



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Τίτλος Διπλωματικής:

Τεχνο-οικονομική μελέτη εφικτότητας μετασκευής επιβατηγών-οχηματαγωγών πλοίων σε πλήρως ηλεκτρικά για τις πορθμειακές γραμμές Μέγαρα-Σαλαμίνα, Πέραμα-Παλούκια, Ωρωπός-Ερέτρια

Πράπας Μάριος

Αθήνα, Ιούνιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Τίτλος Διπλωματικής:

Τεχνο-οικονομική μελέτη εφικτότητας μετασκευής επιβατηγών-οχηματαγωγών πλοίων σε πλήρως ηλεκτρικά για τις πορθμειακές γραμμές Μέγαρα-Σαλαμίνα, Πέραμα-Παλούκια, Ωρωπός-Ερέτρια

Πράπας Μάριος

Επιβλέπων Καθηγητής : Προυσαλίδης Ιωάννης

Καθηγητής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η τεχνο-οικονομική μελέτη εφικτότητας για την μετασκευή επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου ανοιχτού τύπου σε πλήρως ηλεκτρικό. Η ανάλυση στηρίζεται σε υπαρκτά πλοία που καλύπτουν συγκεκριμένες πορθμειακές γραμμές. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθούν οι εξής πορθμειακές γραμμές: Πέραμα Μεγάρων – Φανερωμένη Σαλαμίνας, Πέραμα-Παλούκια και τέλος Ωρωπός – Ερέτρια. Οι συγκεκριμένες πορθμειακές γραμμές παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον, καθώς τα πλοία που καλύπτουν τις συγκεκριμένες διαδρομές πραγματοποιούν αρκετά δρομολόγια ετησίως, με αποτέλεσμα τα οφέλη να καθίστανται σημαντικά τόσο για τον πλοιοκτήτη από την μείωση των λειτουργικών εξόδων όσο και για το περιβάλλον από την μείωση των εκπομπών.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται μια ανάλυση της Ναυτιλίας Μικρών Αποστάσεων, ο στόχος της οποίας είναι η απεικόνιση της σημασίας της στο παγκόσμιο εμπόριο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας, όπου κυριαρχεί η Ναυτιλία Μικρών Αποστάσεων, λόγω των αρκετών πορθμειακών της γραμμών, είναι η Νορβηγία, η οποία είναι από τις πρώτες χώρες που προώθησε την κατασκευή ηλεκτρικών πλοίων για την κάλυψη αυτών των διαδρομών. Στην ίδια φιλοσοφία, η Ελλάδα αποτελεί εξίσου μια χώρα με πολλές πορθμειακές γραμμές, με αποτέλεσμα η μετασκευή ήδη υπαρκτών πλοίων σε ηλεκτρικά ή κατασκευή τους από την αρχή να αποτελεί μια πλήρως ρεαλιστική επιλογή.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής, το οποίο επικεντρώνεται στους διάφορους τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν εξαιρετική επιλογή για βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες αναφορικά με την θερμική τους σταθερότητα, τις μεγάλες τιμές ειδικής ενέργειας και τον μεγάλο αριθμό κύκλων λειτουργίας. Ο στόχος του κεφαλαίου είναι να βρεθεί ο βέλτιστος τύπος μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί στο υπό μελέτη πλοίο και παράλληλα να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας.

Έπειτα, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο βασικός εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί στο πλοίο, όπως η μπαταρία και το BMS, τα ηλεκτρικά μοτέρ, οι inverter και τα Aziprod thrusters. Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην διάταξη των μπαταριών και στο πλήθος των πακέτων μπαταριών που θα εγκατασταθούν στο πλοίο, ενώ ειδική αναφορά γίνεται για το ηλεκτρικό δίκτυο τροφοδοσίας του υπό μετασκευή ηλεκτρικού πλοίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται η ανάπτυξη συγκεκριμένης μεθοδολογίας για την πραγμάτωση της τεχνο-οικονομικής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου στο λιμάνι και στο ταξίδι, θα υπολογιστεί η εγκατεστημένη ισχύς των μπαταριών στο πλοίο, έχοντας ως δεδομένο ένα συγκεκριμένο σενάριο φόρτισης, ρεύμα φόρτισης και μέγιστο βάθος αποφόρτισης της μπαταρίας. Στη συνέχεια θα προσδιοριστούν τα ετήσια λειτουργικά έξοδα του πλοίου πριν και μετά την μετασκευή και τέλος θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της βιωσιμότητας της επένδυσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια προσεγγιστική μέθοδος για τον προσδιορισμό της αντίστασης του πλοίου στην ταχύτητα υπηρεσίας του, με στόχο την εύρεση του μέγιστου λειτουργικού φορτίου της μηχανής. Το μέγιστο φορτίο λειτουργίας της μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού είναι σημαντικό να προσδιοριστεί έστω και προσεγγιστικά, διότι αποτελεί την πιο σημαντική συνιστώσα ζήτησης ενέργειας.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν σε ξεχωριστά κεφάλαια αναλυτικά τα σενάρια και τα τελικά συμπεράσματα για όλες τις πορθμειακές γραμμές που προαναφέρθηκαν. Τέλος, θα γίνει μια προσέγγιση σχετικά τα περιβαλλοντικά οφέλη της μετασκευής, με μία προσπάθεια ποσοτικοποίησης της μείωσης των εκπομπών λόγω της μετασκευής των πλοίων σε πλήρως ηλεκτρικά για τις γραμμές που μελετήθηκαν.

Abstract

The purpose of this dissertation is the feasibility study for the retrofit of an open type passenger ferry into a fully electric ship. The analysis is based on existing ships that cover specific ferry lines. More specifically, the following ferry lines are going to be studied: Perama Megaron - Faneromeni Salamina, Perama-Paloukia and finally Oropos - Eretria. These ferry lines are of great interest, as the ships that cover these routes make several itineraries per year, and as a result the benefits become significant for both the shipowner from the reduction of operating costs and for the environment from the reduction of emissions.

Initially, in the first chapter of the dissertation, an analysis of Short Distance Shipping in Europe is made, the aim of which is to illustrate its importance in world trade. A typical example of a country in which the Short Sea Shipping is dominant, due to its several ferry lines, is Norway, which is one of the first countries that promote the construction of electric ships in order to cover these routes. In the same philosophy, Greece is also a case of a country which has numerous ferry lines, and as a result whether the conversion of existing ships into electric or their construction from the beginning is a completely realistic choice.

Furthermore, the second chapter of the dissertation is presented, which focuses on the different types of lithium ion batteries. Lithium-ion batteries are an excellent choice for industrial applications as they have excellent properties in terms of thermal stability, high values of specific energy and a large number of operating cycles. The aim of the chapter is to identify the optimal battery type which is going to equip the electric ship and at the same time to determine the best operating conditions of the battery.

In addition, the next chapter presents the basic equipment that will be used on the ship such as the battery and BMS, electric motors, inverters and Azipod thrusters. At the same time, emphasis is placed on the layout of the batteries and the number of battery packs that will be installed on the ship, while special mention is made for the electric power supply network of the ship.

The fourth chapter of the dissertation presents the development of a specific methodology for the realization of the techno-economic study. More specifically, the methodology is based on the energy requirements of the ship in port and voyage and finally the aim is to calculate the installed capacity of the batteries in the ship, taking into consideration a specific charging scenario, the charging current and the maximum depth of discharge of the battery. The annual operating costs of the ship before and after the retrofit will be determined and finally the sustainability of the investment will be studied.

The fifth chapter will present an approximate method for determining the ship's resistance to its service speed, with the aim of finding the maximum operating load of the engine. The maximum operating load of the engine during the trip is important to be determined even approximately, because it is one of the most important energy demands.

Then the scenarios and the final conclusions for all the ferry lines mentioned above will be presented in separate chapters. Finally, in the last chapter an approach to the environmental benefits derived from the retrofit will be made, and furthermore an effort to quantify emission reductions due to the retrofit of ships to fully electric for the lines studied.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, κ. Ι.Προυσαλίδη για την εμπιστοσύνη της ανάθεσης αυτής της διπλωματικής, καθώς και για τη μεγάλη του διάθεση να με καθοδηγήσει και να με συνδράμει σε όποιες δυσκολίες συνάντησα κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους οικείους μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου Αριστείδη για την συνεχή στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1ο : Ναυτιλία Μικρών Αποστάσεων- Κάλυψη Πορθειακών Γραμμών	10
1.1 Ορισμός και διαστάσεις της Ναυτιλίας Μικρών Αποστάσεων	12
1.2 Ναυτιλία σύντομων αποστάσεων στην Ευρώπη	12
1.3 Ηλεκτρικά Επιβατηγά Οχηματαγωγά πλοία	16
Κεφάλαιο 2ο : Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου	22
2.2 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου - Εισαγωγή	27
2.3 Τύποι Μπαταριών Ιόντων Λιθίου.....	28
2.4 Λειτουργική Υποβάθμιση Μπαταρίας - Παράγοντες που Επιδρούν.....	35
2.5 Βέλτιστο λειτουργικό εύρος της μπαταρίας	40
2.6 Τελική επιλογή του τύπου μπαταρίας	41
Κεφάλαιο 3 ^ο : Μελέτη Ηλεκτρικού πλοίου	42
3.1 Πλήθος πακέτων μπαταριών και διάταξη αυτών	42
3.2 Σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας - Battery Management System (BMS)	44
3.3 Δίκτυο τροφοδοσίας ηλεκτρικού πλοίου	47
3.4 Αξιμουθιακοί Προωστήρες Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές	50
3.5 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Κινητήρων	55
Κεφάλαιο 4 ^ο : Μεθοδολογία Υπολογισμού Εγκατεστημένης Ισχύος Μπαταριών και Εκτίμηση Κόστους Μετασκευής.....	61
4.1 Υπολογισμός Εγκατεστημένης Ισχύος Μπαταριών.....	61
4.2 Καθορισμός Σεναρίου Φόρτισης.....	63
4.3 Υπολογισμός Ισχύος Ηλεκτρικού Μοτέρ, Inverter και Φορτιστών	67
4.4 Εκτίμηση Συνολικού Κόστους Μετασκευής.....	69
4.5 Μελέτη Εφικτότητας Μετασκευής σε Μπαταριόπλοιο.....	71
4.6 Προσδιορισμός Λειτουργικού Κόστους και Ετήσιου Εισοδήματος λόγω Μετασκευής... ..	73
Κεφάλαιο 5 ^ο : Προσεγγιστικός υπολογισμός αντίστασης πλοίου	75
5.1 Προσεγγιστικός Προσδιορισμός Φορτίου λειτουργίας κύριας Μηχανής	75

Κεφάλαιο 6 ^ο : Οι θαλάσσιες Γραμμές Μεταφορών της Σαλαμίνας.....	78
6.1 Βασικά χαρακτηριστικά της Σαλαμίνας	78
6.2.1 Μελέτη Διαδρομής Πέραμα Μαγάρων - Φανερωμένη Σαλαμίνας.....	81
6.2.2 Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας και Φορτίου Λειτουργίας Μηχανής.....	83
6.2.3 Προσδιορισμός Ειδικής Κατανάλωσης Καυσίμου (gr/kwh).....	86
6.2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Επιλεχθείσας Μπαταρίας	88
6.2.5 Επιλογή Βέλτιστου Σεναρίου Φόρτισης	91
6.2.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για την διαδρομή Πέραμα Μέγαρων – Φανερωμένη Σαλαμίνας.....	104
6.3.1 Διαδρομή Πέραμα - Παλούκια.....	105
6.3.2 Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας και Φορτίου Λειτουργίας Μηχανής.....	106
6.3.3 Επιλογή κατάλληλου σεναρίου φόρτισης.....	110
6.3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την διαδρομή Πέραμα-Παλούκια	122
Κεφάλαιο 7 ^ο : Μελέτη διαδρομής Ωρωπός – Ερέτρια	123
7.1 Βασικά χαρακτηριστικά για την διαδρομή Ωρωπού- Ερέτριας	124
7.2 Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας και Φορτίου Λειτουργίας Μηχανής.....	125
7.3 Επιλογή κατάλληλου σεναρίου φόρτισης.....	129
7.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την διαδρομή Ωρωπού- Ερέτριας	138
Κεφάλαιο 8 ^ο : Ηλεκτρικά Πλοία – Επίδραση στο Περιβάλλον.....	139
8.1 Οι επιπτώσεις των εκπομπών των πλοίων στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη ζωή ..	139
8.2 Ποσοτικοποίηση της μείωσης των ρύπων λόγω της μετασκευής του πλοίου σε ηλεκτρικό	142
Συμπεράσματα	145
Αρθρογραφία	150
Βιβλιογραφία	151

Κεφάλαιο 1ο : Ναυτιλία Μικρών Αποστάσεων- Κάλυψη Πορθειακών Γραμμών

1.1 Ορισμός και διαστάσεις της Ναυτιλίας Μικρών Αποστάσεων

Η ναυτιλία μικρών αποστάσεων (NMA) ή Short Sea Shipping στα αγγλικά, αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική υποκατηγορία της Ευρωπαϊκής ναυτιλίας και ορίζεται ως η δια θαλάσσης σύνδεση λιμένων μεταξύ γειτονικών χωρών. Σύμφωνα με τους ερευνητές, οι ορισμοί για την ναυτιλία μικρών αποστάσεων ποικίλλουν, ωστόσο πληθώρα ορισμών που έχουν δοθεί, περιλαμβάνουν δραστηριότητες όπως η ακτοπλοΐα, η μεσογειακή ναυτιλία, η φορτηγός ακτοπλοϊκή ναυτιλία, υπηρεσίες συλλογής ή τροφοδοσίας, ποτάμιες μεταφορές, διατοπικές μεταφορές φορτίων με υπηρεσίες door to door, καθώς και κάθε άλλη μορφή ναυτιλίας μικρών αποστάσεων, όπως των ρυμουλκούν και των σκαφών αναψυχής (European Short Sea Network, 2017).

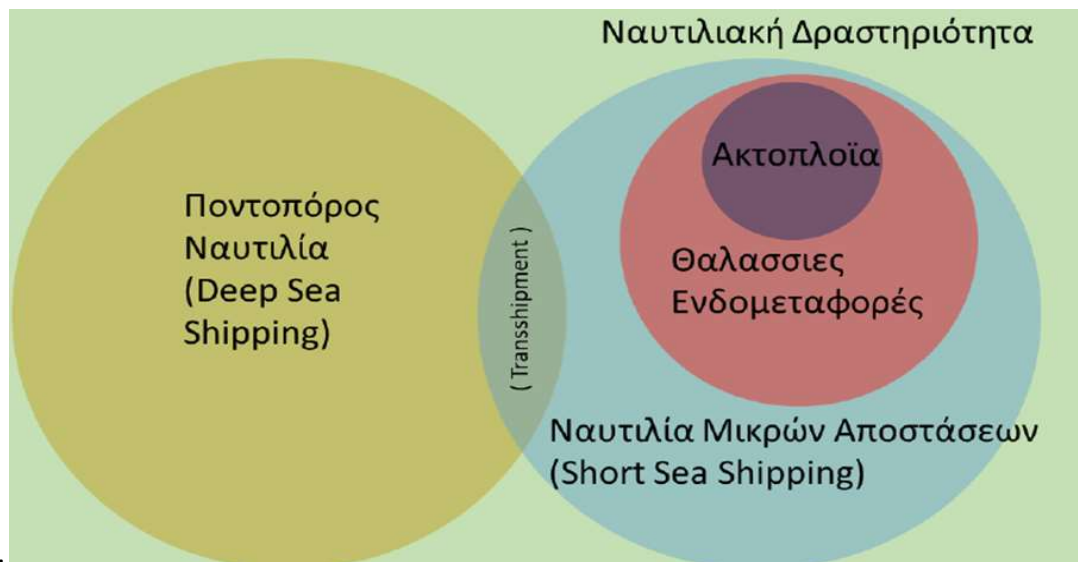
Πιο ειδικά, οι θαλάσσιες ενδομεταφορές και η ακτοπλοΐα αποτελούν σημαντικές υποκατηγορίες της ναυτιλίας μικρής ναυσιπλοΐας. Με τον όρο θαλάσσιες ενδομεταφορές ορίζονται οι δια θαλάσσης συγκοινωνίες που εκτυλίσσονται μεταξύ λιμένων, στα όρια που ορίζουν τα κυριαρχικά δικαιώματα του κάθε κράτους, καθώς και υπηρεσίες εφοδιασμού off shore (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 1992). Έπειτα, η ακτοπλοΐα ορίζεται ως δια θαλάσσης επικοινωνία μεταξύ ελληνικών λιμένων με σκοπό την μεταφορά προσώπων και αγαθών και αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι των θαλάσσιων ενδομεταφορών. Μάλιστα, μέσω της ανάλυσης των συνθετικών της λέξης «ακτοπλοΐα», οδηγούμαστε στο ότι τα συνθετικά «ακτή» και «πλους», σηματοδοτούν την ναυτιλιακή δραστηριότητα με πλοία που πλέουν στην διεύθυνση των ακτών και άρα δεν πλέουν στο αβέβαιο περιβάλλον ενός ωκεανού.

Παρότι, η ναυτιλία μικρής ναυσιπλοΐας αλληλοεπιδρά με την υπερωκεάνια ναυτιλία μέσω μιας σχέσης ανεφοδιασμού της μίας με την άλλη, δεν μπορεί να θεωρηθεί σε καμία περίπτωση ότι η ναυτιλία μικρών αποστάσεων είναι υποσύνολο

της ποντοπόρου ναυτιλίας, διότι αποτελεί μια ξεχωριστή και αρκετά σημαντική ναυτιλιακή δραστηριότητα. Η ιστορική εξέλιξη στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών, συνηγορεί στο ότι η ναυτιλία μικρής ναυσιπλοΐας αποτελεί μια ξεχωριστή δραστηριότητα από την ποντοπόρο ναυτιλία.

Σύμφωνα με την ιστορική αναδρομή ερευνητών, προκύπτει ότι οι άνθρωποι, από τα αρχαία κιόλας χρόνια είχαν αναπτύξει πρώτα την ακτοπλοΐα, δηλαδή την ναυτιλία μικρής ναυσιπλοΐας, διότι γνώριζαν ότι με τα πλοία τους θα ήταν αδύνατον να αποσοβήσουν τους κινδύνους που επιφύλασσε η ανοιχτή θάλασσα (ανέμους, κυματισμούς, ρεύματα) και παράλληλα γνώριζαν ότι εάν δεν έπλεαν παράλληλα στις ακτές, δεν θα ήταν εφικτός ο ανεφοδιασμός τους με τρόφιμα κατά την διάρκεια του ταξιδιού.

Ωστόσο, μετά την δημιουργία των μηχανοκίνητων πλοίων, το φαινόμενο αυτό εξαλείφθηκε και τότε άρχισε να αναπτύσσεται η υπερωκεάνια ναυτιλία με τα υπερατλαντικά ταξίδια, με αποτέλεσμα τα πλοία που δεν εκτελούσαν μακρινές θαλάσσιες αποστάσεις, να πλέουν μόνο για να συνδέσουν κοντινούς λιμένες. Η ανάγκη σύνδεσης κοντινών λιμένων δια θαλάσσης, προκύπτει αφενός από την ανάγκη για ανεφοδιασμό (όπως στην περίπτωση ενός ηπειρωτικού λιμένα και μιας νήσου, όπως Σαλαμίνα- Πέραμα) και αφετέρου από την ανάγκη για εμπόριο μεταξύ δύο ηπειρωτικών περιοχών (όπως Ρίο-Αντίρριο). Συνεπώς, κρίνεται εύλογα κατανοητό ότι τόσο η ναυτιλία μικρών αποστάσεων όσο και η ποντοπόρος ναυτιλία, είναι εξίσου σημαντικές για την ναυτιλιακή δραστηριότητα, υπηρετώντας διαφορετικούς σκοπούς.



Εικόνα 1: Αναπαριστά την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τύπων της ναυτιλιακής δραστηριότητας με διάγραμμα Venn

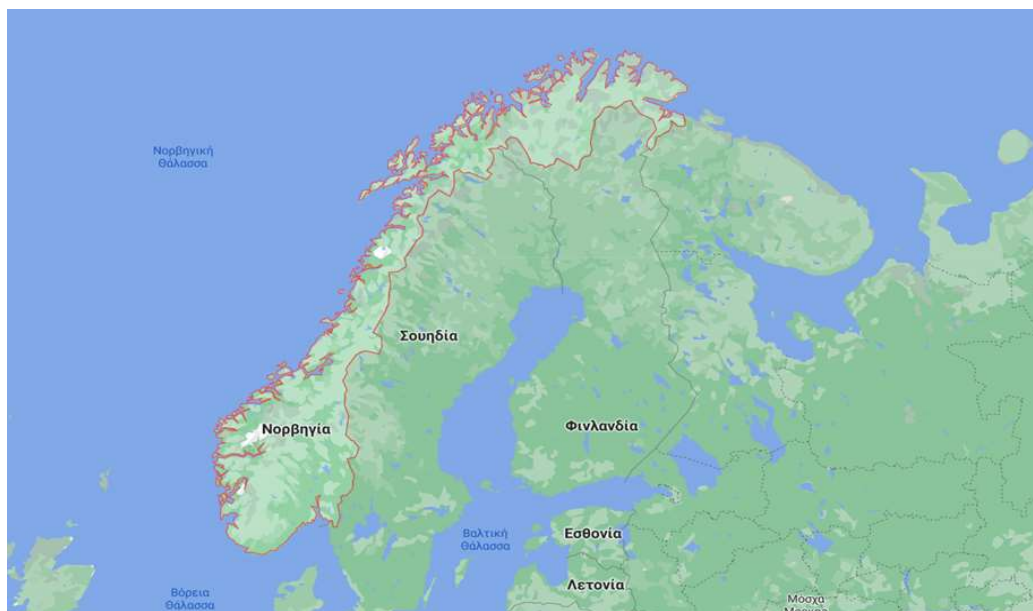
1.2 Ναυτιλία σύντομων αποστάσεων στην Ευρώπη

Στην Ευρωπαϊκή Ήπειρο έχουν αναπτυχθεί πολλές θαλάσσιες πορθμειακές συνδέσεις μικρών αποστάσεων. Το ήμισυ αυτών των συνδέσεων εντοπίζονται στις Σκανδιναβικές χώρες, ενώ οι υπόλοιπες σε χώρες με πολλά νησιά, όπως η Ελλάδα, η Δανία και η Κροατία.

Σύμφωνα με σύγχρονα ερευνητικά δεδομένα, με την χρήση του συστήματος AIS πραγματοποιήθηκε καταγραφή των ενεργών πορθμειακών γραμμών μικρών αποστάσεων στην Ευρώπη. Για τις ανάγκες αυτού του εγχειρήματος, ως ναυτιλιακές γραμμές σύντομων αποστάσεων ορίζονται οι πορθμειακές γραμμές που συνδέουν δύο λιμένες, των οποίων η απόσταση μεταξύ τους δεν υπερβαίνει τα 16 χιλιόμετρα. Η παραδοχή αυτή έγινε προκειμένου ο χρόνος πλεύσης, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται ένα πλοίο για να μεταβεί από το ένα λιμάνι στο άλλο, να μην υπερβαίνει τα τριάντα λεπτά, με μέση ταχύτητα 15 κόμβων.

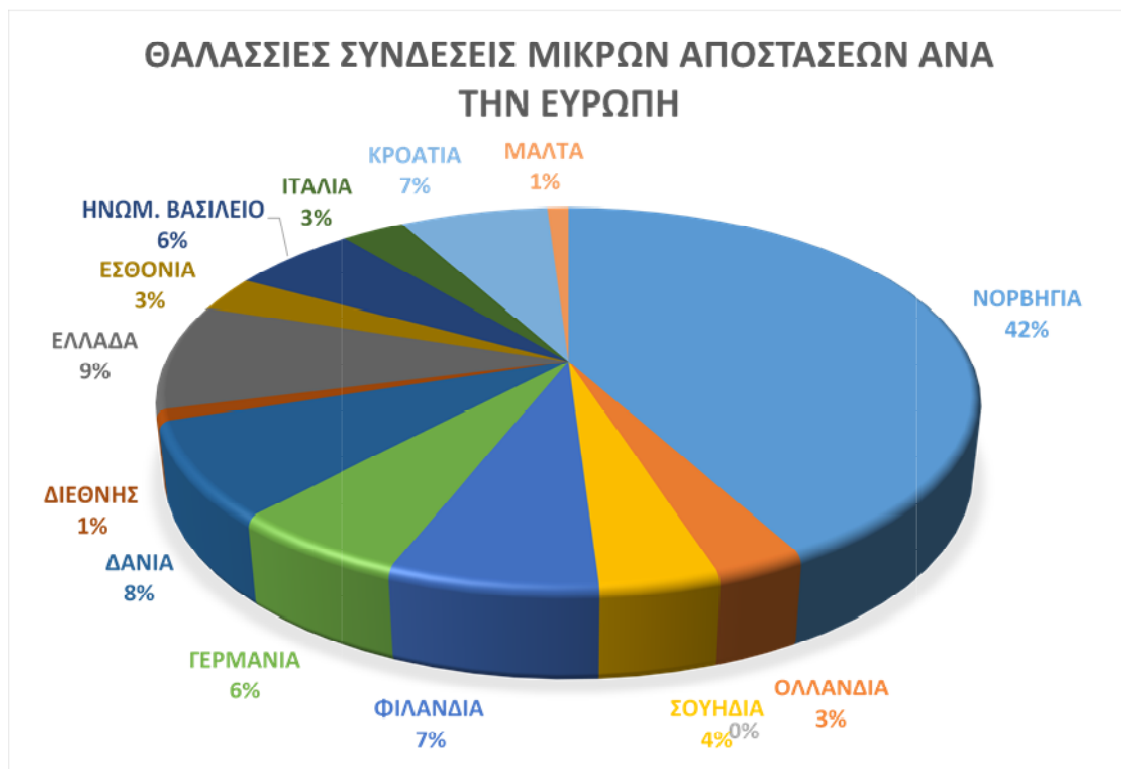
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της καταγραφής, στην Ευρωπαϊκή ήπειρο εντοπίζονται 222 θαλάσσιες συνδέσεις με απόσταση μικρότερη από 16 χιλιόμετρα, εκ των οποίων οι 2 πορθμειακές συνδέσεις Messina-Villa San Giovanni και Puttgarden-Rodbyhavn, αποτελούν διεθνές δρομολόγιο για την ένωση της Δανίας με την Γερμανία. Οι υπόλοιπες 220 πορθμειακές γραμμές στις νότιες χώρες συνδέουν λιμένα μιας νησιωτικής περιοχής με ένα λιμένα μιας ηπειρωτικής περιοχής, ενώ στην Σκανδιναβία οι περισσότερες θαλάσσιες συνδέσεις εξυπηρετούν την σύνδεση δύο ηπειρωτικών λιμένων, με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου και οικονομικών πόρων που θα απαιτούνταν προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μεταφορά αγαθών και προσώπων μέσω του οδικού δικτύου, περιμετρικά των φιόρδ.

Ιδιαίτερα, στην Σκανδιναβία ενθαρρύνθηκε η δημιουργία θαλάσσιων πορθμειακών γραμμών σύντομων αποστάσεων, διότι αυτό οδηγούσε στο να μειωθεί ο κίνδυνος τροχαίων ατυχημάτων εξαιτίας των ακραίων καιρικών συνθηκών του Σκανδιναβικού χειμώνα και παράλληλα στο να μειωθεί το κόστος οδικής ασφάλειας. Από τις Σκανδιναβικές χώρες ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Νορβηγία στην οποία δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση αναφορικά με την δημιουργία των θαλάσσιων γραμμών σύντομων αποστάσεων, εξαιτίας της ιδιαίτερης γεωγραφικής κατανομής της.



Εικόνα 2: Γεωγραφικό ανάγλυφο της Νορβηγίας της Σκανδιναβικής χερσονήσου.

Μάλιστα, σύμφωνα με σύγχρονα ερευνητικά αποτελέσματα η Νορβηγία διαθέτει σχεδόν το ήμισυ των πορθμειακών γραμμών της Ευρώπης (42% των πορθμειακών γραμμών σύντομων αποστάσεων της Ευρώπης), ενώ ακολουθεί η Ελλάδα (9%) , η Δανία (8%) και η Κροατία με την Φιλανδία (7%). Διαγραμματικά απεικονίζονται παρακάτω τα ποσοστά των πορθμειακών θαλάσσιων γραμμών της Ευρώπης για την κάθε χώρα ξεχωριστά, τα οποία προέκυψαν μετά από καταγραφή, με το σύστημα AIS, των ενεργών θαλάσσιων γραμμών μικρών αποστάσεων ανά τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ηπείρου. (Πηγή: δεδομένα AIS, Παπαϊωάννου Γεώργιος, 2018-Διπλωματικήεργασία).



Διάγραμμα 1 : Πορθμειακές γραμμές σύντομων αποστάσεων στην Ευρώπη

Πιο αναλυτικά, η Νορβηγία διαθέτει 94 πορθμειακές συνδέσεις, με την πλειονότητα των συνδέσεων να βρίσκονται στο δυτικό τμήμα της χώρας στην περιοχή των φιόρδ. Αυτές οι συνδέσεις δημιουργήθηκαν με απώτερο σκοπό την παράκαμψη της οδικής διαδρομής περιμετρικά των φιόρδ, η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την θαλάσσια απόσταση. Λόγου χάρη μέσω της θαλάσσιας διέλευσης από το Vestnes προς το Molde, μήκους περίπου 11 χιλιομέτρων αποφεύγεται η αμιγώς χερσαία διαδρομή μεταξύ των 2 προορισμών μήκους περίπου 180 χιλιομέτρων. Η ύπαρξη αυτών των θαλάσσιων γραμμών σύντομων αποστάσεων εξυπηρετεί την άμεση σύνδεση της πρωτεύουσας της χώρας με τα βόρεια τμήματα της, εξαλείφοντας τις όποιες δυσκολίες εμφανίζονται στην σύνδεση αυτών των περιοχών, εξαιτίας των δυσμενών καιρικών συνθηκών και των μεγάλων χιλιομετρικών αποστάσεων.

Μάλιστα, αξιοσημείωτο είναι ότι τα πλοία στην Νορβηγία φέρουν πιστοποιητικό ice class (όπως το πλοίο FF Kronprins Haakon της Νορβηγίας), λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών, που αντιμετωπίζουν κατά την εκτέλεση αυτών των θαλάσσιων διαδρομών και για αυτό κατασκευάζονται σύμφωνα με διεθνείς κανονισμούς, ώστε να έχουν ισχυρότερες μηχανές και ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά προκειμένου να περατώσουν ένα θαλάσσιο ταξίδι σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες με απόδοση και ασφάλεια. Τέλος, σε ορισμένες από τις θαλάσσιες συνδέσεις μικρών αποστάσεων της Νορβηγίας, έχουν δημιουργηθεί ηλεκτροκίνητα πλοία για την κάλυψη αυτών των σύντομων αποστάσεων, όπως το πλοίο «Ampere», το οποίο κατασκευάστηκε το 2014.

1.3 Ηλεκτρικά Επιβατηγά Οχηματαγωγά πλοία

Το ηλεκτρικό επιβατηγό-οχηματαγωγό πλοίο Ampere

Αξιοσημείωτη κρίνεται η αναφορά στο πρώτο ηλεκτροκίνητο επιβατηγό - οχηματαγωγό πλοίο μηδενικών ρύπων στον κόσμο, το οποίο κατασκευάστηκε από την Νορβηγική εταιρία Fjellstrand Shipyard σε συνεργασία με την Siemens και την Corvus Energy και ονομάζεται Ampere. Το συγκεκριμένο ηλεκτρικό ferry boat χρησιμοποιείται για εμπορικούς σκοπούς από τον Μάιο του 2015 στο Sognefjord, συνδέοντας τα χωριά Lavik και Orpedal της Νορβηγίας, σε μια διαδρομή 5,7 km.

Συγκριτικά με τα συμβατικά πορθμεία, το Ampere εξασφαλίζει την μείωση των ρύπων κατά 95%, την μείωση του κόστους της θαλάσσιας μεταφοράς κατά 80% καθώς επίσης και πιο “ήσυχη” λειτουργία από άποψη θορύβου. Το Ampere πραγματοποιεί κατά προσέγγιση 34 ταξίδια ημερησίως, καθένα από τα οποία διαρκεί περίπου 20 λεπτά, δίχως να υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να φορτώσει και να ξεφορτώσει στο λιμάνι (περίπου 10 λεπτά).

Το μήκος 80 μέτρων και πλάτους 21 μέτρων του πλοίου Ampere είναι σχεδιασμένο ως καταμαράν και έχει δύο κύτη. Τα κύτη του πλοίου Ampere είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, το οποίο προτιμήθηκε έναντι του χάλυβα, ώστε να διατηρείται σε χαμηλό επίπεδο το βάρος του κύτους. Το συγκεκριμένο πλοίο δύναται να εξυπηρετήσει 120 αυτοκίνητα, 8 φορτηγά και 350 επιβάτες.

Το πλοίο εξοπλίζεται με δύο ηλεκτροκινητήρες 450 kW και συστοιχία μπαταριών ιόντων-λιθίου 1,000kWh (1 MWh). Η φόρτιση των μπαταριών γίνεται στο λιμάνι με ταχυφορτιστή 1.2 MW, κατά την διάρκεια της φόρτωσης και εκφόρτωσης του πλοίου. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το οικολογικό αποτύπωμα του Ampere, καθώς σε ετήσια βάση μειώνει τη χρήση πετρελαίου κατά ένα εκατομμύριο λίτρα, αντισταθμίζοντας παράλληλα 570 τόνους CO₂ και 15 τόνους εκπομπών οξειδίων του αζώτου συγκριτικά με πλοία συμβατικής-παλαιότερης τεχνολογίας που εκτελούν την ίδια διαδρομή.

Σύμφωνα με σύγχρονες ερευνητικές μελέτες, το δρόμο που χάραξαν οι Νορβηγοί με το Ampere ακολουθούν και οι Φινλανδοί με την δημιουργία ενός ηλεκτροκίνητου

πλοίου με παρόμοια χαρακτηριστικά, το Elektra, το οποίο ξεκίνησε ταξίδια το 2017. Συνεπώς, με δεδομένα τα κυριότερα οφέλη, οικονομικά και περιβαλλοντικά, που προκύπτουν από την κατασκευή ενός ηλεκτροκίνητου πλοίου παρόμοιας τεχνολογίας με το Ampere, αρκετές είναι οι εταιρείες που επιλέγουν να προβούν σε παρόμοιες επενδύσεις.



Εικόνα 3: Το πλοίο Ampere



Εικόνα 4: Γραμμή Lavik-Orpedal που διανύει το πλοίο Ampere της Νορβηγίας.

Το ηλεκτρικό επιβατηγό οχηματαγωγό πλοίο Ellen

Αξιοσημείωτη κρίνεται η αναφορά σε ένα ακόμη ηλεκτρικό πλοίο που κατασκευάστηκε στην Δανία και ονομάζεται E-ferry Ellen (IMO number: 9805374). Πρόκειται για ένα πλήρως ηλεκτροκίνητο ferry boat που κατασκευάστηκε στην Δανία τον Αύγουστο του 2019, στα πλαίσια ενός Ευρωπαϊκού προγράμματος που ονομάζεται Horizon 2020. Το συγκεκριμένο ηλεκτροκίνητο επιβατηγό πλοίο Ellen συνδέει το νησί Aegøe με την ενδοχώρα και τα λιμάνια Fynshavn και Faaborg, καλύπτοντας στην πρώτη περίπτωση απόσταση 10,7 ναυτικά μίλια και στην δεύτερη απόσταση 9,6 ναυτικά μίλια. Η αυτονομία που παρέχεται από την μπαταρία στο συγκεκριμένο ηλεκτρικό πλοίο, δίνει την δυνατότητα η φόρτιση να γίνεται μόνο στο μητρικό λιμάνι Soby, όπου έχουν κατασκευαστεί και καινοτόμες εγκαταστάσεις φόρτισης. Συνεπώς, το πλοίο έχει την δυνατότητα να πλέει διανύοντας απόσταση 21 ναυτικά μίλια, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για φόρτιση της μπαταρίας.

Η ενεργειακή απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου Ellen φτάνει το 85%, γεγονός που σηματοδοτεί ότι υπερβαίνει το διπλάσιο από αυτό του συστήματος πρόωσης ενός πετρελαιοκίνητου πλοίου. Έτσι, το 100% ηλεκτρικό πορθμείο χρησιμοποιεί την ενέργεια που παρέχεται με σημαντική αποτελεσματικότητα, με αποτέλεσμα την άμεση εξοικονόμηση για τον διαχειριστή. Το εν λόγω πλοίο, ξοδεύει περίπου 1600 kWh για να καλύψει την απόσταση των 22 ναυτικών μιλίων και σε συνδυασμό με τον ταχυφορτιστή στο λιμάνι του Soby, καθιστά το πλοίο Ellen σοβαρό ανταγωνιστή απέναντι στα αντίστοιχα υπάρχοντα πετρελαιοκίνητα πλοία. Μπορεί να αντλήσει την απαραίτητη ισχύ πολύ γρήγορα πριν ξεκινήσει το επόμενο ταξίδι, διατηρώντας έτσι την υψηλή συχνότητα δρομολογίων που απαιτούν οι επιβάτες. Ο σταθμός φόρτισης φορτίζει έως και 4MW όταν το πλοίο φτάνει στο λιμάνι του Soby, ανάλογα βέβαια και με την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών.

Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, η πρόωση του πλοίου γίνεται με την λειτουργία δύο ηλεκτροκινητήρων των 750 kW έκαστος, καθώς και με την λειτουργία δύο κινητήρων ώθησης 250 kW ο καθένας. Η διάταξη των μπαταριών βρίσκεται στη μέση και προς την πρύμνη του πλοίου εντός δύο δωματίων. Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος των μπαταριών είναι 4,3 MWh (Li-NMC). Η χωρητικότητα των συλλεκτών του, επιτρέπει να ολοκληρώνει το ταξίδι μετ' επιστροφής με μια ταχύτητα των 22 κόμβων ανά ώρα. (Andrew Tunnicliffe, 2019). Τέλος, το πλοίο Ellen όντας επιβατηγό οχηματαγωγό πλοίο έχει διαθέσιμο χώρο για 198 επιβάτες και 31 οχήματα.



Εικόνα 5: Διάταξη μπαταριών στο πλοίο Ellen Ferry-boat.

Το σημαντικότερο στοιχείο για την μετασκευή πλοίων σε ηλεκτρικά είναι ότι η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια είναι η φθηνότερη λύση αυτή την χρονική στιγμή για πορθμεία σύντομων αποστάσεων. Βεβαίως, το επενδυτικό κόστος είναι σημαντικά υψηλότερο είτε για την κατασκευή ενός αμιγώς ηλεκτρικού πλοίου είτε για την μετασκευή ενός πλοίου σε ηλεκτρικό, εν συγκρίσει με τα πετρελαιοκίνητα. Όμως, η εξοικονόμηση στο κόστος λειτουργίας αντισταθμίζει το κόστος επένδυσης, το οποίο μετά από 4-8 χρόνια (ανάλογα με τις συνθήκες, τεχνικές και κανονιστικές, που ισχύουν για τη εκάστοτε διαδρομή), με την προϋπόθεση κάποιας χρηματοδότησης να δύναται να αποσβεστεί. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η διάρκεια ζωής ενός πορθμείου είναι συνήθως περίπου 30 χρόνια, ο διαχειριστής του σκάφους μπορεί

επομένως να προσβλέπει σε σημαντική εξοικονόμηση μετά από λίγα χρόνια λειτουργίας. Στα εντυπωσιακά οικονομικά στοιχεία που καθιστούν την ύπαρξη ηλεκτρικών πλοίων συμφέρουσα προς ποικίλες κατευθύνσεις, συνεισφέρουν και οι φθίνουσες τιμές της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, ιδίως οι τιμές της μπαταρίας, οι οποίες μειώνονται ταχέως τα τελευταία χρόνια, ενώ αυξάνεται και ενεργειακή τους πυκνότητα.

Ταυτόχρονα, αξιοσημείωτη είναι και η μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και άλλων ρύπων. Το πλοίο Ellen θεωρείται ότι είναι απαλλαγμένο από εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία του, όμως αυτό φυσικά εξαρτάται από την προέλευση της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση όπου το πλοίο Ellen φορτίζεται με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία προέρχεται από πράσινες πηγές ενέργειας, όπως ο άνεμος και ο ήλιος, θα λειτουργεί εκπέμποντας μηδενικούς ρύπους, εξοικονομώντας περίπου 2.520 τόνους CO₂ ετησίως. Ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα από το συνηθισμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της Δανίας για την λειτουργία του, θα μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 2.010 τόνους CO₂ ετησίως. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γεγονός που σημαίνει μηδενική εκπομπή ρύπων. Τα επόμενα χρόνια υπάρχει ο στόχος η ηλεκτρική ενέργεια να παράγεται εξ ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γεγονός που σημαίνει ότι η λειτουργία των ηλεκτρικών πλοίων θα έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Οι εκπομπές CO₂ από την παραγωγή μπαταριών, αντισταθμίζονται από την εξοικονόμηση εκπομπών κατά τους τρεις πρώτους μήνες της ζωής του ηλεκτρικού πορθμείου. Συνεπώς, η ύπαρξη ανάλογων επιβατηγών οχηματαγωγών πλοίων για τις σύντομες πορθμειακές γραμμές, όπως τα πλοία Ellen και το πλοίο Ampere που αναφέρθηκε προηγουμένως, συνεισφέρει όχι μόνο στην εξοικονόμηση χρημάτων από την λειτουργία του πλοίου για τους πλοιοκτήτες, αλλά αποτελεί και μια λύση η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον. Αυτός είναι εξάλλου ο λόγος για τον οποίο η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναλάβει την χρηματοδότηση τέτοιων έργων όπως οι περιπτώσεις του Ellen και του Ampere.



Εικόνα 6: Ellen Ferry-boat

Κεφάλαιο 2ο : Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

2.1 Χαρακτηριστικά Μπαταριών – Ορισμοί Μεγεθών

Μπαταρία (Battery): Η μπαταρία ή ο ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι η συσκευή η οποία αποθηκεύει χημική ενέργεια και την αποδεσμεύει με τη μορφή ηλεκτρισμού.

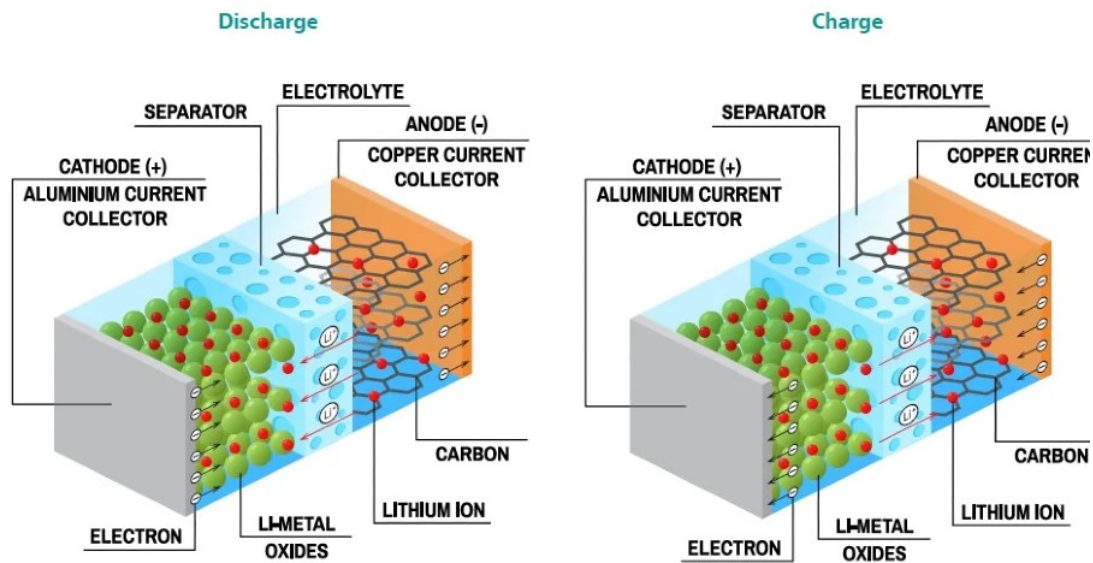
Άνοδος (anode): Άνοδος είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της οξείδωσης. Πιο συγκεκριμένα το υλικό της ανόδου αποβάλλει ηλεκτρόνια, τα οποία μέσω εξωτερικού κυκλώματος ρέουν προς το ηλεκτρόδιο της καθόδου.

Συνήθως το αρνητικό ηλεκτρόδιο μιας συμβατικής μπαταρίας ιόντων λιθίου αποτελείται από άνθρακα.

Κάθοδος (cathode): Κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αναγωγής. Πιο συγκεκριμένα το υλικό της καθόδου προσλαμβάνει ηλεκτρόνια, τα οποία ρέουν μέσω εξωτερικού κυκλώματος από την άνοδο.

