



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Τμήμα Ναυτικής Μηχανολογίας

Τίτλος Διπλωματικής:

“ Τεχνο-οικονομική μελέτη για μετατροπή συμβατικού σκάφους υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων (Offshore Support Vessel) σε ηλεκτρικό”

Αγαθοκλής Θανάσης

Επιβλέπων: Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης

Διευθυντής Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας

Ιούλιος 2022

Copyright © ΑΓΑΘΟΚΛΗΣ ΘΑΝΑΣΗΣ, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκάρδια, τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ιωάννη Μ. Προυσαλίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που παρείχε, καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους συναδέλφους και συνεργάτες μου, από την εταιρεία «STREAMLINED Σύμβουλοι Μηχανικοί Ε.Π.Ε.», και ιδιαίτερα τους διαχειριστές αυτής, κύριους Θεόδωρο Παπαθεοδώρου και Σπυρίδων Ευσταθόπουλο, καθώς και τον συνεργάτη τους, Δρ. Ιωάννη Τίγκα, οι οποίοι - σε ένα κλίμα εξαιρετικής κατανόησης και συνεργασίας - με προέτρεψαν να ασχοληθώ με το παρόν θέμα της εργασίας και μου παρείχαν πάσα βοήθεια και διευκρίνηση για να μπορέσω να την ολοκληρώσω.

Επιπλέον, ευχαριστώ ειλικρινά τους συναδέλφους Κωνσταντίνο Θεοχάρη και Ιωάννη Αλεξανδράτο, για τις πολύτιμες πληροφορίες και διασαφηνίσεις που μου έδωσαν, για την περάτωση της συγκεκριμένης μελέτης.

Τέλος, θα ήθελα να πω το μεγαλύτερο και πιο θερμό μου ευχαριστώ, στην οικογένειά μου και την κοπέλα μου, καθώς επίσης και στους φίλους μου, για την αμέριστη στήριξη, συμπαράσταση και υπομονή που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια, τόσο στα πλαίσια των σπουδών όσο και εκτός αυτών.

Σύνοψη

Διανύοντας μια εποχή, όπου η επιβάρυνση του περιβάλλοντος και η κλιματική αλλαγή αποτελούν φλέγοντα ζητήματα, παρατηρούμε ότι όλο και περισσότεροι και αυστηρότεροι κανονισμοί τίθενται επί τάπητος, με σκοπό την απεξάρτησή μας από τον άνθρακα και την μείωση των ρύπων.

Πιο συγκεκριμένα, πλησιάζοντας χρόνο με το χρόνο στο 2050 και το στόχο του IMO για 50% μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σε σχέση με αυτές του 2008, κρίνεται απαραίτητη, από την παγκόσμια ναυτική βιομηχανία, η αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων σε ότι έχει να κάνει με το πετρέλαιο σαν καύσιμο.

Μία τέτοια λύση, που βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στη ναυτιλία, είναι η ηλεκτροπρόωση, καθώς οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε αυτή, αποτελούν συστήματα ενέργειας με υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος, ελάχιστους ρύπους ενώ και η τεχνολογία αυτών συνεχώς εξελίσσεται και βελτιώνεται, καθώς βλέπουμε να εδραιώνεται πλέον σε πολλούς τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία.

Ωστόσο, η χαμηλή ειδική ενέργεια των μπαταριών - σε σχέση με αυτή του πετρελαίου - κάνει την χρήση αυτών ιδανική για πλοία μικρή κλίμακας που λειτουργούν μεταξύ κοντινών αποστάσεων όπως είναι τα μικρά Ε/Γ-ΟΓ, τα ρυμουλκά ή τα σκάφη παράκτιας υποστήριξης (offshore support vessels).

Στην τελευταία κατηγορία ανήκει και το υπό μελέτη σκάφος «OOC NERZ», το οποίο είναι ένα Crew Transfer Vessel (CSV) που λειτουργεί στο Ηνωμένο Βασίλειο και βοηθά στη μεταφορά ανθρώπων, εξειδικευμένου προσωπικού και εξοπλισμού, από το λιμάνι του Barrow-in-Furness μέχρι το θαλάσσιο αιολικό πάρκο Wanley Extension Offshore Wind Farm, το οποίο απέχει περίπου 10.25 ναυτικά μίλια. Πιο συγκεκριμένα, το σκάφος θα πραγματοποιεί ένα ταξίδι ημερησίως, όπου θα παραμένει στο πάρκο για οκτώ ώρες και θα επιστρέφει.

Στην παρούσα εργασία, λοιπόν, διερευνάται κατά πόσο είναι εφικτή από τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής άποψης η μετατροπή του συγκεκριμένου σκάφος από συμβατικό (πρόωση με καύσιμο το πετρέλαιο) σε ηλεκτρικό (πρόωση με μπαταρίες).

Εν κατακλείδι, από τα αποτελέσματα της μελέτης συνεπάγεται πως η μετατροπή του σκάφους σε πλήρως ηλεκτρικό είναι τεχνικά εφικτή, με σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων και των ετήσιων εξόδων λειτουργίας και συντήρησης, ενώ για να είναι οικονομικά βιώσιμη κρίνεται αναγκαία η εξασφάλιση χρηματοδότησης, λόγω του μεγάλου αρχικού κόστους επένδυσης.

Λέξεις κλειδιά: σύστημα μπαταριών, ηλεκτροπρόωση, πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, μπαταρίες ιόντων λιθίου, σκάφος παράκτιας υποστήριξης, OSV, αιολικά πάρκα, εκπομπές πλοίων, αξιολόγηση επένδυσης, IMO, ABS,

Abstract

Living in the era where the environment burden and climate change are burning issues, the regulations concerning decarbonization and emissions reduction are becoming more and more stringent.

More specifically, approaching the year 2050 and the IMO target for 50% reduction of greenhouse gas emissions, compared to those of 2008, it is necessary for the global maritime industry to look for alternatives to the fuel oil.

One such solution, which is now established in many sectors (such as the automotive industry) and becoming more and more applicable in shipping, is the electric propulsion, since the batteries, that are used in these systems, are constantly improving and provide high efficiency with low cost and zero emissions.

However, the low specific energy of batteries - compared to fuel oil - makes their use ideal for small-scale vessels, that can operate between short distances, such as small ferries, tugboats or offshore support vessels (OSV).

The under-study vessel "OOC NERZ", which is a Crew Transfer Vessel (CSV), operating in the United Kingdom, is transporting people, specialized personnel and equipment, from the port of Barrow-in-Furness to Wanley Extension Offshore Wind Farm, which is approx. 10.25 nautical miles away. In particular, the vessel makes one trip per day, during it will stay in the wind farm for eight hours and return.

Therefore, in present thesis, it is investigated whether it is technically, environmentally and economically feasible to convert current vessel from conventional (propulsion with fuel oil) to electric (propulsion with batteries).

In conclusion, the results of the study imply that the conversion of the boat into fully electric is technically feasible, with a significant reduction of emissions and annual operating and maintenance costs, whereas to be economically viable it is necessary to secure funding, due to the large initial investment costs.

Key words: battery ship, electric propulsion, all-electric vessel, Li-Ion batteries, offshore support vessels, OSV, wind farms, ship emissions, investment appraisal, IMO, ABS,

This page is intentionally left blank

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1	Υπόβαθρο της μελέτης.....	14
1.2	Καθορισμός προβλήματος και στόχων	16
1.3	Δομή της εργασίας	17
2.	ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ.....	19
2.1	Ναυτιλία και περιβάλλον	19
2.2	Ατμοσφαιρική ρύπανση	21
2.2.1	Μετριάσμος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης	22
2.3	Διαρροές πλοίων (πετρέλαιο).....	24
2.3.1	Διαχείριση πετρελαιοκηλίδων	25
2.4	Διαρροές επικίνδυνων και επιβλαβών ουσιών (HNS)	27
2.4.1	Διαχείριση διαρροών HNS	27
2.5	Νερό έρματος	29
2.5.1	Διαχείριση νερού έρματος	30
2.6	Απορρίμματα πλοίων και διαχείριση	31
3.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ.....	33
3.1	Τεχνικοί ορισμοί ιδιοτήτων μπαταριών	34
3.1.1	Βασικά στοιχεία μιας μπαταρίας	34
3.1.2	Καταστάσεις μπαταρίας.....	35
3.1.3	Τεχνικοί όροι μπαταριών	36
3.2	«Κλασσικές» μπαταρίες και χημεία κελιών.....	39
3.2.1	Μολύβδου – οξέος.....	39

3.2.2	Νικελίου.....	42
3.2.3	Ιόντων λιθίου	46
4.	ΝΟΜΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	57
4.1	Ορολογία.....	58
4.2	Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος μπαταρίας.....	60
4.3	Σχεδίαση και Ασφάλεια διαμερίσματος μπαταριών	65
5.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΕΡΙΑΣ & ΣΚΑΦΟΥΣ.....	68
5.1	Τοπολογία από την πλευρά του σκάφους	69
5.1.1	Ηλεκτρική τοπολογία Συνεχούς Ρεύματος (Σ.Ρ.).....	69
5.1.2	Ηλεκτρική τοπολογία Εναλλασσόμενου Ρεύματος (Ε.Ρ.).....	70
5.2	Τοπολογία από την πλευρά της στεριάς.....	72
6.	ΠΛΟΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (OFFSHORE SUPPORT VESSELS - OSV).....	75
6.1	Βασικοί τύποι offshore support vessels	76
6.1.1	Σκάφη υποστήριξης κατάδυσης.....	76
6.1.2	Σκάφη υποστήριξης κατασκευαστικών έργων (Offshore Construction Vessels)...	78
6.1.3	Σκάφη για την τοποθέτηση σωλήνων	79
6.2	Συστήματα ελιγμών.....	80
6.3	Κατανάλωση καυσίμων και εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας.....	81
7.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ.....	83
7.1	Φιλοσοφία σχεδίασης.....	83
7.2	Εξισώσεις και παράμετροι του μοντέλου.....	89
7.3	Γενικά στοιχεία σχεδίασης.....	94

7.4	Αποτελέσματα	98
7.5	Εκτίμηση ρύπων.....	103
7.6	Κόστος μετασκευής, λειτουργίας και συντήρησης.....	108
7.7	Οικονομική ανάλυση.....	110
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	114
8.1	Συμπεράσματα.....	114
8.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	115
	Βιβλιογραφία	117

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών μολύβδου - οξέος.....	41
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - καδμίου	43
Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - υδριδίου μετάλλου	43
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - σιδήρου	45
Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - ψευδαργύρου.....	46
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά υπό μελέτη σκάφους.....	84
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά επιλεγθείσας μπαταρίας.....	98
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά επιλεγθέντα κινητήρα.....	99
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά συστήματος μπαταριών	100
Πίνακας 10: Ποσοστό συμμετοχής ενεργειακών τομέων στην παραγωγή ηλ. ρεύματος στο ΗΒ, το 2021.....	104
Πίνακας 11: Αναδιανομή ποσοστών συμμετοχής ηλεκτρικής παραγωγής στο ΗΒ, το 2021	105
Πίνακας 12: Συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλ. ρεύματος από επίγειους σταθμούς.....	106
Πίνακας 13: Συντελεστής εκπομπών ρύπων, για ταχύστροφη Κ.Μ. και γεννήτριες	106
Πίνακας 14:Ετήσιοι τόνοι εκπομπών CO ₂ , SO ₂ , NO _x και PM με τη συμβατική πρόωση.....	107
Πίνακας 15: Ετήσιοι τόνοι εκπομπών CO ₂ , SO ₂ , NO _x και PM με την ηλεκτροπρόωση.....	107
Πίνακας 16: Κόστος συστήματος μπαταριών.....	108
Πίνακας 17: Κόστος ηλεκτροκινητήρων και inverters	108
Πίνακας 18: Κέρδη πώλησης μεταχειρισμένων Κ.Μ και Η/Γ	109
Πίνακας 19: Σύγκριση εξόδων λειτουργίας συμβατικής - ηλεκτροπρόωσης.....	109
Πίνακας 20: Σύγκριση εξόδων συντήρησης συμβατικής - ηλεκτροπρόωσης	110
Πίνακας 21: Οικονομική μελέτη επένδυσης χωρίς χρηματοδότηση με προεξοφλητικό επιτόκιο 6%	111
Πίνακας 22: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 10% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%	111
Πίνακας 23: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 20% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%	111
Πίνακας 24: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 30% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%	112

Πίνακας 25: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 40% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%	112
Πίνακας 26: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 50% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%	113
Πίνακας 27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χωρίς και με χρηματοδότηση για εύρος προεξοφλητικών επιτοκίων.....	113

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροχημικών αντιδράσεων μπαταρίας	34
Εικόνα 2: Χωρητικότητα - κύκλοι μπαταρίας μολύβδου οξέος	39
Εικόνα 3: Αρχή λειτουργίας μπαταριών ιόντων - λιθίου.....	47
Εικόνα 4: Voltage - SoC μπαταριών λιθίου με άνοδο γραφίτη	47
Εικόνα 5: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου – οξείδιο του κοβαλτίου.....	49
Εικόνα 6: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου - οξείδιο του μαγγανίου	50
Εικόνα 7: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου – οξείδιο του νικελίου, μαγγανίου, κοβαλτίου	51
Εικόνα 8: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου - φωσφορικού σιδήρου.....	52
Εικόνα 9: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου - οξειδίου νικελίου, κοβαλτίου, αλουμινίου	53
Εικόνα 10: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου – οξείδιο του τιτανίου	54
Εικόνα 11: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου, σύγκριση τεχνολογιών	55
Εικόνα 12: Ηλεκτρική τοπολογία σκάφους σταθερού ρεύματος	70
Εικόνα 13: Ηλεκτρική τοπολογία σκάφους εναλλασσόμενου ρεύματος	71
Εικόνα 14: Ηλεκτρική τοπολογία στεριάς χαμηλής τάσης.....	72
Εικόνα 15: Ηλεκτρική τοπολογία στεριάς, υψηλής τάσης	73
Εικόνα 16: Ηλεκτρική τοπολογία στεριάς, με ανορθωτή.....	74
Εικόνα 17: Τοποθεσία αιολικού πάρκου και διαδρομή του υπό μελέτη σκάφους	85
Εικόνα 18: Μεταβολή απαιτούμενης χωρητικότητας μεταξύ της φόρτισης στο λιμάνι αναχώρησης καθώς και της ενδιάμεσης φόρτισης.....	94
Εικόνα 19: Απεικόνιση διαθέσιμης ενέργειας και ελάχιστης απαιτούμενης σε περίπτωση βλάβης ενός εκ των συστημάτων μπαταριών	95
Εικόνα 20: Επίδραση του βάθους εκφόρτισης στους μέγιστους κύκλους της μπαταρίας.....	96
Εικόνα 21: Επίδραση διαθέσιμης χωρητικότητας στην τάση της μπαταρίας.....	97
Εικόνα 22: Διαθέσιμοι χώροι για την τοποθέτηση των μπαταριών.....	101
Εικόνα 23: Stacked area chart των ενεργειακών τομέων που συμμετείχαν στην ηλεκτρική παραγωγή του ΗΒ, το 2021	104

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Υπόβαθρο της μελέτης

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η αξιολόγηση του κατά πόσο είναι βιώσιμη και τεχνικά αλλά και από οικονομική άποψη η μετατροπή ενός Offshore Support Vessel (OSV) σε πλήρως ηλεκτρικό.

