρός, είτε μέσω μειωτήρων. Η χρήση μειωτήρων, οδηγεί στη χρήση μηχανών σχετικά υψηλών ονομαστικών στροφών, άρα και σε πιο συμπαγείς μηχανές. Το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι περιλαμβάνουν αρκετά μηχανικά υποσυστήματα, οπότε και περισσότερες μηχανικές απώλειες.



Εικόνα 1.8 Αξονική πρόωση [11]

Η αξονική πρόωση εφαρμόζεται σε ντιζελοηλεκτρικά συστήματα πρόωσης όπου η ισχύς τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει ένα αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης, μειώνονται όμως οι ελκτικές του ικανότητες και χρειάζονται έξτρα βοηθητικά μέσα πρόωσης (π.χ. bow thrusters). Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση πηδαλίων για κάθε έλικα. Συνήθως χρησιμοποιούνται έλικες σταθερού βήματος (FPP). Σε ορισμένες εφαρμογές παρόλο που οι στροφές τις έλικας είναι μεταβλητές χρησιμοποιούνται και έλικες μεταβλητού βήματος (CPP), συνδυασμός ο οποίος οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις έλικας. [3]

1.7.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters)

Αυτό το είδος προωστήρων μέσω της περιστροφής τους παράγουν ώση σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Η ώση μπορεί να ελέγχεται είτε από προωστήρες με έλικες ελεγχόμενου βήματος CPP με σταθερές στροφές / λεπτό είτε από προωστήρες με

έλικες σταθερού βήματος FPP με μεταβλητές στροφές / λεπτό είτε ακόμα και με προωστήρες μεταβλητού βήματος και στροφών.

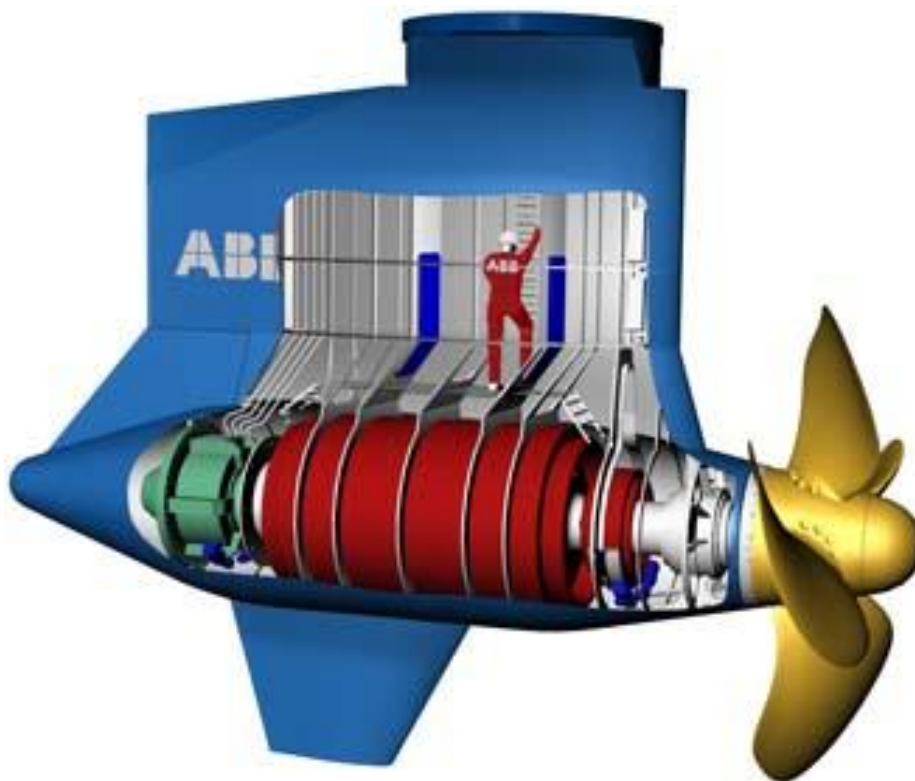
Οι αξιμουθιακοί προωστήρες αρχικά χρησιμοποιούνταν για να κρατούν σταθερή τη θέση ενός πλοίου και για τις μανούβρες του (dp). Τα τελευταία χρόνια ο συνδυασμός τους με την ηλεκτρική πρόωση οδήγησε και στην εφαρμογή τους ως κύρια μέσα πρόωσης σε εφαρμογές της τάξης των 6-7 MW. [3]



**Εικόνα 1.9 Αξιμουθιακός
προωστήρας [8]**

1.7.3 Αξιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod/azipod (podded propulsion)

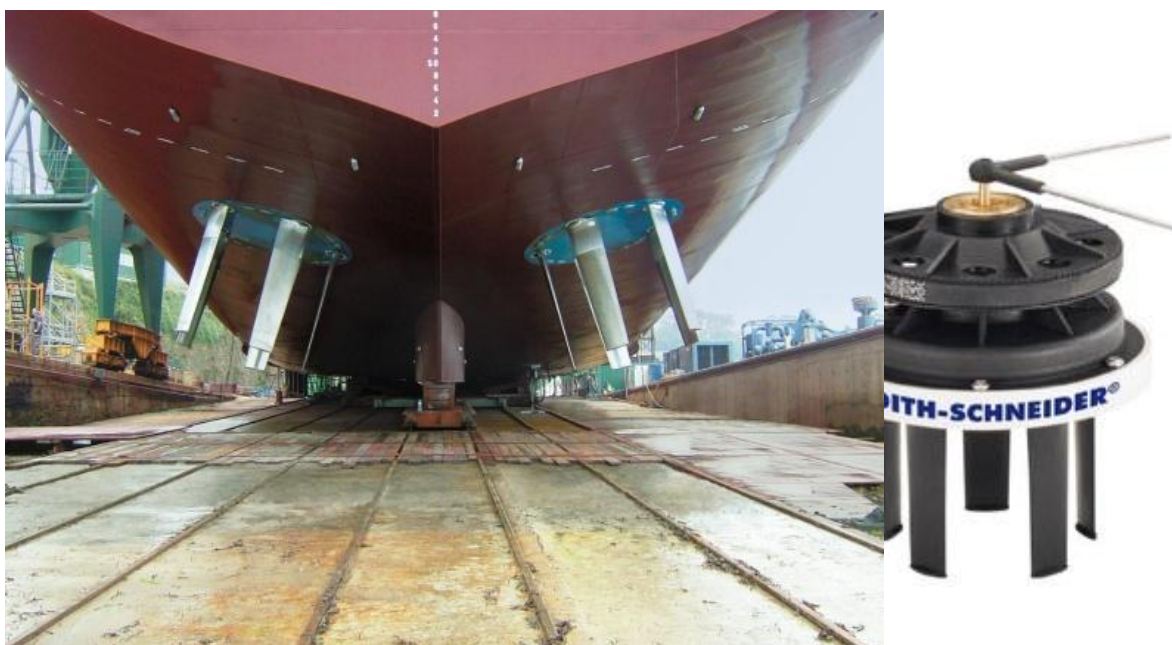
Την τελευταία δεκαετία και παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες. Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360° κατά την αξιμουθιακή διεύθυνση (από όπου προέρχεται και το όνομά του), δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου, ενώ αφενός πρακτικά εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και αφετέρου δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλίου. Το αξιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης της τάξης των 1 – 25MW . [7],[2]



Εικόνα 1.10 Αξιμουθιακό σύστημα πρόωσης [5]

1.7.4 Σύστημα πρόωσης Voith Schneider

Κατά τα τελευταία χρόνια έχει εισαχθεί στην παραγωγή ένας νέος τύπος προωστήρων, οι Voith Schneider. Από μία κυκλική πλάκα, περιστρεφόμενη γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, μία κυκλική συστοιχία κάθετων πτερυγίων (σχήμα υδροπτέρυγα) προεξέχουν έξω από τον πυθμένα του πλοίου. Κάθε λεπίδα μπορεί η ίδια να περιστρέφεται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα. Η εσωτερική ταχύτητα αλλάζει τη γωνία προσβολής των πτερυγίων σε συγχρονισμό με την περιστροφή της πλάκας, έτσι ώστε κάθε λεπίδα μπορεί να παρέχει ώση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση παρέχοντας ικανοποιητικές ταχύτητες πλεύσης αλλά κυρίως πάρα πολύ καλό έλεγχο δυναμικής τοποθέτησης, πράγμα το οποίο βρίσκει χρήση σε πλοία εργασιών. [5]



Εικόνα 1.11 Προωστήρας τύπου Voith Schneider [12]

1.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

1.8.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα:

- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0- 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μια να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.
- Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων διότι:
 - α. η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,
 - β. ιδιαίτερα οι εκπομπές NOx είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.
- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενόπλοιων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.

1.8.2 Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Το υψηλό κόστος επένδυσης. Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να προσπερνιέται εύκολα.

Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ., σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel με έλικα ρυθμιζόμενου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4%: 2% στην έλικα και 2% στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας / βήματος. Σε εγκατάσταση ντίζελο-ηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 - 8%: 3% στις γεννήτριες, 2% στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 - 3% στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσ αυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Έτσι ο «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις –πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος – ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω της εξηλέκτρισης των συστημάτων του πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος.

Κεφάλαιο 2

Βέλτιστη διαχείριση ενέργειας σε πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο

2.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια ανησυχία για την ποιότητα του αέρα και για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (GHG greenhouse gases) έχει οδηγήσει σε αυστηρότερους κανονισμούς την ναυπηγική βιομηχανία. Ως αποτέλεσμα αυτού, υπάρχει μια ολοένα αυξανόμενη προσπάθεια να γίνουν τα ενεργειακά συστήματα των πλοίων πιο αποδοτικά. Επιπλέον, η βέλτιστη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων των πλοίων μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και την αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας των πλοίων. Ως εκ τούτου, καθίσταται επιτακτική ανάγκη η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών που θα μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την κατανάλωση καυσίμου.

Στο πλαίσιο αυτό, το ευρέως γνωστό ως πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (AES - All Electric Ship), έχει γίνει μια ελκυστική τεχνολογία, σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων. Ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο συνδυάζει έννοιες όπως η βέλτιστη διαχείριση ενέργειας, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και την εκμετάλλευση "πράσινων" τεχνολογιών και μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτικά πλοία. Επίσης, το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο επιτρέπει διαμορφώσεις όσο αφορά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς συνδυασμούς των κινητήρων ντίζελ, αεριοστρόβιλων, κυψέλων καυσίμου, συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, ενδεχομένως και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μεγάλη ποικιλία των τεχνολογιών παραγωγής επιτρέπει τη συμμόρφωση του πλοίου στις οδηγίες της ενεργειακής απόδοσης που δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί με καθεμιά τεχνολογία από μόνη της. Ωστόσο, η απόφαση για το κατά πόσο θα χρησιμοποιηθούν οι διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Γενικά κάθε πλοίο είναι μια ξεχωριστή περίπτωση και ο σχεδιασμός του συνήθως βασίζεται στη βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους-οφέλους και στη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του συστήματος ισχύος.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο και να συμβάλλουν στην βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας έχοντας ως επακόλουθα αρκετές θετικές επιπτώσεις, όπως την μείωση της ισχύος των γεννητριών και την περαιτέρω μείωση του κόστους των καυσίμων. Διαφορές τεχνολογίες αποθήκευσης(π.χ. μπαταρίες ροής, υψηλής ισχύος σφόνδυλοι,

και υπερπυκνωτές) με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμα στις μέρες μας, καθιστώντας τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας πιο ελκυστικά.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της λειτουργίας των συστημάτων ισχύος των πλοίων θα πρέπει να αξιολογείται η απόδοση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, σύμφωνα με την πολιτική του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (IMO), η αποδοτικότητα του πλοίου θα πρέπει να αξιολογείται μέσω των ακόλουθων δεικτών:

- δείκτης ενεργειακής αποτελεσματικότητας σχεδιασμού (energy efficiency design indicator, EEDI)
- δείκτης ενεργειακής αποτελεσματικότητας λειτουργίας (energy efficiency operation indicator EEOI)

Τόσο ο EEDI όσο και ο EEOI εκφράζουν την παραγωγή CO₂ ανά χωρητικότητα του πλοίου και έργου μεταφοράς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης ενεργειακής αποτελεσματικότητας σχεδιασμού (EEDI) περιορίζεται σε πλοία όπως φορτηγά, δεξαμενόπλοια, Ro-Ro κ.α.. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του EEDI είναι ότι θεωρεί μόνο ένα σημείο λειτουργίας (υποθέτει λειτουργία στο 75% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος προώσεως) και δεν έχει σχεδιαστεί για να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας των πλοίων. Αντιθέτως, ο δείκτης EEOI είναι πιο κατάλληλος για να αντιπροσωπεύσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε πλοία σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους και μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (AES).

Διάφορα μέτρα είναι υπό μελέτη, προκειμένου να βελτιωθούν οι δείκτες EEDI και EEOI. Ορισμένα από αυτά έχουν ως εξής:

- Ενεργειακή απόδοση και επιδόσεις πλοίου (παρακολούθηση της κατανάλωσης καυσίμου από τις κύριες και τις βοηθητικές μηχανές συνοδευόμενη από ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται με συστήματα υποστήριξης αποφάσεων),
- Βελτιστοποίηση των δρομολογίων και της αποτελεσματικότητας του ταξιδιού,
- Επιβράδυνση της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου (slow-steaming),
- Αποδοτικά μέσα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και έξυπνης διαχείρισής της.

Για τους παραπάνω λόγους, στο εγγύς μέλλον τα παραδοσιακά πλοία, καθώς επίσης και τα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία πρέπει να έχουν ένα καλά σχεδιασμένο πλάνο ενεργειακής διαχείρισης και αύξησης της απόδοσής τους (Ship Energy Efficiency Management Plan SEEMP). Οι κύριοι στόχοι του SEEMP δηλαδή η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και ο περιορισμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, θα μπορούσαν να μην είναι συμβατοί μεταξύ τους. Υπό αυτή την άποψη, πρέπει να γίνεται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του κόστους με περιορισμούς που οδηγούν σε «πράσινη» και χαμηλού κόστους λειτουργία. Σημειώνεται εδώ ότι, η διαχείριση του ηλεκτρικού φορτίου των πλοίων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που

συμβάλλει σημαντικά στην μείωση του κόστους λειτουργίας των πλοίων και στην οικολογικά φιλική λειτουργία τους. Σε αυτό το πλαίσιο, η βέλτιστη ρύθμιση της ταχύτητας του πλοίου, σύμφωνα με την μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου θα μπορούσε να οδηγήσει σε περαιτέρω βελτίωση της αποδοτικότητας των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων. Αυτό είναι ένα ακόμη μέτρο που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο για τον έλεγχο του δείκτη ενεργειακής αποτελεσματικότητας λειτουργίας του πλοίου (EEOI) και τη μείωση του κόστους λειτουργίας. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως τα όρια ταχύτητας του πλοίου και των χρόνων άφιξης στους ενδιάμεσους αλλά και τον τελικό προορισμό.

Η βέλτιστη διαχείριση ενέργειας στα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία είναι ένα πολύ δύσκολο και σύνθετο πρόβλημα. Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφεται μια μέθοδος για τη βέλτιστη διαχείριση ενέργειας και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου λαμβάνοντας υπόψη τα ισοζύγια ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος και όλους τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς ενός πλοίου. Υπό την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμη η πρόβλεψη του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου, η περιγραφείσα μέθοδος βελτιστοποιεί την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την ταχύτητα πλεύσης του πλοίου. Λόγω της εγγενούς αυξημένης πολυπλοκότητας του εξεταζόμενου προβλήματος, αυτό λύνεται χρησιμοποιώντας δυναμικό προγραμματισμό.

2.2 Δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Ο υπολογισμός του δείκτη EEDI βασίζεται μόνο σε δεδομένα του σχεδιασμού του πλοίου, και αντιπροσωπεύει τις εκπομπές CO₂ σε ένα μόνο σημείο λειτουργίας του και όχι για την πλήρη λειτουργία του πλοίου. Ο δείκτης EEDI μετριέται σε γραμμάρια CO₂ ανά τόνο μεταφορικού έργου κατά ένα ναυτικό μίλι (gCO₂/t/nm). Αν και η δημιουργία του EEDI είναι μια ενέργεια προς τη σωστή κατεύθυνση, οι πραγματικές εκπομπές που παράγονται από ένα πλοίο μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από εκείνες που δείχνει ο δείκτης EEDI, ενώ περιορίζεται σε συγκεκριμένους τύπους πλοίων μη περιλαμβάνοντας εκείνα που διαθέτουν πλήρη ηλεκτροκίνηση. Το γεγονός αυτό προέτρεψε την Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του IMO να προσδιορίσει και να αναπτύξει μηχανισμούς που απαιτούν την επίτευξη του περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία και, με αυτό τον τρόπο, να δοθεί προτεραιότητα στη δημιουργία μιας κατώτατης βάσης όσο αφορά τα αέρια του θερμοκηπίου και την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που να περιγράφει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου των πλοίων κατά τη λειτουργία του πλοίου.

Σε αυτό το πλαίσιο, έχει αναπτυχθεί ο δείκτης EEOI με βάση κάποιες γενικές κατευθυντήριες γραμμές και με προτροπή προς τους διαχειριστές των πλοίων να τις εφαρμόσουν και να επιστραφεί ανατροφοδότηση της εμπειρίας από την εφαρμογή τους. Ο EEOI ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του εκπεμπόμενου CO₂ ανά μονάδα μεταφορικού έργου.

$$EEOI = \frac{mCO_2}{\text{μεταφορικό έργο}} \quad (1)$$

Ο δείκτης αυτός μπορεί να τροποποιηθεί ελαφρώς για διευκόλυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, εάν αναφερθεί σε ένα αυθαίρετο χρόνο παρατήρησης διαστήματος Δt_j ως εξής:

$$EEOI_j = \frac{mCO_2}{LF \cdot V_j \cdot \Delta T_j} = \frac{\sum_i c_i \cdot P_{ij} \cdot SFC_i(P_{ij})}{LF \cdot V_j} \quad (2)$$

Όπου,

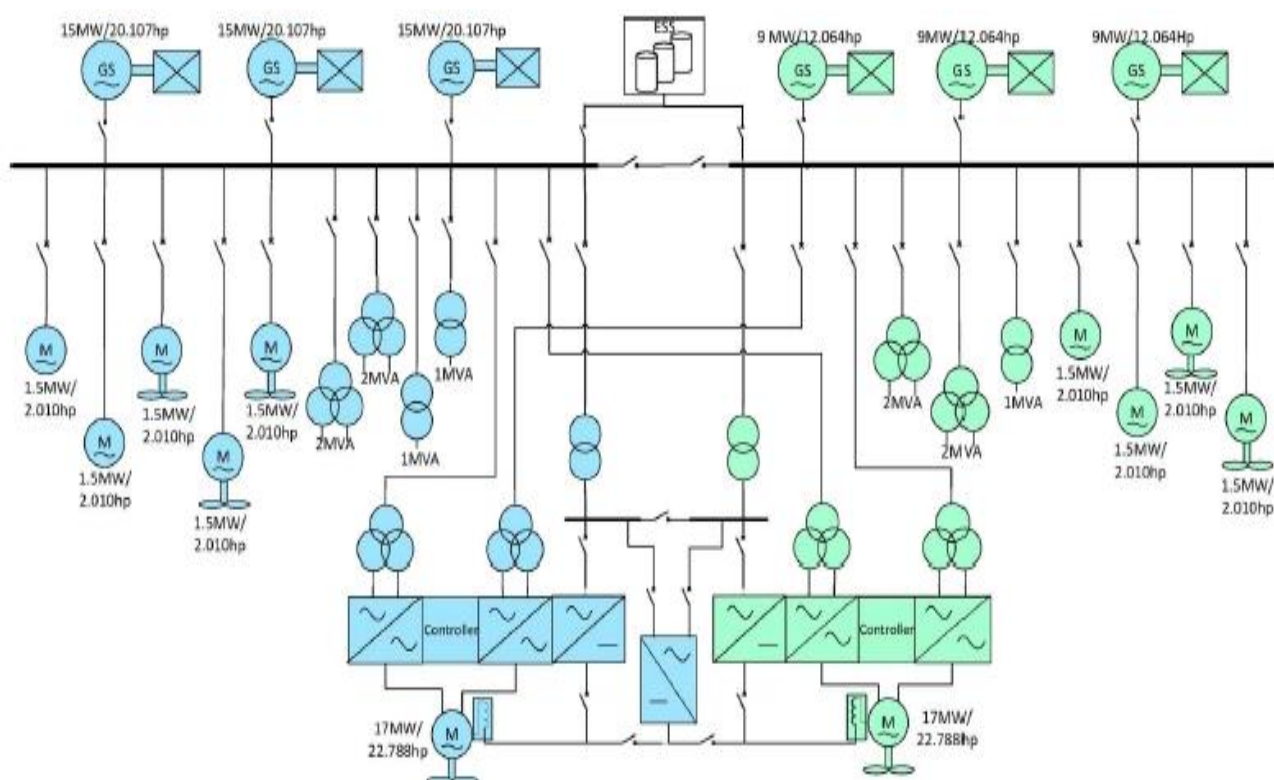
- i είναι ένας δείκτης που δηλώνει την ηλεκτρική γεννήτρια i ,
- j είναι ένας δείκτης που δηλώνει το χρονικό διάστημα j ,
- ΔT_j είναι το χρονικό διάστημα j της χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης.
- LF είναι ο συντελεστής φορτίου του πλοίου,
- V_j Ταχύτητα πλοίου στο χρονικό διάστημα j ,
- c_i είναι ο συντελεστής μετατροπής που απαιτείται για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων (grCO / grFuel) της γεννήτριας i ,
- P_{ij} η ισχύς που παράγεται από την τη γεννήτρια i στο χρονικό διάστημα j και
- SFC_i είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (grFuel / MWh) της γεννήτριας i .