Ηλεκτρολύτης: Ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί ως αγώγιμη οδός μέσω της οποίας τα ιόντα μετακινούνται από το αρνητικό στο θετικό ηλεκτρόδιο και αντιστρόφως. Οι ηλεκτρολύτες στις μπαταρίες μπορεί να είναι υδατικά διαλύματα. Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούνται από άλατα του λιθίου, όπως εξαφθοροφωσφορικό λίθιο LiPF_6 , τετραφθοροβορικό λίθιο LiBF_4 ή υπερχλωρικό λίθιο LiClO_4 σε οργανικό διαλύτη, όπως ανθρακικό αιθυλένιο, ανθρακικό διμεθύλιο και ανθρακικό διαιθύλιο.

Διαχωριστής (separator): Ο διαχωριστής (separator) αποτρέπει την εσωτερική διέλευση των ηλεκτρονίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη, αποτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο την περίπτωση εσωτερικού βραχυκυκλώματος. Ο διαχωριστής είναι ειδικά διαμορφωμένος προκειμένου να τον διαπερνά ο ηλεκτρολύτης, επιτρέποντας παράλληλα την μετακίνηση των ιόντων μεταξύ ανόδου και καθόδου.



Εικόνα 7 : Εσωτερική Απεικόνιση κελιού μπαταρίας

C rates:

Είναι ο ρυθμός εκφόρτισης (C) της μπαταρίας και μας δείχνει πόσο αργά ή γρήγορα μπορεί η μπαταρία να εξαντλήσει τη χωρητικότητά της (Ah). Ενδεικτικά, 1C rate μας δείχνει ότι η μπαταρία μπορεί να εξαντλήσει την χωρητικότητά της (Ah) μέσα σε 60λεπτά. Για παράδειγμα, μια μπαταρία με 50 αμπερώρια (Ah) με ρυθμό εκφόρτισης 1C rate τότε μπορεί να αποδώσει ρεύμα έντασης 50 A για μία ώρα.

Χωρητικότητα Μπαταρίας

Η μέτρηση της χωρητικότητας σε Αμπερώρια (Ah), υποδεικνύει τη συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται σε μια μπαταρία. Χωρητικότητα 1 Ah, αντιπροσωπεύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας όταν η μπαταρία αποδίδει ρεύμα 1 Αμπέρ για 1 ώρα.

Ελάχιστη τάση (Cut-off Voltage): Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση της μπαταρίας η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση μέγιστης αποφόρτισης της μπαταρίας.

Ονομαστική τάση μπαταρίας (Nominal Voltage (V)): Η ονομαστική τάση λειτουργίας της μπαταρίας όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή.

Ονομαστική ενέργεια μπαταρίας (Nominal energy (Wh))

Αντιστοιχεί στην ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας, δηλαδή δηλώνει την ενέργεια που αποδίδει η μπαταρία σε μία ώρα όταν αποφορτίζεται με το ονομαστικό ρεύμα από το 100% μέχρι την ελάχιστη τιμή η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη τάση της μπαταρίας (Cut-off Voltage).

Διάρκεια ζωής (Cycle Life)

Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης- εκφόρτισης χωρίς να επηρεάζονται τα ποιοτικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Η διάρκεια ζωής εκτιμάται για συγκεκριμένη φόρτιση και εκφόρτιση (ρεύμα αποφόρτισης) και δεδομένες συνθήκες. Η πραγματική διάρκεια ζωής της μπαταρίας επηρεάζεται από το ρυθμό και το βάθος της εκφόρτισης (DOD) και από άλλες συνθήκες όπως η θερμοκρασία λειτουργίας και η αντίστοιχη περιβαλλοντική αλλά και η υγρασία.

Ειδική ενέργεια (Specific energy Wh/kg)

Η ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας ανά μονάδα μάζας, μερικές φορές αναφέρεται ως βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα. Η ειδική ενέργεια είναι ένα χαρακτηριστικό της χημείας των μπαταριών και ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το βάρος της μπαταρίας που απαιτείται για συγκεκριμένη τιμή αποδιδόμενης ενέργειας (Wh). Ως εκ τούτου, κάθε μπαταρία χαρακτηρίζεται με μέγιστη τιμή συγκεκριμένης ενέργειας.

Μέγιστο συνεχές ρεύμα εκφόρτισης (Maximum Continuous Discharge Current (A))

Το μέγιστο συνεχές ρεύμα στο οποίο μπορεί η μπαταρία να αποφορτίζεται. Αυτό το όριο ορίζεται συνήθως από τον κατασκευαστή της μπαταρίας προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικά ποσοστά εκφόρτισης που θα μπορούσαν να καταστρέψουν την μπαταρία ή να μειώσουν τη χωρητικότητά της. Η συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος καθορίζει την μέγιστη συνεχή ισχύ του motor και κατ' επέκταση την μέγιστη συνεχή ταχύτητα του πλοίου.

Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης 30 - δευτ. (A)

Το μέγιστο ρεύμα στο οποίο μπορεί η μπαταρία να αποφορτίζεται με παλμούς έως και 30 δευτερόλεπτα. Αυτό το όριο ορίζεται συνήθως από τον κατασκευαστή, προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικοί ρυθμοί εκφόρτισης που θα μπορούσαν να καταστρέψουν την μπαταρία ή να μειώσουν τη χωρητικότητά της.

Τάση φόρτισης (Charge Voltage (V))

Η συνεχής τάση φόρτισης της μπαταρίας. Γενικά ισχύει ότι η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρεύμα μέχρι να φτάσει την τάση φόρτισης, όπου από εκεί και μετά το ρεύμα μειώνεται σημαντικά και η τάση παραμένει σταθερή.

Ρεύμα φόρτισης (Recommended Charge Current (A))

Το ιδανικό ρεύμα στο οποίο η μπαταρία συνίσταται να φορτίζεται

Βάθος αποφόρτισης (Depth of Discharge (DoD) (%))

Το ποσοστό της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά την αποφόρτιση ως προς την συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας. Οι κατασκευαστές προτείνουν να μην γίνεται αποφόρτιση σε ποσοστά άνω του 70%-80% καθώς μειώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Κατάσταση φόρτισης (State of Charge (SoC) (%))

Η υπάρχουσα χωρητικότητα της μπαταρίας ως ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας.

Cold cranking amps (CCA):

Ο αριθμός δείχνει το ρεύμα σε αμπέρ που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία στους – 18 ° C (0 ° F).

Θερμική διαχείριση(Thermal Management)

Στις μπαταρίες υψηλής ισχύος των ηλεκτρικών πλοίων μπορεί να προκληθεί ταχεία θέρμανση, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία αποφόρτιση της μπαταρίας. Αυτοί οι κίνδυνοι αντιμετωπίζονται επί του παρόντος μέσω του σχεδιασμού ενός περιβλήματος το οποίο χρησιμεύει ως φυσικό εμπόδιο.

2.2 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου - Εισαγωγή

Λίθιο-Lithium (Li)

Το λίθιο είναι το χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο Li. Το χημικά καθαρό λίθιο, στις κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, είναι μαλακό στερεό αργυρόλευκο μέταλλο με κανονική θερμοκρασία τήξης 180,50 °C και κανονική θερμοκρασία βρασμού 1330 °C, ενώ παράλληλα έχει πολύ μικρή πυκνότητα: $d = 534 \text{ kg/m}^3$. Ανήκει στα αλκαλιμέταλλα, δηλαδή στην ομάδα 1 (πρώην I_A) του περιοδικού πίνακα. Είναι, ακόμη, το ελαφρύτερο μέταλλο, αλλά και το ελαφρύτερο στερεό χημικό στοιχείο γενικότερα. Όπως και τα υπόλοιπα αλκαλιμέταλλα, το λίθιο είναι πολύ δραστικό και εύφλεκτο. Ακριβώς εξαιτίας της μεγάλης χημικής δραστηριότητάς του, το λίθιο δεν έχει βρεθεί στη φύση στη στοιχειακή του κατάσταση, παρά μόνο με τη μορφή ενώσεών του, συνήθως ιονικών. Όπως και τα άλλα αλκαλιμέταλλα, το λίθιο έχει ένα και μοναδικό ηλεκτρόνιο σθένους, το οποίο μπορεί εύκολα να αποβάλλει, σχηματίζοντας κατιόν. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, το μεταλλικό λίθιο είναι καλός αγωγός τόσο της θερμότητας όσο και του ηλεκτρισμού. Είναι, ακόμη, πολύ δραστικό χημικό στοιχείο.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα στην εύρεση μπαταριών οι οποίες θα ικανοποιούν τα πρότυπα ασφαλείας και συνάμα θα είναι ενεργειακά αποδοτικές προκειμένου να χρησιμοποιηθούν μαζικώς σε βιομηχανικές εφαρμογές. Η επιστημονική έρευνα τα τελευταία χρόνια έχει επικεντρωθεί στην παραγωγή διαφορετικών τύπων μπαταριών ιόντων λιθίου κυρίως λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του. Καταρχάς, εξαιτίας του γεγονότος ότι το λίθιο έχει ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στιβάδα, έχει την ελάχιστη ενέργεια ιονισμού 520 KJ/Mol από όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Παράλληλα, είναι πολύ δραστικό με αποτέλεσμα να αποτελεί εξαιρετική επιλογή για υλικό ανόδου (διασπάται και δίνει ιόντα και ηλεκτρόνια-οξειδώνεται). Πέραν τούτου, τα κελιά ιόντων λιθίου μπορούν να πετύχουν πολύ υψηλή τάση μέχρι και 4 volt ενώ αντίθετα τα αντίστοιχα κελιά συμβατικών μπαταριών παράγουν τιμές μέχρι 1.5 volt. Το συγκεκριμένο οφείλεται στην υψηλή αγωγιμότητα του λιθίου. Παράλληλα, η ειδική ενέργεια (specific energy) και ειδική ισχύς (specific power) είναι εξίσου υψηλές. Ενδεικτικά, η

ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να φτάσει και τα 200Wh/kg το οποίο ισοδυναμεί με 2 έως 4 φορές την αντίστοιχη τιμή συμβατικών μπαταριών. Στη συνέχεια, αυτές οι μπαταρίες έχουν υψηλό λειτουργικό εύρος θερμοκρασιών γεγονός πολύ σημαντικό καθώς τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών. Επισημαίνεται ότι το λίθιο είναι σταθερό όταν σχηματίζει οξειδία με μέταλλα. Τα διαφορετικά είδη μετάλλων δίνουν διαφορετικά είδη οξειδίων δημιουργώντας τελικώς διαφορετικά είδη μπαταριών ιόντων λιθίου. Σε κάθε περίπτωση, η βασική λειτουργία των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι ίδια στις περισσότερες περιπτώσεις.

2.3 Τύποι Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

Υπάρχουν διαφορετικά είδη μετάλλων ως οξειδία μετάλλων συνιστώντας κατά αυτό τον τρόπο διαφορετικούς τύπους μπαταριών :

- 1) Lithium Cobalt Oxide (LCO)
- 2) Lithium Manganese Oxide (LMO)
- 3) Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)
- 4) Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA)
- 5) Lithium Iron Phosphate (LFP)
- 6) Lithium Titanate Oxide (LTO)

Lithium Cobalt Oxide (LCO)

Η ανάπτυξη αυτών των μπαταριών ξεκίνησε την δεκαετία του 1970. Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες οξειδίου κοβαλτίου με πρόσμιξη λιθίου παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα ενέργειας και μεγαλύτερη τάση εξόδου (output voltage) όπως και χαμηλότερο ποσοστό αποφόρτισης (discharge rate) από τις αντίστοιχες νικελίου καδμίου. Αρχικά, το οξείδιο του κοβαλτίου με πρόσμιξη λιθίου αποτελεί υλικό της καθόδου και ο γραφίτης είναι υλικό της ανόδου. Κατά την διαδικασία της φόρτισης τα άτομα λιθίου στο οξείδιο του μετάλλου ιονίζονται δίνοντας ιόντα λιθίου και ηλεκτρόνια τα οποία μετακινούνται στο θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) που είναι από γραφίτη. Τα ιόντα λιθίου τα οποία είναι θετικά φορτισμένα καθώς έχουν αποβάλλει ηλεκτρόνια, μετακινούνται στο θετικό ηλεκτρόδιο διαμέσου του διαχωριστή. Τα ιόντα λιθίου αντιδρούν με τον άνθρακα (ηλεκτρόδιο από γραφίτη) σχηματίζοντας μία ένωση άνθρακα λιθίου. Όταν όλα τα ιόντα λιθίου μετακινηθούν από την άνοδο στην κάθοδο η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Κατά την σύνδεση της μπαταρίας με ένα καταναλωτή, το λίθιο που βρίσκεται στον γραφίτη διασπάται σε ιόντα λιθίου και ηλεκτρόνια τα οποία ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας κατά αυτό τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η αγωγιμότητα της μπαταρίας, το Οξείδιο του κοβαλτίου με πρόσμιξη λιθίου τοποθετείται πάνω σε πλάκα αλουμινίου (Aluminum current collector) και αντίστοιχα ο γραφίτης τοποθετείται πάνω σε χαλκό (copper current collector), διευκολύνοντας ουσιαστικά την ροή των ηλεκτρονίων. Συμπερασματικά, ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτός ο τύπος μπαταρίας είναι η υψηλή ειδική ενέργεια, γεγονός που την καθιστά δημοφιλή επιλογή για κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές.

Το μεγάλο μειονέκτημα των μπαταριών λιθίου κοβαλτίου είναι η σχετική μικρή διάρκεια ζωής τους, η χαμηλή θερμική σταθερότητα και περιορισμένη ειδική ισχύς. Παράλληλα, το γεγονός ότι το κοβάλτιο είναι ένα ακριβό μέταλλο, συνιστά ένα επιπρόσθετο μειονέκτημα αυτού του τύπου σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Αξίζει να επισημανθεί ότι η μπαταρία οξειδίου του κοβαλτίου με πρόσμιξη λιθίου θα πρέπει να φορτίζεται μέχρι τιμές ρευμάτων που δεν ξεπερνούν το 1C rate της μπαταρίας, καθώς σε διαφορετική περίπτωση η μπαταρία υφίσταται υπερθέρμανση και υπερβολική πίεση. Ενδεικτικά, επισημαίνεται ότι σε αυτόν τύπο μπαταρίας, οι κατασκευαστές προτείνουν για γρήγορη φόρτιση μια τιμή της τάξης του 0.8C.

Lithium Manganese Oxide (LMO)

Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας διαθέτει διοξείδιο του μαγγανίου για υλικό καθόδου και άνοδο από λίθιο. Το μαγγάνιο εμφανίζεται μαζί με τον σίδηρο στην φύση και δεν είναι τόσο σπάνιο όσο το κοβάλτιο αποτελώντας ένα πιο κατάλληλο υλικό για μαζική παραγωγή λόγω κυρίως του κόστους του. Η λειτουργία της μπαταρίας είναι ίδια με την αντίστοιχη λιθίου κοβαλτίου, αλλά η κατασκευή είναι διαφορετική. Ουσιαστικά η διαφορά του συγκεκριμένου τύπου σε σχέση με τον προηγούμενο, έγκειται στο υλικό που χρησιμοποιείται στην άνοδο και στην κάθοδο.

Η αρχιτεκτονική της καθόδου σχηματίζει μια τρισδιάστατη δομή spinel που βελτιώνει τη ροή ιόντων στο ηλεκτρόδιο, με αποτέλεσμα χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση. Ένα άλλο πλεονέκτημα που προκύπτει λόγω της τρισδιάστατης δομής, είναι η υψηλή θερμική σταθερότητα όπως και η αυξημένη ασφάλεια. Η χαμηλή εσωτερική αντίσταση του κελιού της μπαταρίας, επιτρέπει την εφαρμογή υψηλών ρευμάτων φόρτισης (γρήγορη φόρτιση) και αποφόρτισης, χωρίς να προκαλείται υπέρμετρη αύξηση της θερμοκρασίας.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας LMO είναι στο 1/3 περίπου της χωρητικότητας του τύπου LCO . Παράλληλα, η χαμηλή ειδική ισχύς και η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής συνιστούν του βασικούς λόγους για τους οποίους ο συγκεκριμένος τύπος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)

Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας διαθέτει οξειδίο του μαγγανίου, νικελίου και κοβαλτίου με πρόσμιξη λιθίου για υλικό καθόδου και άνοδο από γραφίτη. Αποτελεί αυτή την στιγμή έναν από τους πιο επιτυχημένους τύπους μπαταριών, οι οποίες εξαιτίας των λειτουργικών τους χαρακτηριστικών μπορούν χρησιμοποιηθούν μαζικώς σε βιομηχανικές εφαρμογές. Το μυστικό της NMC έγκειται στο συνδυασμό νικελίου και μαγγανίου. Το νικέλιο είναι γνωστό για την υψηλή ειδική του ενέργεια ωστόσο δεν παρουσιάζει σταθερότητα. Το μαγγάνιο έχει το πλεονέκτημα να σχηματίζει μια δομή spinel για να επιτυγχάνει χαμηλή εσωτερική αντίσταση, ωστόσο οι μπαταρίες που βασίζονται σε αυτό το μέταλλο παρουσιάζουν χαμηλές τιμές ειδικής ενέργειας. Ο συνδυασμός των δύο μετάλλων αντισταθμίζει τα μειονεκτήματα τα οποία παρουσιάζει το καθένα ατομικά. Ο τύπος NMC αποτελεί μπαταρία επιλογής για ηλεκτρικά εργαλεία, ηλεκτρονικά ποδήλατα και άλλους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ο ποσοστιαίος συνδυασμός των μετάλλων της καθόδου είναι συνήθως το ένα τρίτο νικέλιο, το ένα τρίτο μαγγάνιο και το ένα τρίτο κοβάλτιο, επίσης γνωστά ως 1-1-1. Αξίζει να τονισθεί ότι το κοβάλτιο είναι ακριβό και σε περιορισμένη προσφορά. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, οι κατασκευαστές μπαταριών μειώνουν το περιεχόμενο κοβαλτίου με κάποιο συμβιβασμό στην απόδοση. Ένας επιτυχημένος συνδυασμός είναι το NCM532 με 5 μέρη νικελίου, 3 μέρη κοβαλτίου και 2 μέρη μαγγανίου. Άλλοι συνδυασμοί είναι NMC622 και NMC811. Το κοβάλτιο σταθεροποιεί το νικέλιο, το οποίο αποτελεί υλικό υψηλής ενέργειας.

Συμπερασματικά, ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας προσφέρει την υψηλότερη ειδική ενέργεια σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους μπαταριών λιθίου, γεγονός που μεταφράζεται σε μειωμένο βάρος για την ίδια αποδιδόμενη ενέργεια, στοιχείο πολύ σημαντικό σε εφαρμογές όπως αυτές των ηλεκτρικών οχημάτων και των πλοίων, όπου το βάρος αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδίασης. Η μπαταρία οξειδίου του λιθίου, νικελίου, μαγγανίου και κοβαλτίου είναι πιο διαδεδομένη στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA)

Η απαίτηση για μπαταρίες αυτοκινήτων με πολύ υψηλή ειδική ενέργεια και διάρκεια ζωής οδήγησε στις μπαταρίες NCA. Αρχικά, υλικό της καθόδου αποτελεί το οξείδιο λιθίου και νικελίου το οποίο υπάρχει στην φύση, και συνδυάζεται με κοβάλτιο και αλουμίνιο. Κατά συνέπεια, μέσω αυτού του συνδυασμού των μετάλλων, επιτυγχάνεται η αύξηση της ειδικής ενέργειας της μπαταρίας όπως επίσης και τα επίπεδα ασφαλείας της. Σταδιακά αυτές οι μπαταρίες αντικαταστάθηκαν από τις NMC οι οποίες παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερα επίπεδα ασφαλείας και είναι αρκετά πιο οικονομικές.

Lithium Iron Phosphate (LFP)

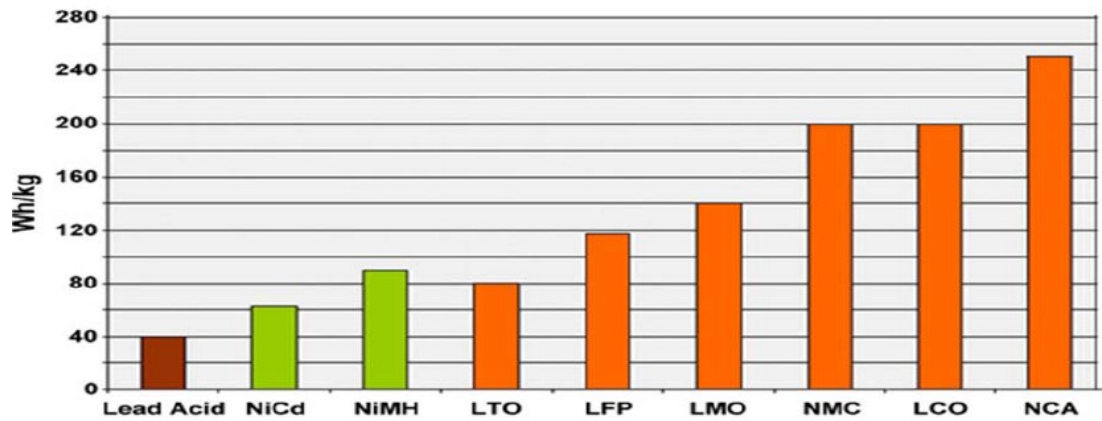
Στα μέσα της δεκαετίας του 90 πραγματοποιήθηκαν έρευνες προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αυτό το μέταλλο ως υλικό καθόδου αντί για το οξείδιο λιθίου κοβαλτίου. Αρχικά αυτή η μπαταρία δεν έγινε αποδεκτή στην αγορά εξαιτίας της χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε τα τελευταία χρόνια μειώνοντας το particle μέγεθος και τοποθετώντας πάνω σε αυτό ένα υλικό με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητας όπως τα carbon nanotubes. Αυτή η μπαταρία έχει υψηλή ηλεκτρική και θερμική σταθερότητα εξαιτίας του υλικού που προστέθηκε. Παράλληλα, προσφέρει καλή ηλεκτροχημική απόδοση με χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Σχετικά με την κατασκευή της, το LFP χρησιμοποιείται ως υλικό της καθόδου και ο γραφίτης χρησιμοποιείται ως υλικό ανόδου.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου αποτελεί η σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής συγκριτικά πάντα με τους υπόλοιπους τύπους μπαταριών λιθίου. Ο μεγάλος αριθμός κύκλων λειτουργίας, συνοδεύεται και με την δυνατότητα της φόρτισης της μπαταρίας σε μεγάλα ρεύματα δηλαδή πάνω 1C, χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής και η απόδοση της. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει επομένως τις ταχυφορτίσεις της μπαταρίας χωρίς την υποβάθμιση των λειτουργικών της χαρακτηριστικών. Σε περιπτώσεις ηλεκτρικών πλοίων οι μπαταρίες LFP επιλύουν το πρόβλημα που δημιουργείται από την έλλειψη

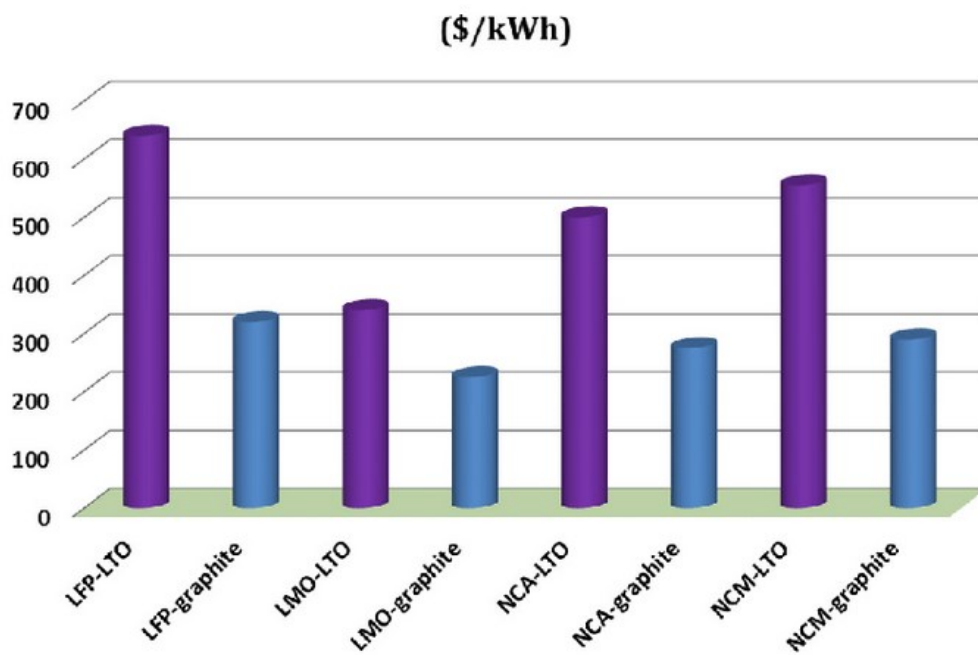
ικανοποιητικού χρόνου για φόρτιση των μπαταριών στα λιμάνια, όπου εκεί το σενάριο της ταχυφόρτισης κρίνεται απαραίτητο.

Lithium Titanate Oxide (LTO)

Αναφορικά με την κατασκευή τους, ο γραφίτης που αποτελεί υλικό της ανόδου της μπαταρίας αντικαταστάθηκε από το οξείδιο του λιθίου τιτανίου. Αντίστοιχα, το υλικό της καθόδου μπορεί να είναι είτε οξείδιο μαγγανίου με πρόσμιξη λιθίου (lithium manganese oxide) είτε οξείδιο του λιθίου νικελίου μαγνησίου και κοβαλτίου (NMC). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προκύπτει από αυτόν τον τύπο μπαταρίας είναι η μεγάλη αύξηση στην ταχύτητα φόρτισης της μπαταρίας εξαιτίας της μοναδικής μικροδομής των κρυστάλλων του τιτανίου. Παράλληλα, ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα αυτού του τύπου μπαταρίας αποτελεί η αποτροπή του σχηματισμού του SEI (Solid Electrolyte Interface) γεγονός που σημαίνει ότι αυξάνονται θεαματικά οι κύκλοι λειτουργίας της μπαταρίας και κατ'επέκταση η διάρκεια ζωής της. Ωστόσο, αυτή την στιγμή του κόστος της είναι αρκετά υψηλό, καθώς είναι αρκετά δύσκολο να συνδεθούν οι κρύσταλλοι οξειδίου λιθίου τιτανίου, αποτελώντας τελικώς την δεδομένη στιγμή ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα της μπαταρίας.



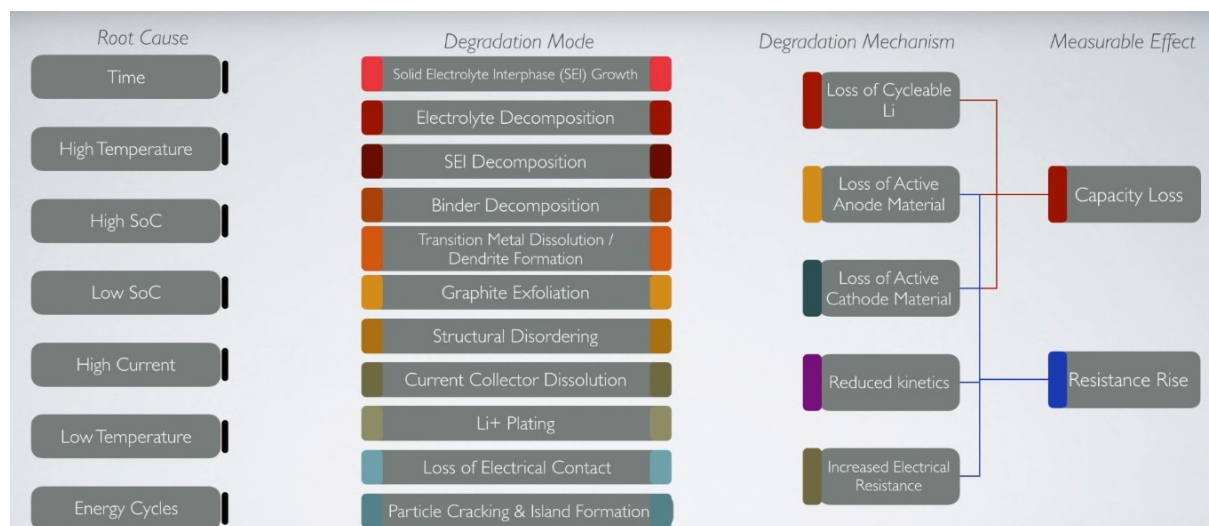
Εικόνα 8: Ειδική Ισχύς διαφορετικών τύπων μπαταριών ιόντων λιθίου



Εικόνα 9: Κόστος κτήσης μπαταρίας για διαφορετικούς τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου

2.4 Λειτουργική Υποβάθμιση Μπαταρίας - Παράγοντες που Επιδρούν

Ως υποβάθμιση της μπαταρίας ορίζεται η μη αναστρέψιμη απώλεια της δυνατότητας της μπαταρίας να αποθηκεύει ενέργεια ή μείωση της ολικής χωρητικότητας της μπαταρίας. Η απώλεια/εξασθένηση της χωρητικότητας εκφράζεται ως ποσοστό της διαφοράς της αρχικής χωρητικότητας από την υπάρχουσα χωρητικότητα της μπαταρίας μετά από έναν αριθμό κύκλων φόρτισης. Η απώλεια ή εξασθένηση της χωρητικότητας οφείλεται σε χημικές μεταβολές που πραγματοποιούνται στα ηλεκτρόδια της μπαταρίας και επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από διάφορους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες αποθήκευσης της μπαταρίας αποτελούν σημαντικό παράγοντα, και ειδικότερα αυξάνεται η ποσοστιαία υποβάθμιση της μπαταρίας εάν αποθηκεύεται η μπαταρία σε υψηλές θερμοκρασίες. Στη συνέχεια, επίπεδα υψηλών λειτουργικών θερμοκρασιών, τα οποία προέρχονται είτε από τη φόρτιση είτε από τον περιβαλλοντική θερμοκρασία επισπεύδουν την απώλεια χωρητικότητας. Οι άνοδοι άνθρακα κατά την διαδικασία της φόρτισης εκπέμπουν θερμότητα. Παράλληλα, ο σχηματισμός της στρώσης SEI αποτελεί έναν από τους σημαντικούς παράγοντες υποβάθμισης των χαρακτηριστικών της μπαταρίας.



Εικόνα 10: Παράγοντες που επιδρούν στην υποβάθμιση της μπαταρίας.

1) Solid Electrolyte Interface (SEI)

Ο σχηματισμός του SEI όπως προαναφέρθηκε αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο η οποία επηρεάζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας καθώς επίσης τα επίπεδα ασφαλείας και την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Γενικά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούνται από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο το οποίο είναι συνήθως από γραφίτη, ένα θετικό ηλεκτρόδιο το οποίο αποτελείται από οξειδία του λιθίου με προσμίξεις διαφόρων μετάλλων ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας και τέλος ένα διαχωριστή. Παράλληλα, τα ηλεκτρόδια περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη.

Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (συνήθως γραφίτης) αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη και κατά αυτό τον τρόπο σχηματίζεται ένα στρώμα που αποτελείται από μείγμα οξειδίου του λιθίου, φθοριούχου λιθίου και ημιανθρακικών στην διεπιφάνεια του γραφίτη. Ο σχηματισμός αυτού του στρώματος οδηγεί στην κατανάλωση ποσοστού του ηλεκτρολύτη και ταυτόχρονα του λιθίου. Τα ιόντα λιθίου μετακινούνται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο κατά την διαδικασία της φόρτισης της μπαταρίας με αποτέλεσμα κατά τον σχηματισμό του στρώματος SEI να κατακρατείται ποσότητα λιθίου.

Συνεπώς, επέρχεται σταδιακά μείωση του ενεργού μέρους του αρνητικού ηλεκτροδίου (άνοδος). Με την αύξηση των κύκλων λειτουργίας της μπαταρίας πραγματοποιούνται επιπρόσθετες αντιδράσεις μεταξύ του γραφίτη και του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα το στρώμα του SEI να γίνεται όλο και παχύτερο και πυκνότερο γεγονός που καθιστά πολύ πιο δύσκολη την μετακίνηση των ιόντων λιθίου από και προς τον γραφίτη. Αυτή η δυσκολία ουσιαστικά μεταφράζεται σε αύξηση της εσωτερικής αντίστασης και κατ'επέκταση αύξηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας κατά την λειτουργία της. Αντίστοιχα, σχηματίζεται το στρώμα SEI και στην κάθοδο, καθώς από τα σωματίδια που υπάρχουν στον ηλεκτρολύτη πραγματοποιείται αντίδραση με το υλικό της καθόδου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι ο σχηματισμός του στρώματος SEI είναι απαραίτητος για την λειτουργία της μπαταρίας καθώς προσφέρει προστασία στο ηλεκτρόδιο από γραφίτη. Παράλληλα, αποτρέπει τα ηλεκτρόνια από την επαφή τους με τον ηλεκτρολύτη γεγονός που θα οδηγούσε σε περαιτέρω υποβάθμιση του ηλεκτρολύτη. Ουσιαστικά, το στρώμα λειτουργεί ως ηλεκτρική μόνωση της ανόδου, έχοντας ωστόσο επαρκή ιοντική αγωγιμότητα και επιτρέποντας στην μπαταρία να λειτουργεί κανονικά. Το πρόβλημα έγκειται κατά το στάδιο όπου αυξάνεται το πάχος του στρώματος γεγονός που οδηγεί σε μείωση του ενεργού υλικού της ανόδου και στην κατανάλωση του λιθίου.

2)Υψηλά ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης – Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας

Τα υψηλά ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται για μεγάλη χρονική περίοδο, οδηγούν σε σημαντική μηχανική πίεση μεγάλες τιμές της οποίας μπορούν να οδηγήσουν σε ρήγμα της ανόδου. Αυτό το ρήγμα θα οδηγήσει σε απόσπαση του κομματιού με αποτέλεσμα να χαθεί σημαντικό μέρος από το ενεργό ποσοστό της ανόδου άρα και της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Παράλληλα, η επιφάνεια της ανόδου που απέμεινε, έρχεται απευθείας σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα τον περαιτέρω σχηματισμό του στρώματος SEI και την περαιτέρω κατανάλωση του λιθίου όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, σε υψηλά ρεύματα φόρτισης η άνοδος διαστέλλεται ως και 13% του αρχικού της όγκου, με αποτέλεσμα το στρώμα SEI να σπάει από μόνο του ή να αποσυντίθεται κάτω από αυτές τις συνθήκες. Το συγκεκριμένο γεγονός οδηγεί σε σχηματισμό εκ νέου στρώματος SEI, καταναλώνοντας έτσι περαιτέρω ποσότητες λιθίου.

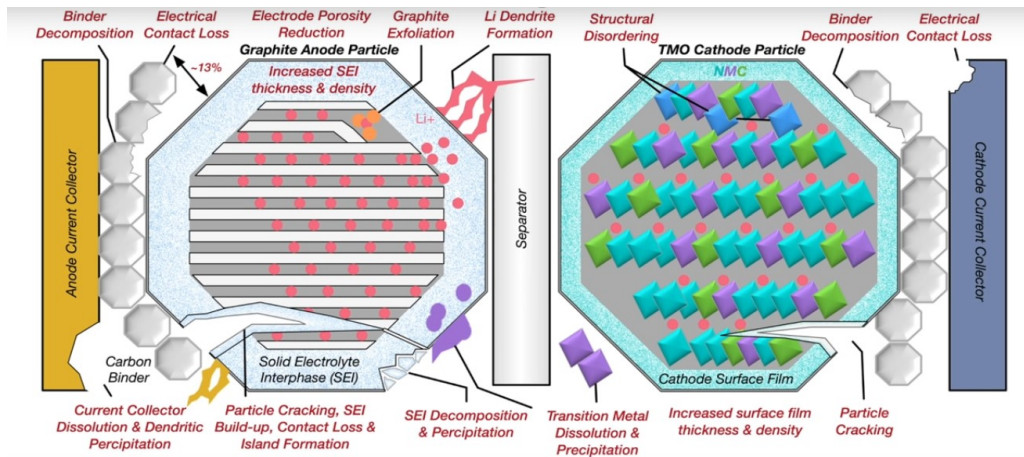
Επιπρόσθετα, σε καταστάσεις υψηλής φόρτισης (high state of charge) σε τάσεις πάνω από 4.2 V παρατηρείται επιμετάλλωση του λιθίου στην άνοδο, προκαλώντας μη αντιστρεπτή απώλεια χωρητικότητας. Η τυχαιότητα του μεταλλικού λιθίου που ενσωματώνεται στην άνοδο κατά τη διάρκεια της παρεμβολής καταλήγει σε σχηματισμό δενδριτών. Με την πάροδο του χρόνου οι δενδρίτες μπορούν να συσσωρευτούν και να διαπεράσουν το διαχωριστικό, προκαλώντας βραχυκύκλωμα που συνεπάγεται υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να οδηγήσει σε

φωτιά ή έκρηξη. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως θερμική διαφυγή (thermal runaway).

Συνεπώς, ο σχηματισμός δενδριτών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της μπαταρίας, καθώς μειώνεται το ενεργό ποσοστό της ανόδου και το ποσοστό λιθίου (έχει γίνει επιμετάλλωση λιθίου στην άνοδο) και ταυτόχρονα μπορούν να προκύψουν σοβαρά προβλήματα ασφαλείας.

3) Υψηλά ποσοστά αποφόρτισης (Low SOC or High DOD)

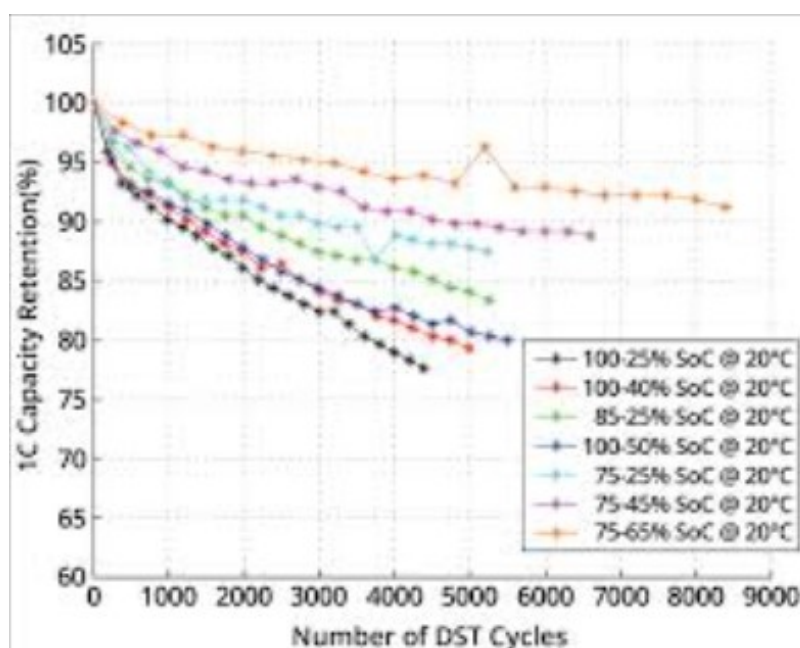
Όπως προαναφέρθηκε το υλικό της ανόδου τοποθετείται πάνω σε χαλκό και αντίστοιχα το υλικό της καθόδου σε αλουμίνιο. Τα συγκεκριμένα υλικά επιλέγονται λόγω της υψηλής τους ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της σταθερότητά τους. Ωστόσο, σε καταστάσεις υψηλής αποφόρτισης της μπαταρίας (υψηλό DOD) ο χαλκός και το αλουμίνιο χάνουν την ιδιότητα της ηλεκτροχημικής σταθερότητας που τα χαρακτηρίζει. Το συγκεκριμένο έχει ως αποτέλεσμα την διάλυση του χαλκού και του αλουμινίου στον ηλεκτρολύτη. Στη συνέχεια, κατά την διαδικασία της φόρτισης τα ιόντα χαλκού και αλουμινίου μπορούν να αναχθούν στην άνοδο σχηματίζοντας δενδρίτες πάνω στο υλικό της ανόδου όπως ακριβώς αναλύθηκε στην περίπτωση του σχηματισμού των δενδριτών λιθίου. Όπως προαναφέρθηκε αυτοί οι δενδρίτες μπορούν να διαπεράσουν το διαχωριστικό, οδηγώντας τελικά σε βραχυκύκλωμα της μπαταρίας. Παράλληλα, η μείωση του πάχους του χαλκού επιφέρει μείωση της ηλεκτρικής επαφής μεταξύ του χαλκού και της ανόδου οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της εσωτερικής αντίστασης. Αντίστοιχα, το αλουμίνιο στην κάθοδο διασπάται στον ηλεκτρολύτη γεγονός που δημιουργεί την μείωση του ενεργού πάχους του αλουμινίου και την επακόλουθη μείωση της επαφής της καθόδου με το αλουμίνιο.



Εικόνα 11: που απεικονίζει συγκεντρωτικά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που περιγράφηκαν και οι οποίες οδηγούν στην υποβάθμιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της μπαταρίας.

2.5 Βέλτιστο λειτουργικό εύρος της μπαταρίας

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ότι όταν το βάθος αποφόρτισης δεν ξεπερνάει το 50% της ολικής χωρητικότητας, τότε μειώνεται η πιθανότητα αισθητής απώλειας χωρητικότητας της μπαταρίας συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας της. Παράλληλα, απεικονίζεται ότι όταν η μπαταρία δεν φορτίζεται μέχρι το 100% αποτρέπεται εξίσου η αισθητή απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας. Τέλος, συμπεραίνεται ότι η λειτουργία της μπαταρίας είναι βέλτιστη όταν το ποσοστό φόρτισης είναι μεταξύ 65%-75% της ολικής της χωρητικότητας. Συμπερασματικά, επιλέγεται αφενός το μέγιστο βάθος αποφόρτισης να μην ξεπερνάει το 70%-75% και αφετέρου να αποφεύγεται όσο είναι δυνατόν η φόρτιση της μπαταρίας μέχρι το 100%.



Εικόνα 12: Απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας για διαφορετικές περιπτώσεις εύρους βάθους αποφόρτισης.

2.6 Τελική επιλογή του τύπου μπαταρίας

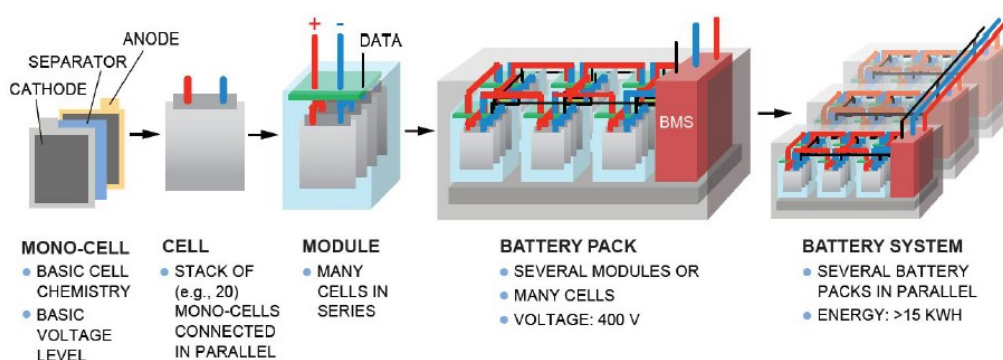
Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε παραπάνω, οι τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου που προκρίνονται για την χρησιμοποίησή τους σε ηλεκτρικά πλοία είναι η μπαταρία τύπου NMC και η LFP. Η μπαταρία τύπου NMC παρουσιάζει εξαιρετικές τιμές ειδικής ενέργειας και χωρητικότητας, γεγονός που μεταφράζεται σε μειωμένο βάρος μπαταριών για συγκεκριμένη απαίτηση σε εγκατεστημένη ισχύ μπαταριών. Παράλληλα, παρουσιάζει μεγάλο αριθμό κύκλων λειτουργίας που μεταφράζεται σε σημαντική διάρκεια ζωής. Από την άλλη πλευρά, η μπαταρία τύπου LFP παρουσιάζει μειωμένες τιμές ειδικής ενέργειας άρα για την ίδια απαίτηση σε εγκατεστημένη ισχύ, απαιτείται μεγαλύτερο βάρος. Ωστόσο, η μπαταρία τύπου LFP παρουσιάζει μεγαλύτερο αριθμό κύκλων λειτουργίας και συγκριτικά μειωμένο κόστος κτήσης λόγω της αντικατάστασης του κοβαλτίου από το phosphate. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η σχετικά χαμηλή ειδική ενέργεια της μπαταρίας LFP σε σχέση με την NMC σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός μπαταριών για την ίδια εγκατεστημένη ισχύ, γεγονός που μεταφράζεται σε μεγαλύτερο κόστος. Σε κάθε περίπτωση το συγκριτικό κόστος παραμένει χαμηλότερο. Αξίζει να επισημανθεί ότι το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μπαταρίας LFP είναι η φόρτιση σε μεγάλες τιμές ρεύματος μέχρι και 2C rate χωρίς την υπερθέρμανση της μπαταρίας. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό, ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις που απαιτείται γρήγορη φόρτιση της μπαταρίας. Παράλληλα, το λειτουργικό εύρος θερμοκρασιών είναι μεγαλύτερο, καθώς επιτρέπεται η λειτουργία της μπαταρίας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, οι μπαταρίες LFP μπορούν να αντέξουν στη χρήση υψηλής τάσης για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, γεγονός που μεταφράζεται σε υψηλή θερμική σταθερότητα. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό μεταφράζεται σε μειωμένη πιθανότητα έκρηξης ή πυρκαγιάς. Συμπερασματικά, λόγω κυρίως της θερμικής σταθερότητας σε σχέση με τον τύπο NMC, η μπαταρία LFP αποτελεί εξαιρετική επιλογή, πόσο μάλλον για την περίπτωση ηλεκτρικών πλοίων που καλύπτουν τις πορθμειακές γραμμές στην Ελλάδα, όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος τους καλοκαιρινούς μήνες είναι αρκετά υψηλή.