Ένα πλοίο υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων χαρακτηρίζεται από το πολύ ευέλικτο επιχειρησιακό του προφίλ. Αυτή η ευελιξία συναντάται από τις χαμηλές έως και τις υψηλές ταχύτητες καθώς και κατά την πραγματοποίηση στατικών λειτουργιών. Επιπλέον, συνήθως λειτουργούν σε πιο βαθιά νερά επομένως υπάρχει η ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα καθώς και για πιο εξελιγμένα συστήματα αγκύρωσης που συνεπάγεται και ισχυρότερα βαρούλκα. Ακόμα, πρέπει να είναι ικανά να ανταποκριθούν σε πληθώρα επιχειρησιακών απαιτήσεων όπως καταπολέμηση πυρκαγιάς, διάσωση καθώς και καταπολέμηση της ρύπανσης, συνθέτοντας έτσι ένα πολυλειτουργικό επιχειρησιακό προφίλ.

Επομένως, αυτή η ανάγκη για ευελιξία καθιστούν τα υπεράκτια σκάφη υποστήριξης ένα σημαντικό υποψήφιο για την πλήρη εξηλεκτρισμένη πρόωση καθώς σε αντίθεση με της μηχανές εσωτερικής καύσης, ένας ηλεκτροκινητήρας μπορεί να ανταποκριθεί εξίσου αποδοτικά σε μεγάλο εύρος λειτουργίας. Ακόμα, τα πλήρως εξηλεκτρισμένα σκάφη χαρακτηρίζονται από μηδενικούς ρύπους, ένα ακόμα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα ντιζελοκίνητα σκάφη καθώς όχι μόνο είναι αρκετά φιλικότερα ως προς το περιβάλλον αλλά και με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που γίνονται όλο και πιο αυστηροί με το βάθος των χρόνων, προσφέρουν τη δυνατότητα στον εκάστοτε πλοιοκτήτη να είναι εξασφαλισμένος μελλοντικά όσον αφορά τη συμμόρφωση με αυτούς.

Όπως αναφέρθηκε, στα επόμενα χρόνια αναμένονται όλο και αυστηρότεροι κανονισμοί που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Κάποιοι τέτοιοι κανονισμοί είναι ο δείκτης EEDI (Energy Efficiency Design Index) καθώς και ο δείκτης CII (Carbon Intensity Index) οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το ποσοστό άνθρακα του καυσίμου που καταναλώνεται. Αυτοί οι κανονισμοί πιέζουν όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη για υιοθέτηση εξελιγμένων λειτουργιών και διατάξεων, που στοχεύουν αφενός στην μείωση της κατανάλωσης, για παράδειγμα Flettner

Rotors, Air Lubrication Systems (ALS) αλλά και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όπως για παράδειγμα τα συστήματα δέσμευσης CO₂ (τεχνολογίες Carbon Capture).

Ο ναυτιλιακός κλάδος ήταν ανέκαθεν διστακτικός στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και είναι προφανές ότι η υιοθέτηση της ηλεκτροπρόωσης δε θα πραγματοποιηθεί εν μία νυκτί. Ακόμα και αν το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, συνοδεύεται από τα αρνητικά των μπαταριών που τα τροφοδοτούν. Η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών είναι της τάξης του 1 - 1.5% της αντίστοιχης του τυπικού ναυτιλιακού diesel. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα, όπως για παράδειγμα σε ποντοπόρα σκάφη. Ωστόσο, οι μπαταρίες εξελίσσονται σε άλλους κλάδους (ηλεκτροκίνηση) και μελλοντικά σίγουρα θα υπάρξουν βελτιώσεις στον συγκεκριμένο τομέα.

Συγκεκριμένες εφαρμογές έχουν δείξει ότι ο εξηλεκτρισμός του σκάφους μπορεί να μειώσει και την ενεργειακή κατανάλωση καθώς και τις εκπομπές CO₂, PM, NO_x και SO_x με μειωμένα κόστη συντήρησης. Στις μέρες μας, η ηλεκτροπρόωση συναντά όλο και παραπάνω εφαρμογές κυρίως σε επιβατηγά σκάφη, σε υπεράκτια πλοία υποστήριξης καθώς και ρυμουλκά. Όλες αυτές οι εφαρμογές έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι δεν έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και λειτουργούν σε κοντινές διαδρομές.

1.2 Καθορισμός προβλήματος και στόχων

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής είναι η μετατροπή ενός συμβατικού OSV σε πλήρως εξηλεκτρισμένο. Ο βασικός στόχος είναι η διερεύνηση του κατά πόσο το σύστημα ηλεκτροπρόωσης που επιλέγεται – ο ηλεκτροκινητήρας μαζί με το σύστημα μπαταριών – μπορεί να ανταποκριθεί στο επιχειρησιακό προφίλ του υπό μελέτη σκάφους και το κατά πόσο αυτό είναι οικονομικά βιώσιμο και αν όχι, το ύψος της χρηματοδότησης που απαιτείται.

Η παρούσα μελέτη θα επικεντρωθεί στις επιμέρους τεχνολογίες των σύγχρονων μπαταριών, τα κύρια χαρακτηριστικά των υπεράκτιων πλοίων υποστήριξης, το νομικό και κανονιστικό πλαίσιο που πρέπει να ικανοποιεί ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο σκάφος, το σχεδιασμό της ηλεκτρικής τοπολογίας από την πλευρά του σκάφους αλλά και από την πλευρά της στεριάς.

Η διαστασιολόγηση των κινητήρων θα γίνει έχοντας ως αναφορά τους υπάρχοντες κινητήρες εσωτερικής καύσης που φέρει το σκάφος, ενώ το σύστημα των μπαταριών θα προκύψει με βάση τις ενεργειακές ανάγκες που έχει με βάση το επιχειρησιακό του προφίλ. Κύριο μέλημα είναι η διερεύνηση του κατά πόσο το μέγεθος του συστήματος μπαταριών που θα προκύψει μπορεί να χωρέσει το σκάφος, λαμβάνοντας υπόψη και την περίπτωση βλάβης ενός εξ αυτών που έχει επίδραση στην εναπομένουσα αυτονομία.

Τέλος, το υπό μελέτη σκάφος λειτουργεί στο HB, οπότε και γι' αυτό το σκοπό θα γίνει σύγκριση των εκπομπών που παράγονται κατά τη συμβατική πρόωση σε σχέση με τις αντίστοιχες εκπομπές που παράγονται κατά την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στο κρατικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη σχετικά δεδομένα για το ποσοστό συμμετοχής διαφόρων ενεργειακών πηγών – ορυκτά καύσιμα, αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, βιομάζα – στην παραγωγή αυτή.

Κλείνοντας, η επένδυση αξιολογείται και από οικονομική σκοπιά με βάση τους δείκτες Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV), καθώς και με τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (FNR) και προσδιορίζεται το ύψος της χρηματοδότησης με σκοπό η επένδυση να κρίνεται βιώσιμη.

1.3 Δομή της εργασίας

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- Κεφάλαιο 2: Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι κύριες πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης εξαιτίας της ναυτιλίας. Αρχικά, περιγράφονται οι κύριες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς και οι κύριες μέθοδοι μετριασμού – περιορισμού της. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι διαρροές, κυρίως πετρελαίου, που οφείλονται είτε σε ατυχήματα και η διαχείριση τους καθώς και οι διαρροές επικίνδυνων και επιβλαβών ουσιών (HNS). Ακόμα, αναλύονται οι επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα από την απόρριψη έρματος καθώς και τα μέσα διαχείρισής του. Τέλος, αναλύονται τα κύρια απορρίμματα πλοίων και τα μέσα επεξεργασίας τους.

- Κεφάλαιο 3: Μπαταρίες

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται η αρχή λειτουργίας της μπαταρίας και επιμέρους τεχνικοί ορισμοί των ιδιοτήτων τους που είναι απαραίτητοι στον εκάστοτε αναγνώστη για να κατανοήσει σε βάθος τα χαρακτηριστικά του συστήματος μπαταριών που θα επιλεγεί στην μετατροπή του σκάφους σε πλήρως ηλεκτρικό. Στη συνέχεια, αναλύεται η χημεία και τα πλεονεκτήματα των τριών κύριων τύπων μπαταριών που υπάρχουν στην αγορά, των μολύβδου – οξέος, νικελίου και ιόντων λιθίου και συγκεκριμένα για τις μπαταρίες λιθίου, οι έξι βασικές κατηγορίες τους και πιο αναλυτικά τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα αυτών.

- Κεφάλαιο 4: Νομικό και κανονιστικό πλαίσιο

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο υπάρχον κανονιστικό πλαίσιο με βάση σχετικούς κανονισμούς του ABS, “Use of Lithium-ion Batteries in the Marine and Offshore Industries” (Jan 2022). Οι συγκεκριμένοι κανονισμοί ορίζουν συγκεκριμένες απαιτήσεις που πρέπει να πληροί η σχεδίαση του συστήματος μπαταριών, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή ισχύος, ως πηγή έκτακτης ανάγκης καθώς και απαιτήσεις του συστήματος φόρτισης αλλά και του συστήματος διαχείρισης μπαταριών (BMS). Ακόμα προσδιορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις σχεδίασης αλλά και ασφάλειας που πρέπει να ικανοποιεί το διαμέρισμα που θα τοποθετηθούν οι μπαταρίες το οποίο μελετάται κυρίως από την άποψη της ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς, ένας κίνδυνος που ελλοχεύει στις μπαταρίες ιόντων λιθίου.

- Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός ηλεκτρικής τοπολογίας στεριάς και σκάφους

Στο πέμπτο κεφάλαιο προσδιορίζονται οι βασικές ηλεκτρικές τοπολογίες στην περίπτωση του πλήρους εξηλεκτρισμένου σκάφους. Αυτές είναι η τοπολογία σταθερού ρεύματος (Σ.Ρ.) καθώς και η τοπολογία εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.), όπου στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε η πρώτη. Επιπλέον, αναλύονται και η αντίστοιχες τοπολογίες από την πλευρά της στεριάς, όπου η βασική διάκριση είναι μεταξύ της τοπολογίας εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής/υψηλής τάσης καθώς και εκείνης του σταθερού ρεύματος.

- Κεφάλαιο 6: Πλοία υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων (Offshore Support Vessels – OSV)

Στο έκτο κεφάλαιο, αναφέρονται οι βασικοί τύποι των OSV, τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του συστήματος ελιγμών που πρέπει να ικανοποιούν και συγκεκριμένα το Dynamic Positioning (DP) καθώς και η κατανάλωση καυσίμου που τα χαρακτηρίζει. Τέλος αναφέρονται και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η λύση της μπαταρίας ως κύρια πηγή ενέργειας στις ενεργειακές απαιτήσεις των OSV.

- Κεφάλαιο 7: Φιλοσοφία σχεδίασης

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η φιλοσοφία σχεδίασης της μετατροπής, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη σκάφους, το επιχειρησιακό του προφίλ, οι σχετικές εξισώσεις που θα χρησιμοποιούν για τη διαστασιολόγηση του συστήματος μπαταριών καθώς και τα σχετικά αποτελέσματα, τα οποία αφορούν τον υπολογισμό των μπαταριών, την τοποθέτησή τους, την εκτίμηση των ρύπων καθώς και την οικονομική μελέτη βιωσιμότητας της μετατροπής.

- Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

2. ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

2.1 Ναυτιλία και περιβάλλον

Οι θαλάσσιες μεταφορές είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά αγαθών αξίας δισεκατομμυρίων δολαρίων κάθε ημέρα, αντιπροσωπεύοντας 90% (κατά βάρος) του παγκόσμιου εμπορίου (Walker, 2016). Το 2015, οι εκτιμώμενοι όγκοι του παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου ξεπέρασαν τους 10 δισεκατομμύρια τόνους (Asariotis et al., 2016). Ωστόσο, ο τεράστιος όγκος των παγκόσμιων θαλάσσιων μεταφορών σχετίζεται επίσης με αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον (Byrnolf et al., 2016). Οι θαλάσσιες μεταφορές περιλαμβάνουν εμπορικές μεταφορές εμπορευμάτων (π.χ. εμπορική ναυτιλία) και εμπορικές μεταφορές εκτός φορτίου (π.χ. πλοία, κρουαζιερόπλοια).

Σε αυτό εντάσσονται επίσης στρατιωτικά πλοία, ρυμουλκά και αλιευτικά σκάφη τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το 2016, καταγράφηκαν 1.806.650 θαλάσσια πλοία, συμπεριλαμβανομένων, 778.890 πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου (π.χ. άνθρακας, σπόροι κ.λ.π.), 75.258 γενικού φορτίου (πλοία πολλαπλών χρήσεων), 503.343 πετρελαιοφόρα, 244.274 πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (κοντέινερ), 44.347 δεξαμενόπλοια χημικών, 5950 πορθμεία και επιβατηγά πλοία, και 1800 δεξαμενόπλοια υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Οι πέντε κορυφαίες πλοιοκτήτριες χώρες (Ελλάδα, Ιαπωνία, Κίνα, Γερμανία και Σιγκαπούρη) ελέγχουν περισσότερα από τα μισά παγκόσμια θαλάσσια σκάφη (Asariotis et al., 2016).

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (IMO) χρησιμοποιεί διάφορα μέσα για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από ναυτιλιακές δραστηριότητες. Παρόλο που ο IMO έχει την ευθύνη για την ασφάλεια των παγκόσμιων μεταφορών, έχει επίσης αναγνωρίσει ότι οι θαλάσσιες μεταφορές και οι λιμενικές δραστηριότητες έχουν ακούσιες επιπτώσεις στο περιβάλλον (IMO, 2017a). Πριν από πενήντα χρόνια, ο IMO ξεκίνησε να ανησυχεί όλο και περισσότερο για τους μεγάλους όγκους πετρελαίου που μεταφέρονται δια θαλάσσης σε δεξαμενόπλοια. Η καταστροφή Torrey Canyon το 1967, έριξε 120.000 τόνους αργού πετρελαίου στη θάλασσα, σκοτώνοντας 25.000 θαλάσσια πτηνά και άλλους θαλάσσιους οργανισμούς και κατέδειξε τον παγκόσμιο αντίκτυπο των θαλάσσιων μεταφορών στο περιβάλλον (Wells, 2017).

Στη συνέχεια, ο IMO εισήγαγε τη διεθνή σύμβαση MARPOL για την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση των συνεπειών της ρύπανσης και ατυχημάτων από πλοία, συμπεριλαμβανομένης

της ρύπανσης από συνήθεις εργασίες, όπως ο καθαρισμός δεξαμενών φορτίου και η διάθεση των αποβλήτων μηχανοστασίου. Η MARPOL καλύπτει επίσης τη ρύπανση από χημικά, συσκευασμένα προϊόντα, λύματα, σκουπίδια και ατμοσφαιρική ρύπανση. Άλλη διεθνής νομοθεσία για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των θαλάσσιων μεταφορών περιλαμβάνεται στη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας (UNCLOS), η οποία κυρώθηκε το 1994, μεταξύ άλλων (Gula et al., 2017).