Ο ορισμός του ΕΕΟΙ είναι σύμφωνος με τις οδηγίες που εκδόθηκαν από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO). Ο συντελεστής φορτίου του πλοίου LF εξαρτάται από τον τύπο του εξεταζόμενου πλοίου, π.χ. επιβατηγά πλοία, κρουαζιερόπλοια, κλπ.

2.3 Περιγραφή συστήματος πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES)

2.3.1 Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η μεγάλη καινοτομία που εισήγαγε η έννοια των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων είναι ότι η πρόωση του πλοίου γίνεται πλέον από μεγάλους ηλεκτροκινητήρες οι οποίοι καθοδηγούνται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος επιτρέπουν την συνεχή λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων (στροφών) χωρίς να επηρεάζεται η κύρια ταχύτητα πρόωσης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγάλη λειτουργική ευελιξία και οικονομία καυσίμου. Επιπλέον, παύει να υπάρχει η ανάγκη για μεγάλους άξονες μεταξύ της προπέλας και των κινητήρων



Εικόνα 2. 1 Διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (AES).

Υποτίθεται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του εξεταζόμενου συστήματος σε πλοία αποτελείται από N_g θερμοηλεκτρικές γεννήτριες οι οποίες συνδέονται με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τροφοδοτούν το φορτίο του πλοίου και τους

ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης. Το διάγραμμα πλοίου το οποίο διαθέτει πλήρη ηλεκτροκίνηση και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας φαίνεται στην εικόνα 2.1. Στη συνέχεια, παρατίθενται διάφορες έννοιες που είναι χρήσιμες στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου.

2.3.2 Χρονολογική καμπύλη φορτίου

Η χρονολογική καμπύλη φορτίου του πλοίου καθορίζει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα, T , ο οποίος διαιρείται σε διαστήματα ΔT_j με $j=1,2,\dots,T$. Σε κάθε χρονικό διάστημα ΔT_j , το αντίστοιχο ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου L_j θεωρείται σταθερό και υπολογίζεται από την συνάρτηση:

$$L_j = \frac{1}{\Delta T_j} \cdot \int_{t_{j-1}}^{t_j} L(t) \cdot dt \quad (3)$$

με

$$j = 1, \dots, T, \quad \Delta T_j = t_j - t_{j-1} \quad (4)$$

Στην ανάλυση που ακολουθεί, το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου (L_j) χωρίζεται σε δύο μέρη που αντιπροσωπεύουν την ηλεκτρική ισχύ της πρόωσης (P_{Propj}) και το ηλεκτρικό φορτίο των διαφόρων άλλων υπηρεσιών του πλοίου (L_{servj}):

$$L_j = P_{Propj} + L_{servj} \quad (5)$$

Στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, η ισχύς πρόωσης αποτελεί ένα μεγάλο μέρος του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου. Η ισχύς πρόωσης, αν ρυθμιστεί κατάλληλα, χωρίς να παραβιάζονται οι χρονικοί περιορισμοί του ταξιδιού και οι περιορισμοί της ταχύτητας του πλοίου, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου.

2.3.3 Συνάρτηση Κατανάλωσης Καυσίμου

Σε γενικές γραμμές, η συνάρτηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για την γεννήτρια i , SFC_i (grFuel / MW), μειώνεται σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ έως το κρίσιμο σημείο όπου επιτυγχάνεται η πιο οικονομική λειτουργία ενώ εν συνεχεία αυξάνεται φτάσουμε στην ονομαστική ισχύ. Η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου (FC) της γεννήτριας i εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ, και αυτό μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από πολυώνυμα δευτέρας τάξεως.

Έτσι, η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμων FC_i της θερμικής μονάδας i δίνεται από τον τύπο:

$$FC_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i}P_i + a_{2i}P_i^2, \quad P_{min,i} \leq P_i \leq P_{max,i} \quad (6)$$

Η συνάρτηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον προσδιορισμό του πλέον οικονομικού σημείου λειτουργίας μιας γεννήτριας. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC_i) υπολογίζει την κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας i ανά παραγόμενο kW ανά ώρα (grFuel/MWh). Χαρακτηριστική γραφική παράσταση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται ως εξής:

$$SFC_i(P_i) = \frac{FC_i(P_i)}{P_i} = \frac{a_{0i}}{P_i} + a_{1i} + a_{2i} \cdot P_i, \quad P_{min,i} \leq P_i \leq P_{max,i} \quad (7)$$

Το συνολικό κόστος των καυσίμων (TFC_j) στο χρονικό διάστημα ΔT_j υπολογίζεται ως το άθροισμα των δαπανών καυσίμου όλων των γεννητριών ως εξής:

$$TFC_j = \sum_{i=1}^{N_g} Fuel_{Cost_i} \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j \quad (8)$$

$$\mu\epsilon \quad FC_i(P_{ij}) = P_{ij} \cdot SFC_i(P_{ij}) \quad (9)$$

Όπου,

- Fuel_Cost_i είναι το μοναδιαίο κόστος του καυσίμου που καταναλώνεται από τη γεννήτρια i (mu / grFuel),
- FC_i η ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται από τη γεννήτρια i (mu / grFuel) και
- SFC_i η ειδική κατανάλωση καυσίμου για την γεννήτρια i , (grFuel / MWh).

Το συνολικό κόστος καυσίμου TFC του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου για ολόκληρη την περίοδο του χρόνου υπολογίζεται ως το άθροισμα:

$$TFC = \sum_{j=1}^T TFC_j \quad (10)$$

2.3.4 Συνάρτηση παραγόμενων εκπομπών

Υποτίθεται ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι ανάλογες των καταναλισκόμενων καυσίμων. Κατά συνέπεια, το καύσιμο που καταναλώνει η γεννήτρια i μετατρέπεται σε εκπομπές CO₂ με ένα συντελεστή μετατροπής c_i . Οι εκπομπές CO₂ μπορεί να εκτιμηθούν για το χρονικό διάστημα ΔT_j ως:

$$mCO_{2,i} = \sum_i c_i \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j \quad (11)$$

Όπου,

- P_{ij} είναι η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια i κατά το χρονικό διάστημα j .
- FC_j είναι το αποτέλεσμα που δίνει η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου το χρονικό διάστημα j ,
- c είναι ένας συντελεστής μετατροπής για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων (grCO / grFuel),
- ΔT_j είναι το χρονικό διάστημα j της χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης T .

2.3.5 Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage System (ESS))

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στη βέλτιστη λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου και την αύξηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποθηκεύει την περισσευούμενη ενέργεια που παράγεται από τις ηλεκτρικές γεννήτριες ή συμπληρωματικά τροφοδοτεί το φορτίο. Οι μπαταρίες αποτελούν μια επιλογή για την αποθήκευση της ενέργειας που είναι κατάλληλη για ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο. Θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες ροής (flow batteries) καθώς σήμερα είναι διαθέσιμες για σχετικά μεγάλες και σταθερές εφαρμογές σε απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όπως τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων, εξομαλύνοντας και επιτυγχάνοντας την αδιάλειπτη τροφοδοσία της ισχύος.

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας έχει κατώτατο όριο την ελάχιστη αποθηκευμένη ενέργεια $E_{ESS,min}$ που ορίζεται από το επίπεδο της αξιοπιστίας που θέλουμε να επιτύχουμε και την επάρκεια του αποθέματος ενέργειας και ανώτατο όριο $E_{ESS,max}$ που ορίζεται από τις τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος αποθήκευσης. Επίσης, η ισχύς που παράγεται ή απορροφάται από το σύστημα αποθήκευσης περιορίζεται, έχοντας άνω και κάτω όρια τα οποία εξαρτώνται από την τεχνικά μέγιστη και ελάχιστη ισχύ, αντιστοίχως.

2.3.6 Καμπύλη ταχύτητας - ισχύς πρόωσης

Η καμπύλη ταχύτητας - ισχύος πρόωσης εξαρτάται από την αντίσταση του ατράκτου του πλοίου σε συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου ή τις καιρικές συνθήκες) και προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$P_{Prop} = c_1 \cdot V^{c_2} \quad (12)$$

Όπου,

- V είναι η ταχύτητα του πλοίου,
- P_{Prop} είναι η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης για να αναπτυχθεί ταχύτητα V ,
- c_1 είναι ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ισχύος πρόωσης σε ταχύτητα του πλοίου και
- c_2 είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη μορφή του σκαριού ($c_2 = 3$ για συμβατικές μορφές σκαριού).

Εάν κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος ΔT_j η ταχύτητα του πλοίου είναι V_j' , ενώ η προγραμματισμένη ταχύτητα είναι V_j , τότε άμεσα προκύπτει από την (12) ότι η απαιτούμενη απόκλιση της ισχύος πρόωσης από την προγραμματισμένη της τιμή είναι:

$$\Delta P_{Prop,j} = c_1 \cdot (V_j'^{c_2} - V_j^{c_2}) \quad (13)$$

Όπου,

- V είναι η ταχύτητα του πλοίου το χρονικό διάστημα j ,
- ΔP_{Prop} είναι η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης για να αναπτυχθεί ταχύτητα V ,

2.4 Η γενική ιδέα της βελτιστοποίησης

Στη συνέχεια περιγράφονται οι περιορισμοί και γίνεται η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την επίτευξη του ελάχιστου κόστους λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου και του περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να αποτελείται από περισσότερα του ενός σταδίου στη περίπτωση πολύπλοκων συστημάτων. Π.χ. στο πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης μπορεί να υπολογίζεται η ισχύς που παράγεται / απορροφάται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για κάθε χρονικό διάστημα ΔT_j λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Ακολουθώντας, υπό την προϋπόθεση ότι η ισχύς του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας εκτιμήθηκε στο πρώτο στάδιο, μπορεί να εκτιμηθεί η βέλτιστη ισχύς πρόωσης έτσι ώστε να εξακολουθούν να ικανοποιούνται οι τεχνικοί περιορισμοί του συστήματος.

2.4.1 Λειτουργικοί και τεχνικοί περιορισμοί

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου επιβάλλει διάφορους περιορισμούς και όρια τα οποία θα πρέπει να εφαρμόζονται προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος ισχύος και να ακολουθηθούν οι φυσικοί κανόνες που το διέπουν. Οι περιορισμοί αυτοί δίνονται εδώ.

- *Ισοζύγιο ισχύος*: Εξασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τη σταθερότητα της συχνότητας.
- *Φόρτιση γεννητριών*: η γεννήτρια δεν θα πρέπει να φορτίζεται πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο ισχύος πέρα από ένα συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο λόγω της αύξησης των μηχανικών καταπονήσεων και επειδή τότε είναι περιορισμένη η αποτροπή μιας διακοπής λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, ο κινητήρας δεν θα πρέπει να φορτίζεται κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο ισχύος που καθορίζεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα, προκειμένου να μειωθεί κόστος συντήρησης και η αποφυγή πιθανών ζημιών.
- *Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου*: ο δείκτης ΕΕΟΙ πρέπει να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο και να περιορίζεται κάτω από ένα ορισμένο ανώτατο όριο.
- *Ρυθμός ανάληψης/μείωσης φορτίου*: Πρέπει να αποφεύγεται το υψηλό ποσοστό μεταβολής της παραγόμενης ισχύος, ώστε να περιοριστούν πιθανές ζημιές των γεννητριών και να ελαχιστοποιηθεί η ανάγκη συντήρησης.
- *Πρόληψη σβέσης του συστήματος*: Καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη συνεχή φόρτιση των γεννητριών όπου το σύστημα είναι προστατευμένο από πιθανή σβέση του.
- *Εκκίνηση γεννητριών*: Οι συχνές εκκινήσεις/παύσεις των γεννητριών οδηγούν σε αυξημένο κόστος συντήρησης και κατανάλωσης καυσίμων. Αυτός ο

περιορισμός μπορεί να εφαρμοστεί με την επιβολή ενός χρονικού περιθωρίου μεταξύ διαδοχικών εκκινήσεων/παύσεων της γεννήτριας.

- *Επίπεδο ενέργειας και ισχύος στο Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας:* Στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας η ενέργεια και η ισχύς θα πρέπει να είναι άνω και κάτω φραγμένες λόγω κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και λειτουργικών περιορισμών του συστήματος.
- *Ταχύτητα πλοίου:* Η ταχύτητα πλοίου είναι άνω και κάτω φραγμένη από την αντίστοιχη μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα του πλοίου.
- *Συνολική διανυθείσα απόσταση:* Η συνολική απόσταση που διανύθηκε κατά το τέλος του διαστήματος της τελευταίας χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης θα πρέπει να είναι σχεδόν ίση με το συνολικό μήκος της διαδρομής.

2.4.2 Μαθηματική Διατύπωση Αλγορίθμου Βέλτιστης Διαχείρισης Ενέργειας

Ακολουθώς δίνεται η μαθηματική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος και των περιορισμών της.

Συνάρτηση Ελαχιστοποίησης

$$TC = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} (St_{ij} \cdot Fuel_Cost_i \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j + SC_{ij})$$

Όπου,

- TC είναι το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος,
- Fuel_Cost_i είναι το κόστος καυσίμου που χρησιμοποιεί η γεννήτρια i,
- P_{ij} είναι η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια i κατά το χρονικό διάστημα j,
- FC_i είναι συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου,
- ΔT_j είναι το χρονικό διάστημα j της χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης T.

με

$$St_{ij} = \{1,0\} \text{ αν η } i \text{ μονάδα είναι ανοικτή ή κλειστή αντίστοιχα}$$

$$SC_{ij} = \{SC_{i \rightarrow on}, 0\}$$

$$j = 1, \dots, T, \quad i = 1, \dots, N_g \quad (14)$$

SC_{i→on} είναι το κόστος εκκίνησης της γεννήτριας i

Με περιορισμούς

→ ισοζυγίου ισχύος

$$\sum_{i=1}^{N_g} St_{ij} \cdot P_{ij} + P_{ESS} = L_j + \Delta P_{Prop,i} \quad \forall j, i \quad (15)$$

Όπου,

- P_{ij} είναι η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια i κατά το χρονικό διάστημα j ,
- P_{ESS} είναι η ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας,
- L_j είναι το ηλεκτρικό φορτίο πλοίου στο χρονικό διάστημα j ,
- $\Delta P_{Prop,j}$ είναι η απόκλιση της ισχύος πρόωσης από την προγραμματισμένη τιμή στο χρονικό διάστημα j .

με

$$St_{ij} = \{1,0\} \text{ αν η } i \text{ μονάδα είναι ανοικτή ή κλειστή αντίστοιχα}$$

→ ελάχιστης και μέγιστης φόρτισης γεννήτριας

$$P_{i,min} < P_{ij} < P_{i,max} \quad \forall i, j \quad (16)$$

Όπου,

- $P_{i,min}$ είναι η ελάχιστη παραγωγή ισχύος από την γεννήτρια i ,
- $P_{i,j}$ είναι η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια i κατά το χρονικό διάστημα j ,
- $P_{i,max}$ είναι η μέγιστη παραγωγή ισχύος από την γεννήτρια i .

→ ρυθμού μεταβολής της παραγωγής

$$\frac{|P_{ij} - P_{ij-1}|}{\Delta T_j} \leq Rc_{i,max} \quad \forall i, j \quad (17)$$

Όπου,

- $P_{i,j}$ είναι η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια i κατά το χρονικό διάστημα j ,
- ΔT_j είναι το χρονικό διάστημα j της χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης T ,
- $Rc_{i,max}$ είναι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του ρεύματος που παράγεται από τη γεννήτρια i .

→ εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_g} c_i St_{ij} \cdot P_{ij} \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j}{LF \cdot V_j} \leq EEOI_{max} \quad \forall j, i \quad (18)$$

Όπου,

- LF είναι ο συντελεστής φόρτωσης του πλοίου,
- $EEOI_{max}$ ανώτερο επιτρεπτό όριο για της εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου,
- V_j είναι η ταχύτητα του πλοίου το χρονικό διάστημα j ,
- ΔT_j είναι το χρονικό διάστημα j της χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης T ,
- FC_j είναι το αποτέλεσμα που δίνει η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου το χρονικό διάστημα j ,
- P_{ij} είναι η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια i κατά το χρονικό διάστημα j ,
- c_i είναι ένας συντελεστής μετατροπής για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων (grCO / grFuel).

με

$$St_{ij} = \{1,0\} \text{ αν η } i \text{ μονάδα είναι ανοικτή ή κλειστή αντίστοιχα}$$

→ αρχική και τελική κατάσταση για το επίπεδο της ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS)

$$E_{ESS,0} = E_0 \quad (19)$$

$$E_{ESS,T} = E_f \quad (20)$$

Όπου,

- E_{ESS}, E_0, E_f είναι η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια και οι αντίστοιχες αρχικές και τελικές συνθήκες

→ ελάχιστης και μέγιστης ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS)

$$P_{ESS,min} < P_{ESS,j} < P_{ESS,max} \quad \forall j \quad (21)$$

Όπου,

- $P_{ESS,min}$ είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
- $P_{ESS,j}$ είναι η ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS) το χρονικό διάστημα j .
- $P_{ESS,max}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

→ ελάχιστου και μέγιστου επιπέδου ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης

$$E_{ESS,min} < E_{ESS,j} < E_{ESS,max} \quad \forall j \quad (22)$$

Όπου,

- $E_{ESS,min}$, είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας,
- $E_{ESS,j}$ είναι το επίπεδο ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο χρονικό διάστημα j ,
- $E_{ESS,max}$ είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

→ ελάχιστου χρόνου λειτουργίας της γεννήτριας

$$t_{\rightarrow OFF,i} - t_{\rightarrow ON,i} \geq T_{ON_min,i} \quad \forall i \quad (23)$$

Όπου,

- $t_{\rightarrow off,i}$, $t_{\rightarrow on,i}$ είναι τα χρονικά σημεία στα οποία η γεννήτρια i σταματά και αρχίζει να λειτουργεί, αντίστοιχα,
- $T_{ON_min,i}$ είναι ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της γεννήτριας i .