Κεφάλαιο 3^ο : Μελέτη Ηλεκτρικού πλοίου

Σε αυτή την ενότητα θα προσδιοριστεί ο βασικός εξοπλισμός για την λειτουργία του ηλεκτρικού πλοίου, ο οποίος θα αποτελέσει και την βασική συνιστώσα του κόστους μετασκευής. Ειδικότερα, θα γίνει ανάλυση σχετικά με το πλήθος των πακέτων των μπαταριών και της διάταξης τους επί του πλοίου, όπως επίσης το BMS της μπαταρίας, το σύστημα τροφοδοσίας του δικτύου σε ένα ηλεκτρικό πλοίο, οι αζιμουθιακοί προωστήρες και τέλος οι ηλεκτρικοί κινητήρες.

3.1 Πλήθος πακέτων μπαταριών και διάταξη αυτών

Τα μεγάλα πακέτα μπαταριών αποτελούνται κανονικά από έναν αριθμό μονάδων (modules), καθεμία από τις οποίες περιέχει έναν αριθμό κυψελών (cells), όπως επίσης ηλεκτρονικά για λόγους ελέγχου, ασφάλειας και παρακολούθησης της λειτουργίας της μπαταρίας. Προκειμένου να επιτευχθεί η ισχύς και η ενέργεια που απαιτείται από την μπαταρία, τα κελιά (cells) μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να πετύχουν την ονομαστική τάση της μονάδας (module) , αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο και την χωρητικότητα της. Στη συνέχεια, κάθε μονάδα τοποθετείται σε σειρά προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση του δικτύου. Έπειτα, τοποθετούνται σε παράλληλη σύνδεση μονάδες μπαταριών (modules) με τις ήδη υπάρχουσες σε σειρά, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς. Ανάλογα με τις σχεδιαστικές προδιαγραφές τοποθέτησης των μπαταριών, το σύστημα της μπαταρίας χωρίζεται σε πακέτα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η διάταξη που αναλύθηκε, από την κάθε κυψέλη μέχρι και το τελικό σύστημα της μπαταρίας.



Pack Battery

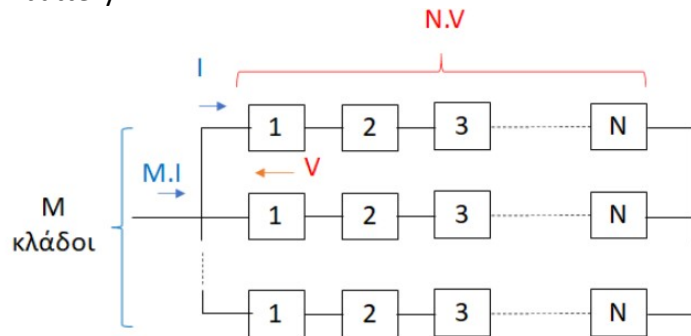
M: κλάδοι τοποθετημένοι παράλληλα

N: πλήθος μπαταριών τοποθετημένων σε σειρά σε κάθε κλάδο.

V: Ονομαστική τάση μπαταρίας (module)

I: ρεύμα κλάδου

Power battery = $N * M * V * I$



Εικόνα 13: Το πακέτο μπαταριών του πλοίου Ampere

3.2 Σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας - Battery Management System (BMS)

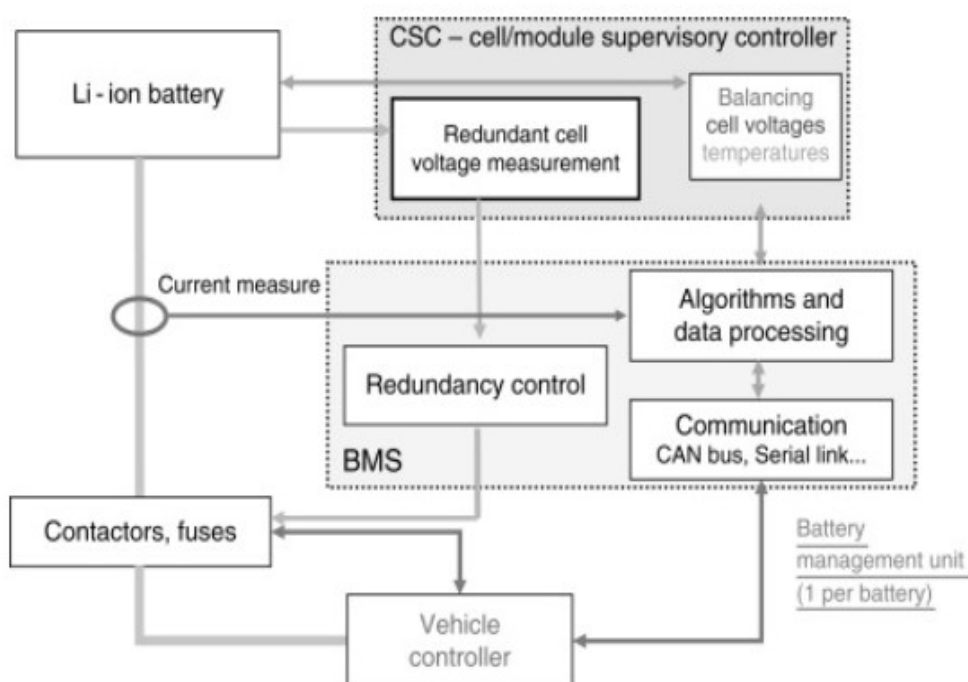
Η βασική λειτουργία του BMS είναι να διατηρήσει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας εντός της περιοχής λειτουργίας ασφάλειας αναφορικά με την τάση, το ρεύμα και την θερμοκρασία κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Κατά αυτόν τον τρόπο, η μπαταρία θα λειτουργεί χωρίς να δημιουργεί απειλές στο ίδιο το σύστημα της μπαταρίας και τους κοντινούς ανθρώπους (κάτοικοι, προσωπικό, συντήρηση κ.λπ.) αλλά και παράλληλα αποφεύγοντας συγκεκριμένες συνθήκες που οδηγούν στην υποβάθμιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της μπαταρίας.

Πιο συγκεκριμένα, το BMS αναλύει τη συμπεριφορά της μπαταρίας με συνεχή ή περιοδικό τρόπο μετατρέποντας τις παραμέτρους που παρακολουθούνται σε δεδομένα κατάστασης μπαταρίας που τροφοδοτούνται στο ανώτερο επίπεδο συστήματος ή χρησιμοποιούνται απευθείας για τον έλεγχο των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης βάσει μιας αρχής ανάδρασης. Το ανώτερο επίπεδο συστήματος μπορεί να είναι ο ίδιος ο χρήστης της μπαταρίας (όπως ένας οδηγός ηλεκτρικού αυτοκινήτου) ή μια διαμόρφωση λογισμικού / υλικού που ελέγχει το ενεργειακό σύστημα.

Το BMS πρέπει να παρακολουθεί το σύστημα καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του, διασφαλίζοντας τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Κατάλληλοι αισθητήρες συγκεντρώνουν μετρήσεις σχετικά με το ρεύμα την τάση, και θερμοκρασίες εντός του κάθε module. Οι πληροφορίες επεξεργάζονται από το BMS για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της μπαταρίας.
- Έλεγχος του ρεύματος και της τάσης φόρτισης του φορτιστή για διασφάλιση της σωστής φόρτισης της μπαταρίας. Ο φορτιστής μπορεί να είναι ενσωματωμένος ή εξωτερικός.
- Θερμική διαχείριση της μπαταρίας: το BMS παρακολουθεί τη θερμοκρασία του κάθε module σε κάθε φάση λειτουργίας και παράλληλα τους ανεμιστήρες για τη διαχείριση της θερμοκρασίας της μπαταρίας.

- Έλεγχος ασφάλειας: Με την ανίχνευση κάποιας βλάβης, το σύστημα είτε απενεργοποιείται αυτόματα (κατάσταση έκτακτης ανάγκης) είτε απενεργοποιεί μέρος του συστήματος ενημερώνοντας τον χρήστη. Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι πολύ σημαντική για την εξασφάλιση της ασφάλειας του συστήματος ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπως αυτή του βραχυκυκλώματος (thermal runaway).
- Αναφορά της κατάστασης της μπαταρίας: επικοινωνία πληροφοριών (συναγερμοί, μετρητές κ.λπ.) στον χρήστη και σε άλλο ενσωματωμένο εξοπλισμό μέσω του διαύλου επικοινωνίας.
- Συντήρηση μέσω του BMS: Υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης εργαλείων συντήρησης και διάγνωσης για την πραγματοποίηση των τακτικών ελέγχων και συντήρησης της μπαταρίας.
- Μεταφορά δεδομένων σε φορητό υπολογιστή, μέσω του οποίου παρακολουθούνται και αποθηκεύονται τα δεδομένα που συλλέγονται από το BMS. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα μπορούν να εξεταστούν χρησιμοποιώντας κανονικά εργαλεία λογισμικού, όπως υπολογιστικά φύλλα.



Εικόνα 14: Γραφική αναπαράσταση των λειτουργιών και διασύνδεση μεταξύ αυτών του BMS για μία μπαταρία ιόντων λιθίου.

Μέτρηση και έλεγχος της τάσης σε κάθε κυψέλη

Η συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση της τάσης είναι από τις πιο σημαντικές λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας. Η υπερβολική αύξηση της τάσης λόγω υπερφόρτισης ή παλμών υψηλής ισχύος μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά ζητήματα ασφαλείας. Ουσιαστικά, μέσω του συστήματος αποφεύγεται η υπερφόρτιση του συστήματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, η υπερφόρτιση της μπαταρίας συνοδεύεται από την αύξηση της θερμοκρασίας η οποία όπως εξηγήθηκε παραπάνω συνιστά σημαντική παράμετρο για την χημική υποβάθμιση των ηλεκτροδίων της μπαταρίας (σχηματισμός στρώματος SEI, ασταθής συμπεριφορά του χαλκού και του αλουμινίου με τον ηλεκτρολύτη και διάσπασή του σε αυτόν). Παράλληλα, εκτός από την σταδιακή μείωση της χωρητικότητας, η υπερθέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά ζητήματα ασφαλείας όπως πυρκαγιά η οποία μπορεί να προκληθεί από βραχυκύκλωμα της μπαταρίας.

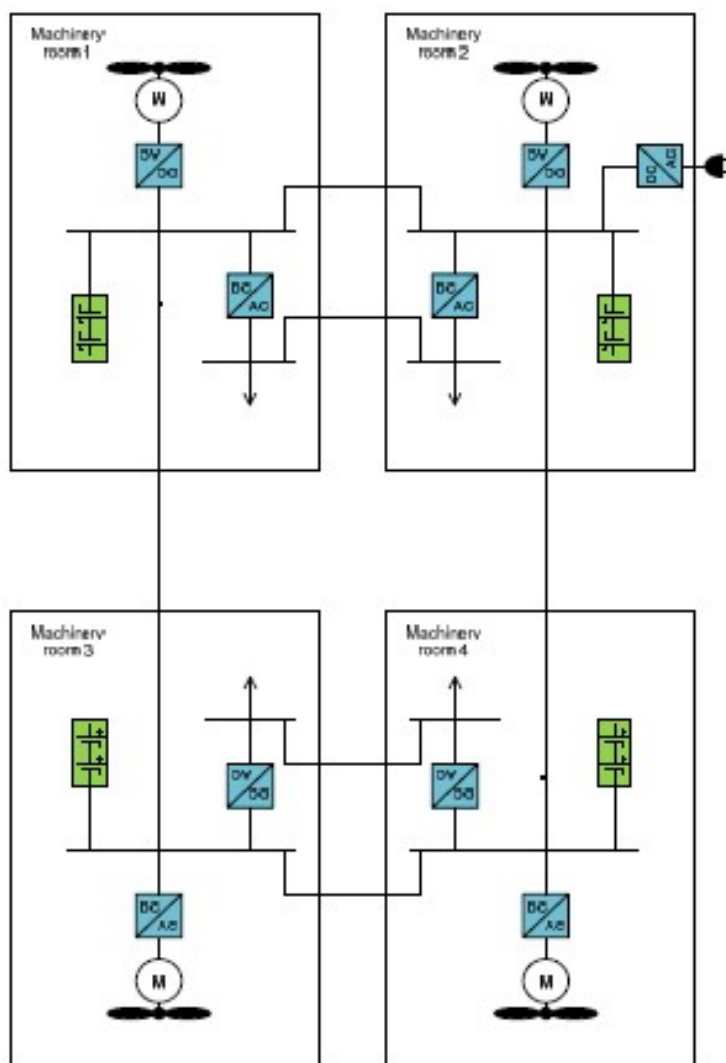
3.3 Δίκτυο τροφοδοσίας ηλεκτρικού πλοίου

Τα επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία όπως προαναφέρθηκε έχουν συνήθως δύο μηχανοστάσια για την περίπτωση πλοίου παντόφλας και τέσσερα για την περίπτωση αμφίπλωρου. Παρακάτω, θα αναλυθεί η περίπτωση πλοίου που διαθέτει τέσσερα μηχανοστάσια όπου αποτελεί και την πιο συνηθισμένη περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση, για την περίπτωση πλοίου με δύο μηχανοστάσια, το δίκτυο τροφοδοσίας παρουσιάζει την ίδια λογική, με την διαφορά ότι υπάρχουν λιγότεροι inverter, ηλεκτρικά μοτέρ, δύο ζυγά λιγότερα, και μικρότερα σε μήκος καλώδια. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστεί το δίκτυο τροφοδοσίας ηλεκτρικού πλοίου τόσο για την περίπτωση συνεχούς ρεύματος όσο και για την περίπτωση εναλλασσόμενου. Επισημαίνεται ότι για την περίπτωση τεσσάρων μηχανοστασίων, στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερα ανεξάρτητα πακέτα μπαταριών. Σύμφωνα με την επιλογή που θα γίνει παρακάτω, θα επιλεγεί να τοποθετηθούν στο πλοίο 2 ανεξάρτητα πακέτα μπαταριών, καθώς δεν υπάρχει ουσιαστικός λόγος να τοποθετηθούν τέσσερα ανεξάρτητα πακέτα, περίπτωση που αυξάνει χωρίς λόγο την εγκατεστημένη ισχύ πάνω στο πλοίο. Σε κάθε περίπτωση, η φιλοσοφία του δικτύου τροφοδοσίας σχετικά με τον απαραίτητο εξοπλισμό αναφορικά με τους inverter τα ηλεκτρικά μοτέρ τα ζυγά παραμένει ίδια ανεξάρτητα από το πλήθος των ανεξάρτητων πακέτων μπαταριών.

Η περίπτωση δικτύου συνεχούς ρεύματος παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, επειδή τα περισσότερα επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία έχουν δίκτυο τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος, δεν συμφέρει κατά την μετατροπή του πλοίου να πραγματοποιηθεί αλλαγή στο δίκτυο τροφοδοσίας. Συνεπώς, η επιλογή δικτύου τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος αποτελεί ρεαλιστική περίπτωση για πλοία που κατασκευάζονται από την αρχή.

Περίπτωση Δικτύου Συνεχούς Ρεύματος

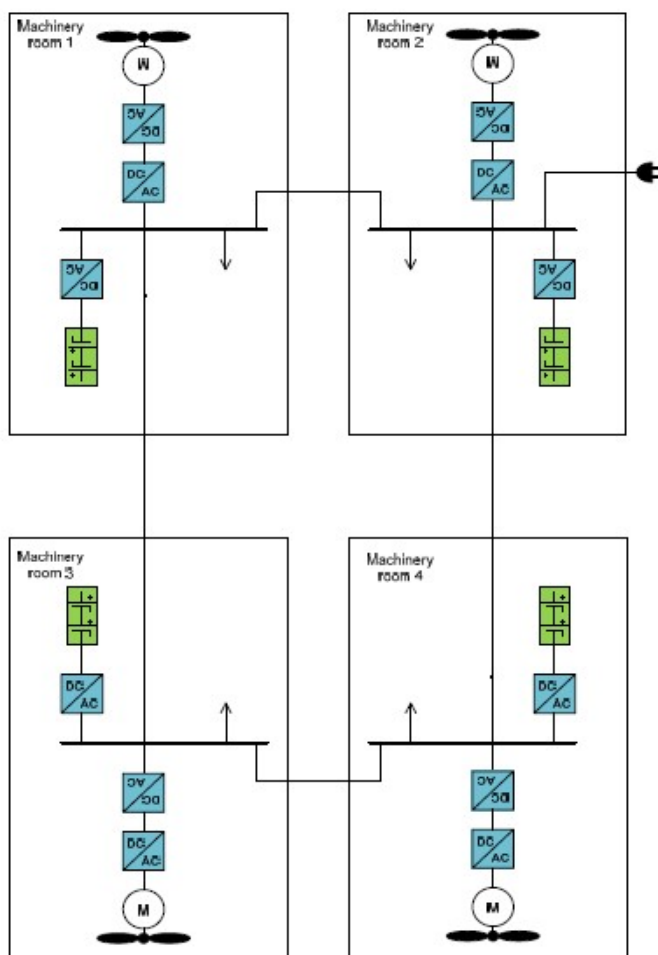
Ο βασικός εξοπλισμός για την περίπτωση δικτύου τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούνται τέσσερις inverter (αντιστροφείς) πριν από κάθε ηλεκτρικό μοτέρ, για την μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο. Παράλληλα, αναλαμβάνουν την μετατροπή της συχνότητας του ρεύματος που τροφοδοτεί τα επαγωγικά μοτέρ για τους ελιγμούς του πλοίου. Επιπρόσθετα, απαιτείται ένας rectifier (ανορθωτής) για την μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος φόρτισης που προέρχεται από την στεριά σε συνεχές για την φόρτιση της μπαταρίας. Επισημαίνεται ότι η μπαταρία απορροφά και δίνει στο σύστημα συνεχές ρεύμα. Παράλληλα, απαιτούνται 4 ζυγά, ένα για κάθε μηχανοστάσιο προκειμένου να γίνει η διασύνδεση του επιμέρους εξοπλισμού. Τέλος, ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν δύο επιπρόσθετοι inverters για την τροφοδοσία κάποιων συσκευών του συστήματος όπως κλιματιστικά, φώτα.



Εικόνα 15: Δίκτυο τροφοδοσίας Συνεχούς Ρεύματος (DC) ηλεκτρικού αμφίπλωρου επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου

Περίπτωση Δικτύου Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Ο βασικός εξοπλισμός για την περίπτωση δικτύου τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούνται τέσσερις διαδοχικοί converters (ανορθωτές) πριν από κάθε ηλεκτρικό μοτέρ. Οι συγκεκριμένοι αναλαμβάνουν την μετατροπή του ρεύματος σε συνεχές και αφού μετατρέψουν την συχνότητα του το ξανακάνουν εναλλασσόμενο. Παράλληλα, απαιτούνται 4 ζυγά ένα για κάθε μηχανοστάσιο προκειμένου να γίνει η διασύνδεση του επιμέρους εξοπλισμού. Τέλος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τέσσερις inverters πριν από κάθε πακέτο μπαταριών για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο προκειμένου να τροφοδοτηθεί το δίκτυο του πλοίου. Το σύνολο του εξοπλισμού και η διασύνδεση τους επί του πλοίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αξίζει να επισημανθεί ότι εναλλακτικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν μόνο τέσσερις inverters πριν από κάθε επαγωγικό μοτέρ όπου θα μετατρέπουν το ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο και θα ρυθμίζουν την συχνότητα του, περίπτωση που ανάγεται στην περίπτωση δικτύου συνεχούς ρεύματος.



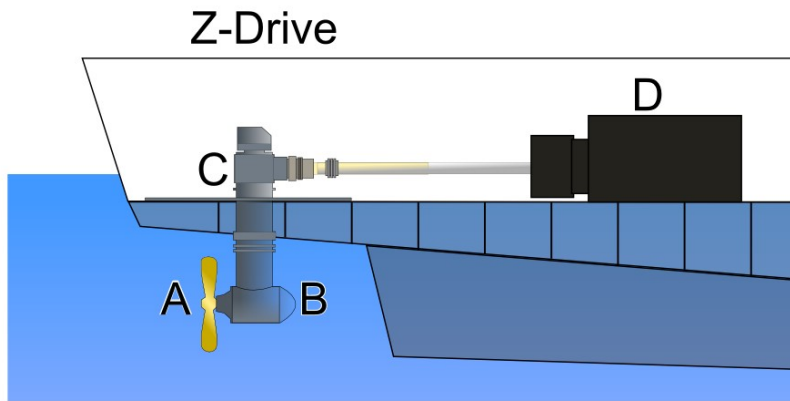
Εικόνα 16: Δίκτυο τροφοδοσίας Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC) ηλεκτρικού αμφίπλωρου επιβατηγού οχηματηγού πλοίου.

3.4 Αζιμουθιακοί Προωστήρες Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές

Τα σύγχρονα επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία τα οποία καλύπτουν πορθμειακές γραμμές χρησιμοποιούν συνήθως ελικοπηδάλια για την πρόωσή τους. Ανάλογα με τον τύπο του πλοίου δηλαδή αν είναι παντόφλα ή αμφίπλωρο τοποθετούνται είτε ένα ζεύγος ελικοπηδαλίων στην πρύμνη (παντόφλα) είτε από ένα ζεύγος στην πλώρη και την πρύμνη για την περίπτωση του αμφίπλωρου. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετείται στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου μία μονάδα η οποία αποτελείται από μία έλικα είτε σταθερού είτε μεταβλητού βήματος η κίνηση της οποίας πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων γραναζιών τα οποία μεταφέρουν την ισχύ της κύριας μηχανής, ενώ παράλληλα υπάρχει κατάλληλος μηχανισμός που επιτρέπει την περιστροφή της έλικας ως προς τον κατακόρυφο άξονα της κατά 360° . Ο συγκεκριμένος τύπος προωστήρα προσφέρει το πλεονέκτημα για αυξημένες ελκτικές ικανότητες, κράτημα ευστάθειας πορείας, ελιγμούς εντός του λιμανιού και πρόσω ανάποδα χωρίς αλλαγή στην απόδοση της μηχανής. Ανάλογα με την θέση του άξονα ως προς το οριζόντιο επίπεδο της έλικας, διακρίνονται δύο κύριοι τύποι αζιμουθιακών προωστήρων.

Z - Drive

Στον συγκεκριμένο τύπο αζιμουθιακού προωστήρα η ισχύς που προέρχεται από την παλινδρομική κίνηση της μηχανής μεταδίδεται σε έναν οριζόντιο άξονα (άξονας εισόδου) ο οποίος συνδέεται με έναν κατακόρυφο άξονα μέσω κατάλληλων λοξών γραναζιών, όπου οι άξονες των δύο αξόνων τέμνονται και οι οδοντωτές όψεις των γραναζιών έχουν σχήμα κωνικό. Στη συνέχεια, με ένα επιπρόσθετο σύστημα γραναζιών η ισχύς μεταφέρεται από τον κατακόρυφο άξονα στον οριζόντιο άξονα από τον οποίο διέρχεται η έλικα του πλοίου. Η πορεία μετάδοσης της ισχύος της μηχανής προσομοιάζεται με το γράμμα Z και έτσι προκύπτει και η ονομασία του συγκεκριμένου τύπου προωστήρα.



Εικόνα 17: Απεικόνιση συστήματος Z Drive Thruster

L - Drive

Στον συγκεκριμένο τύπο αξιμουθιακού προωστήρα η ισχύς της μηχανής μεταδίδεται σε έναν κατακόρυφο άξονα ο οποίος με την σειρά του συνδέεται μέσω κατάλληλων κωνικών γραναζιών με τον οριζόντιο άξονα από τον οποίο διέρχεται η έλικα του πλοίου. Η διαφορά του συγκεκριμένου τύπου προωστήρα από τον προηγούμενο, έγκειται στην έλλειψη ενός επιπρόσθετου γραναζιού που χρησιμοποιείται από τον τύπο Z για την μετάδοση της ισχύος από τον οριζόντιο άξονα εισόδου στον κατακόρυφο. Ουσιαστικά στην συγκεκριμένη περίπτωση ο άξονας εισόδου είναι κατακόρυφος με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση ενός επιπρόσθετου συστήματος γραναζιών.



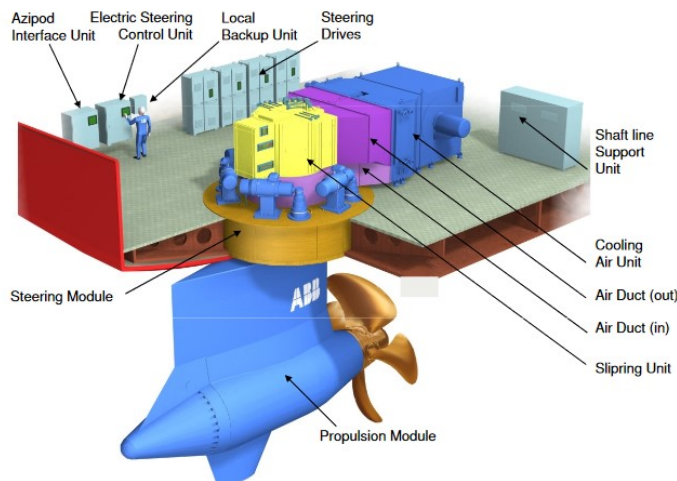
Εικόνα 18: Απεικόνιση συστήματος L Drive Thruster

Azipod Προωστήρας

Το Azipod είναι στα πρότυπα του αζιμουθιακού προωστήρα και παράγεται από την ABB Group. Αναπτύχθηκε στη Φινλανδία από κοινού από την ναυπηγική εταιρεία Masa-Yards και ABB. Πιο συγκεκριμένα, είναι μια μονάδα η οποία αποτελείται από μια προπέλα σταθερού βήματος τοποθετημένη στον ίδιο άξονα με το ηλεκτρικό μοτέρ το οποίο παράγει περιστροφική κίνηση για την κίνηση της έλικας. Η συγκεκριμένη διάταξη εδράζεται σε ένα κατακόρυφο άξονα ο οποίος έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο κατά 360° μέσω κατάλληλου μηχανισμού. Ουσιαστικά, το ηλεκτρικό μοτέρ εδράζεται στον ίδιο άξονα με την προπέλα με αποτέλεσμα να μην απαιτείται κάποιου είδους συστήματος γραναζιών.

Η διαφορά του συγκεκριμένου προωστήρα σε σχέση με τους προηγούμενους που αναφέρθηκαν, έγκειται στην ύπαρξη ενός ηλεκτρικού μοτέρ αντί για μία μηχανή εσωτερικής καύσης, το οποίο βρίσκεται στον ίδιο άξονα άρα και επίπεδο με την έλικα, βρισκόμενο εξωτερικά του πλοίου ως ενιαία μονάδα μαζί με την έλικα.

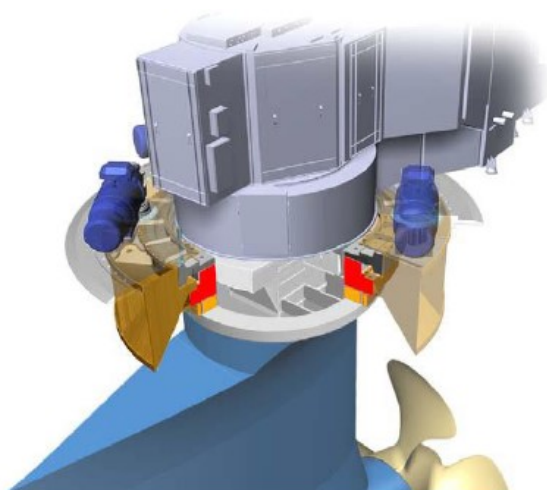
Επειδή οι μονάδες Azipod χρησιμοποιούν προπέλες σταθερού βήματος, η αυξομείωση των στροφών της έλικας για την κάλυψη των διαφορετικών απαιτήσεων του πλοίου πραγματοποιείται μέσω του inverter που επιτρέπει την ρύθμιση της συχνότητας του ρεύματος που τροφοδοτεί το μοτέρ. Ουσιαστικά, ο inverter παίρνει το εναλλασσόμενο ρεύμα το μετατρέπει σε συνεχές, στη συνέχεια του αλλάζει την συχνότητα και έπειτα το μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ξανά διαφορετικής συχνότητας, το οποίο τροφοδοτεί τελικώς τον ηλεκτροκινητήρα. Όπως προαναφέρθηκε, ο Azipod προωστήρας μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον κατακόρυφο άξονα στήριξης, εφαρμόζοντας την ώση του προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Συμπερασματικά, οι προωστήρες αζιμούθιου αφενός επιτρέπουν στα πλοία να είναι πιο ευέλικτα και αφετέρου εξασφαλίζουν την πρόσω ανάποδα εξίσου αποτελεσματικά με την πρόσω πορεία. Παράλληλα, προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούνται γρανάζια για την μετάδοση της κίνησης από τον ηλεκτροκινητήρα στον άξονα της προπέλας.



Εικόνα 19 : Επιμέρους μέρη του συστήματος Azipod thruster

Σύστημα Πηδαλιουχίας

Όπως προαναφέρθηκε οι αζιμουθιακοί προωστήρες προσφέρουν την δυνατότητα περιστροφής της έλικας κατά 360° γύρω από κατακόρυφο άξονα, παρέχοντας ώση προς όλες τις κατευθύνσεις. Η περιστροφή της μονάδας (rod) πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων ηλεκτροκινητήρων, η περιστροφική κίνηση των οποίων μεταδίδεται μέσω κατάλληλων διαμορφωμένων γρναζιών στον κατακόρυφο άξονα όπου εδράζεται η μονάδα. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η περιστροφή του κατακόρυφου άξονα όπου εδράζεται το σύστημα της έλικας.



Εικόνα 20: Απεικόνιση του συστήματος περιστροφής του κατακόρυφου άξονα της μονάδας (rod)

Συμπερασματικά, τα επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε ελιγμούς στο λιμάνι, χρησιμοποιούν αζιμουθιακού τύπου προωστήρες, οι οποίοι προσφέρουν την δυνατότητα ώσης προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η παραγωγή των Azipod προωστήρων οι οποίοι βρίσκονται εκτός του πλοίου ως ενιαίο σύστημα. Η παραγωγή της περιστροφικής κίνησης προέρχεται κυρίως από ηλεκτρικούς επαγωγικούς κινητήρες, παρέχοντας θεαματική βελτίωση του βαθμού απόδοσης πρόωσης έως και 15% σε σύγκριση με τους προωθητήρες αζιμουθίου που στηρίζονται σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Συνεπώς, η μετασκευή του πλοίου σε πλοίο με μπαταρίες που θα μελετηθεί παρακάτω, θα στηρίζεται σε Azipod thruster καθώς αποτελεί αυτή την στιγμή την βέλτιστη επιλογή τόσο για τον συνολικό βαθμό απόδοσης, όσο και στις ελικτικές ικανότητες του πλοίου.

3.5 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Κινητήρων

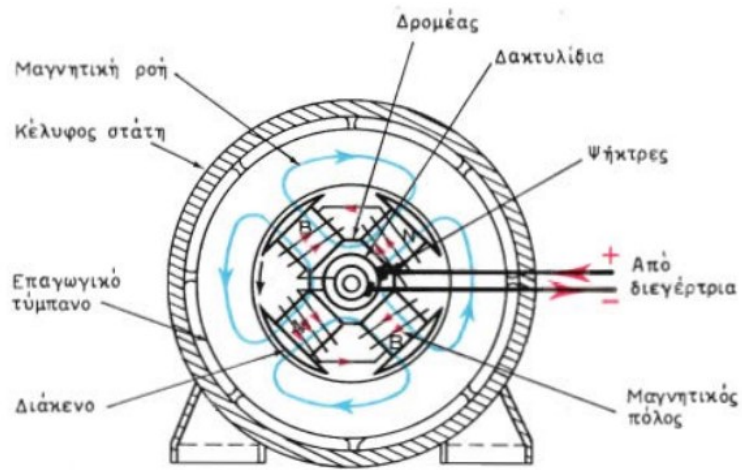
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μελετηθεί η μετασκευή επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου σε μπαταριόπλοιο το οποίο θα χρησιμοποιεί ως κύρια μηχανή πρόωσης ηλεκτροκινητήρα. Για αυτό τον λόγο, κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση των βασικών τύπων ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές. Οι βασικοί τύποι ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται κυρίως αυτή την στιγμή για την πρόωση των πλοίων είναι ο σύγχρονος και ο ασύγχρονος κινητήρας (επαγωγικός). Κάθε τύπος παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία συσχετίζονται πάντα και με το μέγεθος της παραγόμενης ισχύος.

Σύγχρονος Κινητήρας - Αρχή Λειτουργίας

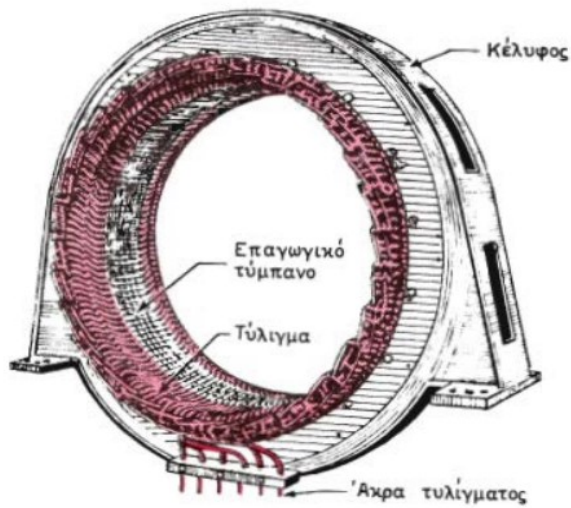
Στη σύγχρονη μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται συνήθως στο δρομέα, ενώ το τύλιγμα επαγωγισμού στο στάτη. Το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, αλλά δεδομένου ότι στρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα, το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι στρεφόμενο. Η αγώγιμη σύνδεση των τυλιγμάτων του δρομέα πραγματοποιείται μέσω δακτυλίων και ψηκτρών. Το τύλιγμα επαγωγισμού (τυμπάνου) βρίσκεται στο στάτη, αποτελούμενο από τρία τυλίγματα καταμεμημένα στο χώρο κατά 120° , ενώ τα ρεύματα που τα διαρρέουν είναι εναλλασσόμενου ρεύματος συγκεκριμένης ηλεκτρικής συχνότητας. Το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι στρεφόμενο χώρο με ταχύτητα του να ισούται με την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων που διαρρέουν το τύλιγμα επαγωγισμού (στάτης).

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου κινητήρα έγκειται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητων μεταξύ τους, αυτού του τυλίγματος διέγερσης και του αντίστοιχου του τυλίγματος του επαγωγισμού.

Για να διατηρείται η περιστροφική κίνηση πρέπει τα δύο πεδία να κινούνται με την ίδια ταχύτητα, δηλαδή η ηλεκτρική συχνότητα του ρεύματος στο στάτη να ταυτίζεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (σύγχρονη ταχύτητα).



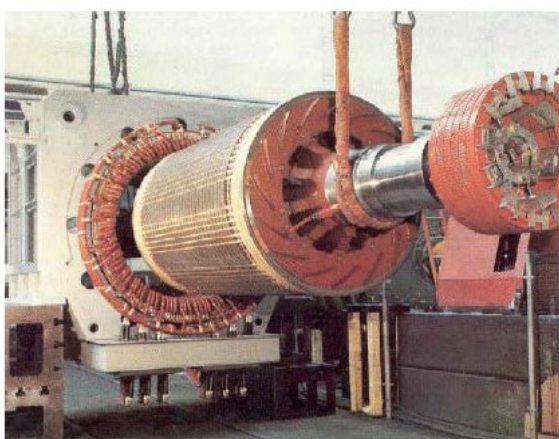
Εικόνα 21: Δομέας (4 πόλοι) Σύγχρονης Μηχανής



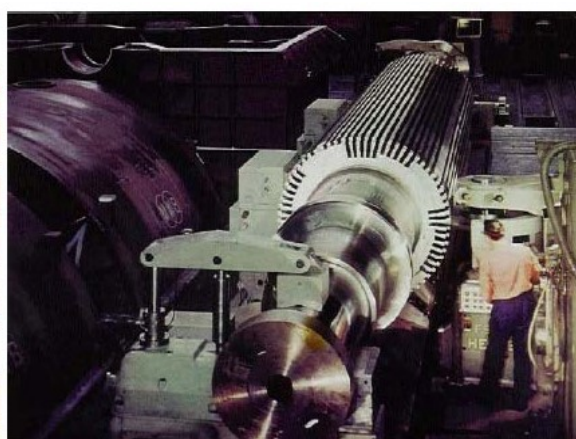
Εικόνα 22: Στάσης Σύγχρονης Μηχανής

Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές Σύγχρονου Κινητήρα

Ο σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται ως κύρια προωστήρια μηχανή λόγω της μεγάλης ισχύος του. Το πλεονέκτημα των κινητήρων αυτών είναι ότι η ισχύς τους δεν είναι περιορισμένη, προσεγγίζοντας τιμές έως και 100 MW. Ωστόσο, με την αύξηση της ισχύος, αυξάνεται σημαντικά και το βάρος του ηλεκτρικού κινητήρα όπως και η κατασκευαστική του περιπλοκότητα. Ενδεικτικά, το χαρακτηριστικό του αυξημένου βάρους συνιστά ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα αυτού του τύπου, καθώς σε σύγκριση με έναν αντίστοιχο επαγωγικό κινητήρα με την ίδια παραγόμενη ισχύ, το βάρος του σύγχρονου κινητήρα είναι αισθητά μεγαλύτερο. Έπειτα, για την λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου απαιτείται η χρήση ενός μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος συμβάλει τόσο κατά την έναρξη του κινητήρα όσο και στον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτρικού κινητήρα. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα τόσο στην επιτάχυνση του πλοίου όσο και στους ελιγμούς στα λιμάνια. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ο σύγχρονος κινητήρας παρουσιάζει αυξημένο κόστος κτήσης όπως και συντήρησης με έναν αντίστοιχο επαγωγικό κινητήρα της ίδια ισχύος λόγω κυρίως της απαίτησης για μεγαλύτερο εξοπλισμό (ψήκτρες, ψηκτροθήκες, καρβουνάκια).



ΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ



ΔΡΟΜΕΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Εικόνα 23: Στάτης και Δρομέας Σύγχρονου κινητήρα

Ασύγχρονος Κινητήρας (Επαγωγικός) - Αρχή Λειτουργίας

Η λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών οφείλεται αποκλειστικά στο φαινόμενο της επαγωγής. Αρχικά, ως πρωτεύον τύλιγμα (διέγερση) δρα το τύλιγμα του στάτη και ως δευτερεύον τύλιγμα (επαγωγίμο-τύμπανο) δρα το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο είναι βραχυκυκλωμένο. Το ρεύμα του δρομέα κυκλοφορεί λόγω επαγωγής από τα ρεύματα του στάτη, χωρίς ο δρομέας να συνδέεται αγώγιμα με τον εξωτερικό κόσμο με προφανή πλεονεκτήματα (απουσία ψηκτρών, χαμηλότερο κόστος συντήρησης)

Για την διατήρηση της περιστροφικής κίνησης θα πρέπει τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας να έχουν στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Για το στάτη αυτό γίνεται όπως και στη σύγχρονη μηχανή με τυλίγματα κατανομημένα στο χώρο σε 120° , αλλά και με την τροφοδοσία των τυλιγμάτων με συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων που καθυστερούν χρονικά μεταξύ τους επίσης κατά 120° . Στο δρομέα ο νόμος της επαγωγής (ή νόμος Faraday) επάγει αυτόματα τριφασικό συμμετρικό σύστημα δινορευμάτων.

Η συχνότητα περιστροφής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του στάτη ταυτίζεται με την συχνότητα του τριφασικού ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη, δηλαδή είναι η σύγχρονη συχνότητα όπως ακριβώς στην σύγχρονη μηχανή.

Αντίθετα απ' ό,τι συμβαίνει στη σύγχρονη μηχανή, ο δρομέας στην ασύγχρονη μηχανή δεν στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα αλλά η ταχύτητά του κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών μικρότερων από την σύγχρονη ταχύτητα. Το συγκεκριμένο οφείλεται στο γεγονός ότι για να διατηρείται η κίνηση θα πρέπει τα δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία να στρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Έτσι, δεδομένου ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στάτη και δρομέα πρέπει να στρέφονται με την ίδια ταχύτητα (αλλιώς η κίνηση δεν συντηρείται) είναι φανερό ότι αφού ο δρομέας στρέφεται με κάποια ταχύτητα, η ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων του, είναι όση υπολείπεται για να φθάσει στην τιμή της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη.

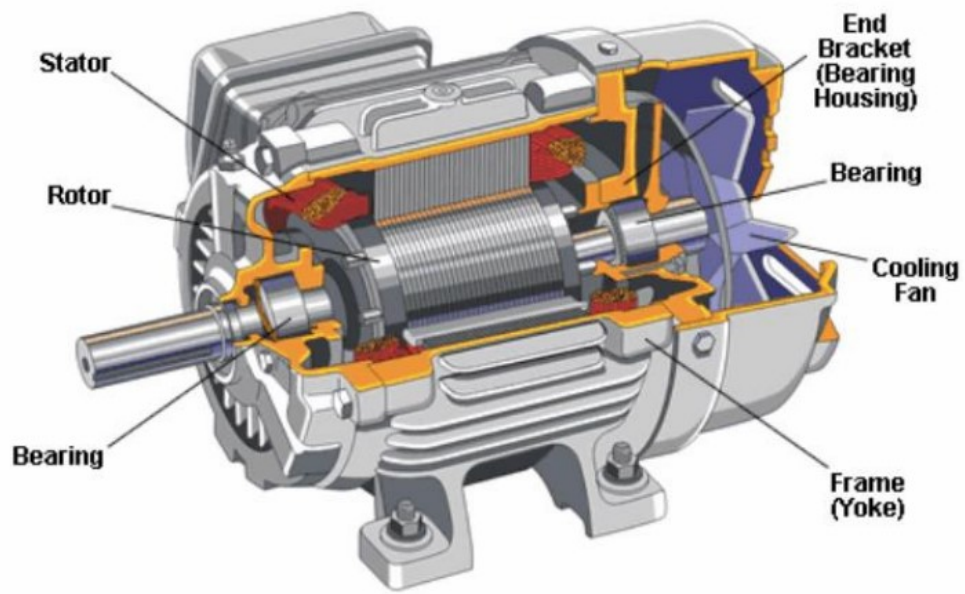
$s = \frac{\eta_s - \eta}{\eta_s} * 100\%$, s: ολίσθηση ορίζεται ως η διαφορά της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα η , από την σύγχρονη η_s

$\eta = (1-s) * \eta_s$, μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Ουσιαστικά, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του δρομέα στρέφεται με την σύγχρονη συχνότητα και η κίνηση αυτή προκύπτει ως υπέρθεση λόγω της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα $\eta = (1-s) * \eta_s$ και της συχνότητας του ρεύματος που επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα συχνότητας $s * \eta_s$.

Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές Επαγωγικού Κινητήρα

Ο κινητήρας επαγωγής χρησιμοποιείται είτε ως κύρια μηχανή πρόωσης του πλοίου, είτε ως προωθητήρας (bow thruster) για τους ελιγμούς του πλοίου στο λιμάνι. Παράλληλα, βρίσκει αρκετές εφαρμογές σε βοηθητικά μηχανήματα όπως αντλίες, ανεμιστήρες και άλλες εφαρμογές επί του πλοίου. Σε αυτές τις εφαρμογές, ο κινητήρας ξεκινά συνήθως υπό μηδενικό φορτίο ή με έναν εκκινητή αστέρα-δέλτα. Σε περίπτωση που η εκκίνηση του κινητήρα δεν πραγματοποιείται με τους συγκεκριμένους τρόπους, τότε το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα θα ήταν πολύ υψηλό, με αποτέλεσμα σε μεγάλους κινητήρες όπου οι απαιτήσεις ισχύος είναι πολύ μεγάλες, να μην υπήρχε αντίστοιχη καλωδίωση που να αντέχει σε αυτές τις τιμές. Παρόμοια και σε αυτόν τον τύπο κινητήρα απαιτείται ένας κύκλο-μετατροπέας ο οποίος ελέγχει και τις τιμές του ρεύματος εκκίνησης αλλά ρυθμίζει και την συχνότητα του ρεύματος κατά την λειτουργία του πλοίου όταν απαιτούνται αυξομειώσεις της ταχύτητας περιστροφής της προπέλας. Προς το παρόν, ο μεγαλύτερος επαγωγικός κινητήρας χρησιμοποιεί έχει ισχύ που φτάνει τα 20 MW. Ο επαγωγικός κινητήρας απαιτεί πολύ λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με έναν ασύγχρονο κινητήρα επειδή δεν έχει καρβουνάκια και ψήκτρες γεγονός που μεταφράζεται σε μειωμένο κόστος συντήρησης. Επομένως, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, ο επαγωγικός κινητήρας αποτελεί καλύτερη λύση για περιπτώσεις παραγόμενης ισχύος που δεν ξεπερνούν τα 20 MW.



Εικόνα 24 : Επιμέρους Στοιχεία Επαγωγικού Κινητήρα

Κεφάλαιο 4^ο : Μεθοδολογία Υπολογισμού Εγκατεστημένης Ισχύος Μπαταριών και Εκτίμηση Κόστους Μετασκευής

4.1 Υπολογισμός Εγκατεστημένης Ισχύος Μπαταριών

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος μπαταριών θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλα τα φορτία λειτουργίας του πλοίου (KW) τόσο κατά την διάρκεια του ταξιδιού όσο και κατά την παραμονή του στο λιμάνι.

Φορτία Λειτουργίας στο ταξίδι

- 1) Απαιτούμενη ισχύς λόγω της λειτουργίας των κύριων μηχανών για την πρόωση του πλοίου P_{sea_M/E_LOAD}
- 2) Απαιτούμενη ισχύς λόγω της λειτουργίας των γεννητριών για την κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων κατά την διάρκεια του ταξιδιού $\rightarrow P_{sea_electric_load}$

$$E_{sea_M/E_load/voyage} = \frac{N_{M/E} * \bar{P}_{AVERAGE_M/E} * \Delta t_{cruising}}{\eta_{EL_MOTOR} * 60} \text{ (Kwh)}$$

$$E_{sea_G/E_LOAD/voyage} = N_{G/E} * \bar{P}_{AVERAGE_G/E} * \Delta t_{cruising} \text{ (Kwh)}$$

$$\bar{P}_{AVERAGE_M/E} = \frac{\int_0^{\Delta t_{cruising}} P[KW] * dt}{\int_0^{\Delta t_{cruising}} dt}$$

$$E_{sea_total/voyage} = E_{sea_M/E_load/voyage} + E_{sea_G/E_LOAD/voyage}$$

$N_{G/E}$: Αριθμός γεννητριών σε λειτουργία

$N_{M/E}$: Αριθμός κύριων μηχανών σε λειτουργία

$P_{NCR_M/E}$: Ονομαστικό συνεχές φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής (KW)

$\bar{P}_{AVERAGE_M/E}$: Μέσο φορτίο κύριας μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού

$\bar{P}_{AVERAGE_G/E}$: Μέσο φορτίο γεννήτριας κατά την διάρκεια του ταξιδιού

$\Delta t_{cruising}$: Χρόνος ταξιδιού (min)

η_{EL_MOTOR} : βαθμός απόδοσης ηλεκτροκινητήρα

Στον υπολογισμό της απαιτούμενης ενέργειας για την πρόωση του πλοίου, χρησιμοποιείται το μέσο φορτίο λειτουργίας κατά την διάρκεια του ταξιδιού. Το συγκεκριμένο υπολογίζεται θεωρώντας ότι η ζήτηση ισχύος του πλοίου συναρτήσει του χρόνου ταξιδιού είναι γραμμική μέχρι να φτάσει την ταχύτητα υπηρεσίας και αντίστοιχα όταν προσεγγίζει το λιμάνι επιβραδύνει επίσης με γραμμικό τρόπο. Επισημαίνεται, ότι το πλοίο πιάνει την ταχύτητα υπηρεσίας στο ονομαστικό φορτίο λειτουργίας της μηχανής (NCR) .

Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψιν και ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού μοτέρ, το οποίο και θα εγκατασταθεί μετά την μετασκευή, θεωρώντας ότι το μοτέρ ζητάει από τις μπαταρίες ενέργεια αυξημένη από αυτό που ζητάει η έλικα, κατά τις απώλειες που υπάρχουν από την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιστροφική και οι οποίες εκφράζονται από τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα.

Φορτίο στο λιμάνι

- 1) Απαιτούμενη ισχύς λόγω της λειτουργίας των γεννητριών για την κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων κατά την διάρκεια παραμονής στο λιμάνι →

$$P_{port_electric_load}$$

- 2) Απαιτούμενη ισχύς για την πηδαλιουχία του πλοίου $P_{maneuvering}$

$$E_{port/voyage} = \frac{P_{port_electric_load} * \Delta t_{port}}{60} + \frac{P_{maneuvering} * \Delta t_{maneuvering}}{60} \text{ (kwh)}$$

Δt_{port} : Χρόνος παραμονής στο λιμάνι (min)

$\Delta t_{maneuvering}$: Χρόνος maneuvering (min)

Συνολική Απαιτούμενη Ενέργεια για ένα Δρομολόγιο

$$E_{voyage} = E_{port/voyage} + E_{sea_total/voyage} \text{ (kwh)}$$

4.2 Καθορισμός Σεναρίου Φόρτισης

Η επιλογή του σεναρίου φόρτισης καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος πάνω στο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα, μαζί με τον παράγοντα του μέγιστου επιθυμητού ποσοστού αποφόρτισης (DOD), λειτουργούν ως συντελεστές που καθορίζουν την εφεδρεία ενέργειας που πρέπει να είναι εγκατεστημένη πάνω στο πλοίο, προκειμένου η τελική εγκατεστημένη ισχύς να επαρκεί (με ενδιάμεση ή και καθόλου φόρτιση) για να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου χωρίς ωστόσο το βάθος αποφόρτισης να ξεπερνάει την τιμή του DOD που έχει τεθεί.

1 Σενάριο: Φόρτιση μετά από καθορισμένο αριθμό δρομολογίων

Ουσιαστικά σε αυτό το σενάριο θεωρείται ότι οι μπαταρίες του πλοίου θα πρέπει να καλύπτουν την ενεργειακή απαίτηση του πλοίου για Nx δρομολόγια χωρίς φόρτιση και παράλληλα το μέγιστο ποσοστό αποφόρτισης της μπαταρίας να μην ξεπερνάει το μέγιστο DOD που έχει τεθεί. Στη συνέχεια, μετά από τα Nx δρομολόγια το πλοίο θα φορτίζεται πλήρως μέχρι το 100% της χωρητικότητας των μπαταριών του.

Υπολογισμός Εγκατεστημένης Ισχύος Μπαταριών

$$E_{\text{MIN_INSTALLED}} = E_{\text{VOYAGE}} * \frac{Nx}{DOD} \text{ (kwh)} \rightarrow$$

Όπου Nx είναι το σύνολο των δρομολογίων που θα κάνει το πλοίο χωρίς ενδιάμεση φόρτιση.

$$Ny \text{ είναι το σύνολο των ημερήσιων φορτίσεων} \rightarrow Ny = \frac{2 * Ntrips}{Nx}$$

$$E_{\text{TOTAL_DAY}} = Nx * E_{\text{VOYAGE}} \text{ (kwh)}$$

$Ntrips$:Ο συνολικός αριθμός ταξιδιών (1 ταξίδι ισούται με 2 δρομολόγια)

Υπολογισμός Αριθμού Μπαταριών

Όπως αναλύθηκε προηγούμενα, στο πλοίο θα εγκατασταθούν δύο πακέτα μπαταριών τα οποία θα έχουν τον ίδιο αριθμό μπαταριών. Το κάθε πακέτο θα περιλαμβάνει μπαταρίες σε σειρά, δίνοντας την επιθυμητή τάση δικτύου και σύνδεση παράλληλα για την επίτευξη της επιθυμητής ισχύος.

$$N_{\text{series_battery}} = \text{roundup}\left(\frac{V_{\text{nominal_battery}}}{V_{\text{δικτύου}}}\right)$$

$V_{\text{nominal_battery}}$: Ονομαστική τάση module μπαταρίας

$V_{\text{Δίκτυο}}$: Ονομαστική τάση Δικτύου

roundup: Στρογγυλοποίηση προς τα πάνω

$$N_{\text{parallel_battery}} = \text{roundup}\left(\frac{1000 * E_{\text{MIN_INSTALLED}}}{N_{\text{series_battery}} * V_{\text{nominal_battery}} * \text{BatteryCapacity(Ah)}}\right)$$

$$E_{\text{energy_installed}} \text{ (kwh)} =$$

$$= 10^{-3} * N_{\text{series_battery}} * N_{\text{parallel_battery}} * V_{\text{nominal_battery}} * \text{BatteryCapacity(Ah)}$$

Εκ νέου Υπολογισμός του Μέγιστου DOD

Επανυπολογισμός του DOD με βάση την τελική τιμή της εγκατεστημένης ισχύος πάνω στο πλοίο καθώς λόγω των στρογγυλοποιήσεων τοποθετήθηκε λίγο μεγαλύτερος αριθμός μπαταριών.

$$DOD_{\text{real}} = \frac{Nx * E_{\text{VOYAGE}}}{E_{\text{energy_installed}}}$$

Οι ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας της μπαταρίας ισούνται :

$$\text{Daily Cycles} = \frac{2 * N_{\text{trips}}}{Nx} * DOD_{\text{real}} = \frac{E_{\text{TOTAL_DAY}}}{E_{\text{energy_installed}}}$$

Υπολογισμός Χρόνου Φόρτισης της Μπαταρίας

Ο υπολογισμός του χρόνου φόρτισης για πλήρη φόρτιση του συστήματος μπαταριών του πλοίου για δεδομένη τιμή του ρεύματος φόρτισης:

$$\text{time_charging (min)} = 60 * \frac{DOD_{\text{real}} * \text{BatteryCapacity(Ah)}}{\text{Current_charging(A)}}$$

2 Σενάριο: Ενδιάμεση Φόρτιση σε κάθε Λιμάνι

Ουσιαστικά, σε αυτό το σενάριο θεωρείται ότι το πλοίο φορτίζει σε κάθε λιμάνι για όσο χρονικό διάστημα παραμένει σε αυτό. Παράλληλα, η ενέργεια που απορροφούν οι μπαταρίες μετά από κάθε φόρτιση σε συνδυασμό με την αρχική ενέργεια των μπαταριών (100%) πριν το πλοίο ξεκινήσει τα δρομολόγια του, επαρκούν για να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου χωρίς η μπαταρία να ξεπεράσει το μέγιστο βάθος αποφόρτισης που έχει τεθεί. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο βάθος αποφόρτισης επέρχεται όταν το πλοίο ολοκληρώσει το τελευταίο του δρομολόγιο, η τιμή του οποίου θα ισούται με το DOD που έχει τεθεί.

Υπολογισμός Εγκατεστημένης Ισχύος Μπαταριών

$$E_{\text{TOTAL_DAY}} = N_{\text{TRIPS}} * E_{\text{TRIP}}$$

$$E_{\text{total_energy_charging_DAY}} = E_{\text{MIN_INSTALLED}} * f * (2 * N_{\text{trips}} - 1)$$

Όπου ο συντελεστής f εκφράζει το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας για δεδομένο χρόνο και ρεύμα φόρτισης. Ουσιαστικά, αυτός ο συντελεστής εκφράζει τα C rates της φόρτισης, δηλαδή σε πόσο χρόνο φόρτισης θα πάρουμε την συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας.

$$f = \frac{\text{Current}_{\text{charging}} * (\text{Time}_{\text{charging}} - \text{Time}_{\text{plug}})}{\text{BatteryCapacity (Ah)}}$$

$$\Rightarrow f = \frac{\text{Current}_{\text{charging}} * (\text{Time}_{\text{port/voyage}} - \text{Time}_{\text{plug}})}{\text{BatteryCapacity (Ah)}}$$

$2 * N_{\text{trips}} - 1$: Ο αριθμός των δρομολογίων όπου γίνεται ενδιάμεση φόρτιση

$\text{Time}_{\text{plug}}$: είναι ο χρόνος που απαιτείται για την σύνδεση και αποσύνδεση των καλωδίων φόρτισης με το σταθμό φόρτισης του λιμανιού

Ισοζύγιο Ενέργειας

Εφαρμόζουμε το ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος (πλοίου) στο τέλος του τελευταίου ταξιδιού σύμφωνα με το οποίο, η συνολική προσδιδόμενη ενέργεια στο σύστημα λόγω ενδιάμεσων φορτίσεων μαζί με την ενέργεια που έχουν αποδώσει οι μπαταρίες από το 100% πλήρους φόρτισης μέχρι την τελική τιμή του βάθους αποφόρτισης των μπαταριών (DOD) όταν το πλοίο ολοκληρώσει το τελευταίο ταξίδι, ισούται με την ενέργεια του πλοίου που έχει καταναλωθεί σε μία ημέρα.

$$E_{\text{total_energy_charging_DAY}} + E_{\text{MIN_INSTALLED}} * \text{DOD} = E_{\text{TOTAL_DAY}} \Rightarrow$$

$$E_{\text{MIN_INSTALLED}} = E_{\text{TOTAL_DAY}} * \frac{1}{(2 * N_{\text{trips}} - 1) * f + \text{DOD}} \quad (\text{kwh})$$

Υπολογισμός Αριθμού Μπαταριών

Όπως αναλύθηκε προηγούμενα, στο πλοίο θα εγκατασταθούν δύο πακέτα μπαταριών τα οποία θα έχουν τον ίδιο αριθμό μπαταριών. Το κάθε πακέτο θα περιλαμβάνει μπαταρίες σε σειρά, δίνοντας την επιθυμητή τάση δικτύου και σύνδεση παράλληλα για την επίτευξη της επιθυμητής ισχύος.

$$N_{\text{series_battery}} = \text{roundup}\left(\frac{V_{\text{nominal_battery}}}{V_{\text{δικτύου}}}\right)$$

$V_{\text{nominal_battery}}$: Ονομαστική τάση module μπαταρίας

$V_{\text{δικτύου}}$: Ονομαστική τάση Δικτύου

roundup: Στρογγυλοποίηση προς τα πάνω

$$N_{\text{parallel_battery}} = \text{roundup}\left(\frac{1000 * E_{\text{MIN_INSTALLED}}}{N_{\text{series_battery}} * V_{\text{nominal_battery}} * \text{BatteryCapacity(Ah)}}\right)$$

Εκ νέου Υπολογισμός του Μέγιστου DOD

Επανυπολογισμός του DOD με βάση την τελική τιμή της εγκατεστημένης ισχύος πάνω στο πλοίο καθώς λόγω των στρογγυλοποιήσεων τοποθετήθηκε λίγο μεγαλύτερος αριθμός μπαταριών.

$$\text{DOD}_{\text{real}} = \frac{E_{\text{TOTAL_DAY}}}{\text{Energy_installed}} - ((2 * N_{\text{trips}} - 1) * f)$$

$$\text{Daily Cycles} = f(2 * Ntrips - 1) + DOD_{real} = \frac{E_{TOTAL_DAY}}{E_{energy_installed}}$$

4.3 Υπολογισμός Ισχύος Ηλεκτρικού Μοτέρ, Inverter και Φορτιστών

Βασικά στοιχεία του εξοπλισμού που θα εγκατασταθεί στο πλοίο είναι το ηλεκτρικό μοτέρ και ο inverter που αναλαμβάνει την μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο όπως επίσης και την ρύθμιση της συχνότητας του ρεύματος. Τα συγκεκριμένα στοιχεία του εξοπλισμού πρέπει να διαστασιολογηθούν αναφορικά με την ισχύ εξόδου τους, ώστε να υπολογιστεί το κόστος κτήσης τους, το οποίο αναμένεται να είναι σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους μετασκευής.

Όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου δηλαδή αν είναι αμφίπλωρο ή παντόφλα διαφοροποιείται ο συνολικός αριθμός των κύριων μηχανών και αντίστοιχα των ελίκων. Ωστόσο, ανεξάρτητα από τον τύπο του πλοίου, θα εγκατασταθούν στο πλοίο δύο πακέτα μπαταριών, και πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση της παντόφλας τα δύο πακέτα θα τοποθετηθούν περί το κέντρο πλευστότητας του πλοίου δεξιά και αριστερά, και στην περίπτωση του αμφίπλωρου ένα πακέτο πρύμνηθεν και ένα πώραθεν. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης θα αντικατασταθούν από ίσο αριθμό ηλεκτρικών κινητήρων. Δεδομένου ότι θα εγκατασταθούν στο πλοίο Azipod thrusters, κάθε ηλεκτρικός κινητήρας απαιτεί για την λειτουργία του και έναν inverter. Επομένως, στο πλοίο θα εγκατασταθεί ίσος αριθμός inverter και electric motor.

Ο προσδιορισμός της μέγιστης ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ θα προκύψει από το μέγιστο φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής. Θεωρούμε ότι η πηδαλιουχία αυτού του τύπου πλοίων, προκύπτει εξ ολοκλήρου από την λειτουργία των αζιμουθιακών προωστών χωρίς την ύπαρξη κάποιων επιπρόσθετων thruster πλευρικά του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής, καθορίζεται εξ ολοκλήρου από την λειτουργία του πλοίου στο ταξίδι και από την κατάσταση manuevering. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η ισχύς του ηλεκτρικού μοτέρ θα προκύψει με βάση το MCR της κύριας μηχανής, ωστόσο αυτή η θεώρηση θα σημαίνει υπερδιαστασιολόγηση αναφορικά με την ισχύ του ηλεκτρικού μοτέρ και αντίστοιχα του inverter και υπερβολική αύξηση του κόστους. Πιο συγκεκριμένα, τα πλοία που εξυπηρετούν πορθμειακές γραμμές στην Ελλάδα, διαθέτουν μεγαλύτερες μηχανές από αυτές που χρειάζονται για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της διαδρομής που εξυπηρετούν και αυτό γίνεται επειδή τα συγκεκριμένα πλοία έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και σε περίπτωση που πωληθούν να μπορούν να καλύψουν και άλλες διαδρομές με διαφορετική ταχύτητα υπηρεσίας πλοίου. Ωστόσο, για την περίπτωση της μετασκευής σε πλοίο με μπαταρίες που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εγκατεστημένη ισχύς των μπαταριών στο πλοίο είναι αυστηρά προσδιορισμένη για συγκεκριμένη

αυτονομία και ταχύτητα υπηρεσίας. Συνεπώς, δεν υπάρχει κανένας λόγος να διαστασιολογηθεί το μοτέρ για μεγαλύτερη ισχύ από αυτή που απαιτείται.

$$Power_{motor} = \max (Power_{M/E_LOAD}) / \eta_{motor}$$

Σε αυτό το πρώτο στάδιο μελέτης, επειδή οι τιμές ισχύος του inverter είναι τυποποιημένες, θεωρείται προσεγγιστικά ότι η ισχύς θα είναι κατά 10% μεγαλύτερη από την ισχύ που ζητάει το ηλεκτρικό μοτέρ. Κατά αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η ισχύς του inverter δεν θα είναι μικρότερη από αυτή που ζητάει ο ηλεκτρικός κινητήρας.

$$Power_inverter = 1.1 * Power_{motor}$$

Ισχύς Φορτιστών

Αναφορικά με την ισχύ των φορτιστών θεωρούμε ότι θα τοποθετηθούν δύο φορτιστές επί του πλοίου ώστε ο κάθε ένας να τροφοδοτεί με ενέργεια το κάθε πακέτο μπαταρίας. Η ισχύς του φορτιστή καθορίζεται από το συνολικό ρεύμα φόρτισης που πρέπει να αποδώσει ο φορτιστής σε N παράλληλους κλάδους και από την τάση του δικτύου των μπαταριών.

$$Power_{charger} (KW) =$$

$$= \frac{N_{series_battery} * V_{nominal_battery} * N_{parallel_battery} * Current_charging}{2 * 1000}$$

4.4 Εκτίμηση Συνολικού Κόστους Μετασκευής

Όπως προαναφέρθηκε οι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι inverter μαζί με τις μπαταρίες και το BMS αποτελούν τις κυρίαρχες συνιστώσες του κόστους της μετασκευής.

$$\text{Cost}_{\text{electric_motor}} = N_{M/E} * \text{Power}_{\text{motor}}$$

$$\text{Cost}_{\text{inverter}} = N_{M/E} * \text{Power}_{\text{inverter}}$$

Όπου $N_{M/E}$ είναι ο συνολικός αριθμός κύριων μηχανών στο πλοίο

Αναφορικά με το κόστος κτήσης της μπαταρίας, όπως αναλύθηκε και παραπάνω διαφοροποιείται αισθητά ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας. Παράλληλα, σημαντικό μέρος του κόστους κτήσης αποτελεί και το BMS της μπαταρίας το οποίο αυτή την στιγμή φτάνει το 20-30% του αρχικού κόστους κτήσης των μπαταριών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο τύπος μπαταριών που θα χρησιμοποιηθεί είναι τύπου LFP οι οποίες παρουσιάζουν μεν μικρότερη ειδική ενέργεια γεγονός που μεταφράζεται σε αυξημένο βάρος, ωστόσο είναι πιο οικονομικές και παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Τέλος, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εντός του χώρου των μπαταριών κατά την διάρκεια του καλοκαιριού στην Ελλάδα, οι μπαταρίες NMC εμφανίζουν σημαντικές πιθανότητες έκρηξης, κάτι το οποίο δεν ισχύει με τις αντίστοιχες μπαταρίες LFP.

$$\text{Cost}_{\text{Battery}} =$$

$$V_{\text{nominal_battery}} * \text{Capacity Battery (Ah)} * 10^{\wedge} (-3) * \text{Number_of_Batteries} * \text{Cost/kwh}$$

Στην τιμή του κόστους συμπεριλαμβάνεται και το BMS

Κόστος Φορτιστή

$$\text{Cost}_{\text{charger}} = \text{Number_battery_packs} * \text{Power}_{\text{charger}} * \text{Cost/KW} \Rightarrow$$

$$\text{Cost}_{\text{charger}} = 2 * \text{Power}_{\text{charger}} * \text{Cost/KW}$$

Πώληση Κύριων Μηχανών και Γεννητριών

Όπως εξηγήθηκε στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μετασκευή ενός επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου σε πλοίο πλήρως ηλεκτρικό. Συνεπώς, τόσο οι κύριες μηχανές όσο και οι γεννήτριες θα πωληθούν.

$$\text{Selling}_{M/E} = N_{M/E} * \text{Price}_{\text{sellingM/E}}$$

$$\text{Selling}_{G/E} = N_{G/E} * \text{Price}_{\text{sellingG/E}}$$

Ολικό Κόστος Μετασκευής

$$\text{Total}_{\text{retrofit_cost}} =$$

$$\text{Cost}_{\text{Battery}} + \text{Cost}_{\text{electric_motor}} + \text{Cost}_{\text{inverter}} + \text{Cost}_{\text{charger}} - \text{Selling}_{M/E} - \text{Selling}_{G/E}$$

4.5 Μελέτη Εφικτότητας Μετασκευής σε Μπαταριόπλοιο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία όπως προαναφέρθηκε σκοπός πέρα από τον προσδιορισμό της εγκαταστημένης ισχύος των μπαταριών και του προσδιορισμού του συνολικού κόστους της μετασκευής, αποτελεί η μελέτη εφικτότητας της επένδυσης από την μεριά του πλοιοκτήτη. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας υπολογίσει το αρχικό κόστος της επένδυσης θα πρέπει να γίνει έλεγχος σχετικά με την βιωσιμότητα της επένδυσης σε βάθος χρόνου. Για την πραγματοποίηση αυτού θα πρέπει να γίνει προσδιορισμός όλων των εσόδων και των εξόδων του πλοίου μετά την μετασκευή και στην συνέχεια με το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) και του δείκτη IRR να αποφανθούμε σχετικά με την βιωσιμότητα της επένδυσης. Σε περίπτωση, που η επένδυση δεν καθίσταται βιώσιμη σε βάθος Ν ετών, θα πρέπει να προσδιοριστεί το ύψος της χρηματοδότησης προκειμένου η επένδυση να καθίσταται οικονομικά βιώσιμη. Αξίζει να επισημανθεί ότι πραγματοποιείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και γενικότερα από κρατικούς φορείς, η χρηματοδότηση αντίστοιχων επενδύσεων (E ferry) λόγω του γεγονότος ότι πολλές φορές του ύψος της επένδυσης είναι αρκετά μεγάλο συγκριτικά με το ύψος των καθαρών εσόδων.

Αναφορικά με το χρονικό ορίζοντα μελέτης της επένδυσης, θα εξεταστούν δύο σενάρια. Αρχικά, θα εξεταστεί το σενάριο της βιωσιμότητας της επένδυσης στα πρώτα 7 χρόνια από την μετασκευή. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι σύμφωνα με τους κατασκευαστές, οι μπαταρίες θα αρχίσουν να έχουν αισθητή απώλεια χωρητικότητας μετά από αυτό το χρονικό διάστημα. Ενδεικτικά, οι κατασκευαστές δίνουν 7000-10000 κύκλους λειτουργίας της μπαταρίας χωρίς η χωρητικότητα της να μειωθεί κάτω από 70% της αρχικής. Γενικά, όταν θα εξεταστούν παρακάτω πραγματικά πλοία, ο αριθμός των ημερήσιων κύκλων λειτουργίας της μπαταρίας θα αποτελέσει μια βασική παράμετρο που θα εξεταστεί, και μάλιστα θα δοθεί έμφαση ώστε οι μπαταρίες να μην ξεπερνούν τους κύκλους λειτουργίας που προτείνουν οι κατασκευαστές στο σύνολο της επταετίας. Παράλληλα, θεωρείται ότι στο τέλος του έβδομου έτους θα υπάρχει ένα επιπρόσθετο έσοδο από την αντικατάσταση των μπαταριών, το οποίο θα προκύψει από την ανακύκλωση τους. Το συγκεκριμένο έσοδο καθίσταται πλήρως ρεαλιστικό καθώς οι μπαταρίες εκτός από τα μέταλλα τους, σε κάποιες περιπτώσεις θα μπορούν να πωληθούν ως έχουν καθώς θα βρίσκονται σε αρκετά καλή κατάσταση. Αυτό θα οφείλεται στο γεγονός, ότι η μελέτη των φορτίων λειτουργίας και της αυτονομίας του πλοίου είναι αυστηρά προσδιορισμένη, με αποτέλεσμα η μπαταρία να λειτουργεί στους κύκλους λειτουργίας που έχει μελετηθεί, χωρίς μεγάλα ρεύματα αποφόρτισης και βάθη αποφόρτισης όχι μεγαλύτερα του 80%.

Σε αυτό το σενάριο θα θεωρηθεί ότι η επένδυση σταματάει στην επταετία και δεν θα ληφθεί υπόψη η μεταγενέστερη λειτουργία του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα προστεθεί το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών, καθώς δεν γνωρίζουμε τι θα συμβεί μετά την επταετία.

Στο δεύτερο σενάριο θα εξεταστεί η βιωσιμότητα της επένδυσης σε βάθος 14 χρόνων, προκειμένου να συμπεριλάβουμε στην μελέτη το επιπρόσθετο κόστος από την αντικατάσταση των μπαταριών. Στο τέλος του τελευταίου έτους (14) θα συμπεριληφθεί το έσοδο από την εκ νέου ανακύκλωση των μπαταριών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η αντικατάσταση των μπαταριών πρόκειται να κοστίζει αρκετά λιγότερο σε σχέση με το αρχικό κόστος τους, καθώς η τιμή των μπαταριών ακολουθεί πτωτική πορεία και σύμφωνα με εκτιμήσεις αναμένεται η πτώση της τιμής να προσεγγίζει τα 100\$/kwh την πενταετία.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{income}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^N \frac{expenditure}{(1+r)^t} - \text{Αρχικός Κόστος Επένδυσης} \Rightarrow$$

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{Revenue}{(1+r)^t} - \text{Αρχικός Κόστος Επένδυσης}$$

$Revenue = income - expenditure \rightarrow$ καθαρό ετήσιο εισόδημα

Ως καθαρό ετήσιο εισόδημα μετά την μετασκευή θα θεωρηθεί η διαφορά του λειτουργικού κόστους του πλοίου πριν την μετασκευή (έσοδα) με το λειτουργικό κόστος του πλοίου μετά την μετασκευή (έξοδα).

r : Το ποσοστό έκπτωσης του χρήματος. Αυτός ο συντελεστής λαμβάνει υπόψη την διαχρονική αξία του χρήματος. Πιο συγκεκριμένα, δηλώνει ότι αξία μιας μονάδας χρήματος τώρα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε N χρόνια. Μέσω αυτού του συντελεστή, γίνεται αναγωγή μελλοντικών ταμειακών εισροών και εκροών στο σήμερα.

Ο συντελεστής IRR είναι το ποσοστό έκπτωσης r που μηδενίζει την Καθαρά Παρούσα Αξία. Δηλαδή,

$$0 = \sum_{t=1}^N \frac{income}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^N \frac{expenditure}{(1+r)^t} - \text{Αρχικός Κόστος Επένδυσης}$$

Ο συντελεστής r υπολογίζεται επαναληπτικά από την παραπάνω σχέση.

4.6 Προσδιορισμός Λειτουργικού Κόστους και Ετήσιου Εισοδήματος λόγω Μετασκευής

Αρχικά, τα λειτουργικά κόστη του πλοίου μετά την μετασκευή προέρχονται από την λειτουργία της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, στο λειτουργικό κόστος περιλαμβάνεται το κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει το πλοίο για την λειτουργία του και παράλληλα το κόστος συντήρησης της μπαταρίας και του εξοπλισμού της.

Λειτουργικό Κόστος Μπαταρίας

Κόστος Συντήρησης

Θεωρούμε ότι το κόστος συντήρησης εξαρτάται από δύο μεταβλητές

A: Πάγιο κόστος συντήρησης μπαταρίας (ποσοστό του αρχικού κόστους κτήσης της μπαταρίας)

B: Μεταβλητό κόστος συντήρησης (\$/kWh)

$$\text{Battery_maintenance_cost} = A * \text{battery_cost} + B * \text{Energy_installed}$$

Κόστος Κατανάλωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

$$\text{Total}_{\text{electric_energy_consumption_annual}} = 360 * E_{\text{total_energy_per_day}}$$

$$\text{Cost}_{\text{electric_energy}} = \text{Price}_{\text{electric_energy}} * \text{Total}_{\text{electric_energy_consumption_annual}}$$

Λειτουργικό Κόστος πριν την Μετασκευή

Στην ίδια φιλοσοφία πριν την μετασκευή το λειτουργικό κόστος προέρχεται από την συντήρηση των κύριων μηχανών και γεννητριών και από την κατανάλωση καυσίμου για την λειτουργία των μηχανών.

Κόστος Καυσίμου Κύριων Μηχανών

$b_{e_{M/E}}$: ειδική κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής (gr/kwh)

$$\text{Fuel_cost}_{M/E}(t) = 10^{-6} * (b_{e_{\text{sea_M/E}}} * E_{\text{energy_sea_M/E}} + b_{e_{\text{maneuver_M/E}}} * E_{\text{energy_maneuvering_M/E}})$$

Για την περίπτωση όπου γίνεται maneuvering με την κύρια μηχανή

Κόστος Καυσίμου Γεννητριών

$b_{G/E}$: ειδική κατανάλωση καυσίμου γεννητριών (gr/kwh)

Fuel_cost_G/E (t)=

$$10^{-6} * (b_{sea_G/E} * E_{energy_sea_G/E} + b_{port_G/E} * E_{energy_port_G/E} + b_{maneuver_G/E} * E_{energy_maneuvering_G/E})$$

Για την περίπτωση όπου γίνεται maneuvering με τις γεννήτριες

Τα επιμέρους ενεργειακά μεγέθη έχουν υπολογιστεί παραπάνω.

Κόστος Συντήρησης Μηχανών

Για τον προσδιορισμό του κόστους συντήρησης των μηχανών θεωρούμε ότι προκύπτει μέσω ενός συντελεστή ο οποίος εξαρτάται από την ισχύ εξόδου κάθε μηχανής.

M: Maintenance cost (\$/kw)

$$Total_{Maintenance_cost_engine} = M * (N_{M/E} * POWER_{MCR_M/E} + N_{G/E} * POWER_{MCR_G/E})$$

$N_{M/E}$: Συνολικός αριθμός κύριων μηχανών

$N_{G/E}$: Συνολικός αριθμός γεννητριών

Ετήσιο Όφελος από την Μετασκευή

$$Annual_Revenue = Total_{Maintenance_cost_engine} + Fuel_cost_{M/E} + Fuel_cost_{G/E} - Cost_{electric_energy} - Battery_maintenance_cost$$

Αναμένεται να υπάρχει όφελος καθώς τόσο το κόστος συντήρησης όσο και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι αισθητά μικρότερα από τα αντίστοιχα κόστη πριν την μετασκευή.

Συμπέρασμα

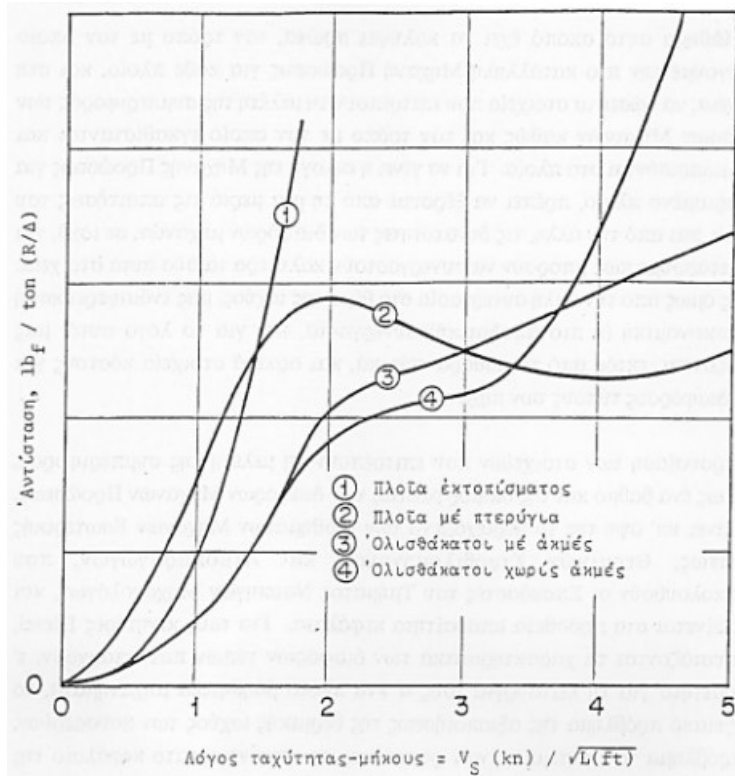
Για να καθίσταται η επένδυση βιώσιμη θα πρέπει ταυτόχρονα το $NPV > 0$ και ο $IRR > r$ → αρχικό επιτόκιο αναγωγής. Στην περίπτωση που δεν ικανοποιούνται αυτοί οι δύο παράμετροι τότε θα υπολογιστεί το ύψος χρηματοδότησης που καθιστά την επένδυση βιώσιμη, δηλαδή ικανοποιεί τις δύο αυτές παραμέτρους.

Κεφάλαιο 5^ο : Προσεγγιστικός υπολογισμός αντίστασης πλοίου

5.1 Προσεγγιστικός Προσδιορισμός Φορτίου λειτουργίας κύριας Μηχανής

Όπως προαναφέρθηκε τα πλοία που καλύπτουν τις πορθμειακές γραμμές στην Ελλάδα, διαθέτουν μεγάλες μηχανές (μεγάλο MCR) συγκριτικά πάντα με την διαδρομή που καλύπτουν. Αυτό γίνεται προκειμένου σε περίπτωση που πωληθούν σε άλλη γραμμή, να μπορούν να πετύχουν την επιθυμητή ταχύτητα υπηρεσίας. Ωστόσο, επειδή μετά την μετασκευή η αυτονομία και η ταχύτητα του πλοίου θα είναι αυστηρά καθορισμένη και τις περισσότερες φορές μικρότερη από την μέγιστη ταχύτητα του πλοίου, κρίνεται απαραίτητο να υπολογιστεί η αντίσταση του πλοίου στην ταχύτητα υπηρεσίας για την διαδρομή που μελετάται, ώστε να προκύψει το ακριβές φορτίο λειτουργίας της μηχανής. Το συγκεκριμένο είναι αρκετά δύσκολο μιας που δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για το πλοίο, ωστόσο θα γίνει μια προσεγγιστική ανάλυση και ενδεχομένως με κάποια υπερεκτίμηση προκειμένου να είμαστε στην ασφαλή περιοχή.

Τα δεδομένα που υπάρχουν για το πλοίο είναι το MCR της μηχανής και η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει (στο φορτίο μέγιστης λειτουργίας) με καθαρή γάστρα. Τα πλοία που θα μελετηθούν παρακάτω ανήκουν στην κατηγορία των γρήγορων σκαφών εκτοπίσματος, καθώς έχουν αριθμό Froude μικρότερο του 0.4. Σύμφωνα με το βιβλίο του μαθήματος Αντίσταση και Πρόωση πλοίου υπάρχει ένα διάγραμμα στο οποίο περιγράφεται η σχέση της αντίστασης του πλοίου συναρτήσει της ταχύτητας του, το οποίο περιλαμβάνει τα πλοία που θα μελετηθούν. Σύμφωνα με αυτό προκύπτει ότι η σχέση της αντίστασης με την ταχύτητα είναι παραβολικής μορφής και πιο συγκεκριμένα $R_{TOTAL} = C_R * V S^2$ (1)



Διάγραμμα 2 : Σχέση αντίστασης με ταχύτητα για διάφορους τύπους πλοίων

Θεωρούμε ότι ο βαθμός πρόωσης του πλοίου κυμαίνεται μεταξύ 50%-60% σύμφωνα με το βιβλίο της Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου.

Ο βαθμός πρόωσης (PC) είναι ο λόγος της πραγματικής ισχύος ρυμούλκησης του πλοίου προς την ισχύ που δαπανά η μηχανή

$$PC = \frac{\text{Power}_{\text{tug}}}{\text{TotalPower}_{\text{engine}}} \Rightarrow \text{Power}_{\text{tug}}(PS)_{MCR} = PC_{MCR} * P_{MCR}$$

Γνωρίζουμε την ταχύτητα του πλοίου όταν η μηχανή δουλεύει στο MCR.

$$\text{Power}_{\text{tug}} = \frac{N * R_{\text{tug}} * V_{\text{smax}}}{75} \xrightarrow{N: \text{αριθμός κύριων μηχανών σε λειτουργία}}$$

$$R_{\text{tug_vsmax}} = \frac{75 * PC_{MCR} * P_{MCR}}{N * V_{\text{smax}}} \text{ (kp) και } V_{\text{smax}} \text{ (m/s)}$$

$$R_{\text{TOTAL}} = C_R * V_S^2 \Rightarrow C_R = \frac{R_{\text{tug_vsmax}}}{V_{\text{sm}}^2}$$

Όπου $R_{\text{tug_vsmax}}$ είναι η αντίσταση ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό στην μέγιστη ταχύτητα του πλοίου. Ο στόχος είναι να υπολογιστεί η αντίσταση ρυμούλκησης του πλοίου στην ταχύτητα υπηρεσίας. Το συγκεκριμένο θα πραγματοποιηθεί μέσω της σχέσης της αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας όπως αναλύθηκε προηγούμενα.

Στο τέλος, για να υπολογιστεί η ισχύς που δαπανά η μηχανή θα πρέπει να διαιρεθεί η αντίσταση ρυμούλκησης με τον βαθμό πρόωσης του πλοίου αλλά αυτή την φορά στην ταχύτητα υπηρεσίας του. Γενικά, αναμένεται ο βαθμός πρόωσης στην νέα κατάσταση (ταχύτητα υπηρεσίας) να είναι διαφορετικός συγκριτικά με την κατάσταση όπου το πλοίο πλέει με την μέγιστη ταχύτητα. Τέλος, στην τιμή αυτή θα πρέπει να γίνει μία προσαύξηση για ρυπασμένη γάστρα, μιας που το πλοίο θα πρέπει να πετυχαίνει την ταχύτητα υπηρεσίας και με ρυπασμένη γάστρα. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντίσταση αυξάνεται κατά 20% κατά την πλεύση του πλοίου με ρυπασμένη γάστρα. Αυτή η προσαύξηση στην αντίσταση ρυμούλκησης γίνεται προκειμένου να βρούμε έστω και προσεγγιστικά το μέγιστο φορτίο λειτουργίας της μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού στην ταχύτητα που ταξιδεύει το πλοίο.

$V_{service}$: ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου

$Rtug_{service}$: αντίσταση στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου

Θεωρώντας ότι η αντίσταση δίνεται από την σχέση (1)

$$Rtug_{service} = 1.2 * \frac{Rtug_{vsmax}}{Vsmax^2} * V_{service}^2 = 1.2 * \frac{75 * PC_{MCR} * PM_{MCR}}{N * Vsmax} * \left(\frac{V_{service}}{Vsm} \right)^2 \text{ (Kp)}$$

Συνεπώς, η ισχύς ρυμούλκησης στην ταχύτητα υπηρεσίας ισούται :

$$Power_{tug_service} = \frac{N * Rtug_service * V_{service}}{75} \text{ (PS)}$$

Για την εύρεση του του φορτίου λειτουργίας της μηχανής διαιρούμε με το νέο βαθμό πρόωσης.

$$Power_engine = Power_{tug_service} / PC_{V_{service}}$$

Στην περίπτωση που λειτουργούν ταυτόχρονα περισσότερες από μία κύριες μηχανές τότε στην ισχύ βάζουμε την ολική ισχύ που παράγουν οι μηχανές, θεωρώντας ότι αυτές δουλεύουν στο ίδιο φορτίο λειτουργίας.

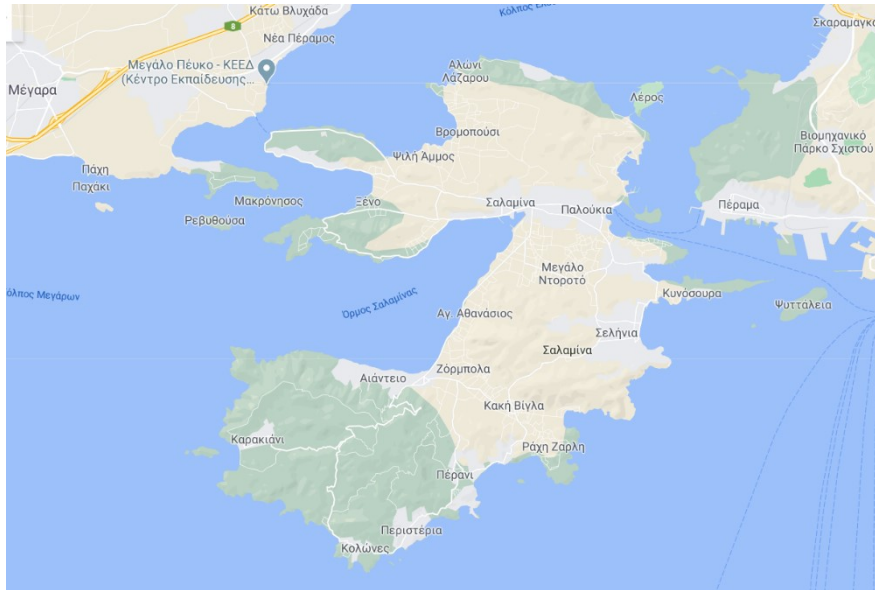
Κεφάλαιο 6^ο : Οι θαλάσσιες Γραμμές Μεταφορών της Σαλαμίνας

6.1 Βασικά χαρακτηριστικά της Σαλαμίνας

Η Σαλαμίνα συνδέεται με την υπόλοιπη αττική αποκλειστικά δια της θάλασσας. Επιγραμματικά, οι θαλάσσιες γραμμές που συνδέουν την Σαλαμίνα με την Αττική είναι: Πέραμα-Παλούκια, Φανερωμένη-Πάχη Μεγάρων, Παλούκια- (Καματερό)- Πειραιά και Σελήνια-Πειραιά. Στην παρούσα ερευνητική εργασία θα ασχοληθούμε με την μελέτη της γραμμής Φανερωμένη (Σαλαμίνα) – Πάχη Μεγάρων (Πέραμα Μεγάρων), δεδομένου ότι η συγκεκριμένη θαλάσσια γραμμή δεν έχει μελετηθεί σε προηγούμενες ερευνητικές μελέτες, εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες θαλάσσιες γραμμές μικρών αποστάσεων που συνδέουν την νήσο της Σαλαμίνας με την Αττική.