Τα πρώιμα εργαλεία πολιτικής και διαχείρισης για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις θαλάσσιες μεταφορές χρησιμοποίησαν μακροπρόθεσμη παρακολούθηση για να προσδιορίσουν τις σχετικές αλλαγές των επιπτώσεων (Wooldridge, McMullen, & Howe, 1999). Ωστόσο, από το 2000, οι εταιρείες θαλάσσιων μεταφορών και οι λιμενικές εγκαταστάσεις έχουν δημιουργήσει πολλά πλαίσια δεικτών περιβαλλοντικής απόδοσης (Darbra, et al., 2009). Πολλοί λιμένες της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής και οι εταιρείες θαλάσσιων μεταφορών (που περιλαμβάνουν πλοιοκτήτες, λιμάνια, τερματικούς σταθμούς, ναυπηγεία, και ναυτιλιακές εταιρείες) έχουν ήδη υιοθετήσει αυτά τα πλαίσια με στόχο τη βιώσιμη διαχείριση λιμένων (Walker, 2016). Τα πλαίσια περιλαμβάνουν, European Sea Ports Organisation (ESPO) (www.espo.be), EcoPorts, Port Environmental Review System (PERS), PORTOPIA (www.portopia.eu) και το Green Marine Environmental Program (GMEP) (Walker, 2016).

Παρόλο που αυτά τα πλαίσια δεικτών απόδοσης εφαρμόζονται και διαχειρίζονται σε διαφορετικές παγκόσμιες δικαιοδοσίες, έχουν όλα παρόμοιους στόχους για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με βάση τη μέτρηση της περιβαλλοντικής απόδοσης μέσω δεικτών απόδοσης. Οι δείκτες απόδοσης και οι προτεραιότητες για τους πλοιοκτήτες και τα λιμάνια συχνά διαφέρουν, αλλά όλα περιλαμβάνουν, ποιότητα αέρα, ποιότητα νερού, κατανάλωση ενέργειας, εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, θόρυβος (στη θάλασσα και λιμάνια), επιπτώσεις στις τοπικές κοινότητες, σκουπίδια πλοίων και ακτών, εργασίες ανάπτυξης, σκόνης και βυθοκόρησης (Walker et al., 2019).

2.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η θαλάσσια ρύπανση που προέρχεται από τη ναυτιλία επηρεάζει την υγεία του περιβάλλοντος και του ανθρώπου. Οι θαλάσσιες μεταφορές αντιπροσωπεύουν το 33% όλων των εκπομπών που σχετίζονται με το εμπόριο από την καύση ορυκτών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του 3,3% του παγκόσμιου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) (Cristea et al., 2013). Οι εκπομπές εξαρτώνται από τον τύπο του καυσίμου, του κινητήρα και της αποδοτικότητας αυτού (Pham & Nguyen, 2015). Περίπου το 70% των συμβατικών ρύπων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου συμβαίνουν 400 χλμ. από την ξηρά (Endresen et al., 2003). Οι συμβατικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι περιλαμβάνουν οξείδια του θείου (SO_x), οξείδια του αζώτου (NO_x), σωματιδιακή ύλη (PM), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και αιθάλη (Eyring et al., 2010). Σύμφωνα με τους Lindstad και Eskeland (2016), οι θαλάσσιες μεταφορές αντιπροσωπεύουν το 10% –15% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών SO_x και NO_x. Τα υψηλά επίπεδα SO_x και NO_x προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα, σχηματίζουν αιθαλομίχλη, αυξάνουν την οξύτητα των ωκεανών και συνδυάζονται με άλλες ατμοσφαιρικές χημικές ουσίες. Είναι αξιοσημείωτο, ότι οι παγκόσμιες εκπομπές από τη ναυτιλία συνδέονται με χιλιάδες καρκίνους του πνεύμονα και καρδιοπνευμονικές παθήσεις (Walker et al., 2019).

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που περιλαμβάνουν CO₂, μεθάνιο (CH₄) και οξείδιο του αζώτου (N₂O), από τις θαλάσσιες μεταφορές, συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια ανθρωπογενή ατμοσφαιρική ρύπανση (Endresen et al., 2003). Το 2012, οι συνολικές εκπομπές της ναυτιλίας αντιστοιχούσαν σε 961 εκατομμύρια τόνους CO₂. Οι Wallington και Wiesen (2014) υπολόγισαν ότι 0.022 Gg N₂O – N / έτος εκπέμπονται από τις θαλάσσιες μεταφορές το 2010 και αναμένεται να αυξηθεί κατά ~ 20% έως το 2030. Οι χύδην μεταφορείς, τα πετρελαιοφόρα και τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι υπεύθυνα για τις περισσότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που προέρχονται από τη ναυτιλία, με ταχύτερα πλοία να εκπέμπουν λιγότερο CO₂ από τα πιο αργά. Ενώ τα καύσιμα Heavy fuel oil (HFO) και Marine Diesel Oil (MDO) εκπέμπουν παρόμοια επίπεδα ρύπων αερίων θερμοκηπίου, το LNG μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά ~ 25%, αλλά έχει υψηλότερες εκπομπές CH₄, το οποίο είναι ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου (Winnes & Fridell, 2009). Παρ'όλα αυτά, το LNG θεωρείται ένα αναπτυσσόμενο καύσιμο θαλάσσιας μεταφοράς (Walker et al., 2019).

2.2.1 Μετριασμός της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Οι στρατηγικές για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου από τις θαλάσσιες μεταφορές επικεντρώθηκαν στη μείωση των εκπομπών μέσω προσαρμογής (Lindstad & Strømman, 2011). Οι Winebrake, Corbett και Meyer (2007) ανέπτυξαν ένα μοντέλο αξιολόγησης κύκλου ζωής για τον ποσοτικό προσδιορισμό των εκπομπών σε ολόκληρη την οδό καυσίμου για αέρια του θερμοκηπίου και άλλους ρύπους, για να προσδιορίσουν τις επιπτώσεις των εναλλακτικών καυσίμων. Τα μέσα πολιτικής που έχουν εφαρμοστεί για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου περιλαμβάνουν ελέγχους εκπομπών, εθελοντικές συμφωνίες, φορολογία και εμπορεύσιμες άδειες, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί άλλοτε με επιτυχία και άλλοτε με όχι και τόσο. Ωστόσο, η έρευνα δείχνει ότι οι συμπληρωματικές πολιτικές, ειδικά οι στόχοι μείωσης των βαριά επιβλαβών εκπομπών και τα συστήματα τιμολόγησης άνθρακα, παρέχουν ευκαιρίες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Walker et al., 2019).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να μειωθούν ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες, λειτουργικούς ελέγχους και στρατηγικές που βασίζονται στην αγορά. Η αντικατάσταση παλαιών συστημάτων κινητήρα, η μετάβαση σε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) - μέθοδος καθαρισμού καυσαερίων - αποδεικνύεται ότι βελτιώνουν την περιβαλλοντική απόδοση των πλοίων/σκαφών, μειώνοντας τις εκπομπές NO_x κατά ~ 95%. Οι επιχειρησιακοί έλεγχοι για τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία περιλαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια στην ξηρά, βελτιωμένα πρότυπα καυσίμων για βοηθητικούς κινητήρες, χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και προγράμματα εθελοντικής μείωσης ταχύτητας (Han, 2010). Η ηλεκτρική ενέργεια από τα λιμάνια επιτρέπει στα πλοία να σβήσουν τους βοηθητικούς κινητήρες και να συνδέονται με αυτούς στα λιμάνια για τη μείωση των εκπομπών.

Οι αυστηροί στόχοι εκπομπών του IMO έχουν αυξήσει τη ζήτηση για καύσιμα υψηλής ποιότητας. Ένα από αυτά είναι και το LNG, του οποίου η χρήση, ως το κύριο καύσιμο θαλάσσιων μεταφορών, αυξάνεται συνεχώς καθώς μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές, αλλά είναι δύσκολη λόγω των πιθανοτήτων υπερθέρμανσης του πλανήτη, των κινδύνων ασφάλειας, των κανονισμών, της έλλειψης υποδομής και του κόστους μιας τέτοιας επένδυσης.

Ο IMO είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των συμβατικών αερίων που προκύπτουν από τις θαλάσσιες μεταφορές. Το παράρτημα VI της MARPOL εγκρίθηκε για πρώτη φορά το 1997 και τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005, ορίζοντας όρια για τα SO_x, NO_x και απαγορεύοντας τις σκόπιμες εκπομπές ουσιών των πλοίων που καταστρέφουν το όζον (Walker et al., 2019).

Το παράρτημα VI της MARPOL εισήγαγε δύο υποχρεωτικούς μηχανισμούς το 2011 για την ενεργειακή απόδοση και τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, που περιλαμβάνουν τον Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) και το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων (SEEMP). Το EEDI ορίζει υποχρεωτικά όρια ενεργειακής απόδοσης για νέα πλοία, ενώ το SEEMP συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Το 2016, ο IMO συμφώνησε να αναπτύξει μια στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις θαλάσσιες μεταφορές, η οποία εξετάζει διαφορετικές βραχυπρόθεσμες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες δράσεις. Οι συμφωνίες σχετικά με τη στρατηγική αναμένονταν το 2018, με μια αναθεώρηση που έχει οριστεί για το 2023, με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ναυτιλίας να υποστηρίζει κάθε εργαλείο μείωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου του IMO (Air Emissions | World Shipping Council, 2021).

Αυτοί οι κανονισμοί εφαρμόστηκαν για να διασφαλιστεί η μείωση των εκπομπών CO₂ από τις θαλάσσιες μεταφορές, περιορίζοντας έτσι τον αντίκτυπο του κλάδου στην κλιματική αλλαγή. Όλο και περισσότερο, διαφορετικές παγκόσμιες δικαιοδοσίες λαμβάνουν μέτρα για τη ρύθμιση και τη μείωση των εκπομπών από τις θαλάσσιες μεταφορές. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ανακοίνωσε τους δικούς της στόχους εκπομπών, όπου τα μεγάλα πλοία θα πρέπει να αναφέρουν τις ετήσιες εκπομπές τους καθώς και τη μείωση του 40% των επιπέδων του 2005 έως το 2050 (Walker et al., 2019).

2.3 Διαρροές πλοίων (πετρέλαιο)

Οι πετρελαιοκηλίδες (συμπεριλαμβανομένων βενζίνης, ντίζελ, καυσίμων και ακατέργαστου αργού πετρελαίου) παραμένουν μεταξύ των υψηλότερων περιβαλλοντικών καταστροφών παγκοσμίως (Höfer, 1998). Ενώ η μεταφορά πετρελαίου ευθύνεται μόνο για το 12% όλων των πετρελαιοκηλίδων παγκοσμίως, περίπου τα δύο τρίτα από αυτά προέρχονται από θαλάσσια σκάφη (Burrgher, 2007). Ενώ όλα τα προϊόντα πετρελαίου μεταφέρονται ως φορτίο, τα καύσιμα είναι η κύρια πηγή ενέργειας των πλοίων. Οι απορρίψεις από ατύχημα οφείλονται κυρίως σε ανθρώπινο σφάλμα ή σε κάποια τεχνική βλάβη (π.χ. εκρήξεις), ενώ οι λειτουργικές απορρίψεις προκαλούνται εκ προθέσεως, από αμέλεια ή εσκεμμένη παραβίαση διεθνών συμβάσεων. Από τις 459 «μεγάλες» διαρροές (> 700 τόνους) μεταξύ 1960 και 2016, περισσότερες από τις μισές σημειώθηκαν τη δεκαετία του 1970 και μόνο 44 (<10%) από το 2000 (Walker et al., 2019).

Μόλις υπάρξουν διαρροές, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του πετρελαίου υφίστανται αποσάθρωση, διάλυση, οξειδωση και πτητικοποίηση με αποτέλεσμα διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η κυματική δράση ενσωματώνει το πετρέλαιο στην επιφάνεια του νερού, ενώ οι ήρεμες συνθήκες επιτρέπουν την εξάπλωση των πετρελαιοκηλίδων σε επιφανειακά νερά και ακτές. Η διασπορά πετρελαίου είναι μεγαλύτερη για μεσαίου βαθμού προϊόντα πετρελαίου (π.χ. βενζίνη), τα οποία εξατμίζονται γρήγορα σε σύγκριση με πυκνά, βαριά πετρέλαια, τα οποία παραμένουν περισσότερο στο περιβάλλον και βυθίζονται μέσω του νερού σε ιζήματα (Walker et al., 2019).

Οι πετρελαιοκηλίδες αποτελούν τη μεγαλύτερη απειλή για τα θαλάσσια πτηνά και τα θαλάσσια θηλαστικά, ρυπαίνοντας το δέρμα ή τα φτερά τους. Η σοβαρότητα των πετρελαιοκηλίδων στους θαλάσσιους οργανισμούς εξαρτάται από τον τύπο του πετρελαίου, την οδό έκθεσης και τον βαθμό αποσάθρωσης. Το πετρέλαιο βλάπτει τους θαλάσσιους οργανισμούς μέσω της οξείας τοξικότητας, των θανατηφόρων επιπτώσεων στην υγεία μειώνοντας την φυσική κατάσταση των θαλάσσιων κοινοτήτων (NRC, 2003) Οι παχύτερες λιπαντικές ουσίες προκαλούν τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική βλάβη (French-McCay et al., 2004). Η κατάποση (μέσω θήρας) ή η εισπνοή τοξικών προϊόντων πετρελαίου έχει αρνητικές επιπτώσεις στα πεπτικά, αναπνευστικά και κυκλοφοριακά συστήματα θηλαστικών ή πτηνών.

Τα θαλάσσια πτηνά επηρεάζονται σοβαρά από πετρελαιοκηλίδες και συχνά αυτό δεν αναφέρεται σε κάποια αρχή. Για κάθε πτηνό που έχει μολυνθεί με πετρέλαιο και έχει βρεθεί, εκτιμάται ότι έως

και 10 φορές περισσότερα πτηνά μπορεί να πεθάνουν λόγω των επιπτώσεων από πετρελαιοκηλίδες, αλλά δεν βρέθηκαν ποτέ. Τα συγκεκριμένα πτηνά βουτούν για τροφή, περνώντας έτσι μέσα από πετρελαιοκηλίδες, οι οποίες απορροφούνται εύκολα από τα φτερά τους, οι οποίες στη συνέχεια τα μολύνουν. Ακόμη και μικρές ποσότητες επιφανειακού πετρελαίου παρεμβαίνουν στη φυσική στεγανοποίηση και στις μονωτικές ιδιότητες των φτερών των πουλιών. Το πετρέλαιο που υπάρχει στα φτερά μπορεί επίσης να μεταφερθεί σε αυγά με αποτέλεσμα μειωμένο πάχος κελύφους και κακή επιτυχία αναπαραγωγής (Vidal & Domínguez, 2015).

Τα ψάρια και τα αυγά διατρέχουν ακόμη μεγαλύτερο κίνδυνο από την έκθεση στο πετρέλαιο, καθώς μικρά μόρια διαλύονται στο νερό και καθίστανται βιοδιαθέσιμα. Τα βαρύτερα μόρια (π.χ., πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες - PAHs) συσσωρεύονται στα ιζήματα, με τα δίθυρα να χρησιμοποιούνται συνήθως ως βιοδείκτες για μόλυνση με PAHs σε παράκτιες περιοχές (π.χ. Walker & MacAskill, 2014). Τα ιζήματα που επηρεάζονται από τους PAH μπορεί να είναι μεγαλύτερα από την οπτική εξάπλωση του πετρελαίου στην επιφάνεια του νερού (NRC, 2003). Προηγούμενοι έλεγχοι των λεπτόκοκκων ιζημάτων δείχνουν ότι οι πετρελαιοκηλίδες μπορούν να οδηγήσουν στην ολική κατάρρευση των υπαρχουσών βενθικών κοινοτήτων (η οικολογική περιοχή στο πιο χαμηλό επίπεδο ενός υδατικού οικοσυστήματος). Οι παλιρροιακοί ύφαλοι επηρεάζονται περισσότερο αρνητικά από τους παράκτιους υφάλους λόγω των διπλών επιδράσεων από τις επιφανειακές πετρελαιοκηλίδες και τους διαλυμένους ρύπους σε όλη την επιφάνεια του νερού (Walker et al., 2019).

