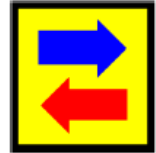




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Μελέτης Πλοίου & Θαλάσσιων Μεταφορών



Μελέτη Κύκλου Ζωής Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Πλοίου



Διπλωματική Εργασία

Δρίβας Δημήτριος

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Νικόλαος Π. Βεντικός

Αθήνα, 2018

στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Στην διαμόρφωση και ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθοριστική ήταν η καθοδήγηση και η βοήθεια του επιβλέποντος κ Νικόλαο Βεντίκου Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτωρ του Εργαστηρίου Θαλασσίων Μεταφορών του ΕΜΠ, Ειρήνη Σταματοπούλου η οποία συμμετείχε ενεργά στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θερμά ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Λάμπρο Καϊκτσή για την πολύτιμη συνεισφορά του σε θέματα που αφορούν το ευρύτερο επιστημονικό πεδίο της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη έχουν οδηγήσει στη λήψη μέτρων προκειμένου να μειωθούν τα αέρια του θερμοκηπίου. Η κοινωνική ανησυχία σχετικά με τις εκπομπές και τους ρύπους αυξάνεται. Παρότι η ναυτιλιακή βιομηχανία συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη συνεισφέροντας με ποσοστό λιγότερο από το 3% των εκπεμπόμενων αερίων, ο IMO θέτει περιορισμούς στην εκπομπή ρύπων SO_x, NO_x σε περιοχές περιορισμένης εκπομπής (ECA) και στη συνέχεια ο MRV ακολουθεί με την παρακολούθηση των εκπομπών CO₂. Εξετάζοντας τρόπους μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και των αερίων των ρύπων, με τη συνειδητοποίηση από τη διεθνή κοινότητα των επιδράσεων τους στον πλανήτη, οδηγούμαστε σε εφαρμογές νέων τεχνολογιών σε κάθε τομέα που σχετίζεται με αυτό το παγκόσμιο πρόβλημα. Ο οργανισμός IMO έχει ήδη θέσει κανόνες ώστε να οδηγήσει τη ναυτιλία σε εφαρμογή των νέων τεχνολογιών, ώστε να συμβάλουν εν μέρει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας. Οι νέες αυτές τεχνολογίες όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια, τα αιολικά πάρκα, τα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία, η χρήση μπαταριών και οι κυψέλες καυσίμου θα οδηγήσουν στο πλοίο του μέλλοντος. Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται σε τέτοιες εφαρμογές για ένα κρουαζιερόπλοιο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως ακολούθως. Στην εισαγωγή παρουσιάζονται οι κύριες πηγές εκπομπών και ρύπων στη φάση λειτουργίας των πλοίων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται νέες τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν. Μια σειρά σεναρίων αναπτύχθηκαν ώστε να εξυπηρετηθούν τα φορτία του κρουαζιεροπλοίου. Στη μελέτη αυτή η κάλυψη όλων των φορτίων του πλοίου γίνεται μέσω ενός συνδιασμού διαφόρων στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχοντας ως στόχο την διερεύνηση του κατά πόσο είναι οικονομική μία τέτοια λειτουργία.

Με σκοπό να γίνει η προσομοίωση της λειτουργίας, σε επίπεδο κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών ρύπων, στον κύκλο ζωής ενός πλοίου που χαρακτηρίζεται ως εξηλεκτρισμένο επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τ' αποτελέσματα μελέτης που αφορά τον υπολογισμό των φορτίων ενός κρουαζιεροπλοίου που εκτελεί δρομολόγια στη Βαλτική θάλασσα. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων θα γίνει η επιλογή των κύριων στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου, που στη παρούσα εργασία επιλέχθηκαν να είναι GenSets, Κυψέλες Καυσίμου και Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση, βασιζόμενοι στις ανάγκες αυτές αλλά και στους περιορισμούς που υπάρχουν ακολουθώντας τις υποδείξεις των τεχνικών εγχειριδίων. Για τη προσομοίωση επιλέχθηκε το δυναμικό υπολογιστικό πακέτο TRNSYS που είναι σχεδιασμένο για ενεργειακά συστήματα παραγωγής ενέργειας για διάρκεια λειτουργίας έως ένα έτος.

Η προσομοίωση θα γίνει σε 20 σενάρια (6 για GenSets με χρήση καυσίμου MDO και 6 για χρήση καυσίμου LNG, 6 για τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου βάσει του εύρους λειτουργίας των GenSets και 2 για φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Τα στοιχεία αυτά συνθέτουν το σύστημα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου ενώ εξετάζεται το επίπεδο κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και ρύπων βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Μέσω αυτών θα οδηγηθούμε σε συμπεράσματα που θα αφορούν αφενός τη βέλτιστη λειτουργία και συνεργασία των στοιχείων που συνθέτουν το σύστημα παραγωγής ενέργειας ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου και αφετέρου την αξιολόγηση της εφαρμογής τέτοιων επιλογών συνολικά από τη ναυτιλία.

Abstract

The effect of global warming has led to set measurements in order to reduce the Greenhouse Gases. The societal awareness regarding emissions and pollutants is increasing. Although shipping industry contributes to global warming with less than 3% IMO set a limit for pollutants SO_x, NO_x, in emission restricted areas and then MRV has followed with the monitoring of CO₂ emissions. When you look for ways of reducing the gases of the Greenhouse and also the gases of the pollutants, after realizing from the nation community their effects on the planet, that leads to adjustments of making new technological stuff in every section that is related to this global problem. The organization IMO has already set rules so as to lead the navy in adjustments in new technology, that they can partly contribute to reduce the effect of environmental footprint of shipping try. New technologies such as renewables, solar power, wind farms, electric ship, batteries and fuel cells are going to be used and lead towards the vessel of the future. This study focuses on the investigating related scenarios in a cruise vessel.

This paper is structured as follows. An introduction presents the key sources for emissions and pollutants during operational phase of a cruise vessel. Afterwards, a selection of new technologies that can be applied are presented. A numerous of scenarios have been developed to describe all the possible required loads of the vessel. In this study a set of power plants is assumed that it provides all the electricity and propulsion. The goal was to investigate if this could lead to significant emission reduction.

In order to simulate fuel consumption and emissions, in the life cycle of a ship which is characterized as all electric ship the simulation ship was selected to be a cruise ship that travels in Baltic sea. Based on these results, we selected the main ship power generating elements, which in this work were selected to be GenSets, Fuel Cells and Photovoltaic Installation, based on these demands as well as on the limitations that exist and following the instructions in the technical manuals. For the simulation the dynamic computational package TRNSYS has been selected which was designed for power plant systems with simulation time up to one year.

The simulation consists of a sets of 20 scenarios (6 for GenSets using MDO as fuel and 6 using LNG as fuel, 6 for fuel cells operation based on GenSets operation and 2 for photovoltaic installations). Those were selected as the components that constitute the power generation system of the ship. Then, the level of fuel consumption and greenhouse gas emissions and pollutants was calculated.

Through the above procedure regarding the optimum management and cooperation of the selected elements comprising the electric production system of the all electric ship and conclusions were drawn as adjustment about the implementation of these elements.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	2
1. Εισαγωγή.....	11
1.1 Στόχος.....	11
1.2 Δομή	11
2. Αέριες Εκπομπές από τη Ναυτιλία.....	13
2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Η Δράση των Αερίων του Θερμοκηπίου και των Αέριων Ρύπων.....	15
2.2.1 Αέρια του θερμοκηπίου	15
2.2.2 Αέριοι Ρύποι	16
2.3 Μέτρα μείωσης εκπομπών	17
2.4 Προτάσεις για μείωση των εκπομπών	21
3. Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο	22
3.1 Περιγραφή Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Πλοίου	22
3.2 Ανάλυση πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου	23
3.2.1 Ηλεκτροπρόωση	23
3.2.1.1 GenSet	26
3.2.1.1.1 Καύσιμα των GenSets.....	27
3.2.1.1.2 Πίνακας Διανομής	31
3.2.1.1.3 Μετασχηματιστής Παροχής	31
3.2.1.1.4 Μετατροπέας Συχνότητας.....	31
3.2.1.1.5 Ηλεκτροκινητήρας.....	32
3.2.1.1.6 Κιβώτιο Ταχυτήτων	34
3.2.1.1.7 Συνεργασία έλικα – κινητήρα πρόωσης.....	34
3.2.2 Κυψέλες Καυσίμου	36
3.2.2.1 Η Χρήση του Υδρογόνου ως Καύσιμο	36
3.2.2.2 Κυψέλη Καυσίμου (Fuel Cell)	37
3.2.4 Στήλη Κυψελών Καυσίμου	42
3.2.5 Γενική δομή συστήματος παραγωγής ενέργειας με PEMFC.....	43
3.3 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση	46
4. Περιγραφή Μελέτης Περίπτωσης.....	48
4.1 Επιλογή Τύπου Πλοίου.....	48
4.2 Κρουαζιερόπλοιο Προσομοίωσης.....	49
4.3 Διάρκεια Προσομοίωσης.....	51
4.4 Σχεδιασμός Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Πλοίου	53

4.4.1 Σχεδιασμός Ηλεκτροπρόωσης.....	53
4.4.1.1 Επιλογή μηχανής	54
4.4.1.2 Επιλογή Εναλλακτήρα και Διανομέα Ισχύος	62
4.4.1.3 Επιλογή ηλεκτροκινητήρων.....	63
4.5 Κυψέλες καυσίμου	65
4.6 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση	67
5. Πρόγραμμα Δυναμικής Προσομοίωσης TRNSYS	70
5.1 Μαθηματική τυποποίηση Στοιχείων της Προσομοίωσης.....	71
5.1.1 Switchboard-Degs Dispatch controller (Type 102).....	71
5.1.2 GenSet - Diesel Engine Generator Set (Type 120).....	71
5.1.3 Διαφορικός Ελεγκτής (Type 2d)	72
5.1.4 Ολοκληρωτής (Type 24)	72
Inverter/Converter	72
5.1.6 Κυψέλες PEM (Type 170)	73
5.1.7 Data Reader	73
5.1.8 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία (Type180).....	73
5.1.9 Ωριαίο Αρχείο Καιρού (Type54)	74
5.1.10 Online Plotter (Type65d)	75
5.1.11 Printer (Type25c).....	75
5.1.12 Προσθήκη Εξισώσεων	75
6. Σενάρια Προσομοίωσης	77
6.1 GenSets.....	78
6.1.1 Καύσιμο MDO.....	78
6.1.2 Καύσιμο LNG	82
6.2 Κυψέλες Καυσίμου	91
6.3 Προσομοίωση Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας	98
7. Αποτελέσματα	103
7.1. GenSets.....	103
7.2 Κυψέλες Καυσίμου	108
7.3 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση	111
8.Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	114
9.Συμπεράσματα	115
Βιβλιογραφία	116
Παράρτημα-Α	117

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ποσοστό εκλυόμενων ρύπων από τη παγκόσμια ναυτιλία, IMO 2015.....	14
Πίνακας 2.2: Όρια του IMO για περιεκτικότητα S στο καύσιμο.....	19
Πίνακας 2.3: Όρια εκπομπών NOx βάσει του VI Παραρτήματος της οδηγίας Marpol.....	19
Πίνακας 3.1 Βασικά Στοιχεία που Συνθέτουν την Ηλεκτροπρώωση.....	24
Πίνακας 3.2: Κόστος και θερμογόνος ισχύς ανά τύπο πετρελαίου.....	27
Πίνακας 3.3: Εκπομπές ανά kg αέριων του θερμοκηπίου και ρυπαντών ,IMO 2009.....	28
Πίνακας 3.4: Εκπομπές ρύπων ανά kg Ing και παραγόμενης kwh.....	29
Πίνακας 3.5: Σύγκριση παραγόμενων ρύπων σε σχέση με το καύσιμο και το τύπο της μηχανής.....	30
Πίνακας 3.6: Αντιδράσεις σε ηλεκτρόδια ανόδου καθόδου ανάλογα το τύπο της κυψέλης...39	
Πίνακας 3.7: Παραγόμενη τάση βάσει των τύπων του Nernst για κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου.....	39
Πίνακας 4.1: Παραγγελίες νέων κρουαζιερόπλοιών έως το 2019 και προβλέψεις για τα έτη 2020-2026, CLIA.....	48
Πίνακας 4.2: Στοιχεία μηχανής τύπου L 51/60DF, MAN 2016.....	56
Πίνακας 4.3: Μεθοδολογία εκλογής μοντέλου και αριθμού μηχανών ανάλογα το φορτίο, MAN 2016.....	57
Πίνακας 4.4: Τροποποιημένη μεθοδολογία εκλογής μοντέλου και αριθμού μηχανών ανάλογα το φορτίο, MAN 2016.....	57
Πίνακας 4.5: Στοιχεία μηχανής 7L51/60DF, MAN 2016.....	57
Πίνακας 4.6: Ειδική κατανάλωση καυσίμου της 51/60DF σε σχέση με φορτίο στις 500rpm, MAN 2016.....	58
Πίνακας 4.7: Τιμές αναφοράς περιβάλλοντος-ποιότητας καυσίμου για MDO, MAN 2016.....	59
Πίνακας 4.8: Ειδική κατανάλωση σε λειτουργία διπλού καυσίμου MAN 51/60DF Project Guide – Marine.....	60
Πίνακας 4.8: Τιμές αναφοράς περιβάλλοντος και ποιότητας καυσίμου για διπλό καύσιμο, MAN 2016.....	61
Πίνακας 4.9: Επιλογή τάσης λειτουργίας , MAN 51/60DF Project Guide – Marine 2016.....	62
Πίνακας 4.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά FCM, Siemens 2015.....	65
Πίνακας 4.11: Τεχνικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών πλαισίων SPR-X21 της Sunpower.....	67
Πίνακας 4.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων 20000TL & 25000TL της εταιρίας SMA, SMA 2015.....	68
Πίνακας 6.1: Εύρος λειτουργίας κάθε GenSet ανά σενάριο προσομοίωσης.....	78
Πίνακας 6.2: Αναγωγή της κατανάλωσης καυσίμου για τη κατανάλωση καυσίμου στα όρια του εύρους λειτουργίας.....	78
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα από γραμμική παρεμβολή.....	79
Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά επιλεγόμενων καυσίμων.....	82
Πίνακας 6.5: Αναγωγή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατ' όγκον και κατά μάζα για τυποποιημένο του IMO.....	82
Πίνακας 6.6: Αναγωγή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατ' όγκον και κατά μάζα για Αλγερινό κοίτασμα.....	82
Πίνακας 6.7: Ποσοστό μείωσης εκπομπών ανά καύσιμο σε σχέση με το επίπεδο φόρτισης της μηχανής.....	83
Πίνακας 6.8: Κατανάλωση καυσίμου κατά όγκο και κατά μάζα σε σχέση με το επίπεδο φόρτισης της μηχανής για το τυποποιημένο καύσιμο του IMO.....	83
Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα από γραμμική παρεμβολή για τη κατανάλωση καυσίμου στα όρια του εύρους λειτουργίας.....	84

Πίνακας 6.10: Συνολικά εγκατεστημένο πλήθος FCM34 ανά σενάριο λειτουργίας των GenSets.....	91
Πίνακας 7.1:Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας των GenSet με καύσιμο MDO ανά σενάριο προσομοίωσης.....	104
Πίνακας 7.2:Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας των GenSet με καύσιμο LNG ανά σενάριο προσομοίωσης.....	103
Πίνακας 7.3: Συντελεστές εκπομπών ανά τύπο καυσίμου.....	103
Πίνακας 7.4: Συνολικές εκπομπές για λειτουργία με MDO.....	104
Πίνακας 7.5: Συνολικές εκπομπές για λειτουργία με LNG.....	104
Πίνακας 7.6: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με MDO.....	105
Πίνακας 7.7: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με LNG.....	106
Πίνακας 7.8: Εκπομπές των GeneSets για MDO και LNG ανά έτος βάσει αποτελεσμάτων του Σεναρίου 5.....	107
Πίνακας 7.9:Απόλυτη και ποσοστιαία διαφορά εκπομπών για λειτουργία με MDO και LNG βάσει των αποτελεσμάτων του Σεναρίου 5.....	107
Πίνακας 7.10: Κατανάλωση εγκατάστασης κυψελών καυσίμου στο σύνολο της ετήσιας λειτουργίας του πλοίου.....	108
Πίνακας 7.11: Εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση εκπομπών λόγω χρήσης των κυψελών καυσίμου ανά σενάριο για καύσιμο MDO.....	108
Πίνακας 7.12: Ποσοστιαία εξοικονόμηση καυσίμου και μείωσης ρύπων ανά σενάριο προσομοίωσης με MDO.....	109
Πίνακας 7.13: Εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση εκπομπών λόγω χρήσης των κυψελών καυσίμου ανά σενάριο για καύσιμο MDO.....	109
Πίνακας 7.14: Ποσοστιαία εξοικονόμηση καυσίμου και μείωσης ρύπων ανά σενάριο προσομοίωσης με LNG.....	109
Πίνακας 7.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης της φ.β. εγκατάστασης για συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	112
Πίνακας 7.16: Εξοικονόμηση καυσίμου MDO και μείωση εκπομπών για λειτουργία στη Βαλτική.....	112
Πίνακας 7.17: Εξοικονόμηση καυσίμου MDO και μείωση εκπομπών για λειτουργία στη Βαλτική.....	112
Πίνακας 7.18: Παραγόμενη ενέργεια από τη φ.β. εγκατάσταση ανά έτος.....	113

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Ποσοστό έκλυσης CO ₂ από καύση ορυκτών καυσίμων ανά χρήστη,Second IMO GHG Study 2009.....	14
Διάγραμμα 2.2: Πρόβλεψη εκπομπών CO ₂ σε Mt από τον IMO, Third IMO Study , 2014.....	18
Διάγραμμα 2.3: Επιτρεπόμενες εκπομπές NO _x και συγκεντρώσεις συναρτήσει των στροφών λειτουργίας της μηχανής.....	21
Διάγραμμα 3.1:Αριθμός πλοίων με ηλεκτροπρόωση που ναυπηγήθηκαν ανά έτος. Electrical Propulsion in the Low Διάγραμμα.....	22
3.2: Απώλειες ενέργειας ανά στοιχείο στην ηλεκτροπρόωση, MAN 51/60DF Project Guide Marine 2016.....	24
Διάγραμμα 3.3: Ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανής ανάλογα το ποσοστό φόρτισης της, Wartsila 2014.....	26
Διάγραμμα 3.4: Φάσεις του φυσικού αερίου βάσει πίεσης και θερμοκρασίας,Wikipedia.....	28
Διάγραμμα 3.4: Τυπικό διάγραμμα Ροής-Στροφών Ηλεκτροκινητήρα Technical guide No. 4 Guide to variable speed drives ABB, 2011.....	33
Διάγραμμα 3.5: βαθμός απόδοσης, τάση κυψέλης ,ηλεκτρική ισχύς, παραγωγή θερμότητας σε σχέση με το παραγόμενο ρεύμα σε τυπική κυψέλη καυσίμου, Fuel Cell Formulary, Dr. Alexander Kabza.....	41

Διάγραμμα 3.6: Ισχύς κατανάλωσης βοηθητικών στοιχείων των κυψελών καυσίμου.....	45
Διάγραμμα 3.7: Ρεύματος-Τάσεως από φωτοβολταϊκό πάνελ βάσει της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας.....	47
Διάγραμμα 3.8: Μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο ανάλογα τον τύπο του αντιστροφέα.....	47
Διάγραμμα 4.1: Εκατομμύρια επιβατών σε κρουαζιέρα ανά έτος παγκοσμίως, CLIA 2015....	48
Διάγραμμα 4.2: Ποσοστό του χρόνου που καταλαμβάνει σε ετήσια βάση κάθε κατάσταση του πλοίου, , Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015.....	50
Διάγραμμα 4.3 & 4.4: Ποσοστό φόρτισης της μηχανής για τις μηχανές πρόωσης και τις ηλεκτρογεννήτριες , Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015.....	50
Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα Sankey Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015	
Διάγραμμα 4.5: Αρ. ενεργών κρουαζιερόπλοιών στη Βαλτική ανά μήνα, HELCOM 2014.....	52
Διάγραμμα 4.6: Αριθμός επιβατών ανά έτος για κρουαζιέρα στη Βαλτική, HELCOM 2014....	52
Διάγραμμα 4.7: Οδηγός εκλογής μοντέλου μηχανής βάσει της απαιτούμενης ισχύος, MAN 2016.....	55
Διάγραμμα 4.8: Καμπύλες ειδικής κατανάλωσης καυσίμου MAN 51/60DF, MAN 2016.....	58
Διάγραμμα 4.9: Αύξηση της ειδικής κατανάλωσης βάσει των ωρών λειτουργίας και της συχνότητας συντηρήσεων της μηχανής MAN 51/60DF Project Guide – Marine 2016.....	60
Διάγραμμα 4.10: Αύξηση της ειδικής κατανάλωσης σε λειτουργία διπλού καυσίμου MAN 51/60DF Project Guide – Marine.....	61
Διάγραμμα 4.11: Αέριες εκπομπές για MDO και διπλό καύσιμο στη 51/60DF, MAN 2016....	62
Διάγραμμα 4.12: Ισχύς και παραγόμενη ροπή ηλεκτροκινητήρα σε σχέση με τον αριθμό στροφών του, ABB 2014.....	63
Διάγραμμα 4.13: Λειτουργία της έλικας, MAN 2016.....	64
Διάγραμμα 4.14 : Βαθμός απόδοσης (αριστερά) και παραγόμενης ισχύος (δεξιά) σε συνάρτηση με το απορροφούμενο από το φορτίο ρεύμα , Siemens 2015.....	66
Διάγραμμα 4.15: Τάση στοιχείου κυψέλης σε συνάρτηση με το παραγόμενο ρεύμα , Siemens 2015.....	66
Διάγραμμα 4.16: Εγγυημένη ισχύς και αντοχής προϊόντος των φωτοβολταϊκών πλαισίων SPR-X21 της Sunpower.....	67
Διάγραμμα 4.17: Καμπύλη βαθμού απόδοσης βάσει ισχύος SMA 250000TL-30, SMA 2015...	68
Διάγραμμα 5.1: Λειτουργία Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου, TRNSYS 2011.....	72
Διάγραμμα 6.1: Κατανάλωση καυσίμου MDO ανά ώρα βάσει του ποσοστού φόρτισης της μηχανής.....	79
Διάγραμμα 6.2: Κατανάλωση καυσίμου LNG ανά ώρα βάσει του ποσοστού φόρτισης της μηχανής.....	83
Διάγραμμα 6.3: Απαίτηση συνολικών φορτίων σε KW.....	87
Διάγραμμα 6.4: Τιμές αποτελεσμάτων των διαφορικών ελεγκτών.....	87
Διάγραμμα 6.5: Σύνολο φορτίων για κάλυψη από GenSets.....	88
Διάγραμμα 6.6: Φορτία που αναλαμβάνουν να καλύψουν οι κυψέλες καυσίμου.....	88
Διάγραμμα 6.7: Αριθμός ενεργών GenSets και παραγωγή ισχύος του καθενός.....	89
Διάγραμμα 6.8: Συνολική κατανάλωση καυσίμου των GenSets ανά ώρα.....	89
Διάγραμμα 6.9: Συνολική παραγόμενη ενέργεια και κατανάλωσης καυσίμου.....	90
Διάγραμμα 6.10: Φορτία που θα καλυφθούν μέσω των FCM34.....	92
Διάγραμμα 6.11: Απαιτούμενη ισχύς ανά FCM34.....	93
Διάγραμμα 6.12: Λειτουργία διαφορικών ελεγκτών.....	93
Διάγραμμα 6.13: Μετατρέπόμενη ισχύς σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος από το converter.....	94
Διάγραμμα 6.14: Βαθμός απόδοσης του converter.....	94
Διάγραμμα 6.15: Τάση των FCM34.....	95
Διάγραμμα 6.16: Παραγόμενο ρεύμα από τις FCM34.....	95

Διάγραμμα 6.17: Συνολική κατανάλωση υδρογόνου κατ' όγκον σε κανονικές συνθήκες από τις FCM34.....	96
Διάγραμμα 6.18: Βαθμός απόδοσης κυψελών καυσίμου.....	96
Διάγραμμα 6.19: Συνολική κατανάλωση υδρογόνου από τις κυψέλες καυσίμου για την διάρκεια λειτουργίας του πλοίου ανά έτος.....	97
Διάγραμμα 6.20: Προσπίπτουσα ισχύς ανά m ² φ.β. πάνελ.....	99
Διάγραμμα 6.21: Μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος Στοκχόλμης.....	100
Διάγραμμα 6.22: Συνολική ισχύς που παράγεται από το σύνολο των φ.β. πάνελ.....	100
Διάγραμμα 6.23: Βαθμός απόδοσης των inverter.....	101
Διάγραμμα 6.24: Ισχύς που μετατρέπεται σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος στον κάθε inverter.....	101
Διάγραμμα 6.25: Η συνολικά διαθέσιμη από την φ.β. εγκατάσταση ισχύς.....	102
Διάγραμμα 6.26: Η συνολικά διαθέσιμη ενέργεια από τη φ.β. εγκατάσταση ανά έτος λειτουργίας.....	102
Διάγραμμα 7.1: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με MDO.....	105
Διάγραμμα 7.2: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με LNG.....	106
Διάγραμμα 7.3: Ετήσια παραγωγή ενέργειας από τη φ.β. εγκατάσταση για κρουαζιερόπλοιο στη Βαλτική.....	111
Διάγραμμα 7.4: Ετήσια παραγωγή ενέργειας από τη φ.β. εγκατάσταση για κρουαζιερόπλοιο στο Αιγαίο.....	111

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση στοιχείων που εκλύονται από τη λειτουργία ενός πλοίου, EMEC 2015.....	13
Εικόνα 2.2: Είσοδος και έξοδος μιας ναυτικής μηχανής (Δεδομένα για τις ποσότητες αέρα, καυσίμου, λιπαντικού, τη σύνθεση του καυσίμου και του λαδιού και τη σύσταση των καυσαερίων από MAN & Diesel, 2004).....	14
Εικόνα 2.3:Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας των αερίων του θερμοκηπίου.....	15
Εικόνα 2.4:Σχηματική αναπαράσταση επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, Building Green 2011.....	16
Εικόνα 2.5:Σχηματική αναπαράσταση επιπτώσεων των ρυπαντών, WWF 2012.....	17
Εικόνα 2.6:Περιοχές αναγνωρισμένες ως ECA, www.isalos.net.....	20
Εικόνα 2.7:Σχηματική αναπαράσταση νέων τεχνολογιών για μείωση των εκπομπών από τα πλοία	21
Εικόνα 3.1:Σχεδιάγραμμα τυπικής εγκατάστασης πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου. Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, Ι.Μ.Προυσαλίδης,2006	23
Εικόνα 3.2: Διάταξη Ηλεκτροπρόωσης, MAN 51/60DF Project Guide – Marine, 2016.....	23
Εικόνα 3.3: Αναπαράσταση μηχανικής (επάνω) και ηλεκτρικής (κάτω) πρόωσης.....	24
Εικόνα 3.4: Συστοιχία GenSets.....	26
Εικόνα 3.5:Τύποι δεξαμενών αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου.....	29
Εικόνα 3.6:Θέσεις δεξαμενών υγροποιημένου φυσικού αερίου ανάλογα τον τύπο του πλοίου.....	29
Εικόνα 3.7:: Μηχανή Διπλού Καυσίμου,MAN 2016.....	30
Εικόνα 3.8::Σχηματική αναπαράσταση πίνακα διανομής.....	31
Εικόνα 3.9: Ηλεκτρονική αναπαράσταση μερών μετατροπέα συχνότητας, ABB 2016.....	32
Εικόνα 3.10:Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μετατροπέα συχνότητας, Siemens 2016.....	32
Εικόνα 3.11: Ναυτικός ηλεκτροκινητήρας ισχύος 36.5 MW, ABB 2011.....	33

Εικόνα 3.12: Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, I.M.Προυσαλίδης,2006.....	34
Εικόνα 3.13:Σχηματική αναπαράσταση Αζιμουθιακού Προωστήριου Συστήματος, ABB 2014	35
Εικόνα 3.14: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου τοποθετημένος σε λιμάνι για κάλυψη ηλεκτρικών φορτίων 32	
Εικόνα 3.15:Σχηματική αναπαράσταση πλοίου με εγκατάσταση κυψελών καυσίμου.....	36
Εικόνα 3.16: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.....	37
Εικόνα 3.17 : Σχηματική διάταξη τυπικής ηλεκτρολογικής εγκατάστασης πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου με κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες.....	37
Εικόνα 3.18:Διάγραμμα Ισχύος Κυψέλης Καυσίμου σύμφωνα με το IEC 62282-1 , Fuel Cell Formulary, Dr. Alexander Kabza.....	40
Εικόνα 3.19: Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς ιόντων πρωτονίου σε PEM.....	41
Εικόνα 3.20: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στήλης κυψελών καυσίμου.....	42
Εικόνα 3.21:Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης κυψέλης καυσίμου με inverter και φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος ,SMA 2016.....	43
Εικόνα 3.22:Σχηματική αναπαράσταση συνόλου εγκαταστάσεως συστήματος κυψέλης καυσίμου.....	44
Εικόνα 3.23: Ηλεκτρονική συστοιχία για μετατροπή του συνεχούς ρεύματος των κυψελών καυσίμων στο επιθυμητό εναλλασσόμενο.....	45
Εικόνα 3.24::Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε κρουαζιερόπλοιο.....	46
Εικόνα 3.25: Σχηματική διάταξη συστήματος παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά πανελ για φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος.....	46
Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης πλήρως εξηλεκτρισμένου κρουαζιερόπλοιού.....	49
Εικόνα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση των κύριων ενεργειακών στοιχείων του επιλεγόμενου πλοίου , Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015.....	49
Εικόνα 4.3:Δρομολόγια και προορισμοί κρουαζιερόπλοιών στη Βαλτική, HELCOM 2014.....	51
Εικόνα 4.4: Τυπική Ηλεκτρολογική Διάταξη Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Κρουαζιερόπλοιου, MAN 2016.....	53
Εικόνα 4.5: Διάταξη συστημάτων πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου , ABB 2015.....	54
Εικόνα 4.6:Ικανοποίηση κανονισμών Tier από τη 51/60 DF,MAN 2016.....	55
Εικόνα 4.7 Διαστάσεις μοντέλων της σειράς 51/60DF MAN ,MAN 2016.....	56
Εικόνα 4.8:Επεξήγηση ονομασίας μοντέλου, MAN 2016.....	57
Εικόνα 4.9: Φωτογραφία της μηχανής 71L51/60DF, MAN 2016.....	57
Εικόνα4.10: Εγκατάσταση FCM34, Siemens 2015.....	65
Εικόνα 4.11:Εφαρμογές των SINAVY PEM Fuel Cells, Siemens 2015.....	65
Εικόνα 4.12: Διάταξη inverters για κυψέλες καυσίμου, SMA 2017.....	66
Εικόνα 4.13: Φ.β. πλαίσιο SPR-X21-345.....	67
Εικόνα 4.14:: Σύνολο συστημάτων παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκή συστοιχία και μετατροπή της σε εναλλασσόμενη, SMA 2015.....	69
Εικόνα 5.1: Λογότυπο TRNSYS 18.....	70
Εικόνα 5.2: Σύνδεση στο πρόγραμμα TRNSYS switchboard-MAN 51/60DF.....	70
Εικόνα 5.3: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα με φωτοβολταϊκό πάνελ, TRNSYS 201.....	73
Εικόνα 6.1: Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης των GenSets στο TRNSYS Studio.....	86
Εικόνα 6.2: Σύστημα αυτομάτου ελέγχου για την λειτουργία των κυψελών καυσίμου σε σχέση με τα GenSets.....	91
Εικόνα 6.3: Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης των κυψελών καυσίμου στο TRNSYS Studio.....	95
Εικόνα 6.4:Διαστάσεις του SPR-X21-345	98

Πίνακας Συντομογραφιών

Φ.Β.	Φωτοβολταϊκό
B.A.	Βαθμός Απόδοσης
PM	Particulate Matter
IMO	International Maritime Organization
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
ECA	Emission Control Areas
GenSets	Generator Set
MGO	Marine Gas Oil
MDO	Marine Diesel Oil
HFO	Heavy Fuel Oil
IFO	Intermediate Fuel Oil
LNG	Liquefied Natural Gas
LBSI	Lean-Burn Spark Ignited
LPDF	Low Pressure Dual Fuel
HPDF	High Pressure Dual Fuel
DC	Direct current
AC	Alternating current
FC	Fuel Cell
PEMFC	Proton-Exchange Membrane Fuel Cells
PV	Photovoltaic
CLIA	Cruise Lines International Association
cSt	Centistokes
MCR	Maximum Continuous Rating
CO ₂	Carbon Dioxide
CO	Carbon Oxide
NO _X	Nitrogen Oxide
SO ₂	Sulphur Dioxide
SO _X	Sulphur Oxide
PPM	parts per million

1.Εισαγωγή

Το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο αποτελεί σήμερα μία εκ των κύριων επιλογών της ναυπηγικής βιομηχανίας στην κατεύθυνση για τη κατασκευή των λεγόμενων πράσινων πλοίων που οφείλουν να είναι μέρος της λύσης του παγκόσμιου προβλήματος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίων και των αέριων ρύπων. Ένα τέτοιο πλοίο μπορεί να συντίθεται σε κάθε περίπτωση από ένα πλήθος στοιχείων των οποίων η ορθή διαχείριση τους αποτελεί μεγάλο τμήμα της επιτυχίας του εγχειρήματος. Η πολυπαραμετρική και δυναμική συσχέτιση των παραγόντων που καθορίζουν τη λειτουργία των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σ' ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο μπορεί να προσεγγιστεί μόνο με χρήση δυναμικών υπολογιστικών προγραμμάτων. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα μας οδηγήσουν σε συμπεράσματα σχετικά με την ορθή επιλογή των κύριων στοιχείων που συνθέτουν ένα τέτοιο πλοίο καθώς και της βέλτιστης διαχείρισης τους.

1.1 Στόχος

Η ωρίμανση της περιβαλλοντική συνείδησης παγκοσμίως, σαν αποτέλεσμα των εμφανών πλέον επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στην λειτουργία του οικοσυστήματος του πλανήτη, σε συνδυασμό με την αναζήτηση αποδοτικότερων και κατ' επέκτασιν οικονομικότερων τρόπων χρήσης της ενέργειας, λόγω του ολοένα και αυξανόμενου κόστους των ορυκτών καυσίμων οδηγεί αναπόδραστα στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών στη ναυτιλία. Ο IMO στην προσπάθεια ώθησης της εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών έχει θεσπίσει μια σειρά μέτρων ανώτατων ορίων εκπομπής ρύπων τόσο για τα σύγχρονα όσο και τα παλαιότερης κατασκευή πλοία. Μία από τις τεχνολογίες που κομίζουν λύσεις στα στενά αυτά πλαίσια όντας ταυτοχρόνως οικονομικά προσιτή είναι αυτή του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου. Η ιδέα στηρίζεται στο γεγονός της υψηλής απόδοσης μιας συστοιχίας ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, καθώς με κατάλληλη διαχείρισή τους μπορούν λειτουργούν συνεχώς εντός εύρους ισχύος που καθιστούν την καύση οικονομικότερη, και ο συνδυασμός τους με αειφόρες μορφές ενέργειας οι οποίες εισάγονται στη ναυτιλιακή βιομηχανία όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στην εργασία εξετάζεται η κατανάλωση ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου εφοδιασμένου με GenSets, κυψέλες καυσίμου και φωτοβολταϊκά πάνελ προσομοιάζοντας την λειτουργία τους στην κάλυψη φορτίων με χρήση του δυναμικού προγράμματος προσομοίωσης για ενεργειακά στοιχεία TRNSYS. Στα σενάρια προσομοίωσης καθορίζεται η εκάστοτε λειτουργία των στοιχείων στις περιοχές εκείνες που είναι πλέον αποδοτικά βάσει των φορτίων που θα πρέπει να εξυπηρετηθούν. Από τα αποτελέσματα θα προκύψουν συμπεράσματα και κίνητρα για μελλοντικές μελέτες.

1.2 Δομή

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε 9 κεφάλαια με διακριτή μεταξύ τους θεματολογία.

Στο κεφάλαιο 2 αφού γίνει σύντομη αναφορά στα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα εστιάζομαστε στη συνεισφορά της ναυτιλίας στα φαινόμενα σε παγκόσμιο επίπεδο και εξετάζουμε μεμονωμένα τα στοιχεία που την συνθέτουν. Έπειτα γίνεται παρουσίαση της νομοθεσίας που έχει θεσπίσει ο IMO στο επίπεδο εκπομπής ρύπων για τα πλοία κάθε κατηγορίας και για τις περιοχές ECA. Τέλος γίνεται αναφορά σε νέες τεχνολογίες η εφαρμογή των οποίων θα μπορούσε να προσφέρει λύσεις στο πρόβλημα.

Στο κεφάλαιο 3 κάνουμε μια γενική περιγραφή της λειτουργίας και της εγκατάστασης του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού καθώς και τα χαρακτηριστικά τύπων πλοίου για τα οποία ενδείκνυται. Έπειτα ακολουθεί ανάλυση των σημαντικότερων στοιχείων που συνθέτουν το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο με βάση τις

επιλογές που έχουμε κάνει στο σύστημα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας για το πλοίο της προσομοίωσης που θ' ακολουθήσει.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η επιλογή από προϊόντα της αγοράς που θα συνθέσουν την εγκατάσταση παραγωγής και διανομής της ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου το οποίο έχουμε επιλέξει προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της λειτουργίας του. Αρχικά θα γίνει η επιλογή των GenSets κατόπιν των κυψελών καυσίμου και τέλος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης .

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η λειτουργία και η φιλοσοφία του προγράμματος με το οποίο θα γίνει η δυναμική προσομοίωση. Κατόπιν θα γίνει η ανάλυση της μαθηματικής τυποποίησης του κάθε στοιχείου του προγράμματος χρησιμοποιεί για την επίλυση των δεδομένων-εισόδων που έχει.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται ένα-ένα τα συνολικά 20 σενάρια προσομοίωσης αναλύοντας τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων και με χρήση των διαγραμμάτων που προκύπτουν καθώς και οι επιλογές που έχουν γίνει σε κάθε προσομοίωση.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται η έκθεση των αποτελεσμάτων των σεναρίων της προσομοίωσης εστιάζόμενοι στη κατανάλωση καυσίμου και στις εκπομπές ρύπων καθώς και η εξέλιξη αυτών στο κύκλο ζωής του πλοίου.

Στο κεφάλαιο 8 κάνουμε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των σεναρίων της προσομοίωσης βασιζόμενοι στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο κεφάλαιο 9 εκθέτουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα που λάβαμε μέσω της προσομοίωσης και προτείνονται πεδία για περαιτέρω έρευνα.

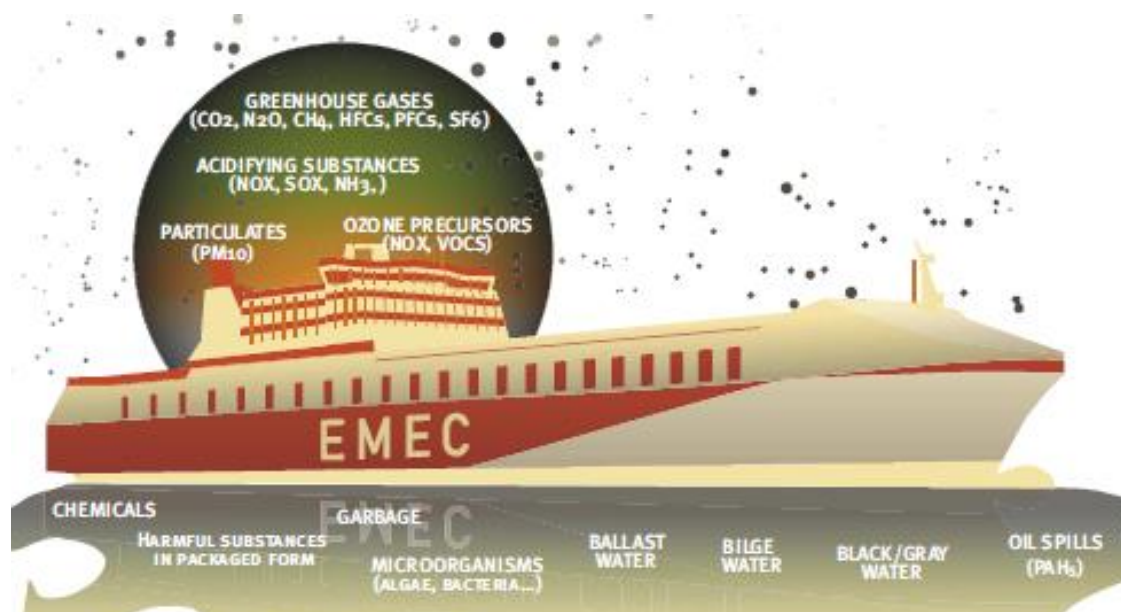
2. Αέριες Εκπομπές από τη Ναυτιλία

2.1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή συντελείται πλέον σ' ένα μεγάλο εύρος φαινομένων που εκτείνονται από την αύξηση της θερμοκρασίας έως την άνοδο της στάθμης της θάλασσας σαν αποτέλεσμα της τήξης των πολικών παγετών, καθώς και τη συχνότερη εμφάνιση καταιγίδων και πλημμυρών. Οι μεταβολές αυτές επιφέρουν με τη σειρά τους σοβαρές επιπτώσεις στην ακεραιότητα των οικοσυστημάτων, τους υδατικούς πόρους, τη δημόσια υγεία, την προσφορά τροφής, τη βιομηχανία, τις γεωργικές καλλιέργειες, τις μεταφορές και τις υποδομές. Η κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής είναι η υπερβολική χρήση ορυκτών πόρων των οποίων η καύση απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Η ανθρώπινη παρέμβαση στον φυσικό κύκλο του CO₂ τα τελευταία 150 χρόνια έχει υπάρξει καθοριστική καθώς έχει διαταράξει τις ισορροπίες στον κύκλο του CO₂ με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η προσαρμογή των φυσικών συστημάτων στα νέα δεδομένα. Εκτός όμως της αύξησης της συγκέντρωσης του CO₂ ένα πλήθος ενώσεων που αποτελούν παράγωγα της καύσης αποτελεί εχθρό για τον άνθρωπο και περιβάλλον .

Η ναυτιλία χρησιμοποιεί την χημική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων ώστε μέσω αυτής να εκτελείται σχεδόν το 90% της παγκόσμιας διακίνησης φορτίων, καθιστώντας το κυριότερο μέσον μεταφοράς προϊόντων, παράγοντας περί το 3% του συνόλου του CO₂ που εκπέμπεται από ανθρώπινη δραστηριότητα [21].



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση στοιχείων που εκλύονται από τη λειτουργία ενός πλοίου, EMEC 2015

Όπως βλέπουμε στη παραπάνω εικόνα, πέραν των αερίων του θερμοκηπίου, παράγεται ένα μεγάλο εύρος ρυπαντικών ενώσεων από τη λειτουργία των πλοίων.

Οι κυριότερες εξ αυτών είναι:

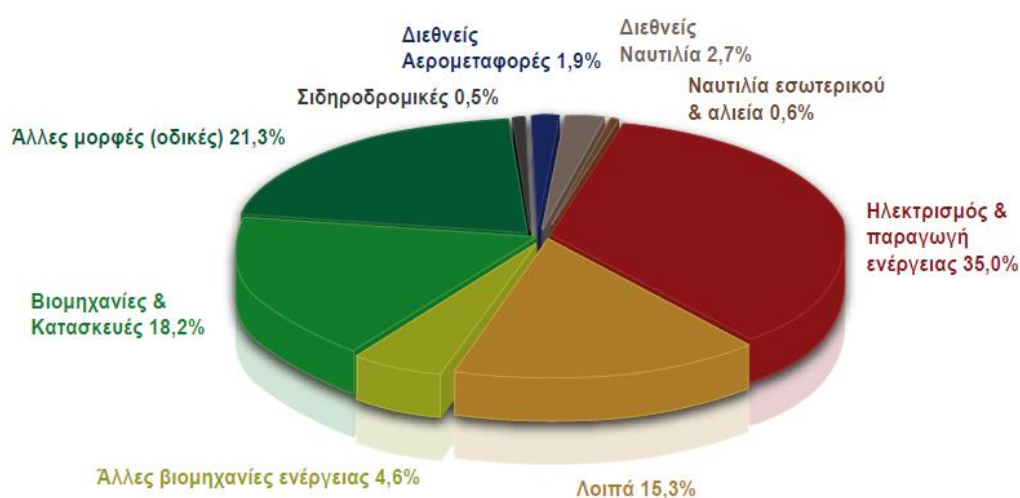
- SO_x οξείδια του θείου
- NO_x οξείδια του αζώτου
- PM αιωρούμενα σωματίδια (σκόνη, καπνός, τέφρα κλπ.)

Η ναυτιλία συμβάλει στη παραγωγή στο παγκόσμιο πρόβλημα σε επίπεδο αέριων εκπομπών στα ποσοστά του παρακάτω πίνακα σύμφωνα με τον IMO (2015)

Πίνακας 2.1: Ποσοστό εκλυόμενων ρύπων από τη παγκόσμια ναυτιλία, IMO 2015

	Estimation (mln tonnes)	Year	Share of total emissions	Source
CO ₂	949	2012	2.7%	IMO 2014
	1050	2007	3.3%	IMO 2009
	944	2007	-	Psaraftis & Kontovas 2009
	695	2006	-	Paxian et al. 2010
	813	2001	3%	Eyring et al. 2005
	912	2001	3%	Corbett & Koehler 2003
	501	2000	2%	Endresen et al. 2003
SO _x	419	1996	1.5%	IMO 2000
	10	2012	-	IMO 2014
	15	2007	-	IMO 2009
	14	2005	10%	ICCT 2007
	12	2001	9%	Eyring et al. 2005
	13	2001	9%	Corbett & Koehler 2003
	6.8	2000	5%	Endresen et al. 2003
NO _x	16.5	2005	-	Cofala et al. 2007
	17	2012	-	IMO 2014
	25	2007	-	IMO 2009
	22	2005	27%	ICCT 2007
	24.3		-	Cofala et al. 2007
	21.4	2001	29%	Eyring et al. 2005
	22.6	2001	31%	Corbett & Koehler 2003
PM ₁₀	12	2000	17%	Endresen et al. 2003
	1.3	2012	-	IMO 2014
	1.8	2007	-	IMO 2009
	1.9		-	Cofala et al. 2007
	1.7	2001	-	Eyring et al. 2005
	1.6	2001	-	Corbett & Koehler 2003
	0.9	2000	-	Endresen et al. 2003

Από το παραπάνω πίνακα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το ποσοστό των εκπομπών σε CO₂ διαχρονικά παραμένει σταθερό σ' ένα ποσοστό περί το 3% ενώ σαφέστατα αυξητικές τάσεις έχουμε στα SO_x λόγο της επιλογής φθηνότερων καυσίμων όπως το βαρύ πετρέλαιο (HFO) για λόγους οικονομίας. Συγκρίνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της ναυτιλίας σε σχέση με άλλες πηγές ρύπανσης προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (IMO,2009)

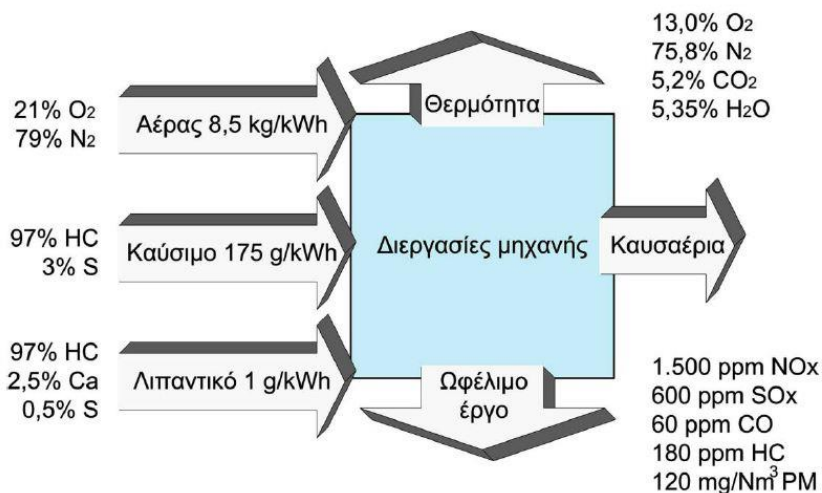


Διάγραμμα 2.1: Ποσοστό έκλυσης CO₂ από καύση ορυκτών καυσίμων ανά χρήστη, Second IMO GHG Study 2009

2.2 Η Δράση των Αερίων του Θερμοκηπίου και των Αέριων Ρύπων

Τα παράγωγα της καύσης από τις ναυτικές μηχανές όπως αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, περιέχουν κατά κύριο λόγο διοξείδιο του άνθρακα CO₂ και σε μικρότερο ποσοστό οξείδια του αζώτου (NO_x), οξείδια του θείου (SO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) καθώς και άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιωρούμενα σωματίδια.

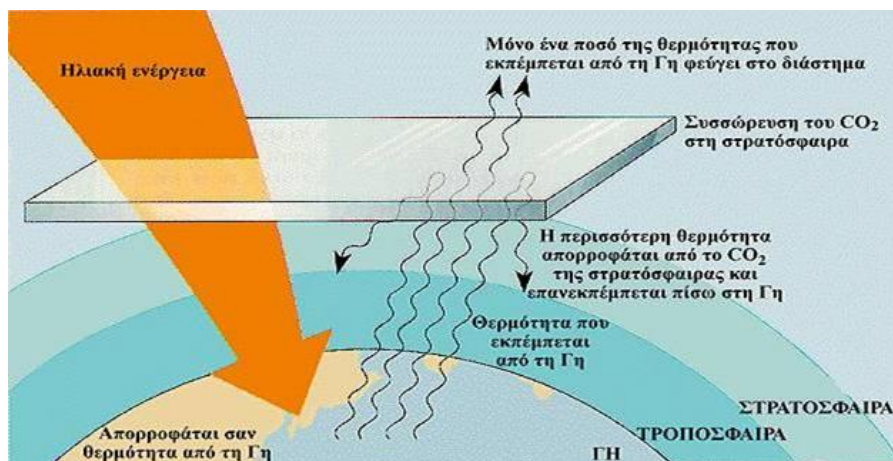
Η κάθε μία από αυτές τις ουσίες σε διαφορετικό επίπεδο και με διαφορετικό τρόπο είναι επιβλαβής και δυσμενής για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.



Εικόνα 2.2: Είσοδος και έξοδος μιας ναυτικής μηχανής (Δεδομένα για τις ποσότητες αέρα, καυσίμου, λιπαντικού, τη σύνθεση του καυσίμου και του λαδιού και τη σύσταση των καυσαερίων από Man & Diesel, 2004)

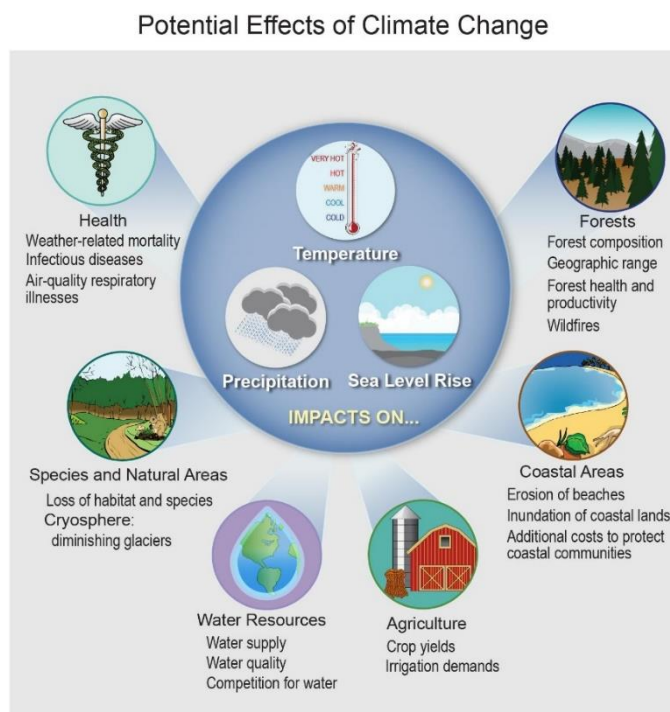
2.2.1 Αέρια του Θερμοκηπίου

Το CO₂ είναι ένα από τα αέρια που χαρακτηρίζονται με τον όρο αέρια του θερμοκηπίου καθώς η λειτουργία τους ομοιάζει με εκείνη των θερμοκηπίων. Η αύξηση της παραγωγής CO₂ αυξάνει τη συγκέντρωση του στοιχείου στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την αύξηση της επανεκπομπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας πίσω στη γη κάτι που οδηγεί στην αύξηση της μέσης της θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας των αερίων του θερμοκηπίου

Αυτό έχει μια σειρά επιπτώσεων για όλο το πλανήτη και είναι η αλλαγή του κλίματος της Γης με μετακίνηση των ζωνών βροχοπτώσεως, από τον ισημερινό προς τον βορρά και ερημοποίηση του κάτω τμήματος της εύκρατης ζώνης, άνοδος της στάθμης των θαλασσών που επιφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας και η τήξη των πάγων, μείωση των υδάτινων πόρων και η συμβολή στην εμφάνιση του φαινομένου Ελ Νίνιο.