→ ελάχιστου χρόνου που η γεννήτρια είναι εκτός λειτουργίας

$$t_{\rightarrow ON,i} - t_{\rightarrow OFF,i} \geq T_{OFF_min,i} \quad \forall i \quad (24)$$

Όπου,

- $t_{\rightarrow off,i}$, $t_{\rightarrow on,i}$ είναι τα χρονικά σημεία στα οποία η γεννήτρια i σταματά και αρχίζει να λειτουργεί, αντίστοιχα,
- $T_{OFF_min,i}$ είναι ο ελάχιστος χρόνος που η γεννήτρια i είναι εκτός λειτουργίας.

→ πρόληψης σβέσης του συστήματος

$$\sum_i St_{ij} \cdot P_{i,max} - L_j \geq \max\{P_{i,max}\} \quad \forall j, i \quad (25)$$

Όπου,

- L_j είναι το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου το διάστημα j ,
- $P_{i,max}$ είναι η μέγιστη παραγωγή ισχύος από την γεννήτρια i .

με

$St_{ij} = \{1,0\}$ αν η i μονάδα είναι ανοικτή ή κλειστή αντίστοιχα

→ ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας του πλοίου

$$V_{min} < V_j < V_{max} \quad \forall j \quad (26)$$

Όπου,

- V_j είναι η βέλτιστη ταχύτητα του πλοίου το χρονικό διάστημα j ,
- V_{min} είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα το χρονικό διάστημα j ,
- V_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα το χρονικό διάστημα j .

→ συνολικής διανυόμενης απόστασης

$$S_{min} \leq \sum_{j=1}^T V_j \cdot \Delta T_j \leq S_{max} \Rightarrow$$

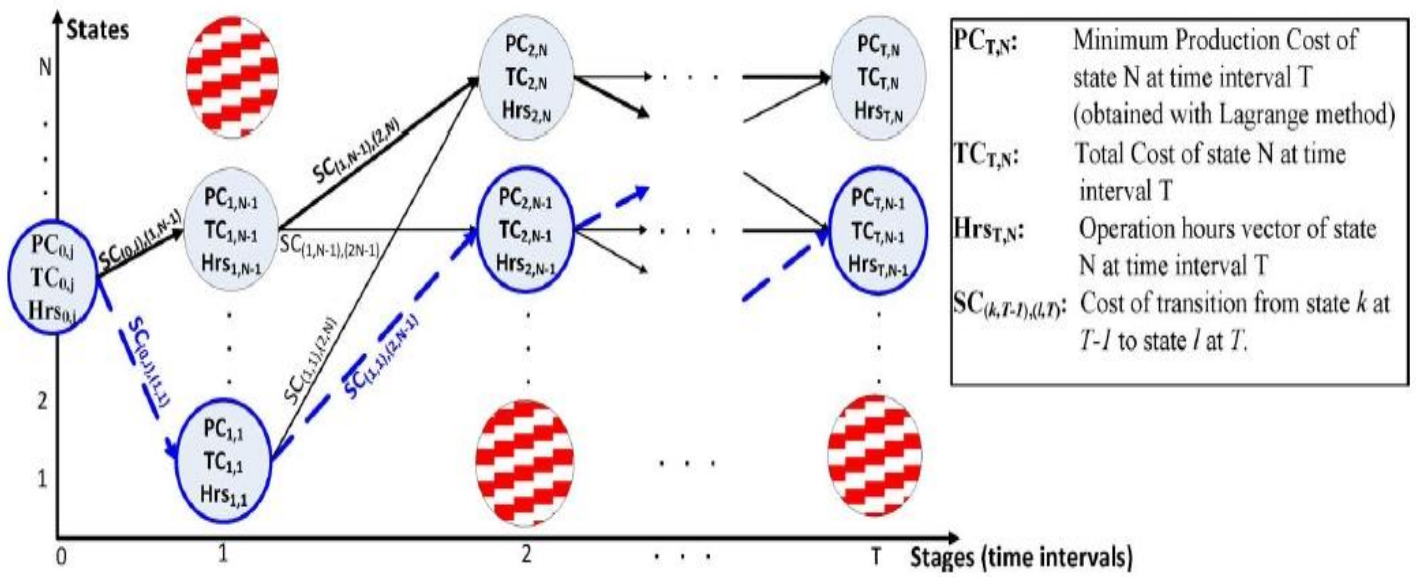
$$S_{min} \leq \sum_{j=1}^T \left(\frac{\Delta P_{Prop,i}}{c_1} + (V_j)^{c_2} \right)^{1/c_2} \cdot \Delta T_j \leq S_{max} \quad (27)$$

Όπου,

- ΔP_{Prop} είναι η απόκλιση της ισχύος πρόωσης από την προγραμματισμένη τιμή,
- S_{max} είναι η επιτρεπτή μέγιστη απόσταση,
- S_{min} είναι η επιτρεπτή ελάχιστη απόσταση.
- $\Delta P_{Prop,j}$ είναι η απόκλιση της ισχύος πρόωσης από την προγραμματισμένη τιμή στο χρονικό διάστημα j ,
- c_1 είναι ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται για το 'ταίριασμα' της ισχύος πρόωσης και της ταχύτητας του πλοίου και
- c_2 είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη μορφή του σκαριού ($c_2 = 3$ για συμβατικές μορφές σκαριού).

2.5 Επίλυση του προβλήματος

Για την επίλυση προβλημάτων όπως το προηγούμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δυναμικός προγραμματισμός. Ενδεικτικό πλέγμα των καταστάσεων του συστήματος σε όλα τα χρονικά διαστήματα παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2. Τα σημεία με κόκκινο ριγέ φόντο δεν είναι εφικτά λόγω παραβίασης ενός ή περισσότερων περιορισμών λειτουργίας, π.χ. περιορισμός πρόληψης διακοπής λειτουργίας του συστήματος, ελάχιστες ώρες λειτουργίας γεννητριών κτλ. Τα στάδια του πλέγματος αντιστοιχούν στα χρονικά διαστήματα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου.



Εικόνα 2.2 Πλέγμα δυναμικού προγραμματισμού

Net-Point Field	Περιγραφή
NetPoint.State	Δυναδική συμβολοσειρά που ορίζει την κατάσταση λειτουργίας των γεννητριών στο σημείο πλέγματος
NetPoint.PC	Ελάχιστο κόστος παραγωγής στο συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος
NetPoint.TC	Συνολικό κόστος λειτουργίας έως το συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος
NetPoint.Hrs	Διάνυσμα ωρών λειτουργίας των γεννητριών
NetPoint.ESS	Ενεργειακό επίπεδο συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
NetPoint. ΔE_{prop}	Απόκλιση ενέργειας πρόωσης από την προγραμματισμένη τιμή
NetPoint.SC	Κόστος μετάβασης σε επόμενη κατάσταση
NetPoint.Feasibility (Εφικτότητα)	Παίρνει τιμές «Ναι», «όχι» αν η κατάσταση είναι εφικτή ή όχι
NetPoint.EEOI	Τιμή του δείκτη EEOI ($grCO_2/tn\ kn$)
NetPoint.Speed	Ταχύτητα πλεύσης του πλοίου (kn)
NetPoint.PreviousState	Κατάσταση του προηγούμενου σταδίου που οδηγεί στο ελάχιστο συνολικό κόστος

Πίνακας 2.1 Δομή διαγράμματος δυναμικού προγραμματισμού

Στον πίνακα 2.1 δίνονται ενδεικτικά τα διάφορα πεδία ενός σημείου του πλέγματος. Αυτά τα πεδία περιέχουν πληροφορία χρήσιμη για την επίλυση του προβλήματος.

Σημειώνεται ότι το κόστος παραγωγής (PC) πρέπει να ελαχιστοποιείται σε κάθε σημείο του πλέγματος με οικονομική κατανομή φορτίου στις γεννήτριες. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση της μεθόδου Lagrange. Τέλος, το συνολικό κόστος των καταστάσεων ($t, TC_{t,l}$), ελαχιστοποιείται σύμφωνα με τον τύπο:

$$TC_{t,l} = \min\{PC_{t,l} + SC_{(t-1,k),(t,l)} + TC_{t-1,k}\} \quad \forall \text{ κατάσταση } k \text{ σε } t-1 \quad (37).$$

Όπου,

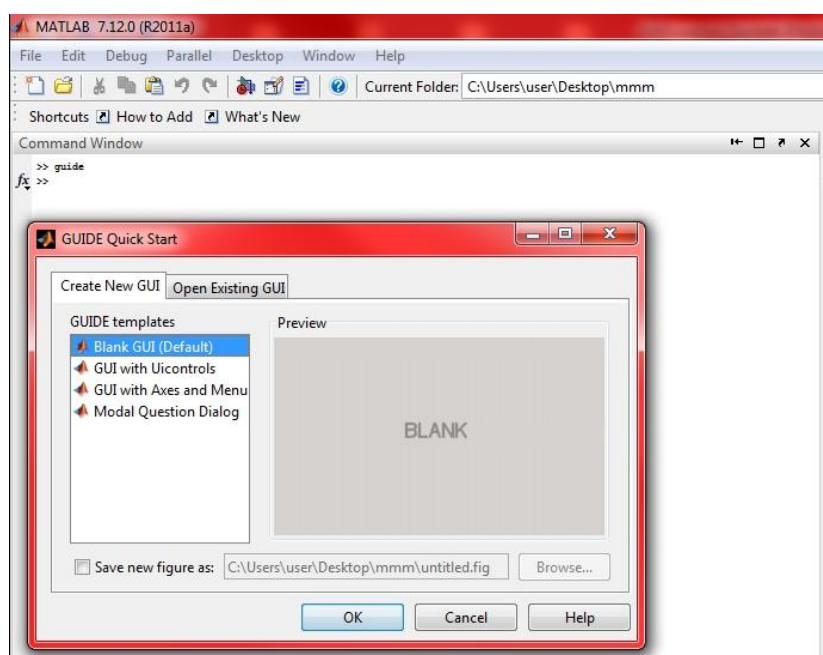
- $PC_{t,l}$ είναι το κόστος παραγωγής για την κατάσταση l το διάστημα t ,
- SC είναι το κόστος μετάβασης από την προηγούμενη κατάσταση $(t-1,k)$ στην παρούσα (t,l) ,
- $TC_{t-1,k}$ είναι το συνολικό κόστος έως την κατάσταση $(t-1, k)$.

Κεφάλαιο 3

Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος σε Matlab για εισαγωγή δεδομένων και λήψη αποτελεσμάτων βελτιστοποιημένης διαχείρισης ενέργειας σε πλοία

3.1 Εισαγωγή

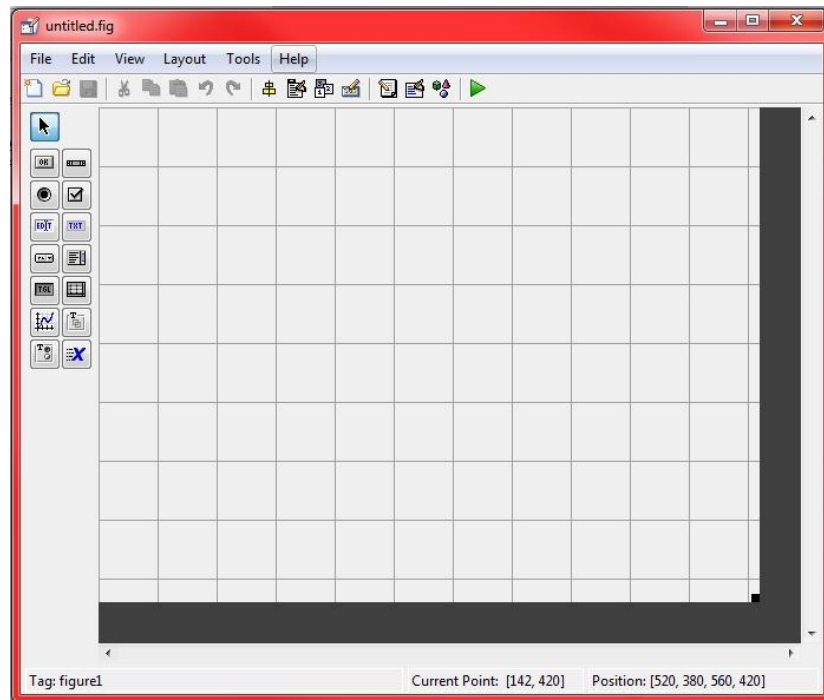
Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά γίνεται μία συνοπτική περιγραφή του εργαλείου GUIDE που διαθέτει η Matlab για τη δημιουργία γραφικών περιβαλλόντων. Εν συνεχεία περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την δημιουργία του τελικού περιβάλλοντος διεπαφής το οποίο αποτελείται από τρεις οθόνες.



Εικόνα 3.1 Αρχική εικόνα όταν καλείται το GUIDE

Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται, με δυο τρόπους. Είτε, με την κλήση της ομώνυμης συνάρτησης από τη γραμμή εντολών του MATLAB, είτε επιλέγοντας από τη γραμμή μενού File → New → GUI. Στη συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο «GUIDE quick start» (εικόνα 3.1) από το οποίο δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός νέου GUI ή φόρτωσης ενός υπάρχοντος.

Για την δημιουργία μιας κενής επιφάνειας διεπαφής επιλέγεται το «Blank GUI» και εμφανίζεται το κενό παράθυρο που φαίνεται στην εικόνα 3.2.















Εικόνα 3.2 Χώρος σχεδιασμού της επιφάνειας διεπαφής, αφού έχει επιλεγεί κενό (Blank) GUI

Ο χώρος σχεδιασμού της επιφάνειας διεπαφής αποτελείται από τη βασική γραμμή του μενού, μία βοηθητική μπάρα εργαλείων, και μία εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκριζα περιοχή με το πλέγμα είναι η περιοχή στην οποία γίνεται ο σχεδιασμός της επιφάνειας διεπαφής.

3.2 Εργαλειοθήκη του GUIDE

Η εργαλειοθήκη, που βρίσκεται κάθετα αριστερά στην περιοχή σχεδίασης, περιέχει όλα τα στοιχεία, τα οποία είναι διαθέσιμα για την δημιουργία της επιφάνειας διεπαφής. Όπως δείχνει η εικόνα 3.3.

	Select
	Push Button
	Toggle Button
	Radio Button
	Checkbox
	Edit Text
	Static Text
	Slider
	Frame
	List box
	Popup Menu
	Axes

Εικόνα 3. 3 Η εργαλειοθήκη του GUI

➤ Select

Με την ενεργοποίηση του κουμπιού επιλογής (select) δίνεται η δυνατότητα επιλογής οποιoδήποτε στοιχείου ελέγχου ή και πολλαπλής επιλογής στοιχείων.

➤ Push Button

Με την επιλογή αυτή εισάγεται ένα κουμπί στο παράθυρο. Οι ιδιότητες του κουμπιού μπορούν να επεξεργαστούν από το «Property inspector» (βλ. παράγραφο 3.3.). Σε

όλα τα αντικείμενα οι ιδιότητες είναι σχεδόν ίδιες. Για το λόγο αυτό αναφέρονται ενδεικτικά μόνο για το αντικείμενο «PushButton» (πίνακας 3.1).

Το αντικείμενο «PushButton» όπως και κάθε αντικείμενο που αναφέρεται στη συνέχεια συνοδεύεται από συναρτήσεις «Callback». Η μετάβαση στις συναρτήσεις γίνεται με δεξί κλικ στο πάνω στο στοιχείο (εδώ το PushButton) και έπειτα με μία από τις επιλογές που υπάρχουν στο «ViewCallback». Άλλος τρόπος μετάβασης στο παράθυρο «Editor» είναι με το αντίστοιχο κουμπί στην μπάρα εργαλείων (παράγραφος 3.3). Στο κομμάτι αυτό του «Editor» εισάγονται οι εντολές που θα εκτελούνται με το πάτημα του κουμπιού.

Όνομα ιδιότητας	Περιγραφή
Background Color	Ορίζεται το χρώμα του αντικειμένου
FontName	Ορίζεται το στυλ τις γραμματοσειράς
FontSize	Ορίζεται το μέγεθος της γραμματοσειράς
FontWeight	Ορίζεται το πάχος της γραμματοσειράς
HorizontalAlignment	Οριζόντια απόσταση από την αριστερή κάτω γωνία
Position	Κάθετη απόσταση από την αριστερή κάτω γωνία
X	Πλάτος στοιχείου ελέγχου
Y	Ύψος στοιχείου ελέγχου
String	Ορίζεται το κείμενο που θα είναι πάνω στο στοιχείο ελέγχου
Tag	Ορίζεται η ετικέτα του στοιχείου ελέγχου
Units	Ορίζεται η μονάδα μέτρησης του στοιχείου ελέγχου
Visible	Ορίζεται αν είναι ορατό ή όχι το στοιχείο ελέγχου

Πίνακας 3.1 Οι βασικές επεξεργάσιμες ιδιότητες ενός αντικειμένου GUI

ToggleButton

Το κουμπί `togglebutton` δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας. Εάν το κουμπί είναι πατημένο θα εκτελεστεί η λειτουργία που θα περιγράφεται στην αντίστοιχη συνάρτησή του, αλλιώς, εάν δεν είναι πατημένο, δεν επηρεάζει το πρόγραμμα.

RadioButton

Το κουμπί `radioButton` δίνει τη δυνατότητα μίας ή πολλαπλών επιλογών μέσα από ένα πλήθος διαθέσιμων επιλογών.

Checkbox

Το αντικείμενο checkbox δίνει τη δυνατότητα μίας ή πολλαπλών επιλογών μέσα από ένα πλήθος διαθέσιμων επιλογών. Εδώ η επιλογή γίνεται με τσεκαρισμα.

Edit Text

Το αντικείμενο edittext δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής δυναμικού κειμένου.

Static Text

Το αντικείμενο statictext δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής στατικών κειμένων.

Slider

Το αντικείμενο slider δίνει την δυνατότητα μεταβολής κάποια τιμή μίας μεταβλητής με τη βοήθεια μπάρας.

Frame/Panel

Το στοιχείο frame χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.

Listbox

Το αντικείμενο listbox δίνει τη δυνατότητα επιλογής μέσα από μία λίστα διαθέσιμων λειτουργιών.

PopupMenu

Το αντικείμενο popupmenu δίνει τη δυνατότητα επιλογής κάποιας λειτουργίας μέσα από ένα μενού πολλαπλών επιλογών.

Axes

Το αντικείμενο axes δίνει τη δυνατότητα παρουσίασης γραφικών παραστάσεων ή προβολής εικόνων στο παράθυρο.