2.3.1 Διαχείριση πετρελαιοκηλίδων

Ήταν σχετικά λίγα γνωστά για τις τοξικές επιδράσεις του πετρελαίου το 1967, όταν συνέβη η πρώτη μεγάλη καταστροφή δεξαμενόπλοιου, με το SS Torrey Canyon να ναυαγεί στις δυτικές ακτές της Αγγλίας (Wells, 2017). Έκτοτε, έχουν σημειωθεί μεγαλύτερες πρόοδοι στην κατανόηση των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Παρά τις εκτεταμένες μειώσεις ψαριών και θαλάσσιων πτηνών μετά από μεγάλες πετρελαιοκηλίδες, λίγες μελέτες έχουν πραγματοποιήσει δοκιμές τοξικότητας του σύγχρονου μαζούτ. Η χρήση της τεχνολογίας για τη χαρτογράφηση και την πρόβλεψη των επιπτώσεων των μελλοντικών διαρροών έχει επίσης αναπτυχθεί. Αρκετά μοντέλα βάσεων δεδομένων έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων των διαρροών (Kontovas et al., 2010). Τα μοντέλα διαφέρουν, αλλά όλα λαμβάνουν υπόψη τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά των ουσιών που

έχουν διαρρεύσει στο περιβάλλον, τη γεωγραφική θέση μιας διαρροής, καθώς και την αξιολόγηση των κλιματικών, ατμοσφαιρικών και ωκεάνιων δεδομένων διανομής για την προβολή της εξάπλωσης μιας διαρροής (Marta-Almeida et al., 2013).

Αυτά τα μοντέλα υποβοηθούνται από υπερφασματικούς δορυφόρους απεικόνισης που επιτρέπουν λεπτομερή αναγνώριση και παρακολούθηση διαρροών. Η ευαίσθητη δορυφορική απεικόνιση μπορεί να κάνει διάκριση μεταξύ διαφορετικών βαθμών πετρελαίου, ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις (Klernas, 2010). Οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται επίσης στον Καναδά, τις ΗΠΑ και τη Γαλλία για την παρακολούθηση των παράνομων απορρίψεων πετρελαίου. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν κενά στην επιβολή κυρώσεων, που επιτρέπουν τη συνέχιση των παράνομων δραστηριοτήτων, εξοικονομώντας μεταξύ 80.000 και 220.000 δολαρίων ανά πλοίο, ή 5% –12% των μέσων λειτουργικών εξόδων των δεξαμενόπλοιων (Vollaard, 2017). Τα μοντέλα πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποιούνται επίσης ως εργαλείο για την εκτίμηση κινδύνων και τον σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης (Marta-Almeida et al., 2013). Ο IMO εδώ και περισσότερο από 10 χρόνια έχει ξεκινήσει να συμπεριλαμβάνει την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού κινδύνου ως επίσημο κριτήριο στο εργαλείο επίσημης αξιολόγησης της ασφάλειας, το οποίο ιστορικά επικεντρώθηκε αποκλειστικά στο οικονομικό κόστος της άμβλυνσης των περιβαλλοντικών ζημιών (Kontovas et al., 2010).

Παρά την ικανότητά και την αδημονία ώστε να αναπτυχθεί μια τεχνολογία για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων, η φυσική ανάκαμψη συνήθως παραμένει η καλύτερη στρατηγική αποκατάστασης σε όλα εκτός από τα πιο εύθραυστα οικοσυστήματα. Οι βιοτικές κοινότητες τείνουν να αποκαθίστανται, ωστόσο οι προσπάθειες αποκατάστασης ενδέχεται να διακόψουν τις διαδικασίες φυσικής ανάκαμψης. Η τεχνολογία και οι κανονισμοί έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά εργαλεία για την πρόληψη διαρροών (Burgher, 2007). Συνολικά, τα διεθνή προληπτικά μέτρα με τη μορφή κανονισμών και πολιτικών είναι οι πιο αποτελεσματικές δράσεις για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων (Wells, 2017).

2.4 Διαρροές επικίνδυνων και επιβλαβών ουσιών (HNS)

Από τα 37 εκατομμύρια χημικά που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως, 2000 από αυτά μεταφέρονται τακτικά δια θαλάσσης (IMO, 2009). Περίπου το 10% –15% του θαλάσσιου φορτίου θεωρείται επικίνδυνο και ο όγκος έχει τριπλασιαστεί τα τελευταία 20 χρόνια. Ωστόσο, ο ορισμός του τι συνιστά HNS εξαρτάται από το διεθνές πρωτόκολλο ή την κατευθυντήρια γραμμή που εξετάζεται. Για παράδειγμα, η Διεθνής Σύμβαση για την ετοιμότητα, την απόκριση και τη συνεργασία για τη ρύπανση από το πετρέλαιο (OPRC), ως HNS ορίζει φορτία όπως άνθρακα, τσιμέντο, διάφορα μεταλλεύματα και σιτηρά, ενώ η Σύμβαση HNS περιλαμβάνει μη ανθεκτικά δυλισμένα ορυκτέλαια (Walker et al., 2019).

Λόγω της ετερογένειας τους, τα HNS έχουν προκαλέσει ανησυχίες μεταξύ μηχανικών περιβάλλοντος και επιστημόνων λόγω των πιθανών κινδύνων τους για τους υδρόβιους οργανισμούς και των συναφών κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων. Τα θαλάσσια ατυχήματα μπορεί να οδηγήσουν σε χημικές πυρκαγιές, εκρήξεις ή τοξικές διαρροές, προκαλώντας σοβαρή επιδείνωση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι επιπτώσεις των διαρροών HNS στο θαλάσσιο περιβάλλον εξαρτώνται από την ποσότητα και τη φύση της χημικής ουσίας που «χύνεται» και τη θέση της διαρροής, αλλά δεν έχουν ακόμη αποδειχθεί πλήρως (Rocha, et al., 2015).

2.4.1 Διαχείριση διαρροών HNS

Ο διεθνής κώδικας επικίνδυνων εμπορευμάτων (IMDG), που αναπτύχθηκε από τον IMO, ορίζει ελάχιστες απαιτήσεις ή πρότυπα για τη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων (Iliyas & Mohan, 2021). Με βάση την επικίνδυνη φύση των χημικών, ταξινομεί τα επικίνδυνα προϊόντα σε εννέα κύριες κατηγορίες: εκρηκτικά, αέρια, εύφλεκτα υγρά, εύφλεκτα στερεά, οξειδωτικά και οργανικά υπεροξειδία, τοξικές και μολυσματικές ουσίες, ραδιενεργό υλικό, διαβρωτικές ουσίες και διάφορες επικίνδυνες ουσίες (IMO, 2015β). Ωστόσο, μια μεγάλη ποικιλία χημικών ουσιών που εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες εμπίπτουν σε αυτές τις κατηγορίες HNS, καθιστώντας τα πρωτόκολλα έκτακτης ανάγκης διαρροής HNS λιγότερο απλά όπως αυτά που υιοθετήθηκαν για τις πετρελαιοκηλίδες (Radovic et al., 2012).

Οι χημικές ουσίες μπορούν να παρουσιάσουν διάφορες συμπεριφορές, αλληλεπιδράσεις και πιθανές επιπτώσεις στη χλωρίδα, την πανίδα και την ανθρώπινη υγεία όταν απελευθερώνονται στο θαλάσσιο περιβάλλον (Iliyas & Mohan, 2021).

Ωστόσο, το πρωτόκολλο OPRC HNS παρέχει ένα πλαίσιο διεθνούς συνεργασίας σε περίπτωση σημαντικών περιστατικών ή απειλών θαλάσσιας ρύπανσης από το HNS. Το πρωτόκολλο OPRC-HNS ακολουθεί τις ίδιες αρχές με τη σύμβαση OPRC και καλεί τα συμβαλλόμενα κράτη να αναπτύξουν και να διατηρήσουν επαρκή ικανότητα αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης ρύπανσης από το HNS.

Πιο συγκεκριμένα, αυτό το νομοθετικό μέτρο διασφαλίζει ότι υπάρχουν εθνικά και περιφερειακά συστήματα ετοιμότητας και αντίδρασης, διασφαλίζοντας ότι τα πλοία που μεταφέρουν επικίνδυνα και επιβλαβή υγρά φορτία έχουν σχέδια έκτακτης ανάγκης επάνω στο πλοίο και ενισχύουν τη διεθνή συνεργασία για την αντιμετώπιση της ρύπανσης. Σημαντικό ζήτημα στη διαχείριση διαρροών HNS είναι ειδικά προγράμματα παρακολούθησης που έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν ουσιαστικά αποτελέσματα για να βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Επειδή είναι δύσκολο να εντοπιστεί μια άμεση συσχέτιση μεταξύ έκθεσης και αποτελέσματος για πολλά HNS, απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση η οποία περιλαμβάνει τη συνεχή συλλογή δειγμάτων για τον καθορισμό βασικών γραμμών και τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση μετά από συμβάντα (Kirby & Law, 2010).

2.5 Νερό έρματος

Το θαλάσσιο νερό άρχισε να χρησιμοποιείται σαν έρμα κατά δεκαετία του 1850 ως εναλλακτική λύση για το ξηρό έρμα (Davidson & Simkanin, 2012). Έκτοτε, οι θαλάσσιες μεταφορές έχουν αυξηθεί ραγδαία, με περίπου 51.400 εμπορικά πλοία να εμπορεύονται παγκοσμίως και 3-5 δισεκατομμύρια τόνοι έρματος να μεταφέρονται από αυτά ετησίως (The Maritime Executive, 2015). Αυτό αυξάνει τους κινδύνους εισαγωγής υδρόβιων χωροκατακτητικών ειδών (AIS) μετά την απόρριψη του μη επεξεργασμένου έρματος των πλοίων, δημιουργώντας σημαντικές απειλές για την παγκόσμια βιοποικιλότητα (Asariotis et al., 2016).

Το νερό έρματος είναι πλέον ένας από τους πιο σημαντικούς φορείς της εισαγωγής AIS και σχετίζεται με περίπου το ένα τρίτο των τεκμηριωμένων εισβολών παγκοσμίως (Davidson & Simkanin, 2012). Οι περισσότερες πρωτογενείς και δευτερογενείς εισβολές των AIS συμβαίνουν μέσω ανταλλαγής υδάτων έρματος στο λιμάνι, με τα πλοία να ταξιδεύουν και να διασκορπίζουν το έρμα τους σε διεθνή, εθνικά και τοπικά ύδατα. Το θαλάσσιο έρμα αποτελεί βασικό στοιχείο για τη διασφάλιση της ευστάθειας των πλοίων, της ασφαλούς πλεύσης και της δομικής ακεραιότητας, καθώς το έρμα επιτρέπει στα πλοία να προσαρμόζονται το βύθισμά τους και ως εκ τούτου το εκτόπισμά τους στα εκάστοτε λιμάνια (Walker, 2016).

Η μεταφορά και η εξάπλωση των υδρόβιων χωροκατακτητικών ειδών μπορεί να έχει σημαντικές οικονομικές, οικολογικές και ανθρώπινες επιπτώσεις στην υγεία (Bailey, 2015).

Ένα τέτοιο παράδειγμα, αποτελεί η εισαγωγή του Comb Jelly (*Mnemiopsis leidyi*) στη Μαύρη και την Αζοφική Θάλασσα, η οποία θεωρείται ότι προκάλεσε σημαντικές μειώσεις στην εμπορική αλιεία γαύρου με εκτιμώμενες απώλειες 16,8 εκατομμυρίων δολαρίων (Bailey, 2015).

Το νερό έρματος έχει επίσης συσχετιστεί με την εξάπλωση της επιδημίας χολέρας (*Vibrio cholera* 01) από τη Νότια Αμερική στις Ηνωμένες Πολιτείες (Ruiz et al., 2000).

Ανησυχία προκαλεί, επίσης, η Αρκτική, λόγω της αλλαγής του κλίματος. Καθώς λιώνουν οι θαλάσσιοι πάγοι, παρουσιάζονται νέες ναυτιλιακές διαδρομές μέσω αυτής, γεγονός που αυξάνει την κυκλοφορία και κατά συνέπεια την πίεση διάδοσης των AIS μέσω του έρματος.

Επομένως, η διαχείριση του έρματος στην Αρκτική απαιτεί σημαντική προσοχή, καθώς γίνεται πιο ευαίσθητη σε διεισδυτικά είδη (Bailey, 2015).

2.5.1 Διαχείριση νερού έρματος

Η ρύθμιση του θαλάσσιου έρματος ξεκίνησε το 1989 όταν ο Καναδάς εισήγαγε κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση έρματος σε πλοία που ταξιδεύουν στις Μεγάλες Λίμνες και στο St. Lawrence Seaway (Transport Canada, 2010). Το νερό έρματος στον Καναδά διαχειρίζεται πλέον από τους κανονισμούς ελέγχου και διαχείρισης του έρματος (Transport Canada, 2017, SOR / 2011 237). Συγκεκριμένα, απαιτείται από όλα τα πλοία που εισέρχονται στη χώρα να ανταλλάσσουν το νερό έρματος τους εκτός της ΑΟΖ σε νερό βάθους 2000 μέτρων (δηλαδή, ανταλλαγή μέσω ωκεανών - mid-ocean exchange [MOE]). Υπάρχουν, ωστόσο, και εξαιρέσεις για λόγους ασφαλείας (ανοικτή θάλασσα, καταιγίδες), όπου είναι αποδεκτή μια εναλλακτική τοποθεσία ανταλλαγής νερού έρματος. Επιπλέον, τα πλοία που χρησιμοποιούνται για επιχειρήσεις αναζήτησης και διάσωσης ή σκάφη αναψυχής, μήκους <50 m και μέγιστης χωρητικότητας νερού έρματος τα 8 κυβικά, εξαιρούνται από τους κανονισμούς για το θαλάσσιο έρμα (Walker et al., 2019).

Το MOE είναι η πιο κοινή μέθοδος επεξεργασίας νερού έρματος (Lo, et al., 2012). Η ανταλλαγή νερού έρματος λιμένα στον ανοιχτό ωκεανό θεωρείται ότι εξαλείφει τα είδη που κατοικούν στο έρμα εκθέτοντάς τα σε διαφορετική αλατότητα, προκαλώντας έτσι θνησιμότητα λόγω όσμωσης (Lo et al., 2012). Η τεχνική MOE για την επεξεργασία του έρματος μπορεί να έχει εκτιμώμενη αποτελεσματικότητα 97% –99% για τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και τα δεξαμενόπλοια (Bailey, 2015). Ωστόσο, η πιθανότητα επιβίωσης οργανισμών από την ανταλλαγή νερού έρματος εξαρτάται από τα ύδατα προέλευσης και από πού απορρίπτονται. Ελλείψει μεγάλων διαφορών αλατότητας μεταξύ των υδάτων υποδοχής και των υδάτων απόρριψης, οι οργανισμοί ενδέχεται να είναι σε θέση να επιβιώσουν από το MOE. Επιπλέον, ορισμένοι οργανισμοί έχουν ένα ευρύ φάσμα ανοχών αλατότητας.