Εικόνα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, Building Green 2011

2.2.2 Αέριοι Ρύποι

SOX - Οξειδία του θείου

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα πλοία, κυρίως βαρύ πετρέλαιο, για λόγους οικονομίας καυσίμου με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο S. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία περιέχουν κατά μέσον όρο 27000ppm τη στιγμή που το ανώτερο θεσπισμένο όριο για το πετρέλαιο κίνησης είναι 10ppm. Αυτές οι εκπομπές όμως επιβαρύνουν άμεσα και σαφώς περισσότερο τις παράκτιες περιοχές των λιμανιών ανά το κόσμο. Η δημιουργία των ενώσεων SO_x προκαλεί μείωση του pH της βροχής και σε μεγάλες συγκεντρώσεις οδηγεί σε όξινη βροχή. Τα αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2,5μm δημιουργούν σοβαρά προβλήματα στους πνεύμονες. Επιπροσθέτως οι επικαθίσεις τους δημιουργούν

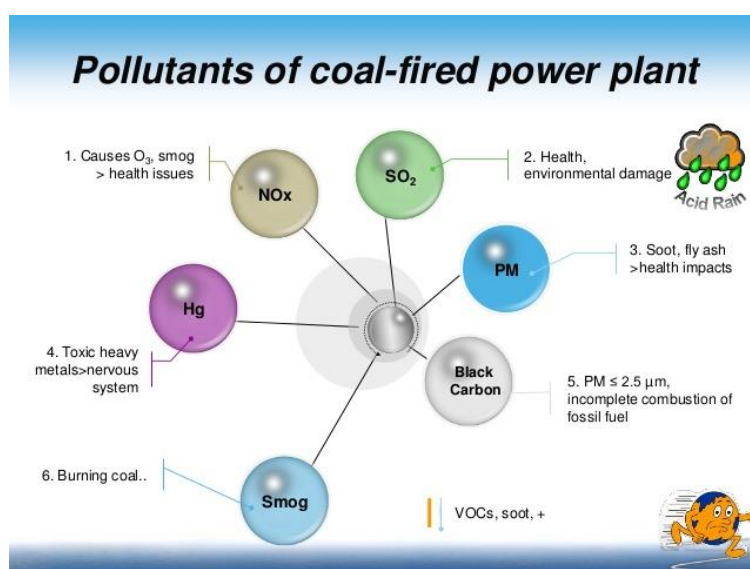
NOX – Οξειδία του αζώτου

Όταν η καύση συντελείτε σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούνται ενώσεις του αζώτου. Οι ενώσεις NO_x συνεισφέρουν στη δημιουργία φωτοχημικού νέφους και της όξινης βροχής. Το όζον, το κύριο συστατικό της αιθαλομίχλης (αστικό νέφος), είναι υπεύθυνο για μερικές από τις χειρότερες επιπτώσεις αέριας ρύπανσης. Η παρουσία του στην ανώτερη ατμόσφαιρα απορροφά την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία. Στην κατώτερη ατμόσφαιρα, εκεί όπου αναπνέουν οι άνθρωποι και αναπτύσσονται τα φυτά, το όζον έχει πολύ βλαβερές συνέπειες στην υγεία και παράλληλα προκαλεί σημαντικές βλάβες στα δάση και στις καλλιέργειες. Σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα από τη χημική αντίδραση πτητικών οργανικών

ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου, παρουσία ηλιακού φωτός. Οι υψηλές θερμοκρασίες διεγείρουν την αντίδραση, γι' αυτό το καλοκαίρι τα επίπεδα του όζοντος είναι υψηλότερα. Επίσης τα οξείδια του αζώτου δημιουργούν εναποθέσεις, και όπως και τα οξείδια του θείου, που μπορεί να είναι επιζήμιες για το φυσικό περιβάλλον, μνημεία και κτίρια.

PM - Μικροσωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών και περιλαμβάνουν ατομικό άνθρακα, αιθάλη, στάχτη, πολύ μικρά σωματίδια καυσίμου που δεν κάηκε ή κάηκε ατελώς, άκαυστο λιπαντικό έλαιο, θειικά και υγρασία. Η εκπομπή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα συνεπάγεται τη δημιουργία αερολυμάτων τα οποία είναι ικανά να εισέρχονται βαθιά στα πνευμόνια προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα, μεταλλάξεις και καρκίνο. Τα PM σαν μείγμα πολλών ενώσεων (οξείδια, στερεά υπολείμματα, μικροσωματίδια άνθρακα) αποτελούν αιτία δημιουργίας του νέφους και της χαμηλής ορατότητας.



Εικόνα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση επιπτώσεων των ρυπαντών, WWF 2012

2.3 Μέτρα μείωσης εκπομπών

Σύμφωνα όμως με την μελέτη του IMO οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εφόσον δεν υπάρξει μια συγκεκριμένη πολιτική μείωσης τους, το έτος 2050 οι εκπομπές από τα πλοία θα αυξηθούν κατά 280% ως αποτέλεσμα της αύξησης του παγκοσμίου εμπορίου [21].

- B. Δείκτης Ενεργειακής Αποτελεσματικότητας Λειτουργίας (energy efficiency operation indicator EEOI) ο δείκτης EEOI αντιπροσωπεύει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε πλοία σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους.

$$EEOI = \frac{\text{μάζα εκπεμπόμενου CO}_2}{\text{μεταφορικό έργο}} \quad (2.2)$$

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)

Ο IMO συνιστά να χρησιμοποιούνται οι δείκτες από τα λιμάνια με σκοπό τη διαφοροποίηση των λιμενικών τελών. Απώτερος στόχος είναι η μείωση κατά 30% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το έτος 2030.

Μέτρα μείωσης SO_x

Ο έλεγχος των εκπομπών του SO₂ γίνεται μέσω της επιβολής χρήσης πετρελαίου χαμηλού θείου. Έτσι από τη 1/1/2012 η ανώτερη περιεκτικότητα του βαρέως πετρελαίου σε θείο θα πρέπει να είναι κατά μέγιστον 3,5% ενώ σε περιοχές ECA το όριο του ποσοστού αυτού είναι 1% ενώ κατά το αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL το παγκόσμιο όριο του θείου θα μειωθεί περαιτέρω σε 0,5% με εφαρμογή από 1η Ιανουαρίου 2020 και υπόκειται σε μελέτη σκοπιμότητας, που θα πρέπει να ολοκληρωθεί μέχρι το 2018 [21].

• IMO Global S limit (by weight)	
– current	4.5%
– 1 July 2012	3.5%
– 1 January 2020/(2025)	0.5%
• IMO ECA S limits (by weight):	
– up to 1 July 2010	1.5%
– 1 July 2010	1.0%
– 1 July 2015	0.1%

Πίνακας 2.2: Όρια του IMO για περιεκτικότητα S στο καύσιμο

Μέτρα μείωσης NO_x

Στο αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL περιλαμβάνονται σταδιακές μειώσεις εκπομπών NO_x από ναυτικές μηχανές ντίζελ, πρώτα με την εφαρμογή των ορίων των εκπομπών της “βαθμίδας II,” για μηχανές που έχουν εγκατασταθεί μετά την 1 Ιανουαρίου 2011, και στη συνέχεια με το αυστηρότερο όριο εκπομπών της “βαθμίδας III,” για μηχανές που θα εγκατασταθούν μετά την 1 Ιανουαρίου 2016 και θα λειτουργούν στις ECAs. Οι ναυτικές μηχανές, οι οποίες εγκαταστάθηκαν την 1η Ιανουαρίου 1990 ή μετά από αυτήν την ημερομηνία, αλλά σίγουρα πριν την 1η Ιανουαρίου 2000, απαιτείται να συμμορφώνονται με τα όρια εκπομπών της “βαθμίδας I.” [21].

Μέγιστες επιτρεπτές εκπομπές NO_x για ναυτικές πετρελαιομηχανές ανάλογα τις ονομαστικές στροφές λειτουργίας της εκάστοτε μηχανής:

Πίνακας 2.3: Όρια εκπομπών NO_x βάσει του VI Παραρτήματος της οδηγίας Marpol

Tier	Date	NO _x Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	45 · n ^{-0.2}	9.8
Tier II	2011	14.4	44 · n ^{-0.23}	7.7
Tier III	2016†	3.4	9 · n ^{-0.2}	1.96

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

Οι προσεγγίσεις των Tier I και Tier II γίνονται με βάση τις πωλήσεις καυσίμων ως κύριο δείκτη δραστηριότητας και υποθέτουν μέσο όρο χαρακτηριστικών εκπομπών σκαφών για τον υπολογισμό των εκπομπών. Η μεθοδολογία Tier III βασίζεται σε πληροφορίες για την κίνηση του πλοίου. Τα όρια της Tier III δεν μπορούν να ικανοποιηθούν χωρίς πρόσθετα μέτρα όπως η Εκλεκτική Καταλυτική Αναγωγή (SCR) και η Έγχυση Νερού (Revision of MARPOL Annex VI). Τέλος οι απαιτήσεις της Tier III ισχύουν μόνο για τα πλοία που κινούνται σε περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA) ενώ έκτος αυτών των περιοχών ισχύουν οι απαιτήσεις της Tier II.

Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA)

Όπως είπαμε παραπάνω στις περιοχές των λιμένων με έντονη δραστηριότητα οι εκπομπές SO_x, NO_x αλλά και μικροσωματιδίων επηρεάζουν έντονα το περιβάλλον της περιοχής. Κάποιες από τις περιοχές αυτών οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως ECA επιβάλλονται αυστηρότεροι έλεγχοι και προϋποθέσεις για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία. Αυτές οι προϋποθέσεις αφορούν τον έλεγχο των προαναφερόμενων ρυπαντών και οι απαιτήσεις και τα γεωγραφικά τους όρια καθορίζονται στο παράρτημα VI της MARPOL 1997.

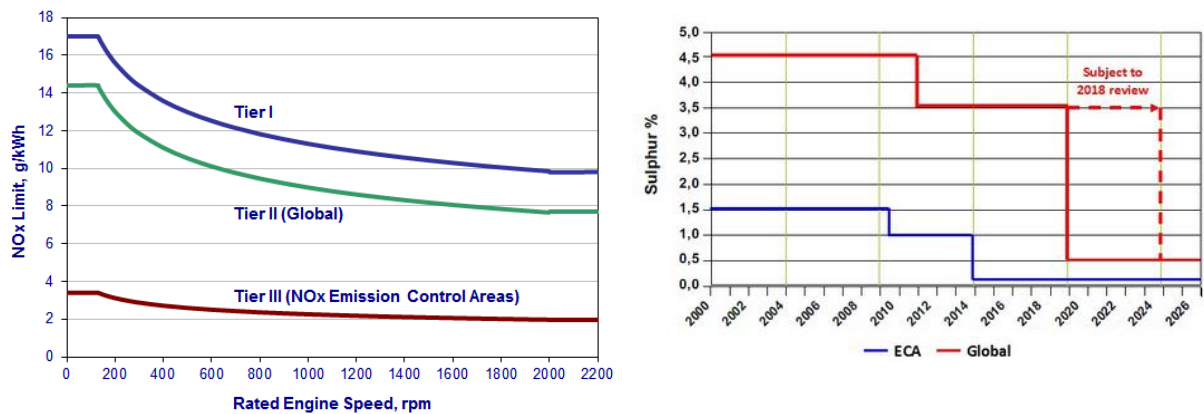
Μέχρι στιγμής υπάρχουν τέσσερις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECAs) [21]:

1. η Βαλτική θάλασσα,
2. η Βόρεια Θάλασσα,
3. η NAECA (η Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών της Βορείου Αμερικής), και
4. η US Caribbean ECA, περιλαμβάνει την αμερικανική ακτή της Καραϊβικής θάλασσας.

Στο μέλλον αναμένεται η δημιουργία νέων ECAs, ενώ θα περιλαμβάνονται περισσότερες περιοχές με αυστηρότερα όρια και στα οξείδια του αζώτου.



Εικόνα 2.6: Περιοχές αναγνωρισμένες ως ECA, www.isalos.net



Διάγραμμα 2.3: Επιτρεπόμενες εκπομπές Nox και συγκεντρώσεις συναρτήσε των στροφών λειτουργίας της μηχανής

Για να πληροί τις διατάξεις των παραπάνω κανονισμών, ένα πλοίο έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί καύσιμο που έχει περιεκτικότητα σε θείο όπως αυτή ορίζεται παραπάνω (αυτό, βέβαια, συνεπάγεται υψηλό κόστος καυσίμου) ή, μεταξύ άλλων εναλλακτικών μεθόδων συμμόρφωσης, σε ένα πλοίο μπορεί να εγκατασταθεί ένα σύστημα scrubber που “καθαρίζει” τα καυσαερίων, δίδοντάς του την δυνατότητα να συνεχίσει να χρησιμοποιεί τα ίδια καύσιμα που χρησιμοποιεί σε περιοχές εκτός ECAs (κατά κύριο λόγο μαζούτ).

2.4 Προτάσεις για μείωση των εκπομπών

Η εξέλιξη τις τεχνολογίας σήμερα μας δίνει σημαντικές δυνατότητες στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και στον περιορισμό των ρύπων σε διάφορα επίπεδα όπως ο βελτιωμένος σχεδιασμός τόσο σε επίπεδο υδροδυναμικής όσο και στη μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου, η χρήση φιλικότερων καυσίμων στο περιβάλλον και η ορθολογικότερη διαχείριση της ενέργειας.

Κάποιες από αυτές τις προτάσεις είναι:

- Χρήση Εναλλακτικών Καυσίμων (LNG, H2 κλπ)
- Αποδοτικότερες μορφές γάστρας (Air Cavity Ships)
- Αποδοτικότερος σχεδιασμός της προπέλας
- Πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο
- Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Εγκαταστάσεις υποδομών ηλεκτροδότησης ελλειμισμένων πλοίων(Δράση ELEMED)



Εικόνα 2.7:Σχηματική αναπαράσταση νέων τεχνολογιών για μείωση των εκπομπών από τα πλοία, www.isalos.gr

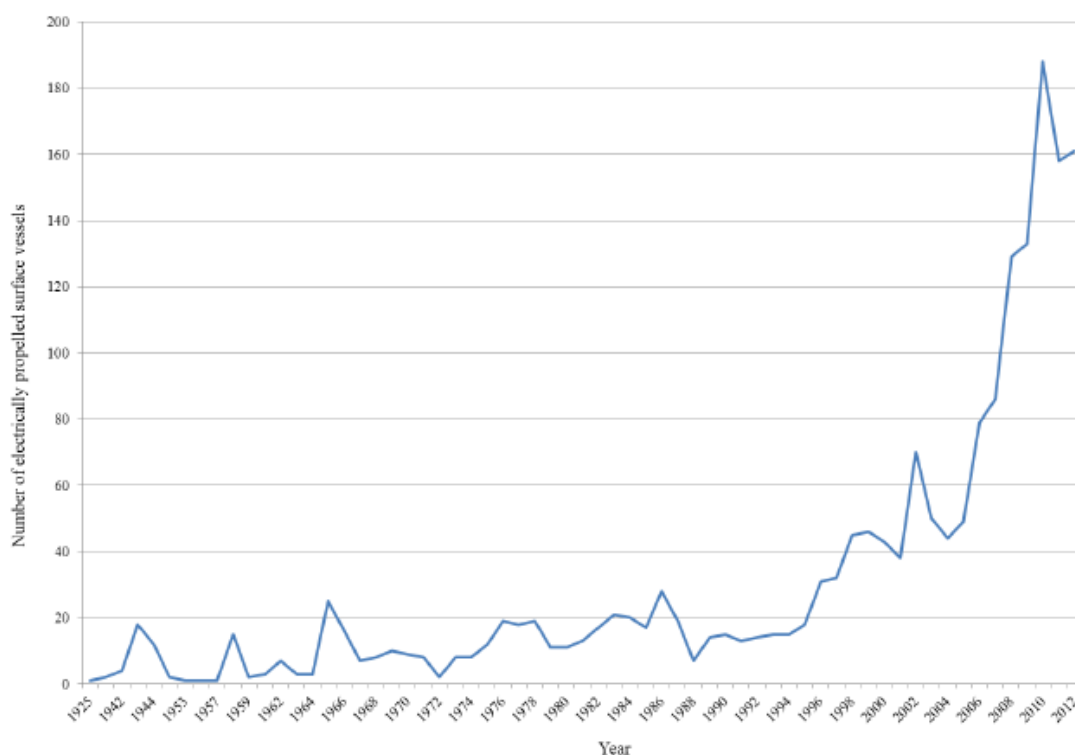
3. Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο

3.1 Περιγραφή Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Πλοίου

Στο πλαίσιο της ικανοποίησης τόσο των αυστηρών κανονισμών, που αναφέρθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο, από τον διεθνή οργανισμό IMO ώστε να προστατευθεί το περιβάλλον όσο και για λόγους μείωσης λειτουργικού των πλοίων ,σήμερα το κόστος καυσίμου ανέρχεται στο 50% του συνολικού λειτουργικού κόστους [7] , η ναυπηγική βιομηχανία θεωρεί πλέον το Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο ως μια ελκυστική τεχνολογία στην κατεύθυνση μιας περισσότερο “πράσινης” ναυτιλίας που θα μπορέσει ν’ ανταποκριθεί στις νέες απαιτήσεις και προκλήσεις της.

Με τον όρο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο νοείται το πλοίο εκείνο το οποίο διαθέτει πλήρη ηλεκτροπρόωση και επιπροσθέτως καλύπτει και όλα τα υπόλοιπα φορτία του μέσω των ίδιων με τη πρόωση ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων . Ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο συνδυάζοντας τη βέλτιστη διαχείριση των συστημάτων τροφοδότησης και αποθήκευσης της ενέργειας δύναται να οδηγήσει σε αποδοτικότερα και κατ’ επέκτασιν οικολογικότερα και οικονομικότερα πλοία.

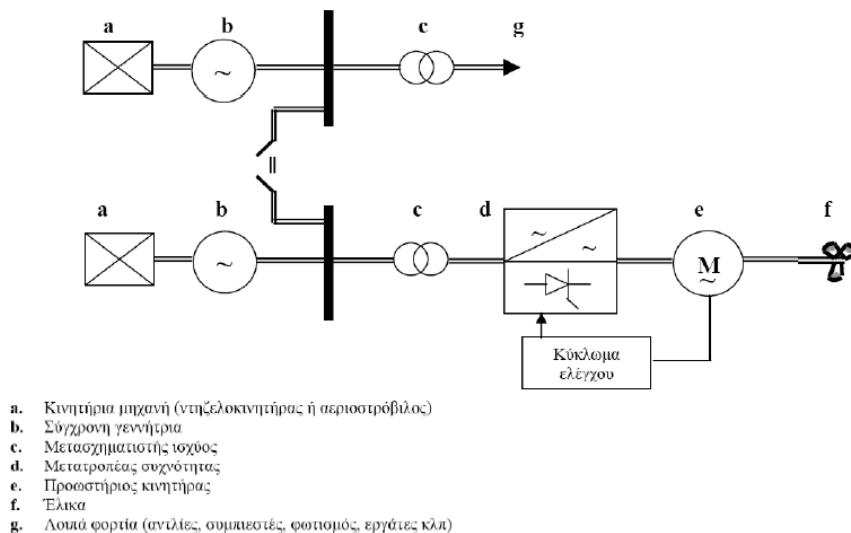
Όλοι οι παραπάνω λόγοι έχουν οδηγήσει στην θεαματική άνοδο των πλοίων που ναυπηγήθηκαν τα τελευταία έτη με εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης .



Διάγραμμα 3.1:Αριθμός πλοίων με ηλεκτροπρόωση που ναυπηγήθηκαν ανά έτος. *Electrical Propulsion in the Low Carbon Economy, Ian Whitelegg 2013*

Η ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός τέτοιου πλοίου γίνεται μέσω διάφορων στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τα συνηθέστερα των οποίων είναι:

- Ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (GenSets)
- Κυψέλες καυσίμου
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



Εικόνα 3.1: Σχεδιάγραμμα τυπικής εγκατάστασης πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου. Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, Ι.Μ. Προυσαλίδης, 2006

Ένα τέτοιο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο με σωστό σχεδιασμό μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση για πλοία που έχουν τις παρακάτω απαιτήσεις [23]:

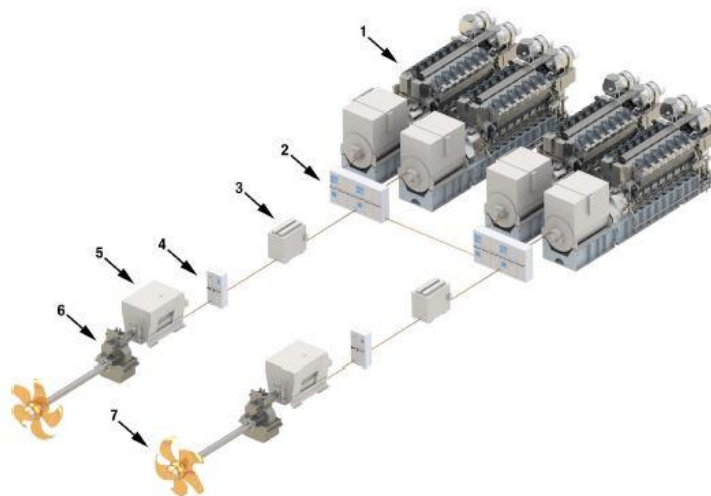
- α. Υψηλές απαιτήσεις ελικτικών ικανοτήτων.
- β. Μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- γ. Μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.
- δ. Πλοία εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.
- ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

3.2 Ανάλυση πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση της ηλεκτροπρόωσης και των συστημάτων που δύναται να συνθέσουν ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο και συγκεκριμένα τα GenSets, τις κυψέλες καυσίμου και τα φ.β. πάνελ.

3.2.1 Ηλεκτροπρόωση

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί το κύριο στοιχείο ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου. Απομονώνοντας την ηλεκτροπρόωση από τις υπόλοιπες ανάγκες σε ηλεκτρικό φορτίο έχουμε μια τυπική διάταξη του παρακάτω σχήματος [10]:



Εικόνα 3.2: Διάταξη Ηλεκτροπρόωσης, MAN 51/60DF Project Guide – Marine, 2016

Τα κύρια στοιχεία που συνθέτουν ένα σύστημα ηλεκτροπρόωση είναι βάσει της αρίθμησης του παραπάνω σχήματος [11]:

Πίνακας 3.1 Βασικά Στοιχεία που Συνθέτουν την Ηλεκτροπρόωση, MAN 2016

A/A	ΣΤΟΙΧΕΙΟ
1	GENSET
2	Πίνακας Διανομής
3	Μετασηματιστής Παροχής (κατά περίπτωση)
4	Μετατροπέας Συχνότητας
5	Ηλεκτροκινητήρες
6	Κιβώτιο Ταχυτήτων (προαιρετικά)
7	Προπέλα

Λόγο των διαφορετικών αναγκών που έχει ένα πλοίο με ηλεκτρική πρόωση ο σχεδιασμός της διαφέρει κατά περίπτωση κάνοντας άλλες φορές επιβεβλημένη την ύπαρξη μετασηματιστή παροχής ή κιβωτίου ταχυτήτων και άλλοτε όχι .

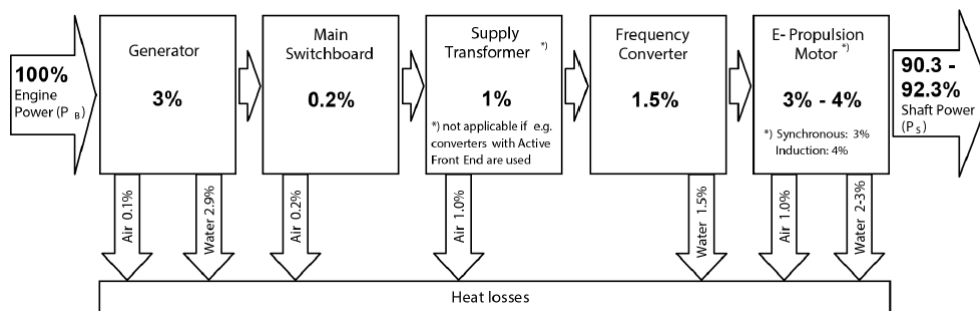
Η μετατροπή της ενέργειας από μηχανική σε ηλεκτρική και ξανά σε μηχανική καθώς και του ρεύματος από εναλλασσόμενο σε σταθερό και τανάπαλι οδηγεί σε απώλειες ισχύος κατά τη μεταφορά της στην έλικα.

Η ισχύς η οποία φθάνει στην έλικα είναι [10]:

- $P_{\text{έλικας}} = P_{\text{μηχανής}} \cdot \eta_G \cdot \eta_{SW} \cdot \eta_{ST} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_M$, (β.α. 90,3-92,3%) (3.1)

όπου: η_G ο β.α. της ηλεκτρογεννήτριας, η_{SW} ο β.α. του switchboard, η_{ST} (σε περίπτωση χρήσης Active Front End θεωρείται αμελητέος), η_{FC} ο β.α. του μετατροπέα συχνότητας, η_M ο β.α. του ηλεκτροκινητήρα.

Οι τυπικές ενεργειακές απώλειες που έχουμε ανά στοιχείο της ηλεκτροπρόωσης είναι:

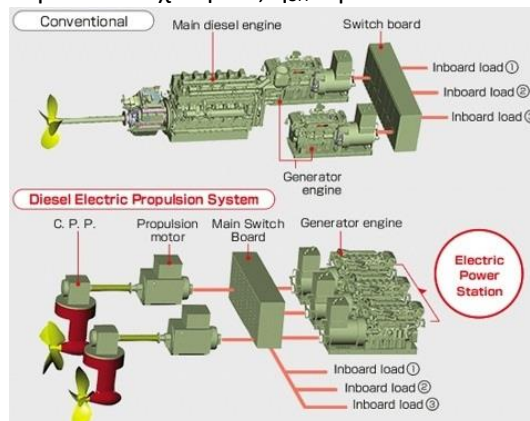


Διάγραμμα 3.2: Απώλειες ενέργειας ανά στοιχείο στην ηλεκτροπρόωση, MAN 51/60DF Project Guide – Marine,

Ενώ για την κλασική μηχανική πρόωση ισχύει [10]:

- $P_{\text{έλικας}} = P_{\text{μηχανής}} \cdot \eta_{GB} \cdot \eta_{SH}$, (β.α. 96-99%) (3.2)

όπου: η_{GB} ο β.α. κιβωτίου ταχυτήτων, η_{SH} ο β.α. του συνόλου των εδράνων



Εικόνα 3.3: Αναπαράσταση μηχανικής (επάνω) και ηλεκτρικής (κάτω) πρόωσης

Παρόλες τις απώλειες ισχύος που φαίνονται στο Διάγραμμα 3.2 η ηλεκτροπρόωση έχει μια σειρά πλεονεκτημάτων που την καθιστούν αποδοτικότερη και αποτελεσματικότερη από τη μηχανική πρόωση σε εύρος περιπτώσεων.

Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα της είναι τα εξής [11]:

1. Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας της έλικας σε όλο το φάσμα από 0-100%
2. Χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και κραδασμών λόγω και της επιπρόσθετης δυνατότητας να αποφύγουμε το κιβώτιο ταχυτήτων
3. Άμεση απόκριση σε αλλαγή ταχυτήτων
4. Χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές ρύπων χάρις στη δυνατότητα βελτιστοποίησης της κατανομής του φορτίου στα GenSets. Η κατανομή είναι τέτοια ώστε τα GenSets να λειτουργούν σε υψηλό ποσοστό φόρτισης όπου έχουμε καλύτερη απόδοση και συνεπώς και οικονομία καυσίμου.
5. Μειωμένο κόστος κύκλου ζωής χάρις στην οικονομικότερη λειτουργία του και λόγω του μικρότερου κόστους συντήρησης
6. Υψηλή αξιοπιστία λόγω των πολλαπλών GenSets ή οποιονδήποτε άλλων εκ των αναφερομένων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας καθώς σε περίπτωση βλάβης ενός στοιχείου τα εναπομείναντα αρκούν ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες του πλοίο απρόσκοπτα.
7. Μεγάλη ευελιξία τοποθέτησης των GenSets ή άλλων στοιχείων παραγωγής ενέργειας και των κινητήρων μιας και μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω ηλεκτρικού καλωδίου .
8. Αυξημένο ωφέλιμο φορτίο λόγω του ότι το σύστημα ηλεκτροπρόωσης καταλαμβάνει λιγότερο χώρο στο πλοίο.
9. Βελτιωμένη δυνατότητα ελιγμών και κράτημα θέσης με τη χρήση ειδικών προωθητηρίων όπως τα αζιμουθιακά. Επακριβής χειρισμός κινήσεων μέσω της αλλαγής συχνότητας που ελέγχει τους ηλεκτροκινητήρες.
10. Δυνατότητα μεγάλων ροπών και σε χαμηλές ταχύτητες της έλικας
11. Ευκολία αυτοματισμού.
12. 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.

Ενώ στα μειονεκτήματα της συγκαταλέγονται:

1. Το υψηλό κόστος επένδυσης
2. Λόγω εκτεταμένης χρησιμοποίησης των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεων που παράγουν ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο επηρεάζοντας αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις

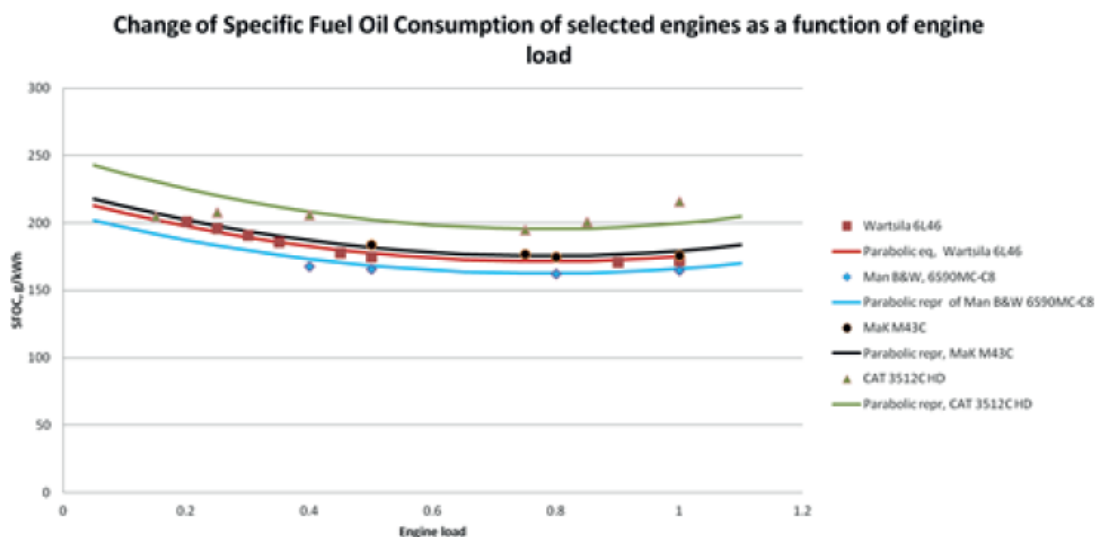
3.2.1.1 GenSet

Με τον όρο Genset εννοούμε τη σύζευξη της εμβολοφόρου μηχανής με τον ηλεκτρικό μετατροπέα κοινώς γεννήτρια. Η λειτουργία των γεννητριών παράλληλα μας δίνει το πλεονέκτημα ζεύξης – απόζευξης γεννητριών από τις καταναλώσεις αυξάνοντας την αποδοτικότητα της καύσης σε μερικά φορτία. Τα GenSet μπορούν να συνδεθούν ηλεκτρικά μεταξύ τους μέσω συγχρονισμού. Ο συγχρονισμός απαιτεί αντίστοιχη τάση, συχνότητα και φάση πριν τη σύνδεση της γεννήτριας στο σύστημα. Η διαδικασία συγχρονισμού μπορεί να γίνει αυτόματα μέσω ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου ή και χειροκίνητα. Ο αυτόματος συγχρονιστής διαβάζει τη τάση, τη συχνότητα και τη φάση από τη γεννήτρια και το ζυγό και ρυθμίζει μέσω του ECM (Engine Control Module) τη λειτουργία του κάθε GenSet. Το φορτίο μοιράζεται μεταξύ των παράλληλων γεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία.



Εικόνα 3.4: Σύστοιχία GenSets, www.abb.com

Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί όταν χρησιμοποιηθούν αποθηκευτικές συσκευές όπως μπαταρίες και κυψέλες καυσίμου οι οποίες θα αναλαμβάνουν μέρος του φορτίου ώστε τα GenSets να λειτουργούν σε αποδοτικότερο σημείο. Επίσης με αυτόν το τρόπο μπορούν να μειωθούν τα δυναμικά φορτία και να βελτιωθεί η ανταπόκριση τους κατά τη διάρκεια των ελιγμών.



Διάγραμμα 3.3: Ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανής ανάλογα το ποσοστό φόρτισης της, Wartsila 2014

3.2.1.1.1 Καύσιμα των GenSets

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα GenSets έχουν τη δυνατότητα καύσης τόσο των συμβατικών καυσίμων όπως βαρύ πετρέλαιο κλπ. όσο και δυνατότητα καύσης υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Marine Gas Oil (MGO)

Αναφέρεται και ως ναυτιλιακό gasoil και αποτελεί καύσιμο από αποστάγματα υψηλής ποιότητας και ενίοτε περιέχει προϊόντα πυρολυτικής διάσπασης. Η κύρια χρήση του είναι σε πολύστροφες και μεσόστροφες μηχανές καθώς επίσης και για την ανάμειξη του με βαρύ πετρέλαιο (HFO) ώστε να προκύψει ενδιάμεσο καύσιμο (IFO). Συντίθεται από υδρογονάνθρακες με πολύ μικρή ποσότητα θείου, οξυγόνου και αζώτου. Το δε ιξώδες του κυμαίνεται από 1,3-4,2 cSt (50°C) και 1,5-5,5 cSt(40°C)

Marine Diesel Oil (MDO)

Περιέχει βαρύτερα αποστάγματα σε σχέση με το MGO. Μπορεί να περιέχει προϊόντα πυρολυτικής διάσπασης και μικρή ποσότητα υπολειμμάτων ώστε ν' αυξηθεί η θερμογόνος του δύναμη. Αποτελεί καύσιμο για μηχανές υψηλών και μέσων στροφών καθώς επίσης και για εκκίνηση μηχανών που καίνε βαρύ πετρέλαιο. Το ιξώδες του κυμαίνεται από 2,5-14 cSt (40°C) και δεν απαιτείται προθέρμανση κατά την άντληση και την έγχυσή του.

Heavy Fuel Oil (HFO)

Παράγεται από τα τελευταία κλάσματα και τα υπολείμματα. Είναι μαύρο και με μεγάλη πυκνότητα με ιξώδες που φτάνει μέχρι και 1000 cSt (50°C) και χρειάζεται οπωσδήποτε προθέρμανση. Χρησιμοποιείται ως καύσιμο για αργόστροφες μηχανές και για ανάμειξη με MGO και MDO.

Intermediate Fuel Oil (IFO)

Αποτελεί ανάμειξη HFO με MGO διακρίνεται σε διάφορες κατηγορίες που εξαρτώνται από την αναλογία ανάμειξης των. Χρειάζεται πάντοτε να γίνει προθέρμανση.

Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου είναι η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται μετά την καύση και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης και στα ναυτιλιακά καύσιμα επηρεάζεται από τη περιεκτικότητα σε άνθρακα, υδρογόνο και θείο καθώς επίσης σε νερό και τέφρα.

Για τα τρία καύσιμα στοιχεία του καυσίμου ισχύουν οι σχέσεις για τέλεια καύση:

- $C+O_2 \rightarrow CO_2+34000KJ/kg$ άνθρακα
- $H_2+1/2 O_2 \rightarrow H_2O+144000KJ/kg$ υδρογόνου για παραγόμενο νερό σε υγρή φάση
 $H_2+1/2 O_2 \rightarrow H_2O+144000KJ/kg$ υδρογόνου για παραγόμενο νερό σε ατμό
- $S+O_2 \rightarrow SO_2+93000KJ/kg$ θείου

Πίνακας 3.2: Κόστος και θερμογόνος ισχύς ανά τύπο πετρελαίου, www.igu.com

FUEL PRICES and PROPERTIES	[EUR/ton]	LHV [kJ/kg]	Carbon% -wt	Sulphur content (%)	Separation losses (%)	Density
Heavy Fuel Oil (HFO)	483	40 600	85	2.7	1.5	
Low Sulphur Heavy Fuel Oil (LSHFO)	493	40 600	85	1	1.5	
Marine Diesel Oil (MDO)	676	42 700	86	0.2	0.5	
Marine Gas Oil (MGO)	680	42 800	87.5	0.1	0	
Liquefied Natural Gas (LNG-1)	477	49 208	75	0.001	0,0	450

Όπως διαπιστώνουμε από το παραπάνω πίνακα η σχέση θερμογόνου δύναμης-κόστους για τα υγρά καύσιμα είναι σαφέστατα καλύτερη για το βαρύ πετρέλαιο. Ο λόγος αυτός όπως είπαμε καθιστά το βαρύ πετρέλαιο ως το πλέον διαδεδομένο καύσιμο.

Οι εκπομπές ρύπων για καύση ανά τύπο καυσίμου (IMO GHG Study 2009, Third IMO GHG Study 2014) είναι:

Πίνακας 3.3: Εκπομπές ανά kg αέριων του θερμοκηπίου και ρυπαντών ,IMO 2009

HFO	MDO/MGO
3,114 gr CO2/kg	3,206 gr CO2/kg
0,0903 gr NOX/kg	0,0961 gr NOX/kg
0,070 gr SOX/kg	0,002 gr SOX/kg
0,00728 gr PM/kg	0,00097 gr PM/kg

Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο

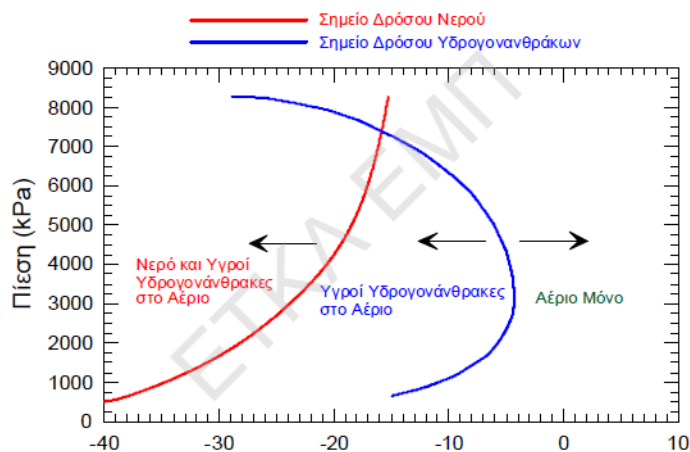
Η διαθεσιμότητα του φυσικού αερίου αυξάνεται διαρκώς παγκοσμίως και η χρήση του σαν καύσιμο ,έπειτα από ευρεία χρήση του στη θέρμανση και μερικώς στις μεταφορές, έγινε πλέον πολύ ελκυστική και στα πλοία. Τα παγκόσμια αποθέματα το 2009 υπολογίστηκαν πως έχουν R/P που εκτιμάται σε 62.8 έτη (N.Μαμάσης & Ι.Στεφανάκος,2011). Η βιομηχανία έχει στραφεί στο πως οι πετρελαιομηχανές θα έχουν τη δυνατότητα καύσης LNG.Το φυσικό αέριο αποτελεί μείγμα υδρογονανθράκων ,που η σύστασή του διαφέρει ανάλογα το κοίτασμα, με πάντοτε κυριότερο συστατικό του το μεθάνιο (σε ποσοστό που κυμαίνεται από 85% έως 95%) και σε μικρότερες συγκεντρώσεις αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και πεντάνιο .

Μία τυπική σύσταση φυσικού αερίου είναι [29]:

- 74,1 % Άνθρακας
- 23,9% Υδρογόνο
- 1,7% Άζωτο
- 0,3% Οξυγόνο

Ενώ η τυπική θερμογόνος του ισχύς είναι 54400 KJ/kg.

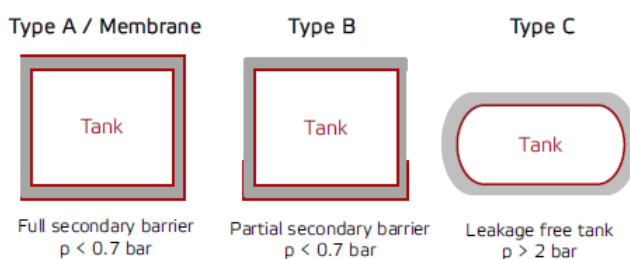
Για το φυσικό αέριο έχει οριστεί μια κατάσταση αναφοράς που καλείται “κανονική κατάσταση” και σε αυτή ανάγονται οι ποσότητές τους ώστε να μπορεί να υπάρχει κοινή αναφορά. Αυτή είναι οι 273,15K (0 °C) για τη θερμοκρασία και 1atm για την πίεση. Ο όγκος ενός κυβικού μέτρου αερίου σε κανονική κατάσταση αποτελεί ένα “κανονικό κυβικό μέτρο” αερίου (1Nm³). Στις συνθήκες αυτές για μια τυπική τιμή ισχύει: 1tn LNG σε 1300 Nm³ gas .



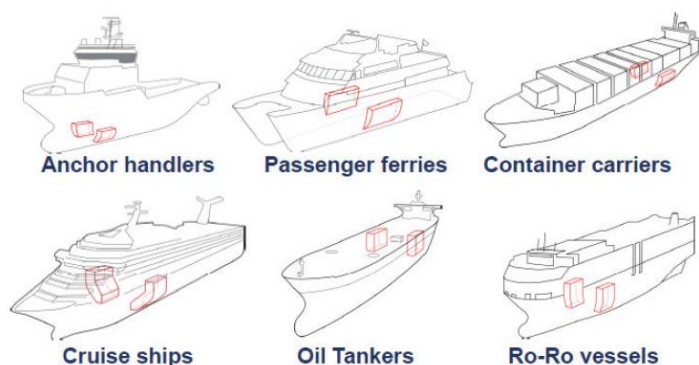
Διάγραμμα 3.4: Φάσεις του φυσικού αερίου βάσει πίεσης και θερμοκρασίας, Wikipedia

Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα με σχετική πυκνότητα 0,55. Σε περίπτωση διαρροής, διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα. Όπως γίνεται από τα παραπάνω κατανοητό η αποθήκευση του φυσικού αερίου σε αέρια μορφή θ' απαιτούσε τεράστιες δεξαμενές. Χάρη στην εξέλιξη της κρυογονικής δύναται υγροποίηση του σε θερμοκρασία περί των $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ καταλαμβάνοντας το 1/600 του αντίστοιχου όγκου σε αέρια μορφή. Για την αποθήκευση μιας δεδομένης ενέργειας καυσίμου, ακόμα και στις παραπάνω συνθήκες, το απαιτούμενο μέγεθος της δεξαμενής για LNG θα πρέπει να διπλασιαστεί σε σχέση με αυτό του πετρελαίου διότι η πυκνότητα του βρίσκεται 450kg/m^3 ενώ εκείνη του πετρελαίου είναι περίπου 1000kg/m^3 . Η αυξημένη θερμική δύναμη κατά 20% ισοσκελίζεται από την απαίτηση για ελεύθερο χώρο εντός της δεξαμενής σε πλήρες γέμισμα κατά συντελεστή 1.2 [29].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι δεξαμενών αποθήκευσης και μεταφοράς του LNG για καύση εντός του πλοίου που η επιλογή τους εξαρτάται από την πίεση που έχουν ενώ οι θέσεις που τοποθετούνται εντός του πλοίου διαφέρει με το τύπο του όπως βλέπουμε στα παρακάτω σχήματα [29]:



Εικόνα 3.5: Τύποι δεξαμενών αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου, www.igu.com



Εικόνα 3.6: Θέσεις δεξαμενών υγροποιημένου φυσικού αερίου ανάλογα τον τύπο του πλοίου, www.igu.com

Όπως είναι λογικό οι εκπομπές του φυσικού αερίου διαφοροποιούνται με τη σύσταση του. Για φυσικό αέριο με θερμογόνο ισχύς $49,3\text{kJ/kg}$ και πυκνότητα $0,78\text{kg/Nm}^3$ οι εκπεμπόμενοι ρύποι παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα [29].

Πίνακας 3.4: Εκπομπές ρύπων ανά kg lng και παραγόμενης kwh παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα

Engine type	NOx		CO		THC		CH4		CO2	
	g/kg fuel	g/kWh	g/kg fuel	g/kWh	g/kg fuel	g/kWh	g/kg fuel	g/kWh	g/kg fuel	g/kWh
Emission factor, LBSI	5,1	0,9	9,8	1,7	25,4	4,4	23,2	4,1	2687,3	472,4
Emission factor, LPDF	10,4	1,9	11,0	1,9	43,2	7,3	40,9	6,9	2630,3	444,2
Average, all engine type	7,5	1,4	10,3	1,8	33,2	5,7	31,0	5,3	2662,4	460,1

Gas fuel: Hn~49,3 kJ/kg, Density~0,78 kg/Nm³

Συγκρίνοντας τις εκπομπές των μηχανών που χρησιμοποιούν τους τύπους καυσίμου έχουμε τα εξής αποτελέσματα

Πίνακας 3.5: Σύγκριση παραγόμενων ρύπων σε σχέση με το καύσιμο και το τύπο της μηχανής

Reduction factors compared to MGO	LBSI	LPDF*, 4-stroke Medium speed	LPDF, 2-stroke Slow speed	HPDF, 4-stroke, medium speed	HPDF, 2-stroke, slow speed
CO ₂	25-28%	20-25%	20-26%	20-24%	20-24%
NO _x	85-90%	75-90%	75-90%	25-30%	25-30%
SO _x	>99%	98-99%	95-99%	95-97% **	95-97% **
Particulates	>99%	95-98%	95-98%	30-40%	N/A

Όπως συμπεραίνουμε από το παραπάνω πίνακα η μείωση στις εκπομπές CO₂ μειώνεται, ανάλογα το τύπο της μηχανής, σε τιμές περίπου κατά 25% μικρότερες, τα οξείδια του αζώτου σε ποσοστό 90% ενώ τα οξείδια του θείου σχεδόν εκμηδενίζονται.

Μηχανές Διπλού Καυσίμου

Οι μηχανές διπλού καυσίμου παρέχουν τη δυνατότητα καύσης τόσο φυσικού αερίου όσο και πετρελαίου ώστε να επιτύχουν χαμηλότερη κατανάλωση και λιγότερες εκπομπές. Γενικά το μείγμα αέρα-φυσικού αερίου αναφλέγεται με την έγχυση μίας μικρής ποσότητας πιλοτικού καυσίμου συνήθως MDO. Το πιλοτικό καύσιμο εγχέεται στους κυλίνδρους μέσω ξεχωριστών ακροφυσίων από το αέριο καύσιμο χρησιμοποιώντας μια ηλεκτρική αντλία υψηλής πίεσης που ελέγχεται ηλεκτρονικά και προσφέρει την κατάλληλη παροχή και πίεση καθώς και τον απαραίτητο χρόνο ξεχωριστά σε κάθε κύλινδρο. Η πλήρης ισχύς κάθε φορά δίνεται σε αναλογία 1% από το πιλοτικό καύσιμο και σε 99% από το αέριο καύσιμο. Το πιλοτικό καύσιμο χρησιμοποιείται και κατά τη διάρκεια που ο κινητήρας λειτουργεί με συμβατικό καύσιμο καθώς από τη μία απαιτείται ώστε να γίνει η καύση του αερίου ενώ στην άλλη για να μην δημιουργηθεί φράξιμο στις οπές των εγχυτήρων του. Μια σημαντική δυνατότητα που υπάρχει είναι πως η αλλαγή του καυσίμου από τη μία μορφή στην άλλη μπορεί να γίνει άμεσα οποιαδήποτε στιγμή και κάτω από οποιοδήποτε φορτίο.

Συνοψίζοντας τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της δυνατότητας διπλής καύσης είναι [10]:

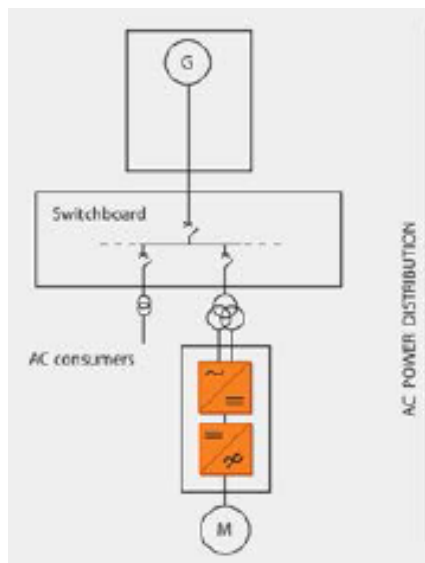
- Δυνατότητα καύσης αέριων καυσίμων σε πετρελαιομηχανές
- Μειωμένο κόστος λειτουργίας χάρη στη χρήση φυσικού αερίου
- Ελκυστική περίοδος αποπληρωμής
- Αύξηση της διάρκειας ζωής της μηχανής
- Περιβαλλοντικά οφέλη από τις μειωμένες εκπομπές



Εικόνα 3.7:: Μηχανή Διπλού Καυσίμου, MAN 2016

3.2.1.2 Πίνακας Διανομής

Ο πίνακας διανομής είναι υπεύθυνος για την ζεύξη και απόζευξη των GenSets και κατ' επέκτασιν τον διαμερισμό του φορτίου λόγω παραλληλίας ανάλογα το μέγεθος του. Έχει τη



Εικόνα 3.8::Σχηματική αναπαράσταση πίνακα διανομής

δυνατότητα να εκκινεί ή να σβήνει τα GenSets σύμφωνα με το σύστημα αυτομάτου ελέγχου που έχουμε σχεδιάσει βάσει της στρατηγικής λειτουργίας που θέλουμε ν' ακολουθήσουμε. Οι μηχανές μας θέλουμε να λειτουργούν σε υψηλά φορτία όπου έχουμε και μεγαλύτερη απόδοση. Συνήθως επιλέγεται να λειτουργούν σε ένα εύρος μεταξύ 60% και 90%. Κατά τη λειτουργία της μηχανής σε χαμηλά φορτία και στο ρελαντί η καύση είναι ατελής με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλή αποδοτικότητα. Πέραν όμως αυτού που συνεπάγεται την αύξηση της εκπομπής ρύπων μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση μόλυνσης στους κυλίνδρους που συμβαίνει συνήθως όταν έχουμε χαμηλά επίπεδα φόρτισης καθώς επίσης και κατά τη διάρκεια των ελιγμών όταν η θερμοκρασία του νερού ψύξης δεν μπορεί να παραμείνει στα απαιτούμενα επίπεδα.

3.2.1.3 Μετασχηματιστής Παροχής

Η εγκατάστασή του ή μη σε ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης δεν είναι πάντοτε απαραίτητη και εξαρτάται από το μετατροπέα συχνότητας που ακολουθεί. Χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε να επιτύχουμε μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων. Όταν είναι απαραίτητο οι αρμονικές μπορούν να βελτιωθούν με χρήση μετασχηματιστών παροχής για τους μετατροπέες συχνότητας δημιουργώντας μία 30^ο ολίσθηση μεταξύ των δύο δευτερευόντων τυλιγμάτων που ακυρώνουν τα ρεύματα της 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής. Μια αύξηση του αριθμού των παλμών οδηγεί σε μειωμένο δείκτη συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης THD [1].

Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί είναι:

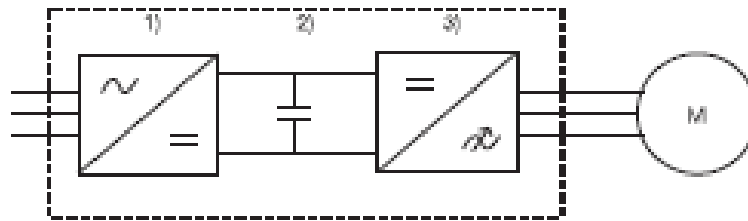
1. Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφών SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)
2. Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)
3. Μετατροπείς τύπου μήτρας ή μιτροειδείς μετατροπείς (matrix converters)

3.2.1.4 Μετατροπέας Συχνότητας

Η συνεχής ρύθμιση ,σύμφωνα με τις ανάγκες μας, των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης και κατ' επέκτασιν της έλικας είναι δυνατή όχι με άμεση σύνδεσή του στο δίκτυο αλλά από μέσω μιας διάταξης μετατροπής της συχνότητας η οποία καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής τους.

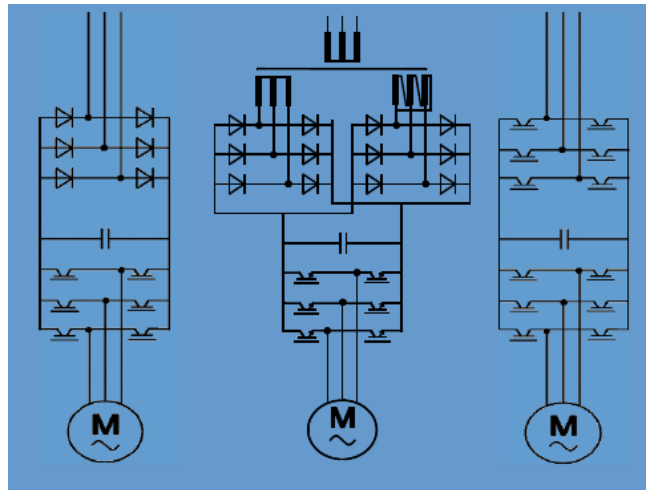
Ο έλεγχος του κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα συχνότητας αλλάζοντας τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης και ρεύματος. Ένας τυπικός ηλεκτροκινητήρας που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα αποτελείται από έναν μετασχηματιστή εισόδου , μετατροπέα συχνότητας, και το κινητήρα. Εντός του μετατροπέα υπάρχει κατά σειρά όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα ένας ανορθωτής(1) που μετατρέπει το ρεύμα από εναλλασσόμενο σε σταθερό ,ένα DC-link(2) για να

φιλτραριστεί η παλλόμενη συνεχής τάση και η μονάδα του αντιστροφέα(3) που μετατρέπει το ρεύμα σε εναλλασσόμενο.