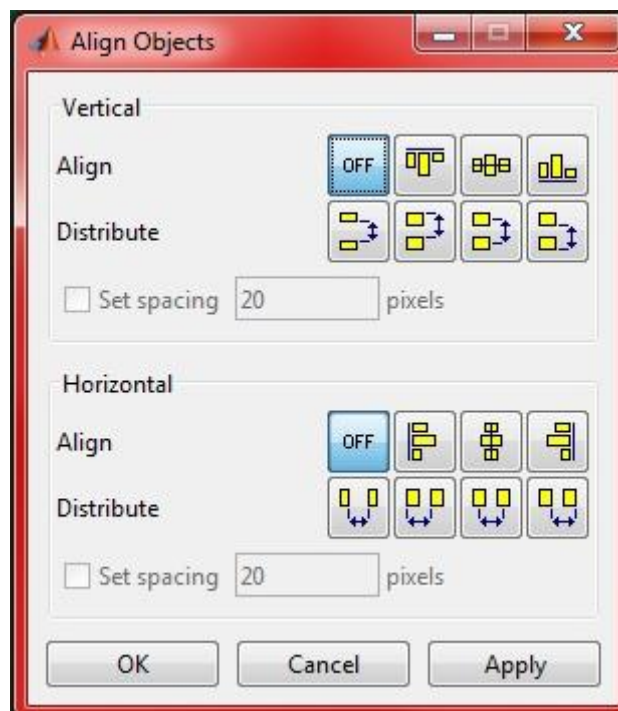
3.3 Μπάρα εργαλείων του GUIDE

Η μπάρα εργαλείων διαθέτει κουμπιά για την δημιουργία νέου GUI και την φόρτωση ήδη υπάρχοντος GUI, κουμπιά αποκοπής, αντιγραφής, επικόλλησης, αναίρεσης και επανάληψης. Οι λειτουργίες που εκτελούν τα κουμπιά αυτά είναι αρκετά απλές και για τον λόγο αυτό δεν περιγράφονται αναλυτικά. Αντιθέτως τα τελευταία εικονίδια του εκτελούν πιο σύνθετες λειτουργίες και περιγράφονται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.4 Τα σημαντικότερα από τα κουμπιά στη γραμμή εργαλείων του GUI

Το πρώτο εικονίδιο (Align Objects), από τα αριστερά (εικόνα 3.4), ενεργοποιεί το παράθυρο της εικόνας 3.5.

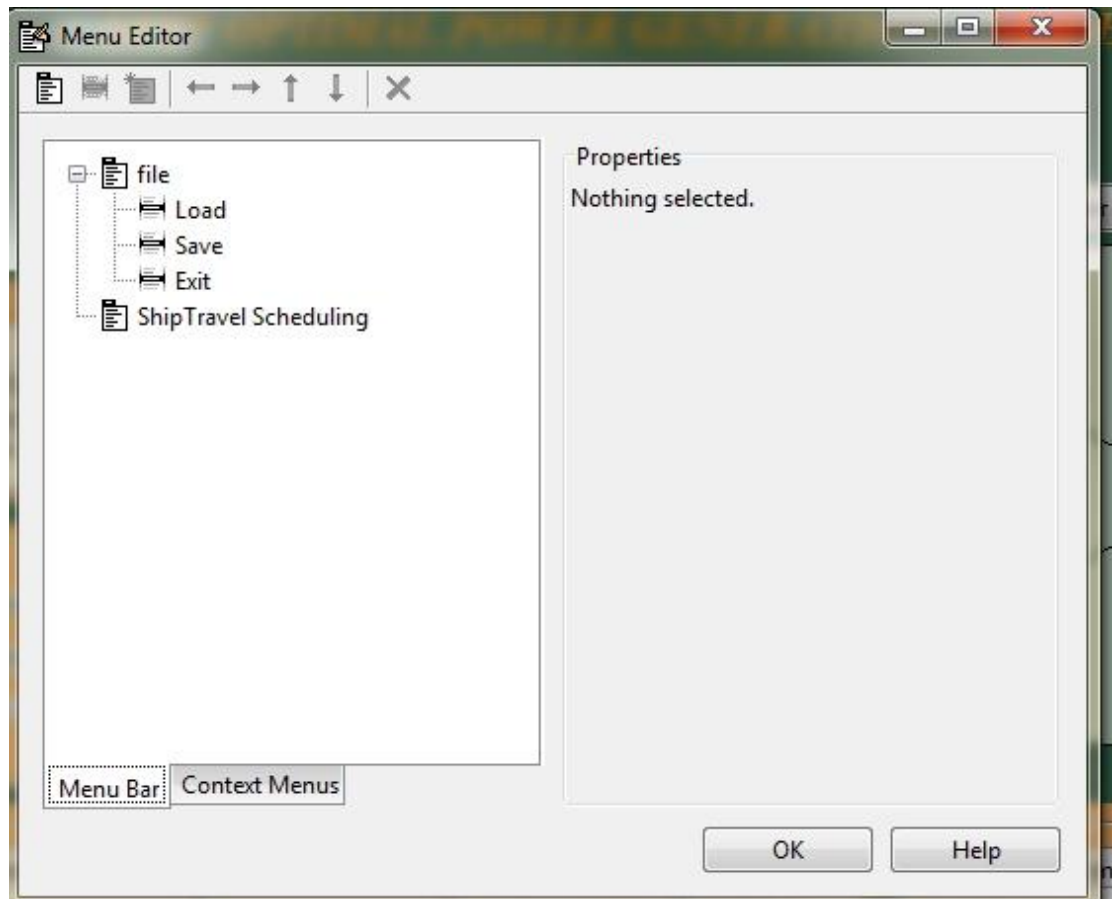


Εικόνα 3.5 Το παράθυρο Align Objects

Από το παράθυρο αυτό ορίζονται, στα επιλεγμένα στοιχεία του GUI, ο τρόπος στοίχισης και τα διάκενα μεταξύ τους (είτε οριζόντια είτε κάθετα).

Το δεύτερο από τα εικονίδια της εικόνας 3.4 δημιουργεί τη γραμμή του μενού στο πάνω μέρος της σχεδιαζόμενης επιφάνειας διεπαφής. Η γραμμή του μενού είναι δυνατό να περιέχει και αναδυόμενα μενού. Στην εικόνα 3.6 φαίνεται το παράθυρο που ενεργοποιείται με το πάτημα του σχετικού κουμπιού (Menu Editor). Στο παράθυρο αυτό φαίνεται το πώς έχει δομηθεί η γραμμή μενού για την κύρια οθόνη της σχεδιαζόμενης επιφάνειας διεπαφής. Αναλυτικότερα, στην γραμμή του μενού υπάρχουν δύο βασικές επιλογές, η επιλογή «file» και η επιλογή «Ship Travel

Scheduling». Η πρώτη επιλογή έχει ακόμα τρεις αναδυνόμενες επιλογές τις «Load», «Save» και «Exit». Οι λειτουργίες κάθε μίας από τις επιλογές περιγράφονται λεπτομερώς στις παραγράφους που περιγράφουν αναλυτικά καθένα από τα τρία παράθυρα της επιφάνειας διεπαφής.



Εικόνα 3.6 Το παράθυρο “Menu Editor”

Από το τρίτο εικονίδιο (Tab Order Editor) της εικόνας 3.4 ορίζονται ποια από τα στοιχεία του παραθύρου θα είναι σε πρώτο πλάνο, ποια στο φόντο κτλ.

Το τέταρτο εικονίδιο (Toolbar Editor) της εικόνας 3.4 δίνει γρήγορες λύσεις για ευρέως χρησιμοποιούμενες επιλογές στη μπάρα του μενού, όπως το save, print, new κτλ.

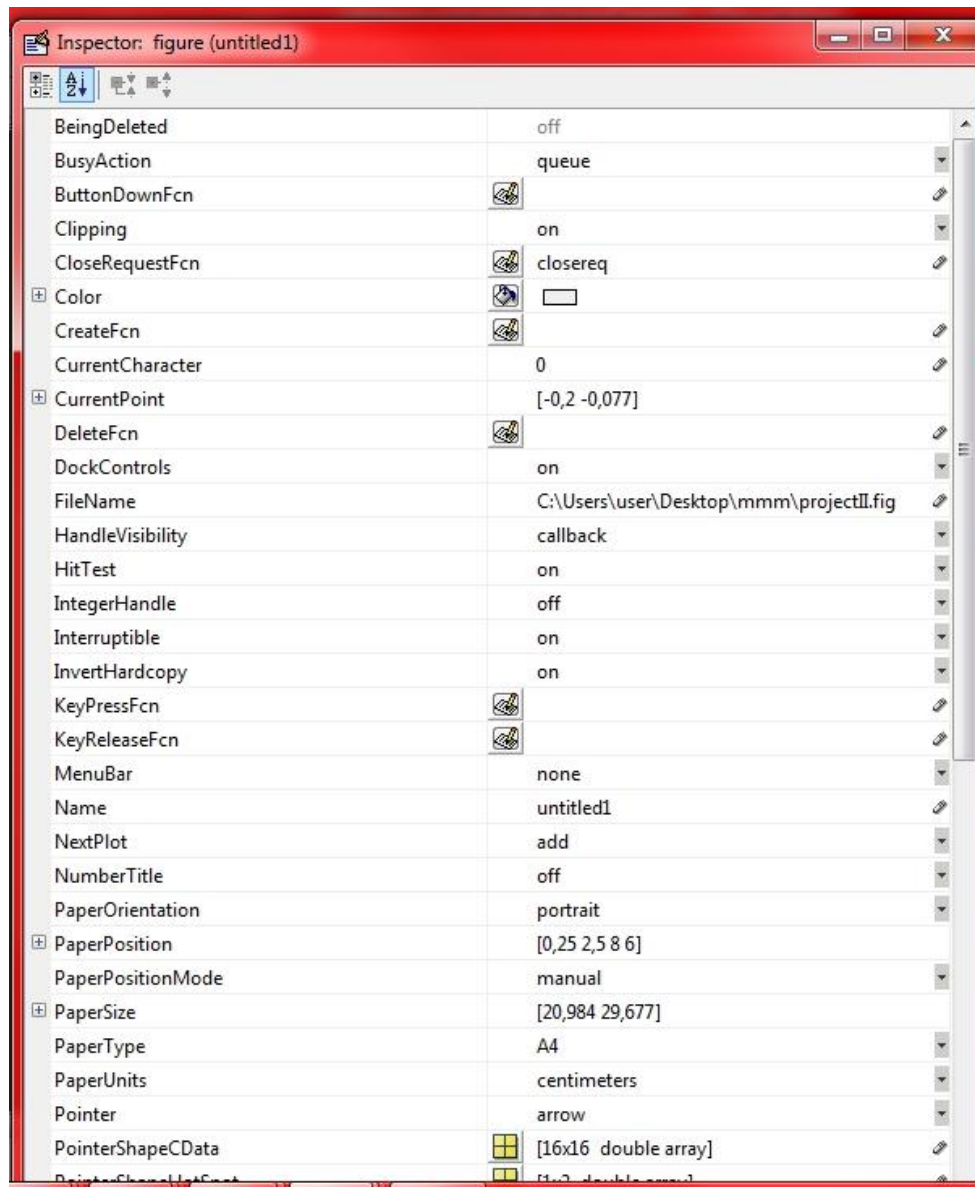
Το πέμπτο εικονίδιο (Editor) της εικόνας 3.4 ανοίγει το παράθυρο «editor» (το παράθυρο στο οποίο συντάσσεται ο κώδικας για κάθε στοιχείο της επιφάνειας διεπαφής) όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.

Το έκτο εικονίδιο (Property Inspector) της εικόνας 3.4 ανοίγει το παράθυρο «Property Inspector» (διαμόρφωση ιδιοτήτων), όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7. Από το παράθυρο αυτό γίνονται αλλαγές στις ιδιότητες (μέγεθος, χρώμα και στυλ

γραμματοσειράς, όνομα στοιχείου, κ.α) του στοιχείου το οποίο έχει επιλεγεί (πίνακας 3.1).

Το έβδομο εικονίδιο της εικόνας 3.4 εμφανίζει ένα χάρτη με τα αντικείμενα που υπάρχουν στο GUI.

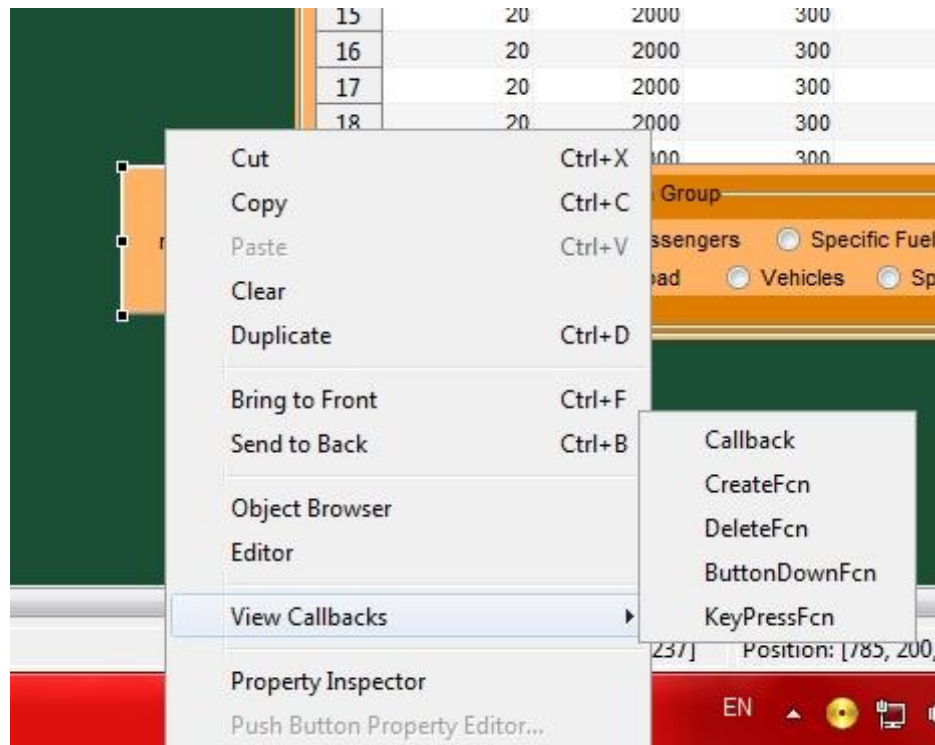
Τέλος, το τελευταίο εικονίδιο της εικόνας 3.4 εκτελεί το GUI που έχει δημιουργηθεί.



Εικόνα 3.7 Το παράθυρο “Property Inspector”

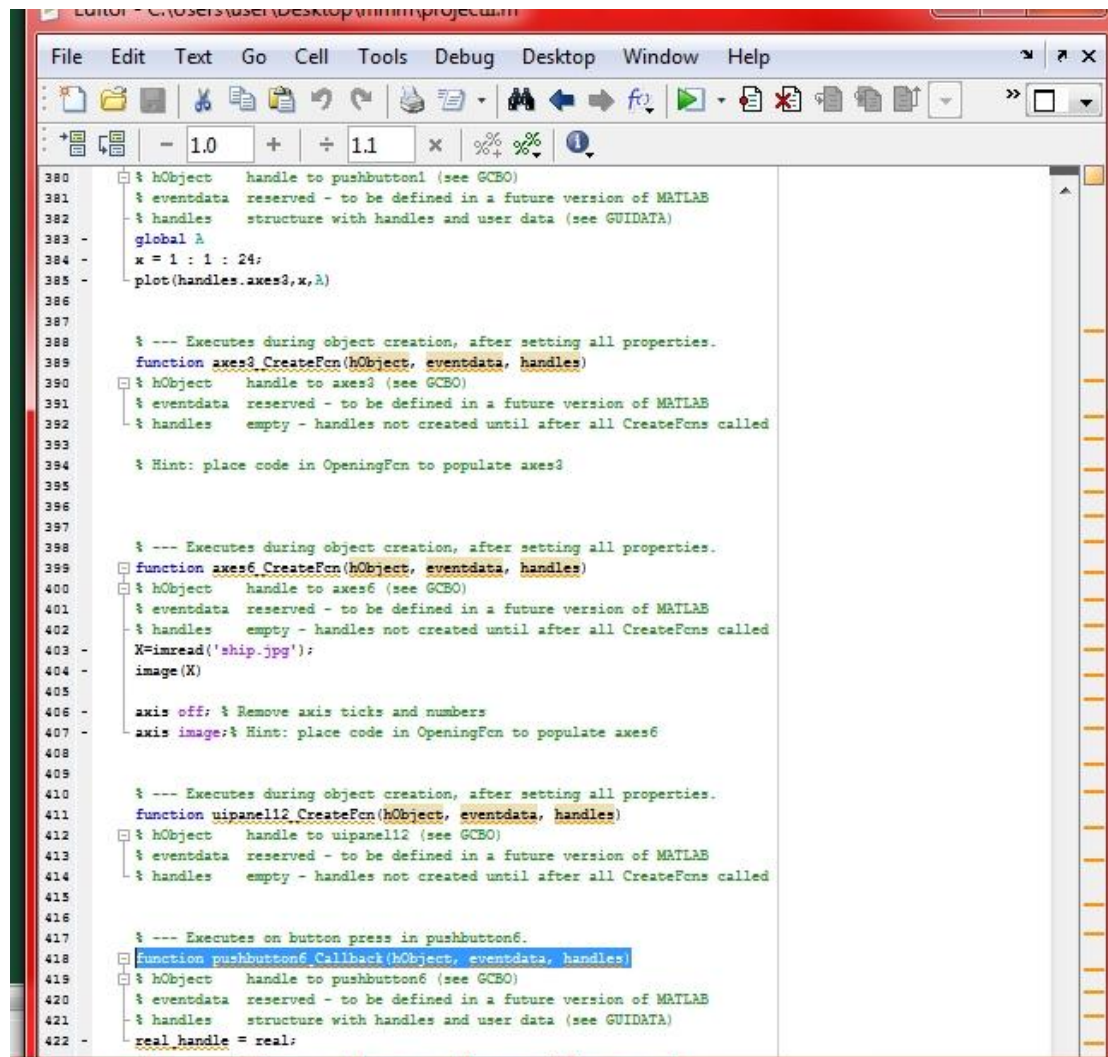
3.4 Προγραμματισμός των αντικειμένων

Όπως προαναφέρθηκε όλα τα αντικείμενα που εισάγονται στο παράθυρο συνοδεύονται από μία συνάρτηση, στην οποία εισάγονται οι εντολές που θα εκτελούνται κατά την ενεργοποίηση του κάθε στοιχείου.



Εικόνα 3.8 Οι επιλογές στο View Callback

Για την μετάβαση στο περιβάλλον του κώδικα έχουν προαναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους δύο δυνατοί τρόποι. Στην εικόνα 3.8 φαίνεται πως γίνεται αυτή η μετάβαση με δεξί κλικ επάνω στο στοιχείο. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω εάν επιλεγεί το «Callback», από τις επιλογές που εμφανίζονται στο «View Callback», γίνεται η μετάβαση στην αντίστοιχη συνάρτηση του αντικειμένου (εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9 Το παράθυρο του Editor

Εδώ εισάγονται οι εντολές που θα εκτελούνται από το συγκεκριμένο αντικείμενο. Ένα απλό παράδειγμα τέτοιας εντολής είναι:

```
temp=get(handles.edit1,'string');
```

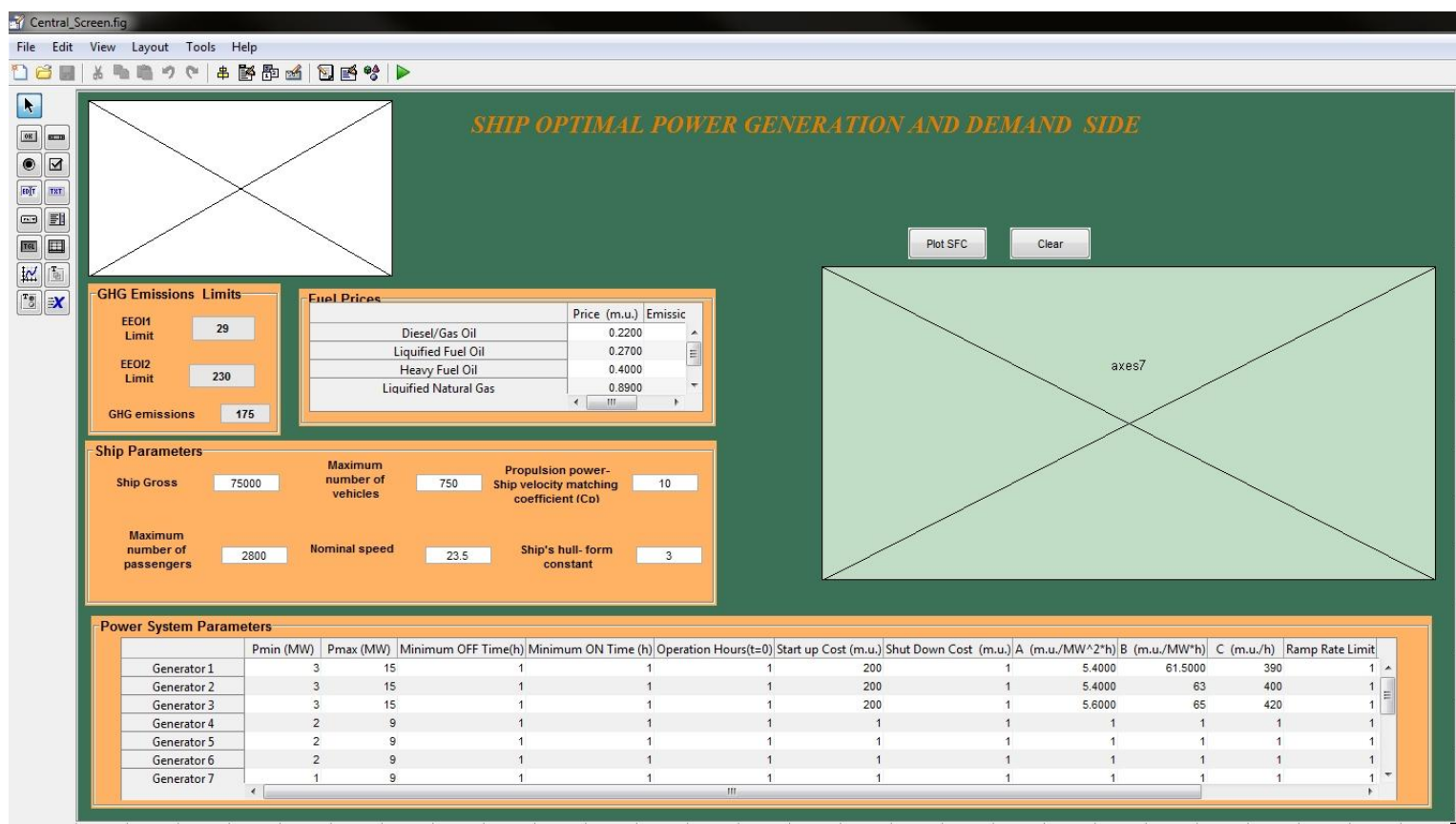
η οποία καταχωρεί στην μεταβλητή temp ό,τι υπάρχει μέσα στο αντικείμενο edit1 (edit text).