Το 2004, ο IMO υιοθέτησε τη Διεθνή Σύμβαση για τον Έλεγχο και τη Διαχείριση του Έρματος και των Ιζημάτων των Πλοίων (Σύμβαση BWM) η οποία εισήγαγε κανονισμούς που ελέγχουν τις λειτουργίες των υδάτων έρματος διεθνώς. Η Σύμβαση BWM θα απαιτεί από όλα τα σκάφη που λειτουργούν διεθνώς να διαχειρίζονται το θαλάσσιο έρμα και τα ιζήματά τους, το οποίο θα περιλαμβάνει τη διατήρηση βιβλίου αρχείων έρματος και του Διεθνούς Πιστοποιητικού Διαχείρισης Έρματος (IMO, 2016b).

Άλλα προγράμματα διαχείρισης, όπως η Green Marine, ενθαρρύνουν τους πλοιοκτήτες να δοκιμάσουν ή να εγκαταστήσουν συστήματα επεξεργασίας στα σκάφη τους (Walker, 2016). Το πρόγραμμα GloBallast (GBP), αποτελεί ένα εργαλείο διαχείρισης έρματος που ξεκίνησε από τον IMO και τέθηκε σε εφαρμογή το 2007 για να βοηθήσει τις αναπτυσσόμενες χώρες να μειώσουν την επιβλαβή μεταφορά υδρόβιων οργανισμών στο νερό έρματος των πλοίων, με εθνική, πολιτική, νομική και θεσμική μεταρρύθμιση.

Ωστόσο, σε σύγκριση με τους κανονισμούς έρματος του Καναδά, οι διεθνείς κανονισμοί δεν επιτυγχάνουν την προληπτική αποτελεσματικότητα στον περιορισμό της μεταφοράς των AIS.

2.6 Απορρίμματα πλοίων και διαχείριση

Οι ωκεανοί σε όλο τον κόσμο πλήττονται από την περιβαλλοντική υποβάθμιση λόγω της ρύπανσης μέσω απορριμμάτων που προκαλούν τα πλοία. Ο IMO χρησιμοποιεί διάφορα μέσα για τη διαχείριση αποβλήτων που παράγονται από τα πλοία στη θάλασσα (De La Fayette, 2009).

Ειδικότερα, τα απόβλητα των πλοίων νομοθετούνται, πλέον, μέσω της MARPOL 73/78, του παραρτήματος III-Επικίνδυνα απόβλητα και V-Garbage, και της Διεθνούς Διαχείρισης Ασφάλειας (ISM).

Είναι αξιοσημείωτο, ότι τα κρουαζιερόπλοια που μεταφέρουν περίπου 3000 επιβάτες παράγουν 70 τόνους στερεών αποβλήτων / εβδομάδα (Butt, 2007).

Τα απόβλητα αυτά περιλαμβάνουν: δοχεία από γυαλί, μέταλλο και πλαστικά, οργανικά απόβλητα, απορρίμματα χαρτονιού και χαρτιού, λιπαρά υγρά, απόβλητα και επικίνδυνα απόβλητα (π.χ. μπαταρίες, επιβλαβή υγρά, απορρίμματα χρωμάτων, φαρμακευτικά προϊόντα) (Zuin et al., 2009).

Τα ανακυκλώσιμα συχνά διαχωρίζονται και αποθηκεύονται για απόρριψη στα λιμάνια ή υποβάλλονται σε επεξεργασία επί του σκάφους (π.χ. θράυση γυαλιού) (Butt, 2007).

Τα οργανικά στερεά απόβλητα (π.χ. χαρτί, χαρτόνι, απόβλητα τροφίμων) αποτεφρώνονται στη θάλασσα και η προκύπτουσα τέφρα μπορεί να απορρίπτεται στον ωκεανό (Zuin et al., 2009) όταν επιτρέπεται (MARPOL 73/78) ή να αποθηκεύεται για απόρριψη (Butt, 2007).

Έτσι, η σωστή εγκατάσταση και λειτουργία εγκαταστάσεων υποδοχής αποβλήτων που παράγονται από πλοία διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Encheva, 2015).

Τα τρόφιμα είναι συχνά η μεγαλύτερη ροή αποβλήτων στα πλοία, αλλά επειδή τα απόβλητα τροφίμων μπορούν να απορρίπτονται απευθείας στη θάλασσα, πολλά από τα συστατικά τους μπορούν να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στα παράκτια ύδατα. Τα απόβλητα τροφίμων που προέρχονται από πλοία μπορούν να μειώσουν την ποιότητα του νερού και των ιζημάτων, να καταστρέψουν τους θαλάσσιους βιοτόπους, να αυξήσουν τη θολότητα και τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών. Αυτές οι αρνητικές επιπτώσεις έχουν οδηγήσει στον περιορισμό της διάθεσης απορριμμάτων τροφίμων στη θάλασσα. Η MARPOL 73/78 περιγράφει αυτούς τους περιορισμούς απόρριψης απορριμμάτων τροφίμων, θέτοντας ελέγχους στην παράκτια διάθεση και θεσπίζοντας κανονιστικές απαγορεύσεις.

Περιορισμοί διάθεσης απορριμμάτων τροφίμων ισχύουν εντός του Great Barrier Reef, εντός 12 ναυτικών μιλίων γης σε ειδικές περιοχές (εκτός της Καραϊβικής), και εντός 3 ναυτικών μιλίων γης σε όλες τις άλλες περιοχές (Polglaze, 2003).

Τα πλαστικά απόβλητα είναι επικίνδυνα για το θαλάσσιο οικοσύστημα λόγω της κατάποσης και της εμπλοκής από υδρόβιους οργανισμούς (Xanthos & Walker, 2017). Γενικά, τα πλαστικά απόβλητα αποθηκεύονται σε πλοία και απορρίπτονται στις εγκαταστάσεις της ξηράς, επειδή απαγορεύεται η απόρριψη και η αποτέφρωση πλαστικού στη θάλασσα (IMO, 2017e). Οι πηγές πλαστικών με βάση τον ωκεανό αποτελούν το 20% των θαλάσσιων πλαστικών απορριμμάτων, με την εμπορική αλιεία να είναι ο μεγαλύτερος συντελεστής (Walker et al., 2019).

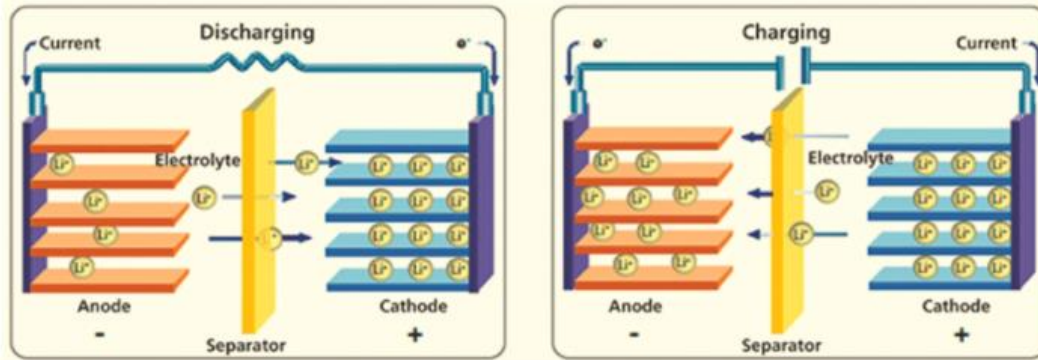
Όλα τα σκάφη παράγουν και λιπαρά απόβλητα έως και 8 t / ημέρα (Butt, 2007). Το λιπαρό νερό υφίσταται επεξεργασία στα πλοία χρησιμοποιώντας διαχωριστικό που διαχωρίζει το νερό από το πετρέλαιο. Το καθαρό νερό αποβάλλεται στη θάλασσα και το πετρέλαιο αποθηκεύεται για μετέπειτα απόρριψη στην ξηρά. Καθώς οι αρχές στρέφουν την προσοχή τους σε μεγάλες πετρελαιοκηλίδες, οι μικρές διαρροές που δημιουργούνται από την άντληση πετρελαιοφόρων στη θάλασσα και τον ανεφοδιασμό, λαμβάνουν σημαντικά λιγότερη προσοχή, αν και έχουν επίσης αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον (Encheva, 2015). Τα πλοία παράγουν επίσης περίπου 20 L λυμάτων (ή blackwater) και 120 L λυμάτων (ή greywater) κατά άτομο την ημέρα. Σύμφωνα με τη MARPOL, στο παράρτημα IV, τα ακατέργαστα λύματα μπορούν να απορρίπτονται στην ανοικτή θάλασσα και τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να απορρίπτονται εντός 12 nm ξηράς ενώ τα λύματα τύπου greywater μπορεί να απορρίπτονται στη θάλασσα χωρίς περιορισμούς. (Butt, 2007).

3. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Η μπαταρία θεωρείται ίσως ένας από τους πιο εξελιγμένους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας. Ο τρόπος λειτουργίας της βασίζεται στην μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική, βασιζόμενη σε δύο ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, την αποβολή ηλεκτρονίων που αποκαλείται οξείδωση και την πρόσδοση ηλεκτρονίων που καλείται αναγωγή. Μια μπαταρία δεν είναι τίποτα άλλο από μια διάταξη από ηλεκτροχημικά κελιά συνδεδεμένα είτε παράλληλα είτε σε σειρά όπου κάθε ένα περιέχει:

- Την κάθοδο, που είναι η “θετική” πλευρά της μπαταρίας όπου κατά την αναγωγή δέχεται τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την άνοδο. Η επιλογή του υλικού της καθόδου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την τάση του καθώς και την χημική σταθερότητα του με το πέρασμα του χρόνου.
- Την άνοδο, που είναι η “αρνητική” πλευρά της μπαταρίας όπου κατά την οξείδωση προσδίδει ηλεκτρόνια τα οποία φτάνουν στην κάθοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Το υλικό της ανόδου επιλέγεται με βάση την αποδοτικότητα του, την μεγάλη ειδική χωρητικότητα, την ευκολία κατασκευής και το χαμηλό κόστος.
- Τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι το μέσο που επιτρέπει την μεταφορά των θετικών ιόντων από την άνοδο στην κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι είτε σε υγρή μορφή, άλας, είτε κάποιο διάλυμα οξέος ή βάσεως, ή για την περίπτωση του ξερού κελιού κάποια πάστα. Επιλέγεται με βάση την υψηλή του αγωγιμότητα, τη μη αντιδραστικότητα με τα ηλεκτρόδια και τη θερμική του σταθερότητα για μεγάλο εύρος.
- Το διαχωριστή όπου είναι το υλικό εκείνο που τοποθετείται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου για να εμποδίσει τη δημιουργία βραχυκυκλώματος.

Όταν η μπαταρία εκφορτίζεται τότε οι χημικές αντιδράσεις δημιουργούν μια ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο, δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα. Παράλληλα θετικά ιόντα ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη ενώ ο διαχωριστής εμποδίζει την ροή άλλων μορίων. Το ηλεκτρικό φορτίο των ανιόντων είναι ίσο με το αντίστοιχο των ηλεκτρονίων με βάση της αρχή διατήρησης της ενέργειας.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροχημικών αντιδράσεων μπαταρίας

Οι μπαταρίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Πρωτεύουσες μπαταρίες: Οι χημικές αντιδράσεις καταναλώνουν το υλικό της ανόδου κατά την εκφόρτιση και έτσι η μπαταρία δεν μπορεί να επαναφορτιστεί, μια διαδικασία δηλαδή μη αντιστρέψιμη.
- Δευτερεύουσες μπαταρίες: Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης εναλλάσσονται ανάλογα με τη χημική διεργασία που λαμβάνει μέρος όταν η μπαταρία εκφορτίζεται. Αυτός ο τύπος μπαταρίας μπορεί να φορτιστεί αρκετές φορές και τα ηλεκτρόδια είναι από διαφορετικά υλικά. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στις ναυτικές εφαρμογές είναι κατά βάση επαναφορτιζόμενες.

3.1 Τεχνικοί ορισμοί ιδιοτήτων μπαταριών

Με σκοπό να γίνουν κατανοητά τα διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και τα θετικά – αρνητικά στοιχεία των διαφορετικών τεχνολογιών θα γίνει μια σύντομη αναφορά στη σχετική ορολογία.

3.1.1 Βασικά στοιχεία μιας μπαταρίας

Κελί μπαταρίας: Πρόκειται για το βασικό λειτουργικό ηλεκτροχημικό στοιχείο που αποτελείται από ηλεκτρόδια, τον ηλεκτρολύτη και το διαχωριστή. Είναι η βασική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία προέρχεται από την εισαγωγή/εξαγωγή αντιδράσεων των ιόντων λιθίου ή την αναγωγή/οξείδωση του λιθίου μεταξύ των αρνητικών και θετικών ηλεκτροδίων. Δεν είναι έτοιμο για εφαρμογή καθώς υπολείπεται το περίβλημα του, η τοποθέτηση των τερματικών και οι ηλεκτρονικές συσκευές ελέγχου.

Μονάδα μπαταρίας: Μια ομάδα κελιών συνδεδεμένα είτε εν σειρά είτε παράλληλα με ή χωρίς προστατευτικές συσκευές και κύκλωμα εποπτείας.

Πακέτο μπαταρίας: Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας που αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά ή μονάδες μπαταρίας ηλεκτρικά συνδεδεμένα. Έχει κύκλωμα εποπτείας που προσφέρει δεδομένα σε ένα σύστημα μπαταρίας.

Κατηγοριοποίηση μπαταριών: Ακόμα και μπαταρίες ίδιας τεχνολογίας μπορεί να διαφέρουν αρκετά. Η βασική διάκριση που έχουν και οι κατασκευαστές πρόκειται για μπαταρίες υψηλής ενέργειας ή ισχύος, καθώς αυτό εξαρτάται από τη συνδεσμολογία των στοιχείων που αναφέρθηκε προηγουμένως (εν σειρά / παράλληλα). Μια ακόμα διάκριση μπορεί να θεωρηθούν και οι μπαταρίες με μεγάλη διάρκεια ζωής, κάτι που έρχεται με κόστος την μέγιστη ισχύ ή ενέργεια.

C- και E- ρυθμοί: Όταν περιγράφονται διάφορες μπαταρίες είναι χρήσιμο το ρεύμα εκφόρτισης να προσδιορίζεται με βάση την ονομαστική χωρητικότητα. Ο C – ρυθμός αναφέρεται στο ρεύμα εκείνο που η μπαταρία εκφορτίζεται σε σχέση με τη μέγιστη χωρητικότητα της. Για παράδειγμα ρυθμός 1C προσδιορίζει το σταθερό εκείνο ρεύμα που εκφορτίζει πλήρως την μπαταρία σε 1 ώρα. Για παράδειγμα για μια μπαταρία με χωρητικότητα 100 A·hr αυτό το ρεύμα είναι ίσο με 100 A. Ρυθμός εκφόρτισης 5C σημαίνει ότι για την ίδια μπαταρία 500 A, θα την εκφόρτιζαν σε 12 λεπτά, ενώ ρυθμός C/2 θα την εκφόρτιζαν σε 2 ώρες. Αντίστοιχα ο E – ρυθμός αφορά την ισχύ εκφόρτισης, ρυθμός 1E προσδιορίζει την ισχύ εκείνη που θα εκφόρτιζε την μπαταρία σε 1 ώρα.