Γεωγραφική Θέση

Το νησί Σαλαμίνα είναι το μεγαλύτερο νησί του Σαρωνικού κόλπου λαμβάνοντας υπόψιν τόσο το συνολικό εμβαδόν του όσο και τον πληθυσμό του που αγγίζει τα 39.220 σύμφωνα με απογραφές του 2001 και του 2011. Από άποψη γεωγραφικής θέσης η νήσος περιβάλλεται από την θάλασσα του Σαρωνικού κόλπου και βρίσκεται νοτίως από την Δυτική Αττική, ανατολικά από το ακρωτήριο της Αγίας Τριάδας και τις νήσους Ρεβυθούσα και Μακρόνησο, δυτικά της νήσου Ψυττάλειας και του κεντρικού λιμένα Πειραιώς και βορείως της νήσου Λαγούσας.



Εικόνα 25 : Χάρτης Σαλαμίνας

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της νήσου αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Περιφέρεια	Αττικής
Περιφερειακή Ενότητα	Νήσων Αττικής
Πρωτεύουσα	Σαλαμίνα
Εμβαδόν	96,09 τ. χλμ.
Πληθυσμός (απογραφή 2001)	38.022
Πληθυσμός (απογραφή του 2011)	39.220
Πυκνότητα πληθυσμού / τ. χλμ. (2001)	395,7 κάτοικοι/τ. χλμ.
Πυκνότητα πληθυσμού / τ. χλμ. (2011)	408,2 κάτοικοι/τ. χλμ.
Ανώτατο υψόμετρο	Μαυροβούνι – 380 μ
Σημαντικοί Οικισμοί της νήσου	Παλούκια, Αιάντειο, Καματερό , Σελήνια, Αμπελάκια, Κακή Βίγλα, Μπατσιό, Βασιλικά, Άνω Βασιλικά, Δημήτρανη.

Οικονομική δραστηριότητα της Σαλαμίνας

Πρωτογενής τομέας Παραγωγής: Η κύρια πηγή πρωτογενούς παραγωγής στο νησί είναι η αλιεία και η ιχθυοκαλλιέργεια, ενώ σε μικρότερο βαθμό εξασκούνται η γεωργία και η κτηνοτροφία. Ωστόσο, η αλιεία επλήγη σοβαρά τα τελευταία χρόνια λόγω της περιβαλλοντικής καταστροφής από το ναυάγιο του δεξαμενόπλοιου Αγία Ζώνη.

Δευτερογενής τομέας Παραγωγής: Η Σαλαμίνα αποτελεί έδρα αρκετών ναυπηγείων, τα οποία επισκευάζουν/κατασκευάζουν μικρά και μεσαία πλοία και καρνάγια για αλιευτικά σκάφη.

Τριτογενής τομέας Παραγωγής: Κύρια δραστηριότητα υπηρεσιών στο νησί είναι ο τουρισμός, όπως και στα περισσότερα νησιά της Ελλάδος. Ωστόσο συναντώνται όλα τα επαγγέλματα του τριτογενούς τομέα παραγωγής.

Σήμερα οι κύριες πηγές απασχόλησης για τους κατοίκους εντός των ορίων της Σαλαμίνας είναι η απασχόληση τους στον Ναύσταθμό. Σήμερα ο ναύσταθμος της Σαλαμίνας είναι ο μεγαλύτερο της χώρας. Σ' αυτόν ελλιμενίζονται τόσο τα πλοία του πολεμικού ναυτικού όσο και τα υποβρύχια. Επίσης εκτελούνται επισκευαστικές εργασίες σε αυτά, ενώ πραγματοποιείται και η τροφοδοσία των πλοίων πριν από κάθε απόπλου. Ο ακριβής αριθμός των εργαζομένων στο ναύσταθμο δεν είναι γνωστός λόγω του ότι αποτελεί στρατιωτική εγκατάσταση. Μεγάλος αριθμός κατοίκων της Σαλαμίνας εργάζεται στο ναύσταθμο. Τέλος, η συνεισφορά του ναύσταθμου στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής είναι πολύ σημαντική, καθώς οι ανάγκες του καλύπτονται από την εγχώρια αγορά και συνεπώς σημαντικό μέρος των θέσεων εργασίας στο νησί σχετίζονται με την ύπαρξή του.

6.2.1 Μελέτη Διαδρομής Πέραμα Μαγάρων - Φανερωμένη Σαλαμίνας

Η συγκεκριμένη πορθμειακή διαδρομή παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον για την περίπτωση μετασκευής πλοίου σε μπαταριόπλοιο καθώς είναι αρκετά μικρή (μόνο 0.45 nm) με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις σε εγκατεστημένη ισχύ να είναι μικρές, το οποίο συνεπάγεται και μειωμένο κόστος μετασκευής. Το ALKYON II με IMO 9856775 είναι επιβατηγό οχηματαγωγό πλοίο το οποίο καλύπτει την γραμμή Πέραμα Μεγάρων - Φανερωμένη Σαλαμίνας. Το συγκεκριμένο πλοίο επιλέχθηκε ως μοντέλο για να μετασκευαστεί σε μπαταριόπλοιο, καθώς κατασκευάστηκε μόλις το 2018, γεγονός που προσδίδει νόημα στην μελέτη εφικτότητας, καθώς υπάρχει αυξημένος χρονικός ορίζοντας προκειμένου να πραγματοποιηθεί απόσβεση της επένδυσης.



Εικόνα 26: Γραμμή Φανερωμένη-Πέραμα Μεγάρων

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Πλοίου ALKYON II

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου Alkyon II

Πίνακας 1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ALKYON II

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ALKYON II		
Τύπος πλοίου	Ro-Ro Passenger ship (παντόφλα)	
IMO Number	9856775	
Έτος Κατασκευής	2018	
Διαδρομή (Route from to)	Πέραμα Μεγάρων -Σαλαμίνα	
Απόσταση Διαδρομής	0.45	nm
time_cruising	5	min
time at port	20	min
time maneuvering	1	min
time acceleration	1	min
time deceleration	1	min
LOA	52	m
B	13	m
D	3.8	m
T_design	1.8	m
DWT	175	t
Vmax	10	Kn
Vservice	6	Kn
PMCR_M/E	450	Hp
PMCR_M/E	335.56	KW
Number of M/E	2	
Number of operating M/E	2	
Power_M/E_Vservice	134.23	KW
PMCR_Generator	80	KW
Number of G/E	2	
Number of operating G/E	1	
Power_G/E_sea_Load	45	KW
Power_G/E_port_Load	20	KW



Εικόνα: ALKYON II , IMO NUMBER: 9856775

6.2.2 Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας και Φορτίου Λειτουργίας Μηχανής

Σύμφωνα, με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος θα πρέπει να προσδιοριστεί το μέσο φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού και αντίστοιχα το φορτίο λειτουργίας της γεννήτριας στο ταξίδι και στο λιμάνι. Σύμφωνα με τα δεδομένα που υπάρχουν από όμοια πλοία, οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου στο λιμάνι κυμαίνονται από 15-20KW (φώτα και κλιματιστικά) και αντίστοιχα οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου κατά την διάρκεια του ταξιδιού κυμαίνονται μεταξύ 40-45KW. Αναφορικά με το φορτίο λειτουργίας των κύριων μηχανών, το οποίο αποτελεί και το πιο σημαντικό λειτουργικό φορτίο που θα καθορίσει την εγκατεστημένη ισχύ των μπαταριών, η απαίτηση ισχύος εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του πλοίου. Συνεπώς, αφού καθοριστεί η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου για αυτή την διαδρομή και για δεδομένο χρόνο ταξιδιού, θα προσδιοριστεί η αντίσταση του πλοίου και άρα το φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής, σύμφωνα με την μέθοδο που αναλύθηκε παραπάνω για την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας

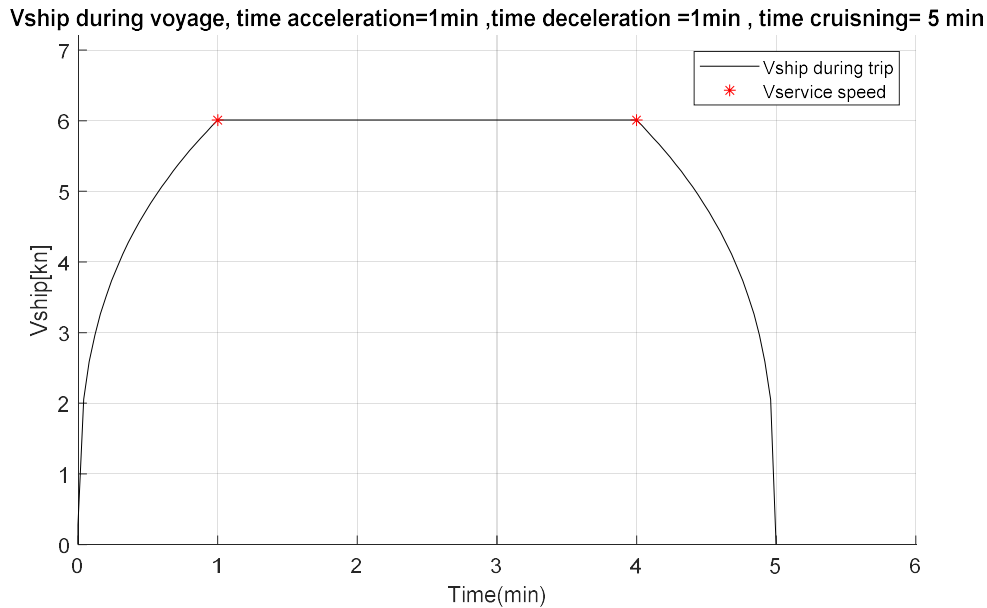
Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υπηρεσίας του πλοίου, θεωρούμε ότι στα πέντε λεπτά που είναι ο χρόνος ταξιδιού, το πλοίο επιταχύνει από την ακινησία μέχρι και την ταχύτητα υπηρεσίας σε 1 λεπτό. Αντίστοιχα, 1 λεπτό θεωρούμε ότι διαρκεί η επιβράδυνση μέχρι και τον μηδενισμό της ταχύτητας. Για να βρεθεί η σχέση της ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, θεωρούμε ότι η ισχύς της μηχανής αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο μέχρι το πλοίο να φτάσει την ταχύτητα υπηρεσίας (σταθερό ονομαστικό φορτίο της μηχανής $\rightarrow NCR$). Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε η αντίσταση του πλοίου συναρτήσει της ταχύτητας δίνεται από την σχέση $R = CR \cdot V_s^2$ όπου R η αντίσταση του πλοίου.

Παράλληλα, $P(KW) = \alpha \cdot t$ (γραμμική σχέση κατά την επιτάχυνση) και $P(KW) = R \cdot V_s$

Συνεπώς, $P(KW) = b \cdot V_s^3 \Rightarrow \alpha \cdot t = b \cdot V_s^3 \Rightarrow V_s = C' \cdot \sqrt[3]{t}$

Αντίστοιχη σχέση προκύπτει κατά την φάση της επιβράδυνσης του πλοίου.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που απεικονίζουν την ταχύτητα του πλοίου συναρτήσει του χρόνου. Η ταχύτητα υπηρεσίας υπολογίστηκε μέσω της συνθήκης ότι το εμβαδό κάτω από την καμπύλη δίνει την συνολική απόσταση που πρέπει να διανύσει το πλοίο στο συγκεκριμένο χρόνο ταξιδιού (0.45 nm). Σύμφωνα, με τους υπολογισμούς η ταχύτητα υπηρεσίας είναι 6 kn.



Διάγραμμα 3: Ταχύτητα Πλοίου συναρτήσει του χρόνου ταξιδιού του πλοίου ALKYON II

Προσδιορισμός Μέγιστου φορτίου λειτουργίας Μηχανής

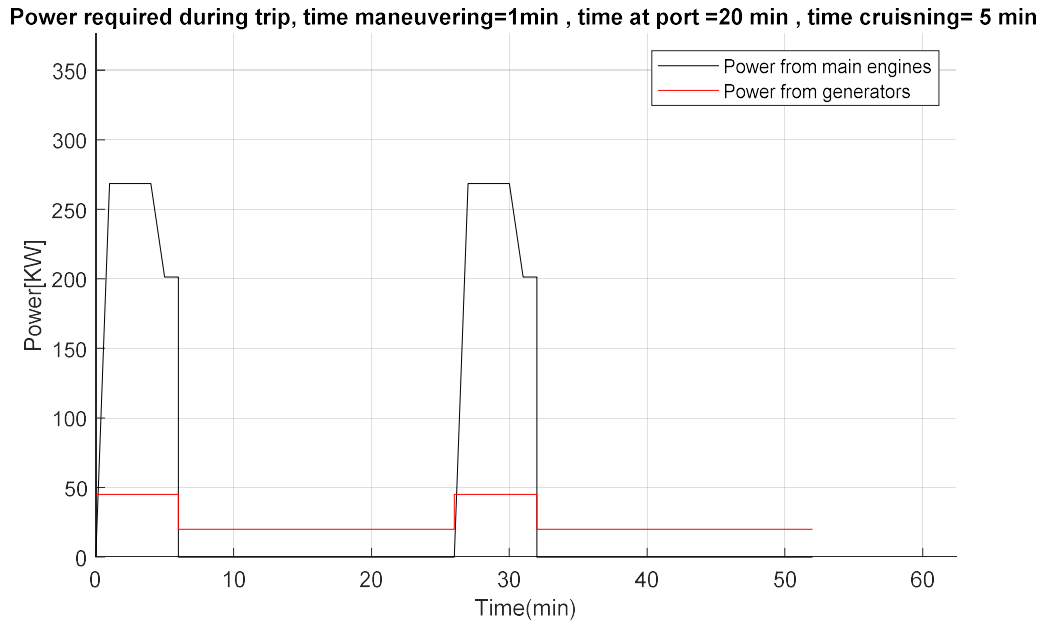
Όπως αναμενόταν η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου είναι αισθητά μικρότερη από την μέγιστη ταχύτητα του πλοίου καθώς η διαδρομή είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα το πλοίο να μην μπορεί να αναπτύξει μεγάλη ταχύτητα. Κατά συνέπεια, η αντίσταση του πλοίου αναμένεται να είναι αισθητά μικρότερη (τετραγωνική σχέση ως προς την ταχύτητα) όπως και το φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής σε σχέση με το MCR. Παράλληλα, πρέπει να επισημανθεί ότι το υπό μελέτη πλοίο ανήκει στην κατηγορία των πλοίων εκτοπίσματος όπου ισχύει $R = CR \cdot V_s^2$ σύμφωνα με το διάγραμμα 2 καθώς ο αριθμός Froude < 0.4 και $V_{service}(kn) \sqrt{L(ft)} = 1.52$

Αναφορικά με τον βαθμό πρόωσης του συστήματος προκειμένου να γίνει συσχέτιση της αντίστασης ρυμούλκησης με την ισχύ της μηχανής, θεωρείται ότι λαμβάνει την τιμή $PC_{Vs_{max}} = 0.6$ στην μέγιστη ταχύτητα και την τιμή $PC_{V_{service}} = 0.5$ στην ταχύτητα υπηρεσίας. Αυτή η επιλογή προκύπτει από το γεγονός ότι έλικα του πλοίου έχει επιλεγεί να λειτουργεί βέλτιστα σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Η ισχύς στο MCR ισούται με 450 HP και η μέγιστη ταχύτητα είναι 11 kn. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι η κάθε μηχανή λειτουργεί στο 32% του MCR λαμβάνοντας υπόψιν και την προσαύξηση της αντίστασης κατά 20% λόγω ρυπασμένης γάστρας. Για του υπολογισμούς επομένως παρακάτω θα θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι οι μηχανές του πλοίου λειτουργούν στο 40% του MCR στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

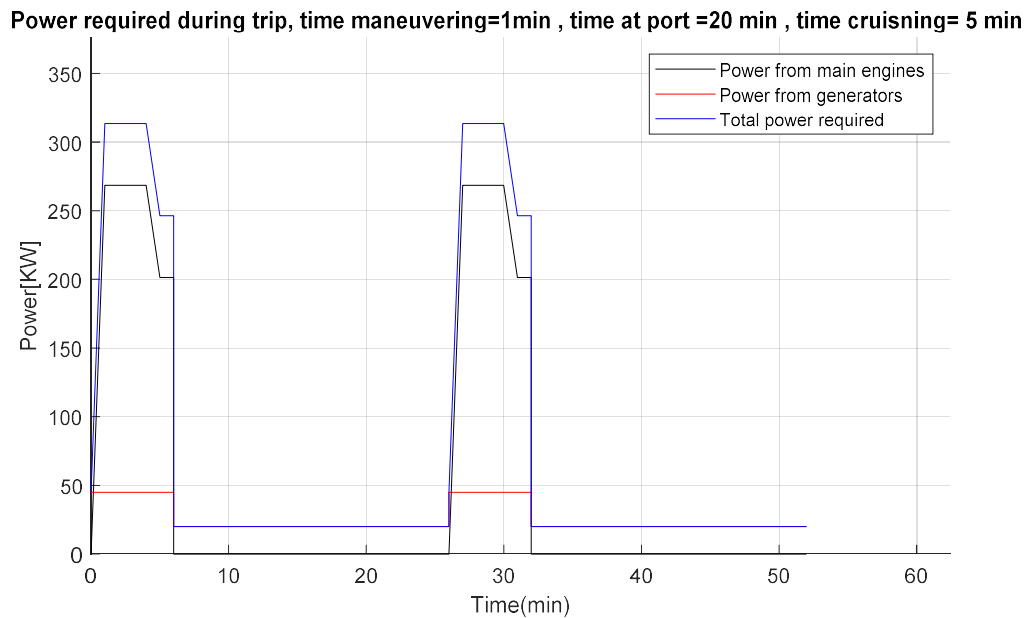
Όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε ότι κατά την επιτάχυνση του πλοίου έχουμε γραμμική αύξηση της ισχύος ως προς τον χρόνο και αντίστοιχα κατά την επιβράδυνση. Αναφορικά με την πηδαλιουχία του πλοίου, επειδή είναι παντόφλα, οι ελιγμοί του πλοίου στο λιμάνι πραγματοποιούνται με την λειτουργία της κύριας

μηχανής και μόνο, λόγω της ύπαρξης των Azipod thrusters. Θεωρούμε ότι οι ελιγμοί διαρκούν περίπου 1 λεπτό και οι μηχανές λειτουργούν περίπου στο 30% του MCR.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που απεικονίζουν τα φορτία λειτουργίας των μηχανών και των γεννητριών συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 4: Λειτουργία Κύριων Μηχανών και Γεννητριών του πλοίου ALKYON II



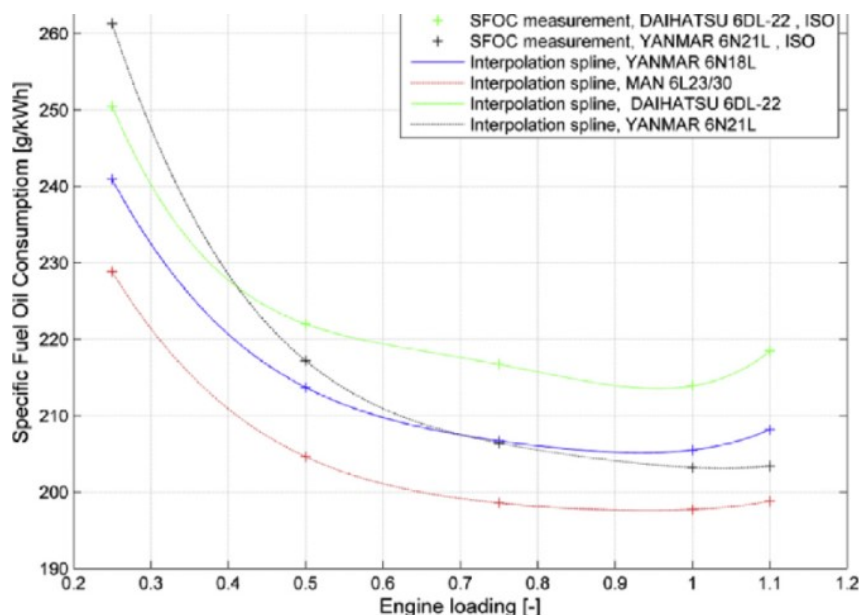
Διάγραμμα 5: Λειτουργία Κύριων Μηχανών και Γεννητριών και Συνολική Ζήτηση Ισχύος του πλοίου ALKYON II

Το μέσο φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού ισούται με 35%MCR. Υπενθυμίζεται ότι υπολογίζεται από τον τύπο :

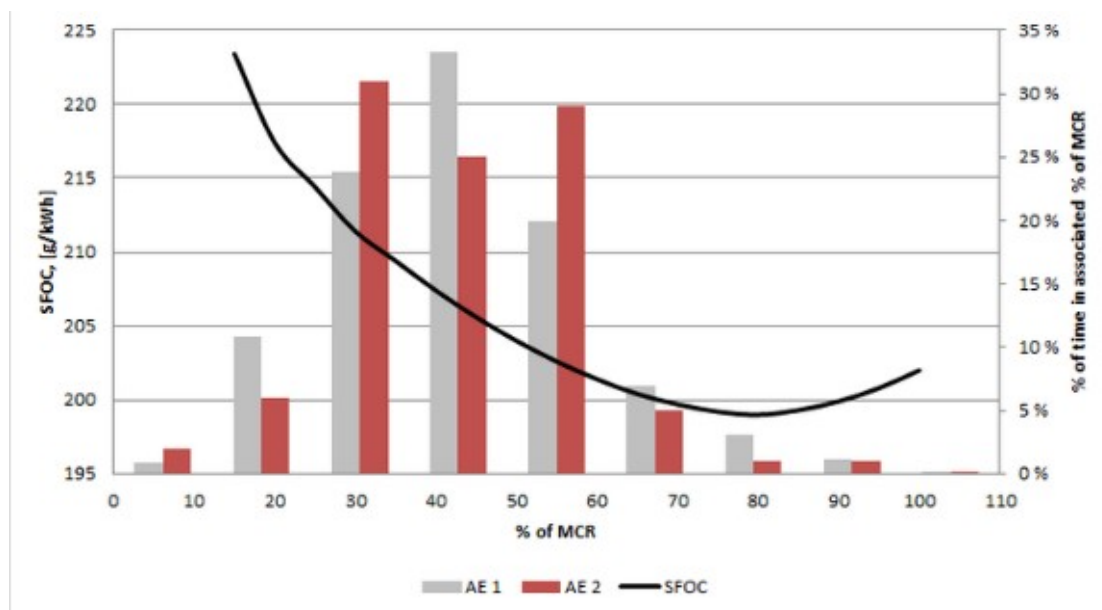
$$\bar{P}_{\text{AVERAGE_M/E}} = \frac{\int_0^{\Delta t_{\text{cruising}}} P[\text{KW}] * dt}{\int_0^{\Delta t_{\text{cruising}}} dt}$$

6.2.3 Προσδιορισμός Ειδικής Κατανάλωσης Καυσίμου (gr/kwh)

Μία πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τα έσοδα από την μετασκευή είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (gr/kwh) των κύριων μηχανών και των γεννητριών, καθώς καθορίζει την ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή έργου από την μηχανή. Γενικά, οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ναυτικών κινητήρων κυμαίνονται από 160 – 220 (gr/kwh) ανάλογα με τον τύπο της μηχανής (π.χ. 2X ή 4X). Οι χαμηλότερες τιμές της ειδικής κατανάλωσης αντιστοιχούν σε μεγάλες 2X οι οποίες έχουν και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις αντίστοιχες 4X. Οι κύριες μηχανές που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους τύπους πλοίων είναι 4X μηχανές. Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που απεικονίζουν την μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας τόσο για την περίπτωση 4X ναυτικών μηχανών όσο και για την περίπτωση των γεννητριών.



Διάγραμμα 6 : Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει φορτίου λειτουργίας για διαφορετικούς τύπους 4X ναυτικών μηχανών σύμφωνα με κατασκευάστριες εταιρείες.



Διάγραμμα 7 : Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει φορτίου λειτουργίας για την περίπτωση λειτουργίας γεννήτριας, σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα του Νηογνώμονα DNV.

Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα και λαμβάνοντας υπόψιν ότι η κύρια μηχανή λειτουργεί κατά μέσο όρο στο 35%MCR η ειδική κατανάλωση θα κυμαίνεται από 205-210 gr/kwh. Αντίστοιχα, η γεννήτρια στο λιμάνι λειτουργεί στο 25%MCR άρα η τιμή της ειδικής κατανάλωσης ισούται προσεγγιστικά με 215 gr/kwh , και κατά την διάρκεια του ταξιδιού στο 60%MCR άρα η τιμή της ειδικής κατανάλωσης ισούται με 203 gr/kwh.

6.2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Επιλεγθείσας Μπαταρίας

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας U24-24XP τύπου LFP, η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα πλοία που θα μελετηθούν παρακάτω.

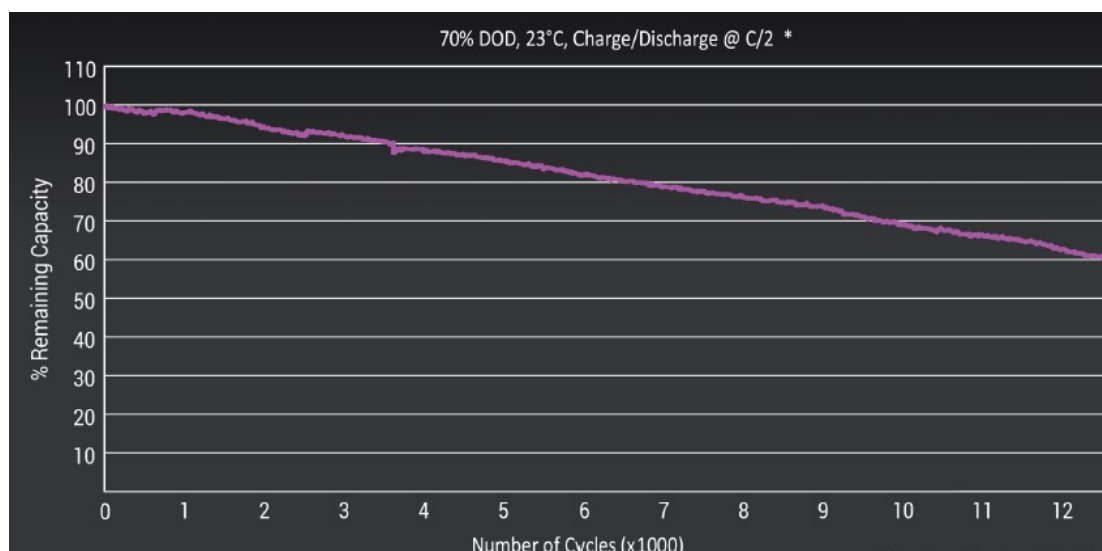
Πίνακας 2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά της μπαταρίας U24-24XP

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μπαταρίας		
Τύπος	LFP	
Ονομασία	U24-24XP	
Ονομαστική Τάση	25.6	Volt
Χωρητικότητα	59	Ah
Τάση Φόρτισης	29.2	Volt
Μέγιστο Προτεινόμενο Ρεύμα Φόρτισης	59	A
Μέγιστο Συνεχές Ρεύμα	118	A
Ενέργεια Μπαταρίας	1510.4	Wh
Βάρος	16.3	Kg
Μήκος	2.6	m
Πλάτος	1.72	m
Ύψος	2.25	m
Ειδική Ενέργεια	92.66	Wh/kg
Εύρος κύκλων λειτουργίας	7000-10000	Cycles
Κόστος (included BMS)	460	\$/kwh
Κόστος Συντήρησης (fixed)	2%*Purchase	
Κόστος Συντήρησης (variable)	(1%-2%)*Total_installed_energy	



Εικόνα 27 : Module μπαταρίας LFP

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η μείωση της χωρητικότητας της επιλεχθείσας μπαταρίας συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας της. Το διάγραμμα αυτό προκύπτει για ρεύμα ρυθμού φόρτισης και αποφόρτισης C/2 rate και για μέγιστο βάθος αποφόρτισης έως 70%. Με βάση αυτές τις συνθήκες η μπαταρία θα χάσει το 30% της χωρητικότητας της σε περίπου 9 χρόνια.



Διάγραμμα 7 : Μεταβολή της χωρητικότητας με τους κύκλους λειτουργίας για δεδομένο ρεύμα φόρτισης, εκφόρτισης και βάθους αποφόρτισης, σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία

Εφαρμογή Marine electrical

Οι υπολογισμοί για την πραγμάτωση της τεχνο-οικονομικής μελέτης θα πραγματοποιηθούν μέσω της εφαρμογής marine electrical , η οποία φτιάχτηκε από τον φοιτητή Νίκο Ντόκο στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας. Η συγκεκριμένη εφαρμογή υλοποιεί όλους τους υπολογισμούς για τον υπολογισμό του απαραίτητου εξοπλισμού για την μετασκευή όπως και του συνολικού κόστους της μετασκευής. Τέλος, υπολογίζεται το ετήσιο όφελος για τον πλοιοκτήτη από την μετασκευή, όπως γίνεται και ο έλεγχος της βιωσιμότητας της επένδυσης. Αξίζει να επισημανθεί ότι η εφαρμογή στηρίζεται στην μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Παρακάτω παρατίθεται στιγμιότυπο από την εφαρμογή Marine electrical με τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου (ALKYONII)

Ship ALKYON II

General

Name:

IMO:

Class:

Flag:

Type:

Principal Dimensions

Length (m):

Breadth (m):

Depth (m):

Draft (m):

DWT (t):

Main Engines

No of M/Es:

No of Operating M/Es:

M/E MCR (kW):

M/E NCR (kW):

M/E Manoeuvring Load (kW):

M/E NCR Consumption (gr/kWh):

M/E Manoeuvring Cons. (gr/kWh):

M/E Efficiency Factor (0-1, Just for Reference):

Generator Engines

No of G/Es:

No of Operating G/Es:

G/E MCR (kW):

G/E NCR (kW):

G/E Manoeuvring Load (kW):

G/E Port Load (kW, For All Oper. G/Es):

G/E NCR Consumption (gr/kWh):

G/E Manoeuvring Cons. (gr/kWh):

G/E Port Consumption (gr/kWh):

G/E Efficiency Factor (0-1):

DC Voltage (V):

6.2.5 Επιλογή Βέλτιστου Σεναρίου Φόρτισης

Στην συγκεκριμένη ενότητα στόχος είναι η εύρεση του βέλτιστου σεναρίου φόρτισης του πλοίου. Το τελικό συμπέρασμα θα προκύψει λαμβάνοντας υπόψη την τελική εγκατεστημένη ισχύ πάνω στο πλοίο, το μέγιστο βάθος αποφόρτισης, το ρεύμα φόρτισης (μεγάλες τιμές του οποίου υποβαθμίζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας) και τέλος τους ημερήσιους κύκλους λειτουργίας.

Σενάριο Ενδιάμεση Φόρτιση σε κάθε λιμάνι

1^η περίπτωση Charging current=15 A

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 2
Port Energy/Trip: 13.33 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 150 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh	No. of Batteries Parallel: 10	No. of Motors: 2
Total Energy/Trip: 67.49 kWh	Total No. of Batteries: 220	Electric Motor Power: 140 kW
Total Energy/Day: 607.41 kWh	Charging Time: 16.00 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 311.11 kW	C Rate (During Charging): 0.25	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 332.29 kW	New DOD: 0.676	
	Total Weight of Batteries: 3586 kg	
	Total Volume of Batteries: 1.69 m ³	
	Daily Cycles: 1.828	
	Life Expectancy: 12.16 years	

2^η περίπτωση Charging current=20 A

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 2
Port Energy/Trip: 13.33 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 150 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh	No. of Batteries Parallel: 8	No. of Motors: 2
Total Energy/Trip: 67.49 kWh	Total No. of Batteries: 176	Electric Motor Power: 140 kW
Total Energy/Day: 607.41 kWh	Charging Time: 16.00 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 259.96 kW	C Rate (During Charging): 0.34	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 265.83 kW	New DOD: 0.748	
	Total Weight of Batteries: 2868.8 kg	
	Total Volume of Batteries: 1.36 m ³	
	Daily Cycles: 2.285	
	Life Expectancy: 9.73 years	

3^η περίπτωση Charging current=30 A

Results

Energy

Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh
Port Energy/Trip: 13.33 kWh
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh
Total Energy/Trip: 67.49 kWh
Total Energy/Day: 607.41 kWh
Energy Min: 195.64 kW
Energy installed: 199.37 kW

Battery

Battery Arrays: 2
No. of Modules Series: 22
No. of Batteries Parallel: 6
Total No. of Batteries: 132
Charging Time: 16.00 min
C Rate (During Charging): 0.51
New DOD: 0.742
Total Weight of Batteries: 2151.6 kg
Total Volume of Batteries: 1.02 m³
Daily Cycles: 3.047
Life Expectancy: 7.29 years

Equipment

No. of Inverters: 2
Inverter Power: 150 kW
No. of Motors: 2
Electric Motor Power: 140 kW
No. of Chargers: 2
Charger Power: 0 kW

4^η περίπτωση Charging current=35 A

Results

Energy

Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh
Port Energy/Trip: 13.33 kWh
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh
Total Energy/Trip: 67.49 kWh
Total Energy/Day: 607.41 kWh
Energy Min: 174.1 kW
Energy installed: 199.37 kW

Battery

Battery Arrays: 2
No. of Modules Series: 22
No. of Batteries Parallel: 6
Total No. of Batteries: 132
Charging Time: 16.00 min
C Rate (During Charging): 0.59
New DOD: 0.358
Total Weight of Batteries: 2151.6 kg
Total Volume of Batteries: 1.02 m³
Daily Cycles: 3.047
Life Expectancy: 7.29 years

Equipment

No. of Inverters: 2
Inverter Power: 150 kW
No. of Motors: 2
Electric Motor Power: 140 kW
No. of Chargers: 2
Charger Power: 0 kW

Συγκεντρωτικά παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα του σεναρίου ενδιάμεσης φόρτισης για διαφορετικά ρεύματα φόρτισης.

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικά δεδομένα της μεθόδου ενδιάμεσης φόρτισης για την διαδρομή Μέγαρο-Σαλαμίνα

Μέθοδος Ενδιάμεση Φόρτιση σε κάθε λιμάνι Total_Battery_cycles=8000					
Current_charging(A)	MAX_DOD_real	E_installed(kwh)	Daily_cycles	Life_exp(years)	MAX_Recommended Current (A)
15	0.68	332.29	1.828	12.2	59
20	0.75	265.83	2.285	9.7	59
30	0.74	199.37	3.047	7.3	59
35	0.36	199.37	3.047	7.3	59

Συμπερασματικά, το βέλτιστο ρεύμα φόρτισης για την περίπτωση της ενδιάμεσης φόρτισης ισούται με 30 A . Με βάση αυτή την τιμή ρεύματος η εγκατεστημένη ισχύς πάνω στο πλοίο ισούται με περίπου 200kw με μία εφεδρεία ισχύος περίπου 25%. Αυτή η τιμή ρεύματος θεωρείται βέλτιστη καθώς με βάση αυτή την τιμή απαιτείται η ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύς πάνω στο πλοίο. Παράλληλα, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας με βάση τους ολικούς κύκλους λειτουργίας (θεωρούνται 8000) είναι 7.3 χρόνια, τιμή αρκετά ικανοποιητική αφού στα 7 χρόνια θεωρείται ότι θα γίνει αντικατάσταση των μπαταριών. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός φόρτισης είναι περίπου C/2, τιμή που επιβεβαιώνει την καλή χρήση της μπαταρίας. Τέλος, επισημαίνεται ότι δεν υπάρχει νόημα να εξεταστούν μεγαλύτερα ρεύματα φόρτισης, καθώς με την αύξηση του ρεύματος φόρτισης, θα μειωθεί η εγκατεστημένη ισχύς στο πλοίο και άρα θα μειωθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, αφού θα αυξηθούν οι ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας της μπαταρίας για την ίδια ημερήσια ενεργειακή ζήτηση του πλοίου.

Σενάριο: Φόρτιση μετά από N αριθμό δρομολογίων

1^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 4 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 2
Port Energy/Trip: 13.33 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 150 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh	No. of Batteries Parallel: 6	No. of Motors: 2
Total Energy/Trip: 67.49 kWh	Total No. of Batteries: 132	Electric Motor Power: 140 kW
Total Energy/Day: 607.41 kWh	Charging Time: 40.62 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 168.73 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 199.37 kW	New DOD: 0.677	
	Total Weight of Batteries: 2151.6 kg	
	Total Volume of Batteries: 1.02 m ³	
	Daily Cycles: 3.047	
	Life Expectancy: 7.29 years	

2^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 5 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 2
Port Energy/Trip: 13.33 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 150 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh	No. of Batteries Parallel: 8	No. of Motors: 2
Total Energy/Trip: 67.49 kWh	Total No. of Batteries: 176	Electric Motor Power: 140 kW
Total Energy/Day: 607.41 kWh	Charging Time: 38.10 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 210.91 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 265.83 kW	New DOD: 0.635	
	Total Weight of Batteries: 2868.8 kg	
	Total Volume of Batteries: 1.36 m ³	
	Daily Cycles: 2.285	
	Life Expectancy: 9.73 years	

3^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 6 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 2
Port Energy/Trip: 13.33 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 150 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh	No. of Batteries Parallel: 8	No. of Motors: 2
Total Energy/Trip: 67.49 kWh	Total No. of Batteries: 176	Electric Motor Power: 140 kW
Total Energy/Day: 607.41 kWh	Charging Time: 45.72 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 253.09 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 265.83 kW	New DOD: 0.762	
	Total Weight of Batteries: 2868.8 kg	
	Total Volume of Batteries: 1.36 m ³	
	Daily Cycles: 2.285	
	Life Expectancy: 9.73 years	

4^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 7 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 2
Port Energy/Trip: 13.33 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 150 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh	No. of Batteries Parallel: 10	No. of Motors: 2
Total Energy/Trip: 67.49 kWh	Total No. of Batteries: 220	Electric Motor Power: 140 kW
Total Energy/Day: 607.41 kWh	Charging Time: 42.66 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 295.27 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 332.29 kW	New DOD: 0.711	
	Total Weight of Batteries: 3586 kg	
	Total Volume of Batteries: 1.69 m ³	
	Daily Cycles: 1.828	
	Life Expectancy: 12.16 years	

Συγκεντρωτικά παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα του σεναρίου φόρτισης του πλοίου μετά από N δρομολόγια.

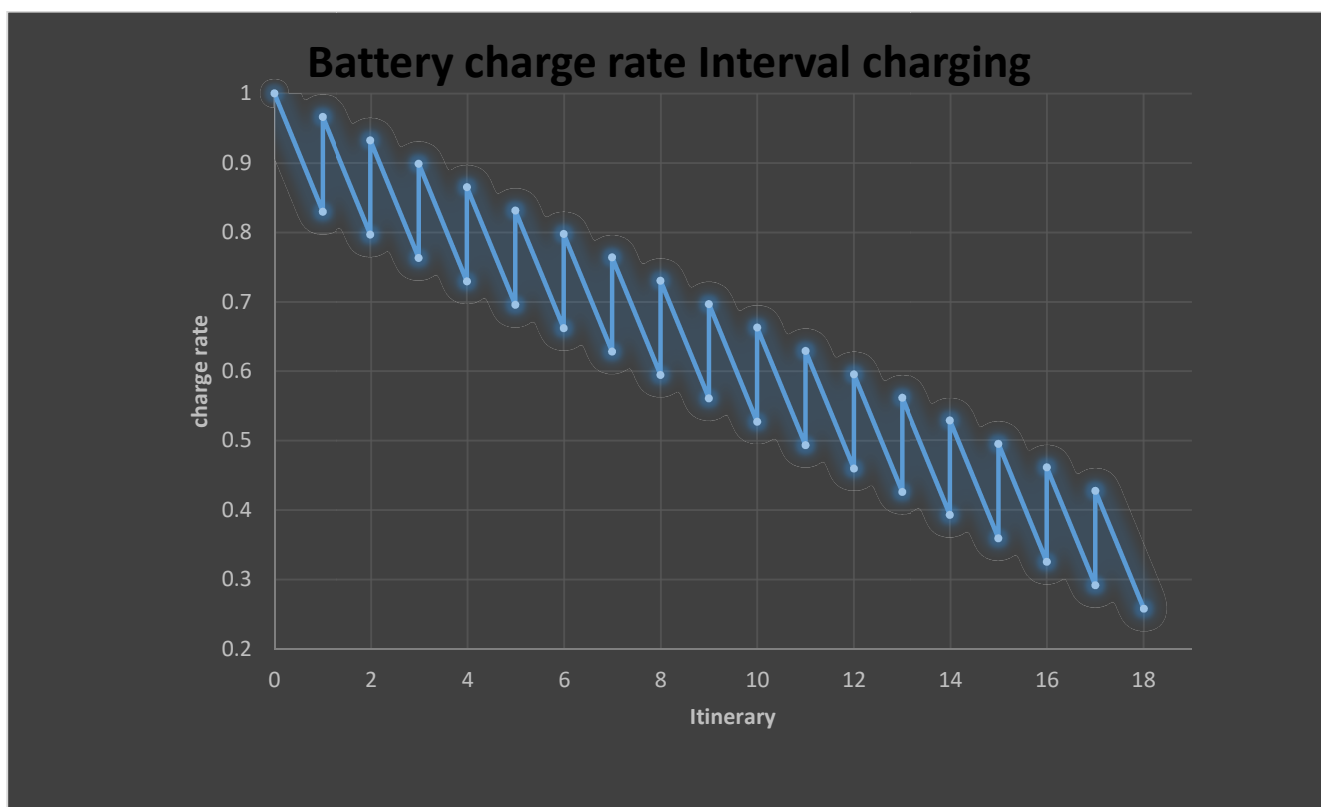
Πίνακας 4 : Συγκεντρωτικά δεδομένα της μεθόδου φόρτισης μετά από Nx δρομολόγια για την διαδρομή Μέγαρα-Σαλαμίνα

Μέθοδος φόρτιση μετά από N δρομολόγια Total Cycles=8000					
N δρομολόγια	DOD_real	E_installed(kwh)	Daily_cycles	Life_exp(years)	Απαιτούμενος Χρόνος Φόρτισης(min)
4	0.68	199.37	3.047	7.29	41
5	0.64	265.83	2.285	9.73	38
6	0.65	265.83	2.285	9.73	46
7	0.71	332.29	1.828	12.16	43

Συμπερασματικά, ο βέλτιστος αριθμός δρομολογίων χωρίς ενδιάμεση φόρτιση, αναφορικά με την ελάχιστη απαίτηση για εγκατεστημένη ισχύ, ισούται με N=4 δρομολόγια. Ενδεικτικά, για N=4 δρομολόγια τα δύο σενάρια καθίστανται ισοδύναμα, αφού η εγκατεστημένη ισχύς στο πλοίο ισούται με περίπου 200kw. Παράλληλα, υπάρχει μία εφεδρεία ισχύος περίπου 30%. Αναφορικά με τον χρόνο φόρτισης, η μπαταρία φορτίζει πλήρως σε 41 λεπτά για ρεύμα ρυθμού φόρτισης 1C rate.

Συγκεντρωτικά καταλήγουμε στο σενάριο ενδιάμεσης φόρτισης με ρεύμα φόρτισης 30A ως βέλτιστη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η επιλογή στηρίζεται στο γεγονός ότι αφού το πλοίο παραμένει για αρκετή ώρα στο λιμάνι είναι προτιμότερο να φορτίζει σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό, καθώς δεν απαιτείται να σταματήσει τα δρομολόγια προκειμένου να φορτιστούν οι μπαταρίες. Το συγκεκριμένο γεγονός πρόκειται να αποτελέσει επιπρόσθετο πλεονέκτημα της μετασκευής, καθώς πριν την μετασκευή το πλοίο έπρεπε να σταματάει ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα δρομολόγια προκειμένου να κάνει ανεφοδιασμό.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των δρομολογίων του πλοίου και φαίνονται ξεκάθαρα τα ποσοστά φόρτισης της μπαταρίας πριν και μετά την φόρτιση σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό. Στο τέλος της ημέρας το πλοίο έχει πραγματοποιήσει 9 ταξίδια, δηλαδή 18 δρομολόγια και παρατηρούμε ότι το μέγιστο βάθος αποφόρτισης της μπαταρίας εντοπίζεται στο τέλος του τελευταίου δρομολογίου και ισούται περίπου με 75%, δηλαδή ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας 25%. Επισημαίνεται ότι το πλοίο μετά το τέλος του τελευταίου δρομολογίου θα βγει για να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες του.



Διάγραμμα 8 : Απεικόνιση ποσοστού φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των ταξιδιών για το σενάριο ενδιάμεσης φόρτισης για το πλοίο ALKYON II.