Στην συνέχεια αναφέρονται αποκλείστηκα τα βήματα και οι εντολές που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία της επιφάνειας διεπαφής της συγκεκριμένης εργασίας.

3.5 Εισαγωγή κατάλληλων αντικειμένων για την εισαγωγή δεδομένων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Αρχικά έγινε καταγραφή όλων των μεταβλητών που απαιτεί ο αλγόριθμος ως είσοδο. Σύμφωνα και με την καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή δημιουργήθηκαν τρεις οθόνες, η οθόνη “CentralScreen”, η οθόνη “ShipTravelScheduling” και η οθόνη “Results”.

3.5.1 Οθόνη Central Screen



Εικόνα 3.10 Την οθόνη "Central Screen" όπως φαίνεται στο GUI (πριν τρέξει το πρόγραμμα)

Στην εικόνα 3.10 παρουσιάζεται την οθόνη «Central Screen». Πάνω αριστερά έχει τοποθετηθεί το αντικείμενο «axes1» στο οποίο θα εμφανίζεται η εικόνα ενός πλοίου, η οποία βρίσκεται στον ίδιο φάκελο στον οποίο αποθηκεύεται και το Central Screen.

Κάτω από το αντικείμενο axes1 υπάρχουν 2 αντικείμενα «panel» (uipanel8 & uipanel16) με τίτλους: «GHG Emissions Limits» και «Ship Parameters» αντίστοιχα. Σε αυτά υπάρχουν αντικείμενα edit text (3 και 6 αντίστοιχα), στα οποία θα καταχωρούνται τιμές μεταβλητών που στη συνέχεια θα εμφανίζονται στο workspace της Matlab. Κατά αντιστοιχία με τα αντικείμενα edit text υπάρχουν αντικείμενα static text τα οποία χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των πρώτων. Οι τιμές περνάνε στο workspace με την εντολή assignin όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα για το edit9 του οποίου η τιμή εκχωρείται σε μία μεταβλητή στο workspace με όνομα NP.

```
function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
b=str2num(get(handles.edit9,'String')); % εκχωρείται στο
b ότι υπάρχει στο edit9 ως αριθμός
CentralScreen.NP=b;
```

```

assignin('base', 'CentralScreen', CentralScreen); %
αποθηκεύεται το β και στην δομή « CentralScreen »
assignin('base', 'NP', b) % το b εκχωρείται στη μεταβλητή
NP που δημιουργείται στο workspace

```

Πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία που εισάγονται στο πάνελ «GHG Emissions Limits» είναι τα άνω όρια των EEOI1 (δείκτης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όταν το πλοίο βρίσκεται αγκυροβολημένο) και EEOI2 (αντίστοιχος δείκτης για την ανοικτή θάλασσα) και ο συντελεστής ποινής (οικονομική) λόγω υπέρβασης της επιτρεπόμενης εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου.

GHG Emissions Limits	
EEOI Limit	29
EEOI2 Limit	230
GHG emissions penalty	175

Εικόνα 3. 11 Το στοιχείο panel με τίτλο "GHG Emissions Limits"

Με το πάνελ «Ship Parameters» εισάγονται το βάρος του πλοίου, σε τόνους, η συνολική χωρητικότητα του σε επιβάτες και σε οχήματα, η ονομαστική ταχύτητά του και δύο σταθερές που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο και σχετίζονται με την υδροδυναμική αντίσταση που έχει το πλοίο και την αναλογία μεταξύ της ισχύος πρόωσης και της ταχύτητάς του πλοίου.

Ship Parameters			
Ship Gross	75000	Maximum number of vehicles	750
		Propulsion power-Ship velocity matching coefficient (Co)	10
Maximum number of passengers	2800	Nominal speed	23.5
		Ship's hull-form constant	3

Εικόνα 3. 12 Το αντικείμενο panel με τίτλο " Ship Parameters"

Στο παράθυρο του Central Screen υπάρχουν ακόμα δύο πάνελ (uipanel1 και uipanel7) με ονόματα «Fuel Prices» και «Power Ship Parameters». Στο πρώτο υπάρχει ένας πίνακας στον οποίο εισάγονται οι τιμές των καυσίμων και οι αντίστοιχοι συντελεστές μετατροπής του καυσίμου σε CO₂ (εικόνα 3.13) και στο δεύτερο ένας ακόμα πίνακας με τις παραμέτρους των γεννητριών του πλοίου (εικόνα 3.14). Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα «Power Ship Parameters» εισάγονται η ελάχιστη και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει κάθε γεννήτρια, ο ελάχιστος χρόνος που μπορεί η γεννήτρια να είναι κλειστή ή σε λειτουργία, οι ώρες λειτουργίας της στην αρχή του χρονικού διαστήματος προγραμματισμού, το κόστος εκκίνησης και σβέσης, οι σταθερές a_1 , a_2 και a_3 οι οποίες αναφέρονται στις εξισώσεις της κατανάλωσης καυσίμου (FC) και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC ενότητα 2.4 μαθηματικές σχέσεις 6, 7), το όριο του ρυθμού μεταβολής της παραγωγής, η σταθερά αδρανείας $H(s)$ και στην τελευταία στήλη από ένα popup menu το είδος καυσίμου της γεννήτριας.

Fuel Prices		
	Price (m.u.)	Emissions Factor c
Diesel/Gas Oil	0.2200	1.1000
Liquified Fuel Oil	0.2700	1.1500
Heavy Fuel Oil	0.4000	0.9500
Liquified Natural Gas	0.8900	0.5000
Liquified Petroleum Gas	0.8400	0.6000

Εικόνα 3. 12 Το αντικείμενο panel με τίτλο "Fuel Prices"

Power System Parameters												
	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Minimum OFF Time(h)	Minimum ON Time (h)	Operation Hours(t=0)	Start up Cost (m.u.)	Shut Down Cost (m.u.)	A (m.u./MW^2*h)	B (m.u./MW*h)	C (m.u./h)	Ramp Rate Limit	Inertia constant H (s)
Generator 1	3	15	1	1	1	200	1	5.4000	61.5000	390	1	1
Generator 2	3	15	1	1	1	200	1	5.4000	63	400	1	1
Generator 3	3	15	1	1	1	200	1	5.6000	65	420	1	1
Generator 4	2	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator 5	2	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator 6	2	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator 7	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator 8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator 9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Generator11	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Εικόνα 3. 14 Το αντικείμενο panel με τίτλο "Power System Parameters"

Οι παραπάνω πίνακες αποθηκεύονται στο workspace όπως φαίνεται και στην παρακάτω συνάρτηση για τον πίνακα uitable1 ο οποίος εμφανίζεται στην περιοχή του workspace ως «generator_data»:

```
function uitable1_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)
assignin('base', 'generator_data', get(hObject, 'Data'))
generator_data=get(hObject, 'Data');
assignin('base', 'CentralScreen', CentralScreen)
guidata(hObject, handles);
```

Ειδικότερα για τους πίνακες, με δεξί κλικ πάνω στον πίνακα εμφανίζεται η επιλογή Table Property Editor όπου επιλέγοντας την εμφανίζεται ένα παράθυρο από το οποίο μπορεί να γίνει η επεξεργασία των επικεφαλίδων και του είδους των περιεχομένων στις στήλες του πίνακα (Columns) των τίτλων των γραμμών (Rows) των αρχικών δεδομένων που θα έχει ο πίνακας με το άνοιγμα του παραθύρου (Data). Τέλος μπορεί να γίνει αλλαγή στα χρώματα των γραμμών (Colors).

Στο Central Screen υπάρχει, επίσης, στα δεξιά ένα ακόμα αντικείμενο axes (axes7) στο οποίο εμφανίζονται γραφικά οι συναρτήσεις κόστους των εν λειτουργία γεννητριών (τύπος 7 κεφ.2, SFC), με το πάτημα του κουμπιού plot SFC (pushbutton15), ενώ με το κουμπί clear σβήνουν αυτές οι γραφικές παραστάσεις. Ο κώδικας είναι στο callback του κουμπιού plot SFC και παρουσιάζεται παρακάτω:

```
function pushbutton15_Callback(hObject, eventdata, handles)
ylabel(handles.axes7,'Specific Fuel Cost','Color',[1 1 0], 'FontSize',12)
xlabel(handles.axes7,'Produced Power (MW)','Color',[1 1 0], 'FontSize',12) %εδώ ορίζονται τα ονόματα των δύο
αξόνων του γραφήματος
k=0;
cla(handles.axes7)
hold on
for n=1:15
    if ~strcmp(T(n,13),'OFF')
        k=k+1;
        P(k,:)=Pmin(n):(Pmax(n)-Pmin(n))/50:Pmax(n); %
        δημιουργία πίνακα P με γραμμές όσες και οι αν λειτουργία
        γεννητρίες (αρχή if) και γραμμές 50 στοιχείων σταθερού
        βήματος (διαφοράς)το πρώτο είναι το αντίστοιχο Pmin και
        τελευταίο το αντίστοιχο Pmax
        SFC(k,:)=
        ((A(n,1)*P(k,:).^2+B(n,1)*P(k,:)+C(n,1))./P(k,:); %σε
        ένα πίνακα SFC καταχωρούνται τιμές σύμφωνα με τον τύπο
        της συνάρτησης SFC στο δεύτερο κεφάλαιο.
        plot(P(k,:),SFC(k,:), 'Color',rand(1,3), 'LineWidth',3);
        %εντολή για να εκτελεστεί το πλοτάρισμα του πίνακα SFC με
        τυχαία χρώματα και πλάτος γραμμών 3.
    end
end

assignin('base', 'SFC', SFC);
Mac='Generator %d';
Generatormnames=cell(1,1);

k=0;
```

```

        for i=1:15
            if ~strcmp(T(i,13),'OFF')
                k=k+1;
                str=sprintf(Mac,i);
                Generator_names{k}=str;
            end
        end
    assignin('base','Generator_names',Generator_names);
    leg=legend(handles.axes7,Generator_names);
    set(leg,'FontAngle','italic','Location','NorthEastOutside');
    set(handles.axes7,'Color',[0.757,0.867,0.776])
    grid on
    axis on
    hold off

```

Ενώ για το κουμπί clear:

```

function pushbutton16_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla(handles.axes7)
legend('off')
xlabel('')
ylabel('')
grid off

```

Επίσης αξίζει να αναφερθεί η εντολή για την μετάβαση στο δεύτερο παράθυρο με όνομα «ShipTravel Scheduling» που είναι η εξής:

```

function Untitled_8_Callback(hObject, eventdata, handles)
ShipTravelScheduling_handle = ShipTravelScheduling;

```

Τέλος οι εντολές που εκτελούνται από τις επιλογές «Load», «Save» και «Exit» στο μενού «File» είναι οι εξής:

Load:

```

function Untitled_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
[file,pathName] = uigetfile('*.mat');
str = strcat(pathName,file);
load(str);
set(handles.uitable7,'Data',Saved.Fuel_Prices);
set(handles.uitable1,'Data',Saved.generator_data);

```

```

set(handles.edit8, 'string', Saved.SG);
... ..
set(handles.edit16, 'string', Saved.Nspeed);

handles.Fuel_Prices=Saved.Fuel_Prices;
handles.generator_data=Saved.generator_data;

handles.SG=Saved.SG;
... ..
handles.Nspeed=Saved.Nspeed;

guidata(hObject, handles);

```

Save:

```

function Untitled_5_Callback(hObject, eventdata, handles)
    [file,pathName] = uinputfile('*.mat','Save Workspace
As');
    str = strcat(pathName,file);

    Saved.Fuel_Prices=get(handles.uitable7, 'Data');
    Saved.generator_data=get(handles.uitable1, 'Data');

    Saved.SG=get(handles.edit8, 'string');
    ... ..
    Saved.Nspeed=get(handles.edit16, 'string');

    save(str, 'Saved')

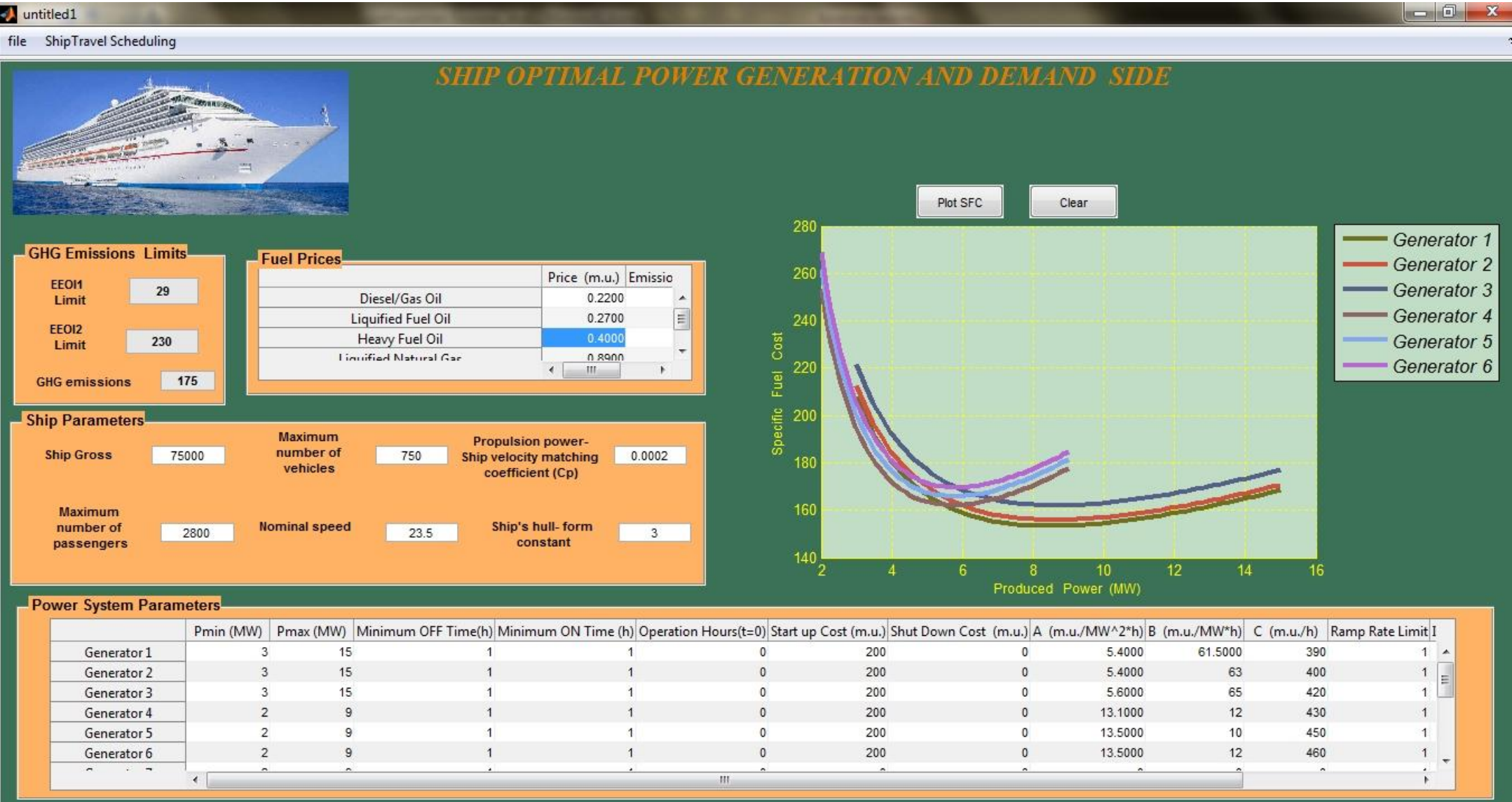
```

Exit:

```

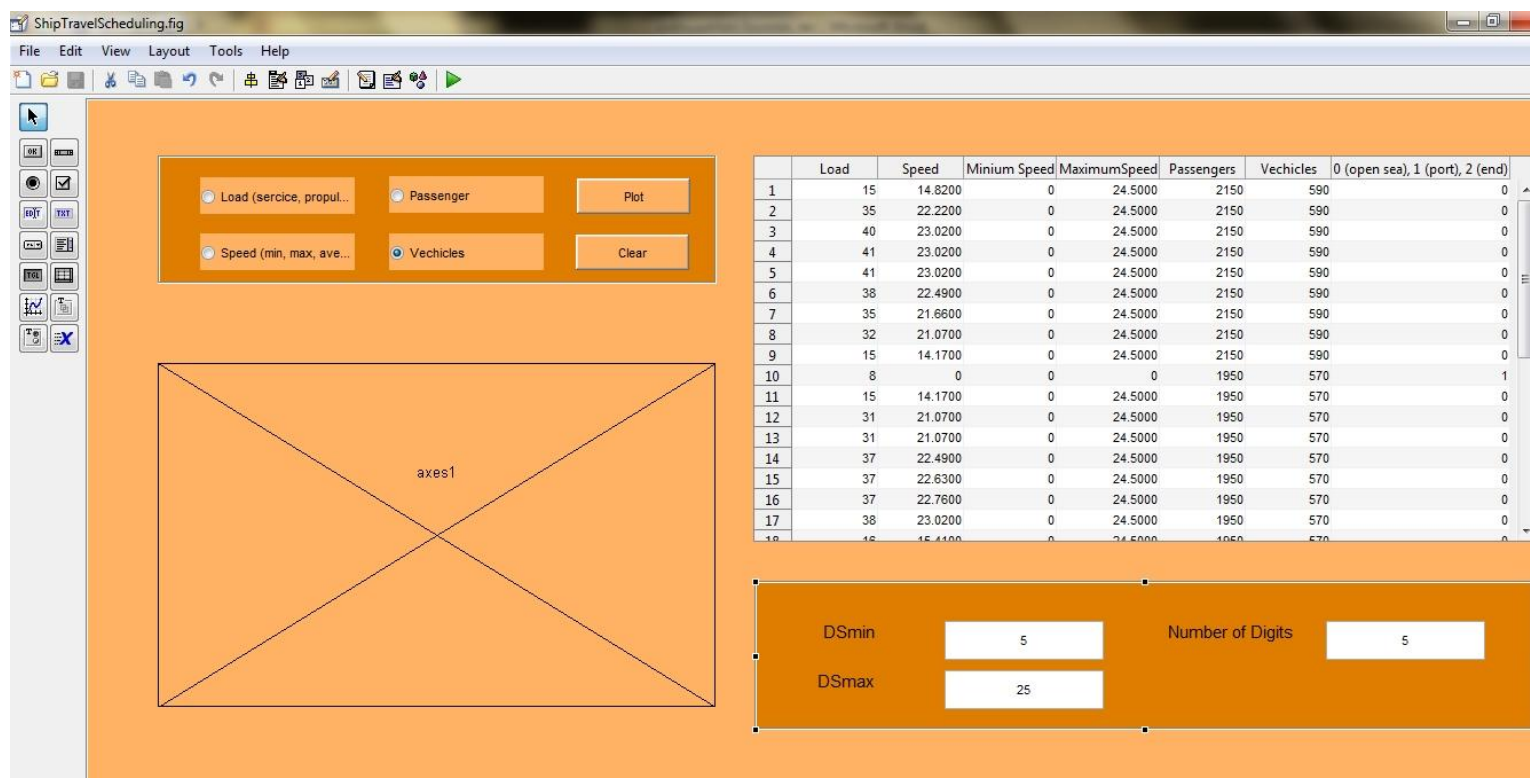
function Exit_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close all

```

Εικόνα 3.13 Η οθόνη "Central Screen" όπως φαίνεται αφού τρέξει το πρόγραμμα.