3.1.2 Καταστάσεις μπαταρίας

Κατάσταση φόρτισης (SoC) (%): Η κατάσταση φόρτισης εκφράζει την παρούσα χωρητικότητα της μπαταρίας συναρτήσει της μέγιστης δυνατής χωρητικότητας. Μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία έχει SoC 100% ενώ μια πλήρως εκφορτισμένη 0%. Για να υπολογιστεί, απαιτείται η ολοκλήρωση του ρεύματος εκφόρτισης με βάση το χρόνο. Η κατάσταση φόρτισης είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία της μπαταρίας και το ρεύμα εκφόρτισης. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα μη γραμμικά φαινόμενα.

Κατάσταση υγείας (SoH): Το συγκεκριμένο μέγεθος εκφράζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μπαταρία και κυρίως το κατά πόσο μπορεί να ανταποκριθεί στην απαίτηση ισχύος σε σύγκριση με μια καινούρια αντίστοιχη μπαταρία. Είναι προφανές ότι μετά από το πέρας αρκετών κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης η άνοδος συγκεντρώνει όλο και λιγότερα ιόντα που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της μέγιστης χωρητικότητας της μπαταρίας.

Βάθος εκφόρτισης (DoD) (%): Εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας της μπαταρίας που έχει εκφορτιστεί. Ένα DoD της τάξης του 80% θεωρείται βαθιά εκφόρτιση.

Τάση ακροδεκτών (V): Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών υπό την παρουσία ηλεκτρικού φορτίου. Εν γένει είναι διαφορετική από την ονομαστική τάση και είναι συνάρτηση του SoC και του ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης.

Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V). Η ηλεκτρική τάση μεταξύ των ακροδεκτών όταν δεν εφαρμόζεται ηλεκτρικό φορτίο. Εξαρτάται σημαντικά από την κατάσταση φόρτισης.

Εσωτερική αντίσταση: Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, η οποία διαφέρει από φόρτιση σε εκφόρτιση και εξαρτάται και αυτή από την κατάσταση φόρτισης. Όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο πιο πολύ μειώνεται ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας, καθώς μέρος της διαθέσιμης ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική (απώλειες) που έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της θερμοκρασίας.

3.1.3 Τεχνικοί όροι μπαταριών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά αρκετοί όροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των μπαταριών.

Ονομαστική τάση (V): Η τάση αναφοράς της μπαταρίας, η οποία λαμβάνεται και ως η “νορμάλ” τάση της μπαταρίας.

Τάση αποκοπής (Cut – off voltage) (V): Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση, η οποία περιγράφει και την άδεια κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Χωρητικότητα ή Ονομαστική Χωρητικότητα (A·h): Εκφράζει την χωρητικότητα της μπαταρίας μετρούμενη σε αμπερόρια, πάντα σε συνάρτηση με το ρεύμα εκφόρτισης (C-rate) από το 100% - 0% SoC. Υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα εκφόρτισης (A) επί το χρόνο εκφόρτισης (hours) και μειώνεται όσο το ρεύμα εκφόρτισης αυξάνεται.

Ενέργεια ή Ονομαστική Ενέργεια (W·h για συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης): Η ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας. Η συνολική, δηλαδή, ενέργεια σε W·hr που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία σε συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης (C-rate) από 100% SoC μέχρι την τάση αποκοπής. Η ενέργεια υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τάση ακροδεκτών με το ρεύμα εκφόρτισης επί το χρόνο εκφόρτισης. Είναι ανάλογο μέγεθος της χωρητικότητας και φθίνει όσο αυξάνεται το ρεύμα εκφόρτισης.

Κύκλοι ζωής (συνάρτηση του DoD): Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης της μπαταρίας μέχρι το σημείο να μην είναι ικανή να ανταποκριθεί στις εργοστασιακές προδιαγραφές. Οι κύκλοι ζωής υπολογίζονται για συγκεκριμένους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης. Η πραγματική διάρκεια ζωής της μπαταρίας επηρεάζεται από το βάθος της εκφόρτισης καθώς και από άλλες συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Υψηλότερο βάθος εκφόρτισης συνεπάγεται και λιγότερους κύκλους ζωής.

Ειδική Ενέργεια ($W \cdot h/kg$): Η ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας ανά μονάδα βάρους. Εξαρτάται από τη χημική σύσταση της μπαταρίας καθώς και από τη συσκευασία της. Γνωρίζοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις μπορεί να υπολογιστεί το απαιτούμενο βάρος μπαταριών για να καλύψει τη σχετική εμβέλεια.

Ειδική Ισχύς (W/kg): Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα βάρους. Επίσης εξαρτάται από τη χημική σύσταση και τη συσκευασία της μπαταρίας. Καθορίζει το απαιτούμενο βάρος της μπαταρίας για συγκεκριμένη απαίτηση ισχύος.

Ενεργειακή Πυκνότητα ($W \cdot h/L$): Μέγεθος επίσης παρόμοιο της Ειδικής Ενέργειας, αφορά την ονομαστική ισχύ της μπαταρίας ανά μονάδα όγκου. Γνωρίζοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις για συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να υπολογιστεί ο απαιτούμενος όγκος των μπαταριών.

Πυκνότητα ισχύος (W/L): Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα όγκου. Καθορίζει τον απαιτούμενο όγκο μπαταριών για συγκεκριμένη απαίτηση ισχύος.

Μέγιστο Συνεχές Ρεύμα Εκφόρτισης: Το μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα εκφόρτισης. Καθορίζεται από τον κατασκευαστή με σκοπό να μπει ένα μέγιστο όριο στο ρεύμα εκφόρτισης που θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβες στην μπαταρία ή να μειώσει τη χωρητικότητα.

Μέγιστο Ρεύμα Εκφόρτισης για 30 sec: Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία συνεχόμενα για 30 δευτερόλεπτα. Επίσης όριο που καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

Τάση φόρτισης: Η τάση με την οποία η μπαταρία φορτίζεται μέχρι την πλήρη χωρητικότητα. Ένα τυπικό προφίλ φόρτισης αποτελείται συνήθως από συνεχόμενο ρεύμα φόρτισης μέχρι η τάση της μπαταρίας φτάσει την τάση φόρτισης και στη συνέχεια για σταθερή τάση το ρεύμα φόρτισης μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί.

Τάση διατήρησης: Η τάση με την οποία η μπαταρία διατηρείται στο 100% SoC, με σκοπό να διατηρήσει τη χωρητικότητα της παρά την αυτό – εκφόρτιση της.

Συνιστώμενο Ρεύμα Φόρτισης: Το ιδανικό ρεύμα φόρτισης μέχρι η μπαταρία να φτάσει στο 70% του SoC προτού μεταβεί σε φόρτιση σταθερής τάσης.

Μέγιστη Εσωτερική Αντίσταση: Η μέγιστη εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, συνήθως διαφορετική για φόρτιση και εκφόρτιση.

Μπαταρία βαθιάς εκφόρτισης: Η μπαταρία που σχεδιάζεται ώστε συχνά να εκφορτίζεται σε πάνω από 80% DoD. Επίσης σχεδιάζεται και για να παρέχει σταθερή ισχύ για μεγάλο χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά η μπαταρία εκκίνησης που συνήθως χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιείται για να παρέχει ένα μικρό ποσοστό της χωρητικότητας της σε σύντομο χρονικό διάστημα, με υψηλό ρεύμα εκφόρτισης.

Φαινόμενο μνήμης: Συμβαίνει όταν επαναλαμβανόμενα η μπαταρία φορτίζεται πριν εκφορτιστεί πλήρως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μπαταρία να μνημονεύει το χαμηλότερο κύκλο εκφόρτισης. Έτσι η χωρητικότητα της μειώνεται.

Αυτό – εκφόρτιση: Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο στην μπαταρία συμβαίνουν εσωτερικά χημικές αντιδράσεις οι οποίες μειώνουν την κατάσταση φόρτισης χωρίς η μπαταρία να είναι συνδεδεμένη σε κάποιο εξωτερικό κύκλωμα. Η αυτό – εκφόρτιση μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τη διαθέσιμη χωρητικότητα, σε σχέση με την ονομαστική.

Ηλεκτρική Απόδοση (Coulombic/Faradaic): Το πηλίκο της συνολικής ενέργειας που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία προς τη συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε για τη φόρτιση της σε ένα πλήρη κύκλο. Περιγράφει την απόδοση φόρτισης με την οποία τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται στην μπαταρία.

Κυκλική Χρήση και Χρήση Αναμονής: Μια μπαταρία θεωρείται ότι βρίσκεται σε κυκλική χρήση όταν χρησιμοποιείται σαν πηγή ισχύος σε σταθερή βάση όπου φορτίζεται και εκφορτίζεται περιοδικά. Από την άλλη, μια μπαταρία όπου βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, χρησιμοποιείται σαν πηγή ενέργειας σε έκτακτη ανάγκη, οπότε πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένη για μεγάλο διάστημα. Σε κατάσταση αναμονής οι μπαταρίες έχουν συνήθως διάρκεια ζωής μέχρι 5 χρόνια.

3.2 «Κλασσικές» μπαταρίες και χημεία κελιών

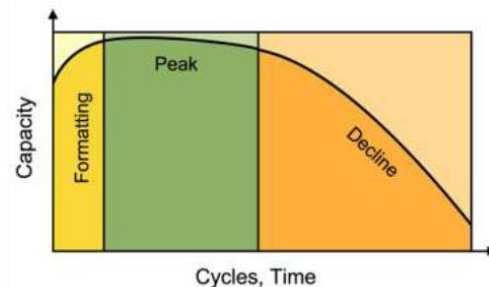
Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών κελιών που προσφέρουν διαφορετικές τάσεις, απόδοση και ενέργεια. Τα κελιά ιόντων λιθίου έχουν σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από άλλα ήδη κελιών, καθιστώντας τα ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές αυτοκινήτων. Θεωρούνται επίσης ασφαλέστερα, λιγότερο τοξικά και είναι πιο αποδοτικά ενεργειακά με σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Μερικές από τις πιο δημοφιλείς τυπολογίες είναι οι εξής.

3.2.1 Μολύβδου – οξέος

Πρόκειται για την πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που εμφανίστηκε στο εμπόριο και κατέχει σημαντικό μερίδιο της αγοράς για πάνω από έναν αιώνα. Βρίσκουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή τους στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου ο κύκλος εργασιών προσδιορίζεται στα \$25BN και αμέσως μετά σε εφεδρικές εφαρμογές με κύκλο εργασιών στα \$10BN.

Η δομή μιας μπαταρίας μολύβδου – οξέος αποτελείται από κράμα μολύβδου. Επιπρόσθετα, μικρές ποσότητες διαφορετικών υλικών προστίθενται με σκοπό την αύξηση της μηχανικής αντοχής καθώς ο καθαρός μολύβδος είναι αρκετά μαλακός και δεν μπορεί να αυτό – υποστηριχτεί. Παράλληλα βελτιώνονται και οι ηλεκτρικές ιδιότητες. Τα πιο κοινά πρόσθετα είναι το αντιμόνιο, ο κασσίτερος όπου μπορούν να βελτιώσουν τη βαθιά εκφόρτιση. Το ασβέστιο μειώνει την αυτό – εκφόρτιση ωστόσο η θετική πλευρά του μολύβδου – ασβεστίου έχει την τάση να μεγαλώνει όταν υπερφορτίζεται. Σε σύγχρονες μορφές σχεδίασης προστίθενται το σελήνιο, το κάδμιο, ο κασσίτερος και το αρσενικό ώστε να μειώσουν την περιεκτικότητα σε ασβέστιο.

Μια μπαταρία μολύβδου – οξέος έχει 3 στάδια ζωής, την μορφοποίηση, την κορυφή και την παρακμή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2: Χωρητικότητα - κύκλοι μπαταρίας μολύβδου οξέος

Το στάδιο της μορφοποίησης είναι το πιο σημαντικό και μπορεί να προσομοιαστεί σαν ένα σφουγγάρι (πλάκες μολύβδου) που περιβάλλεται από κάποιο υγρό (τον ηλεκτρολύτη). Χρησιμοποιώντας τις πλάκες, απορροφούν ηλεκτρολύτη και έτσι η χωρητικότητα σταδιακά αυξάνεται. Είναι η πιο σημαντική φάση για μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης και απαιτεί περίπου 20 – 50 πλήρεις κύκλους για να επιτευχθεί η μέγιστη χωρητικότητα. Σε αυτή τη φάση της μπαταρίας το φορτίο που εφαρμόζεται πρέπει να είναι ήπιο.

Μια μπαταρία μολύβδου – οξέος βαθιάς εκφόρτισης μπορεί να προσφέρει 150 – 250 κύκλους πριν να ξεκινήσει να φθίνει η χωρητικότητα τη. Η αντικατάσταση της πρέπει να γίνεται όταν η χωρητικότητα της φτάσει το 70 με 80% της αρχικής. Κάποιες εφαρμογές επιτρέπουν και χαμηλότερα όρια, ωστόσο ποτέ δεν πρέπει να ξεπερνιέται το 50% καθώς έκτοτε η γήρανση είναι πολύ ταχύτερη. Γενικά οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος είναι λιγότερο ανθεκτικές από τις μπαταρίες νικελίου – καδμίου και ιόντων λιθίου όταν εκφορτίζονται σε μεγάλο βάθος. Μια πλήρης εκφόρτιση καταπονεί την μπαταρία και μειώνει κατά ένα μικρό βαθμό τη μέγιστη χωρητικότητα. Αυτή η απώλεια δεν είναι εμφανής κατά τους αρχικούς κύκλους αλλά γίνεται πολύ εντονότερη όταν η απόδοσή της πέσει κάτω από το 50% της αρχικής. Ο βασικός λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η διάβρωση του πλέγματος του θετικού ηλεκτροδίου, η εξάντληση του ενεργού υλικού και η διαστολή των θετικών πλακών. Οι αυξημένες θερμοκρασίες και τα υψηλά ρεύματα εκφόρτισης χειροτερεύουν αυτά τα φαινόμενα.

Η φόρτιση των μπαταριών αυτών πρέπει να γίνεται ελεγχόμενα. Ένα όριο υψηλής τάσης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση αλλά σχηματίζει διάβρωση του πλέγματος στην θετική πλάκα, ενώ ένα όριο χαμηλής τάσης μπορεί να θωρακίσει την μπαταρία αλλά με το κόστος της ανάπτυξης αυλακώσεων στην αρνητική πλάκα. Αυτές οι αυλακώσεις μπορεί να περιοριστούν αν επισκευαστούν εγκαίρως ενώ από την άλλη πλευρά η διάβρωση είναι μόνιμη.

Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος δε χαρακτηρίζονται από γρήγορη φόρτιση καθώς αυτή μπορεί να διαρκέσει 14 – 16 ώρες. Η μπαταρία πρέπει πάντα να αποθηκεύεται πλήρως φορτισμένη καθώς μερική φόρτιση μπορεί να δημιουργήσει αυλακώσεις, όπου είναι η ανάπτυξη κρυστάλλων μολύβδου στους πόρους του ενεργού υλικού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους φόρτισης, αύξηση της θερμοκρασίας και κυρίως μείωση της διάρκειας ζωής. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη άνθρακα στο αρνητικό ηλεκτρόδιο κάτι που βέβαια μειώνει την ειδική ενέργεια.