Οι τιμές των απαιτούμενων μεγεθών για τον υπολογισμό του τελικού κόστους μετασκευής και του λειτουργικού κόστους του πλοίου πριν και μετά την μετασκευή φαίνονται στην παρακάτω καρτέλα.

Retrofit MEGARA-SALAMINA ALKYONII

General

Name: MEGARA-SALAMINI

Ship: ALKYON II (Ro-Ro)

Battery: Valance 'U24-24XP'

Type of Calculation

With Intermediate Charging

Without Charging

No. Routes w/o Inter. Charging:

Trips Information

(Trip: 2-routes)

Days of operation:

Trips / day:

Port Time (h):

Seagoing Time (h):

Manoeuvring Time (h):

Technical Specifications

Charging Current (A):

Depth of Discharge (%):

Motor Efficiency (0-1):

Charger Power (kW):

Financial

Initial Discount (%):

Inverter (\$/kW):

Electric Motor (\$/kW):

Charger (\$/kW):

M/E Sale (\$/kW):

G/E Sale (\$/kW):

Battery Sale Price at replacement (%):

Discount Rate (0-1):

Grant

Grant Value (\$):

Operation & Maintenance

Electricity (\$/kW):

Fuel (\$/Ton):

Engine Maintenance (\$/kW):

Fixed Battery Maint. (%):

Variable Battery Maint. (\$/kWh):

Year of battery replacement (If none input zero):

Battery Replacement Cost (\$/kW, If none input zero):

Τελικά αποτελέσματα για την μετασκευή του πλοίου ALKYON II σε ηλεκτρικό συμπεριλαμβανομένου της ισχύος του εξοπλισμού που πρέπει να εγκατασταθεί στο πλοίο, του κόστους του εξοπλισμού και του ετήσιου οφέλους από την μετασκευή .

Results

Energy

Seagoing Energy/Trip: 47.45 kWh
 Port Energy/Trip: 13.33 kWh
 Manoeuvring Energy/Trip: 6.71 kWh
 Total Energy/Trip: 67.49 kWh
 Total Energy/Day: 607.41 kWh
 Energy Min: 195.64 kW
 Energy installed: 199.37 kW

Battery

Battery Arrays: 2
 No. of Modules Series: 22
 No. of Batteries Parallel: 6
 Total No. of Batteries: 132
 Charging Time: 16.00 min
 C Rate (During Charging): 0.51
 New DOD: 0.742
 Total Weight of Batteries: 2151.6 kg
 Total Volume of Batteries: 1.02 m³
 Daily Cycles: 3.047
 Life Expectancy: 7.29 years

Equipment

No. of Inverters: 2
 Inverter Power: 150 kW
 No. of Motors: 2
 Electric Motor Power: 140 kW
 No. of Chargers: 2
 Charger Power: 60 kW

Financial

Buying Cost: 234511.49 \$
 Battery: 91711.49 \$
 Inverter: 90000 \$
 Motor: 16800 \$
 Charger: 36000 \$
 Selling Cost: 32444.8 \$
 Grant: 0 \$
 Total Cost after Sell: 202066.69 \$

Pre-Retrofit Fuel Costs: 24633.7 \$/year
 Battery Fuel Costs: 10933.38 \$/year
 Fuel Costs Benefit: 13700.32 \$/year

Pre-Retrofit Maintenance Costs: 9973.4 \$/year
 Battery Maintenance Costs: 2033.6 \$/year
 Maintenance Costs Benefit: 7939.8 \$/year

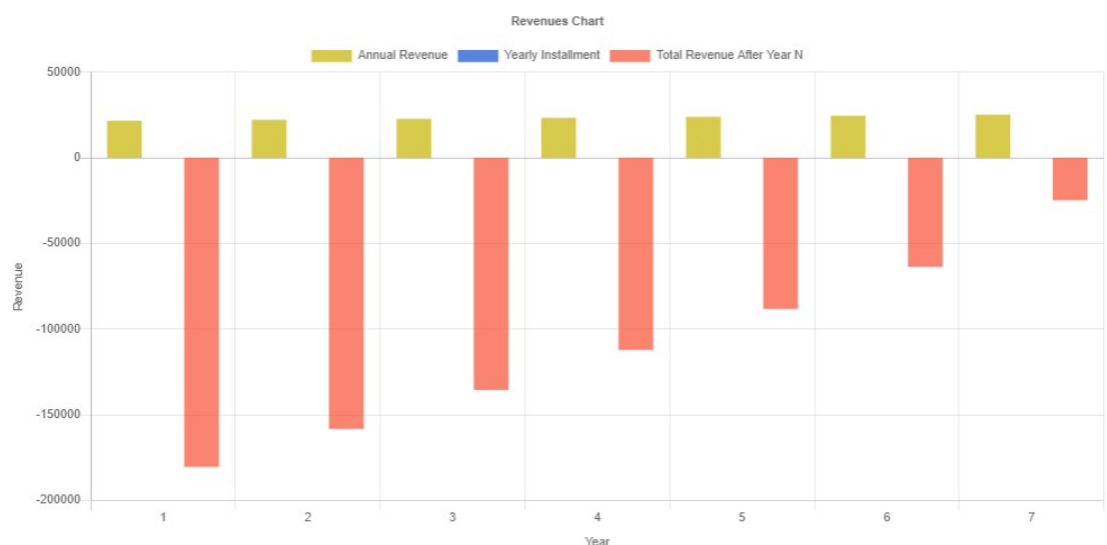
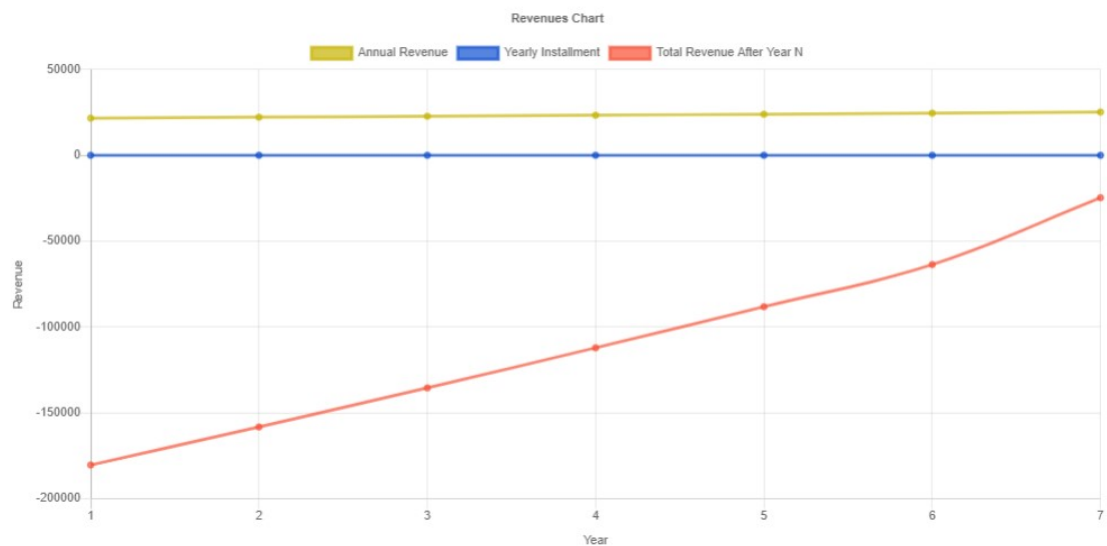
Total Benefits: 21640.12 \$/year

Μελέτη Βιωσιμότητας

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος επταετίας χωρίς χρηματοδότηση

Financial Calculation								
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7
Annual Benefit (\$)	-202066.69	21640.12	22185.9	22750.3	23333.7	23937	24560.5	25205.1
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								13756.723!
Cost by replacing the battery equipment								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-202066.69	-180426.57	-158240.67	-135490.37	-112156.67	-88219.67	-63659.17	-24697.346
NPV		-82308.2 \$			IRR	0 %		

Charts

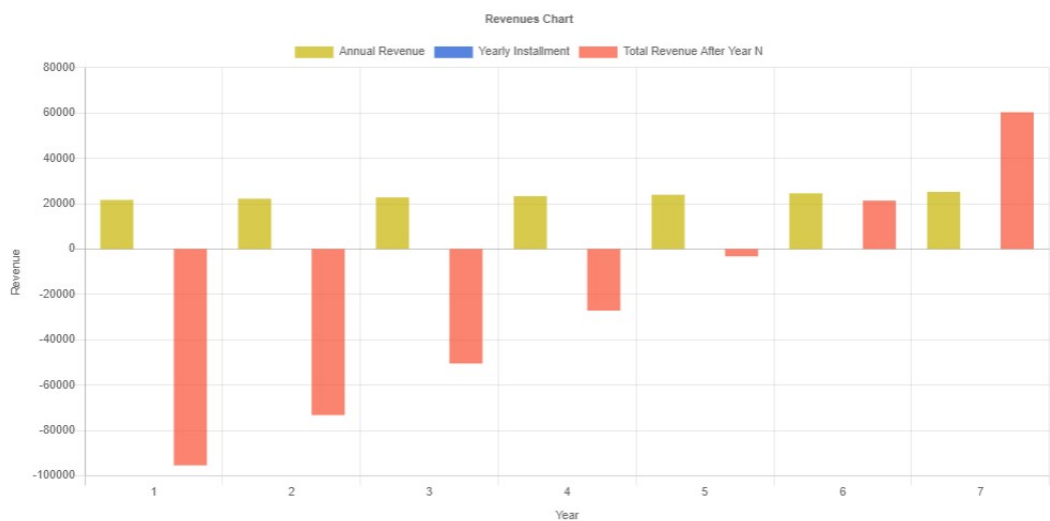
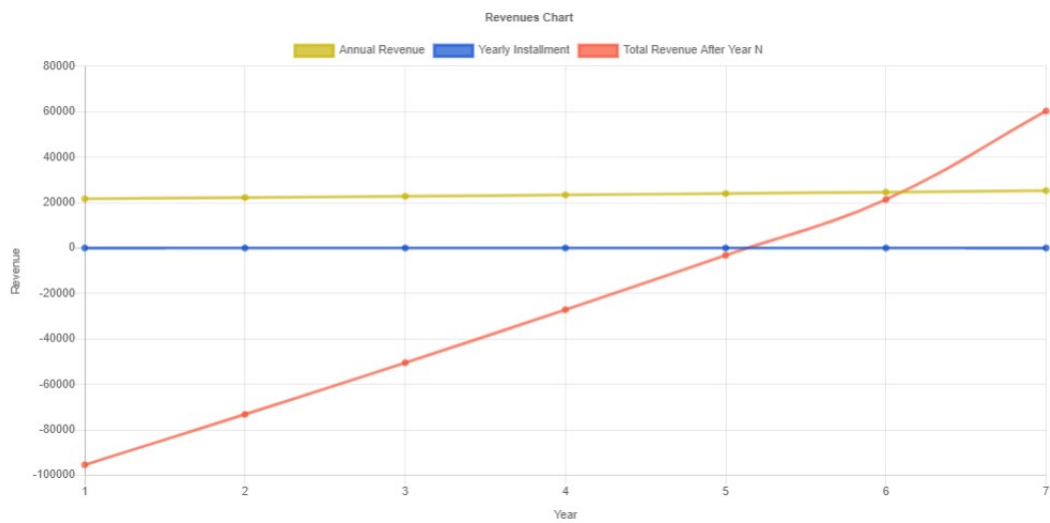


Προκύπτει NPV= -83000\$ και $r=0 \rightarrow$ Απαιτείται χρηματοδότηση

Μελέτη βιωσιμότητας με χρηματοδότηση 85000 σε βάθος επταετίας.

Financial Calculation								
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7
Annual Benefit (\$)	-117066.69	21640.12	22185.9	22750.3	23333.7	23937	24560.5	25205.1
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								13756.723E
Cost by replacing the battery equipment								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-117066.69	-95426.57	-73240.67	-50490.37	-27156.67	-3219.67	21340.83	60302.653E
NPV		2691.8 \$		IRR	10.6 %			

Charts



Προκύπτει $NPV = 2500\$$ και $r = 10.6\% \rightarrow$ Η επένδυση βιώσιμη

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος 14 χρόνων με χρηματοδότηση 50000 και αντικατάσταση των μπαταριών σε επτά χρόνια.

Financial Calculation																
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Annual Benefit (\$)	-152066.69	21640.12	22185.9	22750.3	23333.7	23937	24560.5	25205.1	25871.3	26559.8	27271.3	28006.5	28766.1	29551	30361.8	
Benefit selling the battery equipment (Recycling)									13756.7235						10765.98	
Cost by replacing the battery equipment									-71773.2							
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total Revenue After Year N (\$)	-152066.69	-130426.57	-108240.67	-85490.37	-62156.67	-38219.67	-13659.17	-46470.5465	-20599.25	5960.55	33231.85	61238.35	90004.45	119555.45	160683.23	
NPV		3080.1 \$							IRR	10.3 %						



Προκύπτει NPV= 3000\$ και r=10.3% → Η επένδυση βιώσιμη

6.2.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για την διαδρομή Πέραμα Μέγαρων – Φανερωμένη Σαλαμίνα

Συμπερασματικά, το βέλτιστο σενάριο φόρτισης για την διαδρομή Πέραμα Μέγαρων – Φανερωμένη Σαλαμίνας είναι αυτό της ενδιάμεσης φόρτισης. Το πρότυπο πλοίο που επιλέχθηκε για αυτή την διαδρομή είναι το ALKYON II και με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του πλοίου θα υλοποιηθεί η μελέτη. Η εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών στο πλοίο είναι περίπου 200kw με μία εφεδρεία ισχύος περίπου 25%. Το βάρος των μπαταριών ανέρχεται στους 2.2 t, τιμή απόλυτα ρεαλιστική και ταυτόχρονα αποδεκτή, αφού θα αφαιρεθούν από το πλοίο οι μηχανές και οι γεννήτριες. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα προκύπτει θεωρώντας ότι το πλοίο φορτίζει τις μπαταρίες με ρεύμα 30 A, σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό για όσο χρόνο παραμένει σε αυτόν. Στην προκειμένη περίπτωση το πλοίο παραμένει στο λιμάνι για περίπου 20 λεπτά και θεωρούμε ότι ο καθαρός χρόνος φόρτισης είναι 16 λεπτά μιας και απαιτούνται περίπου 4 λεπτά για να συνδεθούν και να αποσυνδεθούν οι φορτιστές του πλοίου με το δίκτυο του λιμανιού. Παράλληλα, θα χρειαστούν δύο inverter ισχύος 150 KW ο καθένας, δύο επαγωγικοί κινητήρες ισχύος 140KW ο καθένας, όπως και δύο φορτιστές ισχύος 60KW ο καθένας. Τέλος, το κόστος της μετασκευής ανέρχεται περίπου σε 200000\$. Αναφορικά με τα επιμέρους κόστη του βασικού εξοπλισμού που απαιτείται για την μετασκευή του πλοίου σε ηλεκτρικό ισχύουν τα εξής: 39.1% του κόστους της μετασκευής για την μπαταρία και το BMS, 38.38% του κόστους της μετασκευής για τους inverter, 7.16% του κόστους της μετασκευής για την αγορά των επαγωγικών κινητήρων, 15.35% του κόστους της μετασκευής για τους φορτιστές. Επιπρόσθετα, το ετήσιο όφελος του πλοιοκτήτη λόγω της μετασκευής από την μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου, ανέρχεται σε 21640\$ (13700\$ από τα καύσιμα και 7940\$ από την συντήρηση). Ωστόσο, η επένδυση δεν καθίσταται βιώσιμη από την μεριά του πλοιοκτήτη σε βάθος επταετίας, για αυτό και απαιτείται χρηματοδότηση ύψους 85000\$ που αντιστοιχεί στο 43% του αρχικού κόστους της μετασκευής. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόσβεση της επένδυσης γίνεται στο έκτο έτος. Η επταετία επιλέγεται, διότι με βάση τους κατασκευαστές θα χρειαστεί αντικατάσταση των μπαταριών μετά από αυτό το χρονικό διάστημα. Παράλληλα, γίνεται ανάλυση σε βάθος 14 χρόνων λαμβάνοντας υπόψιν και το επιπρόσθετο κόστος από την αντικατάσταση των μπαταριών στην επταετία. Αναφορικά με το κόστος κτήσης των μπαταριών μετά από επτά χρόνια, θεωρούμε ότι η τιμή θα είναι μειωμένη κατά 100\$/kwh ως προς την αρχική τιμή, με βάση και εκτιμήσεις ειδικών σχετικά με την πτώση της τιμής κτήσης της μπαταρίας σε βάθος χρόνου. Η οικονομική ανάλυση σε βάθος 14 χρόνων δείχνει ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη με χρηματοδότηση ύψους 50000\$ που αντιστοιχεί στο 25% του αρχικού κόστους της επένδυσης. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόσβεση της επένδυσης γίνεται στο ένατο έτος. Συνεπώς, η βιωσιμότητα της επένδυσης δεν επηρεάζεται από το επιπρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών.

6.3.1 Διαδρομή Πέραμα - Σαλαμίνα

Η συγκεκριμένη πορθμειακή γραμμή είναι απόστασης 1.6 nm. Σύμφωνα με την συχνότητα των δρομολογίων, το πλοίο πραγματοποιεί δύο δρομολόγια (aller retour) σε μία ώρα. Συνεπώς, από την στιγμή που το ταξίδι διαρκεί περίπου 10 λεπτά, το πλοίο παραμένει στο λιμάνι περίπου για 20 λεπτά. Το πλοίο ELENA A είναι ένα από τα πλοία που καλύπτουν αυτή την διαδρομή και θα αποτελέσει μοντέλο για την μελέτη μας.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ELENA A

Πίνακας 5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ELENA A

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ELENA A		
Τύπος πλοίου	Ro-Ro Passenger ship (Αμφίπλωρο)	
IMO Number	8647751	
Έτος Κατασκευής	2009	
Διαδρομή (Route from to)	Πέραμα- Παλούκια	
Απόσταση Διαδρομής	1.6	nm
time_cruising	10	min
time at port	20	min
time maneuvering	0	min
time acceleration	1.5	min
time deceleration	1.5	min
LOA	100.1	m
B	18.08	m
D	4.2	m
T_design	2.45	m
DWT	250	t
Vmax	13	Kn
Vservice	10.4	Kn
PMCR_M/E	750	Hp
PMCR_M/E	559.27	KW
Number of M/E	4	
Number of operating M/E	2	
Power_M/E_Vservice	335.56	KW
PMCR_Generator	110	KW
Number of G/E	3	
Number of operating G/E	1	
Power_G/E_sea_Load	65	KW
Power_G/E_port_Load	40	KW



Εικόνα 28: Πλοίο ELENA A , IMO : 8647751

6.3.2 Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας και Φορτίου Λειτουργίας Μηχανής

Σύμφωνα, με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος θα πρέπει να προσδιοριστεί το μέσο φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού και αντίστοιχα το φορτίο λειτουργίας της γεννήτριας στο ταξίδι και στο λιμάνι. Σύμφωνα με τα δεδομένα που υπάρχουν από όμοια πλοία, οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου στο λιμάνι ισούνται με 40 KW (φώτα και κλιματιστικά) και αντίστοιχα οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου κατά την διάρκεια του ταξιδιού ισούνται με 60KW. Αναφορικά με το φορτίο λειτουργίας των κύριων μηχανών, το οποίο αποτελεί και το πιο σημαντικό λειτουργικό φορτίο που θα καθορίσει την εγκατεστημένη ισχύ των μπαταριών, η απαίτηση ισχύος εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του πλοίου. Συνεπώς, αφού καθοριστεί η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου για αυτή την διαδρομή και για δεδομένο χρόνο ταξιδιού, θα προσδιοριστεί η αντίσταση του πλοίου και άρα το φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής, σύμφωνα με την μέθοδο που αναλύθηκε παραπάνω για την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας

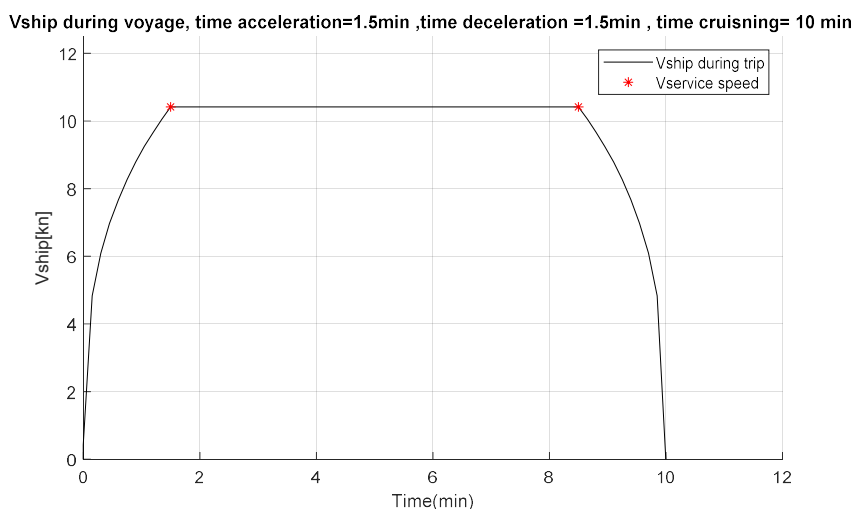
Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υπηρεσίας του πλοίου, θεωρούμε ότι στα δέκα λεπτά που είναι ο χρόνος ταξιδιού, το πλοίο επιταχύνει από την ακινησία μέχρι και την ταχύτητα υπηρεσίας σε 1.5 λεπτό. Αντίστοιχα, 1.5 λεπτό θεωρούμε ότι διαρκεί η επιβράδυνση μέχρι και τον μηδενισμό της ταχύτητας. Για να βρεθεί η σχέση της ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, θεωρούμε ότι η ισχύς της μηχανής αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο μέχρι το πλοίο να φτάσει την ταχύτητα υπηρεσίας (σταθερό ονομαστικό φορτίο της μηχανής $\rightarrow NCR$). Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε η αντίσταση του πλοίου συναρτηθεί της ταχύτητας δίνεται από την σχέση $R = CR \cdot V_s^2$ όπου R η αντίσταση του πλοίου.

Παράλληλα, $P(KW) = \alpha \cdot t$ (γραμμική σχέση κατά την επιτάχυνση) και $P(KW) = R \cdot V_s$

$$\text{Συνεπώς, } P(KW) = b \cdot V_s^3 \Rightarrow \alpha \cdot t = b \cdot V_s^3 \Rightarrow V_s = C' \cdot \sqrt[3]{t}$$

Αντίστοιχη σχέση προκύπτει κατά την φάση της επιβράδυνσης του πλοίου.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που απεικονίζουν την ταχύτητα του πλοίου συναρτηθεί του χρόνου. Η ταχύτητα υπηρεσίας υπολογίστηκε μέσω της συνθήκης ότι το εμβαδό κάτω από την καμπύλη δίνει την συνολική απόσταση που πρέπει να διανύσει το πλοίο στο συγκεκριμένο χρόνο ταξιδιού (1.6 nm). Σύμφωνα, με τους υπολογισμούς η ταχύτητα υπηρεσίας είναι 10.4 kn.



Διάγραμμα 9: Ταχύτητα Πλοίου συναρτήσεως του χρόνου ταξιδιού του πλοίου ELENA A

Προσδιορισμός Μέγιστου φορτίου λειτουργίας Μηχανής

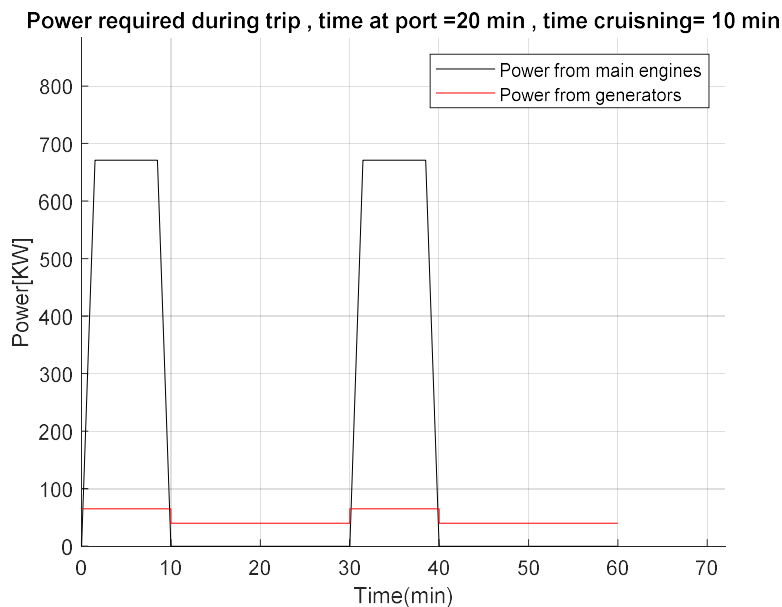
Όπως αναμενόταν η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου είναι αισθητά μικρότερη από την μέγιστη ταχύτητα του πλοίου. Κατά συνέπεια, η αντίσταση του πλοίου αναμένεται να είναι αισθητά μικρότερη (τετραγωνική σχέση ως προς την ταχύτητα) όπως και το φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής σε σχέση με το MCR. Παράλληλα, πρέπει να επισημανθεί ότι το υπό μελέτη πλοίο ανήκει στην κατηγορία των πλοίων εκτοπίσματος όπου ισχύει $R = CR \cdot V_s^2$ σύμφωνα με το διάγραμμα 2 καθώς ο αριθμός Froude < 0.4 και $V_{service}(kn) \cdot \sqrt{L(ft)} = 1.04$

Αναφορικά με τον βαθμό πρόωσης του συστήματος προκειμένου να γίνει συσχέτιση της αντίστασης ρυμούλκησης με την ισχύ της μηχανής, θεωρείται ότι λαμβάνει την τιμή $PC_{Vs_{max}} = 0.55$ στην μέγιστη ταχύτητα και την τιμή $PC_{V_{service}} = 0.6$ στην ταχύτητα υπηρεσίας. Αυτή η επιλογή προκύπτει από το γεγονός ότι έλικα του πλοίου έχει επιλεγεί να λειτουργεί βέλτιστα σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου και η ταχύτητα 10.4 kn είναι κοντά στην βέλτιστη ως προς την σχεδίαση ταχύτητα του πλοίου. Η ισχύς στο MCR ισούται με 750 HP και η μέγιστη ταχύτητα είναι 13 kn. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι η κάθε μηχανή λειτουργεί στο 57% του MCR λαμβάνοντας υπόψιν και την προσαύξηση της αντίστασης κατά 20% λόγω ρυπασμένης γάστρας. Για τους υπολογισμούς επομένως παρακάτω θα θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι οι μηχανές του πλοίου λειτουργούν στο 60% του MCR στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

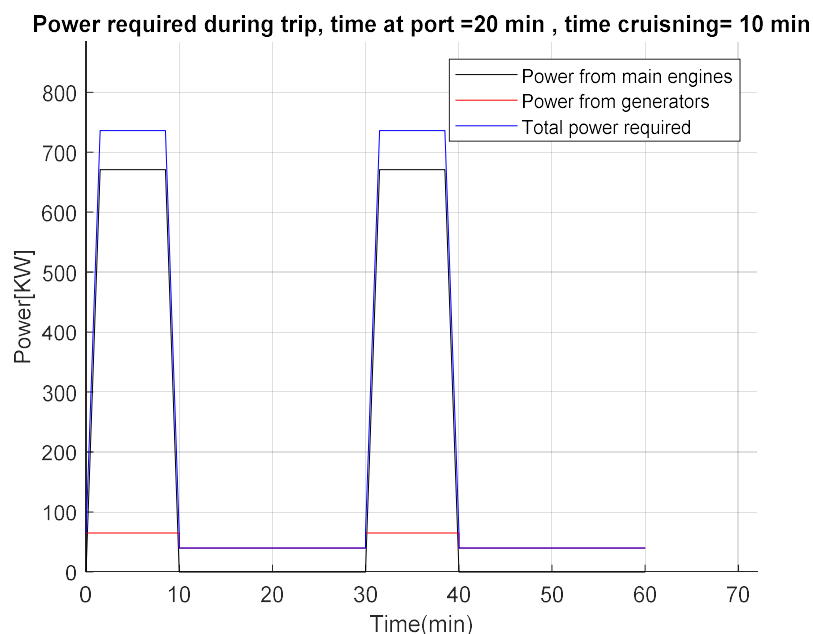
Όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε ότι κατά την επιτάχυνση του πλοίου έχουμε γραμμική αύξηση της ισχύος ως προς τον χρόνο και αντίστοιχα κατά την επιβράδυνση. Αναφορικά με την πηδαλιουχία του πλοίου, οι ελιγμοί του πλοίου πραγματοποιούνται με την λειτουργία της κύριας μηχανής και μόνο, λόγω της ύπαρξης των Azipod thrusters. Παράλληλα, επειδή το πλοίο είναι αμφίπλωρο, δεν

απαιτείται μανούβρα του πλοίου εντός του λιμανιού, όποτε δεν υπάρχει φορτίο manuevering.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που απεικονίζουν τα φορτία λειτουργίας των μηχανών και των γεννητριών συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 10: Λειτουργία Κύριων Μηχανών και Γεννητριών του πλοίου ELENA A



Διάγραμμα 11: Λειτουργία Κύριων Μηχανών και Γεννητριών και Συνολική Ζήτηση Ισχύος του πλοίου ELENA A

Το μέσο φορτίο λειτουργίας της μηχανής στο ταξίδι ισούται με 51% MCR.

Παρακάτω παρατίθεται στιγμιότυπο από την εφαρμογή Marine electrical με τα Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου (ELENA A)

Ship ELENA A

General

Name: ELENA A

IMO: 8647751

Class : Other

Flag : Greece

Type : Ro-Ro

Principal Dimensions

Length (m): 100.1

Breadth (m): 18.08

Depth (m): 4.2

Draft (m): 2.45

DWT (t): 250

Main Engines

No of M/Es : 4

No of Operating M/Es : 2

M/E MCR (kW): 560

M/E NCR (kW): 285.23

M/E Manoeuvring Load (kW): 0

M/E NCR Consumption (gr/kWh): 205

M/E Manoeuvring Cons. (gr/kWh): 0

M/E Efficiency Factor (0-1, Just for Reference): 0.45

Generator Engines

No of G/Es : 3

No of Operating G/Es : 1

G/E MCR (kW): 110

G/E NCR (kW): 65

G/E Manoeuvring Load (kW): 0

G/E Port Load (kW, For All Oper. G/Es): 40

G/E NCR Consumption (gr/kWh): 203

G/E Manoeuvring Cons. (gr/kWh): 0

G/E Port Consumption (gr/kWh): 207

G/E Efficiency Factor (0-1): 0.45

DC Voltage (V): 550

6.3.3 Επιλογή κατάλληλου σεναρίου φόρτισης

Στην συγκεκριμένη ενότητα στόχος είναι η εύρεση του βέλτιστου σεναρίου φόρτισης του πλοίου. Το τελικό συμπέρασμα θα προκύψει λαμβάνοντας υπόψη την τελική εγκατεστημένη ισχύ πάνω στο πλοίο, το μέγιστο βάθος αποφόρτισης, το ρεύμα φόρτισης (μεγάλες τιμές του οποίου υποβαθμίζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας) και τέλος τους ημερήσιους κύκλους λειτουργίας.

Σενάριο Φόρτιση σε κάθε λιμάνι

1^η περίπτωση Charging current=35 A

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 20	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 440	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 16.00 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 626.56 kW	C Rate (During Charging): 0.59	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 664.58 kW	New DOD: 0.619	
	Total Weight of Batteries: 7172 kg	
	Total Volume of Batteries: 3.39 m ³	
	Daily Cycles: 2.991	
	Life Expectancy: 7.43 years	

2^η περίπτωση Charging current=40 A

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 18	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 396	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 16.00 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 566.09 kW	C Rate (During Charging): 0.68	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 598.12 kW	New DOD: 0.612	
	Total Weight of Batteries: 6454.8 kg	
	Total Volume of Batteries: 3.05 m ³	
	Daily Cycles: 3.324	
	Life Expectancy: 6.69 years	

3^η περίπτωση Charging current=45 A

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 16	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 352	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 16.00 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 516.25 kW	C Rate (During Charging): 0.76	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 531.66 kW	New DOD: 0.688	
	Total Weight of Batteries: 5737.6 kg	
	Total Volume of Batteries: 2.71 m ³	
	Daily Cycles: 3.739	
	Life Expectancy: 5.94 years	

4^η περίπτωση Charging current=55 A

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 14	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 308	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 16.00 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 438.97 kW	C Rate (During Charging): 0.93	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 465.2 kW	New DOD: 0.545	
	Total Weight of Batteries: 5020.4 kg	
	Total Volume of Batteries: 2.37 m ³	
	Daily Cycles: 4.273	
	Life Expectancy: 5.20 years	

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά δεδομένα της μεθόδου ενδιάμεσης φόρτισης για την διαδρομή Πέραμα-Παλούκια

Μέθοδος Ενδιάμεση Φόρτιση σε κάθε λιμάνι Total_Battery_cycles=8000					
Current_charging(A)	MAX_DOD_real	E_installed(kwh)	Daily_cycles	Life_exp(years)	MAX_Recommended Current (A)
35	0.62	664.58	2.991	7.5	59
40	0.61	598.12	3.324	6.7	59
45	0.69	531.66	3.739	5.9	59
55	0.55	465.2	4.27	5.2	59

Συμπερασματικά, το βέλτιστο ρεύμα φόρτισης για την περίπτωση της ενδιάμεσης φόρτισης ισούται με 40 A . Με βάση αυτή την τιμή ρεύματος η εγκατεστημένη ισχύς πάνω στο πλοίο ισούται με 600kw με μία εφεδρεία ισχύος περίπου 40%. Αυτή η τιμή ρεύματος θεωρείται βέλτιστη, καθώς αφενός με βάση αυτή την τιμή, η εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών είναι συγκριτικά μικρή και αφετέρου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι στα 7 χρόνια. Πρέπει να επισημανθεί ότι δεν λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή εγκατεστημένης ισχύος, διότι για μικρότερες τιμές ισχύος η διάρκεια ζωής της μπαταρίας πέφτει στα πέντε χρόνια κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός φόρτισης είναι περίπου 0.7C, τιμή που επιβεβαιώνει την καλή χρήση της μπαταρίας. Τέλος, επισημαίνεται ότι δεν υπάρχει νόημα να εξεταστούν μεγαλύτερα ρεύματα φόρτισης, καθώς με την αύξηση του ρεύματος φόρτισης θα μειωθεί η εγκαταστημένη ισχύς στο πλοίο και άρα θα μειωθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας για την ίδια ημερήσια ενεργειακή ζήτηση του πλοίου.

Σενάριο: Φόρτιση μετά από καθορισμένο αριθμό δρομολογίων

1^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 3 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 16	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 352	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 42.06 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 465.92 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 531.66 kW	New DOD: 0.701	
	Total Weight of Batteries: 5737.6 kg	
	Total Volume of Batteries: 2.71 m ³	
	Daily Cycles: 3.739	
	Life Expectancy: 5.94 years	

2^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 4 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 20	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 440	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 44.88 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 621.23 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 664.58 kW	New DOD: 0.748	
	Total Weight of Batteries: 7172 kg	
	Total Volume of Batteries: 3.39 m ³	
	Daily Cycles: 2.991	
	Life Expectancy: 7.43 years	

3^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 5 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 26.67 kWh	No. of Modules Series: 22	Inverter Power: 400 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 24	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 248.49 kWh	Total No. of Batteries: 528	Electric Motor Power: 360 kW
Total Energy/Day: 1987.92 kWh	Charging Time: 46.74 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 776.53 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 797.49 kW	New DOD: 0.779	
	Total Weight of Batteries: 8606.4 kg	
	Total Volume of Batteries: 4.07 m ³	
	Daily Cycles: 2.493	
	Life Expectancy: 8.91 years	

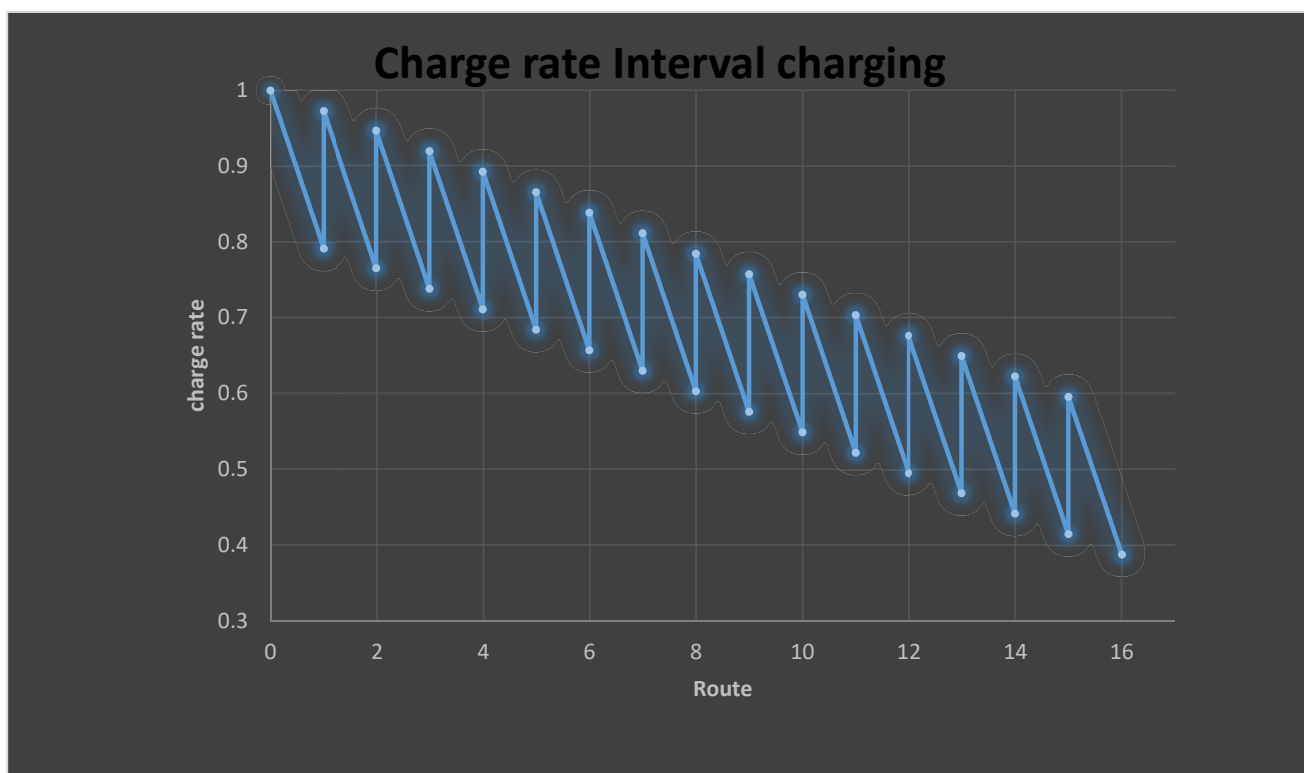
Πίνακας 7: Συγκεντρωτικά δεδομένα της μεθόδου φόρτισης μετά από Nx δρομολόγια για την διαδρομή Πέραμα-Παλούκια

Μέθοδος φόρτιση μετά από N δρομολόγια Total Cycles=8000					
N δρομολόγια	DOD_real	E_installed(kwh)	Daily_cycles	Life_exp(years)	Απαιτούμενος Χρόνος Φόρτισης(min)
3	0.7	531.66	3.74	5.9	42
4	0.75	664.58	2.991	7.43	45
5	0.78	797.5	2.493	8.91	47

Συμπερασματικά, ο βέλτιστος αριθμός δρομολογίων χωρίς ενδιάμεση φόρτιση, αναφορικά με την ελάχιστη απαίτηση για εγκατεστημένη ισχύ, ισούται με N=3 δρομολόγια. Ωστόσο, επιλέγεται το N=4 δρομολόγια, για λόγους πρακτικούς, έτσι ώστε να μην σταματάει το πλοίο τόσο συχνά για να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες του. Πιο αναλυτικά, για N=4 η εγκατεστημένη ισχύς στο πλοίο ισούται με 665kw με μία εφεδρεία ισχύος 25%. Αναφορικά με τον χρόνο φόρτισης, η μπαταρία φορτίζει πλήρως σε 45 λεπτά για ρεύμα ρυθμού φόρτισης 1C rate.

Συγκεντρωτικά καταλήγουμε στο σενάριο ενδιάμεσης φόρτισης με ρεύμα φόρτισης 40A ως βέλτιστη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η επιλογή στηρίζεται στο γεγονός ότι αφού το πλοίο παραμένει για αρκετή ώρα στο λιμάνι είναι προτιμότερο να φορτίζει σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό, καθώς δεν απαιτείται να σταματήσει τα δρομολόγια προκειμένου να φορτιστούν οι μπαταρίες. Το συγκεκριμένο γεγονός πρόκειται να αποτελέσει επιπρόσθετο πλεονέκτημα της μετασκευής, καθώς πριν την μετασκευή το πλοίο έπρεπε να σταματάει ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα δρομολόγια προκειμένου να κάνει ανεφοδιασμό.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των δρομολογίων του πλοίου και φαίνονται ξεκάθαρα τα ποσοστά φόρτισης της μπαταρίας πριν και μετά την φόρτιση σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό. Στο τέλος της ημέρας το πλοίο έχει πραγματοποιήσει 8 ταξίδια, δηλαδή 16 δρομολόγια και παρατηρούμε ότι το μέγιστο βάθος αποφόρτισης της μπαταρίας εντοπίζεται στο τέλος του τελευταίου δρομολογίου και ισούται περίπου με 60%, δηλαδή 40 ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας. Επισημαίνεται ότι το πλοίο μετά το τέλος του τελευταίου δρομολογίου θα βγει για να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες του.



Διάγραμμα 12: Απεικόνιση ποσοστού φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των ταξιδιών για το σενάριο ενδιάμεσης φόρτισης για το πλοίο ELENA A.

Οι τιμές των απαιτούμενων μεγεθών για τον υπολογισμό του τελικού κόστους μετασκευής και του λειτουργικού κόστους του πλοίου πριν και μετά την μετασκευή φαίνονται στην παρακάτω καρτέλα.

Retrofit PERAMA PALOYKIA ELENA A

General

Name: PERAMA PALOYKI

Ship: ELENA A (Ro-Ro)

Battery: Valance 'U24-24XP'

Type of Calculation

With Intermediate Charging

Without Charging

No. Routes w/o Inter. Charging:

Trips Information

(Trip: 2-routes)

Days of operation:

Trips / day:

Port Time (h):

Seagoing Time (h):

Manoeuvring Time (h):

Technical Specifications

Charging Current (A):

Depth of Discharge (%):

Motor Efficiency (0-1):

Charger Power (kW):

Financial

Initial Discount (%):

Inverter (\$/kW):

Electric Motor (\$/kW):

Charger (\$/kW):

M/E Sale (\$/kW):

G/E Sale (\$/kW):

Battery Sale Price at replacement (%):

Discount Rate (0-1):

Grant

Grant Value (\$):

Operation & Maintenance

Electricity (\$/kW):

Fuel (\$/Ton):

Engine Maintenance (\$/kW):

Fixed Battery Maint. (%):

Variable Battery Maint. (\$/kWh):

Year of battery replacement (if none input zero):

Battery Replacement Cost (\$/kW, if none input zero):

Τελικά αποτελέσματα για την μετασκευή του πλοίου ELENA A σε ηλεκτρικό συμπεριλαμβανομένου της ισχύος του εξοπλισμού που πρέπει να εγκατασταθεί στο πλοίο, του κόστους του εξοπλισμού και του ετήσιου οφέλους από την μετασκευή .