Εικόνα 3.9: Ηλεκτρονική αναπαράσταση μερών μετατροπέα συχνότητας συχνότητας, ABB 2016

Η θεμελιώδης διάταξη μετατροπής συχνότητας είναι μια γέφυρα 6-παλμών (ανορθωτής αλλά και κυρίως αντιστροφέας). Ωστόσο για τη μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6 παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30μοιρών. Σε σύγχρονες ναυπηγήσεις αξιοποιούνται προς το παρόν έως και γέφυρες 24 παλμών. Τα σύγχρονα 12-παλμικά συστήματα χρησιμοποιούν ενεργούς ανορθωτές (active front end) και καταργούν τόσο την ανάγκη για ειδικούς μετασχηματιστές όσο και τις συνακόλουθες απώλειες [1].



Εικόνα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μετατροπέα συχνότητας, Siemens 2016

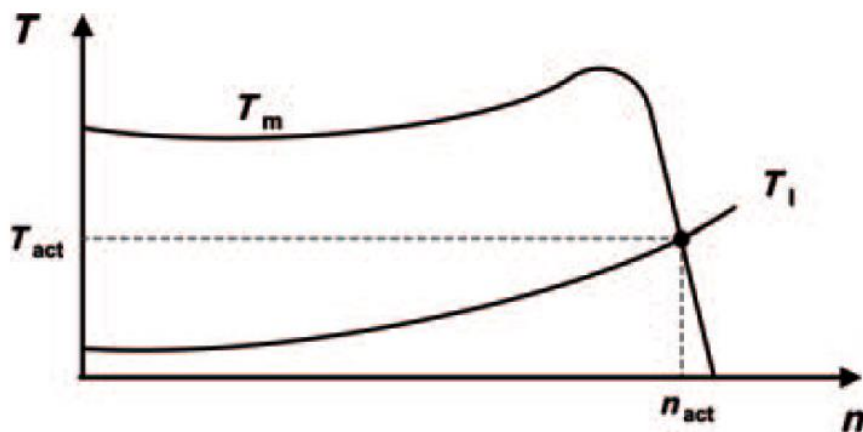
3.2.1.5 Ηλεκτροκινητήρας

Ο ηλεκτροκινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική εκμεταλλεύοντας το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Οι ηλεκτροκινητήρες που συνήθως χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία είναι εναλλασσόμενου ρεύματος. Κατά τη λειτουργία τους η τάση στις περιελίξεις του στάτορα καθορίζει το ρεύμα και τη μαγνητική ροή. Ως εκ τούτου όταν συμβαίνει αλλαγή στη κατεύθυνση της τάσης προκαλείτε αλλαγή της ηλεκτρομαγνητικής ροής. Έτσι με αλλαγή της κατεύθυνσης της τάσης στις περιελίξεις σε ένα τριφασικό κινητήρα με σωστό τρόπο ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται. Ο ρότορας του κινητήρα τότε θ' ακολουθήσει αυτή τη ροή με κάποια ολίσθηση. Ο έλεγχος της ταχύτητας και ροπής του ηλεκτροκινητήρα γίνεται μέσω των στοιχείων που περιεγραφήκαν στην παραπάνω παράγραφο.



Εικόνα 3.11: Ναυτικός ηλεκτροκινητήρας ισχύος 36.5 MW, ABB 2011

Όπως βλέπουμε από το τυπικό διάγραμμα ροπής-στροφών ενός τυπικού ηλεκτροκινητήρα έχουμε τη δυνατότητα υψηλών ροπών ακόμα και σε χαμηλές στροφές. Συνήθως η ροπή του φορτίου αυξάνεται με την ταχύτητα περιστροφής του γραμμικά ή εκθετικά. Ο κινητήρας σε αυτή τη περίπτωση αυτόματα θα επιταχυνθεί μέχρι η ροπή του φορτίου και η ροπή του ηλεκτροκινητήρα ισοσκελισθούν όπως επίσης φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Στην περίπτωση που το φορτίο μας είναι εκείνο της έλικας του πλοίου ισχύει ο ομώνυμος νόμος, ο νόμος της έλικας, ο οποίος είναι εκθετικός [1].



Διάγραμμα 3.4: Τυπικό διάγραμμα Ροπής-Στροφών Ηλεκτροκινητήρα
Technical guide No. 4 Guide to variable speed drives ABB, 2011

Σήμερα ο πλέον εφαρμοζόμενος τύπος κινητήρα είναι ο σύγχρονος, ο οποίος έχει βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται 96 - 98%, και είναι υψηλότερος κατά 3 - 4% από τον βαθμό απόδοσης κινητήρων επαγωγής. Η ονομαστική τάση λειτουργίας στις εγκαταστάσεις μέσης και υψηλής ισχύος είναι 3,3 - 6,6 kV. Μια νέα πολλά υποσχόμενη υποκατηγορία στους σύγχρονους κινητήρες είναι εκείνη με μόνιμους μαγνήτες όπου το τύλιγμα διεγέρσεως του δρομέα, το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες και των οποίων η απόδοση σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους υπερβαίνει το 98%. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο καθώς και στις δύο περιπτώσεις δηλαδή παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα. Το κύριο αίτιο της μεγαλύτερης απόδοσης που έχει αυτός ο τύπος μηχανών είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη παροχής συνεχούς ρεύματος και έτσι μεταξύ άλλων μειώνονται οι συνολικές απώλειες Joule στα τυλίγματα. Η κατασκευή κραμάτων "μόνιμων μαγνητών" (κράματα σαμαρίου-κοβαλτίου, Sm-Co και νεοβιδίου-σιδήρου-βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες,

όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής έκανε εφικτή την εφαρμογή αυτής της ιδέας .Οι κινητήρες με σωστή σχεδίαση μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και συναγωνίζονται έτσι μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations). Η έρευνα σήμερα έχει προχωρήσει περαιτέρω στη χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος [1].

3.2.1.6 Κιβώτιο Ταχυτήτων

Οι έλικες ελέγχονται από του κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας. Με χρήση μειωτήρων έχουμε υψηλές ονομαστικές στροφές και άρα πιο συμπαγείς μηχανές με μειονέκτημα την δημιουργία τριβών λόγω των μηχανικών υποσυστημάτων. Η εγκατάσταση ενός κιβωτίου ταχυτήτων είναι προαιρετική και η εγκατάσταση του ή μη εξαρτάται από τη ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα.

3.2.1.7 Συνεργασία έλικα – κινητήρα πρόωσης

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα που μας δίνεται μέσω της ηλεκτροπρόωσης είναι η ευελιξία χωροθέτησης των στοιχείων που συνθέτουν το σύστημα πρόωσης αλλά και η εξοικονόμηση χώρου στο πλοίο χάρις στη μείωση του αξονικού συστήματος του πλοίου σε σχέση με τη συμβατική πρόωση όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα [23].



Εικόνα 3.12: Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, I.M.Προυσαλίδης,2006

Μέσω των ηλεκτροκινητήρων που ελέγχουν τη προπέλα έχουμε τη δυνατότητα συνεχούς μεταβολής των στροφών σε όλο το πεδίο τιμών και επίσης δυνατότητα μεγάλης ροπής (σχεδόν στο 100%) ,όπως είδαμε στη παραπάνω παράγραφο, σε όλο το πεδίο λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από τουλάχιστον δύο ηλεκτροκινητήρες ίσης ισχύος. Το μηχανικό φορτίο της έλικας ακολουθεί τον νόμο της έλικας που ορίζει ότι η μηχανική ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής της και η χαρακτηριστική αυτή να είναι σταθερή για έλικα σταθερού βήματος και μεταβαλλόμενη με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων της για έλικα μεταβλητού βήματος.

Οι έλικες χωρίζονται βάσει της σχεδίασης τους σε τρεις κύριες κατηγορίες:

Έλικα σταθερού βήματος

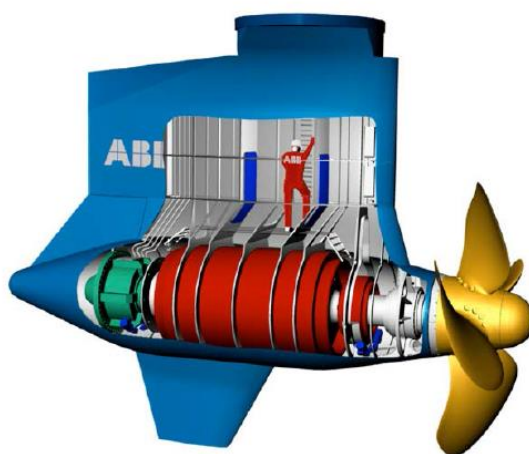
Σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί στη μέγιστη συνεχή ισχύ σε κατάσταση δοκιμών που είναι σε πλήρες φορτίο με καθαρή γάστρα και ήρεμο νερό. Για να είναι δυνατή η πλήρης ισχύς σε δυσμενέστερες των δοκιμών συνθήκες το σύνολο του συστήματος πρόωσης (κινητήρας, μετατροπέας κλπ.) διαστασιολογείται κατά 10—20% μεγαλύτερο από τη μέγιστη συνεχή λειτουργία της έλικας.

Έλικα ρυθμιζόμενου βήματος

Μέσω ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου γίνεται η αλλαγή του βήματος της έλικας για ένα διάστημα στροφών από 65%-100% των στροφών για βελτιστοποίησης της λειτουργίας και καλύτερη απόκριση χειρισμών. Σε τέτοιου είδους έλικες η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε μέσω ρύθμισης του βήματος ν' απορροφήσει.

Αζιμουθιακό Προωστήριο Σύστημα

Η δυνατότητα αυτού του συστήματος δίνεται χάρις στην ηλεκτροπρόωση. Το σύστημα του ηλεκτροκινητήρα και της έλικας σε αυτή τη περίπτωση αποτελεί μία μονάδα τοποθετημένη στη πρύμνη του πλοίου και εντός του ύδατος. Μπορεί να φέρει μία ή και δύο έλικες και υπάρχει η δυνατότητα πλήρης περιστροφής κατά το οριζόντιο επίπεδο. Η δυνατότητα αυτή επιλογής γωνίας από 0-360 μοίρες αυξάνει απεριόριστα τη δυνατότητα ελιγμών καταργώντας το μηχανισμό πηδαλιού και μηδενίζοντας το αξονικό σύστημα μετάδοσης της ισχύος.



Εικόνα 3.13:Σχηματική αναπαράσταση Αζιμουθιακού Προωστήριου Συστήματος, ABB 2014

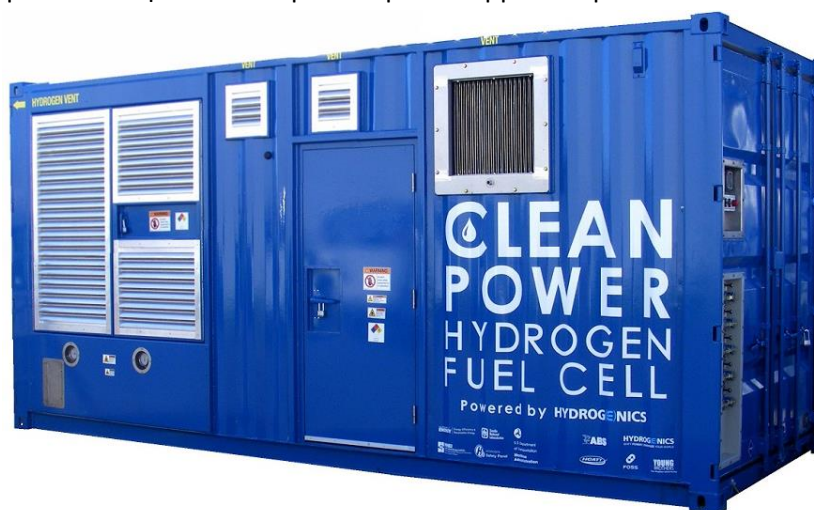
3.2 Κυψέλες Καυσίμου

3.2.1 Η Χρήση του Υδρογόνου ως Καύσιμο

Η ναυπηγική βιομηχανία στα πλαίσια της προσπάθειας για μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και της παραγωγής αέριων ρύπων εδώ και δεκαετίες εξετάζει τη χρήση του υδρογόνου σαν καύσιμο ανοίγοντας νέους ορίζοντες. Το υδρογόνο φαίνεται να είναι ο πιο πιθανός υποψήφιος για την αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων που βασίζονται στους ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη-τοξικό και παράγει μόνο καθαρή ενέργεια και υδρατμούς μέσω της καύσης του με το οξυγόνο του αέρα και κάποια ελάχιστη ποσότητα οξειδίων του αζώτου.

Η επιχειρηματολογία για τη χρήση του υδρογόνου βασίζεται στα παρακάτω πλεονεκτήματα του:

- Το υδρογόνο έχει τον υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο με 120,7 kJ/gr.
- Το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης κάτι που εξασφαλίζει γρήγορη ανάφλεξη. Το ποσό ενέργειας μάλιστα που απαιτείται για να αναφλέξει το υδρογόνο μικρότερο και από αυτό που απαιτείται για τη βενζίνη. Αυτό επιτρέπει στις μηχανές υδρογόνου να εξασφαλίσουν γρήγορη ανάφλεξη.
- Κάνει "καθαρή" καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Ενώ όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα παράγονται επίσης σε πολύ μικρό βαθμό οξείδια του αζώτου.
- Το υδρογόνο έχει μικρή απόσταση απόσβεσης, μικρότερη από τη βενζίνη. Κατά συνέπεια, είναι δυσκολότερο να αποσβησθεί μια φλόγα υδρογόνου από μια φλόγα βενζίνης.
- Το υδρογόνο έχει μια σχετικά υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις όταν συμπιέζεται ένα μίγμα με υδρογόνο. Στην πραγματικότητα, η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι ένας σοβαρός παράγοντας στον καθορισμό ποιας αναλογίας συμπίεσης μια μηχανή μπορεί να χρησιμοποιήσει, δεδομένου ότι η άνοδος της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της συμπίεσης συσχετίζεται με την αναλογία συμπίεσης.
- Το υδρογόνο έχει υψηλή ταχύτητα ανάφλεξης στις στοιχειομετρικές αναλογίες. Υπό αυτούς τους όρους, η ταχύτητα ανάφλεξης υδρογόνου είναι σχεδόν ένα μέγεθος υψηλότερη από αυτή της βενζίνης. Αυτό σημαίνει ότι οι μηχανές υδρογόνου μπορούν να πλησιάσουν περισσότερο το θερμοδυναμικό ιδανικό κύκλο μηχανών.

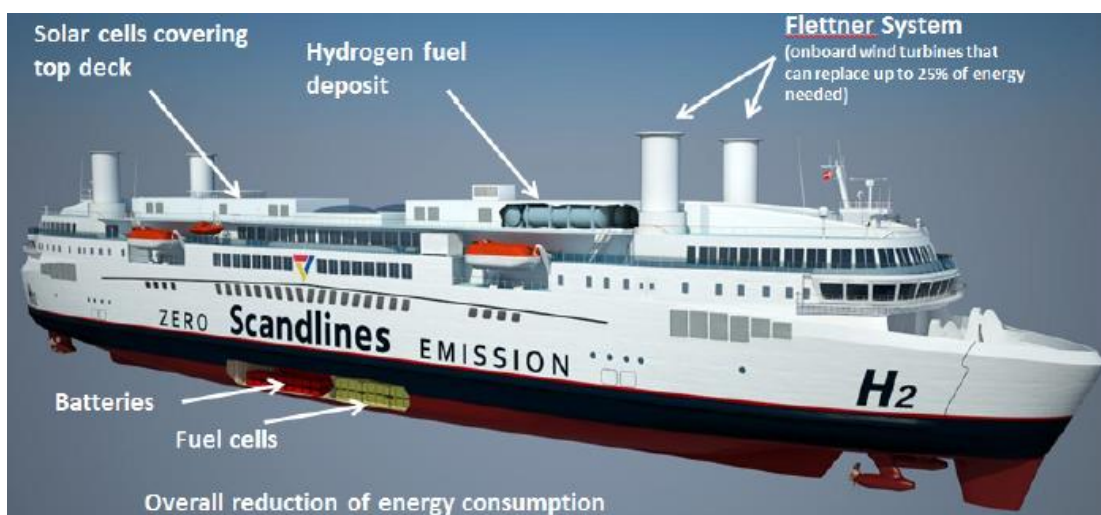


Εικόνα 3.14: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου τοποθετημένος σε λιμάνι για κάλυψη ηλεκτρικών φορτίων

Το υδρογόνο έχει σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος πυκνότητα ίση με 0,0899gr/lit , συντελεστή διάχυσης 0,61 cm³/sec κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα πτητικό ενώ η υγροποίηση του γίνεται στους -253°C. Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω πως η αποθήκευση του υδρογόνου χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και αποτελεί πρόκληση για τους επιστήμονες. Επιπροσθέτως το υδρογόνο αντιδρά με διάφορα μέταλλα όπως χάλυβες υψηλής ποιότητας.

Για την αποθήκευση του χρησιμοποιούνται τρεις τρόποι [19]:

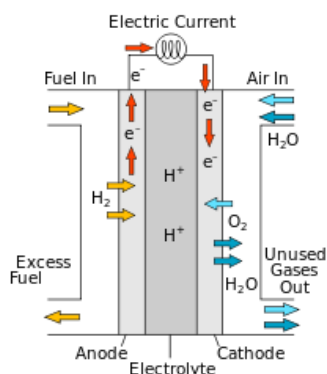
- Αέρια μορφή σε δεξαμενές υπό πίεση 200-350bar.
- Υγρή μορφή σε σφαιρικά ντεπόζιτα με διπλά τοιχώματα χάλυβα ή αλουμινίου. Καταλαμβάνει 80% λιγότερο χώρο από την παραπάνω περίπτωση όμως απαιτείται ενέργεια περίπου ίση με το 40% της ενέργειας που το καύσιμο περιέχει.
- Ένωση με κάποιο υλικό είτε αυτό είναι υδρίδιο (κράματα τιτανίου-σιδήρου, λανθανίου-νικελίου κλπ.) είτε με προσρόφηση (σε ίνες άνθρακα). Το υδρογόνο βρίσκεται σε αέρια κατάσταση ,συνεπώς χαμηλή ενέργεια, και με το τρόπο αυτό αποφεύγεται η επαφή του με άλλα υλικά και αποφεύγεται ο κίνδυνος έκρηξης.



Εικόνα 3.15:Σχηματική αναπαράσταση πλοίου με εγκατάσταση κυψελών καυσίμου, Φασκιώτης 2015

3.2.2 Κυψέλη Καυσίμου (Fuel Cell)

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω χημικών αντιδράσεων που δεν συμπεριλαμβάνουν καύση. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ένωση υδρογόνου με οξυγόνο παράγοντας νερό H₂O και ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 3.16: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου, Φασκιώτης 2015

Συντίθεται από δύο ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) τα οποία διαχωρίζονται από μια μεμβράνη που έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη και μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη μεσολαβεί καταλύτης. Το υδρογόνο τροφοδοτείται στην άνοδο της κυψέλης η οποία είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο τη διάταξης και το οξυγόνο στη κάθοδο η οποία είναι το θετικό ηλεκτρόδιο. Με τη χρήση πλακών πεδίου ροής σε συνδυασμό με πορώδες δομές ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται η αποτελεσματική μεταφορά των αντιδρώντων μέσω καναλιών. Τα μόρια του H₂ έρχονται σε επαφή με τον καταλύτη και διαχωρίζονται σε θετικά φορτισμένα ιόντα και ηλεκτρόνια. Η μεμβράνη εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να διέλθουν σε αυτή και έτσι μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος οδεύουν προς τη κάθοδο. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτείται στη κάθοδο και με τα ηλεκτρόνια που περνώντας από το ηλεκτρικό κύκλωμα φτάνουν στη κάθοδο.

Τ' αντιδρώντα H₂ και O₂ εισέρχονται στη κυψέλη καυσίμου σύμφωνα με το νόμο του Faraday [18]:

- $n_{h_2} [\text{mol/sec}] = I \cdot N / 2 \cdot F$ (3.3)

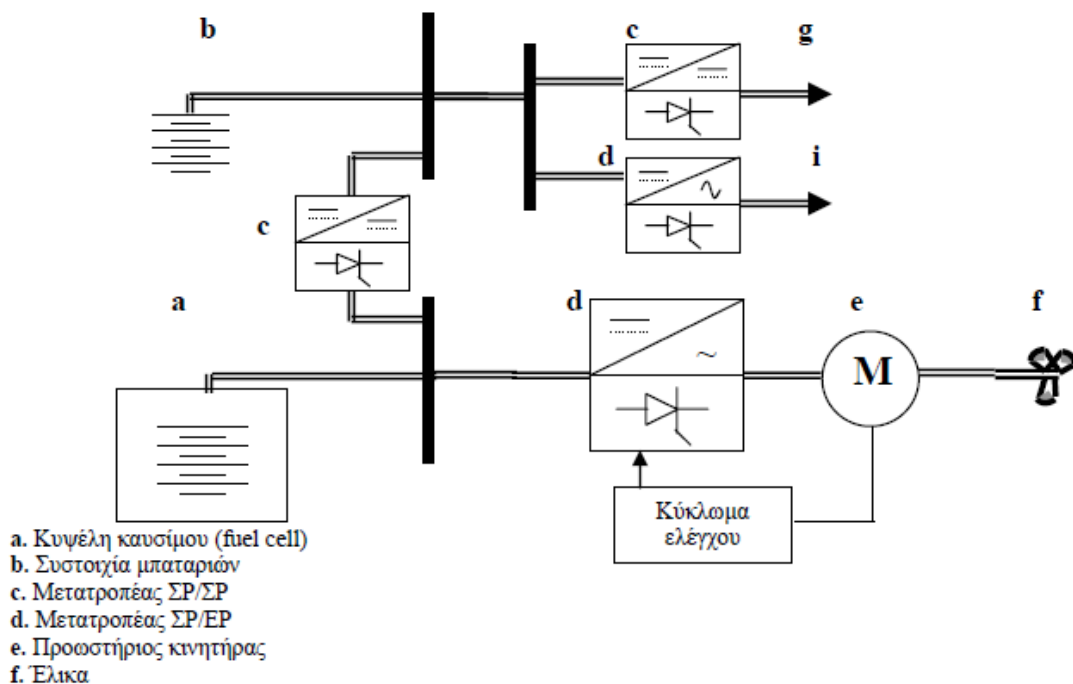
- $n_{o_2} [\text{mol/sec}] = I \cdot N / 4 \cdot F$ (3.4)

όπου:

I είναι το ρεύμα που διαρρέει τη κυψέλη καυσίμου [A], N:ο αριθμός των κυψελών καυσίμου σε σειρά που συνθέτουν τη στήλη κυψέλης καυσίμου, F:η σταθερά του Faraday ενώ το 2 προκύπτει από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που με ανταλλάσσονται ανά mole H₂ και το 4 από τ' αντίστοιχα ηλεκτρόνια του O₂.

Το προϊόν αυτών των αντιδράσεων είναι νερό H₂O το οποίο και αποβάλλεται από τη μεμβράνη ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία και θερμότητα. Οι δεσμοί H-H και O-O περιέχουν υψηλότερη ενέργεια από εκείνη των H-O που δημιουργούνται έπειτα από την παραπάνω περιγραφείσα διαδικασία σε άνοδο και κάθοδο.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη λειτουργίας μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου σε ένα πλοίο για την πλήρη εξυπηρέτησή των φορτίων του σε συνδυασμό με συστοιχία μπαταριών:



Εικόνα 3.17 : Σχηματική διάταξη τυπικής ηλεκτρολογικής εγκατάστασης πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου με κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες, Ι.Μ.Προυσαλίδης 2006.

Οι επικρατούσες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου με υδρογόνο είναι [8] :

Πίνακας 3.6: Αντιδράσεις σε ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου ανάλογα το τύπο της κυψέλης

Fuel Cell	Anode Reaction	Cathode Reaction
Polymer Electrolyte and Phosphoric Acid	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alkaline	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Molten Carbonate	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Solid Oxide	$H_2 + O^* \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^* \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^* \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^*$

Ενώ οι σχέσεις που δίνουν τη τάση που δημιουργείται σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου βάσει των εξισώσεων του Nernst [8]:

Πίνακας 3.7: Παραγόμενη τάση βάσει των τύπων του Nernst για κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου

Cell Reactions*	Nernst Equation
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E^0 + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_{2(a)} \rightarrow H_2O + CO_{2(a)}$	$E = E^0 + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O} (P_{CO_2})_{(a)}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2} (P_{CO_2})_{(g)}]$
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$E = E^0 + (RT/2F) \ln [P_{CO} / P_{CO_2}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E = E^0 + (RT/8F) \ln [P_{CH_4} / P_{H_2O}^2 P_{CO_2}] + (RT/8F) \ln [P_{O_2}^2]$

Όπως βλέπουμε η θεωρητική τάση των κυψελών καυσίμου αποτελεί πάντοτε εξάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης των αντιδρώντων.

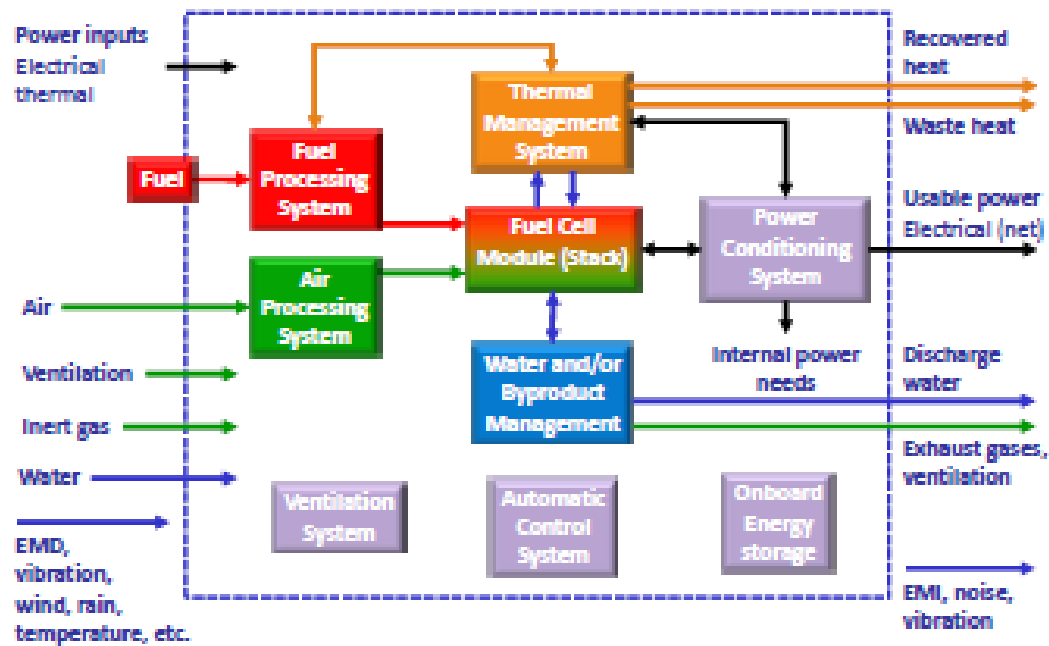
Η χημική ενέργεια που έχει το υδρογόνο ανά μονάδα μάζας και όγκου μπορεί να προσεγγιστεί είτε μέσω του HHV είτε μέσω του LHV δηλαδή της ανώτερης και της κατώτερης τιμής. Η τιμή HHV οποιουδήποτε καυσίμου μπορεί να μετρηθεί μ' ένα θερμιδόμετρο. Το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής είναι η χημική του ενέργεια ξεκινώντας από τους 25°C και τελειώνοντας στην ίδια θερμοκρασία συνεπώς το νερό του προϊόντος συμπυκνώνεται εντελώς. Βάσει αυτού η τιμή HHV περιλαμβάνει την λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του νερού όμως η ποσότητα του νερού που προκύπτει θα πρέπει να υπολογιστεί. Η τιμή LHV δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα γι' αυτό υπολογίζεται από τη τιμή HHV αφαιρώντας την θερμότητα ατμοποίησης [8].

- $W_{H_2,HHV}=39,39 \text{ kWh/kg}$ ή $W_{H_2,HHV}=3,54 \text{ kWh/m}^3$
- $W_{H_2,LHV}=33,32 \text{ kWh/kg}$ ή $W_{H_2,LHV}=3,00 \text{ kWh/m}^3$

Συνεπώς η χημική ισχύς που εισέρχεται είναι [8]:

- $P_{H_2,HHV\text{consumed}} = 1,481 * V * N * I * \lambda_{\text{anode}} \quad (3.5)$
όπου: λ_{anode} ο στοιχειομετρικός λόγος στο ηλεκτρόδιο της ανόδου και V η τάση της κυψέλης καυσίμου

Η ροή ισχύος στις κυψέλες ισχύος παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα [8] :



Εικόνα 3.18: Διάγραμμα Ισχύος Κυψέλης Καυσίμου σύμφωνα με το IEC 62282-1, Kabza 2016

Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

Πλεονεκτήματα

1. Υψηλή απόδοση
2. Αξιοπιστία & Ελάχιστη Συντήρηση – λόγω της έλλειψης κινητών μερών
3. Μηδενικές Εκπομπές Ρύπων – προϊόν καύσης υδρογόνου
4. Μηδενικός Θόρυβος & Δονήσεις
5. Ευελιξία καυσίμου
6. Γρήγορη ανατροφοδότηση
7. Μεγάλη διάρκεια λειτουργίας
8. Ευρύ Φάσμα εφαρμογών
9. Η χρήση υδρογόνου – παράγεται κατευθείαν από το νερό ,εύκολη μεταφορά, ασφαλές καύσιμο σε περίπτωση διαρροής λόγω της γρήγορης διάχυσης του στην ατμόσφαιρα

Μειονεκτήματα

1. Κόστος
2. Τροφοδοσία
3. Χρόνος εκκίνησης
4. Μέγεθος
5. Διαρροές

Αξίζει τέλος να αναφερθεί για να γίνει άμεσα κατανοητή η αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος πως βάσει μετρήσεων ένα σύγχρονο όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης για να διανύσει 400 χιλιόμετρα απαιτεί 24kg βενζίνης ή 8 kg υδρογόνου ενώ ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου χρειάζεται μόλις 4kg υδρογόνου.

3.2.3 Κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC)

Η πλέον κατάλληλη τεχνολογία κυψελών καυσίμου για εφαρμογή σε πλοία θεωρούνται τα στοιχεία Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane PEM).

Οι PEMFC έχουν τα κάτωθι πλεονεκτήματα που τις καθιστά τις πλέον διαδεδομένες σε εφαρμογές πλοίων [15]:

- Υψηλή πυκνότητα ισχύος
- Συμπαγής κατασκευή
- Χαμηλό βάρος
- Έλλειψη ρύπων
- Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (συνήθως 60–80 °C) η οποία επιτρέπει υψηλή εκκίνηση

Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραπάνω βήματα, είναι οι εξής [8]:

- Στην άνοδο
 $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
- Στην κάθοδο
 $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
- Συνολική αντίδραση
 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Η τάση που δημιουργείται στην κυψέλη καυσίμου είναι [8]:

$$U_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohmic} \quad (3.6)$$

όπου:

$$E = 1.23 - 0.00085 * (T_{stack} - 298) + 0.0000431 * T_{stack} * \ln(p_{H_2} * p_{O_2}^{0.5}) \quad (3.7)$$

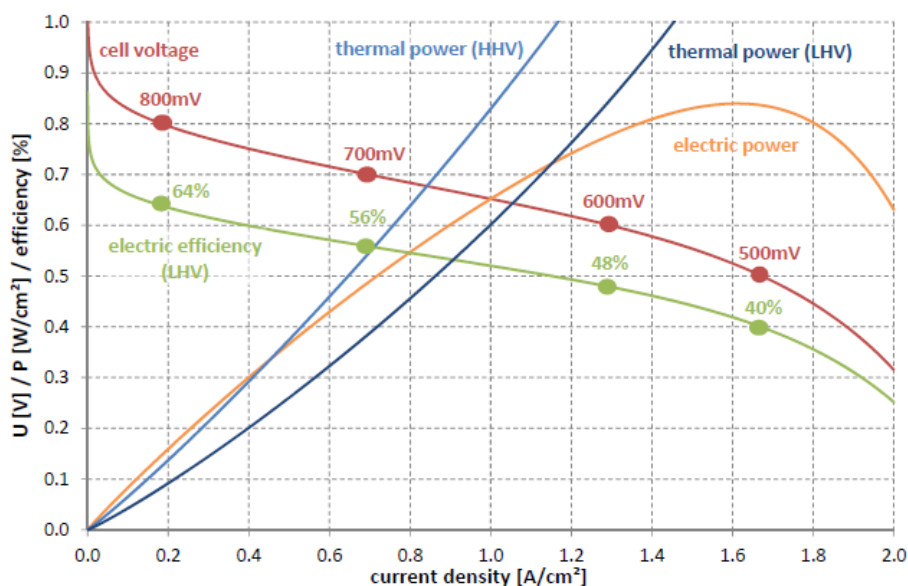
$$\eta_{act} = -0.95 + 0.00243 * T_{stack} + 0.000192 * T_{stack} * \ln(A_{PEM}) - 0.000192 * T_{stack} * \ln(I_{FC}) \rightarrow +0.000076 * T_{stack} * \ln(C_{O_2}) \quad (3.8)$$

$$\eta_{ohmic} = \frac{-I_{FC} * t_{PEM} * 8}{A_{PEM} * \exp[3.6 * (\frac{T_{stack} - 353}{T_{stack}})]} * [1 + 1.64 * \frac{I_{FC}}{A_{PEM}} + \gamma * (\frac{I_{FC}}{A_{PEM}})^3] \quad (3.9)$$

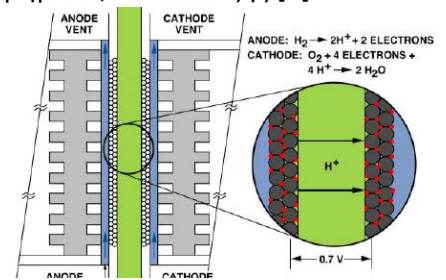
Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου ισούται [8]:

$$\eta_e = \frac{U_{cell}}{U_{tn}} \quad , \text{ με } U_{tn} = 1.482 \text{ V} \quad (3.10)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα λειτουργίας [8]:



Διάγραμμα 3.4: βαθμός απόδοσης, τάση κυψέλης, ηλεκτρική ισχύς, παραγωγή θερμότητας σε σχέση με το παραγόμενο ρεύμα σε τυπική κυψέλη καυσίμου, Kabza 2016



Εικόνα 3.19: Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς ιόντων πρωτονίου σε PEM, Kabza 2016

Από τις παραπάνω εξισώσεις και το προκύπτον διάγραμμα βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η τάση της κυψέλης καυσίμου μειώνεται απότομα κατά την εκκίνηση της
- Ο βαθμός απόδοσης μιας και αποτελεί συνάρτηση μόνο της τάσης της κυψέλης και βαίνει μειούμενη με τον ίδιο ρυθμό με εκείνο της τάσης με την αύξηση του απορριφθέντος ρεύματος
- Το μέγιστο της ισχύος της εμφανίζεται για μια υψηλή πυκνότητα ρεύματος και ως εκ τούτου σε με έναν χαμηλό βαθμό απόδοσης
- Οι θερμικές απώλειες είναι μεγαλύτερες για υδρογόνο LHV

3.2.4 Στήλη Κυψελών Καυσίμου

Ο βαθμός απόδοσης μιας κυψέλης καυσίμου δεν είναι 100% και συνεπώς η θεωρητική τιμή της τάσης της δεν είναι 1,16V αλλά καταφανώς μικρότερη περί τα 0,7 V. Είναι εμφανές πως με τόσο μικρή τάση δεν μπορούμε να έχουμε εφαρμογές. Η σύνδεση όμως σε σειρά ενός αριθμού κυψελών καυσίμου δημιουργεί μια στήλη κυψελών καυσίμου της οποίας η τάση στους ακροδέκτες της ισούται με το γινόμενο του αριθμού των κυψελών που είναι συνδεδεμένες επί τη τάση της μεμονωμένης κυψέλης [18].

$$V_{stack} = N_{\text{κυψελών καυσίμου}} * U_{\text{cell}} \quad (3.11)$$

Εάν τώρα η ισχύς που απαιτείται στη τάση της στήλης είναι μεγαλύτερη τότε συνδέουμε εν παραλλήλο τον αριθμό εκείνο των στηλών που θα ικανοποιήσει τις ανάγκες μας [18].

$$I_{FC} = U_{stack} * N_{stack} \quad (3.12)$$

Συνεπώς η ηλεκτρική ισχύ που δίνει μία στήλη κυψελών καυσίμου [18]:

$$P_{el} = U_{stack} * I = U_{cell} * N * I \quad (3.13)$$

Οι θερμικές απώλειες στη στήλη αποτελούν τμήμα της χημικής ενέργειας που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ [8].

$$P_{therm} = P_{H_2, HHV} - P_{el} \quad (3.14)$$

Θεωρώντας την τιμή HHV οι απώλειες στην κυψέλη καυσίμου ισούται [8]:

$$P_{therm, HHV} = (1,481 \text{ V} - U_{cell}) * N * I \quad (3.15) \quad \text{ή}$$

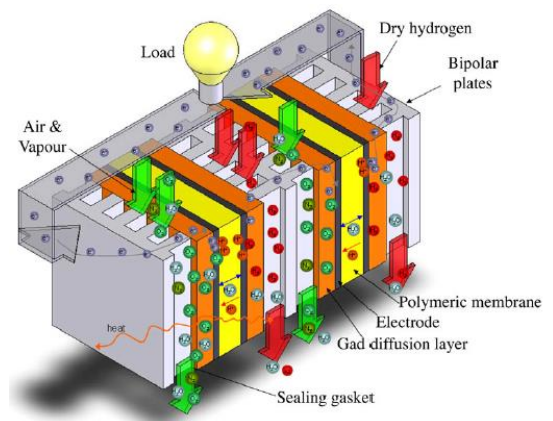
$$P_{therm, LHV} = (1,253 \text{ V} - U_{cell}) * N * I \quad (3.16)$$

Στην βιβλιογραφία για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται είτε με βάση τη τιμή LHV είτε με βάση τη τιμή HHV. Ως εκ τούτου σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσης διαμορφώνεται [8]:

$$n_{el, LHV} = \frac{U_{cell}}{1,481 \text{ V}} \text{ για HHV} \quad (3.17) \quad \text{ή} \quad n_{el, LHV} = \frac{U_{cell}}{1,253 \text{ V}} \text{ για LHV} \quad (3.18)$$

Επίσης μπορεί να οριστεί ένας ακόμη βαθμός απόδοσης βασιζόμενος στη ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται από την κυψέλη καυσίμου. Αυτός ο βαθμός διαμορφώνεται ως εξής [8]:

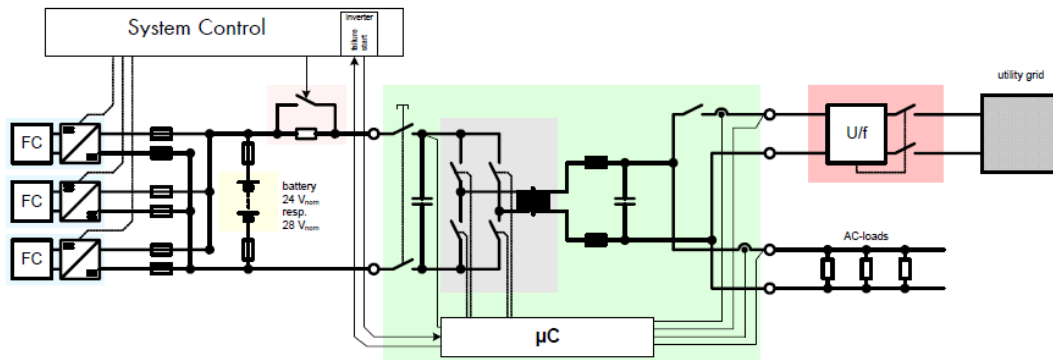
$$n_{el, LHV} = \frac{U_{cell}}{1,481 \text{ V} * \lambda_{anode}} \text{ για HHV} \quad (3.19) \quad \text{ή} \quad n_{el, LHV} = \frac{U_{cell}}{1,253 \text{ V} * \lambda_{anode}} \text{ για LHV} \quad (3.20)$$



Εικόνα 3.20: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στήλης κυψελών καυσίμου, Kabza 2016

Καταφανώς ο παράγοντας διαφοροποίησης των δύο είναι η στοιχειομετρία στο ηλεκτρόδιο ανόδου. Σε κάθε περίπτωση βλέπουμε πως η ονομαστική τιμή του βαθμού απόδοσης με βάση τη τιμή LHV θα είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη από εκείνη που βασίζεται στη τιμή HHV [8].

Οι στήλες κυψελών καυσίμου παράγουν, όπως είδαμε παραπάνω, συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα για το λόγο αυτό πρέπει να συνδεθούν στην έξοδο τους με ηλεκτρονικά ισχύος, που θα μιλήσουμε εκτενέστερα γι' αυτά στο παρακάτω κεφάλαιο, inverters (αντιστροφείς) οι οποίες συσκευές μετατρέπουν το ρεύμα σε εναλλασσόμενο για χρήση σε φορτία που καταναλώνουν αυτή τη μορφή ρεύματος [31].



Εικόνα 3.21: Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης κυψέλης καυσίμου με inverter και φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος, SMA 2016

Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου [15]:

- Υγρασία
Η ύπαρξη υγρασίας κατά την εισροή των αερίων μειώνει την αγωγιμότητα της μεμβράνης στα ιόντα υδρογόνου και προκαλεί μείωση του παραγόμενου ρεύματος
- Ροή Αέρα
- Θερμοκρασία
Χαμηλή τιμή θερμοκρασίας στη κυψέλη μειώνει την απόδοσή της. Υψηλή θερμοκρασία μπορεί να την καταστρέψει λόγω εξάτμισης του νερού αφυδατώνοντας την μεμβράνη
- Πίεση
Η πίεση θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα μικρό διάστημα τιμών καθώς η μικρή πίεση μειώνει την απόδοση της κυψέλης ενώ η πολύ μεγάλη πίεση δύναται να προκαλέσει θέμα δομικής αντοχής της κυψέλης. Κάτι που θα πρέπει να υπολογιστεί είναι το ότι κατά τη διέλευση της ροής από τη στήλη έχουμε πτώση πίεσης που εκφράζεται ως [15]:

$$\Delta p = \frac{p_2 - p_0}{2} + \frac{\sqrt{(\alpha \cdot A \cdot \rho_0)^2 \cdot (p_0 + p_2)^2 + 2 \cdot m^2 \cdot \rho_0 \cdot \rho_0}}{2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \rho_0} - p_2 \quad (3.21)$$

3.2.5 Γενική δομή συστήματος παραγωγής ενέργειας με PEMFC

Η ισχύς εξόδου μιας κυψέλης καυσίμου δεν ρυθμίζεται και η σταθερότητα της είναι ένα ζήτημα προς επίλυση σε κάθε εφαρμογή. Η τάση δέχεται μια έντονη μεταβολή από μια σειρά παραγόντων όπως η ένταση του ρεύματος, η πίεση των αερίων, η υγρασία των αντιδρόντων, η παροχή του αερίου, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα σε νερό της μεμβράνης. Για να γίνει εφικτή η συνεχής παραγωγή ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας διάταξης ώστε να ικανοποιούνται απαραίτητα στοιχεία.

Παροχή Αντιδρώντων

Το υποσύστημα αυτό έχει ως στόχο να εξασφαλίσει την επαρκή ροή αντιδρώντων για την εξασφάλιση άμεσης απόκρισης σε συνδυασμό με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Ο αέρας ή το καθαρό οξυγόνο μπορεί να τροφοδοτηθεί στη κυψέλη καυσίμου μέσω συμπιεστή ή ανεμιστήρα ή και συνδυασμό των δύο. Συνήθως χρησιμοποιούμε συμπιεστή ο οποίος μας προσφέρει αυτονομία, προσαρμοστικότητα και έλεγχο παροχής και πίεσης. Συνήθως συνδέονται ηλεκτρικά με τις κυψέλες καυσίμου και αποτελούν μέρος των απωλειών του συστήματος. Για την παροχή του καυσίμου συζητήσαμε παραπάνω.

Θερμότητας και Θερμοκρασίας

Περιλαμβάνει το σύστημα ψύξης των κυψελών καυσίμου και το σύστημα θέρμανσης του αντιδραστήριου. Η έντονη εξάρτηση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου από τη θερμοκρασία της καθιστά κρίσιμη τη θερμική της διαχείριση. Συνήθως χρησιμοποιούνται συστήματα ψύξης νερού και σπανιότερα ανεμιστήρες [15].

Η απαιτούμενη ροή νερού για την ψύξη των κυψελών καυσίμου υπολογίζεται από το τύπο :

- $$V = \frac{P_{\text{recovered heat}}}{c_p \cdot \Delta T \cdot \rho} \quad [\text{l/min}] \quad (3.22)$$

Διαχείριση Νερού

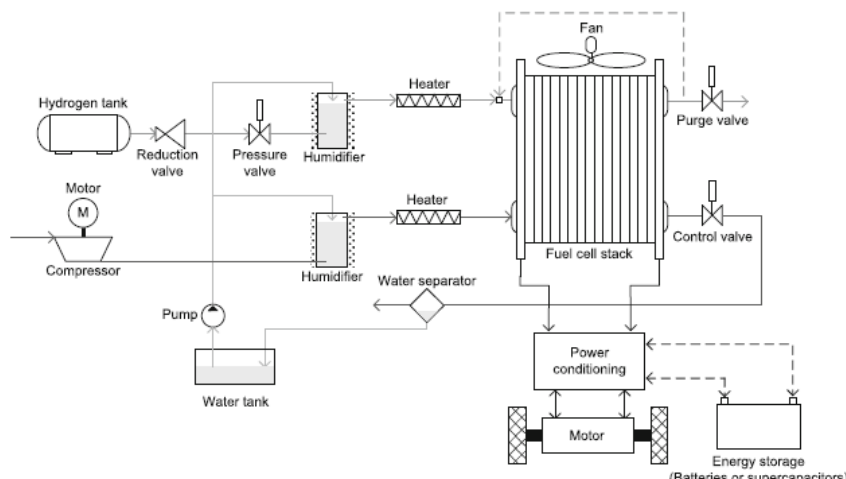
Η διαχείριση του νερού αποτελεί μια τεχνολογική πρόκληση για τη κάθε εφαρμογή. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ενυδάτωση της μεμβράνης. Συνήθως απαιτείται τόσο στον αέρα όσο και στο υδρογόνο αύξηση της υγρασίας τους πριν εισέλθουν στις κυψέλες καυσίμου. Το νερό εξερχόμενο από τη κάθοδο ανακτάται και επανέρχεται στους υγραντήρες μέσω της αντλίας.

Ρύθμιση Ισχύος

Οι κυψέλες καυσίμου με την άνοδο της παραγωγής του ρεύματος που παράγουν υπάρχει πτώση στη τάση τους όπως είδαμε παραπάνω. Ως εκ τούτου αυτό καθιστά τη τάση μη ρυθμιζόμενη και συνεχόμενα μεταβλητή. Απαιτούνται λοιπόν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος είτε DC/DC που μετατρέπουν τη μεταβλητή τάση των κυψελών καυσίμου σε μια επιθυμητή τιμή σταθερής τάσης είτε DC/AC ώστε να γίνει εναλλασσόμενη για άμεση τροφοδότηση φορτίων που υπάρχει τέτοια απαίτηση.

Διαχείριση Ισχύος

Εφαρμόζεται στη περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα χρήση κάποιας αποθήκης θερμότητας όπως μπαταρίες οι οποίες τροφοδοτούν παράλληλα με τις κυψέλες καυσίμου το φορτίο.



Εικόνα 3.22: Σχηματική αναπαράσταση συνόλου εγκαταστάσεως συστήματος κυψέλης καυσίμου

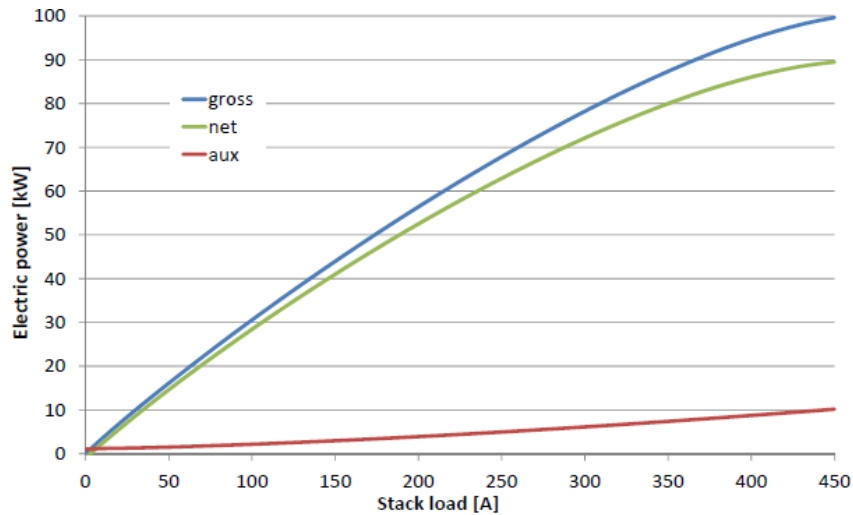
Η κύρια κατανάλωση ισχύος μιας τέτοιας διάταξης είναι εκείνη του συμπιεστή που είναι εξάρτηση της στοιχειομετρίας και της πίεσης στη κάθοδο αλλά και του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή (15).

- $P_{aux} = P_{compressor} + P_{components}$ (Εξίσωση 3.23)

όπου:

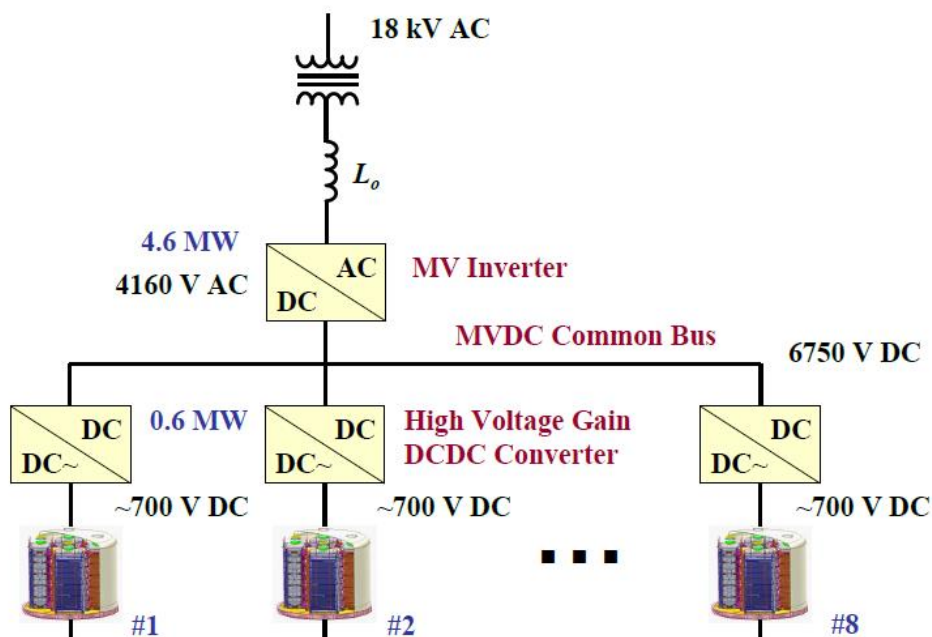
$$P_{compressor} = m * c_{p,m} * T_1 * (\Pi(I))^{(n-1)/n-1} * \frac{1}{\eta_{compressor}(\Pi, m)} \quad (3.24)$$

$$\text{και } m = m_{air}(I) = \frac{I * N}{4 * F * X_{O_2}} * \lambda_{cathode}(I) * M_{air} \quad (3.25)$$



Διάγραμμα 3.5: Ισχύς κατανάλωσης βοηθητικών στοιχείων των κυψελών καυσίμου

Τέλος το ρεύμα το οποίο παρήχθη από τις κυψέλες καυσίμου που είναι συνεχές απαιτείται για χρήση στη πλειονότητα των φορτίων να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο. Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιούνται αρχικά converters για την αύξηση της τάσεως των κυψελών καυσίμου και εν συνεχεία inverters που λαμβάνοντας την συνεχή τάση σε μια τιμή όπου μπορεί να γίνει αποδοτικά η μετατροπή σε εναλλασσόμενη την μετατρέπουν σε αυτή [15].