Ενώ η μπαταρία μολύβδου – οξέος έχει χαμηλή διάρκεια ζωής συγκρινόμενη με τις άλλες τεχνολογίες, χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή αυτό – εκφόρτιση. Για παράδειγμα οι μπαταρίες νικελίου χάνουν κατά προσέγγιση το 40% της ολικής τους χωρητικότητας σε διάστημα 3 μηνών, ενώ οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος σε ένα χρόνο. Επιπλέον, έχουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος είναι και μια αρκετά βιώσιμη περιβαλλοντικά επιλογή καθώς μπορεί να ανακυκλωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Τα ποσοστά ανακύκλωσης στις αναπτυγμένες χώρες αγγίζουν το 100%. Μπορούν να αναγεννηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν με αρκετά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ενώ οι εκπομπές μολύβδου είναι μέσα στα όρια των περιβαλλοντικών κανονισμών. Τέλος, οι τιμές σκραπ των μπαταριών αυτών υποστηρίζουν την ανακύκλωση τους εν αντιθέσει με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου που η ανακύκλωση τους όχι μόνο δεν είναι αποδοτική αλλά και μη οικονομικά συμφέρουσα.

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών μολύβδου - οξέος

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οικονομικές και απλές στην κατασκευή	Χαμηλοί κύκλοι (300)
Καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Αργή φόρτιση (14 – 16 ώρες)
Χαμηλή αυτό – εκφόρτιση	Χαμηλή ειδική ενέργεια (30 – 40 W·h/kg)
Υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης	Πρέπει να αποθηκεύεται σε 100% SoC
Δεν επηρεάζεται από φαινόμενα μνήμης	Δύσκολα κατασκευάσιμη σε μικρά μεγέθη

3.2.2 Νικελίου

Οι μπαταρίες με βάση το νικέλιο όπως για παράδειγμα οι νικελίου – σιδήρου, νικελίου – καδμίου, νικελίου – ψευδαργύρου, νικελίου – υδρογόνου είναι παρόμοιες καθώς ηλεκτρόδια του υδροξειδίου του νικελίου χρησιμοποιούνται ως θετικές πλάκες γι' αυτά τα συστήματα. Καθώς χρησιμοποιούνται ισχυρά αλκαλικά διαλύματα ως ηλεκτρολύτες σε αυτές τις εφαρμογές, οι μπαταρίες αυτές καλούνται επίσης ως αλκαλικές δευτερεύουσες μπαταρίες. Οι μπαταρίες που βασίζονται στο νικέλιο ήταν και παραμένουν μια σημαντική πηγή ενέργειας για πλήθος ηλεκτρονικών συσκευών.

Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd)

Αναπτύχθηκε το 1899 από τον Waldemar Jungner προσφέροντας συγκεκριμένα πλεονεκτήματα έναντι της τεχνολογίας μολύβδου – οξέος που ήταν και η μόνη επαναφορτιζόμενη μέχρι τότε. Ωστόσο, τα απαιτούμενα υλικά ήταν ακριβά για την εποχή και η ανάπτυξη της ξεκίνησε το 1932 όπου έγινε πρόοδος στην εναπόθεση ενεργών υλικών μέσα σε ηλεκτρόδιο από πορώδη πλάκα νικελίου. Το 1947 περαιτέρω ανάπτυξη αντιμετώπισε το πρόβλημα που υπήρχε με την έκλυση αερίων κατά την φόρτιση, οδηγώντας έτσι στις σύγχρονες μπαταρίες νικελίου – καδμίου.

Για αρκετό καιρό οι συγκεκριμένες μπαταρίες ήταν η βασική πηγή ενέργειας για ιατρικό εξοπλισμό έκτακτης ανάγκης, επαγγελματικές κάμερες και διαφόρων εργαλείων κατασκευών. Το 1980 παρουσιάστηκε μια βελτιωμένη έκδοση της σχετικής τεχνολογίας όπου η μέγιστη χωρητικότητα αυξανόταν 60% σε σχέση με την κλασική μπαταρία νικελίου – καδμίου με την εισαγωγή παραπάνω ενεργού υλικού στο κελί σε βάρος μεγαλύτερης εσωτερικής αντίστασης και λιγότερων κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης.

Το βασικό της μειονέκτημα ήταν τα φαινόμενα μνήμης όπου οδηγούσαν σε χαμηλότερη χωρητικότητα, αν περιοδικά δε γινόταν μια πλήρης φόρτιση. Ωστόσο παραμένει ακόμα και σήμερα μια αρκετά στιβαρή και μη ευαίσθητη τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην αεροπορική βιομηχανία και με μεγάλη διάρκεια ζωής αν συντηρηθεί σωστά.

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - καδμίου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ανθεκτική, αρκετοί κύκλοι με κατάλληλη συντήρηση	Χαμηλή ειδική ενέργεια συγκρινόμενη με σύγχρονες τεχνολογίες
Μπορεί να φορτιστεί ταχύτατα με χαμηλή καταπόνηση	Επηρεάζεται από φαινόμενα μνήμης
Καλή απόδοση, επιτρέπει καλή χρήση	Το κάδμιο είναι τοξικό
Καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Υψηλή αυτό – εκφόρτιση
Οικονομικές, \$400/kW	Χαμηλή τάση κελιού της τάξης των 1.2V

Νικελίου – υδριδίου μετάλλου (Ni-MH)

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής ξεκίνησε το 1967, ωστόσο η αστάθεια του νικελίου – υδριδίου οδήγησε στην ανάπτυξη του νικελίου – υδρογόνου (Ni-H). Το 1980 νέα μέταλλα υδριδίου που ανακαλύφθηκαν βελτίωσαν τα ζητήματα σταθερότητας και πλέον οι μπαταρίες Ni-MH μπορούν να επιτύχουν 40% παραπάνω ειδική ενέργεια συγκρινόμενες με τις νικελίου – καδμίου.

Ωστόσο η τεχνολογία Ni-MH έχει συγκεκριμένα μειονεκτήματα. Αρχικά πρόκειται για μια ευαίσθητη τεχνολογία και πιο πολύπλοκη στη φόρτιση σε σχέση με την νικελίου – καδμίου με το μειονέκτημα επίσης ότι παρουσιάζει 20% αυτό – εκφόρτιση τις πρώτες 24 ώρες και 10% μετά κάθε μήνα. Έτσι θεωρείται μια από τις πιο αυτό – εκφορτιζόμενες μπαταρίες. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τροποποίηση των υλικού υδριδίου το οποίο παράλληλα μειώνει την διάβρωση του κράματος εις βάρος της χαμηλότερης ειδικής ενέργειας.

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - υδριδίου μετάλλου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
30-40% υψηλότερη χωρητικότητα σε σχέση με Ni-Cd	Χαμηλή διάρκεια ζωής, η βαθιά εκφόρτιση την επιδεινώνει
Λιγότερο ευαίσθητη σε φαινόμενα μνήμης	Απαιτεί περίπλοκη φόρτιση, ευαίσθητη στην υπερφόρτιση
Περιβαλλοντικά φιλική	Υψηλή αυτό – εκφόρτιση
Το νικέλιο είναι ανακυκλώσιμο	Ηλεκτρική απόδοση 65% (Ιόντων λιθίου 99%)
Λειτουργική σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος	Παράγει θερμότητα κατά την υψηλή φόρτιση/εκφόρτιση

Νικελίου – Σιδήρου (Ni-Fe)

Μετά την παραγωγή των νικελίου – καδμίου, ο Waldemar Jungner δοκίμασε να αντικαταστήσει το κάδμιο με σίδηρο εξαιτίας της χαμηλότερης τιμής του, ωστόσο η χαμηλή απόδοση κατά τη φόρτιση και η παραγωγή υδρογόνου τον οδήγησε στην ματαίωση της έρευνας. Το 1901, ο Thomas Edison συνέχισε την ανάπτυξη της ως μιας εναλλακτικής λύσης σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος για ηλεκτρικά οχήματα, υποστηρίζοντας ότι οι πλάκες νικελίου – σιδήρου που εμβαπτίζονται σε αλκαλικό ηλεκτρολύτη έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες από της μπαταρίες μολύβδου που βρίσκονται σε θειικό οξύ. Ο Edison βασίστηκε στην αναπτυσσόμενη ηλεκτρική αυτοκινητοβιομηχανία και απογοητεύτηκε όχι μόνο όταν επικράτησαν οι μηχανές εσωτερικής καύσης αλλά και επειδή οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος χρησιμοποιήθηκαν ως μπαταρίες εκκίνησης (SLI).

Οι μπαταρίες νικελίου – σιδήρου χρησιμοποιούν υδροξείδιο νικελίου ως κάθοδο, σίδηρο ως άνοδο, υδροξείδιο του καλίου ως ηλεκτρολύτη, με παραγόμενη ονομαστική τάση κελιού ίση με 1.2V. Πρόκειται για τεχνολογία ανθεκτική στην υπερφόρτιση και βαθιά εκφόρτιση με διάρκεια ζωής έως και 20 χρόνια σε εφαρμογές αναμονής. Επιπλέον είναι ανθεκτική σε κραδασμούς και υψηλές θερμοκρασίες και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εξόρυξης στην Ευρώπη. Το βασικό της μειονέκτημα είναι η χαμηλή ειδική ενέργεια της τάξης των 50 W·h/kg, η χαμηλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες και η υψηλή αυτό – εκφόρτιση της τάξης του 20 – 40% ανά μήνα.

Μετά από σημαντικές βελτιώσεις, η τεχνολογία Ni-Fe μπορεί να θεωρηθεί μια σημαντική εναλλακτική σε συστήματα ενέργειας εκτός δικτύου. Πλέον, θεωρείται μια τεχνολογία ανθεκτική σε υπερφόρτιση και βαθιά εκφόρτιση και μπορεί να διαρκέσει για πάνω από 50 χρόνια, συγκρινόμενη με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος που αντέχουν μέχρι 12 χρόνια σε συνθήκες βαθιάς εκφόρτισης. Ωστόσο, κοστίζουν περίπου 4 φορές παραπάνω μια τιμή αντίστοιχη των μπαταριών ιόντων λιθίου.

Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - σιδήρου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ο σίδηρος είναι περιβαλλοντικά φιλικότερος από το κάδμιο	Υψηλό κόστος
Τα ηλεκτρόδια σιδήρου είναι αρκετά ανθεκτικά	Χαμηλή τάση κελιού, απαιτεί πολλά κελιά εν σειρά
Δεν επηρεάζεται από φαινόμενα μνήμης	Δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε ξαφνικές αιχμές ισχύος
Υψηλοί κύκλοι (της τάξης των 2000 με 80% DoD)	Απαιτεί επαρκή εξαερισμό λόγω της παραγωγής υδρογόνου
Σχετικά υψηλή ειδική ενέργεια (1.5 – 2 φορές αυτή των μολύβδου οξέος)	

Νικελίου – Ψευδαργύρου

Οι μπαταρίες νικελίου – ψευδαργύρου είναι παρόμοιες με τις νικελίου – καδμίου καθώς χρησιμοποιούν αλκαλικό ηλεκτρολύτη ωστόσο διαφέρουν στην τάση κελιού καθώς προσφέρουν 1.65V/κελί συγκρινόμενη με τα 1.2V/κελί της Ni-Cd. Η ειδική ενέργεια είναι της τάξης των 100 W·h/kg και μπορεί να φτάσει τους 200-300 κύκλους. Επιπλέον είναι περιβαλλοντικά φιλική καθώς δεν περιέχει βαρέα μέταλλα και είναι σε μεγάλο ποσοστό ανακυκλώσιμη.

Ο Thomas Edison κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη σχετική τεχνολογία ως μια εναλλακτική λύση στην μπαταρία νικελίου – καδμίου, κάτι που βρήκε εφαρμογή σε σιδηροδρομικά βαγόνια μεταξύ των ετών 1932 – 1948. Στα αρνητικά συγκαταλέγεται το ότι υποφέρει από υψηλή αυτό – εκφόρτιση και μικρή διάρκεια ζωής λόγω της ανάπτυξης δενδριτών, που οδηγούν σε βραχυκύκλωμα. Βελτιώσεις στον ηλεκτρολύτη έχουν κάνει την τεχνολογία νικελίου – ψευδαργύρου να θεωρείται μια βιώσιμη επιλογή για εμπορική χρήση. Είναι μια σχετικά ελκυστική επιλογή καθώς χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, υψηλή ισχύ και μεγάλο θερμοκρασιακό λειτουργικό εύρος.

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μπαταριών νικελίου - ψευδαργύρου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλό κόστος	Υψηλή αυτό – εκφόρτιση
Υψηλή ισχύ, σχετικά υψηλή ειδική ενέργεια (60 – 70 W·h/kg)	Χαμηλή διάρκεια ζωής
Λειτουργική σε ευρύ θερμοκρασιακό εύρος	Ανάπτυξη δενδριτών κατά την εκφόρτιση
Υψηλή τάση κελιού (1.65V)	
Περιβαλλοντικά φιλική	

3.2.3 Ιόντων λιθίου

Από το 1912 ο G. N. Lewis ξεκίνησε να ερευνά την τεχνολογία των μπαταριών λιθίου, ωστόσο η ανάπτυξη τους έγινε αρκετά αργότερα και συγκεκριμένα το 1970 όπου παρασκευάστηκαν οι πρώτες εμπορικές μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου. Αργότερα, το 1980 έγιναν προσπάθειες για αντίστοιχες επαναφορτιζόμενες, χωρίς επιτυχία, ωστόσο, λόγω της αστάθειας που παρουσίαζε το υλικό της ανόδου, το μεταλλικό λίθιο.

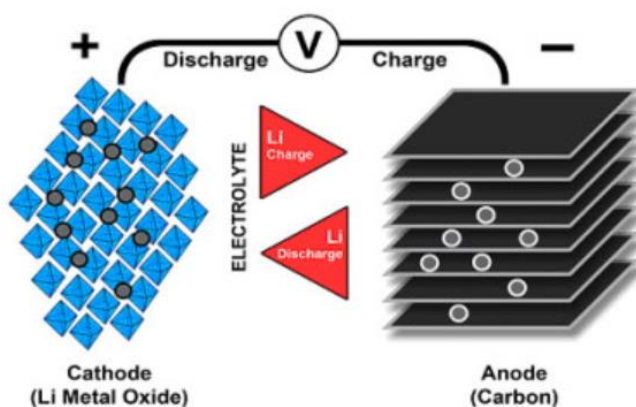
Το λίθιο πρόκειται για ένα από τα ελαφρύτερα μέταλλα, με σημαντικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες και μεγάλη ειδική ενέργεια. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες με μεταλλικό λίθιο ως άνοδο είχαν αρκετά υψηλή πυκνότητα ενέργειας, ωστόσο ανακαλύφθηκε ότι η κυκλική τους χρήση δημιουργούσε δενδρίτες στην άνοδο οι οποίοι διαπερνούσαν το διαχωριστή και είχαν ως αποτέλεσμα βραχυκύκλωμα. Η θερμοκρασία κελιού αυξανόταν σημαντικά, σε σημείο που έφτανε το σημείο τήξης προκαλώντας την καταστροφή της μπαταρίας.

Το 1991 η Sony κυκλοφόρησε στο εμπόριο την πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου όπου μέχρι και σήμερα πρόκειται για την πιο υποσχόμενη και ταχύτερα αναπτυσσόμενη μπαταρία στην αγορά. Ακόμα και αν έχει χαμηλότερη ειδική ενέργεια από τις μπαταρίες μεταλλικού λιθίου, η τεχνολογία των ιόντων λιθίου είναι ασφαλής εφόσον τηρούνται τα όρια της τάσης και του ρεύματος.