Results

Energy

Seagoing Energy/Trip: 221.82 kWh
 Port Energy/Trip: 26.67 kWh
 Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh
 Total Energy/Trip: 248.49 kWh
 Total Energy/Day: 1987.92 kWh
 Energy Min: 566.09 kW
 Energy installed: 598.12 kW

Battery

Battery Arrays: 2
 No. of Modules Series: 22
 No. of Batteries Parallel: 18
 Total No. of Batteries: 396
 Charging Time: 16.00 min
 C Rate (During Charging): 0.68
 New DOD: 0.612
 Total Weight of Batteries: 6454.8 kg
 Total Volume of Batteries: 3.05 m³
 Daily Cycles: 3.324
 Life Expectancy: 6.69 years

Equipment

No. of Inverters: 4
 Inverter Power: 400 kW
 No. of Motors: 4
 Electric Motor Power: 360 kW
 No. of Chargers: 2
 Charger Power: 0 kW

Financial

Buying Cost: 841534.46 \$

Battery: 275134.46 \$
 Inverter: 480000 \$
 Motor: 86400 \$
 Charger: 0 \$

Selling Cost: 101150 \$

Grant: 0 \$

Total Cost after Sell: 740384.46 \$

Pre-Retrofit Fuel Costs: 77457.6 \$/year

Battery Fuel Costs: 35782.56 \$/year

Fuel Costs Benefit: **41675.04 \$/year**

Pre-Retrofit Maintenance Costs: 25700 \$/year

Battery Maintenance Costs: 6100.81 \$/year

Maintenance Costs Benefit: **19599.19 \$/year**

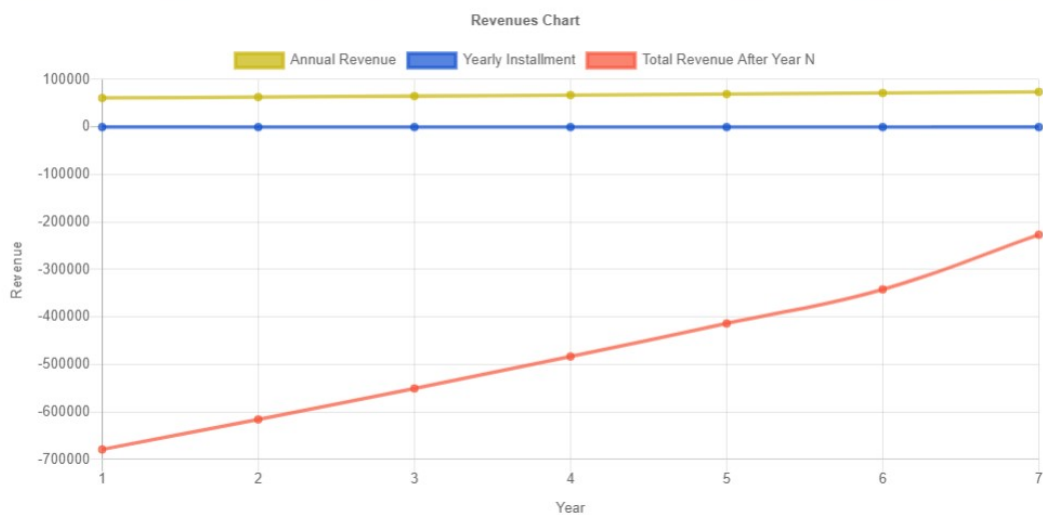
Total Benefits: 61274.23 \$/year

Μελέτη Βιωσιμότητας

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος επταετίας χωρίς χρηματοδότηση

Financial Calculation								
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7
Annual Benefit (\$)	-740384.46	61274.23	63235.1	65261.9	67356.7	69521.7	71759	74070.9
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								41270.169
Cost by replacing the battery equipment								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-740384.46	-679110.23	-615875.13	-550613.23	-483256.53	-413734.83	-341975.83	-226634.761
NPV		-394520.6 \$			IRR	0 %		

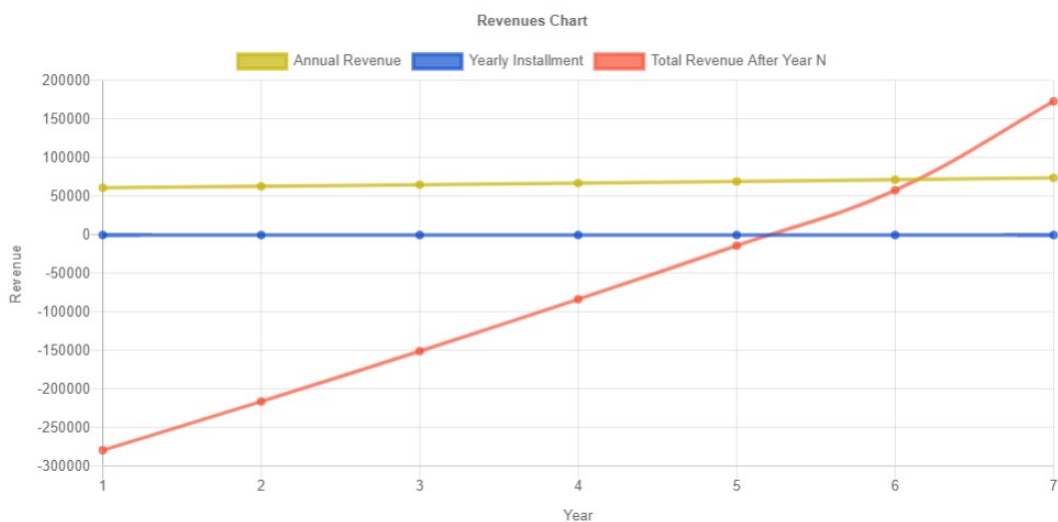
Charts



Προκύπτει NPV= -394000\$ και $r=0 \rightarrow$ Απαιτείται χρηματοδότηση

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος επταετίας με χρηματοδότηση 400000\$

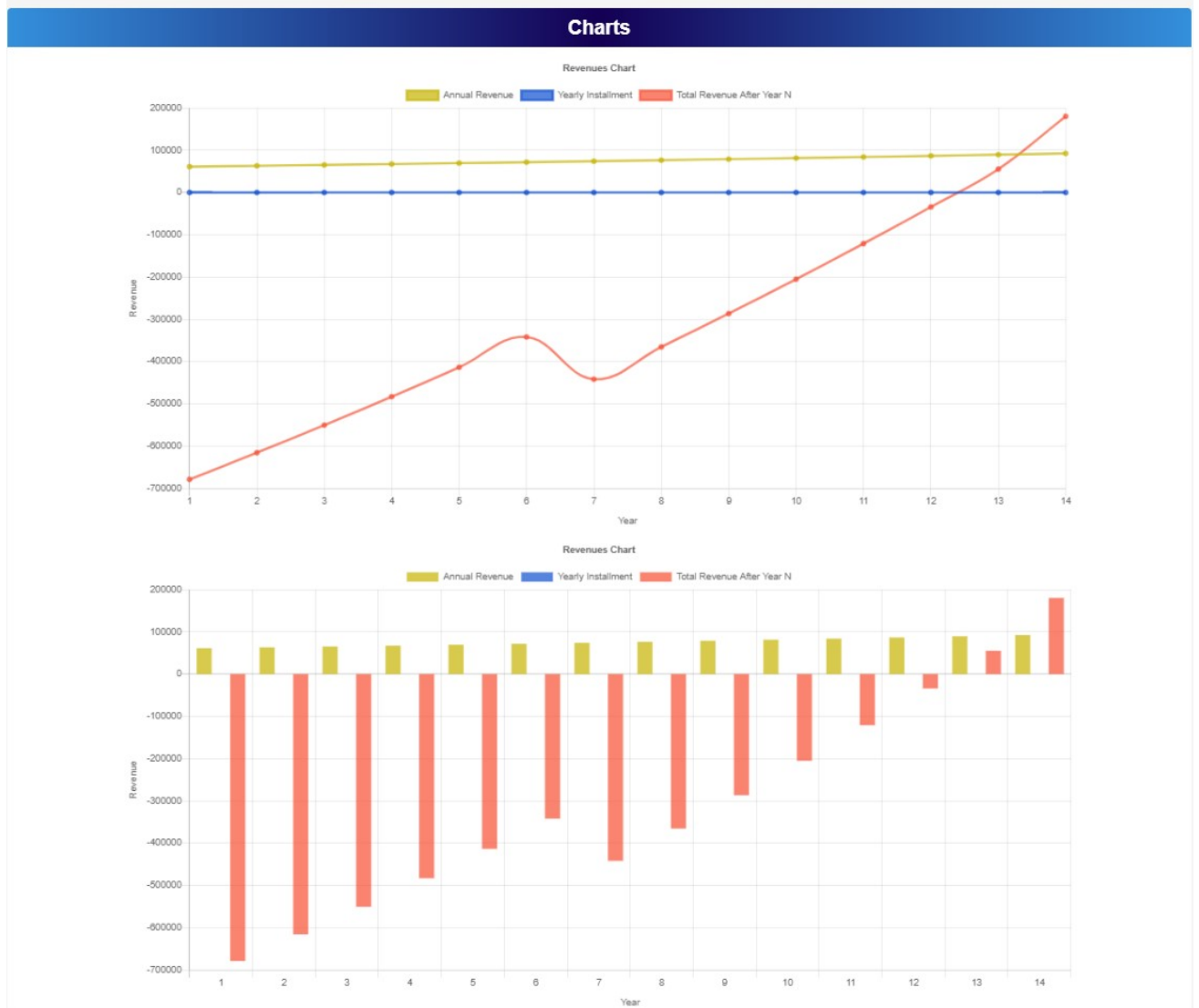
Financial Calculation								
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7
Annual Benefit (\$)	-340384.46	61274.23	63235.1	65261.9	67356.7	69521.7	71759	74070.9
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								41270.169
Cost by replacing the battery equipment								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-340384.46	-279110.23	-215875.13	-150613.23	-83256.53	-13734.83	58024.17	173365.239
NPV		5479.4 \$		IRR		10.4 %		



Προκύπτει NPV= 5500\$ και $r=10.4\%$ → Η επένδυση βιώσιμη

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος 14 χρόνων χωρίς χρηματοδότηση και αντικατάσταση των μπαταριών σε επτά χρόνια.

Financial Calculation																
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Annual Benefit (\$)	-740384.46	61274.23	63235.1	65261.9	67356.7	69521.7	71759	74070.9	76459.7	78927.7	81477.4	84111.4	86832.2	89642.6	92545.2	
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								41270.169							32298.48	
Cost by replacing the battery equipment								-215323.2								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total Revenue After Year N (\$)	-740384.46	-679110.23	-615875.13	-550613.23	-483256.53	-413734.83	-341975.83	-441957.961	-365498.26	-286570.56	-205093.16	-120981.76	-34149.56	55493.04	180336.72	
NPV																-288470.9 \$
IRR																2.7 %

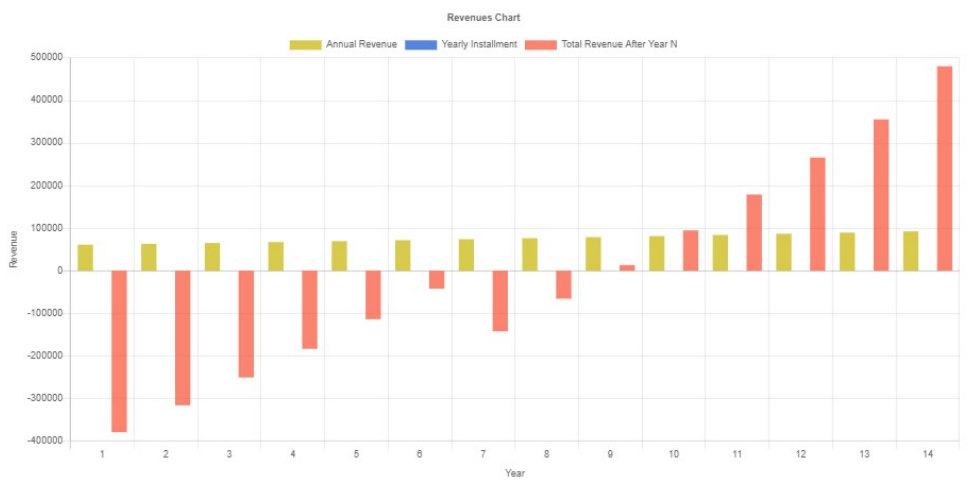
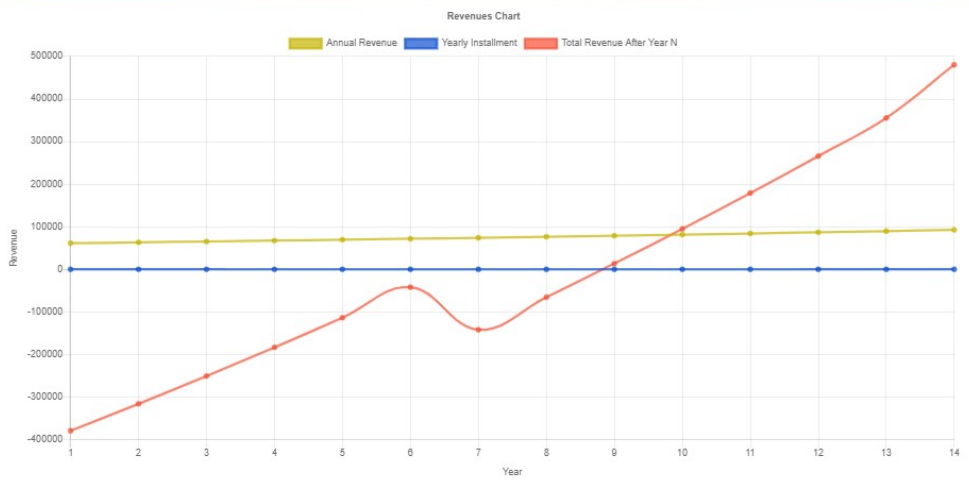


Προκύπτει NPV= -288000\$ και $r=0 \rightarrow$ Απαιτείται χρηματοδότηση

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος 14 χρόνων με χρηματοδότηση 300000 και αντικατάσταση των μπαταριών σε επτά χρόνια.

Financial Calculation															
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Annual Benefit (\$)	-440384.46	61274.23	63235.1	65261.9	67356.7	69521.7	71759	74070.9	76459.7	78927.7	81477.4	84111.4	86832.2	89642.6	92545.2
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								41270.169							32298.48
Cost by replacing the battery equipment								-215323.2							
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-440384.46	-379110.23	-315875.13	-250613.23	-183256.53	-113734.83	-41975.83	-141957.961	-65498.26	13429.44	94906.84	179018.24	265850.44	355493.04	480336.72
NPV															11529.1 \$
IRR															10.4 %

Charts



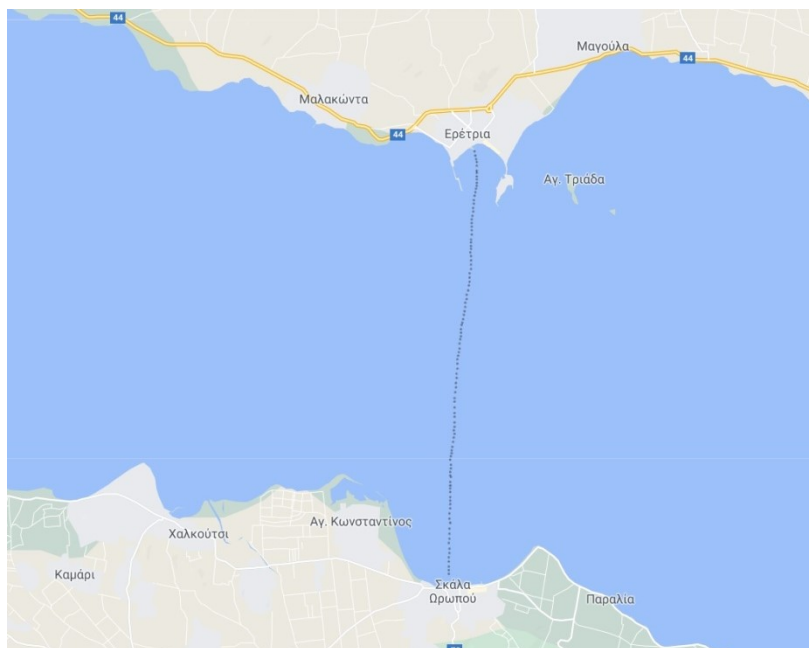
Προκύπτει NPV= 11500\$ και $r=10.4\%$ → Η επένδυση βιώσιμη

6.3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την διαδρομή Πέραμα-Σαλαμίνα

Συμπερασματικά, το βέλτιστο σενάριο φόρτισης για την διαδρομή Πέραμα-Παλούκια είναι αυτό της ενδιάμεσης φόρτισης. Το πρότυπο πλοίο που επιλέχθηκε για αυτή την διαδρομή είναι το ELENA A και με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του πλοίου θα υλοποιηθεί η μελέτη. Η εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών στο πλοίο είναι περίπου 600kw με μία εφεδρεία ισχύος 40%. Το βάρος των μπαταριών ανέρχεται στους 6.5 t, τιμή απόλυτα ρεαλιστική και ταυτόχρονα αποδεκτή, αφού θα αφαιρεθούν από το πλοίο οι μηχανές και οι γεννήτριες. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα προκύπτει θεωρώντας ότι το πλοίο φορτίζει τις μπαταρίες με ρεύμα 40 A, σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό για όσο χρόνο παραμένει σε αυτόν. Στην προκειμένη περίπτωση το πλοίο παραμένει στο λιμάνι για περίπου 20 λεπτά και θεωρούμε ότι ο καθαρός χρόνος φόρτισης είναι 16 λεπτά μιας και απαιτούνται περίπου 4 λεπτά για να συνδεθούν και να αποσυνδεθούν οι φορτιστές του πλοίου με το δίκτυο του λιμανιού. Παράλληλα, θα χρειαστούν τέσσερις inverter ισχύος 400 KW ο καθένας, όπως και τέσσερις επαγωγικοί κινητήρες ισχύος 360KW ο καθένας. Τέλος, το κόστος της μετασκευής ανέρχεται περίπου σε 740000\$. Αναφορικά με τα επιμέρους κόστη του βασικού εξοπλισμού που απαιτείται για την μετασκευή του πλοίου σε ηλεκτρικό ισχύουν τα εξής: 32.7% του κόστους της μετασκευής για την μπαταρία και το BMS, 57% του κόστους της μετασκευής για τους inverter, 10.26% του κόστους της μετασκευής για την αγορά των επαγωγικών κινητήρων. Επιπρόσθετα, το ετήσιο όφελος του πλοιοκτήτη λόγω της μετασκευής από την μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου, ανέρχεται σε 61274\$ (41675\$ από τα καύσιμα και 19600\$ από την συντήρηση). Ωστόσο, η επένδυση δεν καθίσταται βιώσιμη από την μεριά του πλοιοκτήτη σε βάθος επταετίας, για αυτό και απαιτείται χρηματοδότηση ύψους 400000\$ που αντιστοιχεί στο 54% του αρχικού κόστους της μετασκευής. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόσβεση της επένδυσης γίνεται στο έκτο έτος. Η επταετία επιλέγεται, διότι με βάση τους κατασκευαστές θα χρειαστεί αντικατάσταση των μπαταριών μετά από αυτό το χρονικό διάστημα. Παράλληλα, γίνεται ανάλυση σε βάθος 14 χρόνων λαμβάνοντας υπόψιν και το επιπρόσθετο κόστος από την αντικατάσταση των μπαταριών στην επταετία. Αναφορικά με το κόστος κτήσης των μπαταριών μετά από επτά χρόνια, θεωρούμε ότι η τιμή θα είναι μειωμένη κατά 100\$/kwh ως προς την αρχική τιμή, με βάση και εκτιμήσεις ειδικών σχετικά με την πτώση της τιμής κτήσης της μπαταρίας σε βάθος χρόνου. Η οικονομική ανάλυση σε βάθος 14 χρόνων δείχνει ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη με χρηματοδότηση ύψους 300000\$ που αντιστοιχεί στο 40% του αρχικού κόστους της επένδυσης. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόσβεση της επένδυσης γίνεται στο ένατο έτος. Συνεπώς, η βιωσιμότητα της επένδυσης δεν επηρεάζεται από το επιπρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών.

Κεφάλαιο 7^ο : Μελέτη διαδρομής Ωρωπός – Ερέτρια

Η συγκεκριμένη πορθμειακή γραμμή είναι απόστασης 4.2 nm με αποτέλεσμα να παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον μιας και αυτή η απόσταση είναι σχετικά μεγάλη. Σύμφωνα με την συχνότητα των δρομολογίων, το πλοίο πραγματοποιεί δύο δρομολόγια (aller retour) σε μία ώρα. Συνεπώς, από την στιγμή που το ταξίδι διαρκεί περίπου 20-25 λεπτά, το πλοίο παραμένει στο λιμάνι περίπου για 5-10 λεπτά. Το πλοίο ARIS III είναι ένα από τα πλοία που καλύπτουν αυτή την διαδρομή και θα αποτελέσει μοντέλο για την μελέτη μας. Επιλέγεται ο χρόνος ταξιδιού να ισούται με 25 λεπτά, προκειμένου το πλοίο να έχει μικρότερη ταχύτητα υπηρεσίας και άρα μικρότερη απαίτηση ισχύος.



Εικόνα 29: Πορθμειακή γραμμή Ωρωπός-Ερέτρια

7.1 Βασικά χαρακτηριστικά για την διαδρομή Ωρωπού- Ερέτριας

Πίνακας 8: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ARIS III

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ARIS III		
Τύπος πλοίου	Ro-Ro Passenger ship (παντόφλα)	
IMO Number	9608453	
Έτος Κατασκευής	2010	
Διαδρομή (Route from to)	Ωρωπός- Ερέτρια	
Απόσταση Διαδρομής	4.2	nm
time_cruising	25	min
time at port	5	min
time maneuvering	0	min
time acceleration	2	min
time deceleration	2	min
LOA	83	m
B	15.7	m
D	4.4	m
T_design	2.4	m
DWT	500	t
Vmax	13.5	Kn
Vservice	10.5	Kn
PMCR_M/E	720	Hp
PMCR_M/E	536.90	KW
Number of M/E	4	
Number of operating M/E	2	
Power_M/E_Vservice	322.14	KW
PMCR_Generator	110	KW
Number of G/E	3	
Number of operating G/E	1	
Power_G/E_sea_Load	45	KW
Power_G/E_port_Load	20	KW



Εικόνα 30: Πλοίο ARIS III , IMO 9608453

7.2 Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας και Φορτίου Λειτουργίας Μηχανής

Σύμφωνα, με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος θα πρέπει να προσδιοριστεί το μέσο φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής κατά την διάρκεια του ταξιδιού και αντίστοιχα το φορτίο λειτουργίας της γεννήτριας στο ταξίδι και στο λιμάνι. Σύμφωνα με τα δεδομένα που υπάρχουν από όμοια πλοία, οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου στο λιμάνι ισούνται με 40 KW (φώτα και κλιματιστικά) και αντίστοιχα οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου κατά την διάρκεια του ταξιδιού ισούνται με 60KW. Αναφορικά με το φορτίο λειτουργίας των κύριων μηχανών, το οποίο αποτελεί και το πιο σημαντικό λειτουργικό φορτίο που θα καθορίσει την εγκατεστημένη ισχύ των μπαταριών, η απαίτηση ισχύος εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του πλοίου. Συνεπώς, αφού καθοριστεί η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου για αυτή την διαδρομή και για δεδομένο χρόνο ταξιδιού, θα προσδιοριστεί η αντίσταση του πλοίου και άρα το φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής, σύμφωνα με την μέθοδο που αναλύθηκε παραπάνω για την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

Προσδιορισμός Ταχύτητας Υπηρεσίας

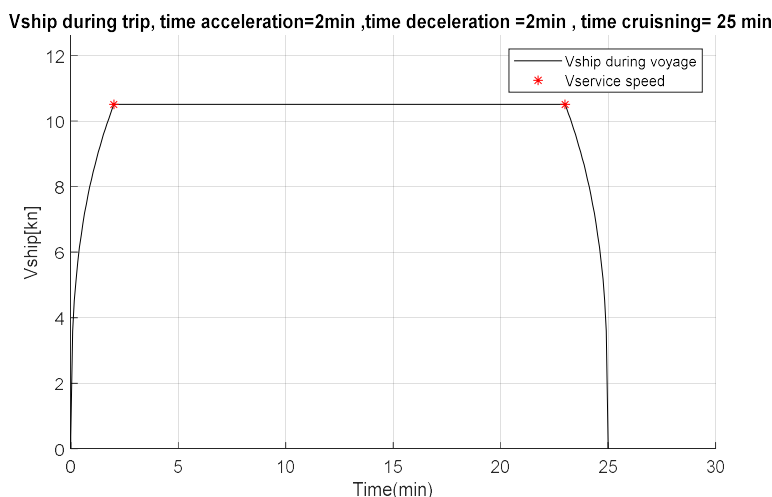
Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υπηρεσίας του πλοίου, θεωρούμε ότι στα 25 λεπτά που είναι ο χρόνος ταξιδιού, το πλοίο επιταχύνει από την ακινησία μέχρι και την ταχύτητα υπηρεσίας σε 2 λεπτά. Αντίστοιχα, 2 λεπτά θεωρούμε ότι διαρκεί η επιβράδυνση μέχρι και τον μηδενισμό της ταχύτητας. Για να βρεθεί η σχέση της ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, θεωρούμε ότι η ισχύς της μηχανής αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο, μέχρι το πλοίο να φτάσει την ταχύτητα υπηρεσίας (σταθερό ονομαστικό φορτίο της μηχανής $\rightarrow NCR$). Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε η αντίσταση του πλοίου συναρτηθεί της ταχύτητας δίνεται από την σχέση $R = CR \cdot V_s^2$ όπου R η αντίσταση του πλοίου.

Παράλληλα, $P(KW) = \alpha \cdot t$ (γραμμική σχέση κατά την επιτάχυνση) και $P(KW) = R \cdot V_s$

$$\text{Συνεπώς, } P(KW) = b \cdot V_s^3 \Rightarrow \alpha \cdot t = b \cdot V_s^3 \Rightarrow V_s = C' \cdot \sqrt[3]{t}$$

Αντίστοιχη σχέση προκύπτει κατά την φάση της επιβράδυνσης του πλοίου.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που απεικονίζουν την ταχύτητα του πλοίου συναρτηθεί του χρόνου. Η ταχύτητα υπηρεσίας υπολογίστηκε μέσω της συνθήκης ότι το εμβαδό κάτω από την καμπύλη δίνει την συνολική απόσταση που πρέπει να διανύσει το πλοίο στο συγκεκριμένο χρόνο ταξιδιού (4.2 nm). Σύμφωνα, με τους υπολογισμούς η ταχύτητα υπηρεσίας είναι 10.5kn.



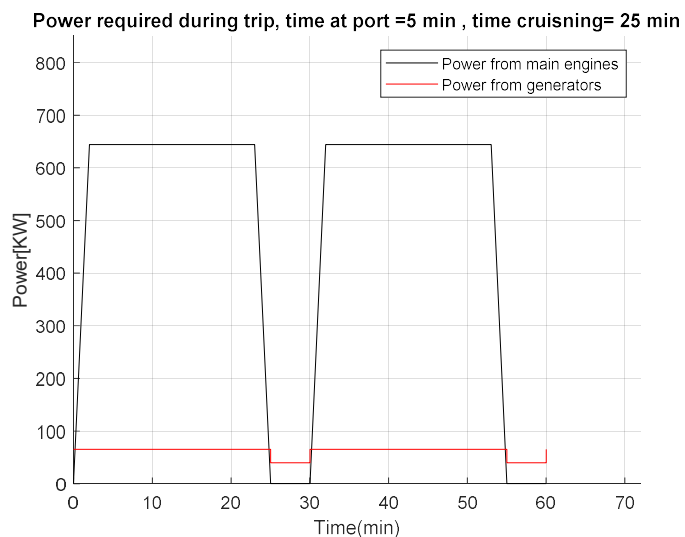
Διάγραμμα 13 : Ταχύτητα Πλοίου συναρτήσεως του χρόνου ταξιδιού του πλοίου ARIS III

Προσδιορισμός Μέγιστου φορτίου λειτουργίας Μηχανής

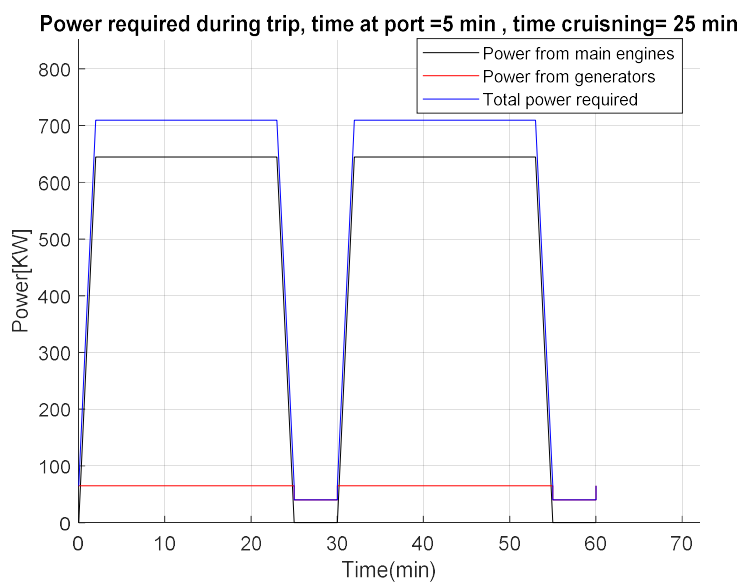
Όπως αναμενόταν η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου είναι αισθητά μικρότερη από την μέγιστη ταχύτητα του πλοίου. Κατά συνέπεια, η αντίσταση του πλοίου αναμένεται να είναι αισθητά μικρότερη (τετραγωνική σχέση ως προς την ταχύτητα) όπως και το φορτίο λειτουργίας της κύριας μηχανής σε σχέση με το MCR. Παράλληλα, πρέπει να επισημανθεί ότι το υπό μελέτη πλοίο ανήκει στην κατηγορία των πλοίων εκτοπίσματος όπου ισχύει $R = CR \cdot V_s^2$ σύμφωνα με το διάγραμμα 2 καθώς ο αριθμός Froude < 0.4 και $V_{service}(kn) \sqrt{L(ft)} = 1.9$

Αναφορικά με τον βαθμό πρόωσης του συστήματος προκειμένου να γίνει συσχέτιση της αντίστασης ρυμούλκησης με την ισχύ της μηχανής, θεωρείται ότι λαμβάνει την τιμή $PC_{Vs_{max}} = 0.55$ στην μέγιστη ταχύτητα και την τιμή $PC_{V_{service}} = 0.6$ στην ταχύτητα υπηρεσίας. Αυτή η επιλογή προκύπτει από το γεγονός ότι έλικα του πλοίου έχει επιλεγεί να λειτουργεί βέλτιστα σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου και η ταχύτητα 10.5 kn είναι κοντά στην βέλτιστη ως προς την σχεδίαση ταχύτητα του πλοίου. Η ισχύς στο MCR ισούται με 720 HP και η μέγιστη ταχύτητα είναι 13.5 kn. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι η κάθε μηχανή λειτουργεί στο 52% του MCR λαμβάνοντας υπόψιν και την προσαύξηση της αντίστασης κατά 20% λόγω ρυπασμένης γάστρας. Για τους υπολογισμούς επομένως παρακάτω θα θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι οι μηχανές του πλοίου λειτουργούν στο 60% του MCR στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

Όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε ότι κατά την επιτάχυνση του πλοίου έχουμε γραμμική αύξηση της ισχύος ως προς τον χρόνο και αντίστοιχα κατά την επιβράδυνση. Αναφορικά με την ηηδαλιουχία του πλοίου, οι ελιγμοί του πλοίου πραγματοποιούνται με την λειτουργία της κύριας μηχανής και μόνο, λόγω της ύπαρξης των Azipod thrusters. Παράλληλα, επειδή το πλοίο είναι αμφίπλωρο, δεν απαιτείται μανούβρα του πλοίου εντός του λιμανιού, οπότε δεν υπάρχει φορτίο maneuvering.



Διάγραμμα 14: Λειτουργία Κύριων Μηχανών και Γεννητριών του πλοίου ARISIII



Διάγραμμα 15: Λειτουργία Κύριων Μηχανών και Γεννητριών και Συνολική Ζήτηση Ισχύος του πλοίου ARISIII

Το μέσο φορτίο λειτουργίας της μηχανής στο ταξίδι ισούται με 55% MCR.

Παρακάτω παρατίθεται στιγμιότυπο από την εφαρμογή Marine electrical με τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου (ARIS III)

Ship ARISIII

General

Name:

IMO:

Class :

Flag :

Type :

Principal Dimensions

Length (m):

Breadth (m):

Depth (m):

Draft (m):

DWT (t):

Main Engines

No of M/Es :

No of Operating M/Es :

M/E MCR (kW):

M/E NCR (kW):

M/E Manoeuvring Load (kW):

M/E NCR Consumption (gr/kWh):

M/E Manoeuvring Cons. (gr/kWh):

M/E Efficiency Factor (0-1, Just for Reference):

Generator Engines

No of G/Es :

No of Operating G/Es :

G/E MCR (kW):

G/E NCR (kW):

G/E Manoeuvring Load (kW):

G/E Port Load (kW, For All Oper. G/Es):

G/E NCR Consumption (gr/kWh):

G/E Manoeuvring Cons. (gr/kWh):

G/E Port Consumption (gr/kWh):

G/E Efficiency Factor (0-1):

DC Voltage (V):

7.3 Επιλογή κατάλληλου σεναρίου φόρτισης

Αναφορικά με το βέλτιστο σενάριο φόρτισης του πλοίου, στην συγκεκριμένη διαδρομή και για το υπό μελέτη πλοίο, το σενάριο της ενδιάμεσης φόρτισης δεν έχει νόημα να εξεταστεί καθώς το πλοίο παραμένει στο λιμάνι μόνο 5 λεπτά. Συνεπώς, θα εξεταστεί μόνο το σενάριο της φόρτισης μετά από Nx δρομολόγια.

1^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 3 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 574.11 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 6.67 kWh	No. of Modules Series: 40	Inverter Power: 410 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 20	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 580.78 kWh	Total No. of Batteries: 800	Electric Motor Power: 370 kW
Total Energy/Day: 4646.24 kWh	Charging Time: 43.26 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 1161.56 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 1208.32 kW	New DOD: 0.721	
	Total Weight of Batteries: 13040 kg	
	Total Volume of Batteries: 6.16 m3	
	Daily Cycles: 3.845	
	Life Expectancy: 5.78 years	

2^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 4 δρομολόγια

Results

Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 574.11 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 6.67 kWh	No. of Modules Series: 40	Inverter Power: 410 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 26	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 580.78 kWh	Total No. of Batteries: 1040	Electric Motor Power: 370 kW
Total Energy/Day: 4646.24 kWh	Charging Time: 44.34 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 1548.75 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 1570.82 kW	New DOD: 0.739	
	Total Weight of Batteries: 16952 kg	
	Total Volume of Batteries: 8.01 m3	
	Daily Cycles: 2.958	
	Life Expectancy: 7.51 years	

3^η περίπτωση: Φόρτιση κάθε 5 δρομολόγια

Results

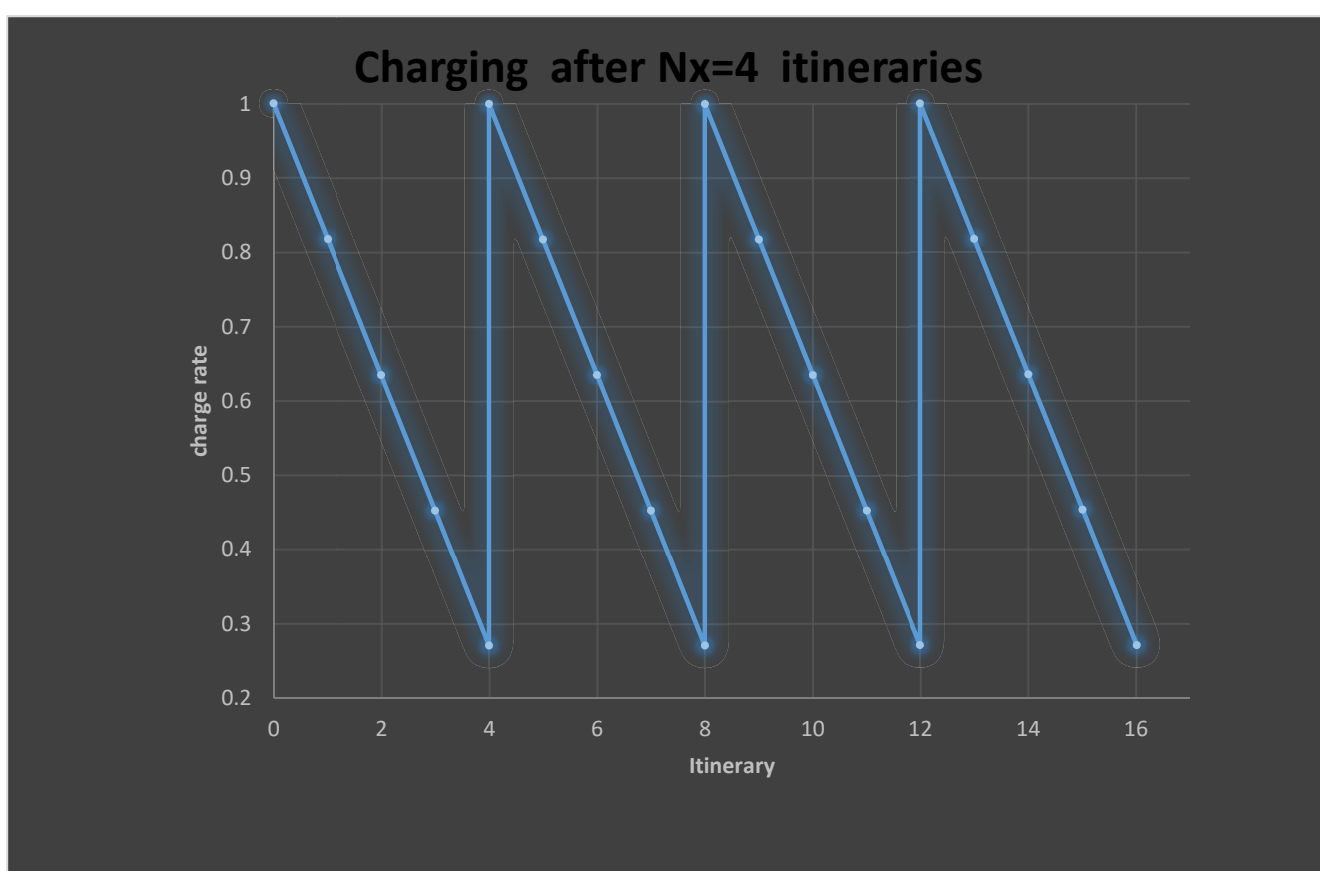
Energy	Battery	Equipment
Seagoing Energy/Trip: 574.11 kWh	Battery Arrays: 2	No. of Inverters: 4
Port Energy/Trip: 6.67 kWh	No. of Modules Series: 40	Inverter Power: 410 kW
Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh	No. of Batteries Parallel: 34	No. of Motors: 4
Total Energy/Trip: 580.78 kWh	Total No. of Batteries: 1360	Electric Motor Power: 370 kW
Total Energy/Day: 4646.24 kWh	Charging Time: 42.42 min	No. of Chargers: 2
Energy Min: 1935.93 kW	C Rate (During Charging): 1.00	Charger Power: 0 kW
Energy installed: 2054.14 kW	New DOD: 0.707	
	Total Weight of Batteries: 22168 kg	
	Total Volume of Batteries: 10.47 m ³	
	Daily Cycles: 2.262	
	Life Expectancy: 9.82 years	

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικά δεδομένα της μεθόδου φόρτισης μετά από Nx δρομολόγια για την διαδρομή Ωρωπός- Ερέτρια

Μέθοδος φόρτιση μετά από N δρομολόγια Total Cycles=8000					
N δρομολόγια	DOD_real	E_installed(kwh)	Daily_cycles	Life_exp(years)	Απαιτούμενος Χρόνος Φόρτισης(min)
3	0.72	1208.32	3.845	5.8	44
4	0.74	1570.82	2.958	7.5	45
5	0.71	2054.14	2.262	9.9	43

Συμπερασματικά, ο βέλτιστος αριθμός δρομολογίων χωρίς ενδιάμεση φόρτιση, αναφορικά με την ελάχιστη απαίτηση για εγκατεστημένη ισχύ, ισούται με N=3 δρομολόγια. Ωστόσο, επιλέγεται το N=4 δρομολόγια, για λόγους πρακτικούς, έτσι ώστε να μην σταματάει το πλοίο τόσο συχνά για να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες του. Πιο αναλυτικά, για N=4 η εγκατεστημένη ισχύς στο πλοίο ισούται με 1571kw με μία εφεδρεία ισχύος 25%. Αναφορικά με τον χρόνο φόρτισης, η μπαταρία φορτίζει πλήρως σε 45 λεπτά για ρεύμα ρυθμού φόρτισης 1C rate.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των δρομολογίων του πλοίου. Μάλιστα φαίνεται ξεκάθαρα το ποσοστό φόρτισης πριν και μετά την φόρτιση, όταν το πλοίο βγαίνει για να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες του. Η συχνότητα της φόρτισης των μπαταριών είναι κάθε 4 δρομολόγια. Στο γράφημα απεικονίζεται το μέγιστο βάθος αποφόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των δρομολογίων του πλοίου, το οποίο ισούται περίπου με 73%, δηλαδή 27% ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας. Επισημαίνεται ότι το πλοίο μετά το τέλος του τελευταίου δρομολογίου θα βγει για να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες του.



Διάγραμμα 16 : Απεικόνιση ποσοστού φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια των ταξιδιών για το σενάριο φόρτισης μετά από Nx δρομολόγια για το πλοίο ARIS III.

Οι τιμές των απαιτούμενων μεγεθών για τον υπολογισμό του τελικού κόστους μετασκευής και του λειτουργικού κόστους του πλοίου πριν και μετά την μετασκευή φαίνονται στην παρακάτω καρτέλα.

Retrofit OROPOS ERETRIA ARISIII

General

Name:

Ship:

Battery:

Type of Calculation

With Intermediate Charging

Without Charging

No. Routes w/o Inter. Charging:

Trips Information

(Trip: 2-routes)

Days of operation:

Trips / day:

Port Time (h):

Seagoing Time (h):

Manoeuvring Time (h):

Technical Specifications

Charging Current (A):

Depth of Discharge (%):

Motor Efficiency (0-1):

Charger Power (kW):

Financial

Initial Discount (%):

Inverter (\$/kW):

Electric Motor (\$/kW):

Charger (\$/kW):

M/E Sale (\$/kW):

G/E Sale (\$/kW):

Battery Sale Price at replacement (%):

Discount Rate (0-1):

Grant

Grant Value (\$):

Operation & Maintenance

Electricity (\$/kWh):

Fuel (\$/Ton):

Engine Maintenance (\$/kW):

Fixed Battery Maint. (%):

Variable Battery Maint. (\$/kWh):

Year of battery replacement (If none input zero):

Battery Replacement Cost (\$/kW, If none input zero):

Τελικά αποτελέσματα για την μετασκευή του πλοίου ARIS III σε ηλεκτρικό συμπεριλαμβανομένου της ισχύος του εξοπλισμού που πρέπει να εγκατασταθεί στο πλοίο, του κόστους του εξοπλισμού και του ετήσιου οφέλους από την μετασκευή .