3.5.2 Οθόνη Ship Travel Scheduling



Εικόνα 3.14 Η οθόνη "Ship Travel Scheduling" όπως φαίνεται στο GUI (πριν τρέξει το πρόγραμμα)

Σε αυτήν την οθόνη υπάρχει στα δεξιά ένας πίνακας στον οποίο καταχωρούνται τα δεδομένα για το ταξίδι του πλοίου. Αυτά είναι το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου, η ταχύτητά του, η μέγιστη και η ελάχιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα σε κόμβους (kn), ο αριθμός των επιβατών και των οχημάτων και το πότε βρίσκεται σε λιμάνι, σε ανοικτή θάλασσα ή έχει ολοκληρώσει το ταξίδι του. Όλα τα παραπάνω μεγέθη εισάγονται για κάθε χρονικό διάστημα του ταξιδιού του πλοίου. Κάτω από τον πίνακα υπάρχουν τρεις μεταβλητές για τη μέγιστη θετική ή αρνητική απόκλιση της συνολικά διανυόμενης απόστασης και για τον αριθμό των υποδιαστημάτων αυτής.

Πάνω αριστερά υπάρχει μια ομάδα κουμπιών το οποίο δίνει την δυνατότητα επιλογής για απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων είτε του φορτίου είτε του αριθμού των επιβατών είτε του αριθμού των οχημάτων είτε της ταχύτητας (σε αυτή την περίπτωση απεικονίζονται 3 γραφικές παραστάσεις για την στήλη «speed», την στήλη «Lower speed» και την στήλη «Maximum Speed»). Όλες οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται στο αντικείμενο axes του παραθύρου (κάτω αριστερά) και σε συνάρτηση με το χρόνο.

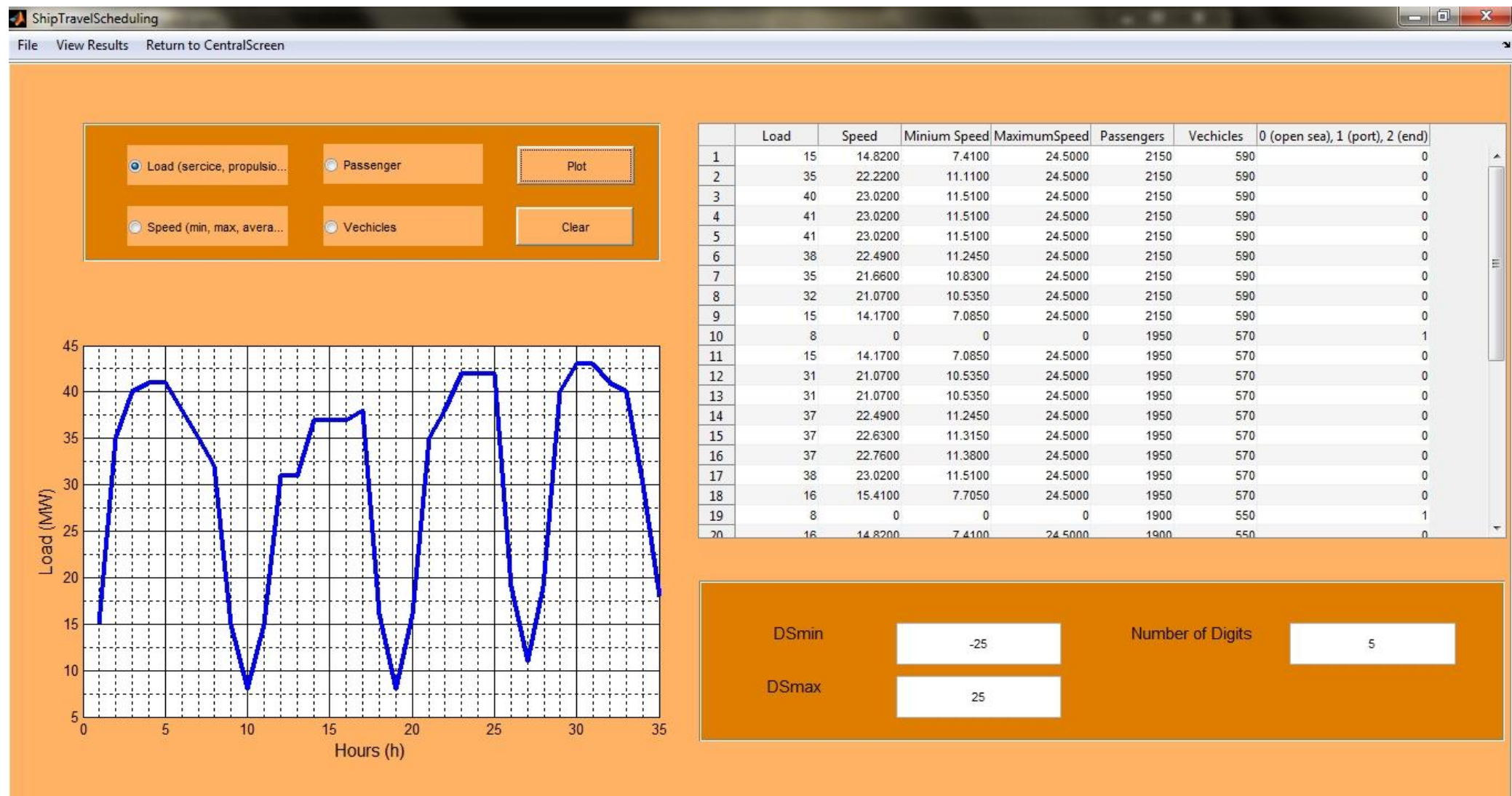
Όσον αφορά τις λειτουργίες αυτού του παραθύρου είναι αρκετά απλές και καλύπτονται πλήρως από όσα προαναφέρθηκαν για το παράθυρο «Central Screen». Για τον λόγο αυτό θα γίνει αναφορά μόνο στο μενού επιλογών «button group».

Με δεξί κλικ στο μενού button group και έπειτα Callback → SelectionChangeFcn εμφανίζεται το παράθυρο κώδικα όπου θα εκχωρηθούν οι εντολές για την επιλογή καθεμίας από τις τέσσερις δυνατές περιπτώσεις (speed, passengers, vehicles, load). Αυτό γίνεται με την συνάρτηση switch του Matlab η οποία για το συγκεκριμένο κομμάτι παρουσιάζεται παρακάτω:

```
function uipanel2_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to the selected object in uipanel2
global G %την μεταβλητή G την κάνουμε global γιατί θα
χρησιμοποιηθεί από το κουμπί plot
global P % ομοίως την P
switch get(eventdata.NewValue, 'Tag') %σύνταξη της
συνάρτησης switch
    case 'radiobutton5' % περίπτωση επιλογής «load»
        h1=get(handles.uitable1);
        T1=h1.Data;
        G=T1(:,1);
        P=1;
    case 'radiobutton1' % περίπτωση επιλογής «passengers»
        h1=get(handles.uitable1);
        T1=h1.Data;
        G=T1(:,5);
        P=2;
    case 'radiobutton4' % περίπτωση επιλογής «speed»
        h1=get(handles.uitable1);
        T1=h1.Data;
        G=T1(:,2:4);
        P=3;
    case 'radiobutton3' % περίπτωση επιλογής «vehicles»
        h1=get(handles.uitable1);
        T1=h1.Data;
        G=T1(:,6);
        P=4;
    otherwise
end
```

Οι γραφικές παραστάσεις εμφανίζονται με το πάτημα του κουμπιού Plot το οποίο τις εμφανίζει ανάλογα με την επιλογή που έχει γίνει.

Σημειώνεται εδώ ότι στη γραμμή του μενού υπάρχει ένα αναδυόμενο κουμπί file με επιλογές save, load και run optimal schedule. Οι λειτουργία της τελευταίας επιλογής είναι να τρέχει το αλγόριθμο ο οποίος έχει αναπτυχθεί από τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, υπάρχει στην γραμμή μενού ένα κουμπί για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, στο παράθυρο «Results» και ένα κουμπί που εκτελεί την επιστροφή στην κύρια οθόνη.



Εικόνα 3. 15 Η οθόνη "Ship Travel Scheduling" αφού τρέξει το πρόγραμμα.

3.5.3 Οθόνη results

Το παράθυρο «Results» παρουσιάζει τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Πάνω αριστερά υπάρχει ένα πίνακας με στήλες όσες και οι εν λειτουργία γεννήτριες συν μία για το άθροισμα των παραγωγών ισχύος των γεννητριών και γραμμές όσες και τα χρονικά διαστήματα του ταξιδιού. Κάθε στήλη παρουσιάζει την παραγόμενη ισχύ από την αντίστοιχη γεννήτρια κάθε χρονικό διάστημα με εξαίρεση την τελευταία στήλη η οποία παρουσιάζει την συνολικά παραγόμενη ισχύ από όλες τις εν λειτουργία γεννήτριες κάθε χρονικό διάστημα.

Ο πίνακας στα δεξιά έχει επτά στήλες και γραμμές όσα τα χρονικά διαστήματα του ταξιδιού. Οι στήλες παρουσιάζουν το ηλεκτρικό φορτίο εξυπηρέτησης και πρόωσης, το συνολικό φορτίο, την ταχύτητα του πλοίου, τους δείκτες EEOI1 και EEOI2 και το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος. Όλα τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζονται για κάθε χρονικό διάστημα του ταξιδιού.

Κάτω αριστερά υπάρχει ένα button group όμοιο με αυτό της παραγράφου 3.3.2 μέσω του οποίου απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις των μεγεθών των πινάκων στο διπλανό αντικείμενο αξόνων. Η διαφορά εδώ (από το button group της παραγράφου 3.3.2) είναι ότι οι γραφικές παραστάσεις θα εμφανίζονται είτε ως γραμμές είτε ως συνδυασμός από γραμμές και μπάρες. Παρατίθεται στη συνέχεια κομμάτι από τον κώδικα με το οποίο εμφανίζεται γραφική παράσταση με συνδυασμό από γραμμές και μπάρες.

Στο Button group

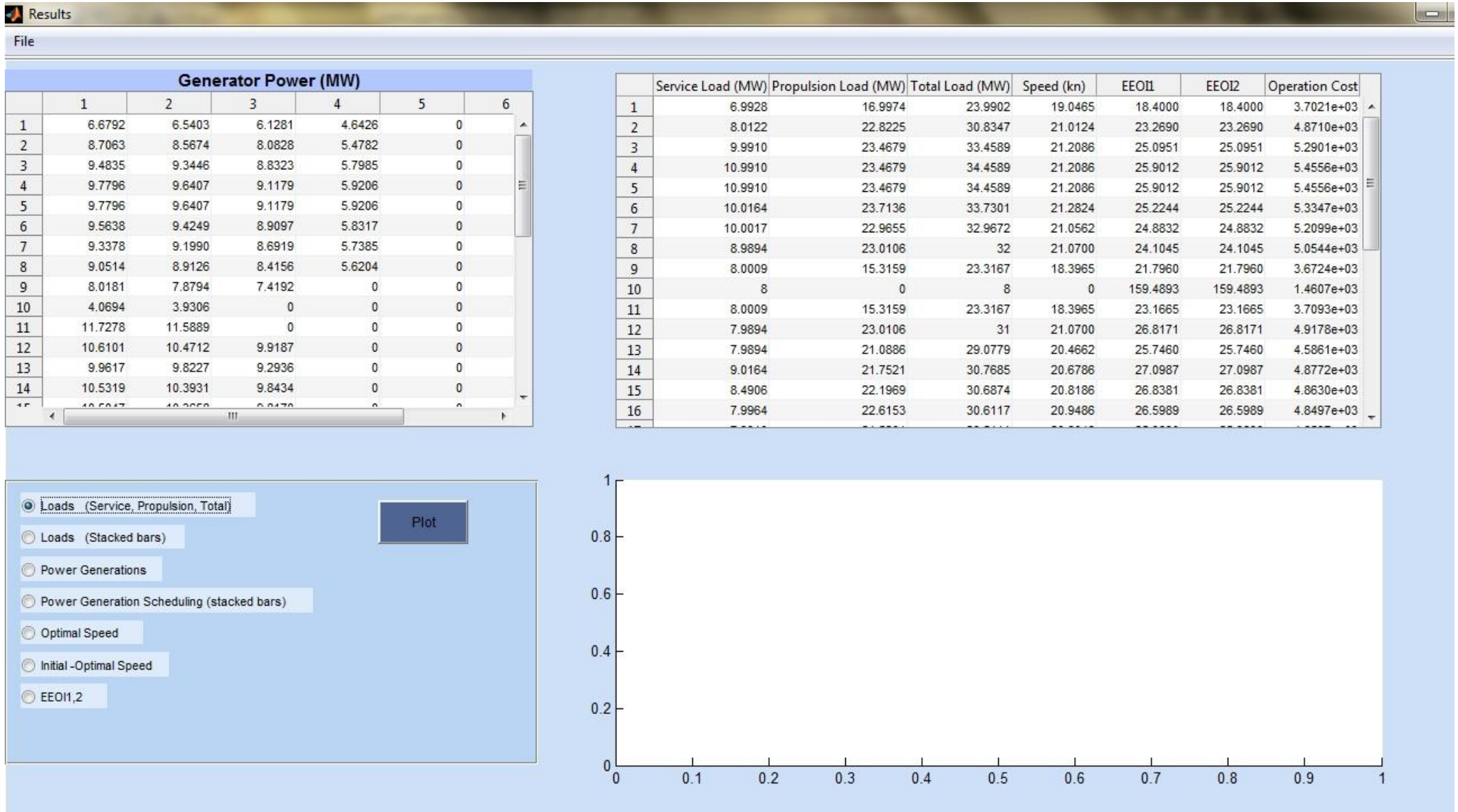
```
function uipanel2_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
global PL
global N
global T

Genon = evalin('base', 'Gen_ON_num');
switch get(eventdata.NewValue, 'Tag')
    ... ..
    case 'radiobutton7'
        h1=get(handles.uitable3);
        T2=h1.Data;
        PL=T2(:,1:2)
        T=T2(:,3)
        N=2;
    ... ..
    otherwise
end
```

Στο κουμπί plot:

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata,
handles)
h = evalin('base', 'hours');
global PL
global N
global T
x = 1 : 1 : h;
if N == 1
... ..
elseif N == 2
    bar(handles.axes1,PL,0.90,'stacked')
    hold on
    plot(handles.axes1,T,'LineWidth',2);
    ylabel(handles.axes1,'Load (MW)','FontSize',12);
    xlabel(handles.axes1,'Hours (h)','FontSize',12);
    hold off
    legend('Service Laod(MW)', 'Propulsion Load
(MW)', 'Total Load (MW)', 'Location', 'northeast')
... ..
end