Εικόνα 3.23: Ηλεκτρονική συστοιχία για μετατροπή του συνεχούς ρεύματος των κυψελών καυσίμων στο επιθυμητό εναλλασσόμενο

3.3 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση

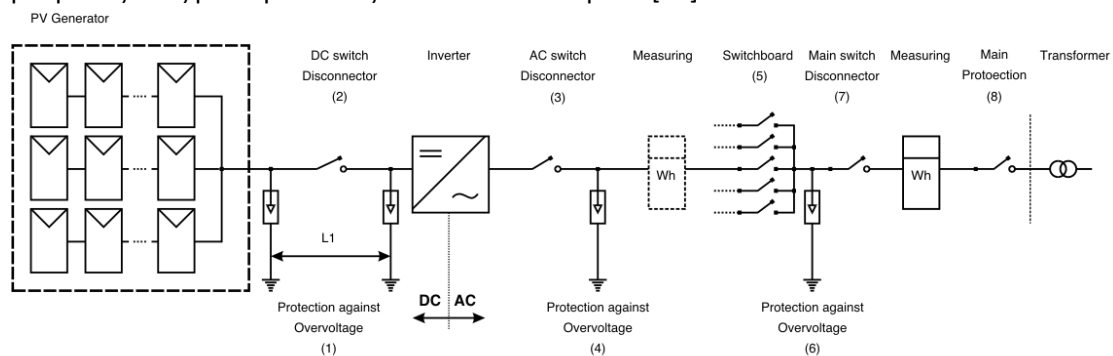
Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια να γίνει εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε πλοία με στόχο τη κατασκευή ολοένα και πιο πράσινων πλοίων όπως επιβάλλεται από τους διεθνείς κανονισμούς.

Μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση όμως σε ένα πλοίο ακόμα και αν έχει εκμεταλλευτεί όλους τους διαθέσιμους χώρους μπορεί να αποτελέσει στη καλύτερη περίπτωση μια δευτερεύουσα πηγή ενέργειας καλύπτοντας ένα μικρό ποσοστό των ενεργειακών του αναγκών. Από την άλλη μεριά η εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνολογίας σε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο αυξάνει κατ' ελάχιστο τη πολυπλοκότητα και το κόστος του ενώ ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τις ανάγκες του πλοίου μιας και εγχέεται κατευθείαν στον ζυγό (bus) μαζί με το ρεύμα από τις άλλες πηγές ή ακόμα άμεσα στις καταναλώσεις.



Εικόνα 3.24::Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε κρουαζιερόπλοιο

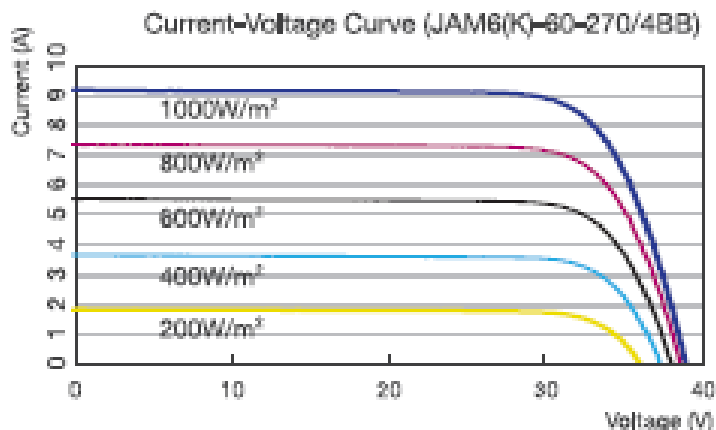
Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι πολύ μικρής πολυπλοκότητας μιας και συντίθενται μόλις από δύο στοιχεία τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τους inverters. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ λειτουργούν σαν πηγές ενέργειας συνεχούς ρεύματος και για να χρησιμοποιηθεί η ισχύς τους θα πρέπει να συνδεθούν στην έξοδο τους με inverters που κάνουν αντιστροφή τους ρεύματος τους μετατρέποντας το σε εναλλασσόμενο [31].



Εικόνα 3.25: Σχηματική διάταξη συστήματος παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά πανελ για φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος

Τα φωτοβολταϊκά πάνελς και τα ηλεκτρονικά ισχύος (inverters, converters κλπ.) που χρησιμοποιούμε για παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο έχουν αποδειχθεί μια αξιόπιστη και με βάθος χρόνου λειτουργίας τεχνολογία η οποία δίνεται να μειώσει στο βαθμό που της αναλογεί τις εκπομπές ενός πλοίου.

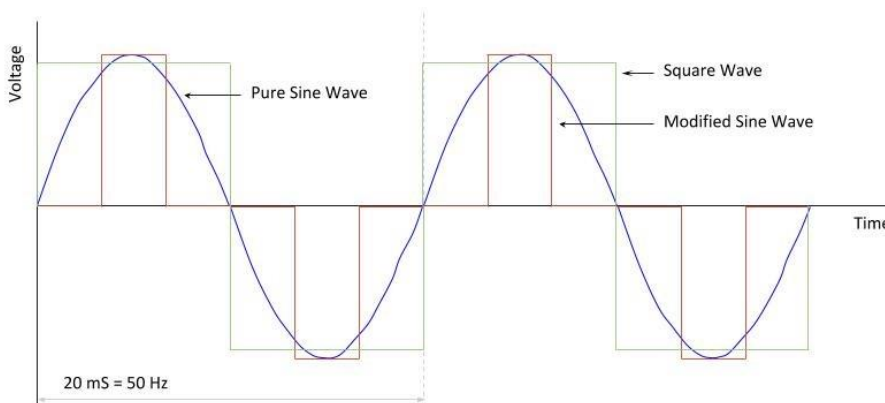
Ένα φωτοβολταϊκό πανελ παράγει ισχύ που εξαρτάται κυρίως από την ισχύ της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του ενώ μεταβάλλεται κατά ένα ελάχιστο ποσοστό αρνητικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Εδώ η τάση στην οποία παράγεται η ισχύς μεταβάλλεται ελαφρώς με την προσπίπτουσα ακτινοβολία αντιθέτως το ρεύμα είναι αρκετά ευαίσθητο στο παράγοντα αυτό [28].



Διάγραμμα 3.6: Ρεύματος-Τάσεως από φωτοβολταϊκό πάνελ βάσει της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας, www.helarco.gr

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως μια φωτοβολταϊκή συστοιχία που έχει εγκατασταθεί σε ένα κρουαζιερόπλοιο και κάνει ταξίδια στη Μεσόγειο θα παράξει στη διάρκεια του χρόνου εμφανώς μεγαλύτερη ενέργεια από το αν έκανε δρομολόγιο στη Βαλτική.

Λόγω του ότι το ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι σε συνεχές ρεύμα για να γίνει η απορρόφηση του τόσο από το δίκτυο είτε και για άμεση κατανάλωση θα πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο. Οι συσκευές που επιφορτίζονται για το έργο αυτό είναι ο inverter (αντιστροφέας). Οι αντιστροφείς αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες του διαμορφωμένου και του καθαρού ημιτόνου. Η διαφορά που έχουν είναι στη ποιότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο τους όπως βλέπουμε από το παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 3.7: Μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο ανάλογα τον τύπο του αντιστροφέα

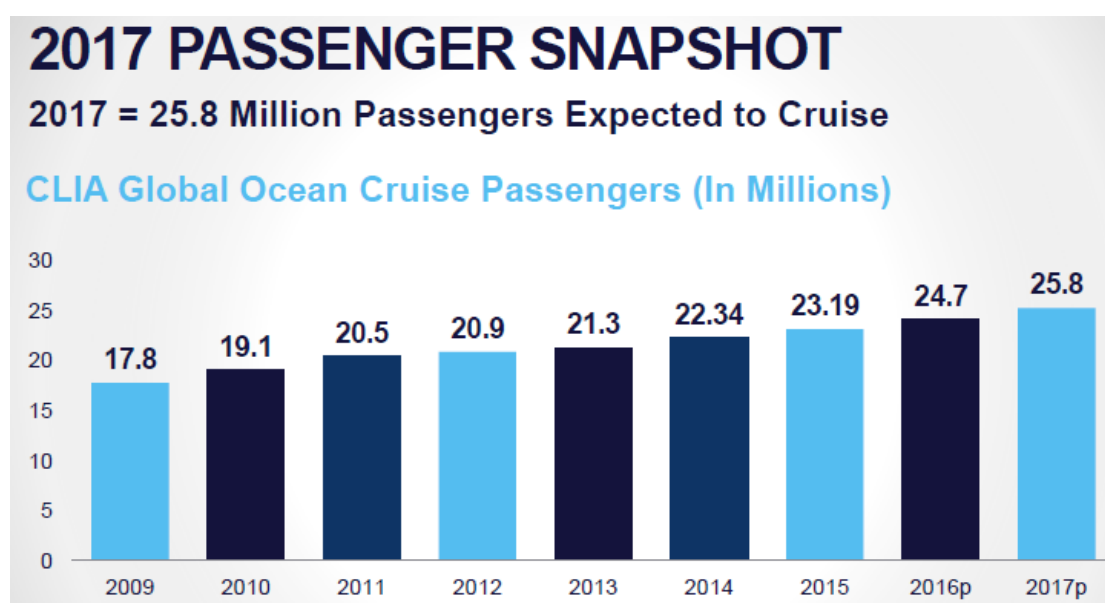
Όπως γίνεται κατανοητό οι Inverter διαμορφωμένου ημιτόνου ,εάν και πιο φθηνοί, αντενδείκνυνται για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών λόγω της μορφής του ρεύματος που δίνουν.

4. Περιγραφή Μελέτης Περίπτωσης

4.1 Επιλογή Τύπου Πλοίου

Ένας από τους πρώτους τύπους πλοίων στον οποίο η ναυπηγική βιομηχανία εφάρμοσε τα συστήματα ηλεκτροπρόωσης είναι εκείνος των κρουαζιερόπλοιων. Ο κυριότερος παράγοντας της επιλογής αυτής είναι η μεγάλη απαίτηση στις ξενοδοχειακές τους εγκαταστάσεις σε ηλεκτρικό φορτίο. Τα φορτία που απαιτούνται για την κάλυψη των σύγχρονων κρουαζιερόπλοιων εξαιτίας της αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας για ψυχαγωγία και θερμική άνεση αποτελούν ένα συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό της συνολικής ισχύος ενός τέτοιου πλοίου που σήμερα μπορεί να φθάνει το 80% της ισχύος πρόωσης.

Ο Διεθνής οργανισμός κρουαζιέρας (CLIA) υποστηρίζει πως τα επόμενα χρόνια θα υπάρξει μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη κρουαζιέρα η οποία βρίσκεται παγκοσμίως σε σταθερή άνοδο.



Διάγραμμα 4.1: Εκατομμύρια επιβατών σε κρουαζιέρα ανά έτος παγκοσμίως, CLIA 2015

Σαν φυσικό επακόλουθο του αυξημένου ενδιαφέροντος είναι η αύξηση της ναυπήγησης σύγχρονων κρουαζιερόπλοιων μεγάλης χωρητικότητας που θα πρέπει να είναι οικονομικά και να πληρούν τις απαιτήσεις που έχει θέσει ο IMO.

Πίνακας 4.1: Παραγγελίες νέων κρουαζιεροπλοίων έως το 2019 και προβλέψεις για τα έτη 2020-2026, CLIA

Year	Ocean	River	Ships Ordered	New Capacity
2017	13	13	26	30,006
2018	15	2	17	29,448
2019	20	2	22	51,824
2020 – 2026	32	0	32	119,510
Total	80	17	97	230,788

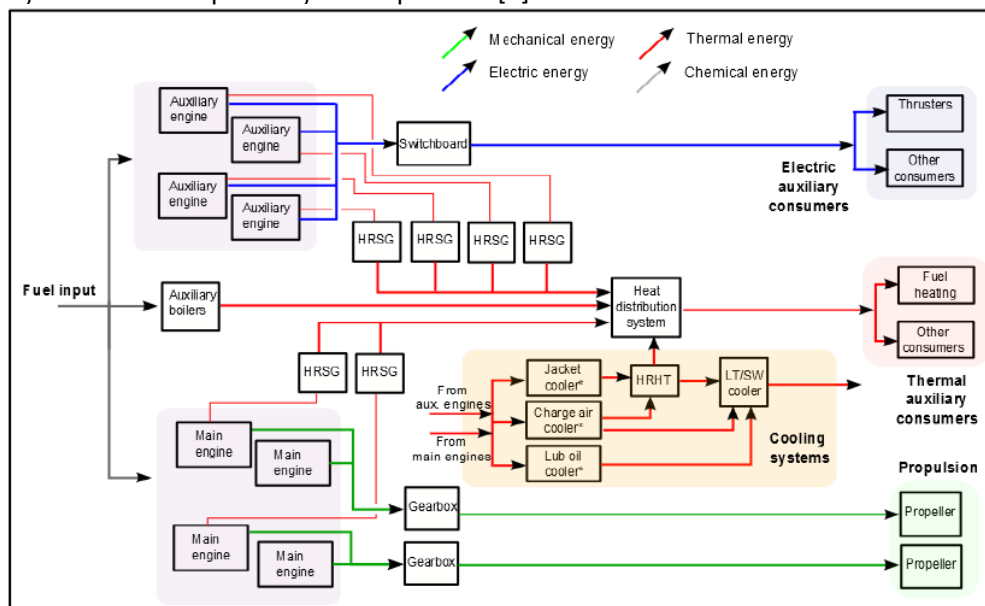
4.2 Κρουαζιερόπλοιο Προσομοίωσης

Στόχος της διπλωματικής είναι να γίνει προσομοίωση της λειτουργίας ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου σε επίπεδο κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπής αέριων ρύπων. Θα χρησιμοποιήσουμε τ' αποτελέσματα της μελέτης «*Energy and exergy analysis of a cruise ship*», 2015 Fr. Baldia για τα απαιτούμενα φορτία που θα πρέπει να καλυφθούν μέσω διαφόρων στοιχείων που θα επιλέξουμε βασιζόμενοι σε αυτά τόσο για το σύστημα ηλεκτροπρόωσης όσο και για τις ξενοδοχειακές ανάγκες. Στη μελέτη το πλοίο που μελετάτε είναι ένα κρουαζιερόπλοιο το οποίο ταξιδεύει στη Βαλτική θάλασσα. Η επιλογή ενός πλοίου που εκτελεί δρομολόγια στη Βαλτική κάθε άλλο παρά τυχαία είναι καθώς όπως είδαμε και στην Εικόνα 2.3 η θάλασσα της Βαλτικής είναι περιοχή χαρακτηρισμένη ως ECA και προστατεύεται με αυστηρή νομοθεσία. Το πλοίο αυτό έχει μήκος 176.9m , πλάτος 28.6m και ταχύτητα υπηρεσίας 21knots ενώ ναυπηγήθηκε το 2004 στη Φιλανδία. Εντός του πλοίου το οποίο μπορεί να φιλοξενήσει στα πλαίσια της κρουαζιέρας 1800 επιβάτες λειτουργούν εστιατόρια, night clubs και bars καθώς και σάουνες και πισίνες. Το πλοίο για τη πρόωση του είναι εγκατεστημένες 4 τετράχρονης πετρελαιομηχανές Wartsila ονομαστικής ισχύος 5850KW εκάστη ενώ για την κάλυψη των ξενοδοχειακών αναγκών είναι εγκατεστημένες 4 ηλεκτρογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2760KW εκάστη. Για την συλλογή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν μετρητικές συσκευές για ένα χρόνο επί του πλοίου [3].



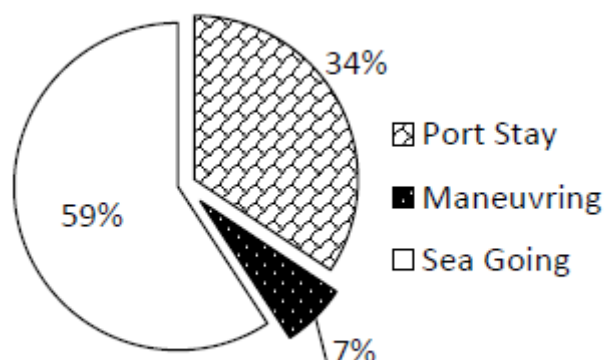
Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης πλήρως εξηλεκτρισμένου κρουαζιερόπλοιού

Η σχηματική αναπαράσταση των κύριων ενεργειακών στοιχείων και ο τύπος και η ροή της ισχύος στο πλοίο παρουσιάζεται παρακάτω [3]:

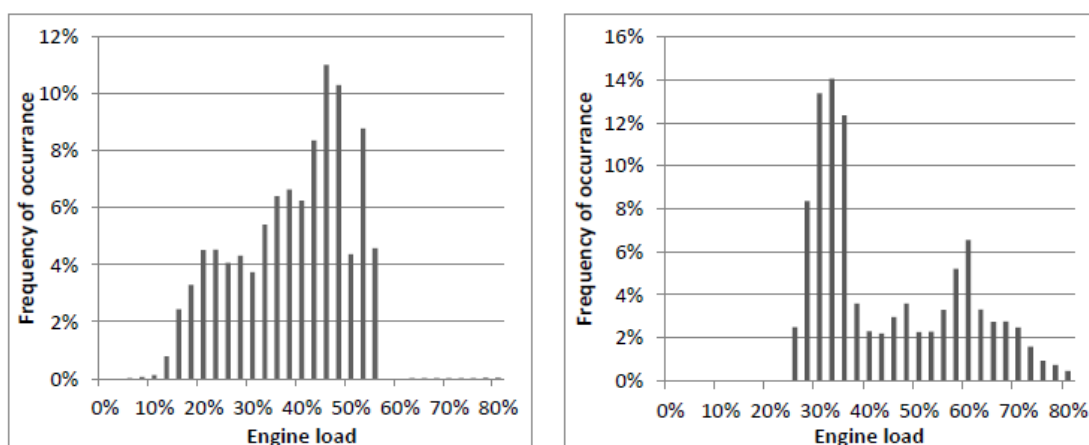


Εικόνα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση των κύριων ενεργειακών στοιχείων του επιλεγόμενου πλοίου , *Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015*

Στα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζεται το ποσοστό του χρόνου που καταλαμβάνει η παραμονή στο λιμάνι, το maneuvering και η πλεύση του πλοίου καθώς και η συχνότητα εμφάνισης του κάθε ποσοστού φόρτισης των μηχανών ανάλογα το τύπο τους ,που είναι και τ' αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν για τη προσομοίωση του πλοίου στο ενεργειακό επίπεδο. Ακολουθούν τα διαγράμματα αντιστοίχως [3]:



Διάγραμμα 4.2: Ποσοστό του χρόνου που καταλαμβάνει σε ετήσια βάση κάθε κατάσταση του πλοίου, , Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015

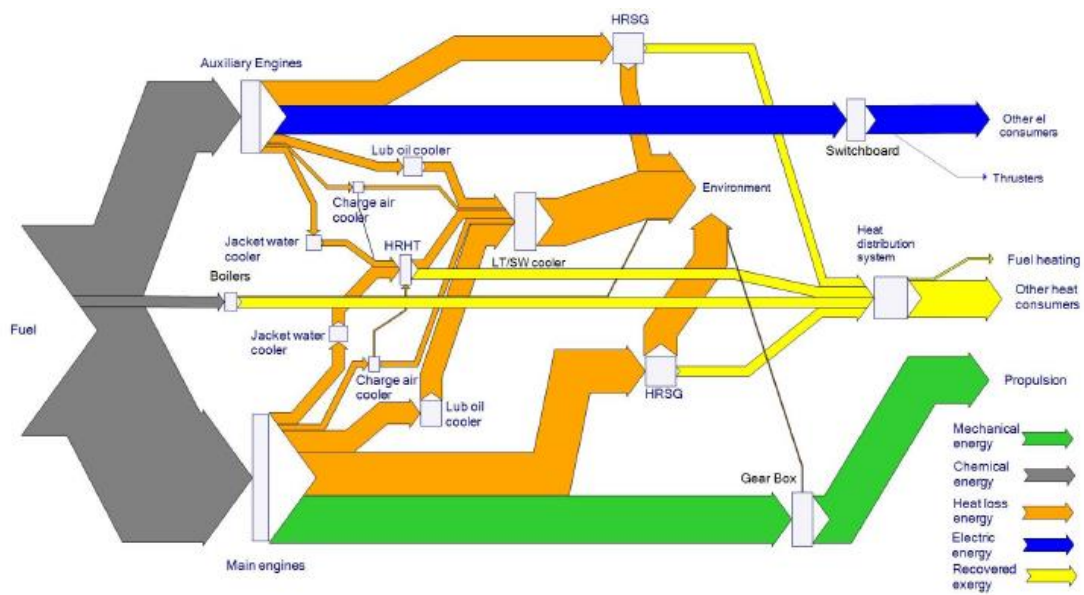


Διάγραμμα 4.3 & 4.4: Ποσοστό φόρτισης της μηχανής για τις μηχανές πρόωσης (αριστερά) και τις ηλεκτρογεννήτριες (δεξιά), , Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015

Από τα παραπάνω αποτελέσματα κάνουμε τις εξής διαπιστώσεις [3]:

1. Το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα η ισχύς που απαιτείται για την πρόωση του πλοίου είναι σαφώς μικρότερη της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος. Συνεπώς η λειτουργία της μηχανικής πρόωσης του πλοίου είναι μη αποδοτική μιας και λειτουργεί ως επι το πλείστον σ' ένα εύρος ισχύος που σπανίως ξεπερνάει το 55%.
2. Τα ξενοδοχειακά φορτία είναι σ' όλες τις φάσεις λειτουργίας του πλοίου σε σχετικά υψηλά επίπεδα.

Το διάγραμμα Sankey βάσει των καταναλώσεων είναι [3]:

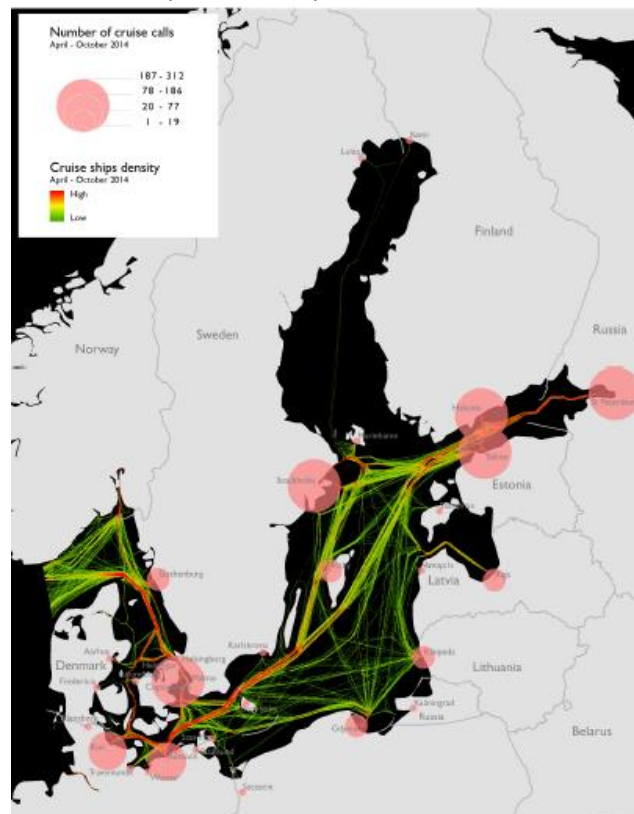


Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα Sankey Energy and exergy analysis of a cruise ship, Fr. Baldi, 2015

Από τα παραπάνω συμπεράσματα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως το προφίλ αυτό των απαιτούμενων φορτίων είναι απόλυτα ταιριαστό να εξυπηρετηθεί με ένα σύστημα πλήρως εξηλεκτισμένου πλοίου όπου μια σειρά παράλληλων GenSets σε συνεργασία με κυψέλες καυσίμου και Α.Π.Ε. θα λειτουργούν με βέλτιστο τρόπο για αυτό το σκοπό.

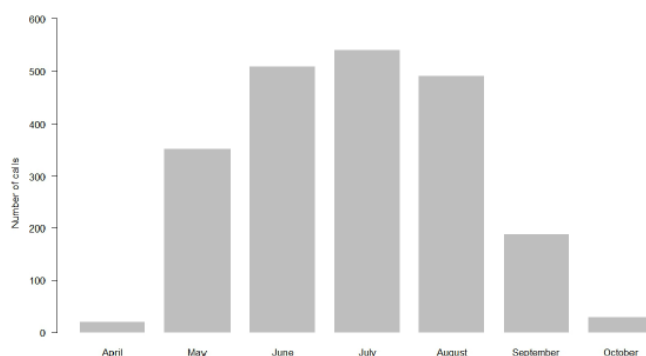
4.3 Διάρκεια Προσομοίωσης

Η θάλασσα της Βαλτικής προσφέρει μια πληθώρα δρομολογίων-προορισμών για τον επιβάτες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [6].



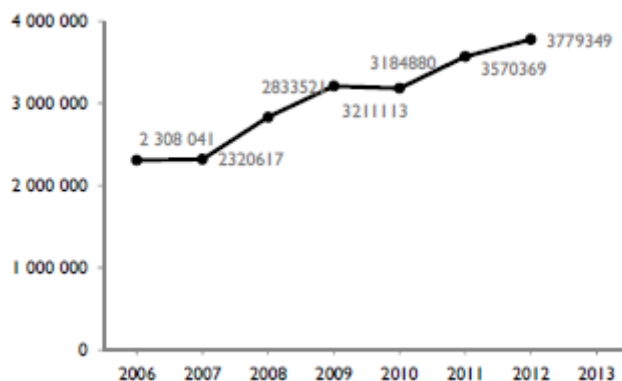
Εικόνα 4.3: Δρομολόγια και προορισμοί κρουαζιεροπλοίων στη Βαλτική, HELCOM 2014

Σύμφωνα με τον οργανισμό HELCOM η πλειοψηφία των πλοίων εκτελεί δρομολόγια στη Βαλτική από το μήνα Μάιο έως τον Σεπτέμβριο ενώ ελάχιστα είναι εκείνα που ξεκινούν περί το τέλος του Απριλίου και σταματάνε στις αρχές του Οκτωβρίου [6].



Διάγραμμα 4.5: Αριθμός ενεργών κρουαζιεροπλοίων στη Βαλτική ανά μήνα, HELCOM 2014

Οι επιβάτες που επιλέγουν κρουαζιέρα στη περιοχή της Βαλτικής παρουσιάζουν μια σταθερά αυξητική τάση. Λόγο αυτού του γεγονότος μπορούμε να προβλέψουμε πως η περίοδος της κρουαζιέρας στη περιοχή αυτή θα διευρυνθεί για περισσότερα πλοία στο μέλλον. Συνεπώς η προσομοίωση μας θα ξεκινήσει από τη τελευταία εβδομάδα του Απριλίου έως τη πρώτη του Οκτώβρη [6].



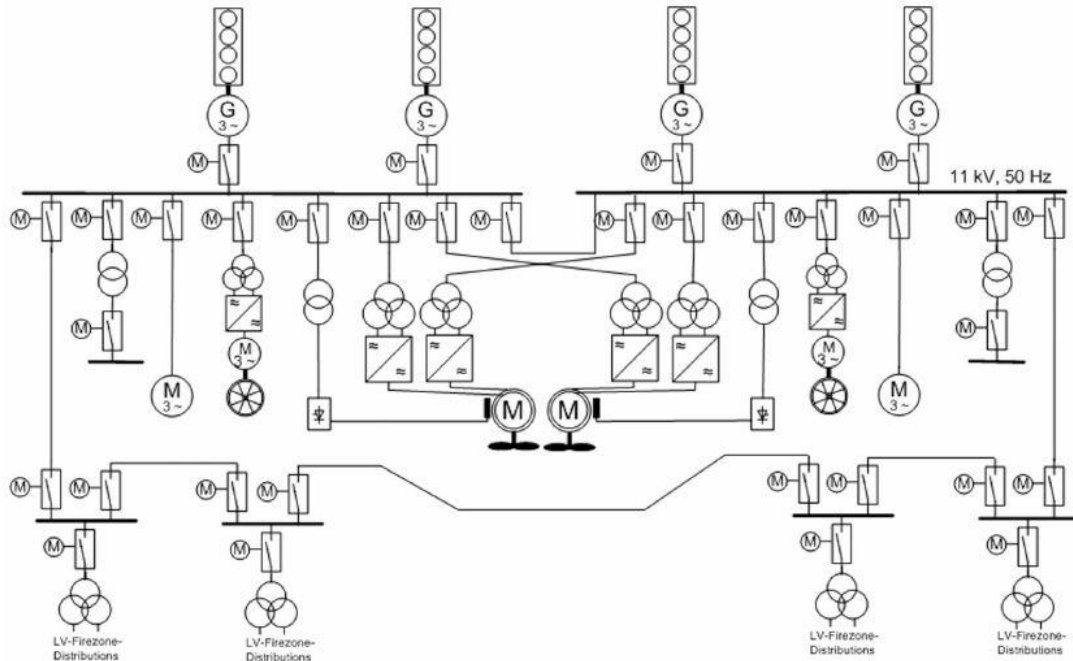
Διάγραμμα 4.6: Αριθμός επιβατών ανά έτος για κρουαζιέρα στη Βαλτική, HELCOM 2014

4.4 Σχεδιασμός Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Πλοίου

Με βάσει τα παραπάνω στο κεφάλαιο αυτό θα επιλέξουμε τα βασικότερα στοιχεία ώστε να έχουμε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο το οποίο θα λειτουργεί με GenSets, κυψέλες καυσίμου και φωτοβολταϊκά.

4.4.1 Σχεδιασμός Ηλεκτροπρόωσης

Μια τυπική ηλεκτρολογική διάταξη ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου κρουαζιερόπλοιου δίνεται παρακάτω [11]:



Εικόνα 4.4: Τυπική Ηλεκτρολογική Διάταξη Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Κρουαζιερόπλοιου, MAN 2016

Σε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο η δομή του ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να είναι δύο μορφών [11]:

1. Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής είναι ενιαία και καλύπτει όλα τα φορτία του πλοίου
2. Διαιρεμένο σύστημα σε εκείνο της ηλεκτροπαραγωγής που καλύπτει την πρόωση και σε εκείνο που καλύπτει τις υπόλοιπες ανάγκες του πλοίου

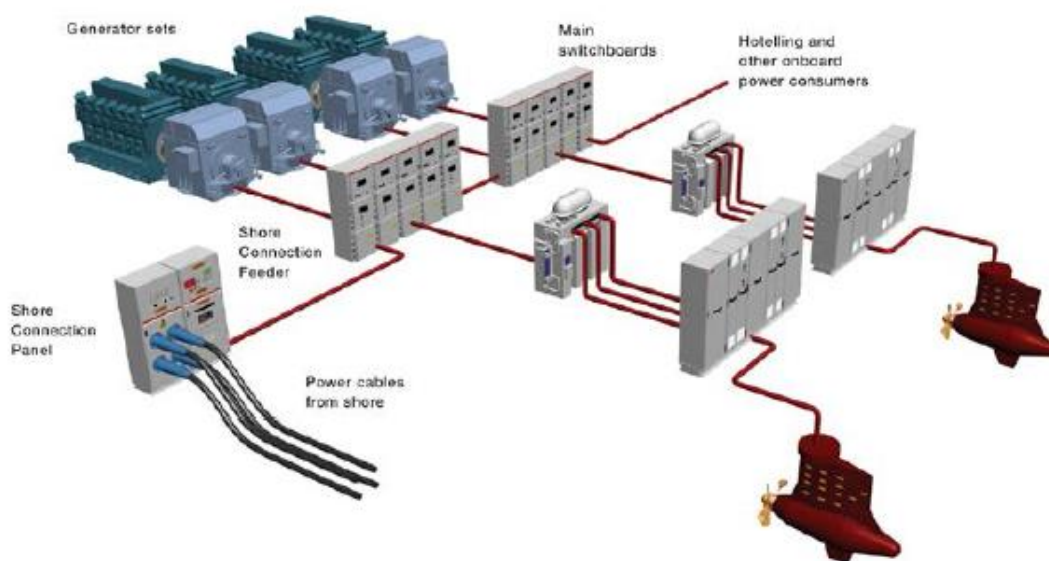
Εμείς θα επιλέξουμε την πρώτη περίπτωση που προτείνεται και στην διεθνή βιβλιογραφία ως πιο αποδοτική αλλά και ως πιο οικονομική στην αρχική επένδυση.

Η διάταξη του συστήματος μας θα περιλαμβάνει τα εξής κύρια στοιχεία:

- GenSets με τα οποία θα γίνεται η κύρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος θα είναι να λειτουργούν μέσα σε ένα εύρος φορτίων στο οποίο θα είναι αποδοτική η λειτουργία τους και ως αντίκτυπο της χαμηλής η ειδικής κατανάλωσης θα έχουμε τόσο οικονομία καυσίμου όσο και μειωμένη παραγωγή ρύπων
- Κυψέλες Καυσίμου οι οποίες θα λειτουργούν ώστε να εξασφαλίζεται η οικονομική λειτουργία GenSets καλύπτοντας τα φορτία που θα τα έβγαζαν εκτός των επιλεγόμενων ποσοστών φόρτισης και επίσης σε ειδικές καταστάσεις όπου απαιτούνται πολύ μικρά φορτία ή πολύ μεγάλα τα οποία δεν μπορούν καλυφθούν αποκλειστικά από τα GenSets.
- Φωτοβολταϊκή συστοιχία η οποία θα διοχετεύει αμέσως την παραγόμενη ισχύ της για κάλυψη αναγκών στο πλοίο

Παρακάτω αναφέρονται τα ζητήματα που θα πρέπει κατά σειρά να εξετάσουμε ώστε να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης [11]:

1. Το είδος των κινητήριων μηχανών. Για ένα κρουαζιερόπλοιο έχουμε να επιλέξουμε μεταξύ εμβολοφόρων μηχανών Diesel ,LNG και Αεριοστρόβιλων. Επίσης ως συνεπικουρούμενη πηγή ισχύος δύναται να είναι κυψέλες καυσίμου, Συσσωρευτές Lid Acid και Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση
2. Τα χαρακτηριστικά ηλεκτρικού δικτύου. Το είδος του δικτύου (DC,AC) της μπάρας δηλαδή πάνω στην οποία συγκεντρώνεται το παραγόμενο ρεύμα καθώς και τη τιμή της τάσης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος.
3. Αριθμός και τύπος των γεννητριών
4. Τρόπος διασύνδεσης με τους καταναλωτές
5. Τρόπος αυτοματισμού ζεύξης-απόζευξης μεταξύ τους μέσω του switchboard
6. Ο αριθμός ,ο τύπος και η ισχύς των κινητήρων πρόωσης.
7. Το είδος ελέγχου χειρισμού των κινητήρων
8. Το είδος των στάτων των μετατροπών
9. Διάταξη του ηλεκτρικού δικτύου
10. Διάκριση των ηλεκτρικών φορτίων σε πρόωσης και υπολοίπων και εξυπηρέτηση τους από διαφορετικές συστοιχίες τελείως ανεξάρτητα, Διακριτά αλλά με δυνατότητα σύνδεσης όταν υπάρχει ανάγκη των δυο, ενοποιημένα σε ένα κοινό ηλεκτρικό δίκτυο

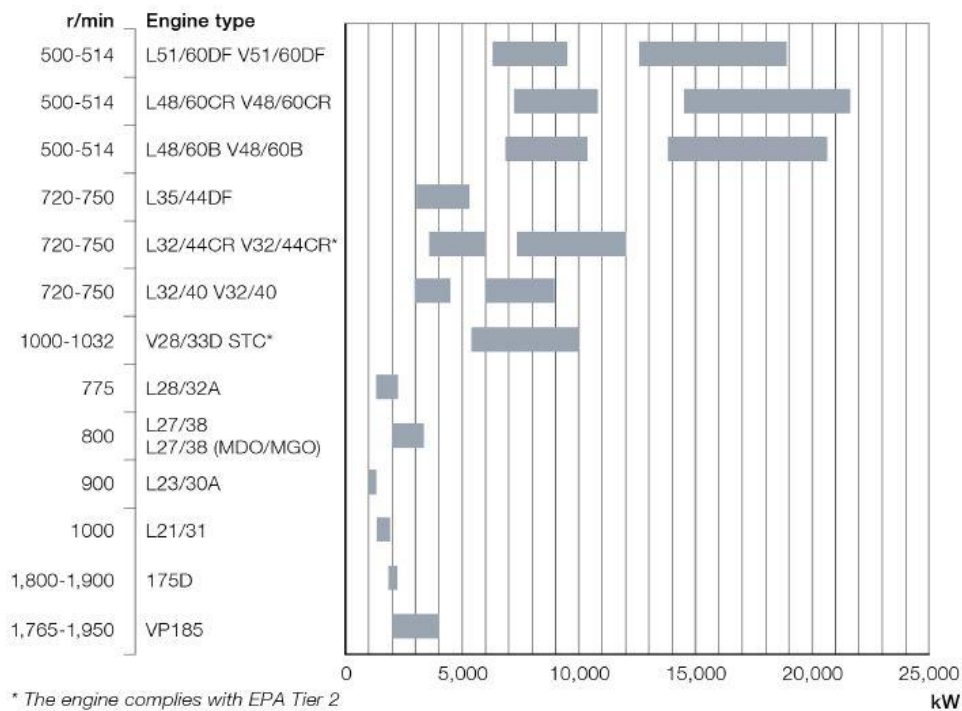


Εικόνα 4.5: Διάταξη συστημάτων πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου , ABB 2015

4.4.1.1 Επιλογή μηχανής

Προκειμένου να επιλέξουμε μηχανή συμβουλευτήκαμε τον οδηγό της εταιρίας MAN για πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο. Η επιλογή βασίζεται στην άθροιση των φορτίων που απαιτούνται για ηλεκτροπρόωση και για κάλυψη των υπόλοιπων καταναλώσεων του πλοίου.

Για την επιλογή του μοντέλου της μηχανής κάνουμε χρήση του διαγράμματος [11] :



Διάγραμμα 4.7: Οδηγός εκλογής μοντέλου μηχανής βάσει της απαιτούμενης ισχύος, MAN 2016

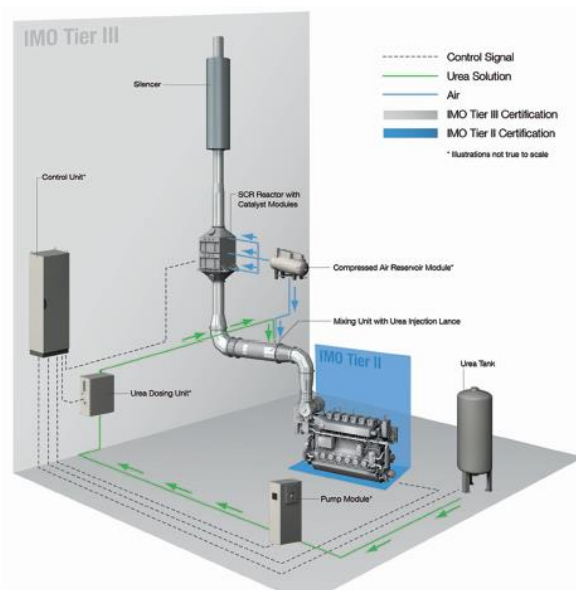
Βάσει των φορτίων του πλοίου και των προτάσεων της MAN ως οι πλέον ενδεδειγμένες επιλογές είναι σειρές μηχανών :

- L51/60DF και V51/60DF
- L48/60CR και V48/60CR
- L48/60B και V48/60B

Από τις παραπάνω θα επιλέξουμε τη σειρά 51/60DF διότι η σειρά αυτή παρέχει τη δυνατότητα καύσης τόσο πετρελαίου όσο και φυσικού αερίου με υψηλό βαθμό απόδοσης και χαμηλές εκπομπές ρύπων και συνίστανται για εγκατάσταση σε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο κρουαζιερόπλοιο.

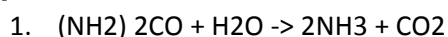
Επιπροσθέτως η σειρά αυτή καλύπτει τις απαιτήσεις του IMO για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου εντός ECA. Για λειτουργία με καύσιμο πετρέλαιο για η ικανοποίηση των περιορισμών αυτών απαιτείτε να συνδεθεί σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής αμμωνίας ενώ για λειτουργία σε φυσικό αέριο οι απαιτήσεις καλύπτονται χωρίς τη χρήση τέτοιου συστήματος [11].

	500rpm	514rpm
IMO Tier II	10,54 g/kWh	10,54 g/kWh
IMO Tier III	2,60 g/kWh	2,58 g/kWh

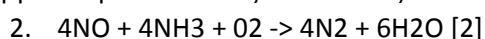


Εικόνα 4.6: Ικανοποίηση κανονισμών Tier από τη 51/60 DF, MAN 2016

Αρχή της τεχνολογίας SCR βρίσκεται στη χρήση της αμμωνίας (NH₃) για τη μετατροπή των οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια σε αβλαβές άζωτο και νερό μέσα σε καταλύτη. Ωστόσο, η αμμωνία είναι μια επικίνδυνη ουσία που πρέπει να αντιμετωπιστεί προσεκτικά για να αποφευχθούν τυχόν κίνδυνοι για τα πληρώματα, τους επιβάτες και το περιβάλλον. Ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ουρία ως πηγή αμμωνίας. Η ουρία είναι αβλαβής και, λύεται στο νερό, επιπροσθέτως είναι εύκολο να μεταφερθεί. Η αντίδραση εντός του σωλήνα καυσαερίων και στο καταλύτη γίνεται σε δύο στάδια. Στην αρχή, η ουρία αποσυντίθεται στα καυτά καυσαέρια σε αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο νερό στο ενέσιμο διάλυμα και τη θερμότητα των καυσαερίων [11]:



Η μείωση των NO_x πραγματοποιείται υποστηριζόμενη από τον καταλύτη, όπου η αμμωνία μειώνει τα οξείδια του αζώτου σε άζωτο και νερό:



Η 51/60DF έχει μοντέλα μηχανών από 6300KW έως 18900KW σε διάταξη σειρά L:

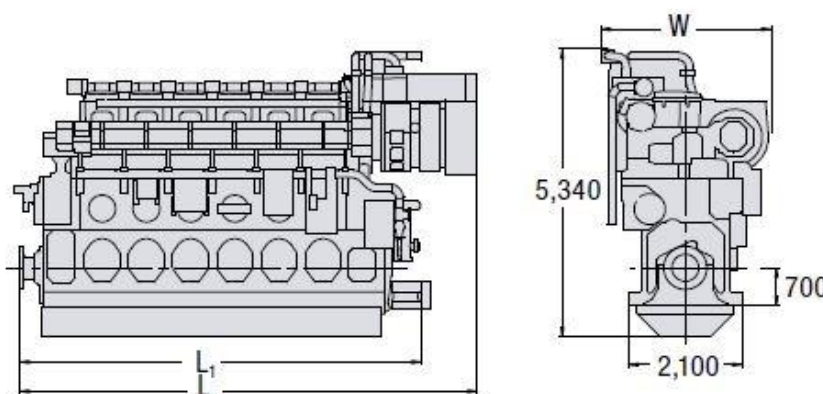
Πίνακας 4.2: Στοιχεία μηχανής τύπου L 51/60DF, MAN 51/60DF Project Guide – Marine 2016

Bore: 510 mm, Stroke: 600 mm			
Speed	r/min	514	500
mep	bar	20.0	20.6
		kW	kW
6L51/60DF		6,300	6,300
7L51/60DF		7,350	7,350
8L51/60DF		8,400	8,400
9L51/60DF		9,450	9,450

Η γεωμετρία των οποίων παρουσιάζεται παρακάτω:

Dimensions					
Cyl. No.		6	7	8	9
L	mm	8,494	9,314	10,134	11,160
L ₁	mm	7,455	8,275	9,095	9,915
W	mm	3,165	3,165	3,165	3,283
Dry mass	t	106	119	135	148

Minimum centreline distance for twin engine installation: 3,200 mm



Εικόνα 4.7 Διαστάσεις μοντέλων της σειράς 51/60DF MAN ,MAN 2016

Η MAN προτείνει έναν τρόπο εκλογής του μοντέλου της σειράς 51/60DF βάσει των απαιτήσεων σε φορτίο που έχει το πλοίο και περιγράφεται στο πίνακα που ακολουθεί ώστε το πηλίκο της απαιτούμενης προς την ονομαστική της εγκατεστημένης να είναι μικρότερη του 90% [11].

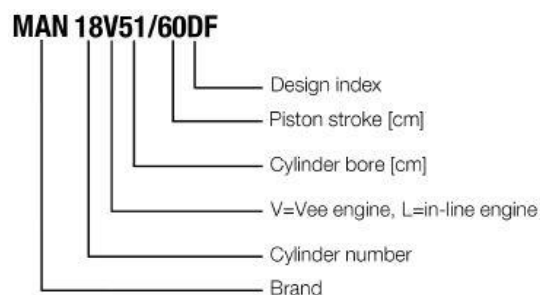
No.	Item	Unit	
1.1	Shaft power on propulsion motors Electrical transmission efficiency	P_B [kW]	10,000 0.91
1.2	Engine brake power for propulsion	P_{B1} [kW]	10,989
2.1	Electric power for ship (E-Load) Alternator efficiency	[kW]	1,000 0.965
2.2	Engine brake power for electric consumers	P_{B2} [kW]	1,036
2.3	Total engine brake power demand (= 1.2 + 2.2)	P_B [kW]	12,025
3.1	Diesel engine selection	Type	MAN 6L32/44CR
3.2	Rated power (MCR) running on MDO	[kW]	3,600
3.3	Number of engines	-	4
3.4	Total engine brake power installed	P_B [kW]	14,400
4.1	Loading of engines (= 2.3/3.4)	% of MCR	83.5
5.1	Check: Maximum permissible loading of engines	% of MCR	90.0

Πίνακας 4.3: Μεθοδολογία εκλογής μοντέλου και αριθμού μηχανών ανάλογα το φορτίο, MAN 2016

Εμείς εφόσον δεν έχουμε την απαίτηση των φορτίων αλλά το ποσοστό φόρτισης των μηχανών από τη μελέτη που επιλέξαμε θα τροποποιήσουμε τον πίνακα της MAN ως εξής :

Πίνακας 4.4: Τροποποιημένη μεθοδολογία εκλογής μοντέλου και αριθμού μηχανών ανάλογα το φορτίο, MAN 2016

ΦΟΡΤΙΑ	ΙΣΧΥΣ	ΣΥΝΤ.	ΙΣΧΥΣ
ΚΥΡΙΑΣ	14050	1,06	14893
ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ	9936	1	9936
ΣΥΝΟΛΙΚΑ			24829
GENSET			
ΙΣΧΥΣ	7350		
ΑΡΙΘΜΟΣ	4		
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	29400		
ΑΠΑΙΤΗΣΗ/ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ	0,845		

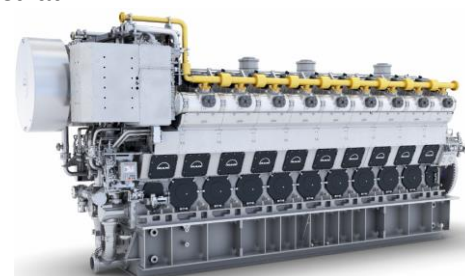


Εικόνα 4.8: Επεξήγηση ονομασίας μοντέλου, MAN 2016

Ως εκ τούτου τα χαρακτηριστικά της επιλεγόμενης μηχανής είναι:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ	Μ.Μ.
Αριθμός Κυλίνδρων	7	τεμ.
Ισχύς Κυλίνδρου	1050	KW
Διάμετρος κυλίνδρου	510	mm
Πιστονιού	600	mm
Όγκος πλήρωσης κυλίνδρου	122,5	mm

Πίνακας 4.5: Στοιχεία μηχανής 7L51/60DF, MAN 2016



Εικόνα 4.9: Φωτογραφία της μηχανής 7L51/60DF, MAN 2016

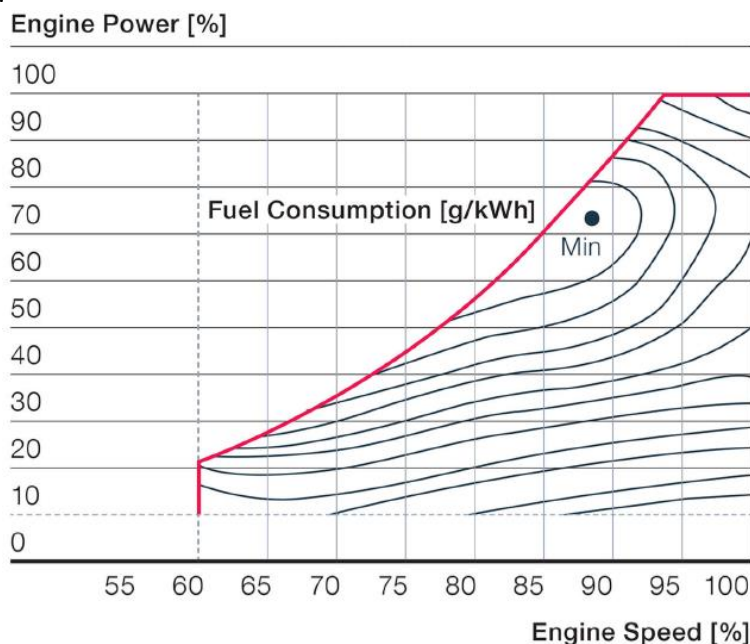
Θα επιλέξουμε βάσει των αποτελεσμάτων μια συστοιχία 4 GENSETS 7L51/60DF 7350KW συνολικής ονομαστικής ισχύος 29400KW.

Λειτουργία με καύσιμο MDO

Η MAN 41/60DF έχει τη δυνατότητα καύσεως MDO, MGO ακόμα και HFO με ιξώδες έως 700m²/s (cSt) στους 50 °C. Να σημειωθεί ότι έχει σχεδιαστεί για καύσιμα ποιότητας RMK700 σύμφωνα με το ISO8217 και RK700 σύμφωνα με CIMAC 2003. Όπως θα δούμε και εκτενέστερα παρακάτω η αποδοτικότητα της καύσης εξαρτάται:

- το φορτίο που πρέπει να εξυπηρετήσει η μηχανή
- τις στροφές της μηχανής
- τις συνθήκες εισόδου του καυσίμου στο θάλαμο καύσης
- περιβαλλοντικές συνθήκες

Υπάρχει ένα ελάχιστο κατανάλωσης πλησιέστερα στο οποίο μέσω των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου προσδοκούμε ανάλογα το εξυπηρετούμενο φορτίο να προσεγγίσουμε. Η κάθε μηχανή έχει το ελάχιστο σημείο κατανάλωσης σε διαφορετικό σημείο φορτίου ισχύος-στροφών όμως αυτό συνήθως βρίσκεται μεταξύ του 80-90% της ονομαστικής της ισχύος [11].



Διάγραμμα 4.8.: Καμπύλες ειδικής κατανάλωσης καυσίμου MAN 51/60DF, MAN 2016

Ο πίνακας που δίνει για την 51/60DF η MAN για την ειδική κατανάλωση πετρελαίου βάσει του απαιτούμενου φορτίου, χωρίς την ιδιοκατανάλωση της μηχανής σε αντλίες και κυκλοφορητές, είναι [11]:

Πίνακας 4.6: Ειδική κατανάλωση καυσίμου της 51/60DF σε σχέση με φορτίο στις 500rpm, MAN 2016

% Load		100	85	75	50	25
Spec. fuel oil consumption with HFO, MDO (DMB), MGO (DMA, DMZ) without attached pumps ^{1) 2) 3)}						
a) Main fuel	g/kWh	177.7	174.9	180.6	181.1	192.8
b) Pilot fuel	g/kWh	1.8	2.1	2.4	3.9	7.2
	kJ/kWh	77	90	102	167	307
c) Total = a + b ⁴⁾	g/kWh	179.5	177.0 ⁵⁾	183.0	185.0	200.0
	kJ/kWh	7,665	7,558	7,814	7,900	8,540

Οι παραπάνω τιμές δίνονται για τις παρακάτω περιβαλλοντικές συνθήκες και τη ποιότητα καυσίμου [11]:

Πίνακας 4.7: Τιμές αναφοράς περιβάλλοντος και ποιότητας καυσίμου για MDO, MAN 2016

Air temperature before turbocharger t_r	K/°C	298/25
Total barometric pressure p_r	kPa	100
Relative humidity ϕ_r	%	30
Exhaust gas back pressure after turbocharger ¹⁾	kPa	5
Engine type specific reference charge air temperature before cylinder $t_{bar}^{2)}$	K/°C	316/43
Temperature control of temperature turbine outlet by adjustable waste gate: Setpoint as minimum temperature for deactivated SCR	K/°C	563/290
Methane number	-	≥ 80
Liquid fuel, pilot fuel ³⁾ NCV	kJ/kg	42,700
¹⁾ Measured at 100 % load, accordingly lower for loads < 100 %. ²⁾ Regulated temperature for dual fuel and gas engines at engine loads ≥ 85 %. ³⁾ Only DMA or DMZ.		