Results

Energy

Seagoing Energy/Trip: 574.11 kWh
 Port Energy/Trip: 6.67 kWh
 Manoeuvring Energy/Trip: 0 kWh
 Total Energy/Trip: 580.78 kWh
 Total Energy/Day: 4646.24 kWh
 Energy Min: 1548.75 kW
 Energy installed: 1570.82 kW

Battery

Battery Arrays: 2
 No. of Modules Series: 40
 No. of Batteries Parallel: 26
 Total No. of Batteries: 1040
 Charging Time: 44.34 min
 C Rate (During Charging): 1.00
 New DOD: 0.739
 Total Weight of Batteries: 16952 kg
 Total Volume of Batteries: 8.01 m3
 Daily Cycles: 2.958
 Life Expectancy: 7.51 years

Equipment

No. of Inverters: 4
 Inverter Power: 410 kW
 No. of Motors: 4
 Electric Motor Power: 370 kW
 No. of Chargers: 2
 Charger Power: 0 kW

Financial

Buying Cost: 1303375.36 \$

Battery: 722575.36 \$
 Inverter: 492000 \$
 Motor: 88800 \$
 Charger: 0 \$

Selling Cost: 97454 \$

Grant: 0 \$

Total Cost after Sell: 1205921.36 \$

Pre-Retrofit Fuel Costs: 178434.3 \$/year

Battery Fuel Costs: 83632.32 \$/year

Fuel Costs Benefit: 94801.98 \$/year

Pre-Retrofit Maintenance Costs: 24776 \$/year

Battery Maintenance Costs: 17593.15 \$/year

Maintenance Costs Benefit: 7182.85 \$/year

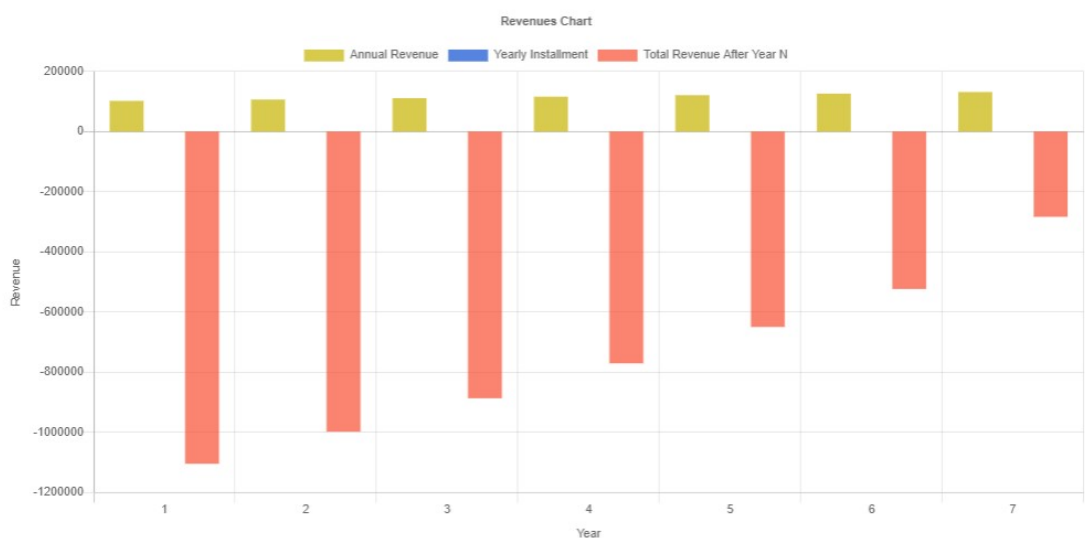
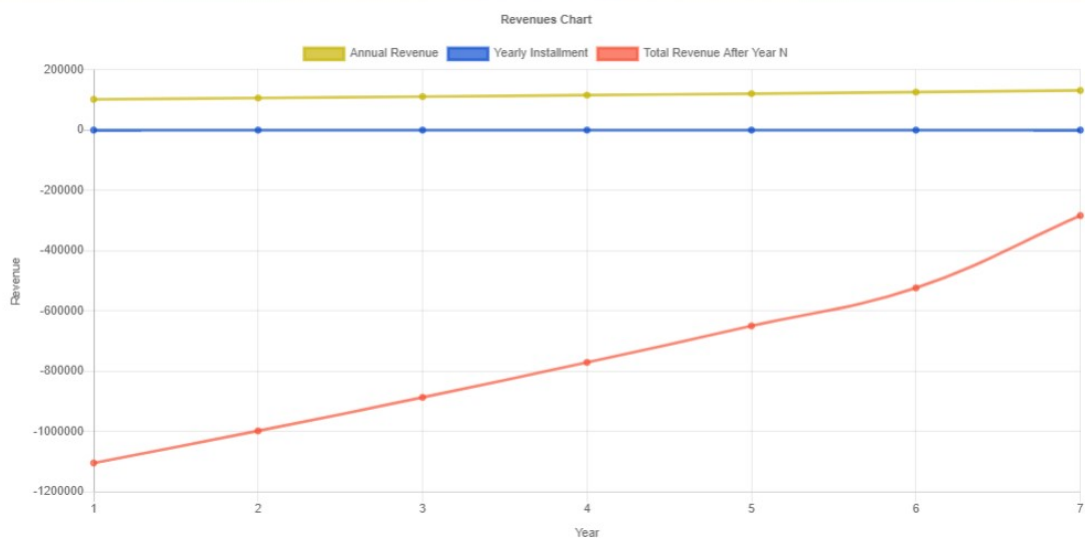
Total Benefits: 101984.83 \$/year

Μελέτη Βιωσιμότητας

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος επταετίας χωρίς χρηματοδότηση

Financial Calculation								
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7
Annual Benefit (\$)	-1205921.36	101984.83	106500.3	111167.9	115992.4	120978.8	126132	131457.1
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								108386.304
Cost by replacing the battery equipment								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-1205921.36	-1103936.53	-997436.23	-886268.33	-770275.93	-649297.13	-523165.13	-283321.726
NPV		-593050.5 \$		IRR	0 %			

Charts

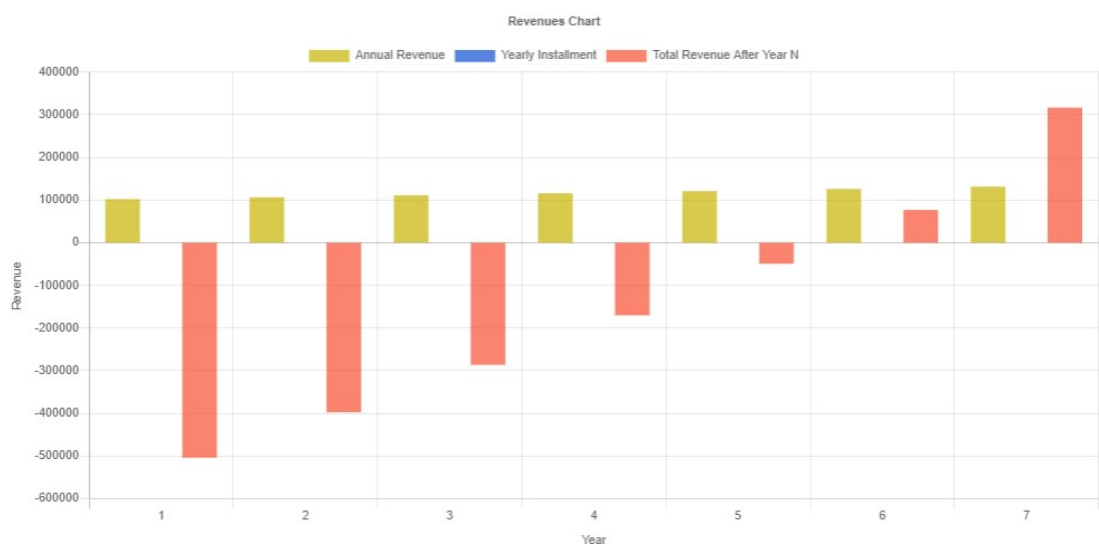
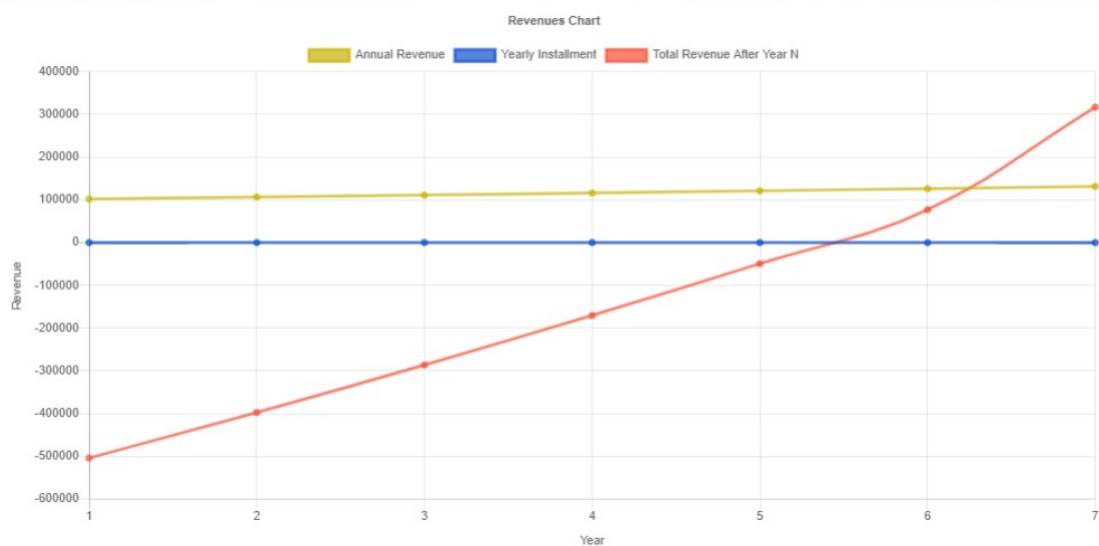


Προκύπτει NPV= -593000\$ και $r=0 \rightarrow$ Απαιτείται χρηματοδότηση

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος επταετίας με χρηματοδότηση 600000\$

Financial Calculation								
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7
Annual Benefit (\$)	-605921.36	101984.83	106500.3	111167.9	115992.4	120978.8	126132	131457.1
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								108386.304
Cost by replacing the battery equipment								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-605921.36	-503936.53	-397436.23	-286268.33	-170275.93	-49297.13	76834.87	316678.274
NPV		6949.5 \$			IRR	10.3 %		

Charts

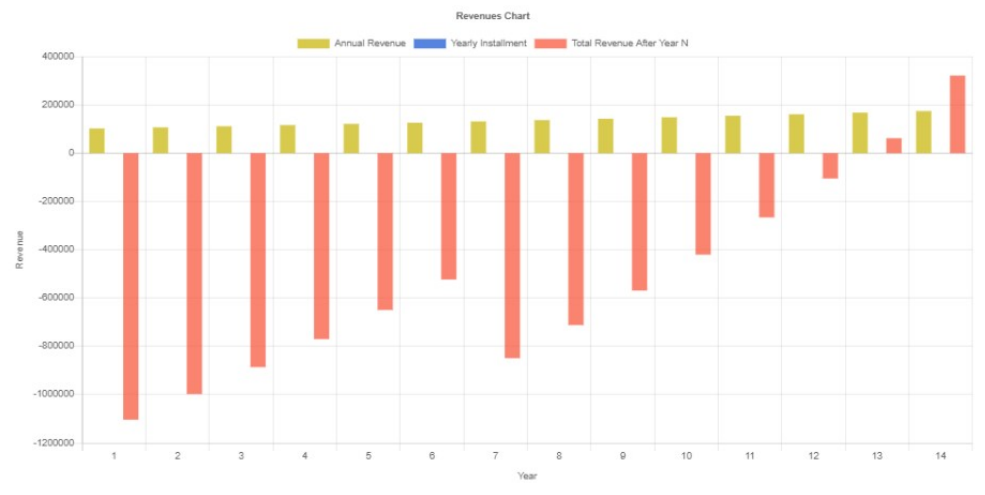
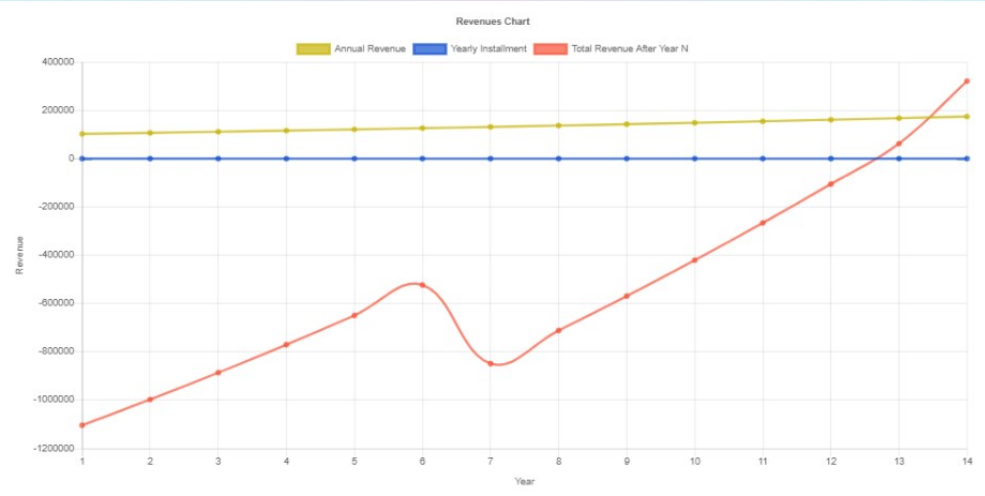


Προκύπτει $NPV = 7000\$$ και $r = 10.3\% \rightarrow$ Η επένδυση βιώσιμη

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος 14 χρόνων χωρίς χρηματοδότηση και αντικατάσταση των μπαταριών σε επτά χρόνια.

Financial Calculation															
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Annual Benefit (\$)	-1205921.36	101984.83	106500.3	111167.9	115992.4	120978.8	126132	131457.1	136959.7	142645	148518.8	154587	160855.5	167330.5	174018.5
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								108386.304							84824.28
Cost by replacing the battery equipment								-565495.2							
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Revenue After Year N (\$)	-1205921.36	-1103936.53	-997436.23	-886268.33	-770275.93	-649297.13	-523165.13	-48816.926	-711857.23	-569212.23	-420693.43	-266106.43	-105250.93	62079.57	320922.35
NPV															-479524 \$
IRR															2.8 %

Charts

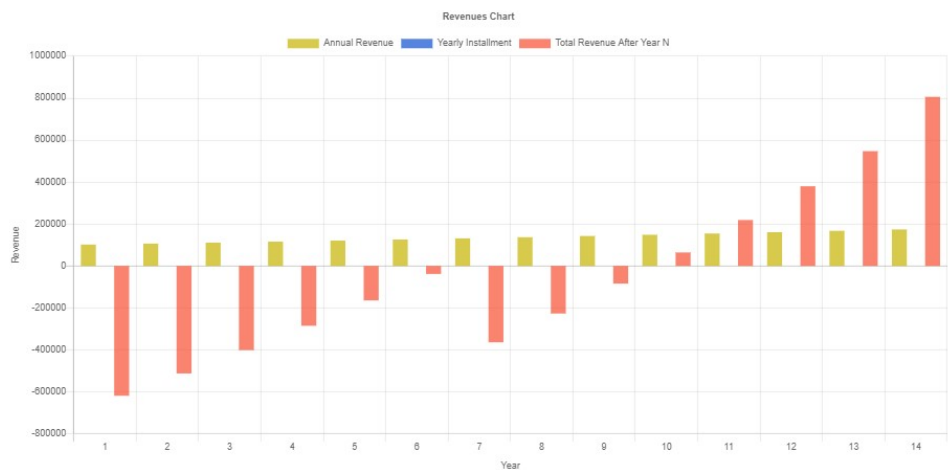
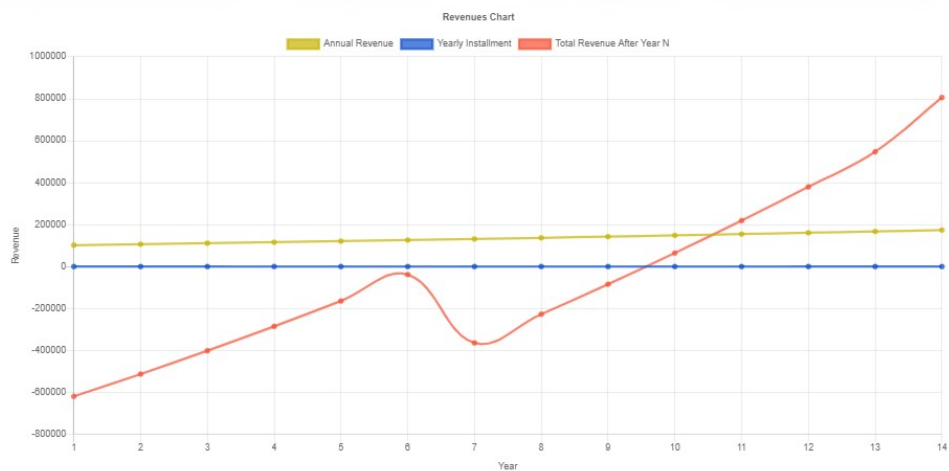


Προκύπτει NPV= -479000\$ και r=0 → Απαιτείται χρηματοδότηση

Μελέτη βιωσιμότητας σε βάθος 14 χρόνων με χρηματοδότηση 485000\$ και αντικατάσταση των μπαταριών σε επτά χρόνια.

Financial Calculation																
Years	Initial Cost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Annual Benefit (\$)	-720921.36	101984.83	106500.3	111167.9	115992.4	120978.8	126132	131457.1	136959.7	142645	148518.8	154587	160855.5	167330.5	174018.5	
Benefit selling the battery equipment (Recycling)								108386.304							84824.28	
Cost by replacing the battery equipment								-565495.2								
Loan / Yearly Installment (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total Revenue After Year N (\$)	-720921.36	-618936.53	-512436.23	-401268.33	-285275.93	-164297.13	-38165.13	-363816.926	-226857.23	-84212.23	64306.57	218893.57	379749.07	547079.57	805922.35	
NPV					5476 \$										IRR	10.1 %

Charts



Προκύπτει NPV= 5476\$ και r=10.1% → Η επένδυση βιώσιμη

7.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την διαδρομή Ωρωπού- Ερέτριας

Συμπερασματικά, το σενάριο φόρτισης για την διαδρομή Ωρωπού- Ερέτρια είναι αυτό της φόρτισης μετά από Nx δρομολόγια. Το πρότυπο πλοίο που επιλέχθηκε για αυτή την διαδρομή είναι το ARIS III και με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του πλοίου θα υλοποιηθεί η μελέτη. Η εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών στο πλοίο είναι περίπου 1571kw με μία εφεδρεία ισχύος 25%. Το βάρος των μπαταριών ανέρχεται στους 17 t, τιμή απόλυτα ρεαλιστική και ταυτόχρονα αποδεκτή, αφού θα αφαιρεθούν από το πλοίο οι μηχανές και οι γεννήτριες. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα προκύπτει θεωρώντας ότι το πλοίο φορτίζει τις μπαταρίες κάθε 4 δρομολόγια μέχρι την πλήρη φόρτιση των μπαταριών, για 45 λεπτά με ρεύμα ρυθμού φόρτισης 1C rate. Παράλληλα, θα χρειαστούν τέσσερις inverter ισχύος 410 KW ο καθένας, όπως και τέσσερις επαγωγικοί κινητήρες ισχύος 370KW ο καθένας. Τέλος, το κόστος της μετασκευής ανέρχεται περίπου σε 1206000\$. Αναφορικά με τα επιμέρους κόστη του βασικού εξοπλισμού που απαιτείται για την μετασκευή του πλοίου σε ηλεκτρικό ισχύουν τα εξής: 55.44% του κόστους της μετασκευής για την μπαταρία και το BMS, 37.75% του κόστους της μετασκευής για τους inverter, 6.81% του κόστους της μετασκευής για την αγορά των επαγωγικών κινητήρων. Επιπρόσθετα, το ετήσιο όφελος του πλοιοκτήτη λόγω της μετασκευής από την μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου, ανέρχεται σε 101984\$ (94801\$ από τα καύσιμα και 7182\$ από την συντήρηση). Ωστόσο, η επένδυση δεν καθίσταται βιώσιμη από την μεριά του πλοιοκτήτη σε βάθος επταετίας, για αυτό και απαιτείται χρηματοδότηση ύψους 600000\$ που αντιστοιχεί στο 50% του αρχικού κόστους της μετασκευής. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόσβεση της επένδυσης γίνεται στο έκτο έτος. Η επταετία επιλέγεται, διότι με βάση τους κατασκευαστές θα χρειαστεί αντικατάσταση των μπαταριών μετά από αυτό το χρονικό διάστημα. Παράλληλα, γίνεται ανάλυση σε βάθος 14 χρόνων λαμβάνοντας υπόψιν και το επιπρόσθετο κόστος από την αντικατάσταση των μπαταριών στην επταετία. Αναφορικά με το κόστος κτήσης των μπαταριών μετά από επτά χρόνια, θεωρούμε ότι η τιμή θα είναι μειωμένη κατά 100\$/kwh ως προς την αρχική τιμή, με βάση και εκτιμήσεις ειδικών σχετικά με την πτώση της τιμής κτήσης της μπαταρίας σε βάθος χρόνου. Η οικονομική ανάλυση σε βάθος 14 χρόνων δείχνει ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη με χρηματοδότηση ύψους 485000\$ που αντιστοιχεί στο 40% του αρχικού κόστους της επένδυσης. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόσβεση της επένδυσης γίνεται στο δέκατο έτος. Συνεπώς, η βιωσιμότητα της επένδυσης δεν επηρεάζεται από το επιπρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών.

Κεφάλαιο 8^ο : Ηλεκτρικά Πλοία – Επίδραση στο Περιβάλλον

8.1 Οι επιπτώσεις των εκπομπών των πλοίων στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη ζωή

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας (IMO), πρωταρχική ανάγκη στον τομέα της ναυτιλίας είναι η αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και των επιπτώσεων που επιφέρουν οι εκπομπές ρύπων, είτε εξαιτίας της λειτουργίας των κινητήρων των πλοίων είτε εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα, δηλαδή πληρώματος και επιβατών.

Πιο αναλυτικά, η ατμοσφαιρική, η θαλάσσια, η πετρελαϊκή και η ακουστική ρύπανση αποτελούν τις πιο συνήθεις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των θαλάσσιων μεταφορών. Αναφορικά με την ατμοσφαιρική και θαλάσσια ρύπανση, εξαιτίας της λειτουργίας των πετρελαιοκίνητων μηχανών των πλοίων, εκπέμπονται καυσαέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO₂) ή άλλα παράγωγα του διοξειδίου του θείου (SO_x), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογονάνθρακες καθώς και αιωρούμενα σωματίδια (PM_{2.5}, PM₁₀). Ιδιαίτερα, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) είναι κρίσιμης σημασίας για την περιβαλλοντική ρύπανση, διότι εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο μακροπρόθεσμα επιφέρει την κλιματική αλλαγή, δεδομένου ότι προκαλεί ολοένα και περισσότερη αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Μάλιστα, σύμφωνα με ερευνητικές μελέτες, όσο μεγαλύτερη είναι η εκπομπή CO₂, τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του πλανήτη και άρα σημειώνεται όλο και μεγαλύτερη κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας, τα αέρια του θερμοκηπίου, με διεθνή συμβολισμό GHG (green house gas), δεν ευθύνονται μόνο για την ατμοσφαιρική και θαλάσσια ρύπανση, αλλά και για τον αφανισμό ορισμένων ζωικών οργανισμών και μικροοργανισμών, καθώς και για την εμφάνιση της όξινης βροχής και τον κίνδυνο εξαφάνισης γεωγραφικών περιοχών από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Μάλιστα, εκτιμάται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από την ναυτιλία αγγίζουν το 4% με 5% της παγκόσμιας εκπομπής

διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενώ παράλληλα ελλοχεύει ο κίνδυνος το ποσοστό αυτό να αυξηθεί έως και 72% επί του προηγούμενου έως το 2020, εάν δεν παρθούν μέτρα.

Όπως προαναφέρθηκε, οι μηχανές των πλοίων που ως γνωστών χρησιμοποιούν κυρίως ως καύσιμο το πετρέλαιο, εκπέμπουν καυσαέρια τα οποία εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Ανάλογα, λοιπόν, με τα είδη των αερίων που εκπέμπονται προκαλούνται διαφορετικά είδη επιπτώσεων στο περιβάλλον. Οι κυρίαρχες κατηγορίες εκπομπών είναι:

- Εκπομπές που επιφέρουν ατμοσφαιρική ρύπανση
- Εκπομπές που επιφέρουν την κλιματική αλλαγή

Πιο εντοπισμένα, η πρώτη κατηγορία εκπομπών περιλαμβάνει εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x), νιτρικών οξειδίων (NO_x), μικροσωματιδίων (PM), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), HCFC και μεθανίου (CH₄). Ωστόσο, οι εκπομπές από την λειτουργία των πετρελαιοκίνητων μηχανών των πλοίων μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω, αν συνυπολογιστεί η επίδραση τους στην ανθρώπινη υγεία, σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία. Πρωτεύοντα στοιχεία αποκαλούνται τα στοιχεία τα οποία όταν έρθουν σε επαφή με τον άνθρωπο έχουν άμεσες επιπτώσεις στην υγεία του, ενώ δευτερεύοντα θεωρούνται οι εκπομπές που όταν ελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα παράγουν διαφορετικούς ρύπους, εξαιτίας της χημικής αντίδρασης του αέρα με τις διάφορες εκπομπές, όπως λόγω χάρη το όζον (O₃), τα θειϊκά και τα νιτρικά αέρια.

Αναφορικά, με τα εκπεμπόμενα αέρια που αναφέρθηκαν παραπάνω: **SO_x**: είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας καύσης των πετρελαιοκίνητων μηχανών Diesel. Η ποιότητα των ναυτιλιακών καυσίμων εξαρτάται από το ποσοστό θείου που εμπεριέχεται σε αυτά. Η καύση θειούχων καυσίμων οδηγεί στην δημιουργία εκπομπών SO₂.

NO_x: σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της καύσης λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας και πίεσης στους κυλίνδρους.

VOC: είναι οργανικές ενώσεις που έχουν υψηλή πίεση ατμοποίησης σε περιβάλλον δωματίου.

CO: είναι αέριο που εκλύεται λόγω της ατελούς καύσης ορυκτών καυσίμων και εκλύεται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα.

CO₂: είναι φυσικό αέριο της ατμόσφαιρας αλλά μπορεί να παραχθεί και από ατελή καύση καυσίμου.

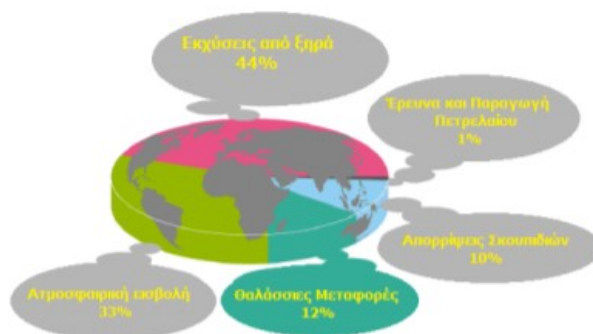
O₃: δημιουργείται μέσα από χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα με «πρώτη ύλη» αέρια NOx.

Συνοπτικά, οι αέριες εκπομπές των πλοίων επηρεάζουν:

- Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής (Climate Change Phenomenon)
- Το οικοσύστημα (Ecosystem)
- Την υγεία του ανθρώπου (Human Health)

Συνεπώς, κρίνεται εύλογο ότι πρέπει να αναζητηθούν μέτρα για την ολιστική αντιμετώπιση της μόλυνσης των θαλάσσιων υδάτων και της ατμόσφαιρας. Το παρακάτω γράφημα της GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution) αναπαριστά σχηματικά μια γενική εικόνα της παγκόσμιας θαλάσσιας ρύπανσης.

Επισκόπηση Συνολικής Θαλάσσιας Ρύπανσης



Πηγή: Ομάδα Εμπειρογνομόνων επί των Επιστημονικών Θεμάτων της Θαλάσσιας Ρύπανσης (GESAMP)

Πιο επεξηγηματικά, με απώτερο στόχο την ελάττωση της έκλυσης των αερίων ρύπων και δη του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), προτείνεται η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου είτε μέσω της δημιουργίας σύγχρονων κινητήρων με κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση των καύσεων είτε μέσω της δημιουργίας νέων πλωτών μέσων τα οποία θα χρησιμοποιούν κατάλληλες μπαταρίες για την πρόωση τους. Σύμφωνα με την θεωρία της τεχνολογικής εξέλιξης της ενεργειακής απόδοσης, η κατασκευή τέτοιων πλοίων, θα βελτιστοποιήσει την ενεργειακή απόδοση, που σημαίνει λιγότερη κατανάλωση ενέργειας κατά τις θαλάσσιες μεταφορές, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερη ή καθόλου καύση στην περίπτωση που δημιουργηθούν πλοία με μπαταρίες και άρα λιγότερη ή καθόλου εκπομπή καυσαερίων.

8.2 Ποσοτικοποίηση της μείωσης των ρύπων λόγω της μετασκευής του πλοίου σε ηλεκτρικό

Στην ενότητα αυτή ο στόχος είναι να προσδιοριστεί η μείωση των εκπομπών λόγω της μετασκευής του πλοίου σε ηλεκτρικό. Σύμφωνα με δεδομένα του ΑΔΜΗΕ 2020, προκύπτει ότι οι εκπομπές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αισθητά μικρότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες εκπομπές που παράγουν οι μηχανές εσωτερικής καύσης των πλοίων. Για τον προσδιορισμό της μάζας καυσίμου για 1 kWh ενέργειας, θεωρούμε ότι οι μηχανές και οι γεννήτριες του πλοίου έχουν μέση ειδική κατανάλωση καυσίμου 200gr/kwh. Παράλληλα, θεωρούμε ότι το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι τύπου MDO.

Πίνακας 9 : Βασικές ποσότητες ρύπων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με δεδομένα του ΑΔΜΗΕ 2020

ΑΔΜΗΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020		
Τύπος Εκπομπών	Ποσότητα Ρύπων	
CO ₂	572.16	gr_CO ₂ /kwh
SOX	0.85	gr_SOX/kwh
NOX	0.752	gr_NOX/kwh
PM	0.314	gr_PM/kwh

Πίνακας 10: Βασικές ποσότητες ρύπων από την καύση του καυσίμου MDO

MDO καύσιμο κύριων μηχανών και γεννητριών				
Τύπος Εκπομπών	Μέση ειδική κατανάλωση μηχανών 200gr/kwh			
CO2	3.19	gr_CO2/gr_καυσίμου	638	gr_CO2/kwh
SOX	0.001	gr_SOX/gr_καυσίμου	0.2	gr_SOX/kwh
NOX	0.06025	gr_NOX/gr_καυσίμου	12.05	gr_NOX/kwh
PM	0.00225	gr_PM/gr_καυσίμου	0.45	gr_PM/kwh

Πίνακας 11 : Διαφορά στις ποσότητες ρύπων λόγω της μετασκευής

Τύπος Εκπομπών	Διαφορά Εκπομπών λόγω της μετασκευής	
CO2	-65.84	gr_CO2/kwh
SOX	0.65	gr_SOX/kwh
NOX	-11.298	gr_NOX/kwh
PM	-0.136	gr_PM/kwh

Πίνακας 12 : Ετήσια απαίτηση ενέργειας των υπο μελέτη πλοίων

Διαδρομή	Πλοίο	Ημερήσια απαίτηση ενέργειας(kwh)	Ετήσια απαίτηση ενέργειας(kwh)
Μέγαρα-Σαλαμίνα	ALKYON II	607.41	218667.6
Παλούκια-Πέραμα	ELENA A	1987.92	715651.2
Ωρωπός-Ερέτρια	ARIS III	4646.24	1672646.4

Πίνακας 13: Ετήσια μείωση ρύπων λόγω της μετασκευής του πλοίου σε ηλεκτρικό

Ετήσια μείωση ρύπων λόγω της μετασκευής του πλοίου σε ηλεκτρικό				
Πλοίο	CO2(t)	SOX(t)	NOX(t)	PM(t)
ALKYON II	-14.3971	0.14213394	-2.470506545	-0.029738794
ELENA A	-47.1185	0.46517328	-8.085427258	-0.097328563
ARIS III	-110.127	1.08722016	-18.89755903	-0.22747991

Συμπέρασμα

Με (-) δηλώνεται η μείωση των εκπομπών λόγω της μετασκευής και αντίστοιχα με (+) η αύξηση. Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα οι εκπομπές μειώνονται για τους ρύπους CO₂,NO_x,PM και αυξάνονται ελαφρώς για το SO_x. Το συγκεκριμένο οφείλεται στο γεγονός ότι για την παραγωγή ποσοστού της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ο λιγνίτης, η καύση του οποίου ελευθερώνει σημαντικές ποσότητες SO_x. Ωστόσο, αναμένεται τα επόμενα χρόνια να εξλειφθεί η χρήση του συγκεκριμένου ορυκτού καυσίμου και ταυτόχρονα να αυξηθεί σημαντικά το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο θα παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το συγκεκριμένο θα σημαίνει ότι η ετήσια μείωση ρύπων θα αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με τις άνωθι τιμές του πίνακα, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια θα παράγεται με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Συμπεράσματα

Η Ναυτιλία Μικρών Αποστάσεων αποτελεί σημαντική υποκατηγορία της παγκόσμιας ναυτιλίας. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρώπη περιλαμβάνει πολλές χώρες οι οποίες διαθέτουν αρκετές πορθμειακές γραμμές, με αποτέλεσμα η εγχώρια οικονομία των αντίστοιχων χωρών να στηρίζεται σημαντικά στην μετακίνηση ανθρώπων και εμπορευμάτων μεταξύ σύντομων διαδρομών. Ενδεικτικά η Νορβηγία είναι η χώρα με τις περισσότερες πορθμειακές γραμμές σε ποσοστό 42% επί του συνόλου των πορθμειακών γραμμών της Ευρώπης. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που αυτή η χώρα έχει επικεντρωθεί τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή ηλεκτρικών πλοίων για την κάλυψη σύντομων αποστάσεων. Η συγκεκριμένη τακτική βασίζεται στο γεγονός ότι τα οφέλη τόσο για τον πλοιοκτήτη όσο και για το περιβάλλον είναι σημαντικά, καθώς τα δρομολόγια των πλοίων που καλύπτουν αυτές τις γραμμές είναι πάρα πολλά ετησίως. Αξίζει να επισημανθεί ότι χαρακτηριστικά παραδείγματα πλήρως ηλεκτρικών επιβατηγών οχηματαγωγών πλοίων ανοικτού τύπου αποτελούν το πλοίο Ampere και το πλοίο E ferry. Ομοίως, η Ελλάδα διαθέτει αρκετές πορθμειακές γραμμές σε ποσοστό 9% επί του συνόλου των πορθμειακών γραμμών της Ευρώπης, με αποτέλεσμα η φιλοσοφία της μετασκευής ήδη υπάρχοντων πλοίων σε πλήρως ηλεκτρικά να αποτελεί μια πλήρως ρεαλιστική επιλογή.

Τα επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία που μελετήθηκαν είναι είτε παντόφλες, δηλαδή διαθέτουν μηχανοστάσια πρύμνηθεν, είτε αμφίπλωρα, δηλαδή διαθέτουν μηχανοστάσια πρύμνηθεν και πώραθεν. Αναφορικά με τον απαραίτητο εξοπλισμό για την μετασκευή, οι μπαταρίες και το BMS είναι από τα πιο σημαντικά και συνάμα από τα πιο ακριβά στοιχεία του εξοπλισμού του υπό μετασκευή πλοίου, με αποτέλεσμα να απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή, καθώς πέρα από το σημαντικό κόστος τους, επηρεάζουν και την λειτουργία του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται να εξοπλισουν το πλοίο μπαταρίες ιόντων λιθίου τύπου LFP, οι οποίες παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά αναφορικά με την θερμική τους σταθερότητα, την ειδική τους ενέργεια, το κόστος τους και τους μέγιστους κύκλους λειτουργίας. Η μπαταρία που επιλέγεται είναι της Valance, η οποία έχει

χωρητικότητα 59Ah και ονομαστική τάση 25.6 Volt. Αναφορικά με τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας, τα ρεύματα φόρτισης και αποφόρτισης θα πρέπει να μην ξεπερνούν το 1C rate και παράλληλα το μέγιστο βάθος αποφόρτισης της μπαταρίας να μην ξεπερνάει το 80%. Στο πλοίο θα εγκατασταθούν δύο πακέτα μπαταριών και πιο συγκεκριμένα θα βρίσκονται περί το κέντρο πλευστότητας και εκατέρωθεν αυτού (δεξιά και αριστερά) για την περίπτωση πλοίου τύπου παντόφλας και αντίστοιχα για την περίπτωση αμφίπλωρου, ένα πακέτο πλώραθεν και ένα πρύμνηθεν, στις θέσεις ουσιαστικά των μηχανοστασίων πριν την μετασκευή. Επιπρόσθετα, αναφορικά με τον βασικό εξοπλισμό που απαιτείται, εκτός από την μπαταρία και το BMS, απαιτούνται inverter που αναλαμβάνουν αφενός την μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο και αφετέρου συμβάλλουν στην ρύθμιση της συχνότητας του ρεύματος. Τέλος, απαιτούνται επαγωγικοί κινητήρες οι οποίοι απορροφούν την ηλεκτρική ενέργεια από τις μπαταρίες και την μετατρέπουν σε περιστροφική ενέργεια για την κίνηση της έλικας. Παράλληλα, για την πηδαλιουχία του πλοίου απαιτούνται προωστήρες αζιμουθίου (ελικοπηδάλια), η χρήση των οποίων συνεπάγεται ότι δεν απαιτούνται πλευρικοί προωστήρες για τους ελιγμούς του πλοίου.

Αρχικά, μελετήθηκε η γραμμή Μέγαρο-Σαλαμίνα απόστασης 0.45nm. Η συγκεκριμένη διαδρομή παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον, καθώς είναι αρκετά μικρή, με αποτέλεσμα η εγκατεστημένη ισχύς των μπαταριών στο πλοίο να ισούται μόνο με 200kw με μία εφεδρεία ισχύος 25%. Το αποτέλεσμα προέκυψε θεωρώντας ότι το πλοίο φορτίζει σε κάθε λιμάνι για όσο χρόνο παραμένει σε αυτό, με ρεύμα φόρτισης 30A (αντιστοιχεί σε 0.5C rate). Το βάρος των μπαταριών ανέρχεται σε 2.2 t. Τα ετήσια έσοδα του πλοιοκτήτη ανέρχονται σε 22000\$, τα οποία προέρχονται από την μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου λόγω της μετασκευής. Το κόστος της επένδυσης ισούται με 200000\$ και για να γίνει βιώσιμη σε βάθος επταετίας, θα πρέπει να επιχορηγηθεί με ένα ποσό της τάξεως του 43% του αρχικού κόστους επένδυσης. Η απόσβεση της επένδυσης με βάση την αρχική επιχορήγηση γίνεται στο έκτο έτος. Η επταετία λαμβάνεται ως χρονικό διάστημα μελέτης, καθώς μετά από αυτό απαιτείται αντικατάσταση των μπαταριών. Επιπρόσθετα, γίνεται

έλεγχος βιωσιμότητας της επένδυσης σε βάθος 14 χρόνων, λαμβάνοντας υπόψιν το επιπρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών και προκύπτει ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη με την αρχική επιχορήγηση με την απόσβεση να γίνεται στο ένατο έτος.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η γραμμή Πέραμα - Παλούκια απόστασης 1.6nm. Αναφορικά με την συγκεκριμένη διαδρομή, η εγκατεστημένη ισχύς των μπαταριών στο πλοίο ισούται με 600kw με μία εφεδρεία ισχύος 40%. Το αποτέλεσμα προέκυψε θεωρώντας ότι το πλοίο φορτίζει σε κάθε λιμάνι για όσο χρόνο παραμένει σε αυτό, με ρεύμα φόρτισης 40A (αντιστοιχεί σε 0.68C rate). Το βάρος των μπαταριών ανέρχεται σε 6.5t. Τα ετήσια έσοδα του πλοιοκτήτη ανέρχονται σε 62000\$, τα οποία προέρχονται από την μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου λόγω της μετασκευής. Το κόστος της επένδυσης ισούται με 740000\$ και για να γίνει βιώσιμη σε βάθος επταετίας, θα πρέπει να επιχορηγηθεί με ένα ποσό της τάξεως του 54% του αρχικού κόστους επένδυσης. Η απόσβεση της επένδυσης με βάση την αρχική επιχορήγηση γίνεται στο έκτο έτος. Επιπρόσθετα, γίνεται έλεγχος βιωσιμότητας της επένδυσης σε βάθος 14 χρόνων, λαμβάνοντας υπόψιν το επιπρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών και προκύπτει ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη με την αρχική επιχορήγηση με την απόσβεση να γίνεται στο ένατο έτος.

Τέλος, μελετήθηκε η γραμμή Ωρωπός-Ερέτρια απόστασης 4.2nm. Η συγκεκριμένη διαδρομή μελετάται προκειμένου να απεικονιστεί σε μία μεγαλύτερη διαδρομή ποιες είναι οι απαιτήσεις σε εγκατεστημένη ισχύ. Αναφορικά με την συγκεκριμένη διαδρομή, η εγκατεστημένη ισχύς των μπαταριών στο πλοίο ισούται με 1571kw με μία εφεδρεία ισχύος 25%. Το αποτέλεσμα προέκυψε θεωρώντας ότι το πλοίο θα φορτίζει πλήρως τις μπαταρίες του κάθε 4 δρομολόγια με ρεύμα φόρτισης 59A (αντιστοιχεί σε 1C rate) με τον χρόνο φόρτισης των μπαταριών να ισούται με 45 λεπτά. Δηλαδή θεωρείται ότι η συχνότητα φόρτισης των μπαταριών είναι κάθε τέσσερα δρομολόγια. Το βάρος των μπαταριών ανέρχεται σε 17t. Τα ετήσια έσοδα του πλοιοκτήτη ανέρχονται σε 102000\$, τα οποία προέρχονται από την μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου λόγω της μετασκευής. Το κόστος της επένδυσης

ισούνται με 1200000\$ και για να γίνει βιώσιμη σε βάθος επταετίας, θα πρέπει να επιχορηγηθεί με ένα ποσό της τάξεως του 50% του αρχικού κόστους επένδυσης. Η απόσβεση της επένδυσης με βάση την αρχική επιχορήγηση γίνεται στο έκτο έτος. Επιπρόσθετα, γίνεται έλεγχος βιωσιμότητας της επένδυσης σε βάθος 14 χρόνων, λαμβάνοντας υπόψιν το επιπρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών και προκύπτει ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη με την αρχική επιχορήγηση με την απόσβεση να γίνεται στο δέκατο έτος.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι με την αύξηση της απόστασης μιας πορθμειακής γραμμής αυξάνονται σημαντικά οι απαιτήσεις σε εγκατεστημένη ισχύ. Το συγκεκριμένο γεγονός αυξάνει σημαντικά το κόστος της επένδυσης, μιας που οι μπαταρίες με το BMS αποτελούν περίπου το 30%-50% του συνολικού κόστους της επένδυσης. Αναφορικά με το βάρος των μπαταριών, το οποίο δεν θεωρείται σημαντικό για αυτές τις ποσότητες εγκατεστημένης ισχύος, θα πρέπει να γίνει έλεγχος, καθώς μετά την αφαίρεση των μηχανών και των γεννητριών, ενδέχεται το πλοίο να πλέει σε μικρότερο βύθισμα. Όπως προαναφέρθηκε και στις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, η επένδυση δεν καθίσταται βιώσιμη με αποτέλεσμα να απαιτείται χρηματοδότηση. Το ύψος της χρηματοδότησης κυμαίνεται μεταξύ 40%-55% του συνολικού κόστους της επένδυσης, με βάση τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, η πορθμειακή γραμμή Πέραμα Μεγάρων – Φανερωμένη Σαλαμίνας αποτελεί την καλύτερη επιλογή για την μετασκευή πλοίου σε πλήρως ηλεκτρικό, καθώς το κόστος της επένδυσης είναι αρκετά χαμηλό, που σε συνδυασμό με κάποια κρατική επιχορήγηση (περίπου 40% του αρχικού κόστους) να μπορεί να καλυφθεί εύκολα από ίδια κεφάλαια του πλοιοκτήτη. Παράλληλα, αξίζει να επισημανθεί ότι το πλοίο εξοπλίζεται με δύο φορτιστές των 60 KW που σημαίνει ότι για την φόρτιση των μπαταριών του πλοίου, δεν απαιτείται ειδικός σταθμός φόρτισης στο λιμάνι, ο οποίος θα συνδέεται με κάποιο εθνικό δίκτυο παραγωγής ενέργειας, αλλά αρκεί η συμβατική τάση και αντίστοιχα το ρεύμα φόρτισης του λιμανιού. Συνεπώς, τα πλοία που καλύπτουν αυτή την διαδρομή θα μπορούσαν να αποτελέσουν την αρχή ενός πρωτοποριακού εγχειρήματος, με στόχο η συγκεκριμένη επιλογή να

αποτελέσει την βάση για την κατασκευή στο μέλλον πλήρως ηλεκτρικών επιβατηγών οχηματαγωγών πλοίων στην Ελλάδα.

Αρθρογραφία

1. Byongug Jeong, Hyeonmin Jeon, Seongwan Kim, Jongsu Kim and Peilin Zhou. 2020. Evaluation of the Lifecycle Environmental Benefits of Full Battery Powered Ships: Comparative Analysis of Marine Diesel and Electricity
2. David Wenzhong Gao. 2015. in *Energy Storage for Sustainable Microgrid*
3. Andrea Vezzini. 2014. Lithium ion Battery Management
4. Παπαϊωάννου Γεώργιος. 2018. Δεδομένα AIS. Διπλωματική εργασία
5. Bakirtzoglou Christos. 2017. Techno-economical feasibility study on the retrofit of double-ended Ro/Pax ferries into battery-powered ones. Diploma Thesis
6. G. Ning, B. Haran, and B. N. Popov. 2003. "Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates
7. Oikonomou. 2014. Estimation of annual external health cost of air pollution from ships in the port Peiraeus using the impact pathway analysis.
8. Μανωλάτος Αργύρης. 2008. Μελέτη Ακτοπλοϊκής σύνδεσης νήσου Σαλαμίνας (Πειραιάς-Σαλαμίνα). Διπλωματική εργασία
9. Ρουμπιέν Βασιλική . 2014. Ναυτιλία Μικρών Αποστάσεων κι Ευρωπαϊκή Ένωση. Διπλωματική εργασία
10. Akira Yoshino . 2014. Development of the Lithium-Ion Battery and Recent Technological Trends
11. Bennabi . 2016. Hybrid propulsion systems for small ships: context and challenges
12. Prousalidis, Ioannidis, Fragkopoulos. 2010. Ship energy systems. National Technical University of Athens.

13. Finos Aggelos. 2018. Technical-economical study for the retrofit of passenger ships of “close type” with electric propulsion.

14. DNV.2016. Fuel Consumption of Generators

15. Resmi Suresh, Raghunathan Rengaswamy. 2017. Lithium ion Batteries

Βιβλιογραφία

1.Γεράσιμου Κ.Πολίτη,Καθηγητή ΕΜΠ.2018.ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ 5^η έκδοση

2.Ι.Προυσαλίδης.2012.Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές σε πλοία και πλωτές κατασκευές