axis on
grid on
grid minor
set(gca, 'GridLineStyle', '-')
```



Εικόνα 3. 16 Η οθόνη "results"

3.6 Παράδειγμα προσομοίωσης πλοίου

Για την παρουσίαση της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κρουαζιερόπλοιου - οχηματαγωγού, τα οποία ελήφθησαν από την επιστημονική εργασία του επιβλέποντος καθηγητή [1]. Παρατίθενται παρακάτω πίνακες με τα δεδομένα αυτά.

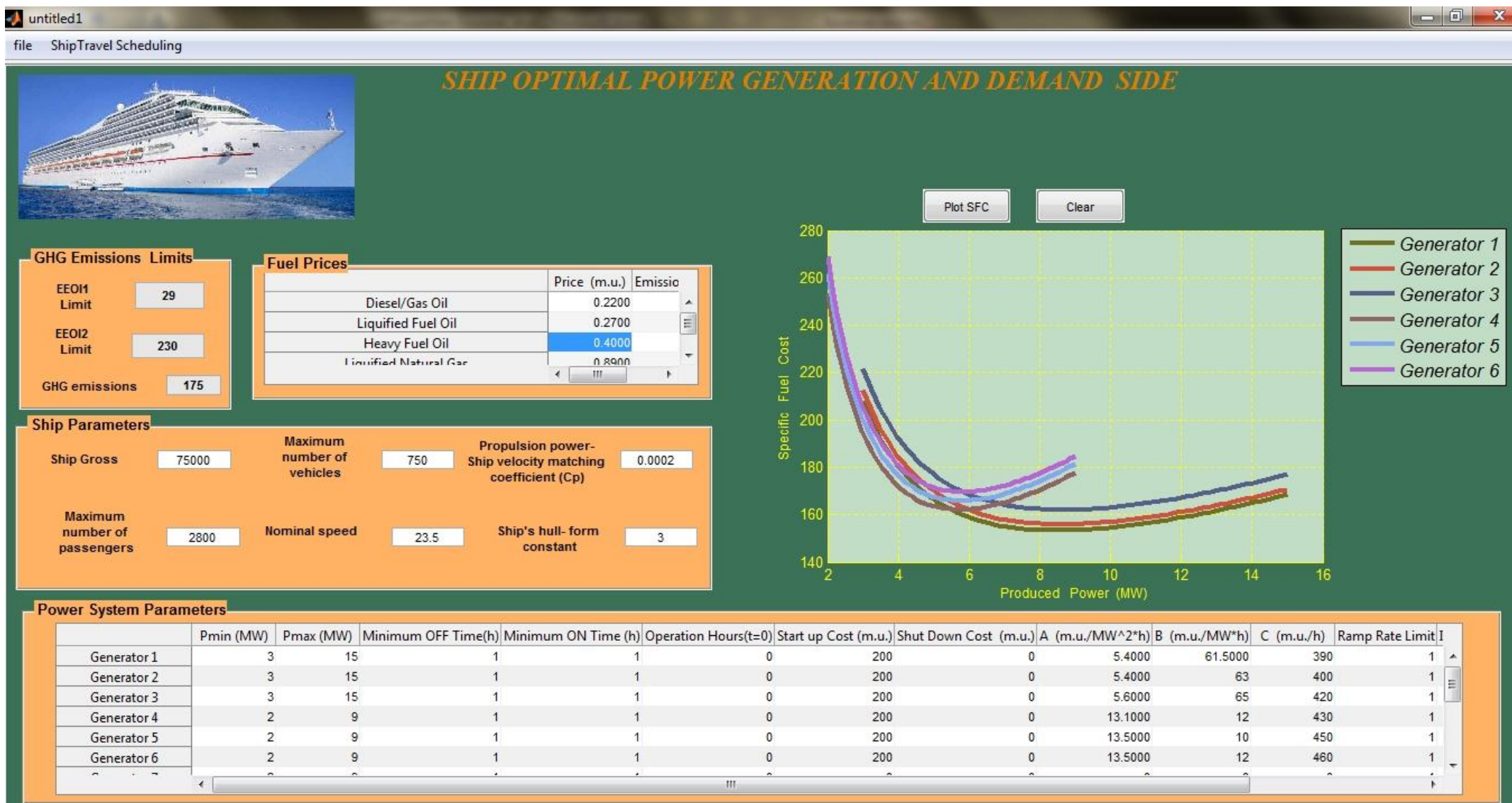
	Γεν.1	Γεν.2	Γεν. 3	Γεν. 4	Γεν. 5	Γεν. 6
Ονομαστική ισχύς (MW)	15	15	15	15	15	15
Τεχνικά ελάχιστη ισχύς (MW)	3	3	3	2	2	2
Ελάχιστες ώρες που μπορεί η γεννήτρια να είναι εν λειτουργία /εκτός λειτουργίας (h)	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Κόστος Έναρξης/Παύσης (m.u.)	200/0	200/0	200/0	200/0	200/0	200/0
Κόστος λειτουργίας σαν συνάρτηση της παραγόμενης ισχύος (m.u./MWh)	$390+61.5P$ $\dots+5.4P^2$	$400+63P$ $\dots+5.4P^2$	$420+65P$ $\dots+5.6P^2$	$430+12P$ $\dots+13.1P^2$	$450+10P$ $\dots+13.5P^2$	$460+12P$ $\dots+13.5P^2$

Πίνακας 3. 2 Παράμετροι γεννητριών του πλοίου

Τύπος	Κρουαζιερόπλοιο
Ονομαστική ταχύτητα (kn)	23.5
Μέγιστος αριθμός επιβατών	2800
Μέγιστος αριθμός οχημάτων	750
$EEOI_{max1}$ (gCO ₂ /tn.kn)	29
$EEOI_{max2}$ (gCO ₂ /tn.kn)	230
Εκτόπισμα (tons)	75000

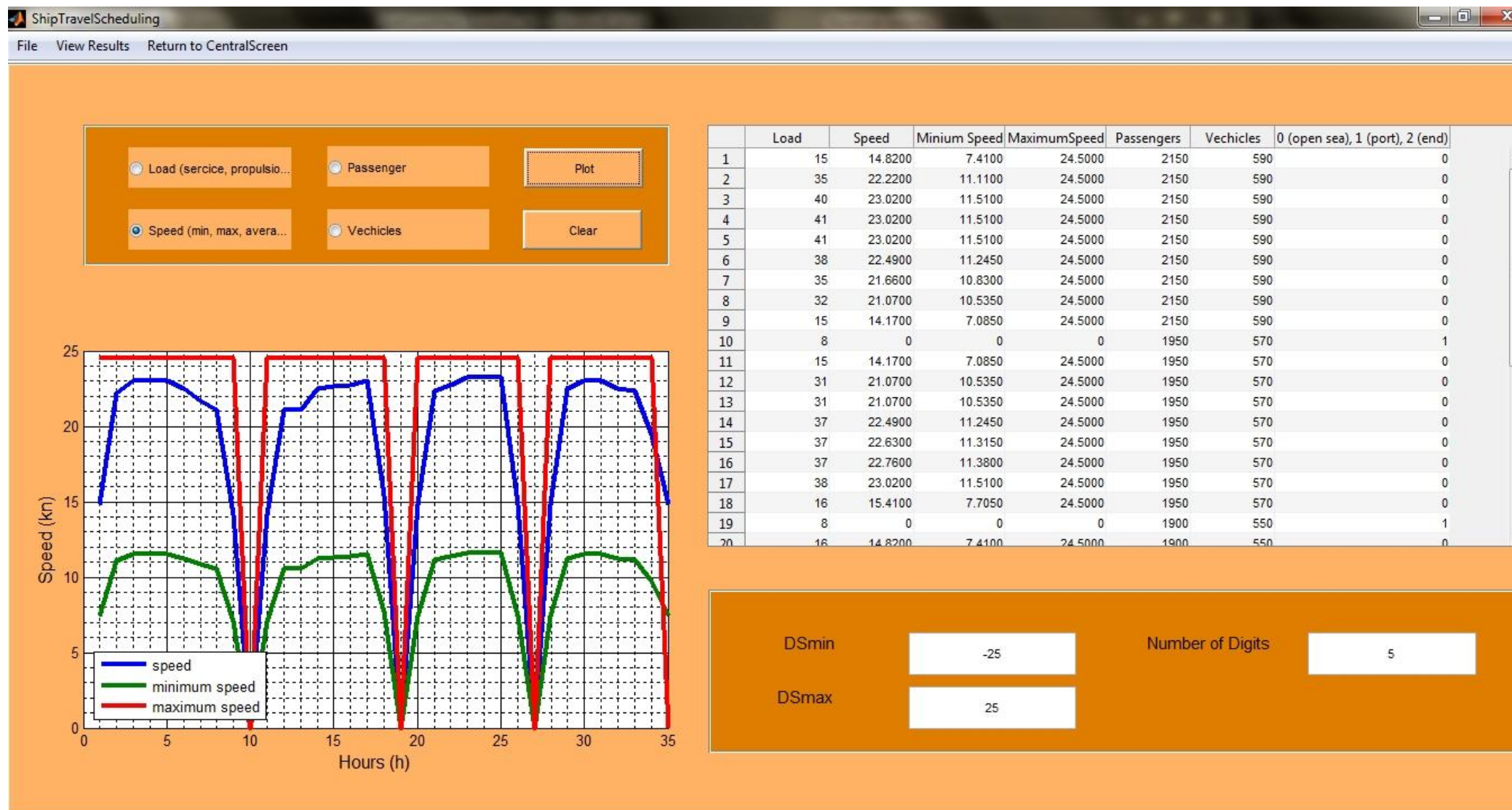
Πίνακας 3. 3 Γενικές παράμετροι του πλοίου

Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στην οθόνη «CentralScreen» όπως φαίνεται στην εικόνα 3.19. Σε αυτή την οθόνη υπάρχει η δυνατότητα να παρουσιάζεται γραφικά το ειδικό κόστος κατανάλωσης για όλες τις γεννήτριες.



Εικόνα 3. 17 Η οθόνη "CentralScreen" με τα δεδομένα του πλοίου

Έπειτα γίνεται η μετάβαση στην επόμενη οθόνη (ship travel scheduling) όπου εισάγονται τα δεδομένα του ταξιδιού. Για το παρόν παράδειγμα προσομοίωσης έχει υποτεθεί πλάνο ταξιδιού 35 χρονικών διαστημάτων, με τρεις ενδιάμεσες στάσεις. Όλα τα δεδομένα μπορούν να παρουσιαστούν γραφικά στα αριστερά της οθόνης (εικόνα 3.20).



Εικόνα 3. 18 Η οθόνη "ShipTravelSchedule" με τα δεδομένα του ταξιδιού του πλοίου

Με το File→Run Optimal Schedule καλείται ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης. Αφού έχει ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση πατώντας το κουμπί view results γίνεται η μετάβαση στην οθόνη των αποτελεσμάτων (εικόνα 3.21). Ο πίνακας στα αριστερά της οθόνης (εικόνα 3.21) παρουσιάζει την παραγόμενη ισχύ από κάθε γεννήτρια καθώς και την συνολική ισχύ (τελευταία στήλη), ενώ στα δεξιά το ηλεκτρικό φορτίο εξυπηρέτησης και πρόωσης, το συνολικό φορτίο, την ταχύτητα, τους δείκτες EEOI1 και EEOI2 και το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος. Τα παραπάνω μεγέθη παράγονται από τον αλγόριθμο της βελτιστοποίησης και μπορούν να παρουσιαστούν και γραφικά όπως δείχνουν οι εικόνες που ακολουθούν.

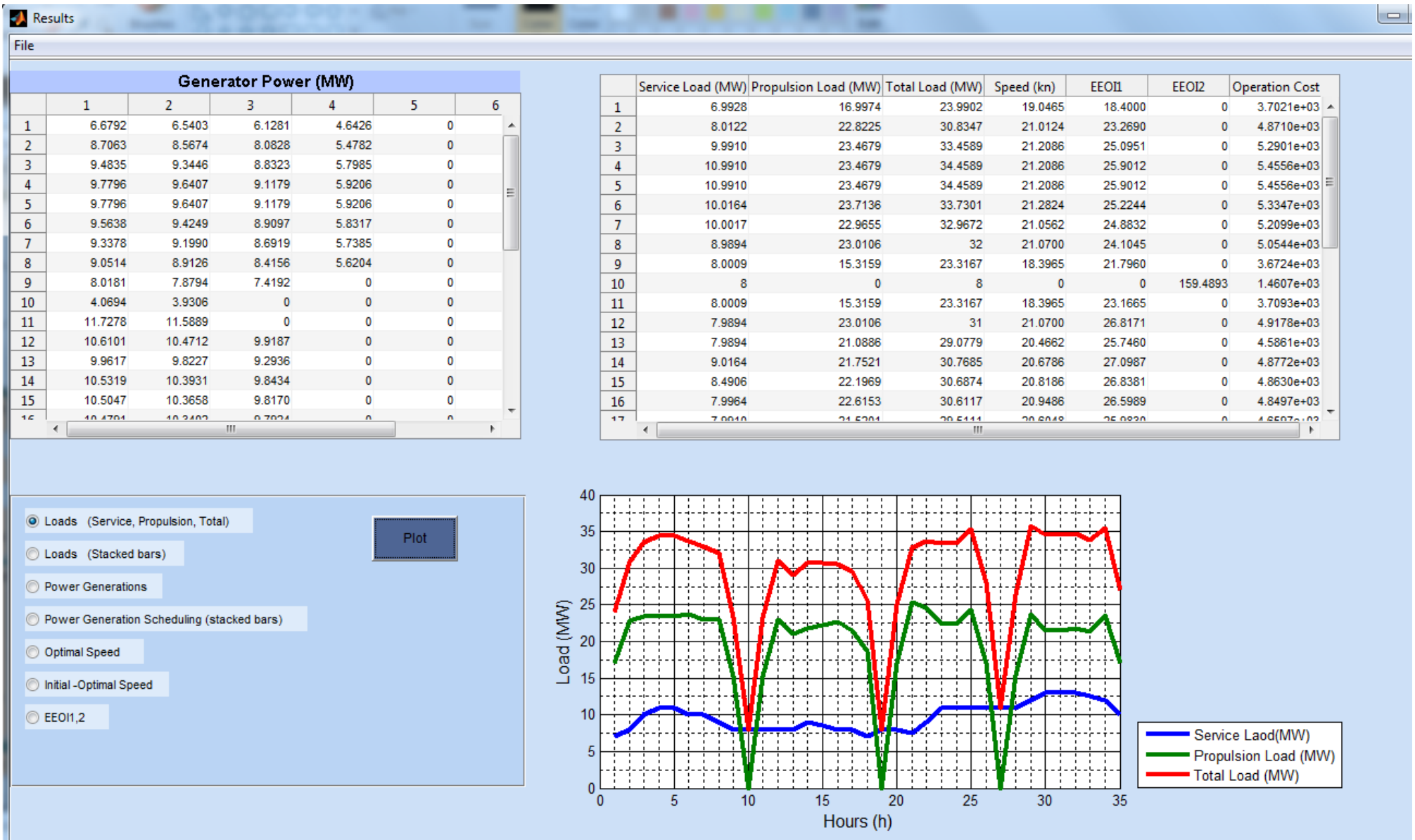
3.6.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Service Load (MW)	Prop. Load (MW)	Total (MW)	Speed (kn)	EEOI1	EEOI2	Operation Cost
6,99	16,99	23,99	19,05	18,4	0	3702,1
8,01	22,82	30,83	21,01	23,27	0	4870,99
9,99	23,47	33,46	21,21	25,1	0	5290,14
10,99	23,47	34,46	21,21	25,9	0	5455,65
10,99	23,47	34,46	21,21	25,9	0	5455,65
10,02	23,71	33,73	21,28	25,22	0	5334,7
10	22,97	32,97	21,06	24,88	0	5209,92
8,99	23,01	32	21,07	24,1	0	5054,39
8	15,32	23,32	18,4	21,8	0	3672,44
8	0	8	0	0	159,49	1460,75
8	15,32	23,32	18,4	23,17	0	3709,32
7,99	23,01	31	21,07	26,82	0	4917,84
7,99	21,09	29,08	20,47	25,75	0	4586,12
9,02	21,75	30,77	20,68	27,1	0	4877,17
8,49	22,2	30,69	20,82	26,84	0	4862,98
8	22,61	30,61	20,95	26,6	0	4849,74
8,01	21,52	29,51	20,6	25,98	0	4659,7
7	18,63	25,63	19,64	23,54	0	4023,88
8	0	8	0	0	167,83	1460,75
7,99	17	24,99	19,05	25,14	0	4031,76
7,5	25,33	32,83	21,76	26,09	0	5187,96
9	24,63	33,63	21,55	27,01	0	5317,25
11	22,31	33,31	20,85	27,64	0	5266,67
11	22,31	33,31	20,85	27,64	0	5266,67
11	24,31	35,31	21,46	29	0	5616,13
10,99	17	27,99	19,05	27,47	0	4404,35
11	0	11	0	0	213,97	1801,4
10,99	15,43	26,42	18,44	28,2	0	4320,14
12,02	23,71	35,73	21,28	29	0	5721,87
12,99	21,52	34,51	20,6	29	0	5515,85
12,99	21,52	34,51	20,6	29	0	5515,85
13,02	21,75	34,77	20,68	29	0	5551,32
12,5	21,34	33,84	20,55	28,91	0	5353,38
12,01	23,51	35,52	21,22	29	0	5668,6
9,99	17	26,99	19,05	26,81	0	4241,05

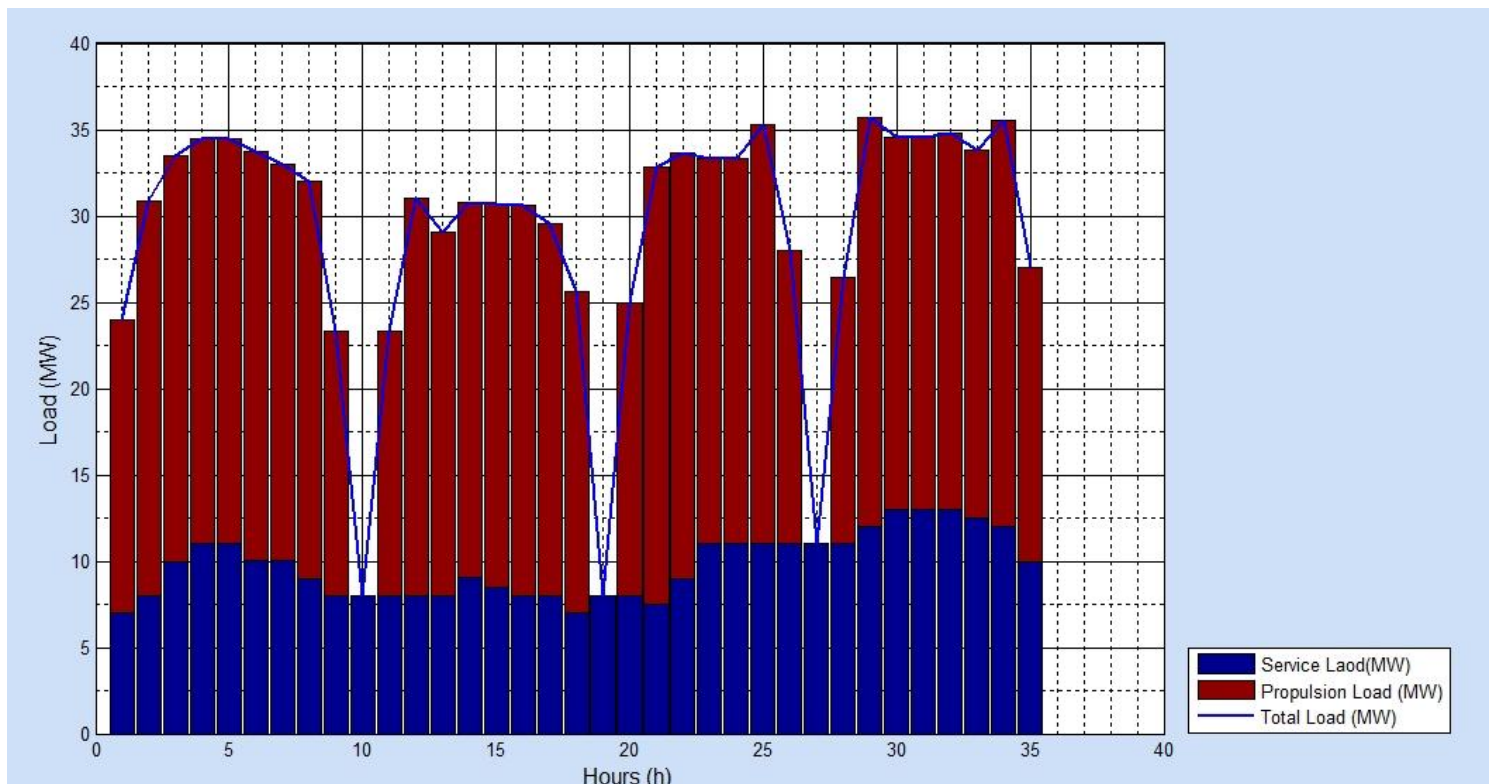
Πίνακας 3. 4 Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για το πλάνο του ταξιδιού

Pgen1 (MW)	Pgen2 (MW)	Pgen3 (MW)	Pgen4 (MW)	Pgen5 (MW)	Pgen6 (MW)	Total (MW)
6,67	6,54	6,13	4,64	0	0	23,98
8,70	8,57	8,08	5,48	0	0	30,83
9,48	9,34	8,83	5,80	0	0	27,65
9,77	9,64	9,12	5,92	0	0	34,45
9,77	9,64	9,12	5,92	0	0	34,45
9,56	9,42	8,91	5,83	0	0	33,72
9,33	9,20	8,69	5,74	0	0	32,96
9,05	8,91	8,42	5,62	0	0	32
8,01	7,88	7,42	0	0	0	23,31
4,06	3,93	0	0	0	0	7,99
11,72	11,59	0	0	0	0	23,31
10,61	10,47	9,91	0	0	0	30,99
9,96	9,82	9,29	0	0	0	29,07
10,53	10,39	9,84	0	0	0	30,76
10,50	10,37	9,82	0	0	0	30,69
10,47	10,34	9,79	0	0	0	30,6
10,10	9,97	9,43	0	0	0	29,5
8,79	8,66	8,17	0	0	0	25,62
4,06	3,93	0	0	0	0	7,99
12,56	12,43	0	0	0	0	24,99
9,29	9,16	8,65	5,72	0	0	32,82
9,53	9,39	8,88	5,82	0	0	33,62
9,44	9,30	8,79	5,78	0	0	33,31
9,44	9,30	8,79	5,78	0	0	33,31
9,31	10,59	10,16	5,24	0	0	35,3
9,59	9,45	8,94	0	0	0	27,98
5,57	5,43	0	0	0	0	11
13,28	13,14	0	0	0	0	26,42
9,54	9,49	8,78	7,93	0	0	35,74
7,93	10,14	8,97	7,47	0	0	34,51
7,93	10,14	8,97	7,47	0	0	34,51
9,30	8,97	8,84	7,66	0	0	34,77
9,60	9,46	8,94	5,85	0	0	33,85
10,00	9,14	8,86	7,52	0	0	35,52
9,26	9,12	8,61	0	0	0	26,99

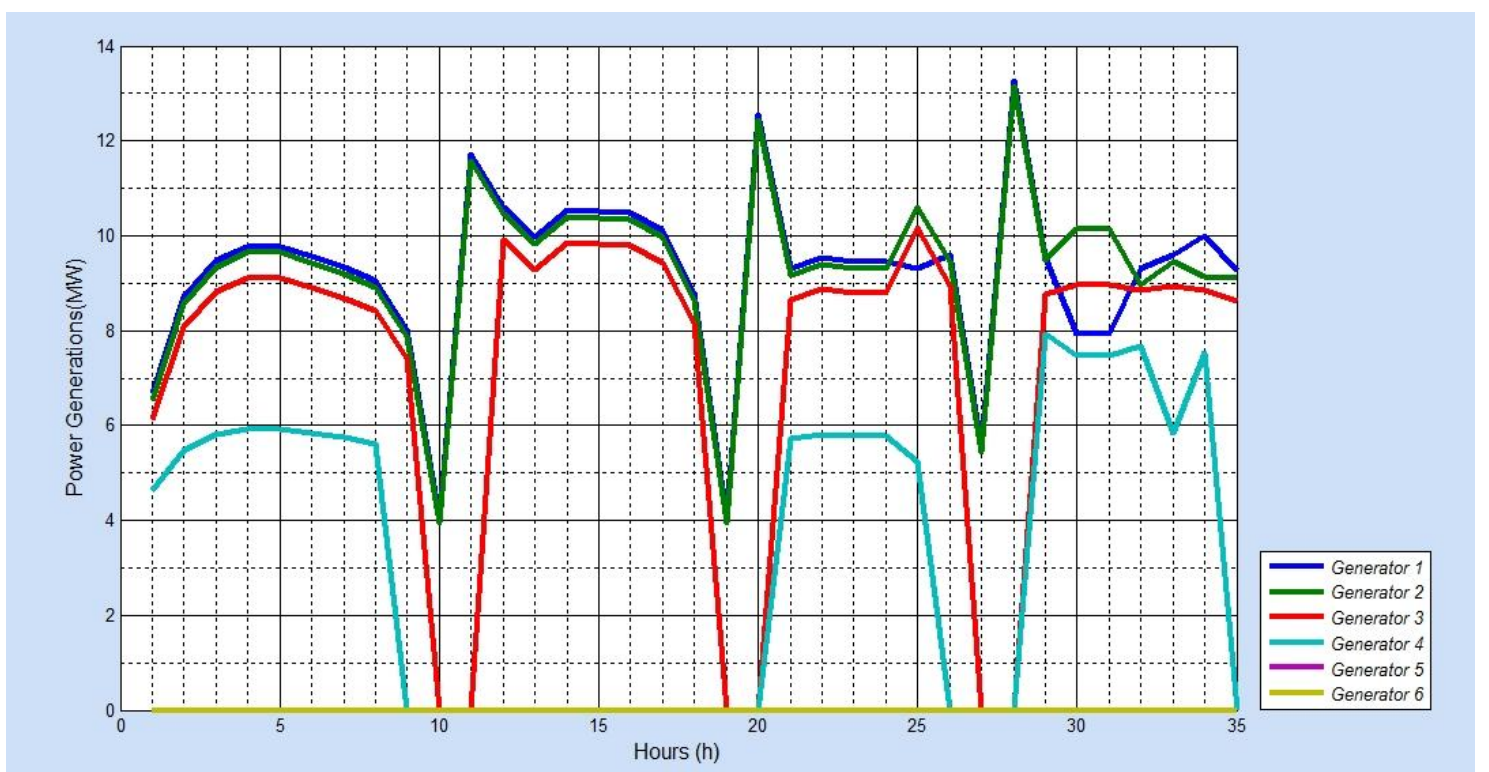
Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για την παραγόμενη ισχύ των γεννητριών



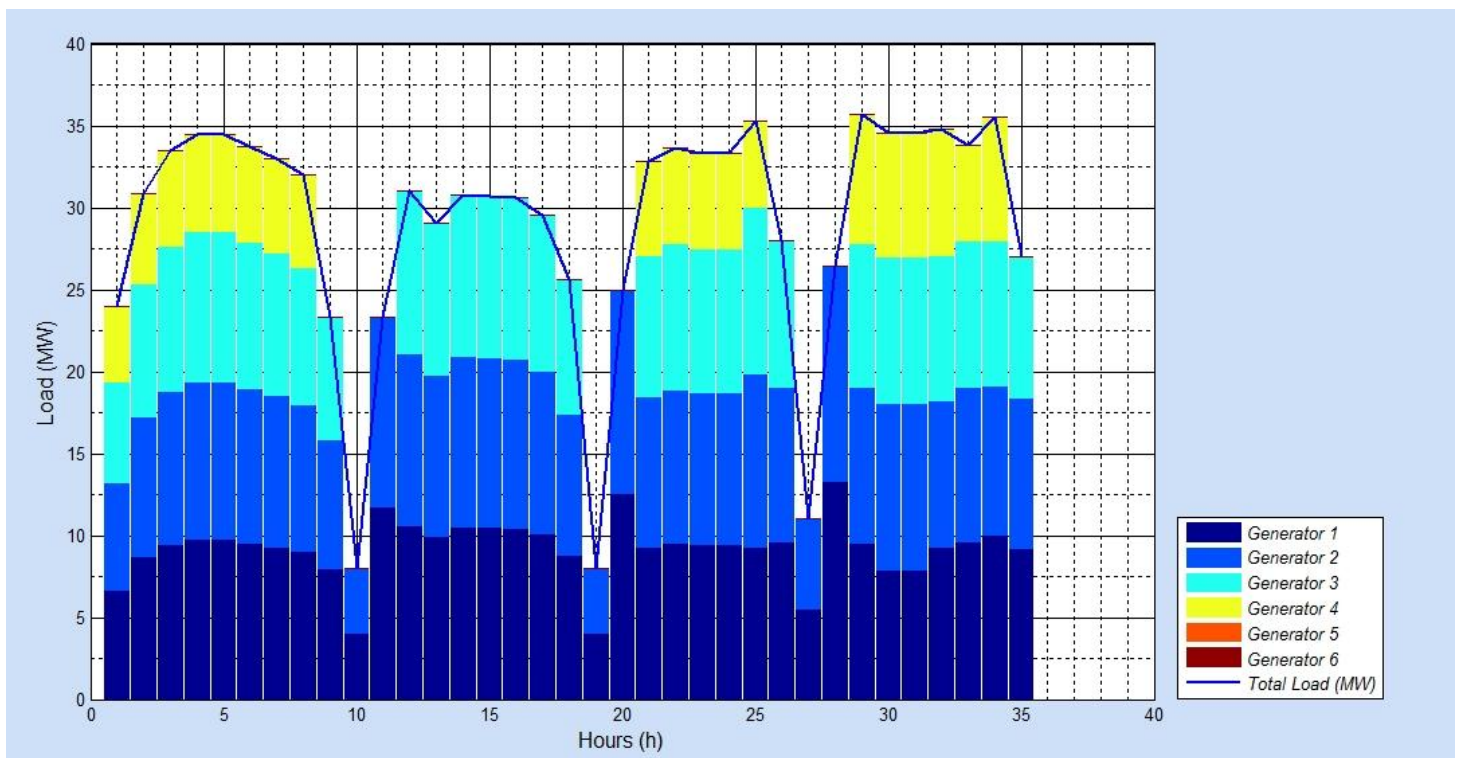
Εικόνα 3. 19 Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης όπως φαίνονται στην οθόνη "results"