Η ειδική κατανάλωση του πίνακα, όπως προαναφέραμε, δεν συμπεριλαμβάνει τη χρήση των αντλιών της μηχανής. Με τη προσθήκη των αντλιών η κατανάλωση (gr/KWh) αυξάνεται ποσοστιαία κατά [11]:

- Για τις αντλίες του GENSET:

$$1,02 * \left(\frac{100\%}{loads\%} \right) \% \quad (4.1)$$

- Για τους κυκλοφορητές ψύξης θεωρώντας πως λειτουργούν στις ονομαστικές τους στροφές:

$$0,19 * \left(\frac{100\%}{loads\%} \right) * \left(\frac{n_x}{n_n} \right)^3 \% - \text{υψηλών θερμοκρασιών ψυκτικό νερό} \quad (4.2)$$

$$0,27 * a * \left(\frac{100\%}{loads\%} \right) * \left(\frac{n_x}{n_n} \right)^3 \% - \text{χαμηλών θερμοκρασιών ψυκτικό νερό} \quad (4.3)$$

Όπου:

load: πραγματικό φορτίο (ποσοστό επί του ονομαστικού)

n_x : οι στροφές στις οποίες κινείται για να εξυπηρετήσει το πραγματικό φορτίο

n_n : οι ονομαστικές στροφές

a: παράγοντας που μεταβάλλεται μεταξύ 1-2 ανάλογα τη παροχή του νερού

Στην προσομοίωση που θ' ακολουθήσει οι τιμές αυτές συμπεριλαμβάνονται μιας και σ' αποτελέσματα που χρησιμοποιούμε εμπειρίχεται και αυτή η κατανάλωση.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι η πίεση και θερμοκρασία του αέρα και τη διαφοροποιούν σε σχέση με εκείνες της αναφοράς σύμφωνα με το παρακάτω συντελεστή [11]:

$$\beta = 1 + 0.0006 (t_x - t_r) + 0.0004 (t_{ba} - t_{bar}) + 0.07 (p_r - p_x) = 1.023 \quad (4.4)$$

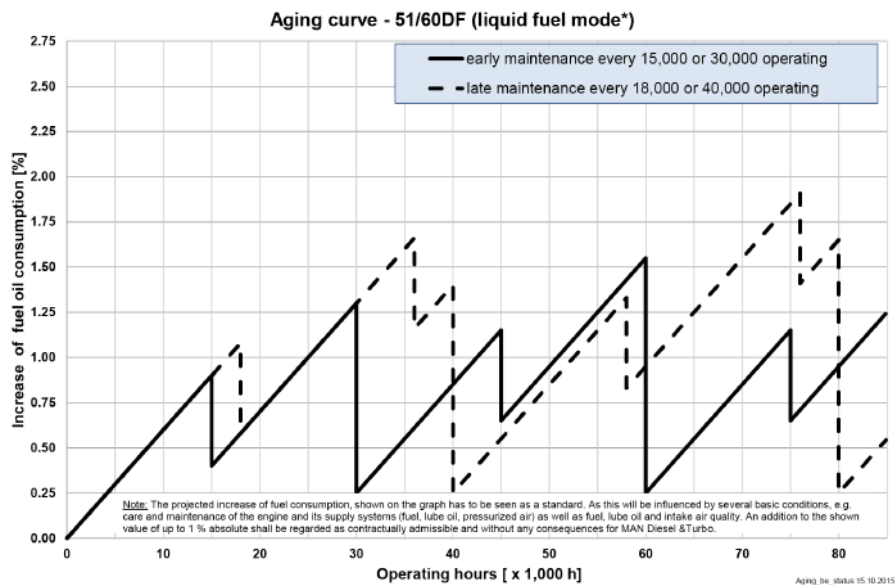
όπου:

- β : συντελεστής κατανάλωσης καυσίμου
- r: δείκτης για συνθήκες αναφοράς
- x: δείκτης για συνθήκες λειτουργίας
- t_{ba} : θερμοκρασία αέρα προ του κυλίνδρου σ
- p: πίεση αέρα
- t: θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος

συνεπώς η πραγματική κατανάλωση ισούται:

$$b_x = \beta * b_r \quad (4.5)$$

Η κατανάλωση του πετρελαίου θα αυξηθεί με την γήρανση της μηχανής δηλαδή με τις ώρες λειτουργίας που έχει καταγράψει. Το ποσοστό αυτής της αύξησης εξαρτάται από την συχνή ή μη συντήρηση της μηχανής όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί [11].



Διάγραμμα 4.9:Αύξηση της ειδικής κατανάλωσης βάσει των ωρών λειτουργίας και της συχνότητας συντηρήσεων της μηχανής MAN 51/60DF Project Guide – Marine 2016

Λειτουργία με καύσιμο LNG

Η αρχή λειτουργίας στην επιλογή διπλού καυσίμου στηρίζεται στην ιδέα lean-burn όπου το αέριο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης του κυλίνδρου αναμειγμένο με αέρα μέσω αυτόνομων ελεγχόμενων βαλβίδων. Για την ανάφλεξη του μείγματος απαιτείται επιπροσθέτως μία μικρή ποσότητα (της τάξεως του 1%) πιλοτικού, όπως ονομάζεται, καυσίμου. Για την συγκεκριμένη μηχανή το καύσιμο αυτό μπορεί να είναι είτε MDO είτε MGO. Ο ρόλος του είναι να βοηθήσει την καύση του LNG εντός του θαλάμου καύσης. Η ειδική κατανάλωση φυσικού αερίου και πιλοτικού καυσίμου είναι [11]:

Πίνακας 4.8:Ειδική κατανάλωση σε λειτουργία διπλού καυσίμου MAN 51/60DF Project Guide – Marine

1,050 kW/cyl., 500 rpm or 1,050 kW/cyl., 514 rpm

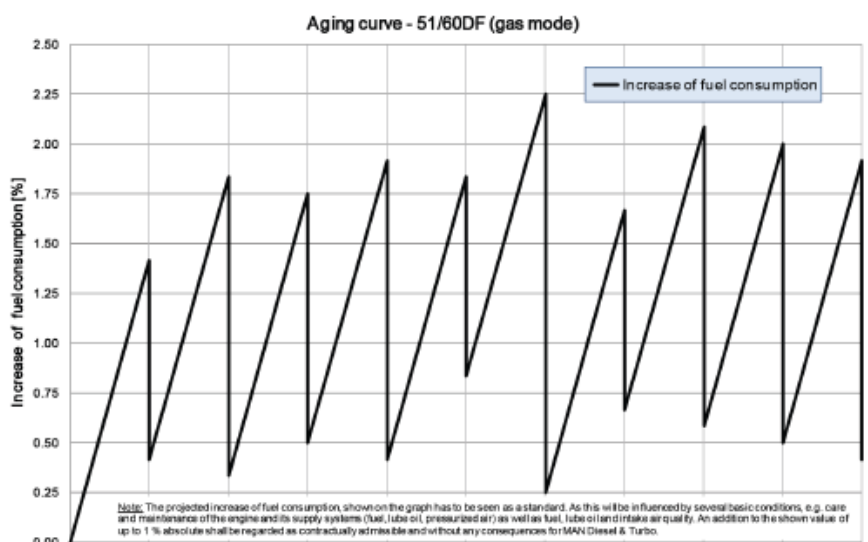
% Load		100	85	75	50	25
Spec. fuel consumption in gas mode without attached pumps^{(1) (2) (3)}						
a) Natural gas	kJ/kWh	7,109	7,106	7,219	7,641	8,505
b) Pilot fuel	g/kWh	1.9	2.2	2.6	4.2	11.6
	kJ/kWh	81	94	111	179	495
c) Total = a + b ⁽⁴⁾	kJ/kWh	7,190	7,200 ⁽⁵⁾	7,330	7,820	9,000

Οι παραπάνω τιμές δίνονται για τις παρακάτω περιβαλλοντικές συνθήκες και τη ποιότητα καυσίμου [11]:

Natural gas		
Permitted temperature range	°C	+5 °C ¹⁾ up to 50 °C before GVU and +0 °C ¹⁾ up to 50 °C before engine
Calorific value (LHV)	kJ/Nm ³	≥ 28,000
Methan number (for nominal engine output)	-	≥ 80
Gas supply at inlet engine		
Minimum gas pressure at inlet engine	bar	tbd.
Maximum allowable fluctuaction at inlet engine	bar/s	± 0.2
Maximum gas pressure at inlet engine (SAFETY-issue!)	bar	6.5
Gas supply at inlet GVU		
Maximum admissible supply gas pressure at inlet GVU	bar	tbd.
Minimum supply gas pressure at inlet GVU (recommended)	bar	tbd. ²⁾
Minimum supply gas pressure at inlet GVU with pre-filter at engine (recommended)	bar	tbd. ²⁾³⁾
¹⁾ The temperature- and pressure-dependent dew point of natural gas must always be exceeded to prevent condensation. ²⁾ Considering: LHV 28.0 MJ/Nm ³ , pressure losses and reserve for governing purposes. ³⁾ Pre-filter before engine is required if gas line between GVU and engine is not made of stainless steel (contrary to the requirements in section Specification of materials for piping, Page 315).		

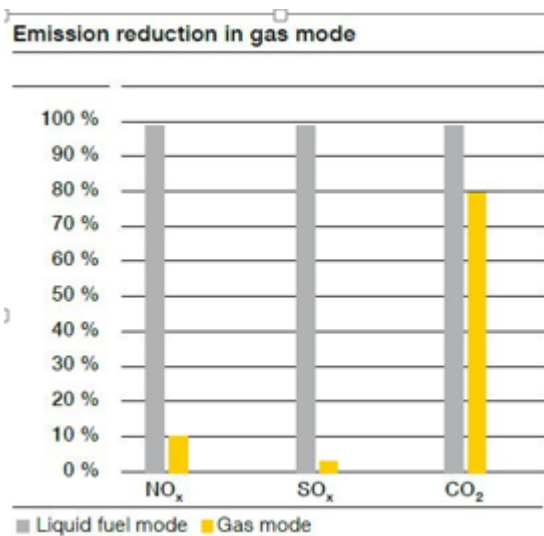
Πίνακας 4.8: Τιμές αναφοράς περιβάλλοντος και ποιότητας καυσίμου για διπλό καύσιμο, MAN 2016

Όπως και στη λειτουργία σε υγρό καύσιμο επίδραση των ωρών λειτουργίας στην κατανάλωση του καυσίμου σε λειτουργία διπλού καυσίμου όμως όπως διαπιστώνουμε από το παρακάτω διάγραμμα είναι ελαφρώς δισμενέστερη ποσοστιαία απ’ ότι εκείνη με πετρέλαιο [11].



Διάγραμμα 4.10: Αύξηση της ειδικής κατανάλωσης σε λειτουργία διπλού καυσίμου 0.1 MAN 51/60DF Project Guide – Marine

Οι εκπομπές NO_x της 51/60DF με καύση φυσικού αερίου ,ανάλογα πάντα τη ποιότητα του, είναι περίπου 90% λιγότερες σε σύγκριση με το υγρό καύσιμο ενώ οι εκπομπές CO₂ είναι αντιστοίχως 20% λιγότερες.Οι εκπομπές SO_x είναι σχεδόν μηδενικές και εξαρτώνται από το πιλοτικό καύσιμο. Είναι λοιπόν προφανές πως η λειτουργία της 51/60DF με φυσικό αέριο είναι σαφέστατα περιβαλλοντικά οφελιμότερη. Οι εκπομπές της είναι σαφώς λιγότερες των ορίων που έχουν θεσπιστεί. Σε λειτουργία καύσης αερίου ήδη πληρούνται οι απαιτήσεις της IMO Tier III NO_x για εκπομπές στις περιοχές ECAs. Ενώ για καύση βαρέως πετρελαίου ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της Tier II [11].



Διάγραμμα 4.11: Αέριες εκπομπές για MDO και διπλό καύσιμο στη 51/60DF,MAN 2016

4.4.1.2 Επιλογή Εναλλακτήρα και Διανομέα Ισχύος

Η επιλογή του συνόλου των ηλεκτρικών στοιχείων βασίζεται στις παρακάτω βασικές αρχές [11]:

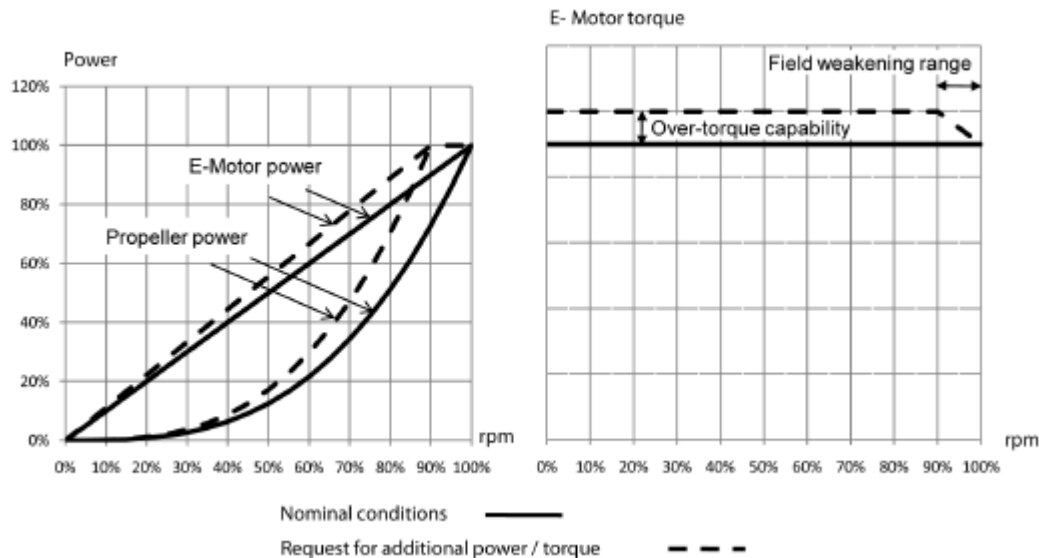
- Το switchboard το οποίο είναι διαιρεμένο σε συμμετρικά τμήματα ώστε είναι αξιόπιστο
- Ένας ζυγός αριθμός GenSets εξασφαλίζει τη συμμετρική κατανομή φορτίων στο bus
- Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις θα πρέπει να είναι συμμετρικές στο bus
- Τα switchboard σχεδιάζονται βάσει του επιπέδου βραχυκυκλώματος που μπορούν να αντέξουν και της ικανότητας του διακοπτικού υλικού του κυκλώματος.
- Η τάση λειτουργίας του εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων. Συνήθως ακολουθούνται οι προτάσεις του παρακάτω πίνακα και της εγκατεστημένης ισχύος επιλέγουμε:
Τάση Λειτουργίας 6600 V (για εγκατεστημένη ισχύ 29,4 MW) βάσει του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.9:Επιλογή τάσης λειτουργίας , MAN 51/60DF Project Guide – Marine 2016

Συνολική εγκατεστημένη ισχύς εναλλακτών	Τάση Λειτουργίας [V]	Μέγιστο Ρεύμα [kA]
<10-12 MW & μοτέρ <3,5MW	440	100
<13-15 MW & μοτέρ <4,5MW	690	100
< 48 MW	6600	50
<130 MW	11000	30

4.4.1.3 Επιλογή ηλεκτροκινητήρων

Στα συστήματα ηλεκτροπρόωσης που λειτουργούν που συνήθως χρησιμοποιούνται έλικες σταθερού βήματος η διαστασιολόγηση θα πρέπει να γίνει με προσοχή προκειμένου να υπάρχει επαρκής ισχύς πρόωσης. Για τη διαστασιολόγηση θα πρέπει να γίνει ένας προσεκτικός υπολογισμός της απαιτούμενης ροπής του κινητήρα, που καθορίζει το βάρος, την απαίτηση χώρου και το κόστος του.



Διάγραμμα 4.12: Ισχύς και παραγόμενη ροπή ηλεκτροκινητήρα σε σχέση με τον αριθμό στροφών του, ABB 2014

Θα επιλέξουμε ένα σύγχρονο κινητήρα που είναι και ο πλέον διαδεδομένος γι' αυτές τις εφαρμογές. Η ταχύτητα περιστροφής ενός τέτοιου κινητήρα είναι [1]:

$$n_s = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{\text{αριθμός πόλων}}, \text{ όπου } f: \text{η συχνότητα} \quad (4.6)$$

Η ισχύς η οποία δίνεται από τον ηλεκτροκινητήρα στο φορτίο είναι [1]:

$$P_{out}[KW] = \frac{T[Nm] \cdot n[rpm]}{9550} \quad (4.7)$$

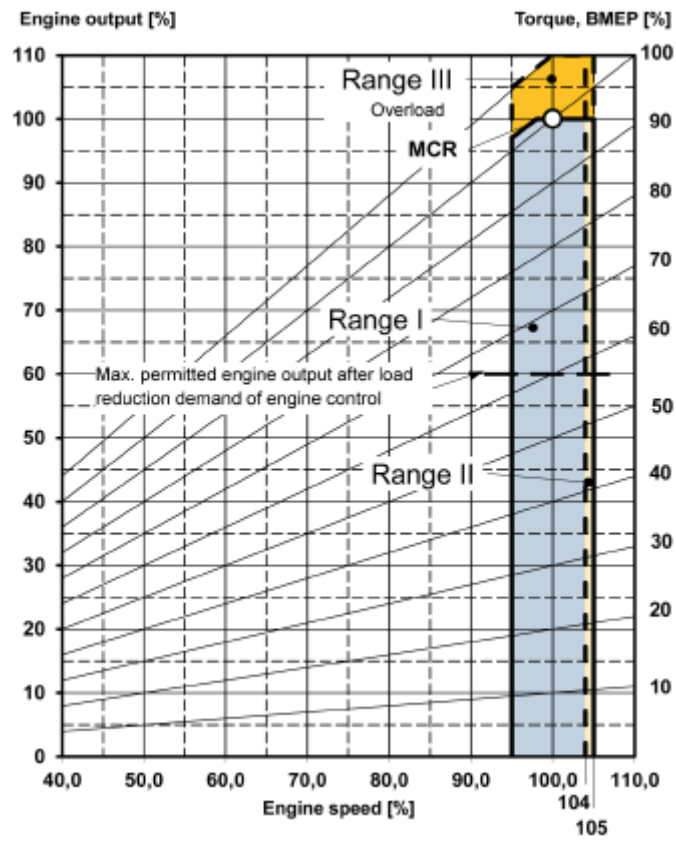
ενώ η ισχύς που απορροφάται για από τον ηλεκτροκινητήρα για την εξυπηρέτηση του φορτίου είναι [1]:

$$P_{in}[KW] = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (4.8)$$

Το ηλίκο των ανωτέρω καθορίζει και το βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα [1]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.9)$$

Η ισχύς του κινητήρα θα πρέπει να είναι όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπερδιαστασιολογημένη κατά 10-20% από την ισχύ που έχει υπολογιστεί πως απαιτείται από την έλικα βάσει των δοκιμών που έχουν γίνει σε ήρεμο νερό [11].



Διάγραμμα 4.13: Λειτουργία της έλικας, MAN 2016

4.5 Κυψέλες καυσίμου

Η επιλογή των κυψελών καυσίμου ,που για τις απαιτήσεις που επιβάλλει το θαλάσσιο περιβάλλον θα είναι τύπου PEM, θα γίνει με γνώμονα την υψηλή αξιοπιστία , την ισχύ, την μικρή απαίτηση όγκου και την μεγάλη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας. Με βάση όλων παραπάνω θα επιλέγει το μοντέλο κυψέλης καυσίμου SiNavy της εταιρίας Siemens.

Επιπροσθέτως των βασικών απαιτήσεων τις οποίες καλύπτουν προσφέρουν τα κάτωθι πλεονεκτήματα [30]:

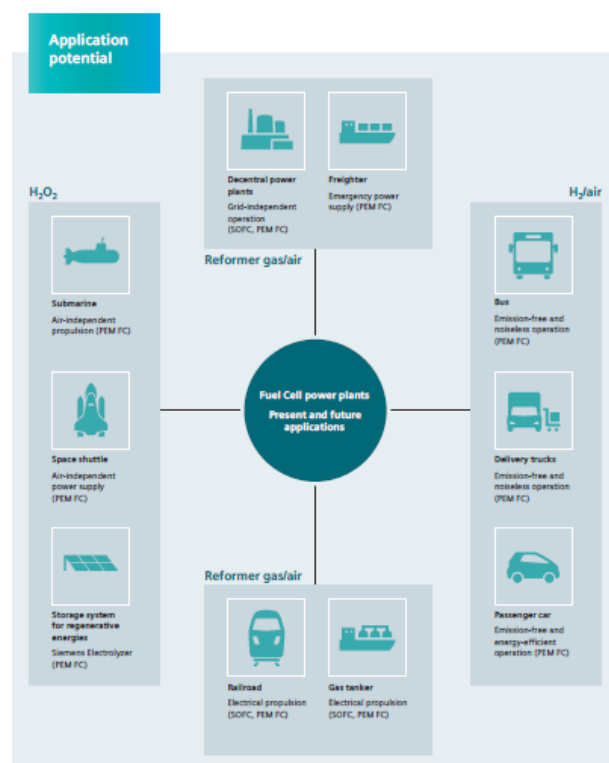
1. Γρήγορη ανταπόκριση σε εκκίνηση και τερματισμό λειτουργίας
2. Μεγάλη διάρκεια ζωής
3. Πτώση τάσης μικρότερη από 2mV/h
4. Δυνατότητα υπερφόρτισης
5. Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (80°C)
6. Απουσία υγρού διαβρωτικού ηλεκτρολύτη

Ο τύπος αυτός είναι διαθέσιμος σε δύο μοντέλα σε λειτουργία με καθαρό οξυγόνο:

- 34FCM ισχύος 34KW
- 120FCM ισχύος 120KW



Εικόνα4.10: Εγκατάσταση FCM34, Siemens 2015



Εικόνα 4.11:Εφαρμογές των SINAVAL PEM Fuel Cells, Siemens 2015

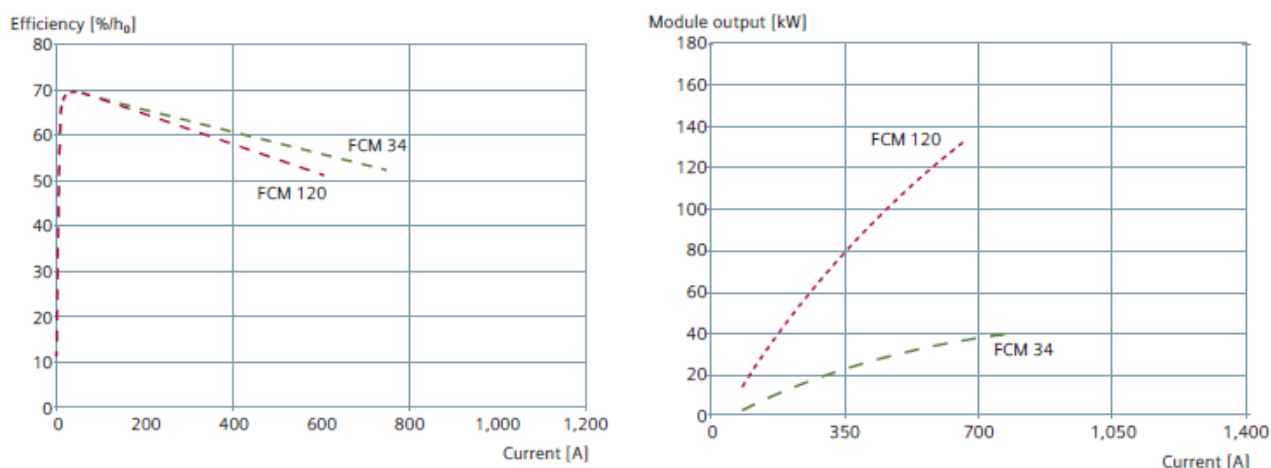
Το μοντέλο αυτό των κυψελών καυσίμου είναι συμβατό για ένα πλήθος εφαρμογών μεταξύ αυτών και για εφαρμογές σε πλοία όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων αυτών είναι [30]:

Technical data	FCM 34	FCM 120
Rated power	approx. 34 kW	approx. 120 kW
Voltage range	approx. 54 VDC	approx. 215 VDC
Efficiency at rated load	> 58%	> 53%
Efficiency at 20% load	approx. 71%	approx. 68%
Operating temperature	70–75° C	approx. 70° C
H ₂ pressure	2.3 bar abs.	2.4 bar abs.
O ₂ pressure	2.6 bar abs.	2.7 bar abs.
Dimensions	H = 47 cm W = 47 cm L = 143 cm	H = 50 cm W = 53 cm L = 176 cm
Weight (without module electronics)	630 kg	930 kg

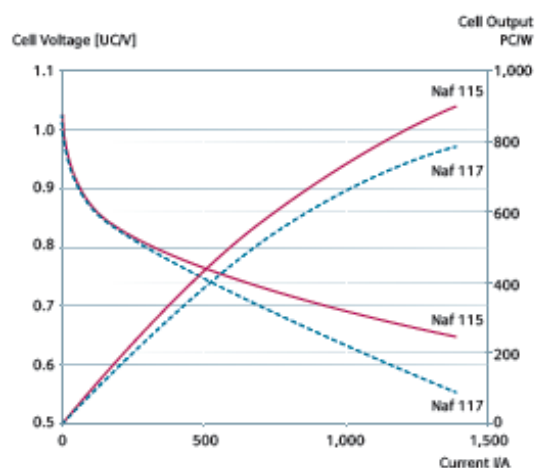
Πίνακας 4.10:Τεχνικά χαρακτηριστικά FCM, Siemens 2015

Ενώ οι καμπύλες ισχύος-ρεύματος και απόδοσης ρεύματος είναι [30]:



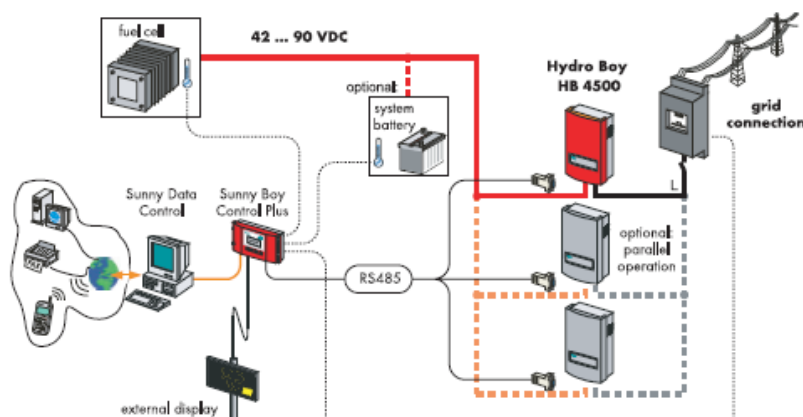
Διάγραμμα 4.14 :Βαθμός απόδοσης (αριστερά) και παραγόμενης ισχύος (δεξιά) σε συνάρτηση με το απορροφούμενο από το φορτίο ρεύμα ,Siemens 2015

Η λειτουργία της FCM είναι με αντιδρών του Η₂ καθαρό οξυγόνο Ο₂ και η θεωρητική τάση ανοιχτοκυκλώματος είναι 1,48 Volt . Ενώ η τάση του σε συνάρτηση με παραγόμενο ρεύμα δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα [30].



Διάγραμμα 4.15:Τάση στοιχείου κυψέλης σε συνάρτηση με το παραγόμενο ρεύμα ,Siemens 2015

Για τη μετατροπή της ενέργειας σε εναλλασσόμενη θα χρησιμοποιηθούν inverters της εταιρίας SMA [31]:



Εικόνα 4.12: Διάταξη inverters για κυψέλες καυσίμου, SMA 2017

4.6 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση

Η επιλογή των φωτοβολταϊκών πανελ θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να έχουμε τη μέγιστη απόδοση ανά εμβαδόν δεδομένου ότι έχουμε περιορισμένη διάθεση χώρου που μπορεί να αξιοποιηθεί για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστοιχιών.

Με δεδομένο αυτό θα επιλεγθούν φωτοβολταϊκά πάνελ της εταιρίας Sunpower. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια Sunpower είναι τα αποδοτικότερα στο εμπόριο παγκοσμίως. Τα φωτοβολταϊκά αυτά πλαίσια έχουν βαθμό απόδοσης άνω του 21% τη στιγμή που ένα μέσο φωτοβολταϊκό πάνελ του εμπορίου κυμαίνεται στο 16% .



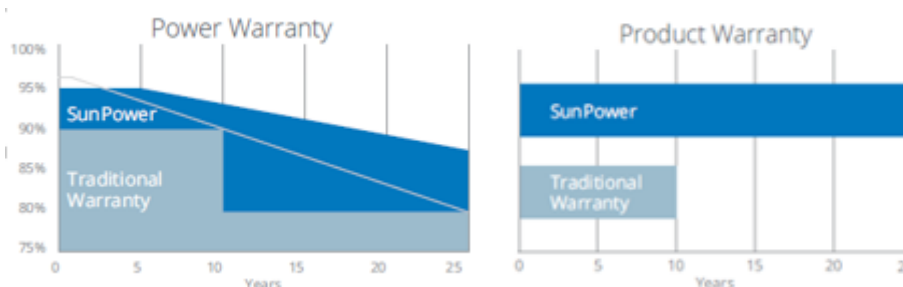
Το μοντέλο που θα επιλέγει για τη προσομοίωση θα είναι το : SPR-X21-345 [32].

Εικόνα 4.13: Φ.β. πλαίσιο SPR-X21-345

Πίνακας 4.11: Τεχνικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών πλαισίων SPR-X21 της Sunpower

Electrical Data		
	SPR-X21-335-BLK	SPR-X21-345
Nominal Power (P _{nom}) ¹¹	335 W	345 W
Power Tolerance	+5/-0%	+5/-0%
Avg. Panel Efficiency ¹²	21.0%	21.5%
Rated Voltage (V _{mpp})	57.3 V	57.3 V
Rated Current (I _{mpp})	5.85 A	6.02 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	67.9 V	68.2 V
Short-Circuit Current (I _{sc})	6.23 A	6.39 A
Max. System Voltage	600 V UL & 1000 V IEC	
Maximum Series Fuse	15 A	
Power Temp Coef.	-0.29% / °C	
Voltage Temp Coef.	-167.4 mV / °C	
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C	

Ένα σημαντικό επιπρόσθετο πλεονέκτημα των SPR-X21-345 είναι ότι η εγγύηση τους καλύπτει όλο το χρόνο ζωής ενός πλοίου. Έτσι στην οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης δεν θα πρέπει να υπολογίζονται τυχόν φθορές [32].



Διάγραμμα 4.16: Εγγυημένη ισχύς και αντοχής προϊόντος των φωτοβολταϊκών πλαισίων SPR-X21 της Sunpower, www.sunpower.com

Υποθέτουμε πως οι θέσεις των φωτοβολταϊκών πάνελ δε μπορούν να είναι συγκεντρωμένες στο πλοίο αλλά διάσπαρτα σε επιφάνειες που είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμες. Για λόγους απλοποίησης της κατασκευής αλλά και αξιοπιστίας ένας αριθμός πανελς θα συνδέεται σε

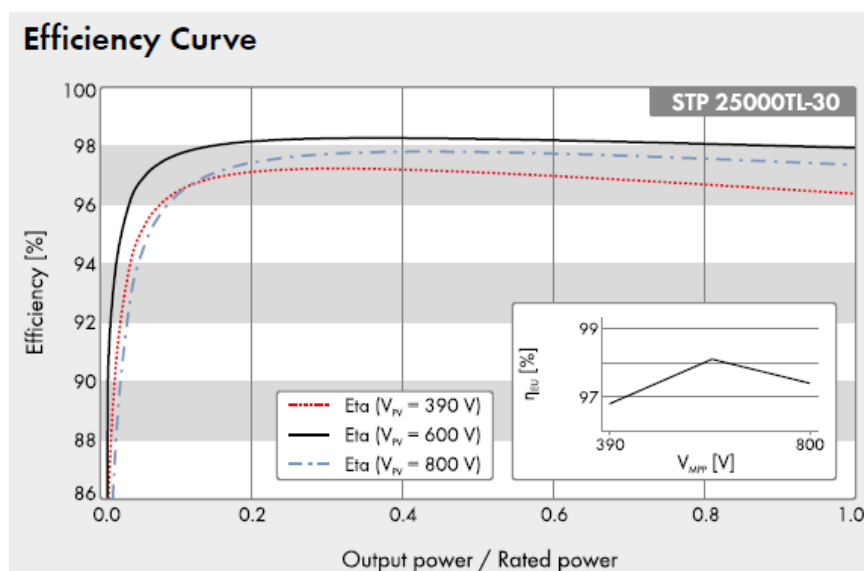
έναν inverter και από εκεί το εναλλασσόμενο πλέον ρεύμα θα εξυπηρετεί ξενοδοχειακά φορτία.

Οι inverter που θα επιλεγούν θα είναι της εταιρίας SMA μία εκ των μεγαλύτερων στο κλάδο. Όπως βλέπουμε ο βαθμός απόδοσης των inverter αυτών είναι εξαιρετικά υψηλός φτάνοντας το 98,4% και διατηρεί υψηλές τιμές για ένα μεγάλο εύρος ισχύος [31].

Πίνακας 4.12:Τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων 20000TL & 25000TL της εταιρίας SMA, SMA 2015

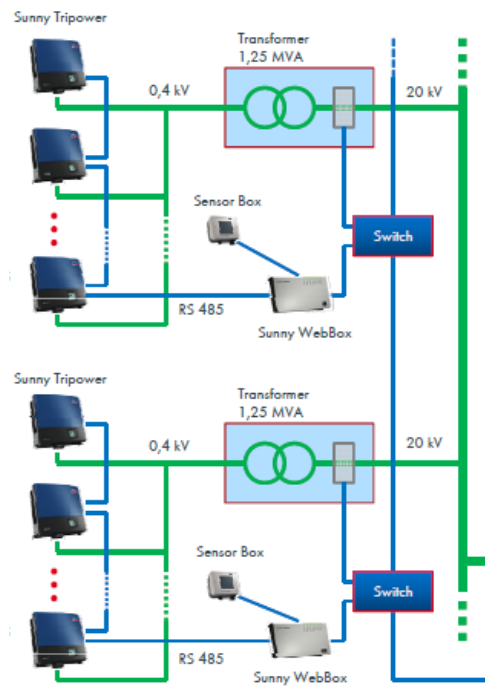
Technical Data	Sunny Tripower 20000TL	Sunny Tripower 25000TL
Input (DC)		
Max. generator power	36000 W _p	45000 W _p
DC rated power	20440 W	25550 W
Max. input voltage	1000 V	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	320 V to 800 V / 600 V	390 V to 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 33 A	33 A / 33 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:3; B:3	2 / A:3; B:3
Output (AC)		
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	20000 W	25000 W
Max. AC apparent power	20000 VA	25000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE; 230 V / 400 V	
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz	
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V	
Max. output current / Rated output current	29 A / 29 A	36.2 A / 36.2 A
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0 overexcited to 0 underexcited	
THD	≤ 3%	
Feed-in phases / connection phases	3 / 3	
Efficiency		
Max. efficiency / European Efficiency	98.4% / 98.0%	98.3% / 98.1%

Η απόδοση της μετατροπής του ρεύματος σε εναλλασσόμενο αποτελεί συνάρτηση της εισερχόμενης ισχύος και της τάσεως λειτουργίας. Η καμπύλη ισχύος του επιλεγμένου inverter παρουσιάζεται παρακάτω [31]:



Διάγραμμα 4.17:Καμπύλη βαθμού απόδοσης βάσει ισχύος SMA 250000TL-30,SMA 2015

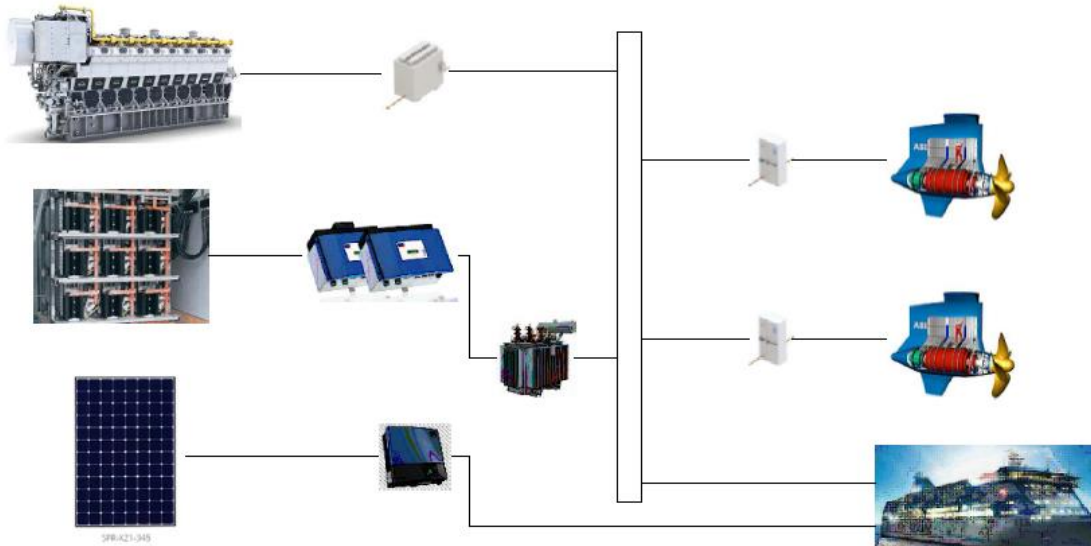
Τυπική διάταξη μιας συστοιχία τέτοιας εγκατάστασης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.14:: Σύνολο συστημάτων παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκή συστοιχία και μετατροπή της σε εναλλασόμενη, SMA 2015

Διάταξη

Συνοψίζοντας το σύνολο της ηλεκτρομηχανολογικής εγκατάστασης μας έχουμε το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.12: Συνολική διάταξης της ηλεκτρομηχανολογική εγκατάστασης βάσει των επιλογών έχουν γίνει

5. Πρόγραμμα Δυναμικής Προσομοίωσης TRNSYS

Όπως γίνεται κατανοητό από την περιγραφή παραπάνω η λειτουργία των διάφορων στοιχείων που συνθέτουν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου σε συσχέτιση με τα απαιτούμενα φορτία δημιουργεί μια σχέση που είναι άκρως δυναμική. Η κατανάλωση ισχύος των GenSet μεταβάλλεται με την απαίτηση ισχύος, η κατανάλωση υδρογόνου στις κυψέλες καυσίμου εξαρτάται από την απαιτούμενη ισχύ και μια σειρά περιβαλλοντικών παραγόντων ενώ η παραγωγή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας εξαρτάται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και τη θερμοκρασία των πανελς. Συνεπώς η αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπεμπόμενων ρύπων μπορεί να γίνει μόνο μέσω δυναμικών προγραμμάτων.

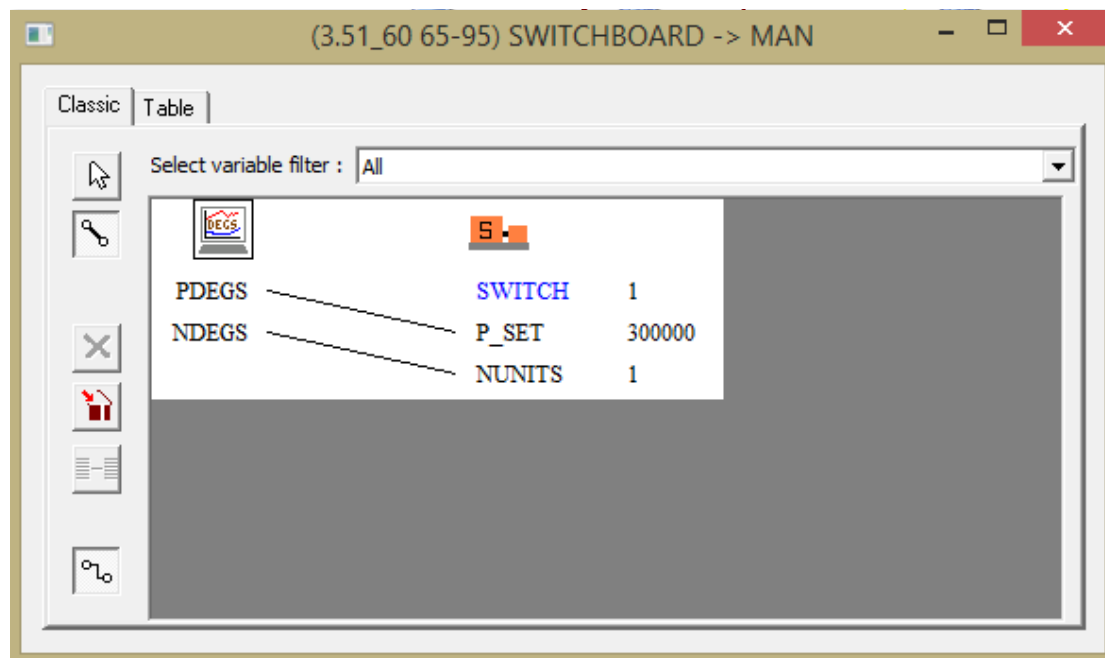
Το TRNSYS αποτελεί ένα πλήρες υπολογιστικό περιβάλλον για την δυναμική προσομοίωση χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων που δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο του Wisconsin.

Το κύριο περιβάλλον γραφικών του TRNSYS είναι το στούντιο προσομοίωσης, όπου και δημιουργούνται οι διάφορες διατάξεις, μεταφέροντας και τοποθετώντας τα στοιχεία στο χώρο εργασίας, συνδέοντας τα και θέτοντας τις γενικές παραμέτρους της προσομοίωσης.

Όπου «στοιχείο» νοείται κάθε ξεχωριστή ρουτίνα που επιλέγουμε για τη προσομοίωση μας π.χ. (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κυψέλες καυσίμου κλπ). Σε κάθε τέτοιο στοιχείο δίνουμε τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά-parameters του. Έπειτα συνδέουμε τις απαραίτητες πληροφορίες εισόδου-inputs που απαιτούνται ώστε να μας δώσει τα αποτελέσματα-outputs. Στη συνέχεια υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης των αποτελεσμάτων όπως επίσης και το να συνδεθούν ως inputs για κάποιο άλλο στοιχείο.



Εικόνα 5.1: Λογότυπο TRNSYS 18



Εικόνα 5.2: Σύνδεση στο πρόγραμμα TRNSYS switchboard-MAN 51/60DF

Στόχος της προσομοίωσης είναι να υπολογιστεί η δυναμική απόκριση των στοιχείων που παράγουν την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ισχύ του εξεταζόμενου πλοίου σε όλη τη διάρκεια του έτους. Θα εστιαστούμε κυρίως στην κατανάλωση καυσίμου (diesel και lng για τα GENSETS και υδρογόνο για τις κυψέλες

καυσίμου) και στις εκπομπές ρύπων για διάφορους συνδυασμούς και χειρισμούς των στοιχείων της προσομοίωσης. Τέλος θα γίνει προσομοίωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φ.β. συστοιχία που θα θεωρηθεί ως εγκατεστημένη επί του πλοίου.

5.1 Μαθηματική τυποποίηση Στοιχείων της Προσομοίωσης

Τα κυριότερα στοιχεία καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που τα διέπουν και θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να γίνει η δυναμική προσομοίωση ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου περιγράφονται παρακάτω [18].

5.1.1 Switchboard-Degs Dispatch controller (Type 102)

Το μοντέλο Type102 προσομοιάζει το switchboard δηλαδή υπολογίζει τον αριθμό των GENSETS τα οποία λειτουργούν βάσει του απαιτούμενου φορτίου. Το μοντέλο συγκρίνει βάσει των τιμών που έχουμε επιλέξει και βάσει του επιθυμητού εύρους λειτουργίας των GenSets και ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί το εκάστοτε i GenSet ανάλογα το φορτίο που απαιτείται.

- $P_{up,i} = i P_{DEGS,max} * X_{Low}$ (5.1)

- $P_{down,i} = i P_{DEGS,max} * X_{Up}$ (5.2)

Έναρξη του 1^{ου} GenSet:

- Όταν $P_{Load} > 0$ τότε γίνεται εκκίνηση του GENSET 1

Έναρξη των υπολοίπων GENSETS(2^{ου}, 3^{ου}....):

- Όταν το i ήταν κλειστό και $P_{Load} > P_{up,i}$ τότε γίνεται εκκίνηση του i του GENSET
 - Όταν το i είναι σε λειτουργία και $P_{Load} > P_{down,i}$ τότε γίνεται τερματισμός της λειτουργίας του i του GENSET
- $$N_{DEGS,min} \leq N_{DEGS} \leq N_{DEGS,max}$$

Η ισχύς που απαιτείται ισοκατανέμεται στα ενεργά GENSETS έτσι η ισχύς του κάθε ενός ισούται με:

- $P_{DEGS,set} = P_{Load} / N_{DEGS}$ (5.3)

5.1.2 GenSet - Diesel Engine Generator Set (Type 120)

Το μοντέλο χρησιμοποιεί για τη προσομοίωση της κατανάλωσης στη μηχανή πρωτοβάθμια σχέση με μεταβλητή το ποσοστό ισχύος της μηχανής σε σχέση με την ονομαστική:

- $V = a + b * X$ (5.4)

Όπου: $X = \frac{P}{P_{rated}}$ (5.5) (το πηλίκο της ζητούμενης προς την ονομαστική ισχύ του κάθε GenSet) και a, b : συντελεστές βάσει της ειδικής κατανάλωση σε διαφοράς φορτία που μας δίνει η κατασκευάστρια εταιρία στους Πίνακες 4.6 και 4.8

Το πρόγραμμα λαμβάνει τις τιμές των a και b καθώς και την ονομαστική ισχύ μέσω ενός αρχείου data ακολουθώντας την κάτωθι μορφή

<Nb of DEGS>

<No of the DEGS>, <Name of DEGS>

<Rated power> <coefficient a [l/h]> <coefficient b [l/h]>

Η συνολική παραγόμενη ισχύς της συστοιχίας των GENSETS είναι:

- $P_{total} = N_{DEGS} * P_{DEGS}$ (5.6)

Όπου: N_{DEGS} :ο αριθμός των ενεργών GENSETS

Ως εκ τούτου η συνολική κατανάλωση καυσίμου ισούται:

- $V_{total} = N_{DEGS} * V$ (5.7)

5.1.3 Διαφορικός Ελεγκτής (Type 2d)

Το μοντέλο αυτό αποτελεί έναν controller ο οποίος δίνει σαν αποτέλεσμα τις τιμές 1 και 0 ανάλογα το εύρος τιμών που του έχουμε καθορίσει και βάσει του προηγούμενου αποτελέσματος του. Το χρησιμοποιούμε κατά την προσομοίωση ώστε να διαχωρίσουμε τα φορτία που θα εξυπηρετήσουν οι κυψέλες καυσίμου αφαιρώντας τα από τα συνολικά που θα καλύψουν τα GenSets.

Εάν την αμέσως προηγούμενη ώρα προσομοίωσης το μοντέλο έδινε σήμα ελέγχου 1 τότε:

- εάν $\gamma_i = 1$ και $\Delta TL \leq (TH - TL)$, $\gamma_o = 1$ (5.8)

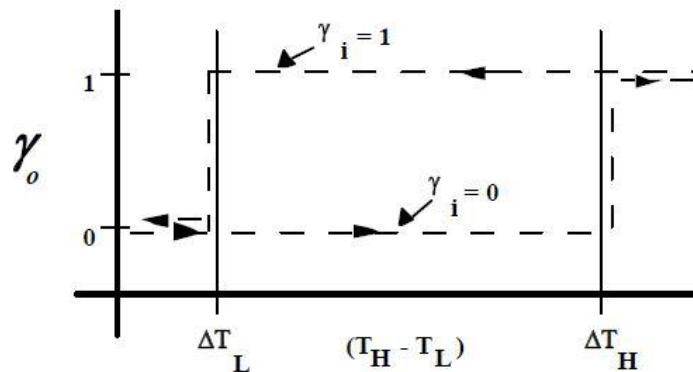
- εάν $\gamma_i = 1$ και $\Delta TL > (TH - TL)$, $\gamma_o = 0$ (5.9)

Εάν την αμέσως προηγούμενη ώρα προσομοίωσης το μοντέλο έδινε σήμα ελέγχου 0 τότε:

- εάν $\gamma_i = 0$ και $\Delta TH \leq (TH - TL)$, $\gamma_o = 1$ (5.10)

- εάν $\gamma_i = 0$ και $\Delta TH > (TH - TL)$, $\gamma_o = 0$ (5.11)

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται τ' αποτελέσματα που δίνει ο διαφορικός εκλεκτής βάσει των διαστημάτων που έχουμε δώσει και σε συσχέτιση με την τιμή εισόδου την οποία δέχεται.



Διάγραμμα 5.1:Λειτουργία Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου, TRNSYS 2011

5.1.4 Ολοκληρωτής (Type 24)

Μέσω αυτού του στοιχείου ολοκληρώνουμε στο χρόνο την εκάστοτε τιμή που επιθυμούμε για το χρονικό διάστημα σε ώρες της προσομοίωσης.

$$Y_i = \int_{\text{time}} X_i dt \quad (5.12)$$

Inverter/Converter

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες και οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή συνεχούς ρεύματος και για την μετατροπή του σε εναλλασσόμενο χρησιμοποιούνται συσκευές οι οποίες μετατρέπουν το εισερχόμενο σταθερό ρεύμα σε εξερχόμενο εναλλασσόμενο. Οι συσκευές αυτές ονομάζονται inverters. Αναπόφευκτα όπως σε όλες τις μετατροπές έχουμε απώλεια ενέργειας. Ενδεχομένως όμως πριν γίνει αυτή η μετατροπή να απαιτείται η τάση αυτή της εξόδου από τα στοιχεία αυτά να πάρει άλλη τιμή. Οι converters είναι συσκευές οι οποίες αλλάζουν την τάση εξόδου σταθερού ρεύματος από εκείνη

της εισόδου αυξάνοντας ή μειώνοντας την ανάλογα τη περίπτωση. Στο μοντέλο αυτό μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη είτε η ισχύς εισόδου είτε η ισχύς εξόδου.

- $P_{in} - P_{out} = P_0 + (U_s / U_{out}) * P_{out} + (R_{ipn} / U_{out}^2) * P_{out}^2$ (5.13)
όπου: P_{in} η ισχύς εισόδου στη συσκευή, P_{out} η ισχύς εξόδου, P_0 ισχύς κατανάλωσης σε κατάσταση αναμονής, U_s η επιθυμητή τάση εξόδου, U_{out} η τάση εξόδου, R_{ipn} η εσωτερική αντίσταση της συσκευής

Ο βαθμός απόδοσης τους ισούται:

- $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ (5.14)

Για το ρεύμα ισχύει ότι:

- $I = \frac{P}{U}$ (5.15)

5.1.6 Κυψέλες PEM (Type 170)

Το μοντέλο των κυψελών καυσίμου χρησιμοποιεί τις σχέσεις που αναφέραμε για την τάση κυψέλης και στήλης στο κεφάλαιο 3.

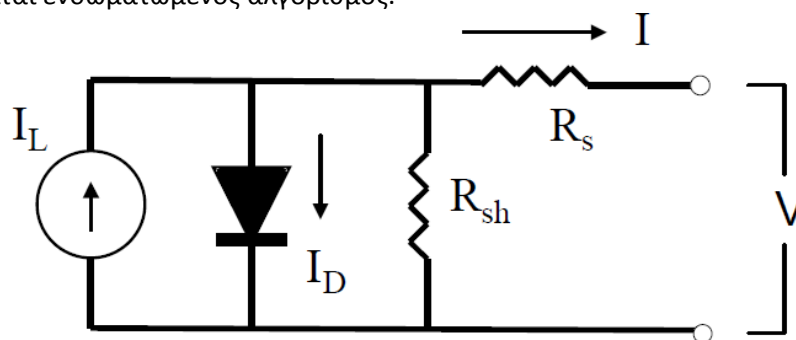
Το μοντέλο κάνει ακόμα υπολογισμούς για την θερμοδυναμική λειτουργία των κυψελών καυσίμου και για την πίεση των αντιδρώντων στην είσοδο που όμως εμείς θα τις θεωρήσουμε στη προσομοίωση μας ως σταθερές.

5.1.7 Data Reader

Μέσω αυτού του μοντέλου εισάγονται στη προσομοίωση δεδομένα που είναι αποθηκευμένα σε άλλο αρχείο σε μορφή .txt και των οποίων η ανάγνωση γίνεται σειριακά σε κανονικά χρονικά διάστημα μίας ώρας.

5.1.8 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία (Type180)

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να μαθηματικοποιηθεί σαν ένα ισοδύναμο κύκλωμα μίας διόδου, ονομαζόμενο και ως μοντέλο 5 παραμέτρων, όπως βλέπουμε στην εικόνα. Οι μη γραμμικές εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία κάθε κύτταρου του φωτοβολταϊκού μέσω την μεθόδου Newton-Raphson και για δεδομένη τάση το μοντέλο υπολογίζει το ρεύμα. Για την εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT) χρησιμοποιείται ενσωματωμένος αλγόριθμος.