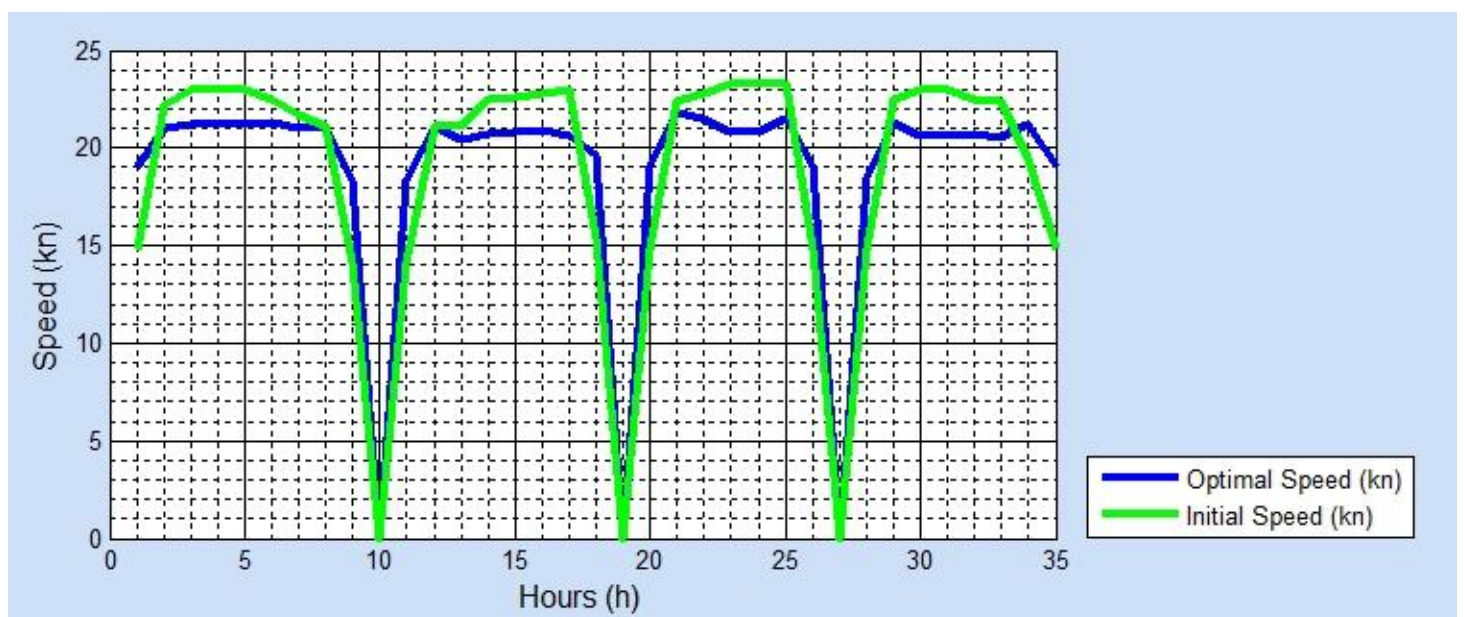
Εικόνα 3. 21 Γραφική παράσταση της ισχύος φορτίου εξυπηρέτησης, της ισχύος πρόωσης και της συνολικής ισχύος



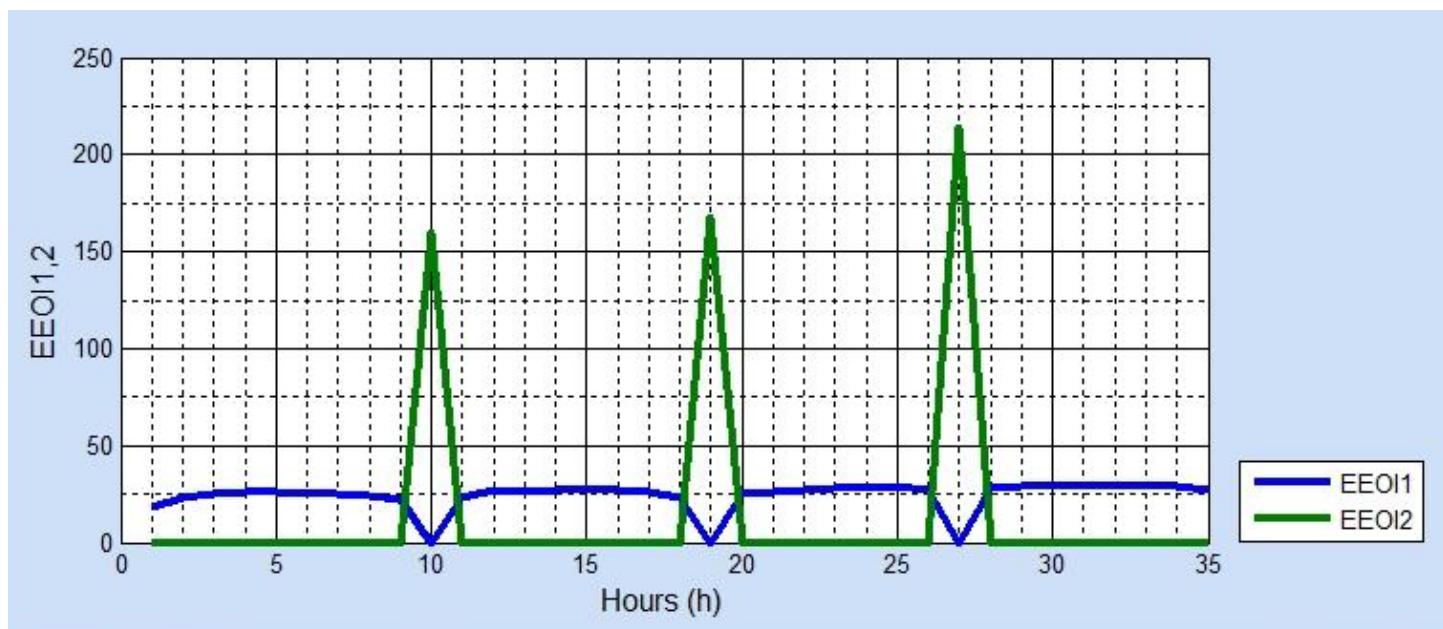
Εικόνα 3. 20 Γραφική παράσταση της ισχύος των γεννητριών



Εικόνα 3. 23 Γραφική παράσταση της ισχύος των γεννητριών και της συνολικά παραγόμενης ισχύος



Εικόνα 3. 22 Γραφική παράσταση της βέλτιστης ταχύτητας του πλοίου και του αρχικού πλάνου



Εικόνα 3. 24 Γραφική παράσταση των δεικτών ΕΕΟΙ1 και ΕΕΟΙ2

3.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Αρχικά δίνονται τα αποτελέσματα της παραγόμενης ισχύος από καθεμιά από τις γεννήτριες. Παρατηρείται ότι οι γεννήτριες 5 και 6 δεν παράγουν ισχύ σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού. Δηλαδή είναι μόνιμα σβηστές σε αντίθεση με τις 1, 2, 3 οι οποίες είναι μόνιμα σε λειτουργία (η 3 παύει μόνο όταν το πλοίο είναι αγκυροβολημένο). Η γεννήτρια 4 λειτουργεί μόνο όταν απαιτείται περισσότερη ισχύς από ότι μπορούν να παράγουν οι τρεις πρώτες. Ανατρέχοντας στην αρχική οθόνη (central screen) και συγκεκριμένα στην στήλη του καυσίμου παρατηρούμε ότι οι τρεις πρώτες γεννήτριες λειτουργούν με φθηνότερο καύσιμο έναντι των 4, 5, 6 και έχουν μικρότερα ειδικά κόστη κατανάλωσης. Επομένως τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μπορούν να χαρακτηριστούν αναμενόμενα όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ ανά γεννήτρια. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι υπάρχουν τρεις βασικές γεννήτριες που είναι και οι πιο οικονομικές (1, 2, 3) και τρεις βοηθητικές με πιο δαπανηρές.

Ακόμα ένα ενδιαφέρον σχόλιο που πρέπει να γίνει αφορά την κατανομή της παραγόμενης ισχύος. Η ισχύς προώσεως, όπως είναι λογικό, όταν το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι είναι 0. Σε ανοικτή θάλασσα όμως η ισχύς που καταναλώνεται από την πρόωση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της ισχύος που καταναλώνονται από τις υπόλοιπες λειτουργίες του πλοίου. Οι διάφορες λειτουργίες του πλοίου καταναλώνουν σχεδόν σταθερά ποσά ισχύος (γύρω στα 10MW), τα οποία όμως δεν μεταβάλλονται πτωτικά παρόλο που κατά τη διάρκεια του ταξιδιού ο αριθμός των επιβατών και των οχημάτων μειώνεται σταδιακά.

Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η βέλτιστη ταχύτητα σε σχέση με αυτή στο αρχικό πλάνου του ταξιδιού. Λίγο πριν και λίγο μετά το λιμάνι η ταχύτητα του αρχικού πλάνου είναι μικρότερη από την βέλτιστη ενώ στην ανοικτή θάλασσα συμβαίνει το αντίθετο. Η βέλτιστη ταχύτητα έχει επίσης λιγότερο απότομες μεταβολές.

Τέλος, σχετικά με τους δείκτες EEOI1 και EEOI2, ο πρώτος αναφέρεται στις εκπομπές CO₂ σε ανοικτή θάλασσα για αυτό εντός λιμανιού ο EEOI1 μηδενίζεται. Αντίθετα, ο EEOI2 είναι μηδέν όταν το πλοίο βρίσκεται σε ανοικτή θάλασσα και έχει τιμές μόνο όταν το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι. Μετά τη βελτιστοποίηση κανένας δεν ξεπερνά το άνω όριο του σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού.

3.8 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η ανάπτυξη επιφάνειας διεπαφής χρήστη με χρήση του Matlab όπου θα καταχωρούνται τα δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου, ενός αρχικού πλάνου ταξιδιού και να απεικονίζονται τα αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης του ταξιδιού του πλοίου κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς. Αρχικά δημιουργήθηκε μία οθόνη στην οποία καταχωρούνται τα δεδομένα των γεννητριών και του πλοίου καθώς και οι περιορισμοί λειτουργίας. Σε αυτή μπορεί να υπολογίζεται και να εμφανίζεται το ειδικό κόστος λειτουργίας κάθε γεννήτριας. Η επόμενη οθόνη που δημιουργήθηκε είναι την καταχώρηση του αρχικού πλάνου του ταξιδιού του πλοίου. Τέλος, δημιουργήθηκε οθόνη στην οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του ταξιδιού. Όλες οι οθόνες δημιουργήθηκαν ώστε να είναι απλές και φιλικές στον χρήστη του προγράμματος. Επίσης, η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύει τα δεδομένα αλλά και να φορτώνει δεδομένα παλαιότερων μοντελοποιήσεων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να αναπτυχθεί περεταίρω μελλοντικά με τροποποιήσεις και προσθήκες στην επιφάνεια διεπαφής ώστε να υπάρξει η δυνατότητα σύνδεσης με αλγορίθμους βέλτιστης διαχείρισης της ενέργειας σε πλοία σε πραγματικό χρόνο.

Παραπομπές

- [1] F. D. Kanellos, “Optimal Power Management with GHG Emissions Limitation in All Electric Ship Power Systems comprising Energy Storage Systems”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, issue 1, pages: 330 -339, January 2014.
- [2] Jan Fredrik Hansen, «Modeling and control of Marine power Systems» diploma thesis
- [3] Νικόλαος Γ. Μπαϊραχτάρης, «Μελέτη και κατασκευή συστήματος ελέγχου ηλεκτροκίνητου μικρού πλωτού μέσου μεταφοράς», *διπλωματική εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών , 2009
- [4] Ιστοσελίδα της εταιρίας «Hightech Finland» (<http://www.hightechfinland.com/>)
- [5] Ν. Π. Κυρτάτος Καθηγητής ΕΜΠ, «Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων», σημειώσεις εργαστηρίου ναυπηγικής μηχανολογίας, Ιανουάριος 2006
- [6] Ι. Κ. Χατζηλάου, , Ι. Μ. Προυσαλίδης, , Γ. Αντωνόπουλος, , Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, «ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ» εισήγηση, «Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές», ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιανουαρίου 2006
- [8] Ιστοσελίδα της εταιρίας Shottel (www.shotel.de)
- [9] Ιστοσελίδα της εταιρίας Alstom (www.alstom.com)
- [10] Ιστοσελίδα της εταιρίας Rollix (www.rollix.com)
- [11] Ιστοσελίδα της εταιρίας Power Conversion (www.gepowerconversion.com)
- [12] Ιστοσελίδα της εταιρίας Voith (<http://www.voith.com>)