Εικόνα 5.3: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα με φωτοβολταϊκό πάνελ, TRNSYS 2011

Η εξίσωση Ρεύματος-Τάσεως του κυκλώματος παραπάνω είναι:

- $I_{cell} = I_L - I_D - I_{sh}$ (5.16)

όπου:

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,ref}} * (I_{L,ref} + \mu_{isc} * (T_{cell} - T_{cell,ref})) \quad (5.17)$$

$$I_{sh} = \frac{U_{cell} + I_{cell} * R_S}{R_{sh}} \quad (5.18)$$

$$I_D = I_0 * [\exp * (\frac{U_{cell} + I_{cell} * R_S}{a}) - 1] \quad (5.19)$$

όπου: I_0 το ρεύμα κορεσμού της διόδου, I_L ρεύμα παραγωγής του φ.β. module του πάνελ, I_{cell} ρεύμα του ισοδύναμου κυκλώματος, μ_{isc} ο θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκυκλώσεως, G_T ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στην φ.β. συστοιχία

Η τάση ανοιχτοκυκλώματος:

- $U_{oc} = a * \ln[\frac{I_L}{I_0}] \quad (5.20)$

Η ισχύς της κάθε κυψέλης του φωτοβολταϊκού:

- $P_{cell} = I_{cell} * U_{cell} \quad (5.21)$

Η ισχύ της φ.β. συστοιχίας ισούται:

- $P_{tot} = N_s * I_{cell} * U_{cell} \quad (5.22)$

Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης είναι:

- $\eta = \frac{P_{cell}}{A_{cell} * G_T} \quad (5.23)$

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του φ.β. πάνελ χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

- $C_t * dT * dt = Q_{rad} - Q_{el} - Q_{loss} \quad (5.24)$

- $Q_{rad} = \tau_{\alpha} * G_T \quad (5.25)$

- $Q_{el} = \eta * G_T \quad (5.26)$

- $Q_{loss} = U_L * (T_{cell} - T_{amb}) \quad (5.27)$

- $U_L = \tau_{\alpha} * [\frac{G_T}{T_{c,NOCT} - T_{amb,NOCT}}] \quad (5.28)$

Το μοντέλο Type180 για τις παραμέτρους του εκάστοτε φ.β. πάνελ χρησιμοποιεί ένα αρχείο data στο οποίο καθορίζονται τα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τη παρακάτω σειρά:

<Nb of PV cells>

<No of the PV cell>, <Name of PV cell>

<Isc,ref><Uoc,ref><Tc,ref><GT,ref><Imp><Ump>< μ ,sc>< μ U,oc><Ta,NOCT><Tc,NOCT><GT,N

OCT><CT>

5.1.9 Ωριαίο Αρχείο Καιρού (Type54)

Αυτό το στοιχείο περιέχει δεδομένα καιρού ανά ώρα βάσει των μέσων ετήσιων τιμών βασιζόμενες σε πολυετής καταγραφές για τις συγκεκριμένες ώρες από μετεωρολογικά κέντρα για διάφορες περιοχές του πλανήτη. Τα στοιχεία αυτά είναι αποθηκευμένα σε αρχεία τύπου .tmg και μέσω του στοιχείου ανακαλούνται ωριαία δίνοντας μια σειρά τιμών που αφορούν:

1. Θερμοκρασία περιβάλλοντος
2. Σχετική υγρασία
3. Ταχύτητα ανέμου
4. Διεύθυνση ανέμου

5. Ατμοσφαιρική πίεση
6. Γωνία ζενίθ ήλιου
7. Γωνία αζιμουθιακή ήλιου
8. Ολική ακτινοβολία προσπίπτουσα σε επιφάνεια οποιαδήποτε κλίσης και προσανατολισμού
9. Άμεση ακτινοβολία στην επιφάνεια
10. Διαχέουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια
11. Γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια

5.1.10 Online Plotter (Type65d)

Μέσω αυτού του μοντέλου κατασκευάζονται τα διαγράμματα από τα μοντέλα της προσομοίωσης. Στον άξονα των x πάντα έχουμε τις ώρες της προσομοίωσης ενώ στον άξονα των y τις εκάστοτε τιμές που θέλουμε να εμφανιστούν.

5.1.11 Printer (Type25c)

Όπως και το παραπάνω μοντέλο και αυτό του Printer χρησιμοποιείται για εμφάνιση αποτελεσμάτων. Στην πρώτη στήλη πάντοτε αναγράφεται ο χρόνος της προσομοίωσης με αύξουσα σειρά και στις επόμενες στήλες εμφανίζονται τα αποτελέσματα που έχουμε επιλέξει προς καταγραφή. Έτσι σε κάθε γραμμή που αποτελεί και μια ξεχωριστή ώρα προσομοίωσης έχουμε τ' αποτελέσματα για εκείνη την ώρα. Τ' αποτελέσματα αποθηκεύονται είτε σε αρχεία τύπου .out είτε σε αρχεία .txt. Τα αρχεία αυτά μέσω του μοντέλου Data Reader μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποια άλλη προσομοίωση.

5.1.12 Προσθήκη Εξισώσεων

Τέλος το TRNSYS μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε δικές μας εξισώσεις σύμφωνα με τις ανάγκες της προσομοίωσης και οι οποίες μπορούν να συνδέσουμε με τα υπάρχοντα μοντέλα του προγράμματος και να μας δώσουν αποτελέσματα που αναζητάμε είτε τελικά είτε για χρήση ως δεδομένων εισόδου σε κάποιο άλλο μοντέλο.

Στις προσομοιώσεις θα χρησιμοποιηθούν μια σειρά τέτοιων εξισώσεων κυρίως για εισαγωγή δεδομένων σε συστήματα διαφορικών ελεγκτών στα πλαίσια του αυτομάτου ελέγχου αλλά και για υπολογισμό συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων. Ο τίτλος σε κάθε ένα μοντέλο που θ' αναλυθεί κατωτέρω προέρχεται από το όνομα που του δόθηκε στο TRNSYS Studio.

LOADS

Από τα Διαγράμματα 4.3 και 4.4 έχουμε τα αποτελέσματα της φόρτισης της μηχανής. Η φόρτιση της μηχανής όμως στη περίπτωση της ηλεκτροπρόωσης για την κάλυψη της ίδιας απαίτησης σε σχέση με εκείνη της μηχανικής φόρτισης θα είναι προσαυξημένη κατά το μέγεθος των μεγαλύτερων απωλειών που η πρώτη έχει. Έτσι θεωρώντας συνολικό βαθμό απόδοσης στην ηλεκτροπρόωση 92,3% και τον αντίστοιχο στη μηχανική πρόωση ίσο με 98% έχουμε επαυξημένα φορτία για πρόωση κατά το συντελεστή 1,06 όπως προκύπτει από την εξίσωση των φορτίων της έλικας. Συνεπώς τα δεδομένα των φορτίων της κύριας μηχανής πολλαπλασιάζονται με τον παρακάτω συντελεστή

- $PLOADS_PROP=LOADS_PROP*1,06$ (5.29)

Η προσαύξηση αυτή αφορά μόνο τα φορτία της ηλεκτροπρόωσης λόγω του διαφορετικού συστήματος μετατροπής ενέργειας. Αντιθέτως στη περίπτωση των ξενοδοχειακών καταναλώσεων δεν υπάρχει διαφοροποίηση στα φορτία. Συνεπώς έχουμε:

- $PGS_aux=P_AUX$ (5.30)

PGS

Μέσω της εξισώσεως αυτής υπολογίζονται τα φορτία που αναλαμβάνουν να καλύψουν οι κυψέλες καυσίμου και αφαιρούνται από τα ολικά ώστε να προκύψουν τα εναπομείναντα που θα “οδηγηθούν” στο μοντέλο του switchboard και εν συνεχεία στα GenSets. Έχει την εξής μορφή η οποία διαφοροποιείται αναλόγως εξαρτώμενη από τα εύρη λειτουργίας των GenSets σε κάθε σενάριο προσομοίωσης:

- $PGS = PLOADS - CS1 * (PLOADS - FC_START) - CS2 * (PLOADS - FC_STOP)$ (5.30)
Όπου : PLOADS τα ολικά φορτία, CS1 και CS2 οι εντολές των αντίστοιχων διαφορικών εκλεκτών, FC_START και FC_STOP η ζήτηση ισχύος στην οποία ξεκινάν σε κάθε ένα σενάριο προσομοίωσης οι κυψέλες καυσίμου τη λειτουργία του και το σταμάτημα αντιστοίχως.

Equa-1

Μέσω αυτού γίνεται η πρόσθεση των συνολικών φορτίων που θα πρέπει να εξυπηρετηθούν και που αναλύθηκαν παραπάνω:

- $P = PLOADS_PROP + PGS_aux$ (5.31)

Metering

Η απαιτούμενη ισχύς που θα πρέπει να καλυφθεί από την εγκατάσταση των κυψελών καυσίμου διαμοιράζεται ισόποσα στο σύνολο των στοιχείων FCM που έχουμε επιλέξει στην προσομοίωση. Συνεπώς τα φορτία που προέκυψαν από την προσομοίωση των GenSets ανακαλούνται από την προσομοίωση των κυψελών καυσίμου και διαιρούνται με το πλήθος των FCM του κάθε σεναρίου προσομοίωσης πολλαπλασιαζόμενα με 1.1 μιας και όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3 το 10% της παραγώμενης ισχύος χρησιμοποιείται στα περιφερειακά συστήματα που απαιτούνται από τις κυψέλες καυσίμου με κύριο αυτών το συμπιεστή:

- $P_FC = (PLOAD_FC / N_BZM) * 1.1$ (5.32)

Total PV

Η προσομοίωση της λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας γίνεται για έναν inverter σε κάθε σενάριο. Όμως δεδομένου πως οι κλίσεις και ο τύπος των φ.β. είναι ίδιος για λόγους απλότητας ,μιας και οι αποκλίσεις στη λειτουργία λόγω των διαφορετικών τους θέσεων θεωρούνται αμελητέες πολλαπλασιάζουμε τα αποτελέσματα του ενός για το σύνολο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του πλοίου που έχει 5 inverters.

- $P_TOTAL_PV = P_INV * N$ (5.33)

6. Σενάρια Προσομοίωσης

Καθοριστικός παράγοντας ώστε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο να λειτουργήσει κατά τρόπο αποδοτικότερο και οικονομικότερο είναι πέραν των επιλογών των στοιχείων τα οποία θα το συνθέσουν, η επιλογή των οποίων έγινε στο Κεφάλαιο 4, αποτελούν και οι ρυθμίσεις τις οποίες έχουμε επιλέξει για τη λειτουργία των στοιχείων αυτών.

Η φιλοσοφία της προσομοίωσης στηρίζεται στο γεγονός πως για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος η κύρια μας επιλογή, που δεν είναι άλλη από τη λειτουργία των GenSets καθώς αποτελεί και το κύριο τμήμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλοίου, να λειτουργεί εντός της περιοχής ισχύος που έχει οικονομική λειτουργία. Επιπροσθέτως στις οδηγίες τις MAN που περιέχονται στο εγχειρίδιο “MAN 51/60DF Project Guide – Marine 2016” [3] αναφέρεται πως:

- Η μηχανή λειτουργεί καλύτερα σε ένα φάσμα απαίτησης φορτίου μεταξύ 60 και 90% της ονομαστικής της ισχύος
- Η λειτουργία της μηχανής σε φορτία κάτω του 25% της ονομαστικής συνίσταται να αποφεύγεται

Σε κάθε σενάριο λοιπόν επιλέγουμε ένα εύρος λειτουργίας από 60-95% έως 70-90% ώστε να υπολογιστεί η κατανάλωση του αντίστοιχου καυσίμου (MDO και LNG) βάσει των φορτίων που έχουμε. Αναπόφευκτα από το μέγεθος της μηχανής και το επιλεγόμενο εύρος λειτουργίας της κάθε μηχανής προκύπτουν τιμές φορτίου οι οποίες δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν εντός των ορίων που θέσαμε. Τελικά η απαιτούμενη αυτή ισχύς καλύπτεται με τη συνδρομή των κυψελών καυσίμου ισομοιραζόμενη κάθε φορά στο σύνολο τους καθώς έτσι, όπως εξετάσαμε παραπάνω, επιτυγχάνουμε χαμηλότερη απαίτηση έντασης ρεύματος ανά κυψέλη και έτσι επιτυγχάνουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση της συστοιχίας των FCM. Τέλος η ισχύς που παράγεται από την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση καλύπτει άμεσα ξενοδοχειακές ανάγκες του πλοίου και εξετάζεται χωριστά από τα φορτία της μελέτης καθώς λόγω της μικρής συνεισφοράς της δεν επηρεάζει την ειδική κατανάλωση των καυσίμων.

Με βάσει το παραπάνω σκεπτικό για να γίνει η προσομοίωση θα πρέπει να δημιουργηθούν 3 διαφορετικά projects και συνολικά 20 σενάρια προσομοίωσης στο TRNSYS Studio.

1. GenSets (6 για καύσιμο MDO και 6 για καύσιμο LNG)
2. Κυψέλες Καυσίμου (6 ανάλογα το εύρος λειτουργίας των GenSets)
3. Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (2 για διαφορετικές περιοχές δρομολογίων του πλοίου)

Η διάρκεια της κάθε προσομοίωσης θα είναι όση είναι η season για ένα κρουαζιερόπλοιο που λειτουργεί στη Βαλτική δηλαδή από τα τέλη του Απριλίου έως τις αρχές του Οκτωβρίου όπως αποφασίστηκε στο Κεφάλαιο 4. Η περίοδος αυτή περιέχει περίπου 4000 ώρες.

Συνεπώς θα πάρουμε τ' αποτελέσματα από των Διαγραμμάτων 4.3 και 4.4 και θα τα αναγάγουμε ωριαία φορτία ώστε να χρησιμοποιηθούν από το TRNSYS και να γίνει η προσομοίωση της λειτουργίας. Για τις προσομοιώσεις 1 και 2 οι τιμές των ορίων της προσομοίωσης είναι ανεξάρτητες των μεγεθών που εξετάζονται. Θα τις χρησιμοποιούσαμε εάν τ' αποτελέσματα της δημοσίευσης που χρησιμοποιούσαμε ήταν η μέση ωριαία ζήτηση ισχύος του κρουαζιερόπλοιού για κάθε ώρα λειτουργίας. Παρόλα αυτά τ' αποτελέσματα που θα εξαχθούν δεν επηρεάζονται από το γεγονός αυτό δηλαδή δεν υπάρχει εξάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου από τις τιμές της προηγούμενης. Αντιθέτως στη προσομοίωση της φ.β. εγκατάστασης λόγω του ότι εξαρτώνται από τα κλιματικά δεδομένα που οι μέσες τιμές της κάθε ώρας είναι υπολογισμένες για κάθε περιοχή απαιτείται να γίνει η ακριβής χρονική

αντιστοίχιση. Έτσι ,θεωρώντας αυτές τις ημερομηνίες για την λειτουργία του κρουαζιερόπλοιου ανά έτος και με δεδομένο πως το TRNSYS θεωρεί ως ώρα υπ' αριθμόν 1 την πρώτη ώρα του έτους ,δηλαδή 00:00-01:00 την 1^η Ιανουαρίου και ως 8760 την τελευταία ,αντιστοίχως 23:00-24:00 την 31^η Δεκεμβρίου, η διάρκεια της προσομοίωσης για το πλοίο θα είναι για το αναφερθέν διάστημα από την ώρα 2700 έως την ώρα 6623.

6.1 GenSets

Η λειτουργία των GenSets είναι ,όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποδοτικότερη για λειτουργία σε φορτία κοντά στο 85% της ονομαστικής της ισχύος. Συνεπώς θα διερευνήσουμε διάφορα εύρη λειτουργίας για περιοχές ισχύος σχετικά κοντά σε αυτή τη τιμή ώστε να επιτύχουμε κατά το δυνατό οικονομικότερη λειτουργία.

Έτσι θα κατασκευάσουμε 12 σενάρια λειτουργίας της μηχανής (6 με καύσιμο MDO ΚΑΙ 6 με καύσιμο LNG) με τα παρακάτω εύρη αμφότερα:

Πίνακας 6.1:Εύρος λειτουργίας κάθε GenSet ανά σενάριο προσομοίωσης

A/A Σεναρίου ανά τύπο καυσίμου	Εύρος Λειτουργίας
1	60-95%
2	60-90%
3	65-95%
4	65-90%
5	70-95%
6	70-90%

Τα δεδομένα για την ειδική κατανάλωση του κάθε καυσίμου θα τα πάρουμε από τους Πίνακες 4.6 και 4.8 που πήραμε από το εγχειρίδιο της μηχανής της MAN. Όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο το TRNSYS για την κατανάλωση χρησιμοποιεί μια εξίσωση της μορφής $V=a+b*X$ για παροχή καυσίμου σε lt/hr. Έτσι αναγάγουμε τα δεδομένα των προαναφερθέντων πινάκων σε lt/hr και για το εκάστοτε σενάριο προσομοίωσης βρίσκουμε την αντίστοιχη ευθεία βάσει του εύρους λειτουργίας αφού γίνει όπου απαιτείται γραμμική παρεμβολή για την εύρεση της κατανάλωσης σε τιμές ποσοστού φόρτισης που δεν δίνονται στους πίνακες και αποτελούν τα όρια της. Από τη αυτή προσομοίωση θα πάρουμε ως αποτελέσματα την ισχύ που έχουμε σε κάθε GenSet και την κατανάλωση καυσίμου.

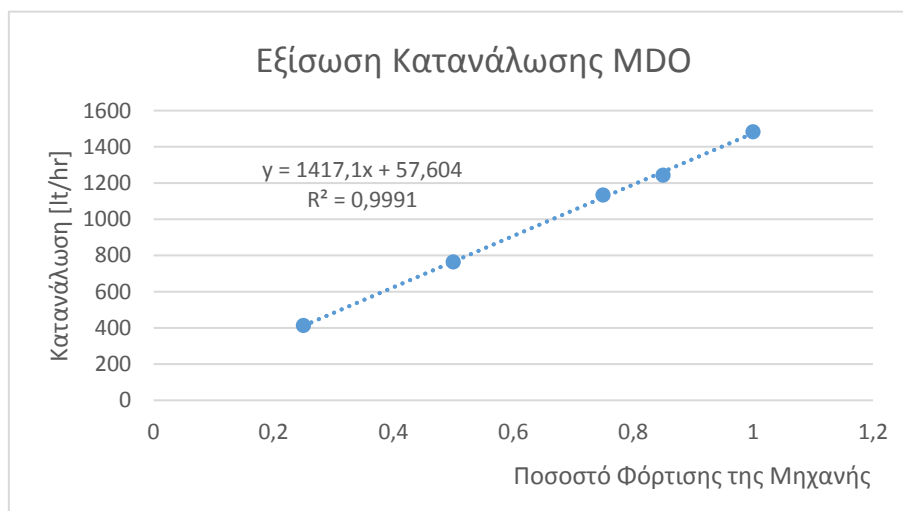
6.1.1 Καύσιμο MDO

Για την κατασκευή του πίνακα της κατανάλωσης καυσίμου σε μορφή βάσει των απαιτήσεων του προγράμματος θα θεωρηθεί η πυκνότητα του MDO ίση με 890 kg/m^3 ήτοι 890 gr/lt έτσι κατασκευάζουμε το παρακάτω πίνακα ώστε να γίνει η αναγωγή της κατανάλωσης από gr/KWh στις ζητούμενες από το πρόγραμμα μονάδες l/hr :

Πίνακας 6.2: Αναγωγή της κατανάλωσης καυσίμου σε l/hr

P	P/Prated	l/kWh	l/h
1837,5	0,25	0,224719101	412,9213483
3675	0,5	0,207865169	763,9044944
5512,5	0,75	0,205617978	1133,469101
6247,5	0,85	0,198876404	1242,480337
7350	1	0,201685393	1482,38764

Με βάση το παραπάνω πίνακα κατασκευάζουμε την εξίσωση κατανάλωσης καυσίμου της μηχανής για το εκάστοτε ποσοστό φόρτισης σε πρωτοβάθμια εξίσωση όπως απαιτείται από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Συνεπώς:



Διάγραμμα 6.1: Κατανάλωση καυσίμου MDO ανά ώρα βάσει του ποσοστού φόρτισης της μηχανής

Προκύπτει λοιπόν πως για τις τιμές που μας δίνονται η κατανάλωση δίνεται μέσω της εξίσωσης:

- $Y=1417,1 \cdot X+57,604$ με $R^2=0,9991$

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι πολύ κοντά στο 1 έτσι θεωρούμε την γραμμική προσομοίωση της κατανάλωσης ως αποδεκτή.

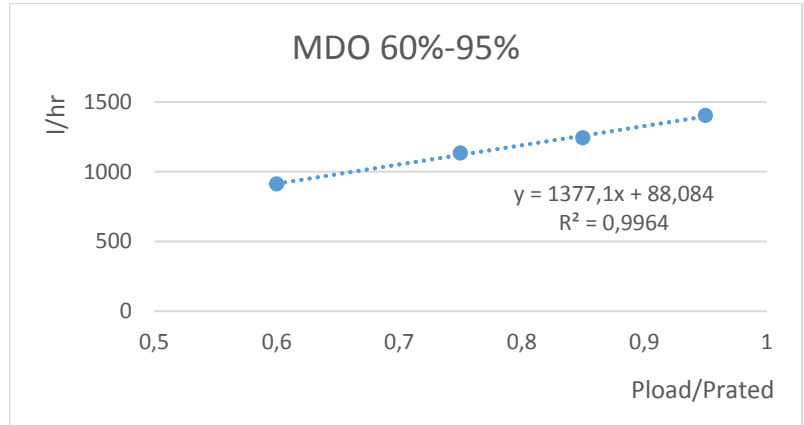
Όπως διαπιστώνουμε για τις καταναλώσεις 60,65,70,90 και 95% δεν έχουμε ειδικές καταναλώσεις καυσίμου. Για τον υπολογισμό αυτών των τιμών θα γίνει γραμμική παρεμβολή για τις μεν τιμές 60,65,70% από τις τιμές που μας δίνονται στο πίνακα 50 και 75% ενώ για τις δε 90 και 95% από τις τιμές 85 και 100%. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτουν οι τιμές:

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα από γραμμική παρεμβολή για τη κατανάλωση καυσίμου στα όρια του εύρους λειτουργίας

Ποσοστό Ισχύος	Κατανάλωση σε l/hr
60%	911,755
65%	985,67
70%	1059,585
90%	1322,47
95%	1402,44

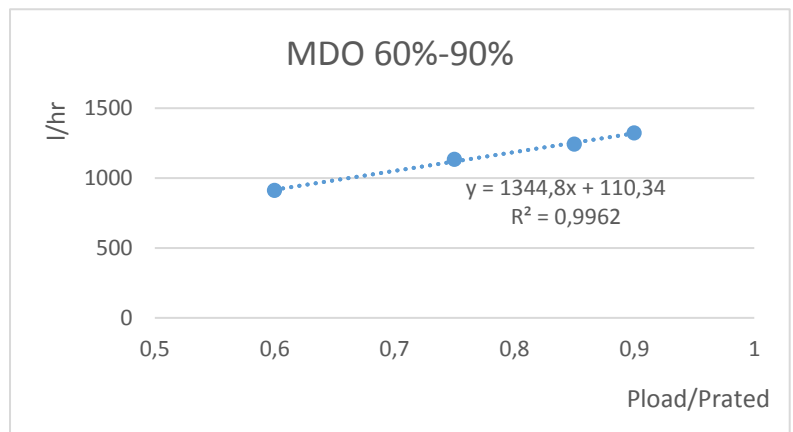
1. Εύρος λειτουργίας 60%-95% (MDO)

P/Prated	I/hr
0,6	911,755
0,75	1133,469101
0,85	1242,480337
0,95	1402,44
Αρ. Ενεργών GenSets	Εύρος Ισχύος GenSets [KW]
1	4410-6982,5
2	8820-13965
3	13230-20947,5
4	17640-27930



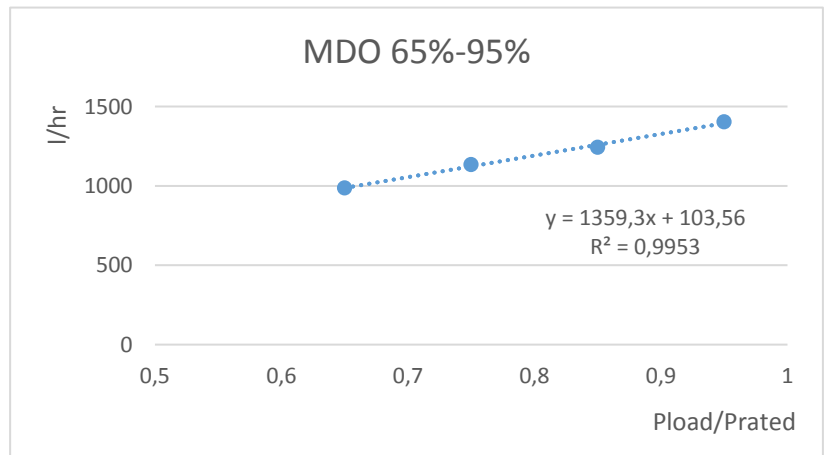
2. Εύρος λειτουργίας 60%-90% (MDO)

P/Prated	I/hr
0,6	911,755
0,75	1133,469101
0,85	1242,480337
0,9	1322,47
Αρ. Ενεργών GenSets	Εύρος Ισχύος GenSets [KW]
1	4777,5-6982,5
2	9555-13965
3	14332,5-20947,5
4	19110-27930



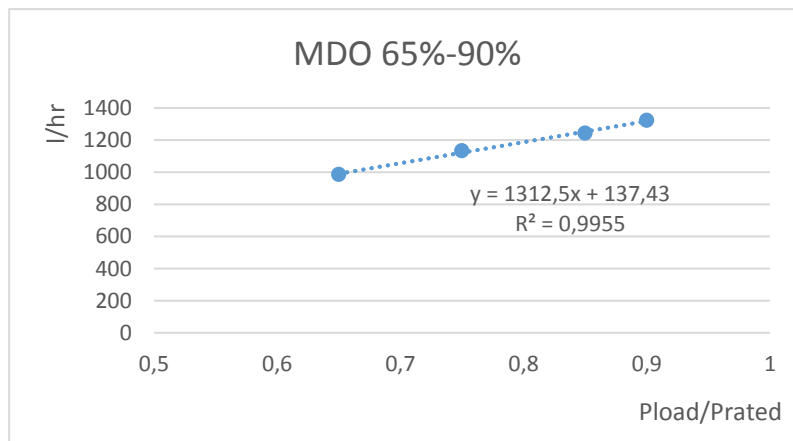
3. Εύρος λειτουργίας 65%-95% (MDO)

P/Prated	I/hr
0,65	985,67
0,75	1133,469
0,85	1242,48
0,95	1402,44
Αρ. Ενεργών GenSets	Εύρος Ισχύος GenSets KW
1	4777,5-6982,5
2	9555-13965
3	14332,5-20947,5
4	19110-27930



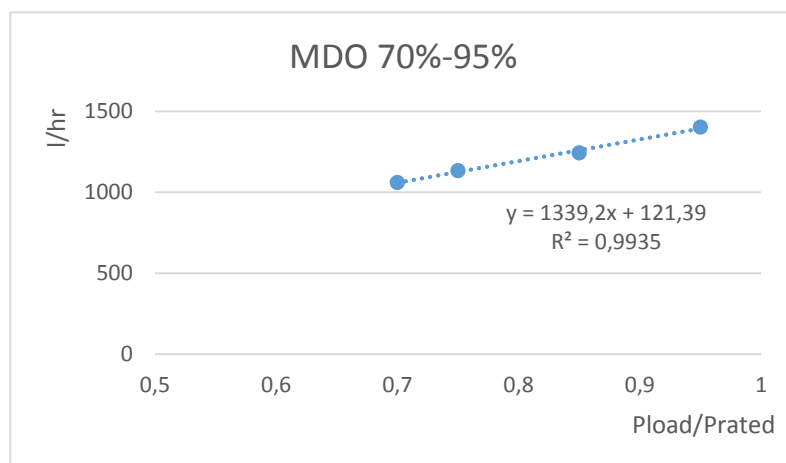
4. Εύρος Λειτουργίας 65%-90% (MDO)

P/Prated	I/hr
0,65	985,67
0,75	1133,469
0,85	1242,48
0,9	1322,47
Αρ. Ενεργών GenSets	Εύρος Ισχύος GenSets [KW]
1	4777,5-6615
2	9555-13230
3	14332,5-19845
4	19110-26460



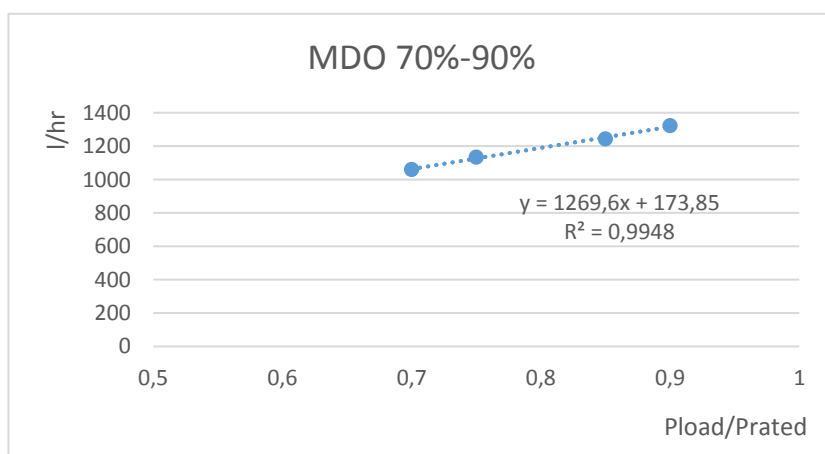
5. Εύρος Λειτουργίας 70%-95% (MDO)

P/Prated	I/hr
0,7	1059,585
0,75	1133,469
0,85	1242,48
0,95	1402,44
Αρ. Ενεργών GenSets	Εύρος Ισχύος GenSets [KW]
1	5145-6982,5
2	10290-13965
3	15435-20947,5
4	20580-27930



6. Εύρος Λειτουργίας 70%-90% (MDO)

P/Prated	I/hr
0,7	1059,585
0,75	1133,469
0,85	1242,48
0,9	1322,47
Αρ. Ενεργών GenSets	Εύρος Ισχύος GenSets [KW]
1	5145-6615
2	10290-13230
3	15435-19845
4	20580-26460



6.1.2 Καύσιμο LNG

Για τη λειτουργία της μηχανής με φυσικό αέριο θα θεωρηθεί πως η μηχανή λειτουργεί εξ' ολοκλήρου με LNG θεωρώντας δηλαδή ως αμελητέα την κατανάλωση του πιλοτικού καυσίμου που είναι της τάξεως του 1%. Βασιζόμενοι στο Πίνακα 4.8 διαπιστώνουμε πως η κατανάλωση δε δίνεται εδώ σε gr/KWh όπως στη περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί με MDO αλλά δίνεται σε KJ/KWh. Η χρήση αυτών των μονάδων μέτρησης γίνεται λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης στη τιμή της θερμογόνου δύναμης που απαντάται σε διάφορα μείγματα φυσικού αερίου. Η επιλογή αυτών των μονάδων που κάνει η MAN για τον πίνακα της ειδικής κατανάλωσης είναι εύλογη λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών των διαφόρων κοιτασμάτων φυσικού αερίου. Για την επιλογή του φυσικού αερίου που θα χρησιμοποιηθεί για τη προσομοίωση των GenSets εξετάζουμε τη λειτουργία τους βάσει του τυποποιημένου φυσικού αερίου που δίνει ο IMO και ενός φθηνού φυσικού αερίου με την ίδια πυκνότητα στις κανονικές συνθήκες και χαρακτηριστικά που λάβαμε από τον IGU [29].

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά επιλεγόμενων καυσίμων

Χαρακτηριστικά Καυσίμου	IMO-Τυποποιημένο	Algeria-Bethioua 2
Θερμογόνος Δύναμη	48000 KJ/kg	46154
Πυκνότητα	0,78 kg/Nm ³	0,78 kg/Nm ³
Συντελεστής εκπομπών CO ₂	2,75 kg CO ₂ /kg καυσ.	2,744 kg CO ₂ /kg καυσ.

Βάσει της ειδικής κατανάλωσης του Πίνακα 4.8 για κάθε καύσιμο έχουμε την εξής διαμόρφωση των μεγεθών που μπορούν να εκφράσουν την ειδική κατανάλωση.

Για τυποποιημένο καύσιμο του IMO:

Πίνακας 6.5: Αναγωγή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατ' όγκον και κατά μάζα για τυποποιημένο του IMO

P	P/Prated	KJ/KWh	Nm3/Kwh	Nm3/h	kg/h	gr/kwh
3675	0,5	7820	0,208868	767,5881	598,7188	162,9167
5512,5	0,75	7330	0,19578	1079,237	841,8047	152,7083
6247,5	0,85	7200	0,192308	1201,442	937,125	150
7350	1	7190	0,192041	1411,498	1100,969	149,7917

Ενώ για το καύσιμο που προέρχεται από τη περιοχή Bethioua της Αλγερίας:

Πίνακας 6.6: Αναγωγή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατ' όγκον και κατά μάζα για αλγερινό κοίτασμα

P	P/Prated	KJ/KWh	Nm3/Kwh	Nm3/h	kg/h	gr/kwh
3675	0,5	7820	0,217222	798,2917	622,6675	169,4333
5512,5	0,75	7330	0,203611	1122,406	875,4769	158,8167
6247,5	0,85	7200	0,2	1249,5	974,61	156
7350	1	7190	0,199722	1467,958	1145,008	155,7833

Βάσει των παραπάνω πινάκων συγκρίνουμε τις εκπομπές ρύπων για καθένα από τα δύο καύσιμα στα διάφορα επίπεδα φόρτισης του κινητήρα. Έχουμε το πίνακα:

Πίνακας 6.7: Ποσοστό μείωσης εκπομπών ανά καύσιμο σε σχέση με το επίπεδο φόρτισης της μηχανής

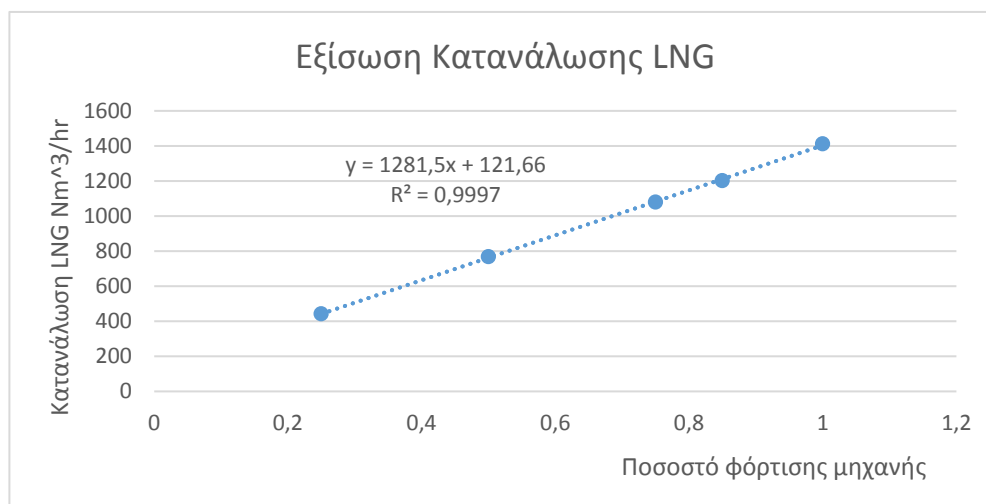
ΦΟΡΤΙΟ %	IMO	Algerian
50	24,46 %	21,65 %
75	28,42 %	25,75 %
85	27,31 %	24,60 %
100	28,42 %	25,75 %

Από τα δύο καύσιμα θα επιλέξουμε εκείνο που χρησιμοποιεί σε μελέτες ο IMO με κριτήριο τις χαμηλότερες εκπομπές ρύπων που έχουμε με τη χρήση ενός τέτοιου καυσίμου. Με βάσει τα παραπάνω χαρακτηριστικά του καυσίμου που επιλέξαμε οι τιμές του πίνακα 4.8 ανάγονται σε l/hr και προκύπτει ο πίνακας που ακολουθεί:

Πίνακας 6.8: Κατανάλωση καυσίμου κατά όγκο και κατά μάζα σε σχέση με το επίπεδο φόρτισης της μηχανής για το τυποποιημένο καύσιμο του IMO

P	P/Prated	KJ/KWh	Nm3/Kwh	Nm3/h	kg/h	gr/kwh
1837,5	0,25	9000	0,240385	441,7067	344,5313	187,5
3675	0,5	7820	0,208868	767,5881	598,7188	162,9167
5512,5	0,75	7330	0,19578	1079,237	841,8047	152,7083
6247,5	0,85	7200	0,192308	1201,442	937,125	150
7350	1	7190	0,192041	1411,498	1100,969	149,7917

Βασιζόμενοι στ' αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα κατασκευάζουμε τη καμπύλη ομοίως με την περίπτωση του MDO συνεπώς έχουμε:



Εικόνα 6.2: Κατανάλωση καυσίμου LNG ανά ώρα βάσει του ποσοστού φόρτισης της μηχανής

Εδώ για τις δοθείσες τιμές κατανάλωσης και αντίστοιχης φόρτισης προκύπτει η εξίσωση της κατανάλωσης :

- $Y=1281,5 \cdot X+121,8$ με $R^2=0,9997$

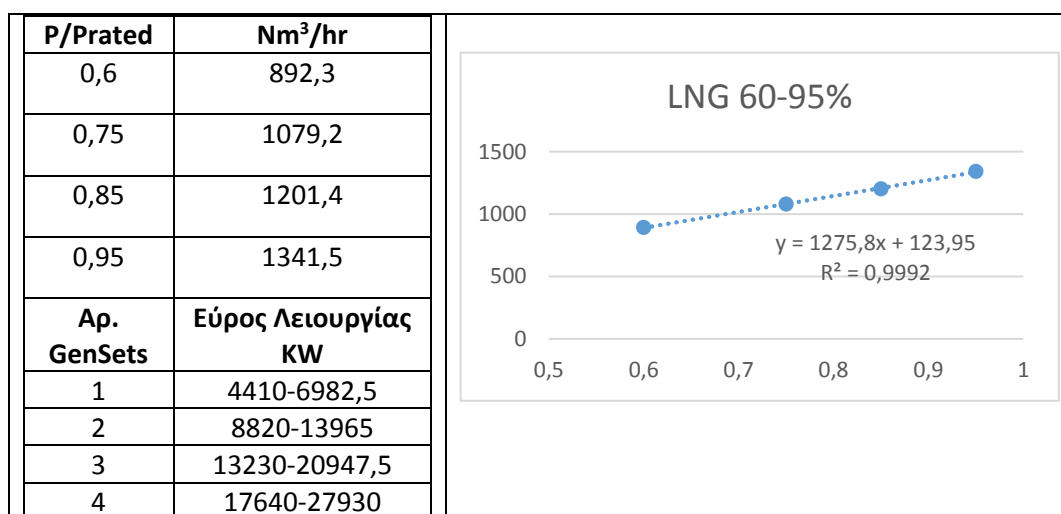
Και εδώ ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι πολύ κοντά στο 1 έτσι θεωρούμε την γραμμική προσομοίωση της κατανάλωσης ως αποδεκτή.

Ενώ εφαρμόζοντας την ίδια μεθοδολογία με την περίπτωση που έχουμε καύσιμο MDO δηλαδή αυτή της γραμμικής παρεμβολής για τις τιμές που θέλουμε βρίσκουμε:

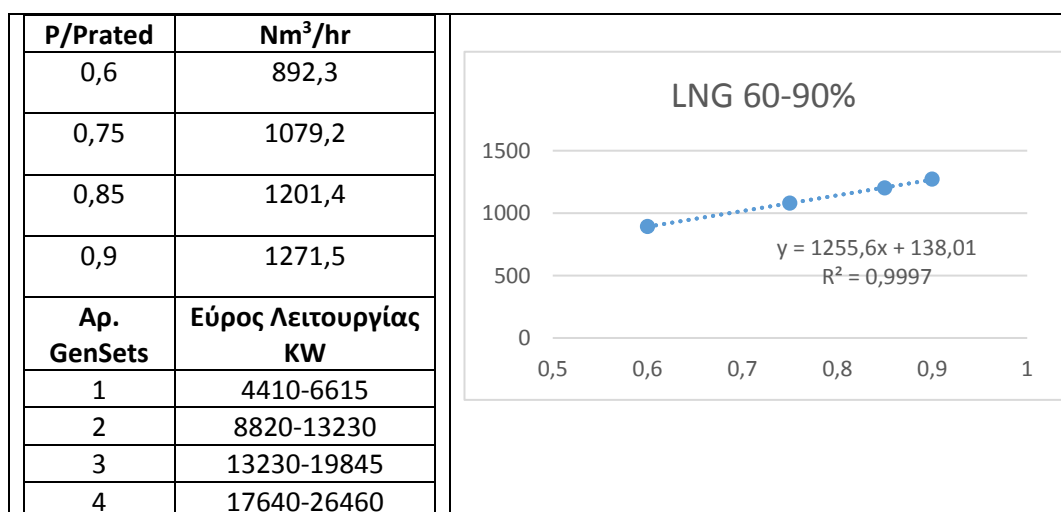
Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα από γραμμική παρεμβολή για τη κατανάλωση καυσίμου στα όρια του εύρους λειτουργίας

Ποσοστό Ισχύος	Κατανάλωση NI/hr
0,6	892,25
0,65	954,58
0,7	1016,91
0,9	1271,484
0,95	1341,504

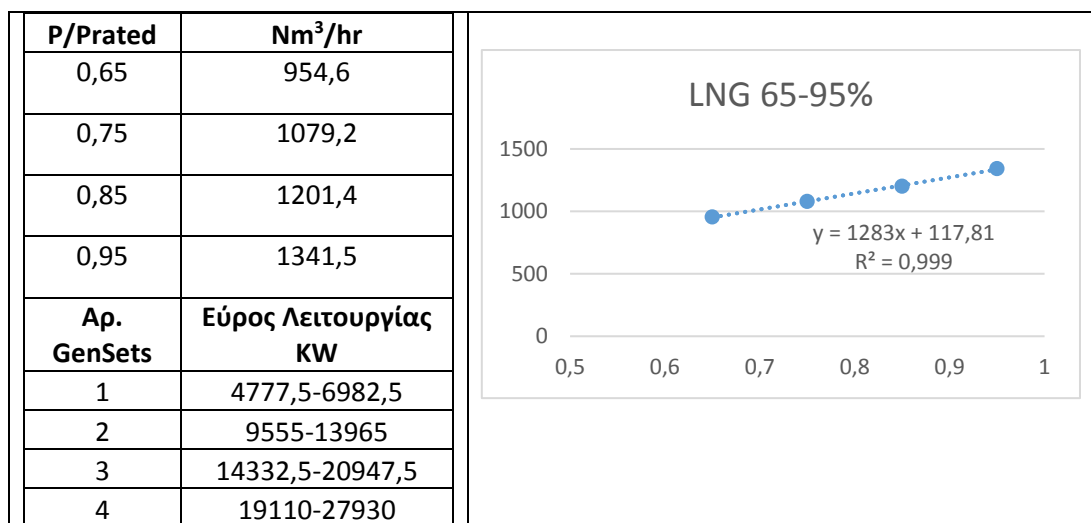
1. Εύρος λειτουργίας 60%-95% (LNG)



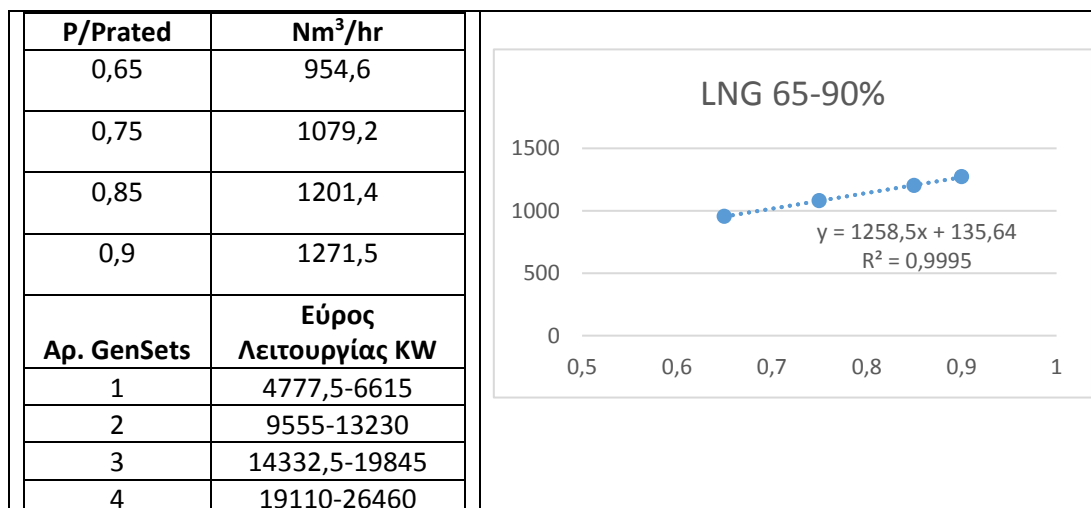
2. Εύρος λειτουργίας 60%-90% (LNG)



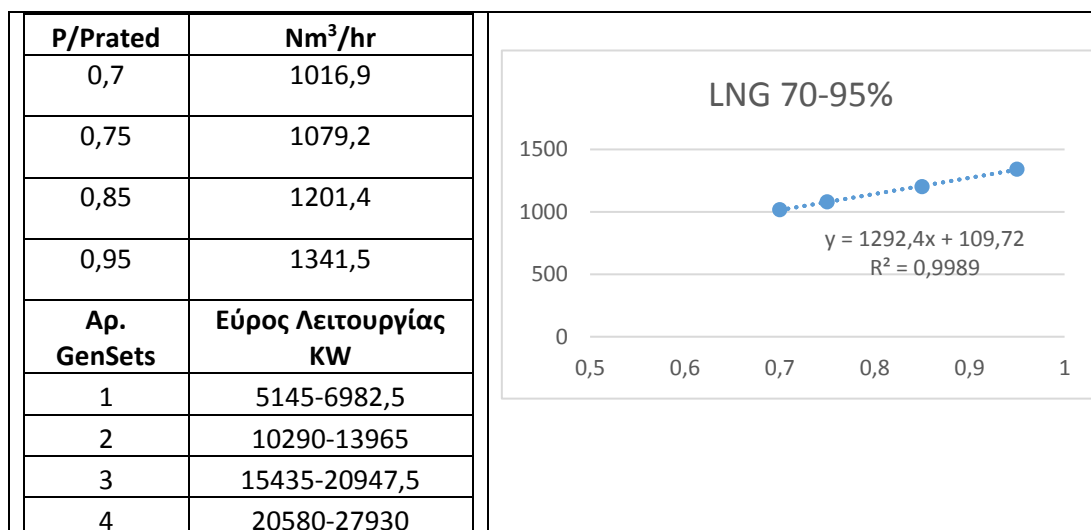
3. Εύρος λειτουργίας 65%-95% (LNG)



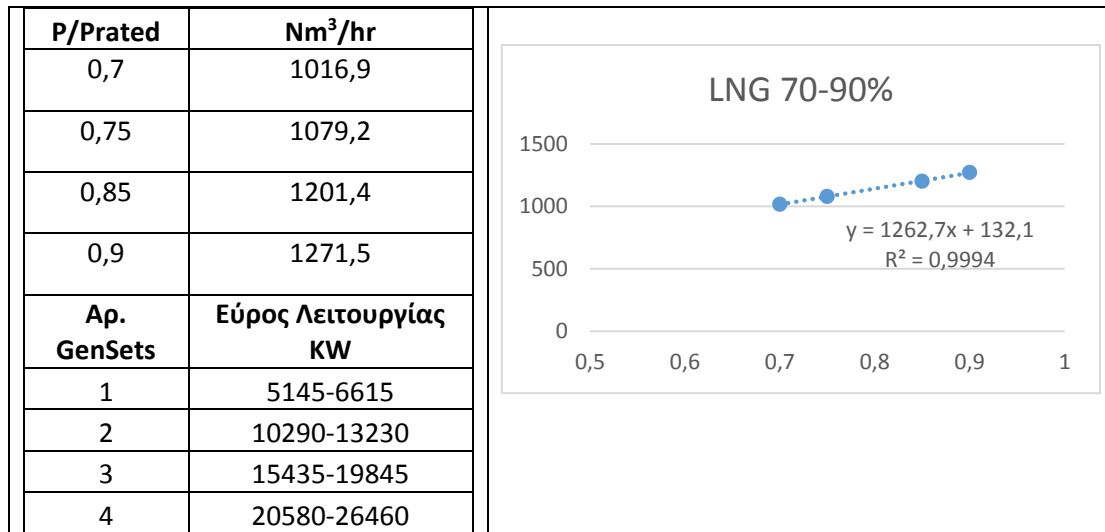
4. Εύρος λειτουργίας 65%-90% (LNG)



5. Εύρος λειτουργίας 70%-95% (LNG)

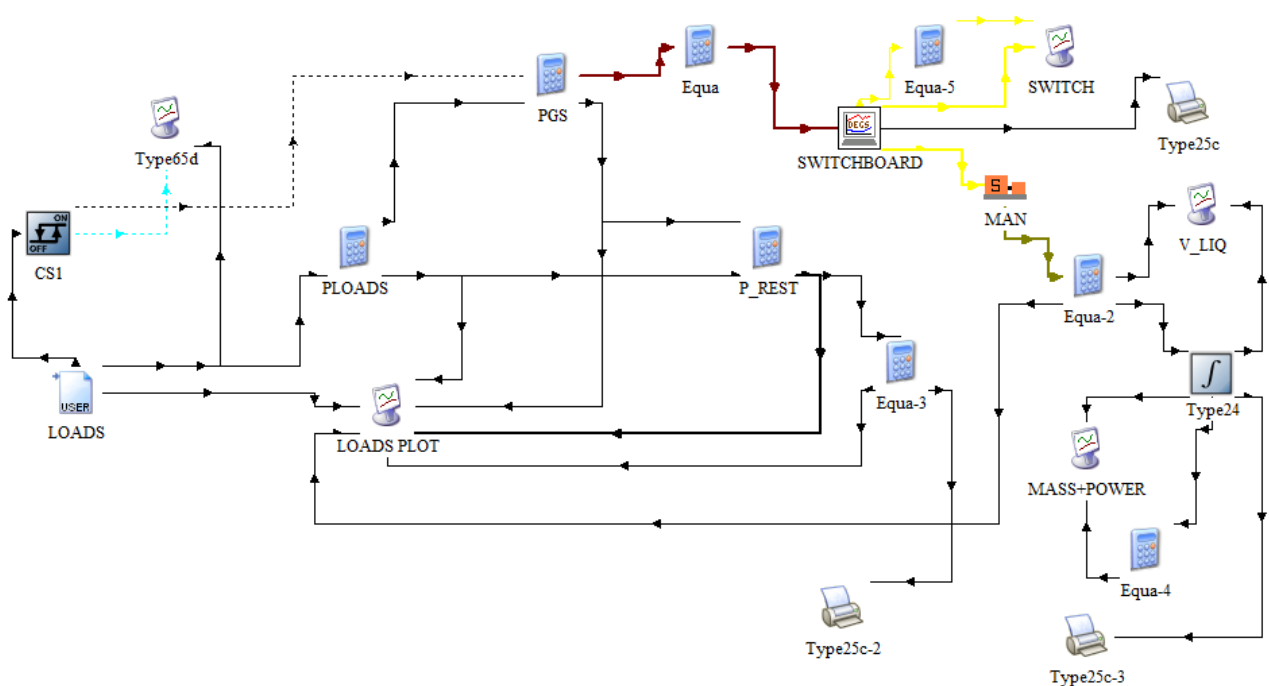


6. Εύρος λειτουργίας 70%-90% (LNG)



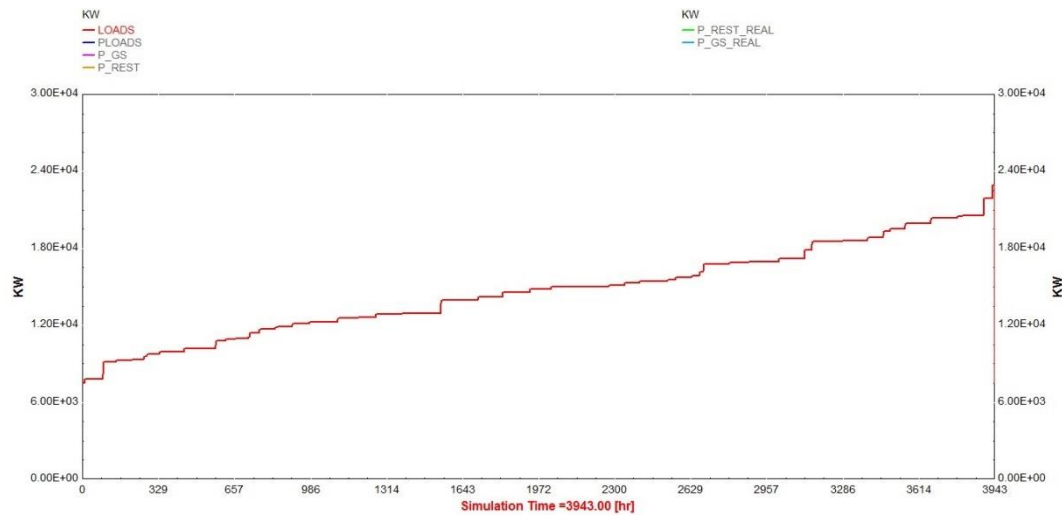
Τα δεδομένα αυτά καθορίζονται σε κάθε προσομοίωση ξεχωριστά και ανακαλούνται κάθε φορά που επιλύεται το στοιχείο των GenSets.

Το διάγραμμα προσομοίωσης στο TRNSYS για τα GenSets είναι:



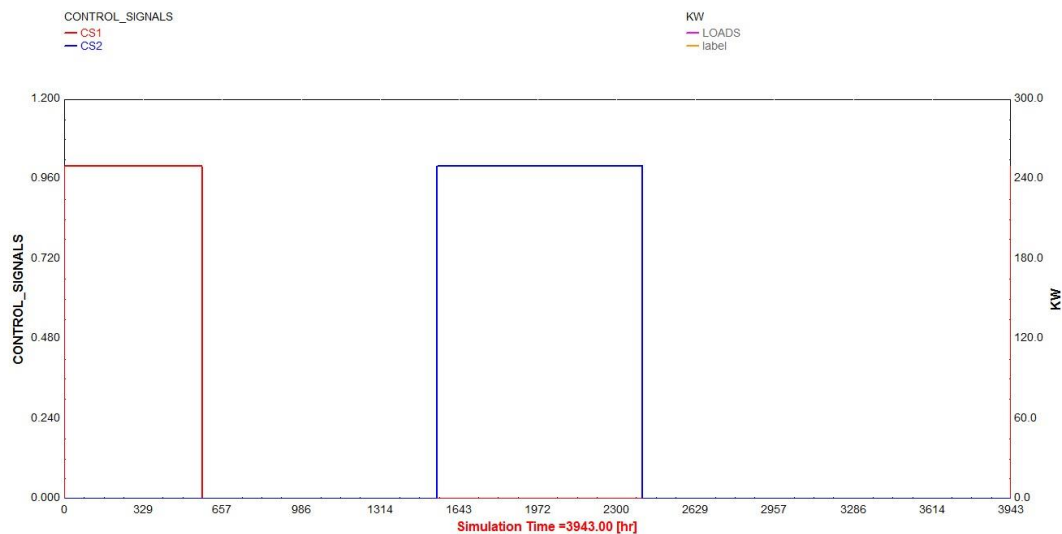
Εικόνα 6.1: Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης των GenSets στο TRNSYS Studio

Τα απαιτούμενα φορτία τα οποία λάβαμε από τα Διαγράμματα 4.3 και 4.4 εισέρχονται στη προσομοίωση μέσω ενός αρχείου Data Reader χωριστά σε εκείνα τη κύριας μηχανής που αφορούν κυρίως την πρόωση και σε εκείνα των auxiliaries που αφορούν κυρίως τις ξενοδοχειακές ανάγκες του κρουαζιερόπλοιού. Κατόπιν εισέρχονται στο μοντέλο εξίσωσης PLOADS όπου αφού τα φορτία της κύριας μηχανής πολλαπλασιαστούν όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο στην παράγραφο που αναλύεται η χρήση του PLOADS αθροίζονται με εκείνα των auxiliaries. Το σύνολο της απαιτούμενης ισχύος παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα που έχουμε μέσω των Plots στο TRNSYS. Τα φορτία εφόσον δεν γνωρίζουμε αλλά δεν επηρεάζονται κιόλας από τη χρονική τους αλληλουχία διαμόρφωση τα τοποθετούμε σε αύξουσα σειρά για λόγους ευανάγνωστης των διαγραμμάτων που προκύπτουν.



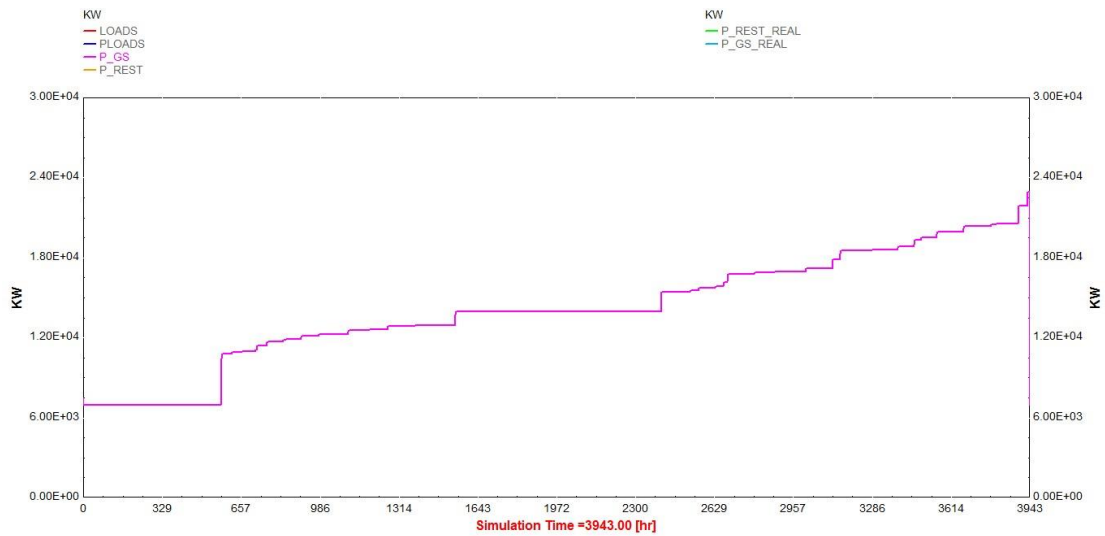
Διάγραμμα 6.3: Απαιτηση συνολικών φορτίων σε KW

Τα φορτία αυτά μαζί με το σήμα ελέγχου από του διαφορικούς ελεγκτές εισέρχονται στο PGS όπου διαχωρίζονται σε εκείνα που θα παραλάβουν τα GenSets και σ' εκείνα των Fuel Cells όπως είδαμε παραπάνω. Το σήμα ελέγχου των διαφορικών ελεγκτών γίνεται 1 όταν βρισκόμαστε σε απαιτούμενες ισχύς εκτός του εύρους τιμών που μπορούν να ικανοποιήσουν τα GenSets και ουσιαστικά υποδεικνύουν το πότε θα λειτουργήσουν οι κυψέλες καυσίμου. Τ' αποτελέσματα της λειτουργίας τους παρουσιάζεται κατωτέρω:



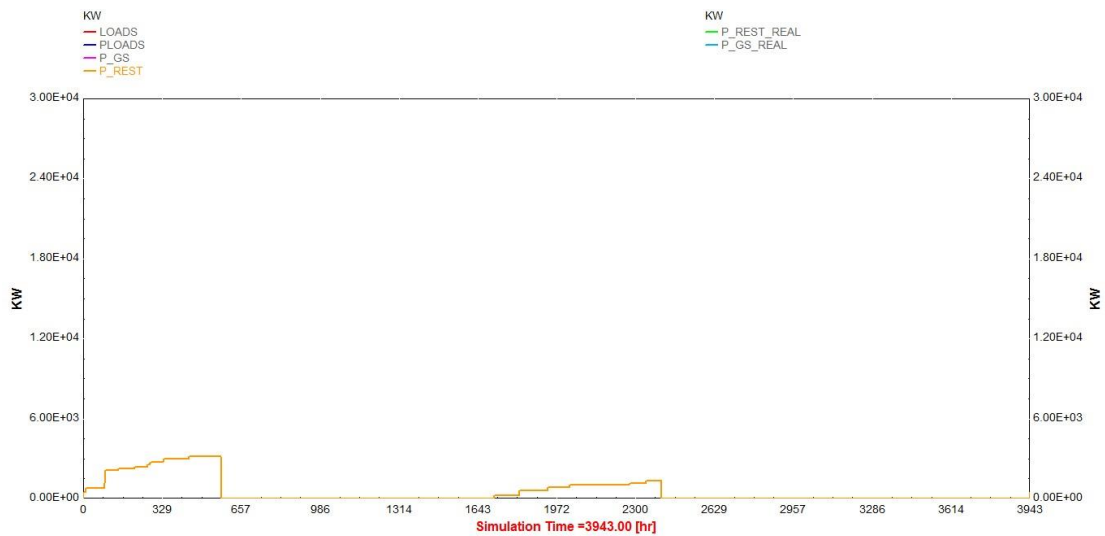
Διάγραμμα 6.4: Τιμές αποτελεσμάτων των διαφορικών ελεγκτών

Τα συνολικά φορτία καθώς και τ' αποτελέσματα των διαφορικών ελεγκτών εισέρχονται στο P_GS όπου όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 προκύπτουν τα φορτία που εξυπηρετηθούν από τα GenSets και είναι:



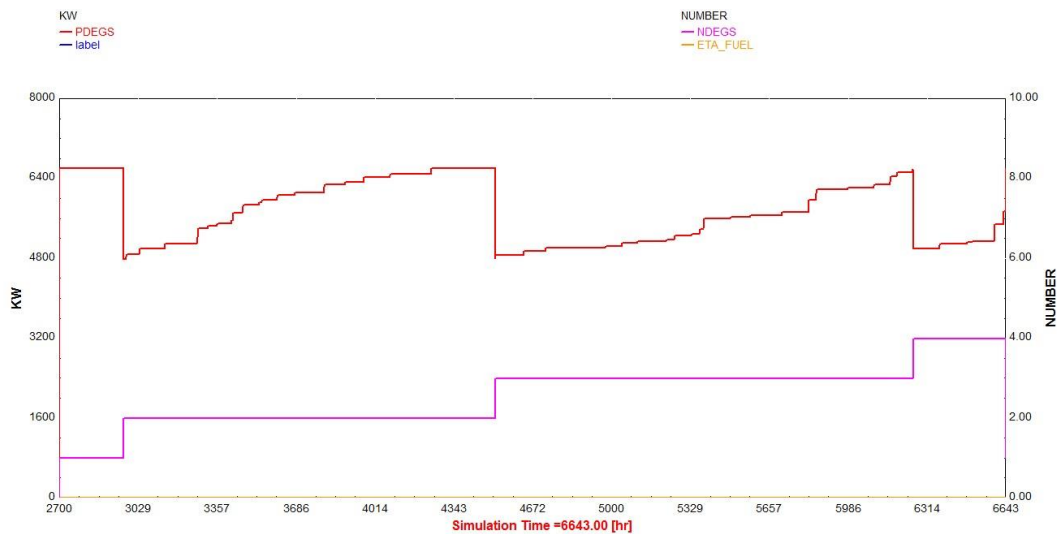
Διάγραμμα 6.5: Σύνολο φορτίων για κάλυψη από GenSets

Η διαφορά μεταξύ των απαιτούμενων και εκείνων που παραλαμβάνουν τα GenSets θα καλυφθεί από τις κυψέλες καυσίμου και γι' αυτό οδηγείται στο Tyre25c-2 και κατόπιν θα χρησιμοποιηθούν από την προσομοίωση των κυψελών καυσίμου. Τα φορτία αυτά είναι:



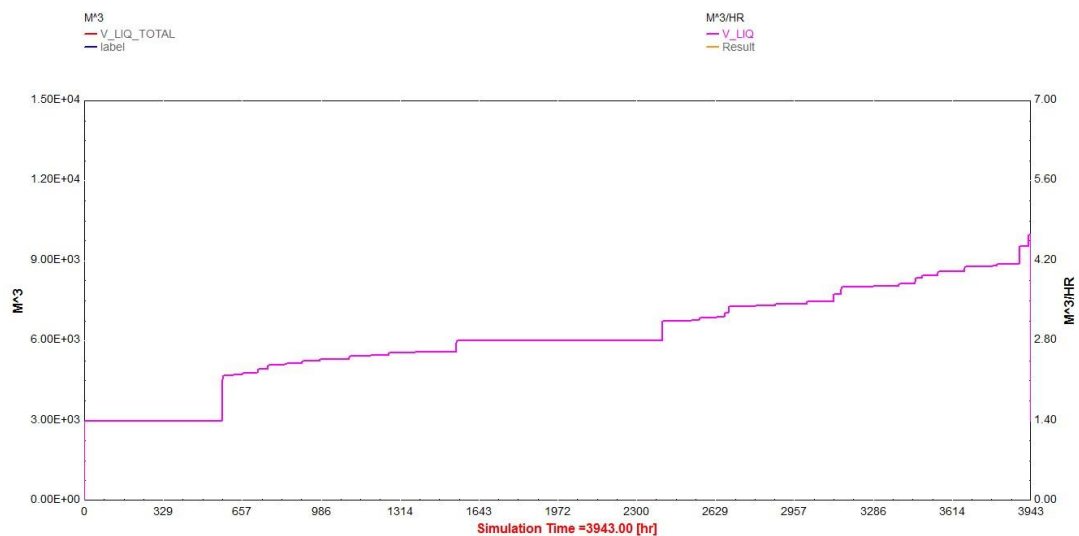
Διάγραμμα 6.6: Φορτία που αναλαμβάνουν να καλύψουν οι κυψέλες καυσίμου

Κατόπιν τα φορτία των GenSets οδηγούνται στο μοντέλο των Switchboard όπου και υπολογίζεται βάσει του εύρους λειτουργίας που θέσαμε ο αριθμός των GenSets που θα λειτουργήσει και η ισχύς που θα παραλάβει το καθένα η οποία είναι η ίδια λόγω παραλληλισμού.



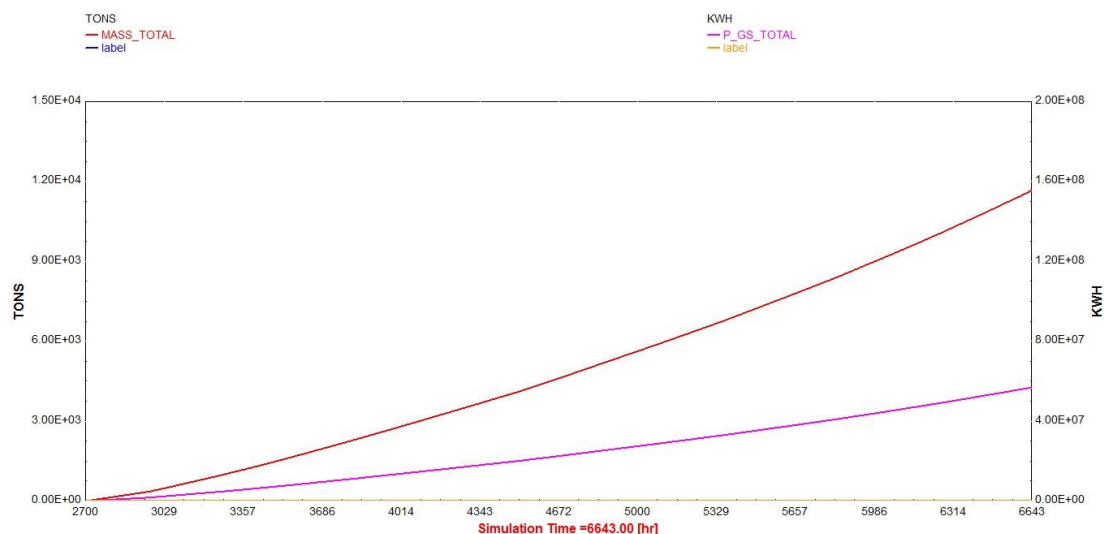
Διάγραμμα 6.7: Αριθμός ενεργών GenSets και παραγωγή ισχύος του καθενός

Τ' αποτελέσματα αυτά αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για το μοντέλο των GenSets όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.1 του οποίου οι δικές του έξοδοι-αποτελέσματα είναι η συνολική κατανάλωση ανά ώρα του συνόλου των ενεργών GenSets :



Διάγραμμα 6.8: Συνολική κατανάλωση καυσίμου των GenSets ανά ώρα

Τέλος τ' αποτελέσματα αυτά εισέρχονται στον Ολοκληρωτή όπου γίνεται το ολοκλήρωμα των των καλυπτόμενων φορτίων και η συνολική κατανάλωση καυσίμου στη χρονική διάρκεια που αναφέραμε:

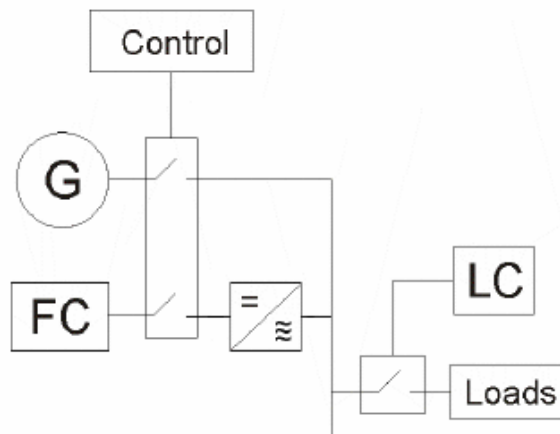


Διάγραμμα 6.9: Διάγραμμα ολοκλήρωσης συνολικής παραγόμενης ενέργειας και κατανάλωσης καυσίμου

Από το αρχείο των συνολικά απαιτούμενων φορτίων τα GenSets καλύπτουν τα φορτία ώστε να λειτουργούν εντός του εύρους που σε κάθε σενάρια έχουμε θέσει. Εάν υπάρξουν φορτία τα οποία δεν καλύπτονται εντός αυτού του εύρους μέσω συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αφαιρούνται και αποθηκεύονται σε ένα αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου. Στη προσομοίωση αυτή υπολογίζονται πόσα θα είναι σε κάθε στιγμή τα ενεργά GenSets και το ποσό της ισχύος του καθενός. Μέσω του αρχείου της κατανάλωσης καυσίμου που έχει φτιαχτεί για κάθε εύρος λειτουργίας υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση του καυσίμου και μέσω αυτής οι εκπομπές ρύπων. Η προσομοίωση αυτή θα «τρέξει» τόσο για καύσιμο MDO όσο και για LNG για τα ίδια εύρη λειτουργίας μηχανών.

6.2 Κυψέλες Καυσίμου

Η σκέψη για την χρήση των κυψελών καυσίμου είναι να λειτουργούν κατά τις απαιτήσεις φορτίου όπου εάν γινόταν η εξυπηρέτηση τους αποκλειστικά και μόνο μέσω των GenSets η απόδοση των δευτέρων δε θα ήταν οικονομική. Το μοντέλο κυψελών καυσίμου που έχουμε επιλέξει είναι της Siemens Sinavyn και ο τύπος της σειράς FCM που θα χρησιμοποιηθεί είναι το FCM34. Ο αριθμός των στοιχείων αυτών που θα χρησιμοποιηθεί ανά σενάριο προσομοίωσης τους καθορίζεται από το εύρος λειτουργίας που έχουμε θέσει για τα GenSets στο αντίστοιχο σενάριο. Από το αρχείο που δημιουργήθηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των GenSets παίρνουμε την ισχύ των φορτίων που θα καλύψουν οι κυψέλες καυσίμου. Κατόπιν η ισχύς αυτή θα πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή 1,1 ώστε να συμπεριληφθεί και η ισχύς που απαιτείται να δοθεί στο σύνολο των συστημάτων προκειμένου να λειτουργήσουν οι κυψέλες καυσίμου όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3. Η ισχύς θα ισομοιράζεται μεταξύ των κυψελών αυτών ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ως αποτέλεσμα της χαμηλής έντασης ρεύματος που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου. Για την μετατροπή από εναλλασσόμενο ρεύμα σε σταθερό της τάσης των κυψελών θα χρησιμοποιηθούν ηλεκτρονικά ισχύος (inverter και converter) των οποίων η λειτουργία προσομοιώνει την συνολικά απαιτούμενη παραγόμενη ισχύ των κυψελών ώστε να καλυφθεί αυτή η απαίτηση. Η μετατροπή αυτή θα οδηγήσει σε απώλειες ισχύος οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος της ισχύος που οφείλει να καλυφθεί κάθε στιγμή [15].



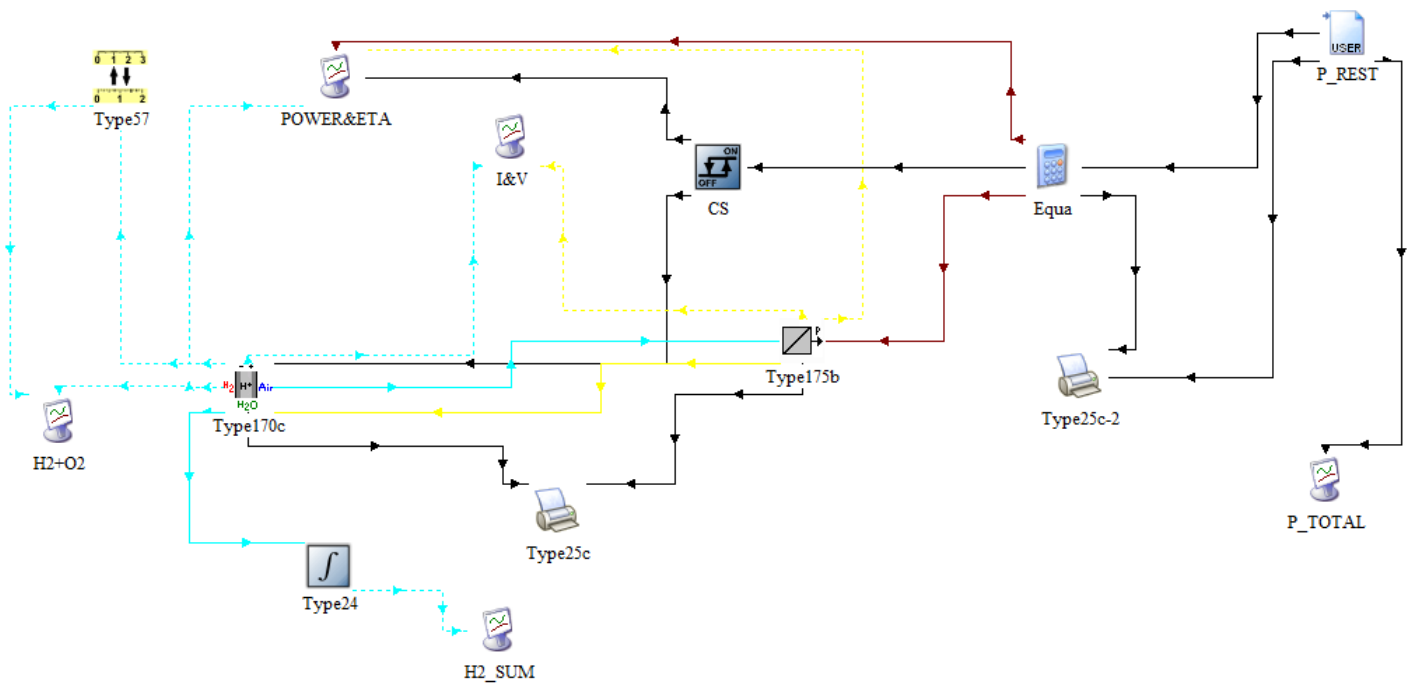
Εικόνα 6.2: Σύστημα αυτομάτου ελέγχου για την λειτουργία των κυψελών καυσίμου σε σχέση με τα GenSets

Η προσομοίωση λειτουργίας των FCM34 είναι ασφαλώς ανεξάρτητη του τύπου του καυσίμου που χρησιμοποιούμε στην παραπάνω προσομοίωση ως εκ τούτου θα έχουμε μία σειρά αποτελεσμάτων. Τα σενάρια που προκύπτουν από τη παραπάνω προσομοίωση είναι:

Πίνακας 6.10: Συνολικά εγκατεστημένο πλήθος FCM34 ανά σενάριο λειτουργίας των GenSets

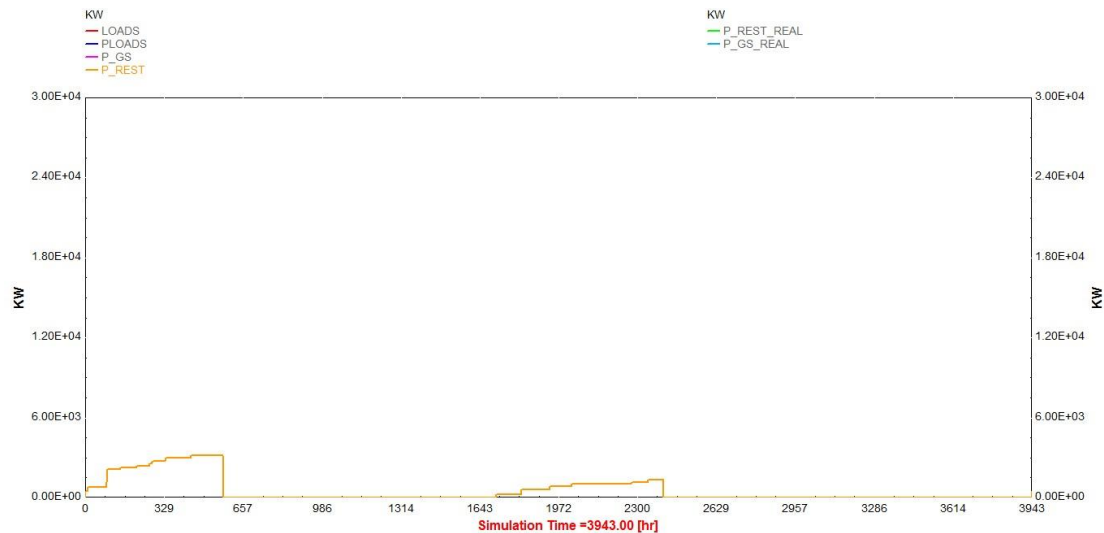
A/A Σεναρίου	Εύρος Ισχύος KW	Μέγιστο Φορτίο για Κυψέλες Καυσίμου KW	Συνολικά Απαιτούμενο Φορτίο KW	Πλήθος FCM34
1 (60-95%)	8820-6982,5	1837,5	2021,25	60
2 (60-90%)	8820-6615	2205	2425,5	72
3 (65-95%)	9555-6982,5	2572,5	2829,75	84
4 (65-90%)	9555-6615	2940	3234	96
5 (70-95%)	10290-6982,5	3307,5	3638,25	108
6 (70-90%)	10290-6615	3675	4042,5	119

Η προσομοίωση στο TRNSYS Studio παρουσιάζεται παρακάτω:



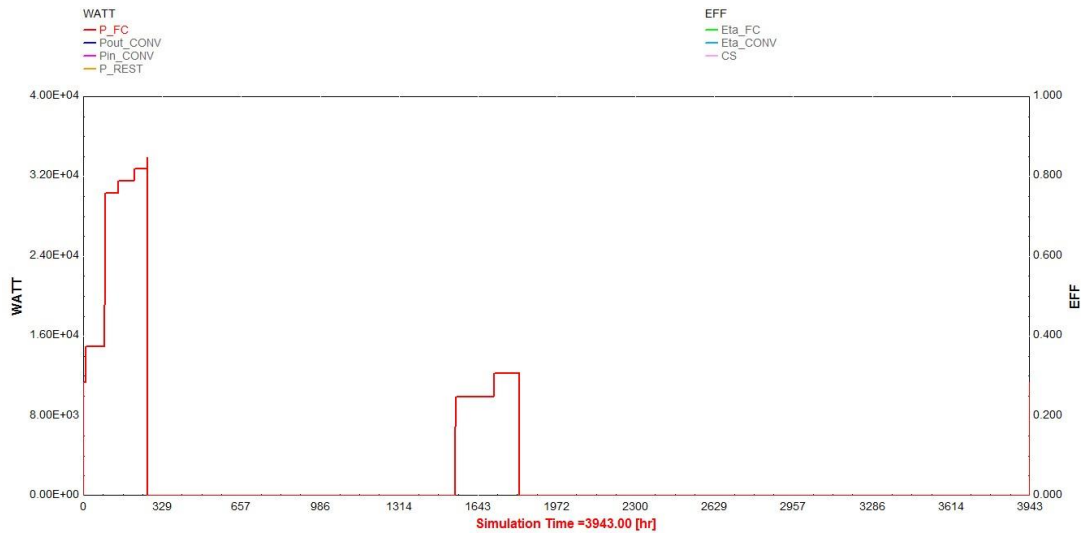
Εικόνα 6.3: Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης των κυψελών καυσίμου στο TRNSYS Studio

Τα φορτία που θα καλύψουν οι κυψέλες καυσίμου εισέρχονται στην προσομοίωση μέσω ενός Data Reader ο οποίος διαβάζει τα αρχεία που έχουν εξαχθεί στο Printer της προσομοίωσης των GenSets στο αντίστοιχο σενάριο.



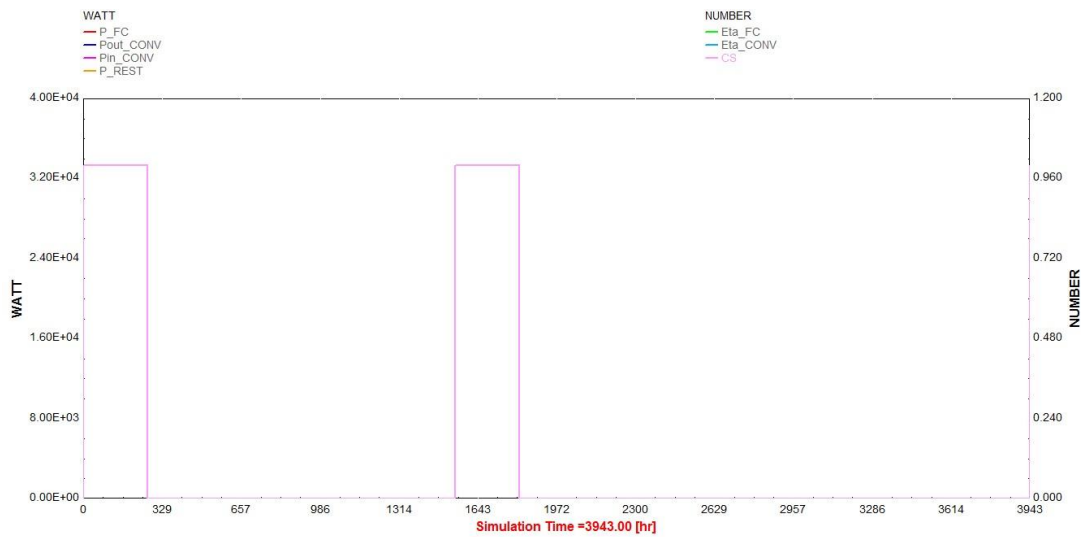
Διάγραμμα 6.10: Φορτία που θα καλυφθούν μέσω των FCM34

Η απαίτηση αυτή ισχύος και πολλαπλασιαζόμενη με 1,1 για την κάλυψη της ισχύς των συστημάτων για την λειτουργία των κυψελών καυσίμου και θεωρώντας πως ισομοιράζεται σε αυτές λόγω παραλληλισμού εισέρχεται στο EQUA όπου γίνεται η διαίρεση με τον αντίστοιχο αριθμό των FCM34. Έτσι προκύπτει η ανά FCM34 απαιτούμενη ισχύς.



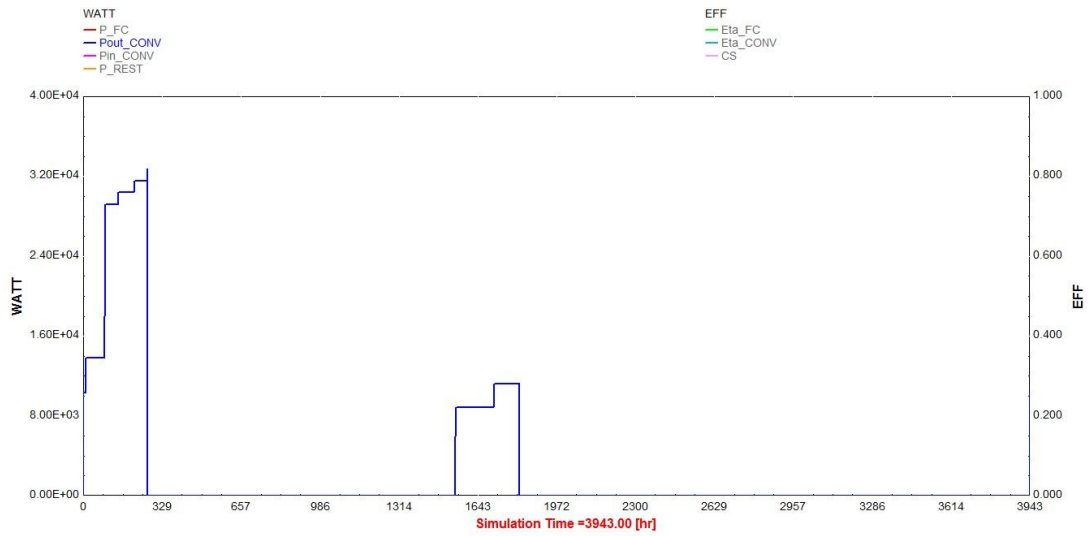
Διάγραμμα 6.11: Απαιτούμενη ισχύς ανά FCM34

Τα φορτία αυτά όταν είναι μηδενικά δίνεται εντολή από το διαφορικό ελεγκτή CS να σταματήσει την λειτουργία των fuel cells ώστε να μην καταναλώνεται καύσιμο σε φάση stand-by. Τα φορτία έπειτα από το EQUA οδηγούνται στον converter αποτελώντας την ενέργεια που μετασχηματίζεται μέσω αυτού σε εναλλασόμενη ώστε ν' απορροφηθεί από τα φορτία.



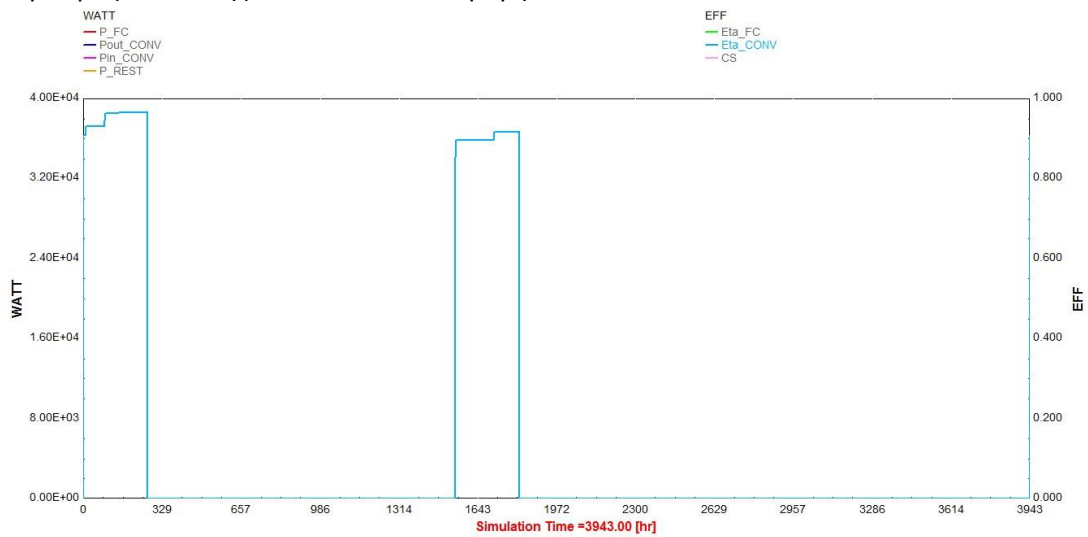
Διάγραμμα 6.12: Λειτουργία διαφορικών ελεγκτών

Θέτοντας σαν τάση εξόδου ίση με 800VOLT μας δίνεται η ισχύ που εισέρχεται στον converter που δεν είναι άλλη από εκείνη που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου . Η παραγόμενη ισχύς από τα fuel cells που αποτελεί ταυτοχρόνως τα εισερχόμενα δεδομένα στον converter είναι:



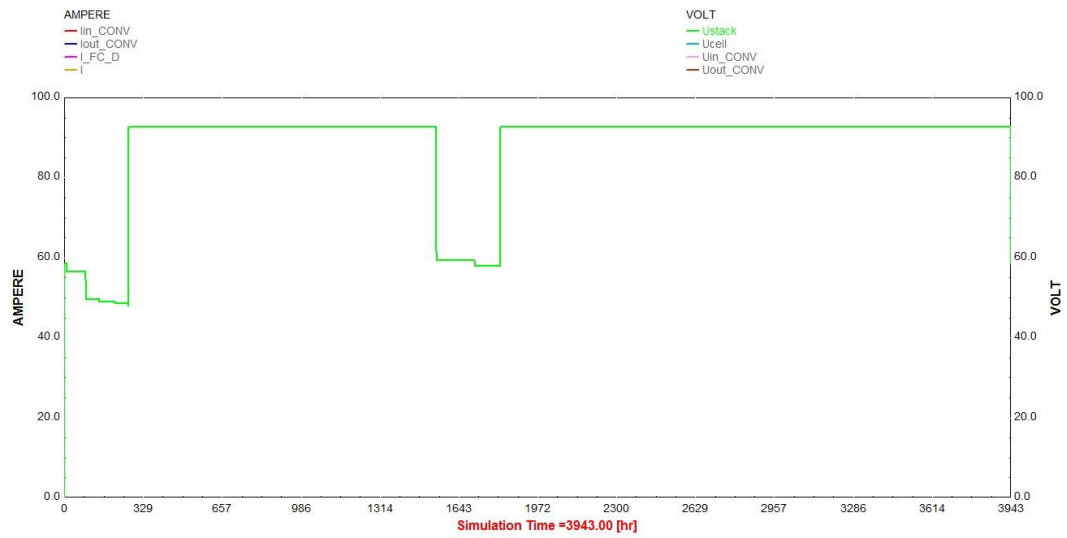
Διάγραμμα 6.13: Μετατρεπόμενη ισχύς σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος από το converter

Ο βαθμός απόδοσης του converter διαμορφώνεται:

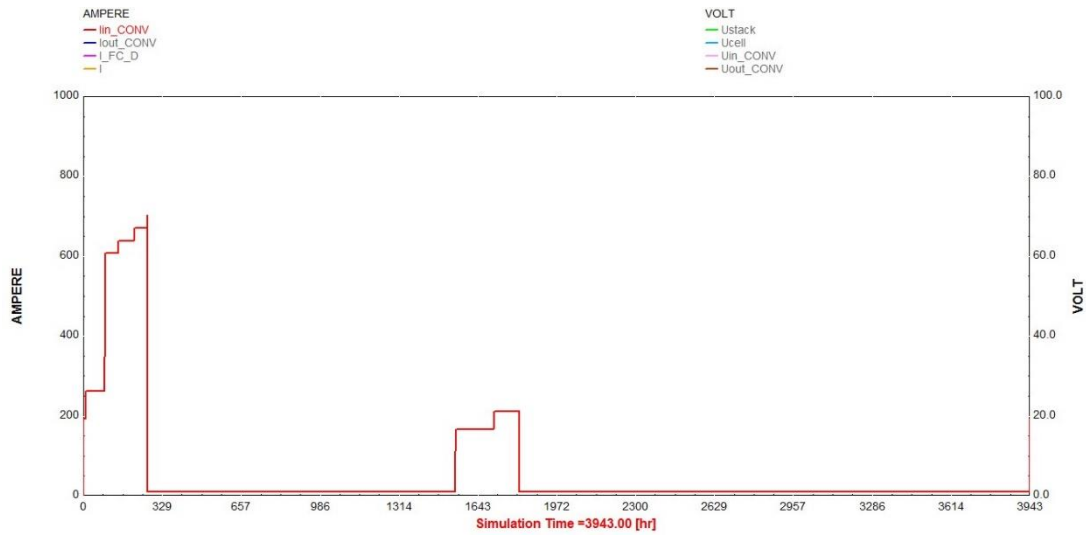


Διάγραμμα 6.14: Βαθμός απόδοσης του converter

Ενώ η τάση και το ρεύμα που παράγεται σε κάθε FCM34 είναι:

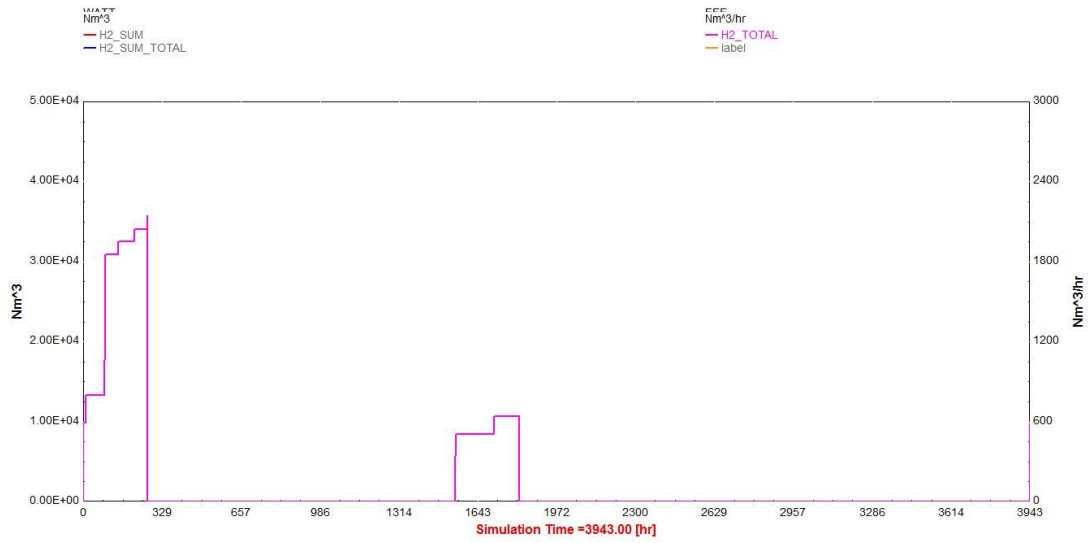


Διάγραμμα 6.15: Τάση των FCM34



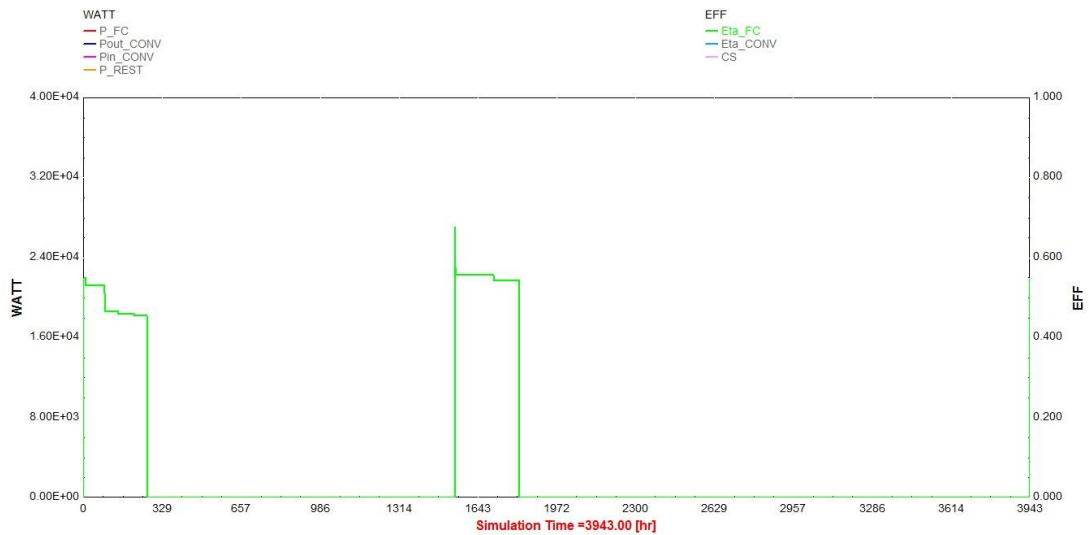
Διάγραμμα 6.16: Παραγόμενο ρεύμα από τις FCM34

Η συνολική κατανάλωση H₂ σε Nm³ για το σύνολο των FCM34 είναι:



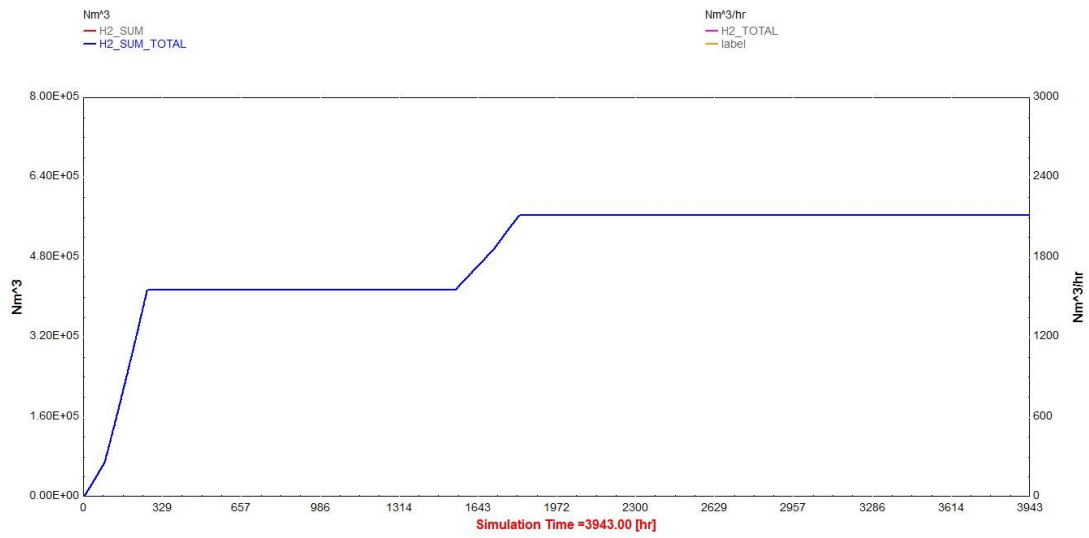
Διάγραμμα 6.17: Συνολική κατανάλωση υδρογόνου κατ' όγκον σε κανονικές συνθήκες από τις FCM34

Ενώ ο βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου είναι:



Διάγραμμα 6.18: Βαθμός απόδοσης κυψελών καυσίμου

Χρησιμοποιώντας Ολοκληρωτή όπως και στην προσομοίωση των GenSets υπολογίζουμε το άθροισμα της κατανάλωσης καυσίμου H₂ για την διάρκεια της λειτουργίας του πλοίου ανά έτος:

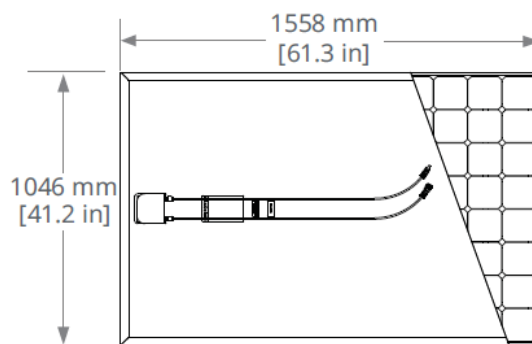


Διάγραμμα 6.19: Συνολική κατανάλωση υδρογόνου από τις κυψέλες καυσίμου για την διάρκεια λειτουργίας του πλοίου ανά έτος

6.3 Προσομοίωση Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Η παραγωγή από τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση χρησιμοποιείται άμεσα από τις ξενοδοχειακές απαιτήσεις. Η παραγωγή αυτή θα μπορούσε ν' αφαιρεθεί από τ' απαιτούμενα προς κάλυψη φορτία μέσω των GenSets και των Fuel Cells όμως δεν υπάρχει χρονική κατάταξη των φορτίων αυτών. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός της μικρής συνεισφοράς της παραγωγής από φ.β. για την κάλυψη του συνόλου των φωτοβολταϊκών αναγκών μας οδήγησε στην απόφαση να εξετάσουμε χωριστά την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στο κρουαζιερόπλοιο ως ένα εν δυνάμει μέσω εξοικονόμησης ενέργειας .

Για την προσομοίωση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης θα χρησιμοποιηθεί μοντέλο καιρού. Η θέση του κρουαζιερόπλοιού βέβαια εντός της Βαλτικής όπου εκτελεί δρομολόγια δεν είναι σταθερή ως εκ τούτου θα χρησιμοποιήσουμε τα μέσα ετήσια κλιματικά δεδομένα αρχικά για τη πόλη της Στοκχόλμης και έπειτα για λόγους σύγκρισης εκείνα της Αθήνας για λειτουργία στο Αιγαίο. Η ισχύς που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία ,όπως είπαμε, καταναλώνεται άμεσα για κάλυψη ξενοδοχειακών αναγκών. Τα πανελ θεωρείται ότι είναι τοποθετημένα στην οροφή των decks υπό μηδενική κλίση. Η κλίση αυτή μας προσφέρει επιπλέον την ευκολία στη προσομοίωση της συμπεριφοράς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καθόσον δεν απαιτείται να θέσουμε χρονικά διαστήματα με συγκεκριμένους προσανατολισμούς. Στο πλοίο που έχει διαστάσεις μήκους 176.9m και πλάτους 28.6m θεωρούμε πως περίπου 10% της επιφάνειας των decks μπορεί να είναι διαθέσιμο ώστε να καλυφθεί με φωτοβολταϊκα πάνελς . Βάσει των διαστάσεων των πανελς θεωρούμε πως θα τοποθετηθούν 280 φωτοβολταϊκά πάνελ



Εικόνα 6.4: Διαστάσεις του SPR-X21-345

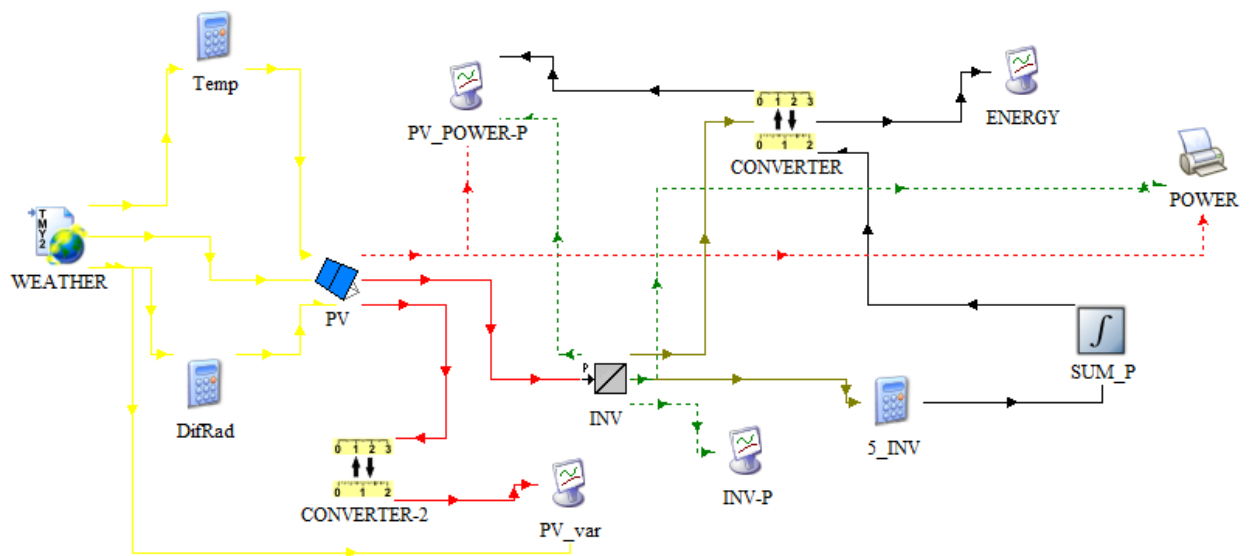
τύπου SPR-X21-345 ονομαστικής ισχύος 345watt έκαστος συνεπώς η συνολική ισχύς της εγκατάστασης ανέρχεται στα 96,6 kw. Για την μετατροπή του συνεχόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενο θα χρησιμοποιηθούν 5 inverter τύπου SMA τύπου 20000TL ισχύος 20kw έκαστος των οποίων οι έξοδοι θα οδηγηθούν στο μετασχηματιστή ρεύματος ώστε να μετατραπούν σε 6600Volt. Η διέλευση της ισχύος δια μέσου των στοιχείων αυτών θα προκαλέσει απώλειες και θα μειώσει τη διαθέσιμη από τα φ.β. πανελς ισχύ. Το ποσό των απωλειών αυτών εξαρτάται από τη ισχύ που πρέπει να διαχειριστούν και αποτελεί μέρος της προσομοίωσης. Η συνδεσμολογία της εγκατάστασης βασίζεται στο εύρος της εισερχόμενης τάσης στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ο inverter ώστε να γίνεται η μέγιστη απορρόφηση ισχύος δηλ. MPPT. Το εύρος της ισχύος αυτής είναι 320-800Volt και μπορεί να δεχθεί έως 6 εισόδους. Δεδομένου λοιπόν των χαρακτηριστικών των επιλεχθέντων φ.β. πάνελς θα εισέρχονται παράλληλα σε κάθε ένα inverter 4 sting των 14πανελ SPR-X21-345 δηλαδή συνολικά θα είναι συνδεδεμένα 56 φ.β. πανελς ήτοι 19320watt. Η ισχύς αυτή οδηγείται στο μετασχηματιστή ο οποίος έχει τοποθετηθεί σε τέτοιο σημείο ώστε οι διαδρομή των καλωδίων των inverter να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστη.

Στις αποκλίσεις από τη πραγματική λειτουργίας σε σχέση με τη προσομοίωση είναι το γεγονός πως δεν συμπεριλαμβάνεται η ταχύτητα του πλοίου η οποία αυξάνει την απαγωγή θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ αυξάνοντας την ισχύς τους στις εκάστοτε συνθήκες

αλλά στον αντίποδα δεν υπολογίζονται οι αυξημένες επικαθήσεις άλατος στην επιφάνεια οι οποίες έχουν τ' αντίθετα αποτελέσματα.

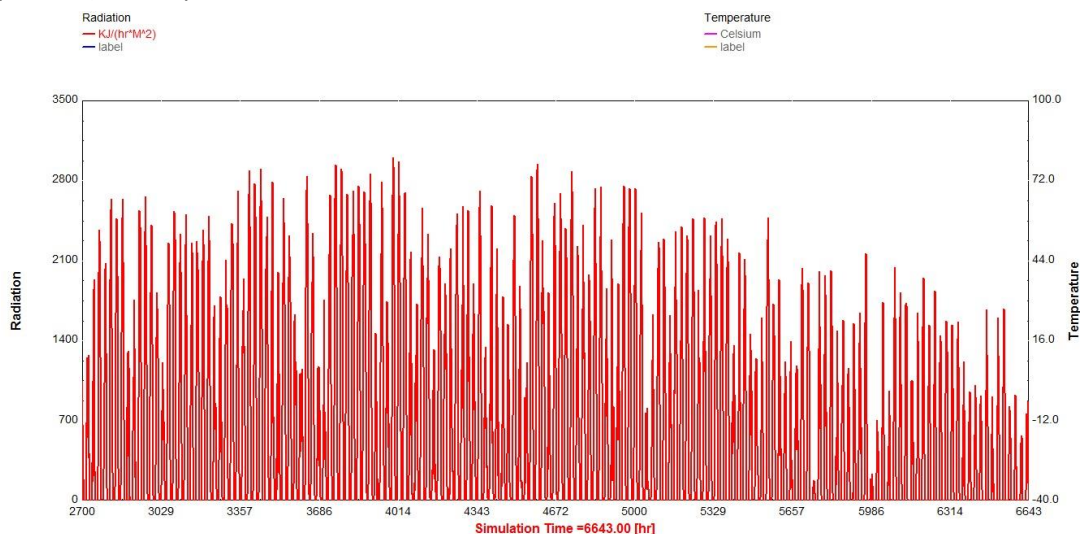
Τέλος στα αποτελέσματα θα αντιπαραβάλουμε το σενάριο το πλοίο να λειτουργεί εντός του Αιγαίου και θ' αντιπαραβάλουμε τα αποτελέσματα.

Για την εκπόνηση των σεναρίων θα χρησιμοποιηθούν ,μιας και η θέση του πλοίου δεν είναι σταθερή, τα κλιματικά δεδομένα της Στοκχόλμης για την κρουαζιέρα στη Βαλτική και της Αθήνας για κρουαζιέρα στο Αιγαίο.



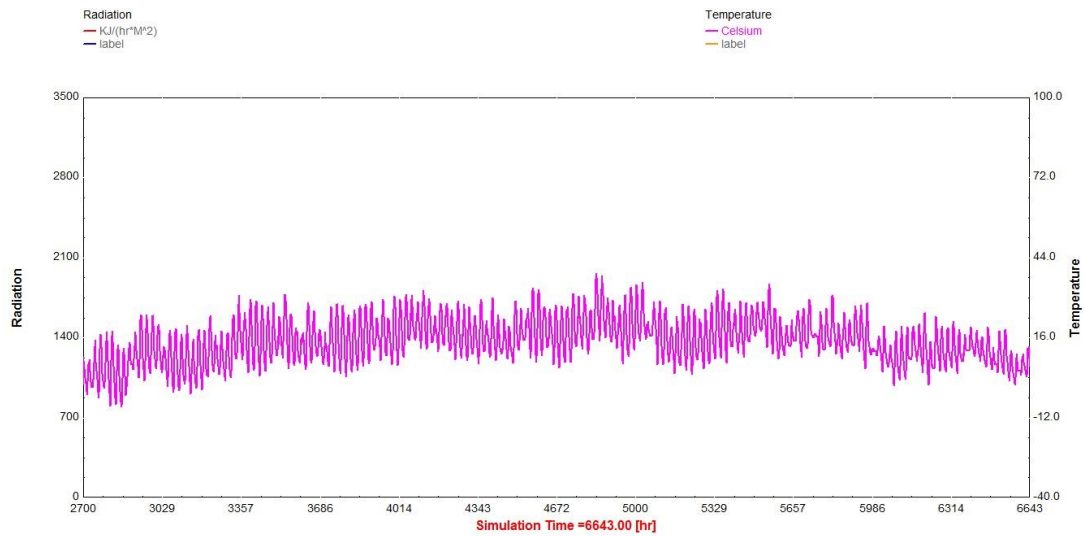
Εικόνα 6.5: Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης των κυψελών καυσίμου στο TRNSYS Studio

Μέσω της προσομοίωσης λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τα κλιματικά δεδομένα της Εδώ οι ώρες για τις οποίες θα γίνει η προσομοίωση είναι από την 2700 έως 6643 . Για τις ώρες αυτές μέσω του στοιχείου Weather παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες κλιματικές τιμές για την πόλη ,αρχικά, της Στοκχόλμης. Από το σύνολο των κλιματικών δεδομένων εμείς θα χρησιμοποιήσουμε την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε $\text{KJ/hr} \cdot \text{m}^2$. Η οποία παρουσιάζεται παρακάτω



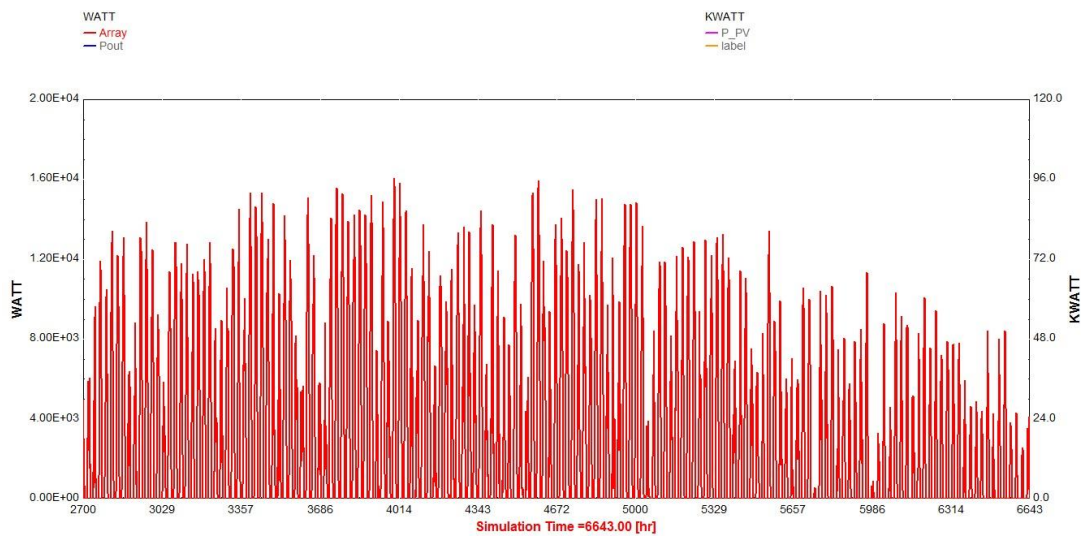
Διάγραμμα 6.20: Προσπίπτουσα ισχύς ανά m^2 φ.β. πάνελ

Την θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε βαθμούς Celsius



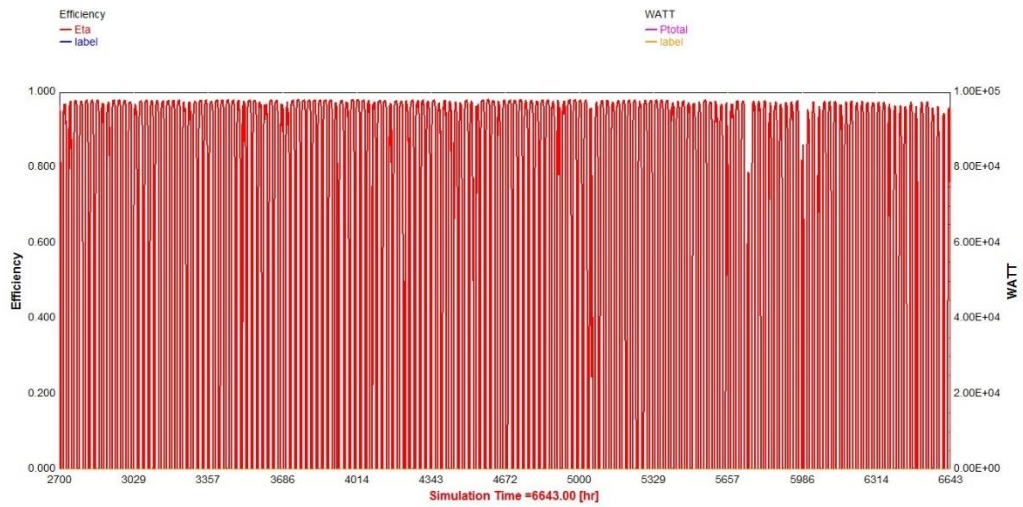
Διάγραμμα 6.21: Μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος Στοκχόλμης

Αυτά καθορίζουν την παραγωγή από τη φ.β. συστοιχία και εισέρχονται στο μοντέλο αυτό. Το στοιχείο αυτό λειτουργεί για το σύνολο των φ.β. ανά Inverter συνεπώς η παραγωγή ισχύος που προκύπτει από τα 4 string των 14 φ.β. πάνελ είναι:



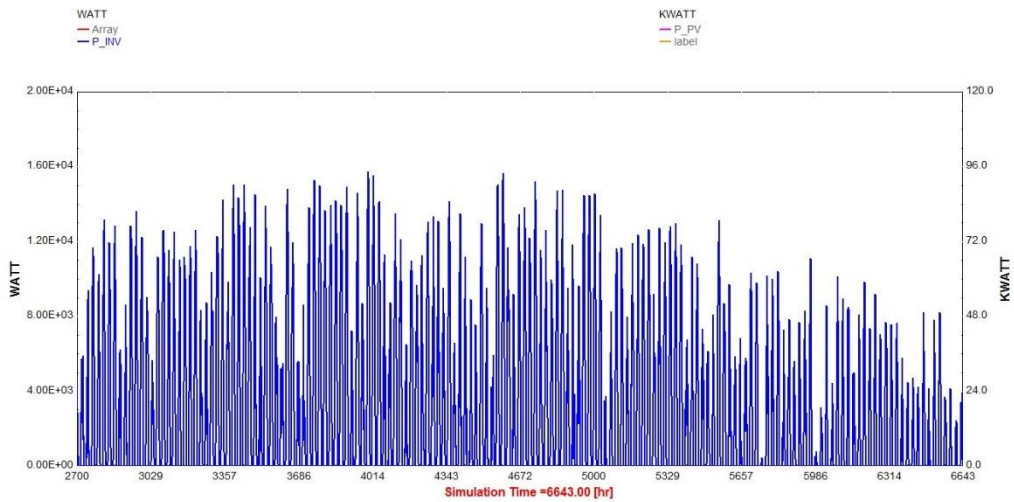
Διάγραμμα 6.22: Συνολική ισχύς που παράγεται από το σύνολο των φ.β. πάνελ

Η παραπάνω ισχύς εισέρχεται στον inverter ώστε να μετασχηματιστεί σε εναλλασσόμενη του οποίου ο βαθμός απόδοσης του είναι:



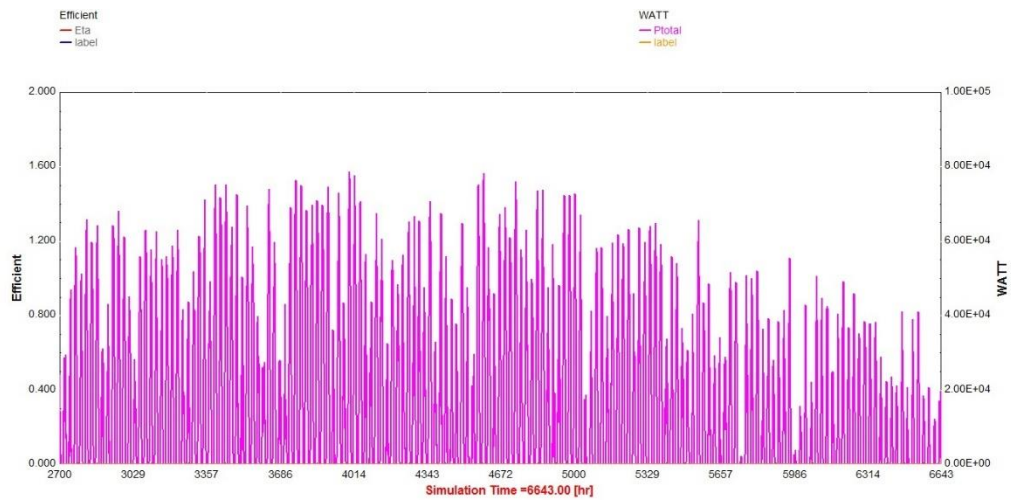
Διάγραμμα 6.23: Βαθμός απόδοσης των inverter

Εν τέλει η διαθέσιμη ισχύς από τον inverter σε watt είναι:



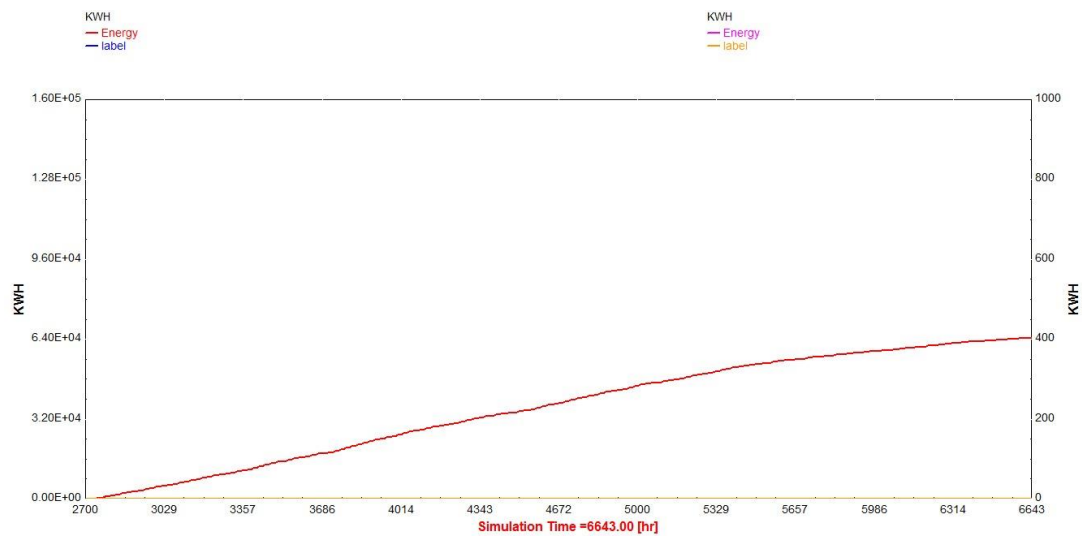
Διάγραμμα 6.24: Ισχύς που μετατρέπεται σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος στον κάθε inverter

Κατόπιν τ' αποτελέσματα αυτά εισέρχονται στο TOTAL όπου και πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό των Inverter δλδ 5 και μας δίνουν τη συνολική παραγόμενη ισχύς.



Διάγραμμα 6.25: Η συνολικά διαθέσιμη από την φ.β. εγκατάσταση ισχύς

Τέλος ολοκληρώνουμε τ' αποτελέσματα αυτά και έχουμε τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια της σεζόν μέσω φ.β.



Διάγραμμα 6.26: Η συνολικά διαθέσιμη ενέργεια από τη φ.β. εγκατάσταση ανά έτος λειτουργίας

Ομοίως η ίδια διαδικασία θα γίνει χρησιμοποιώντας τα κλιματικά δεδομένα της Αθήνας για να προσομοιωθεί η λειτουργία μίας ίδιας φ.β. εγκατάστασης για δρομολόγηση στο Αιγαίο.

7. Αποτελέσματα

Ο στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της κατανάλωσης καυσίμου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός πλήρως ηλεκτρισμένου πλοίου το οποίο λειτουργεί σύμφωνα με τα σενάρια που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο έχοντας ως στόχο την οικονομικότερη λειτουργία των μέσων παραγωγής ενέργειας.

7.1. GenSets

Έπειτα από το τρέξιμο των 12 σεναρίων για την λειτουργία των GenSets έχουμε σε επίπεδο παραγωγής ενέργειας και κατανάλωσης καυσίμου τα εξής αποτελέσματα ανά σενάριο λειτουργίας

Για τη λειτουργία με MDO

Πίνακας 7.1:Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας των GenSet με καύσιμο MDO ανά σενάριο προσομοίωσης

A/A Σεναρίου	Συνολική Παραγωγή KWh	Συνολική Κατανάλωση I	Συνολική Κατανάλωση tonns	Μέση Κατανάλωση I/KWh	gr/KWh
MDO 1	57711622	11712892	13161	0,20296	180,6344
MDO 2	57678179	11724822	13174	0,20328	180,9192
MDO 3	57273915	11604341	13039	0,20261	180,3229
MDO 4	56980124	11565822	12995	0,20298	180,6522
MDO 5	55747247	11260555	12652	0,20199	179,7711
MDO 6	54815700	11085516	12456	0,20223	179,9847

Για τη λειτουργία με LNG

Πίνακας 7.2:Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας των GenSet με καύσιμο LNG ανά σενάριο προσομοίωσης

A/A Σεναρίου	Συνολική Παραγωγή KWh	Συνολική Κατανάλωση Nm ³	Συνολική Κατανάλωση tonns	Μέση Κατανάλωση Nm ³ /KWh	KJ/KWh	gr/KWh
LNG 1	57711622	11285985	8803	0,19556	7321,702	152,53
LNG 2	57678179	11312477	8824	0,19613	7343,143	152,98
LNG 3	57273915	11151205	8698	0,19470	7289,551	151,87
LNG 4	56980124	11130426	8682	0,19534	7313,483	152,36
LNG 5	55747247	10778264	8407	0,19334	7238,711	150,81
LNG 6	54815700	10604428	8271	0,19346	7242,994	150,90

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω αποτελέσματα σε συνδυασμό με τους συντελεστές εκπομπής ρύπων που είναι:

Πίνακας 7.3: Συντελεστές εκπομπών ανά τύπο καυσίμου

	kg CO2/kg fuel	kg NOX/kg fuel	kg SOX/kg fuel	kg PM/kg fuel
MDO	3,206	0,08725	0,00264	0,00102
LNG	2,75	0,00783	0,00002	0,00018

Οι συνολικές εκπομπές κατά τη διάρκεια μίας σεζόν είναι:

Για καύσιμο MDO

Πίνακας 7.4: Συνολικές εκπομπές για λειτουργία με MDO

A/A Σεναρίου	CO2 [tn]	SOX [tn]	NOX [tn]	PM [tn]
MDO 1	33420,86	27,52	909,54	10,63
MDO 2	33454,90	27,55	910,46	10,64
MDO 3	33111,13	27,27	901,11	10,53
MDO 4	33001,22	27,18	898,11	10,50
MDO 5	32130,19	26,46	874,41	10,22
MDO 6	31630,75	26,05	860,82	10,06

Για καύσιμο LNG

Πίνακας 7.5: Συνολικές εκπομπές για λειτουργία με LNG

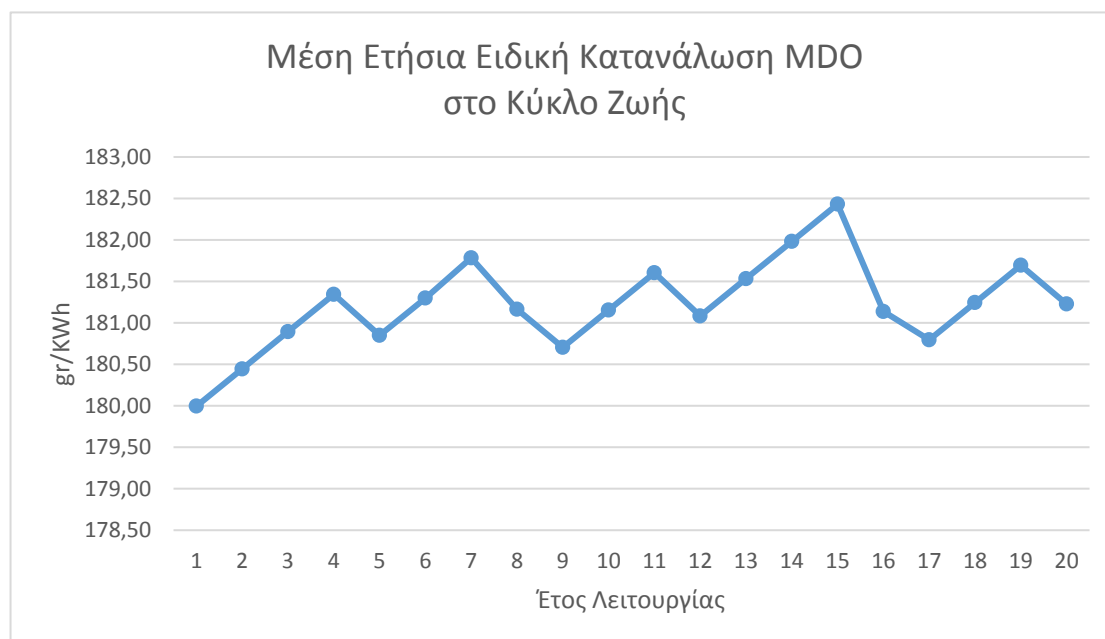
A/A Σεναρίου	CO2 [tn]	SOX [tn]	NOX [tn]	PM [tn]
LNG 1	24208,44	0,18	68,93	1,58
LNG 2	24265,26	0,18	69,09	1,59
LNG 3	23919,34	0,17	68,10	1,57
LNG 4	23874,76	0,17	67,98	1,56
LNG 5	23119,38	0,17	65,83	1,51
LNG 6	22746,5	0,17	64,77	1,49

Βασιζόμενοι στα διαγράμματα της γήρανσης της μηχανής 4.9 και 4.10 που δίνουν την ποσοστιαία αύξηση της κατανάλωσης βάσει των ωρών λειτουργίας ,με την προϋπόθεση πως οι συντηρήσεις γίνονται σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή, και ανάγοντάς τα σε ετήσια βάσει για μέση κατανάλωση εκείνη του σεναρίου 5 ,που είναι και η μικρότερη, για MDO 179,77 gr/KWh και LNG 150,81 gr/KWh έχουμε:

Για καύσιμο MDO

Πίνακας 7.6: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με MDO

ΕΤΟΣ	ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ (%)	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ MDO
1	0,125	179,99
2	0,375	180,44
3	0,625	180,89
4	0,875	181,34
5	0,6	180,85
6	0,85	181,30
7	1,12	181,78
8	0,775	181,16
9	0,52	180,70
10	0,77	181,15
11	1,02	181,60
12	0,73	181,08
13	0,98	181,53
14	1,23	181,98
15	1,48	182,43
16	0,76	181,14
17	0,57	180,79
18	0,82	181,24
19	1,07	181,69
20	0,81	181,23

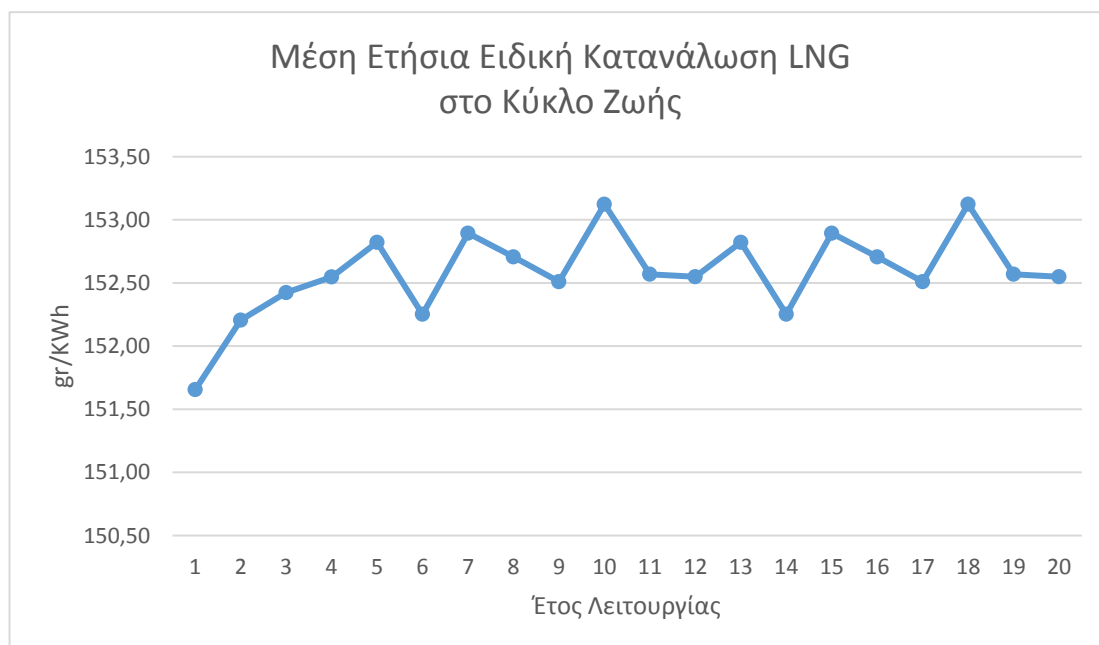


Διάγραμμα 7.1: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με MDO

Για καύσιμο LNG

Πίνακας 7.7: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με LNG

ΕΤΟΣ	ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ LNG
1	0,56	151,65
2	0,9255	152,21
3	1,07	152,42
4	1,152	152,55
5	1,334	152,82
6	0,956	152,25
7	1,3818	152,89
8	1,2575	152,71
9	1,127	152,51
10	1,534	153,12
11	1,166	152,57
12	1,153	152,55
13	1,334	152,82
14	0,956	152,25
15	1,3818	152,89
16	1,2575	152,71
17	1,127	152,51
18	1,534	153,12
19	1,166	152,57
20	1,153	152,55



Διάγραμμα 7.2: Μέση ειδική κατανάλωση ανά έτος για λειτουργία με LNG

Θεωρώντας πως έχουμε μια ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα GenSets ίση με εκείνη του σεναρίου 5 δηλαδή 55747247KWh οι εκπομπές ανάλογα το τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιούμε για τον κύκλο ζωής του πλοίου είναι:

Πίνακας 7.8: Εκπομπές των GeneSets για MDO και LNG ανά έτος βάσει αποτελεσμάτων του Σεναρίου 5

Τύπος Καυσίμου	Μάζα Καυσίμου [tn]	CO2 [tn]	NOX [tn]	SOX [tn]	PM [tn]
MDO	202047,6	647764,7	17628,7	533,4	206,1
LNG	170122,7	467837,5	1332,1	3,4	30,6

Η μείωση των εκπομπών στο κύκλο ζωής του κρουαζιεροπλοίου για χρήση LNG αντί για MDO είναι:

Πίνακας 7.9: Απόλυτη και ποσοστιαία διαφορά εκπομπών για λειτουργία με MDO και LNG βάσει των αποτελεσμάτων του Σεναρίου 5

	CO2 [tn]	NOX [tn]	SOX [tn]	PM [tn]
Διαφορά Εκπομπών	179927,2	16296,6	530,0	175,5
Ποσοστιαία Διαφορά Εκπομπών	27,78%	92,44%	99,36%	85,14%

7.2 Κυψέλες Καυσίμου

Η κατανάλωση καυσίμου H₂ ανά παραγόμενη kWh σε κάθε σενάριο λαμβάνοντας υπόψιν ότι η πυκνότητα είναι ίση με 0,0899 kg/Nm³ είναι:

Πίνακας 7.10: Κατανάλωση εγκατάστασης κυψελών καυσίμου στο σύνολο της ετήσιας λειτουργίας του πλοίου

A/A Σεναρίου	Συνολική Ενέργεια για Κάλυψη Φορτίων [KWh]	Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου [Nm ³]	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου gr/KWh
1 (60-95%)	73748	46886,0	57,14
2 (60-90%)	107190	72197,6	60,54
3 (65-95%)	466958	334807,3	64,44
4 (65-90%)	805245	565980,7	63,17
5 (70-95%)	2038122	1443129,4	63,64
6 (70-90%)	2969669	2237679,0	67,73

Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και ως εκ τούτου η ειδική κατανάλωση επηρεάζεται αρνητικά από την αύξηση του ρεύματος που παράγει. Η ειδική κατανάλωση διαμορφώνεται σε τιμές περί των 65 gr/KWh για τα φορτία που κάθε φορά αναλαμβάνει αποτελώντας σε κάθε περίπτωση μια πιθανοκρατική τιμή για τα εύρη τιμών που λειτουργούν. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου καθιστά αποδοτική τη λειτουργία των GenSets διότι εάν δεν υπήρχαν εκείνες τα φορτία αυτά θα εξυπηρετόνταν με λειτουργία της μηχανής σ' ένα εύρος ποσοστού φόρτισης μεταξύ του 25-60% όπου έχουμε αυξημένη ειδική κατανάλωση. Βασιζόμενοι στις τιμές του Πίνακα 4.4 η μέση τιμή ειδικής κατανάλωσης σ' αυτό το εύρος τιμών είναι περί τα 192 gr ανά παραγόμενη KWh ενώ για λειτουργία με LNG η αντίστοιχη ειδική κατανάλωση είναι 170,42 gr ανά παραγόμενη KWh θεωρώντας το τυποποιημένο καύσιμο του IMO και για ειδική κατανάλωση βάσει του Πίνακα 4.8 ίση με 8180 KJ/KWh. Βάσει αυτού η προσφορά των κυψελών καυσίμου ανά σενάριο λειτουργίας είναι: Για καύσιμο MDO

Πίνακας 7.11: Εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση εκπομπών λόγω χρήσης των κυψελών καυσίμου ανά σενάριο για καύσιμο MDO

A/A Σεναρίου MDO	Εξοικονόμηση Καυσίμου [tn]	Μείωση Εκπομπών CO ₂ [tn]	Μείωση Εκπομπών SOX [tn]	Μείωση Εκπομπών NOX [tn]	Μείωση Εκπομπών PM [tn]
1 (60-95%)	14,16	45,40	0,04	1,24	0,014
2 (60-90%)	20,58	65,98	0,05	1,80	0,021
3 (65-95%)	89,66	287,44	0,24	7,82	0,091
4 (65-90%)	154,61	495,67	0,41	13,49	0,158
5 (70-95%)	391,32	1254,57	1,03	34,14	0,399
6 (70-90%)	570,18	1827,99	1,51	49,75	0,582

Η ποσοστιαία εξοικονόμηση καυσίμου και άρα και ρύπων είναι:

Πίνακας 7.12: Ποσοστιαία εξοικονόμηση καυσίμου και μείωσης ρύπων ανά σενάριο προσομοίωσης με MDO

A/A Σεναρίου MDO	Φορτίο Κάλυψης από τις κυψέλες καυσίμου	Εξοικονόμηση Καυσίμου και Μείωση Εκπομπών
1 (60-95%)	0,13%	0,14%
2 (60-90%)	0,19%	0,20%
3 (65-95%)	0,81%	0,86%
4 (65-90%)	1,39%	1,48%
5 (70-95%)	3,53%	3,76%
6 (70-90%)	5,14%	5,46%

Για καύσιμο LNG

Πίνακας 7.13: Εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση εκπομπών λόγω χρήσης των κυψελών καυσίμου ανά σενάριο για καύσιμο MDO

A/A Σεναρίου LNG	Εξοικονόμηση Καυσίμου [tn]	Μείωση Εκπομπών CO2 [tn]	Μείωση Εκπομπών SOX [tn]	Μείωση Εκπομπών NOX [tn]	Μείωση Εκπομπών PM [tn]
1 (60-95%)	12,57	34,56	0,0003	0,0984	0,0023
2 (60-90%)	18,27	50,24	0,0004	0,1430	0,0033
3 (65-95%)	79,58	218,84	0,0016	0,6231	0,0143
4 (65-90%)	137,23	377,38	0,0027	1,0745	0,0247
5 (70-95%)	347,34	955,18	0,0069	2,7196	0,0625
6 (70-90%)	506,09	1391,75	0,0101	3,9627	0,0911

Η ποσοστιαία εξοικονόμηση καυσίμου και άρα και ρύπων είναι:

Πίνακας 7.14: Ποσοστιαία εξοικονόμηση καυσίμου και μείωσης ρύπων ανά σενάριο προσομοίωσης με LNG

A/A Σεναρίου LNG	Φορτίο Κάλυψης από τις κυψέλες καυσίμου	Εξοικονόμηση Καυσίμου και Μείωση Εκπομπών
1 (60-95%)	0,13%	0,14%
2 (60-90%)	0,19%	0,21%
3 (65-95%)	0,81%	0,91%
4 (65-90%)	1,39%	1,56%
5 (70-95%)	3,53%	3,97%
6 (70-90%)	5,14%	5,77%

Ο λόγος της ελαφρώς αυξημένης ποσοστιαίας εξοικονόμησης καυσίμου σε λειτουργία με LNG είναι πως η ειδική κατανάλωση με αυτό το καύσιμο είναι ποσοστιαία μεγαλύτερη στις περιοχές φόρτισης της μηχανής κάτω του 60% απ' ότι με πετρέλαιο.

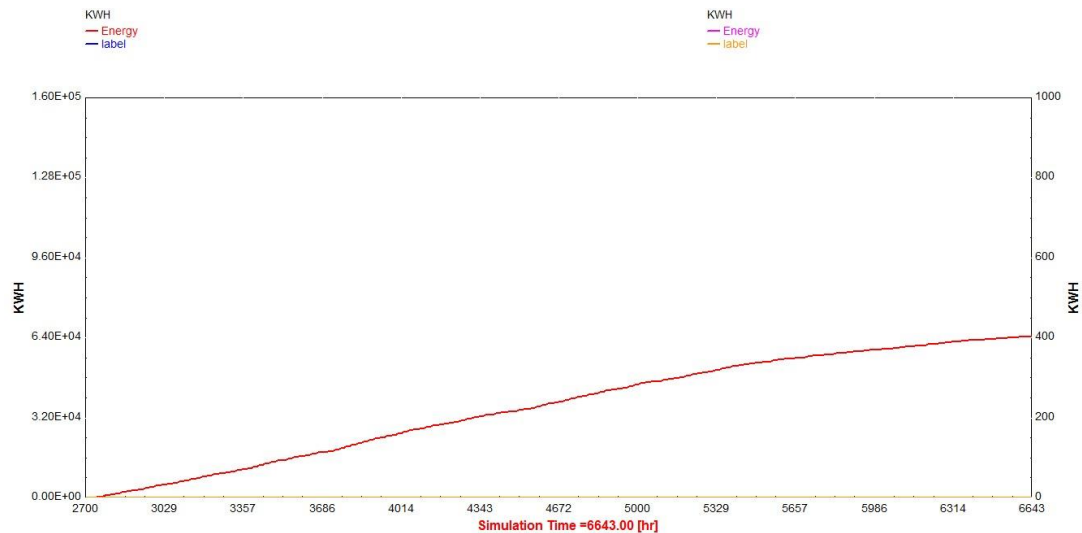
Η γήρανση των κυψελών καυσίμου γίνεται εμφανής με την πτώση της τάσης τους αυξανόμενων των ωρών λειτουργίας. Για το μοντέλο FCM34 η εταιρία Siemens δηλώνει πως

η πτώση αυτή για κάθε κυψέλη είναι μικρότερη των 2μV ανά ώρα λειτουργίας ενώ οι ώρες λειτουργίας της ανέρχονται στις 60000. Από το Σενάριο 5 πήραμε σαν αποτέλεσμα πως λειτουργούν ετήσια για 1431 ώρες. Συνεπώς αυτή η πτώση θα οδηγεί στο τέλος του πρώτου έτους ακόμα και στη δυσμενέστερη περίπτωση σε μείωση κατά 0,002862 volt. Η πτώση αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό μικρότερο του 0,5% και ως εκ τούτου κρίνεται δίχως νόημα η αξιολόγηση της στο επίπεδο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του πλοίου.

7.3 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση

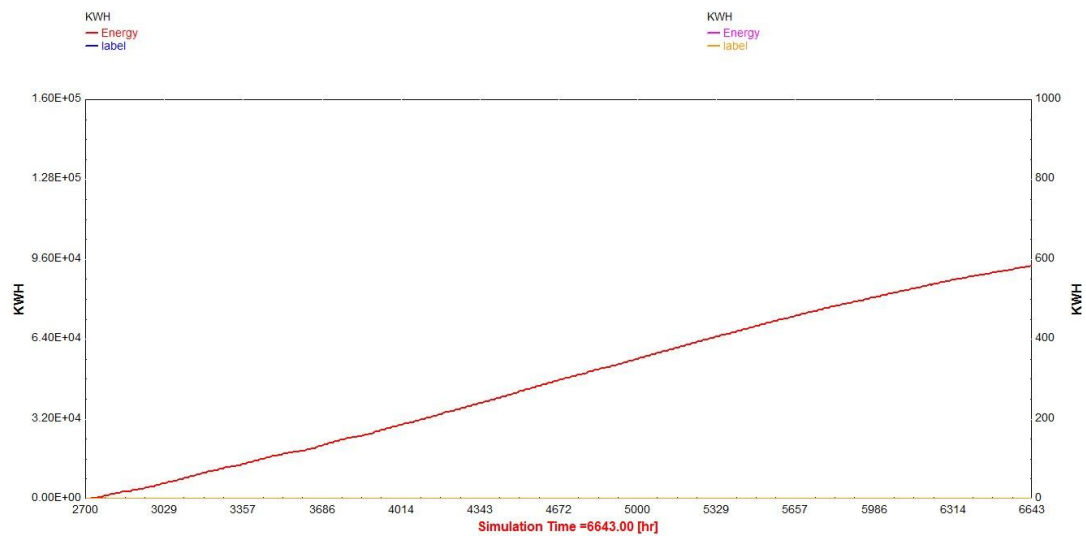
Η σύγκριση όπως είπαμε θα γίνει στη συνολική παραγωγή ενέργειας σε μια εγκατάσταση επί του πλοίου που κάνει δρομολόγια στη Βαλτική και ενός στο Αιγαίο για την χρονική περίοδο που ξεκινά στα τέλη του Απριλίου και τελειώνει στις αρχές του Δεκεμβρίου ανάγοντας την σε ώρες TRNSYS από την 2700^η ως την 6643^η .

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Βαλτική είναι:



Διάγραμμα 7.3: Ετήσια παραγωγή ενέργειας από τη φ.β. εγκατάσταση για κρουαζιερόπλοιο στη Βαλτική

Η παραγωγή στο Αιγαίο είναι:



Διάγραμμα 7.4: Ετήσια παραγωγή ενέργειας από τη φ.β. εγκατάσταση για κρουαζιερόπλοιο στο Αιγαίο

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων για την συνολική παραγωγή ενέργειας:

Πίνακας 7.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης της φ.β.εγκατάστασης για συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ [KWH]
ΒΑΛΤΙΚΗ	64680
ΑΙΓΑΙΟ	93714

Η παραγωγή ενέργειας μέσω της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών είναι της τάξεως του 0,1% του συνόλου της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία του κρουαζιερόπλοιού και αντιστοιχεί ,σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σεναρίου 5 με ειδική κατανάλωση MDO 179,77 gr/kwh και LNG 150,81gr/KWh, σε εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση εκπομπών σε ετήσια βάση :

Πίνακας 7.16: Εξοικονόμηση καυσίμου MDO και μείωση εκπομπών για λειτουργία στη Βαλτική

	MDO [tn]	CO2 [tn]	SOX [tn]	NOX [tn]	PM [tn]
ΒΑΛΤΙΚΗ	11,63	37,286	0,031	1,015	0,012
ΑΙΓΑΙΟ	16,85	54,021	0,044	1,470	0,017

Πίνακας 7.17: Εξοικονόμηση καυσίμου MDO και μείωση εκπομπών για λειτουργία στη Βαλτική

	LNG [tn]	CO2 [tn]	SOX [tn]	NOX [tn]	PM [tn]
ΒΑΛΤΙΚΗ	9,75	26,8125	19,5	0,0764	0,0018
ΑΙΓΑΙΟ	14,13	38,8575	28,26	0,1106	0,0025

Η εγγυημένη παραγόμενη ισχύ που δίνεται από την Sunpower για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που επιλέξαμε για τη προσομοίωση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.16. Βάσει της εγγυημένης ισχύος θα υπολογίσουμε την εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη φ.β. συστοιχία θεωρώντας έτσι το δισμενέστερο σενάριο λειτουργίας. Συνεπώς διαμορφώνεται ο πίνακας παραγόμενης ετήσιας ενέργειας.

Πίνακας 7.18: Παραγόμενη ενέργεια από τη φ.β. εγκατάσταση ανά έτος

Έτος	Βαθμός απόδοσης	Ετήσια Παραγωγή ενέργειας [KWh]
1	0,950	61446
2	0,950	61446
3	0,950	61446
4	0,950	61446
5	0,950	61446
6	0,945	61103
7	0,939	60760
8	0,934	60418
9	0,929	60075
10	0,924	59732
11	0,918	59389
12	0,913	59046
13	0,908	58704
14	0,902	58361
15	0,897	58018
16	0,892	57675
17	0,886	57332
18	0,881	56990
19	0,876	56647
20	0,871	56304
	Συνολικά Παραγόμενη Ενέργεια	1187784

Για την παραγωγή αυτού του ποσού ηλεκτρικής ενέργειας στην διάρκεια της 20ετίας θα απαιτούνταν 214tn MDO και 179tn LNG οι οποίοι θα παρήγαγαν 686tn CO₂ και 493tn CO₂ αντίστοιχα.

8.Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Έπειτα από εκτενή επισκόπηση στη διεθνή βιβλιογραφία τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης επιβεβαιώνονται.

Ενδεικτικά αναφέρουμε για κάθε ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:

Σύμφωνα με το Second IMO GHG Study, 2009 η μέση ειδική κατανάλωση για καύσιμο πετρέλαιο για κύριες και βοηθητικές μηχανές διαφόρων μεγεθών και έτους κατασκευής κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 175 gr/KWh και 203 gr/KWh . Η μέση ειδική κατανάλωση των σεναρίων που εξετάσαμε έχει τιμή περί τα 180 gr/KWh [7].

Σε άρθρο με τίτλο “How Much Fuel Do Cruise Ships Use?” που δημοσιεύτηκε στον διαδικτυακό τόπο www.cruise1st.co.uk που έχει ως αποκλειστική θεματολογία τη κρουαζιέρα δίνονται στοιχεία για τη κατανάλωση καυσίμου για έναν μεγάλο αριθμό κρουαζιερόπλοιων μεταξύ αυτών και του Norwegian Spirit που είναι και αυτό μικρό κρουαζιερόπλοιο αλλά μεγαλύτερων διαστάσεων από εκείνο της προσομοίωσης αναφέρεται πως η μέση κατανάλωση του εν πλω ανέρχεται στα 1100 γαλόνια την ώρα ήτοι 3,1 τόννους πετρελαίου την ώρα ενώ οι τιμές των αποτελεσμάτων του πλοίου προσομοίωσης για αντίστοιχη κατάσταση κυμαίνονται από 1,5τόννους ανά ώρα κατ’ ελάχιστον και 4,15τόννους ανά ώρα κατά μέγιστον. Στο ίδιο άρθρο αναφέρεται πως ένα μέσο κρουαζιερόπλοιο καταναλώνει περί τους 140 τόννους καυσίμου ημερησίως που ισοδυναμεί σε περισσότερους από 20000 τόννους για μια περίοδο αντίστοιχη της προσομοίωσης. Η ορθότητα της τιμής των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται και από αυτά τα δεδομένα μιας και μικρότερη ετήσια κατανάλωση του πλοίου μας οφείλεται στο σαφέστατα μικρότερο μέγεθός του από το μέσο κρουαζιερόπλοιο αλλά και από την οικονομική λειτουργία των GenSets καθώς και από την επιπρόσθετη χρήση των κυψελών καυσίμου [27].

Η εξοικονόμηση ρύπων για λειτουργία με LNG είναι εντός των τιμών που εμφανίζεται σε όλες τις μελέτες όπως και μέσω της εξέτασης της στοιχειομετρικής καύσης που έγινε με την εποπτεία του κ. Λάμπρου Καϊκτση.

Η κατανάλωση των κυψελών καυσίμου είναι επίσης σε συμφωνία λαμβάνοντας υπόψιν το βαθμό απόδοσης τους και τη θερμογόνο ικανότητα του υδρογόνου.

Για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σύμφωνα με τη μελέτη της ABB με τίτλο “Situation for a Swedish PV-system owner” αναφέρεται ότι η παραγωγή ανέρχεται στα 1074 kWh/kW για το καλύτερα σχεδιασμένο σύστημα το 2011 [26]. Δεδομένου ότι η λειτουργία της εγκατάστασης στο πλοίο διαρκεί λιγότερο από το μισό χρόνο και πως ο προσανατολισμός τους δεν είναι ο βέλτιστος μιας και έχουν τοποθετηθεί οριζόντια καταλήγουμε εύκολα στο συμπέρασμα των ορθών αποτελεσμάτων. Όσο για τη περιοχή της Αθήνας η αντίστοιχη παραγωγή είναι περί τις 1600KWh/Kw σύμφωνα με τη helarco (Ένωση Φωτοβολταϊκών) [28] για μια συνηθισμένη εγκατάσταση ως εκ τούτου τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία.

9. Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν διαμορφώθηκε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη λειτουργία των GenSets σε συνάρτηση με τις εναλλακτικές μορφές παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν που δεν είναι άλλες από τις κυψέλες καυσίμου και τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Πρωτίστως συμπεράναμε πως η λειτουργία των GenSets όταν εκείνα λειτουργούν σ' ένα εύρος μεταξύ του 60-95% είναι εξίσου αποδοτική μιας και για όλα τα εύρη λειτουργίας που εξετάσαμε κατά τα διάφορα σενάρια της προσομοίωσης η διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ της οικονομικότερης λειτουργίας και της δυσμενέστερης μεταξύ αυτών είναι μικρότερη του 1% .

Η λειτουργία των GenSets όταν το καύσιμο που χρησιμοποιούμε είναι το LNG επηρεάζεται περισσότερο εκτός αυτών των ορίων λειτουργίας που θέσαμε. Ο λόγος είναι πως η ποσοστιαία αύξηση της ειδικής κατανάλωσης σε χαμηλά φορτία είναι μεγαλύτερη σε λειτουργία με LNG απ' ότι με καύσιμο MDO. Συνεπώς εάν λειτουργήσουμε εκτός του εύρους ισχύος που εξετάσαμε στη προσομοίωση η μείωση των εκπομπών για χρήση LNG θα είναι μικρότερη κατά περίπου 0,4%.

Με βάσει τα δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω για την μέση ειδική κατανάλωση των μηχανών διαπιστώνουμε πως η λειτουργία των GenSets σ' ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο μπορεί να είναι αποδοτική λειτουργώντας εντός του εύρους που θέσαμε μιας και η μέση ειδική κατανάλωση που προέκυψε και είναι περί τα 180gr/KWh αποτελεί μια πολύ αποδοτική λειτουργία μηχανής σύμφωνα με το Second IMO GHG Study, 2009 [7].

Η αντικατάσταση του συστήματος των 4 κυρίων μηχανών και των 4 GenSets του πλοίου που τα δεδομένα του χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση αντικαταστάθηκαν αποδοτικά από μία συστοιχία 4 GenSets σε συνδυασμό με ένα μικρό σχετικά αριθμό κυψελών καυσίμου.

Η χρήση των κυψελών καυσίμου είναι ένας αξιόπιστος τρόπος προκειμένου να διατηρήσουμε τη λειτουργία των GenSets σε ικανοποιητικά επίπεδα ενώ εκείνα θα λειτουργούν σε μια περιοχή ισχύος που η ειδική τους κατανάλωση θα βρίσκεται σε καλά επίπεδα μιας και δε θα λειτουργούν συνεχώς σε υψηλές τιμές παραγωγής ρεύματος όπου ο βαθμός απόδοσης τους είναι πολύ χαμηλός και άρα η ειδική τους κατανάλωση αυξημένη. Η μειωμένη δε χρήση τους εξασφαλίζει τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους.

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ακόμα και αν καταλάμβανε το 100% των χώρων του πλοίου ακόμα και με τα αποδοτικότερα φ.β. πάνελ θα έφθανε μόλις το ποσοστό κάλυψης του 1% για λειτουργία του πλοίου στη Βαλτική.

Για λειτουργία της ίδιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε αντίστοιχο κρουαζιερόπλοιο στο Αιγαίο και για την ίδια περίοδο η παραγωγή ενέργειας θα ήταν καταφανώς μεγαλύτερη περί του ποσοστού του 50% το οποίο σε κάθε περίπτωση δε μπορεί να θεωρηθεί σημαντικό στα πλαίσια των αναγκών του πλοίου.

Βιβλιογραφία

1. ABB 2014, Technical guide No. 1, Direct torque control -the world's most advanced AC drive technology
2. Ådnanes Alf 2003, Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion
3. Baldia Fr. 2015, Energy and exergy analysis of a cruise ship
4. Bhuyan A. 2010, Fuel Cell connected to Grid through Inverter
5. Chrysostomidis C. 2010, Design of the All-Electric Ship: Focus on Integrated Power System coupled to Hydrodynamics
6. HELCOM 2014, Baltic Sea Sewage Port Reception Facilities
7. IMO 2014, Second and Third IMO GHG Study
8. Kabza A. 2016, Fuel Cell Formulary
9. Karniadakis G. 2011 An End-to-End Simulator for the All-Electric Ship MVDC Integrated Power System
10. MAN 2012, Diesel-electric Propulsion Plants
11. MAN 2016, MAN 51/60DF Project Guide – Marine
12. Pyrhönen J. 2011, Design of marine generators for alternative diesel-electric power systems
13. Sadr S. 2013, Ship Electrical Propulsion System
14. Sagarnidhi V. 2015, Fuel Cell Technology for Propulsion and Power Generation of Ships
15. Satyapal S. 2017, Hydrogen and Fuel Cells Overview
16. Shimpalee S. 2006, Numerical studies on rib&channel dimension of flow-field on PEMFC performance
17. Skjong Esp. 2013, The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day
18. Univ. of Wisconsin-Madison 2005, TRNSYS 16-Volume 5 Mathematical Reference
19. Vodovozov V. 2012, Fuels & Fuel Converters Power Accounting for Ship Electric Propulsion
20. Winther M. 2007, Fuel consumption and emissions from navigation
21. Έξαρχος Σ. 2013, Ατμοσφαιρική ρύπανση από πλοία. Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Εξελίξεις
22. Ζέρβας Ε. 2014, “Πράσινα” Πλοία
23. Προυσαλίδης Ι. 2006, Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο
24. Φασκιώτης Ι. 2015, Ανάλυση Χαρακτηριστικών Και Προσομοίωση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων
25. Χατζηαργυρίου Ν. 2013, Ανάλυση Λειτουργίας Κυψέλων Καυσίμου και Μοντελοποίηση για Στατικές Εφαρμογές
26. www.abb.com
27. cruises.lovetoknow.com/wiki/How_Much_Fuel_Does_a_Cruise_Ship_Use
28. www.helapco.gr
29. www.igu.org
30. www.siemens.com/marine
31. www.sma.com
32. www.sunpower.com
33. www.wikipedia.com

Παράρτημα-Α

Για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των καυσίμων που επιλέξαμε για τα GenSets ,δηλαδή του MDO και του LNG, με την επιστημονική καθοδήγηση του κ. Λ. Καϊκτσή εξετάσαμε βασιζόμενοι στη στοιχειομετρική καύση την εκπομπή CO₂ για το καθένα με επιλογή υποθετικών καυσίμων.

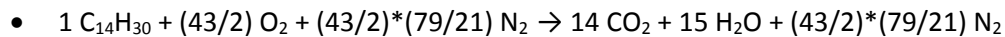
Καύση MDO

Θεωρώντας τη θερμογόνο δύναμη του MDO ίση με 42700KJ/kg όπως αυτή αναφέρεται στο τεχνικό εγχειρίδιο του κινητήρα [10] και για φορτίο ίσο με την ονομαστική ισχύ του κινητήρα από το Πίνακα 4.4 έχουμε $SFOC_{MDO,100\%}=7665$ KJ/KWh.

Συνεπώς η ειδική κατανάλωση καυσίμου στο 100% είναι:

- $m_{scfMDO,100\%}=\frac{7665\text{ KJ/KWh}}{42700\text{ KJ/kg}}=0,1795\text{ kg C}_{14}\text{H}_{30}/\text{KWh}$

Υποθέτοντας πως το καύσιμο μας είναι αποκλειστικά τετραδεκάνιο C₁₄H₃₀ έχουμε την εξής τέλεια καύση:



Εφαρμόζοντας την μέθοδο των τριών έχουμε:

$$198\text{ kg C}_{14}\text{H}_{30} \rightarrow 616\text{ kg CO}_2$$

$$0,1795\text{ kg C}_{14}\text{H}_{30} \rightarrow Y\text{ kg CO}_2$$

$$\text{Συνεπώς } Y=616*\frac{0,1795}{198}\text{ kg CO}_2/\text{KWh}=0,5584\text{ kg CO}_2/\text{KWh}$$

Άρα ο συντελεστής μετατροπής CO₂ είναι:

- $\text{Conversion Factor CO}_2\text{ C}_{14}\text{H}_{30}=\frac{0,5584}{0,1795}=3,11\text{ kg CO}_2/\text{kg C}_{14}\text{H}_{30}$

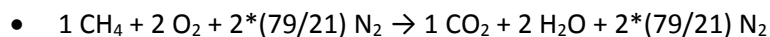
Καύση LNG

Θεωρώντας πως έχουμε καύσιμο LNG αποτελούμενο κατά 100% από μεθάνιο CH₄ έχουμε θερμογόνο δύναμη καυσίμου ίση με 50000KJ/kg και για φορτίο ίσο με την ονομαστική ισχύ του κινητήρα από το Πίνακα 4.6 έχουμε $SFOC_{100\%}=7190$ KJ/KWh.

Συνεπώς η ειδική κατανάλωση καυσίμου στο 100% είναι:

- $m_{scfLNG,100\%}=\frac{7190\text{ KJ/KWh}}{50000\text{ KJ/kg}}=0,1438\text{ kg CH}_4/\text{KWh}$

Από την τέλεια καύση του CH₄ έχουμε:



Εφαρμόζοντας την μέθοδο των τριών έχουμε:

$$16\text{ kg CH}_4 \rightarrow 44\text{ kg CO}_2$$

$$0,1438\text{ kg CH}_4 \rightarrow Y\text{ kg CO}_2$$

$$\text{Συνεπώς } Y=44*\frac{0,1438}{16}\text{ kg CO}_2/\text{KWh}=0,39545\text{ kg CO}_2/\text{KWh}$$

Άρα ο συντελεστής μετατροπής CO₂ είναι:

- Conversion Factor CO₂ CH₄ = $\frac{0,39545}{0,1438} = 2,75 \text{ kg CO}_2/\text{kg CH}_4$

Τέλος το ποσοστό μείωσης των εκπομπών CO₂ για λειτουργία στο 100% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής ισούται:

- Πυλίο εκπομπών CO₂ με χρήση CH₄ προς τις αντίστοιχες με C₁₄H₃₀ $\frac{0,39545}{0,5584} = 0,708$

Άρα έχουμε μείωση των εκπομπών CO₂ στη λειτουργία με LNG και για φορτίο ίσο με την ονομαστική ισχύς της μηχανής κατά 29,2%.

Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε πλήρη συμφωνία με εκείνα της προσομοίωσης.