Το κλειδί για την υψηλή ειδική ενέργεια είναι η υψηλή τάση κυψέλης που φτάνει τα 3.6V και μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα κινητά τηλέφωνα, tablets και διάφορα ηλεκτρονικά προσφέροντας έτσι απλοποιήσεις και μείωση κόστους σε σχέση με διατάξεις πολλαπλών κυψελών. Πρόκειται για μπαταρίες που δεν απαιτούν συχνή συντήρηση, δεν επηρεάζεται από φαινόμενα μνήμης και

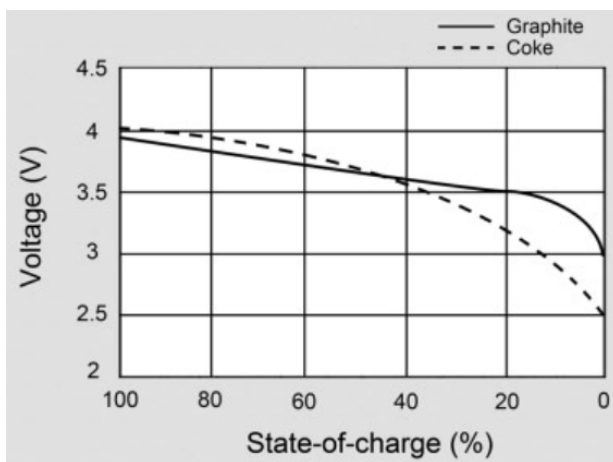
δε χρειάζεται περιοδική πλήρη φόρτιση για να διατηρείται σε καλή κατάσταση. Ακόμα, η αυτό – εκφόρτιση της είναι μικρότερη από αυτή των μπαταριών νικελίου ενώ τα βασικά μειονεκτήματα είναι η υψηλή τιμή και η ανάγκη για κυκλώματα προστασίας.

Η βασική τεχνολογία των ιόντων λιθίου χρησιμοποιεί μια κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο), μια άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και τον ηλεκτρολύτη ως αγωγό. Η κάθοδος είναι συνήθως οξείδιο μετάλλου και η άνοδος αποτελείται από πορώδη άνθρακα. Κατά την εκφόρτιση, τα θετικά ιόντα μεταφέρονται από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη και του διαχωριστή, ενώ η φόρτιση αντιστρέφει αυτή τη φορά και τα ιόντα μεταφέρονται από την κάθοδο στην άνοδο.



Εικόνα 3: Αρχή λειτουργίας μπαταριών ιόντων - λιθίου

Οι αρχικές μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούνταν από οπτάνθρακα ως άνοδο, ωστόσο για να επιτευχθεί μια πιο επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης, επιλέχθηκε ο γραφίτης ως άνοδο, καθώς έχει το πλεονέκτημα μιας πιο ομαλής καμπύλης τάσης – SoC%.



Εικόνα 4: Voltage - SoC μπαταριών λιθίου με άνοδο γραφίτη

Οι 6 πιο κοινές τεχνολογίες ιόντων λιθίου που θα συζητηθούν ακολούθως είναι:

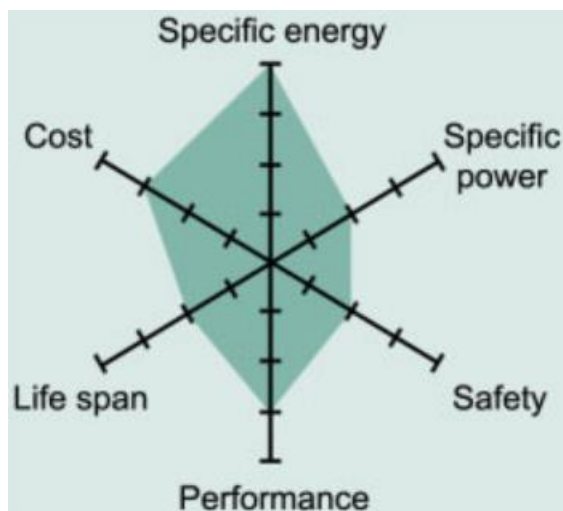
- Λιθίου – οξείδιο του κοβαλτίου (LCO)
- Λιθίου – οξείδιο του μαγγανίου (LMO)
- Λιθίου – οξείδιο του νικελίου, μαγγανίου, κοβαλτίου (NMC)
- Λιθίου – φωσφορικού σιδήρου (LFP)
- Λιθίου – οξείδιο του νικελίου, κοβαλτίου, αλουμινίου (NCA)
- Λιθίου – οξείδιο του τιτανίου (LTO)

Λιθίου – οξείδιο του κοβαλτίου (LCO)

Η μπαταρία αποτελείται από κάθοδο οξειδίου κοβαλτίου - λιθίου και άνοδο άνθρακα γραφίτη. Η υψηλή ειδική ενέργεια την καθιστά δημοφιλή επιλογή για κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Το κύριο μειονέκτημα της είναι οι περιορισμένες δυνατότητες φόρτωσης (χαμηλή ειδική ισχύς). Επίσης έχει σχετικά μικρή διάρκεια ζωής καθώς μειώνονται οι κύκλοι λόγω της δημιουργίας μιας διεπιφάνειας μεταξύ της ανόδου και του ηλεκτρολύτη (SEI), κατά τη γρήγορη φόρτιση ή τη φόρτιση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι είναι απαραίτητο να μη φορτίζεται/εκφορτίζεται με ρυθμούς μεγαλύτερους από το C – ρυθμό της. Για παράδειγμα αυτό σημαίνει ότι για μια μπαταρία με χωρητικότητα 2400 mA·h το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2400 mA. Οι κατασκευαστές συστήνουν ρυθμούς όχι μεγαλύτερους από 0.8C.

Ένας εύχρηστος και αποτελεσματικός τρόπος παρουσίασης των χαρακτηριστικών για διάφορους τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου είναι το εξαγωνικό διάγραμμα που παρουσιάζει τις δυνατότητες της μπαταρίας όσον αφορά την ειδική ενέργεια ή χωρητικότητα, την ειδική ισχύ ή τη δυνατότητα να παρέχει υψηλά ρεύματα, την ασφάλεια, την απόδοση σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, τη διάρκεια ζωής και το κόστος.

Από το παρακάτω διάγραμμα είναι εμφανές ότι η τεχνολογία LCO έχει πλεονεκτήματα την υψηλή χωρητικότητα και μειονεκτήματα τη χαμηλή διάρκεια ζωής και το χαμηλό ρεύμα εκφόρτισης.



Εικόνα 5: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου – οξειδίου του κοβαλτίου

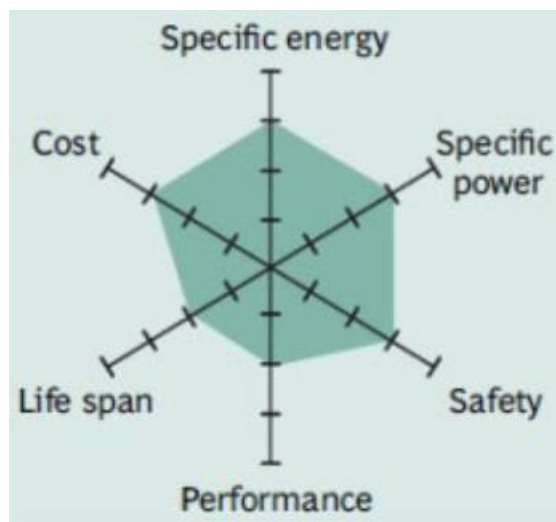
Λιθίου – οξειδίου του μαγγανίου (LMO)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία, λόγω της εσωτερικής της δομής, έχει το πλεονέκτημα της ευκολότερης ροής των ανιόντων που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση και κατ' επέκταση μεγαλύτερη ροή ρεύματος. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η μεγάλη θερμική σταθερότητα, η αυξημένη ασφάλεια εις βάρος ωστόσο των συνολικών κύκλων ζωής.

Η χαμηλή εσωτερική αντίσταση επιτρέπει για γρήγορη φόρτιση – εκφόρτιση, για παράδειγμα μια μπαταρία τύπου 18650 LMO μπορεί να φορτιστεί με ρεύματα της τάξης των 20 – 30A χωρίς την ανάπτυξη σημαντικής θερμοκρασίας. Επιπλέον είναι δυνατή η εφαρμογή παλμών ρεύματος 50A διάρκειας ενός δευτερολέπτου αλλά όχι συνεχούς καθώς το σύστημα θα θερμαινόταν. Η μέγιστη θερμοκρασία δεν πρέπει να ξεπερνά τους 80° C.

Η τεχνολογία LMO έχει χωρητικότητα περίπου κατά το ένα τρίτο λιγότερη από αυτή της LCO. Επιπλέον, οι κατασκευαστές έχουν την ευελιξία κατασκευής με στόχο είτε τη μεγιστοποίηση της συνολικής διάρκειας ζωής, είτε την βελτίωση της ειδικής ισχύος, είτε τη βελτίωση της ειδικής ενέργειας.

Παρακάτω στο εξαγωνικό διάγραμμα φαίνεται ότι η συγκεκριμένη μπαταρία έχει ισορροπημένα χαρακτηριστικά αν και πιο νέες σχεδιάσεις έχουν αυξήσει την ειδική ισχύ, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής. Στη σύγχρονη εποχή η μπαταρία λιθίου – μαγγανίου δε βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή παρά σε ειδικές εφαρμογές.



Εικόνα 6: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου - οξειδίου του μαγγανίου

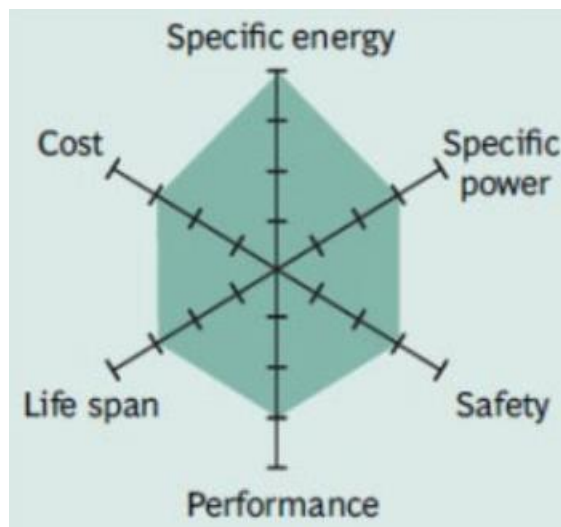
Η ανάμιξη LMO με κράματα νικελίου – μαγγανίου – κοβαλτίου μπορεί να βελτιώσει την ειδική ενέργεια και να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής, ένας συνδυασμός που είναι η βέλτιστη λύση και για τα δύο συστήματα και που εφαρμόζεται κυρίως στην ηλεκτροκίνηση, καθώς η παρουσία LMO σε ποσοστό 30% επιτρέπει υψηλά ρεύματα εκφόρτισης ενώ η παρουσία NMC αυξάνει την αυτονομία (αύξηση ειδικής ισχύος). Νεότερες προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου στην άνοδο όπου επιτρέπει την αύξηση της χωρητικότητας κατά περίπου 25%, μειώνοντας ωστόσο τη διάρκεια ζωής λόγω της μηχανικής καταπόνησης που προέρχεται από το εγγενές χαρακτηριστικό του πυριτίου να συστέλλεται – διαστέλλεται κατά την εκφόρτιση – φόρτιση. Εν ολίγοις το βασικό πλεονέκτημα της LMO τεχνολογίας είναι η ευελιξία που προσφέρει στο σχεδιασμό με σκοπό την αύξηση της ειδικής ενέργειας, είτε της ειδικής ισχύος είτε της διάρκειας ζωής ανάλογα με το υλικό προσθήκης.

Λιθίου – οξείδιο του νικελίου, μαγγανίου, κοβαλτίου (NMC)

Ο συνδυασμός νικελίου, μαγγανίου και κοβαλτίου για την κατασκευή της καθόδου, δημιούργησε ένα από τα καλύτερα συστήματα μπαταρίας ιόντων λιθίου. Αντίστοιχα με τα συστήματα LMO, τα συγκεκριμένα μπορούν να σχεδιαστούν είτε με στόχο τη μέγιστη χωρητικότητα, είτε τη μέγιστη ισχύ (υψηλά ρεύματα). Για παράδειγμα μια μπαταρία 18650 NMC χωρητικότητας 2800 mA·h μπορεί να προσδώσει ρεύματα της τάξης των 4 – 5A ενώ η ίδια μπαταρία αν έχει σχεδιαστεί με στόχο την αυξημένη ειδική ισχύ μπορεί να παραδώσει ρεύματα της τάξης των 20A με χωρητικότητα ίση με 2000 mA·h. Με την προσθήκη πυριτίου η χωρητικότητα μπορεί να φτάσει

τα 4000 mA·h αλλά με το μειονέκτημα της χαμηλότερης εκφόρτισης και διάρκειας ζωής λόγω της μηχανικής αστάθειας του πυριτίου.

Τα πλεονεκτήματα της NMC τεχνολογίας βασίζονται στο συνδυασμό του νικελίου με το μαγγάνιο, καθώς το νικέλιο είναι γνωστό για την υψηλή του ειδική ενέργεια αλλά χαμηλή σταθερότητα, ενώ το μαγγάνιο έχει το πλεονέκτημα λόγω της εσωτερικής του δομής, της χαμηλής εσωτερικής αντίστασης με το μειονέκτημα της χαμηλής ειδικής ενέργειας. Ο συνδυασμός αυτών των δύο αυξάνει και την ειδική ενέργεια αλλά και την ειδική ισχύ. Μια μπαταρία NMC αποτελείται συνήθως από ένα μέρος μαγγανίου, ένα μέρος κοβαλτίου και ένα μέρος νικελίου, γι' αυτό και χαρακτηρίζεται και ως 1-1-1. Οι κατασκευαστές τείνουν να μειώνουν το περιεχόμενο σε κοβάλτιο με έναν μικρό συμβιβασμό στην απόδοση καθώς το κοβάλτιο μπορεί και σταθεροποιεί το νικέλιο, που πρόκειται για ένα αρκετά ενεργό υλικό. Η ευελιξία της μπαταρίας NMC βασίζεται στη δυνατότητα να τροποποιούνται τα ποσοστά των τριών βασικών ενεργών υλικών για να ικανοποιείται ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Το εξαγωνικό διάγραμμα της τεχνολογίας NMC αποδεικνύει ότι έχει πολύ καλή ειδική ενέργεια χωρίς να θυσιάζει τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά.



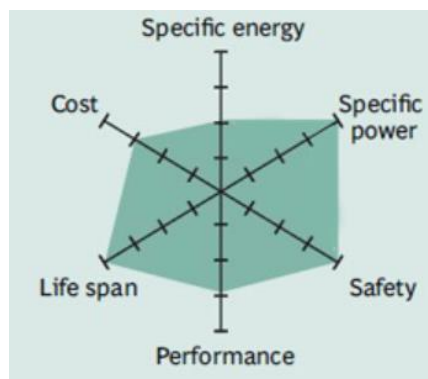
Εικόνα 7: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου – οξειδίου του νικελίου, μαγγανίου, κοβαλτίου

Λιθίου – φωσφορικού σιδήρου (LFP)

Το 1996, το πανεπιστήμιο του Texas ανακάλυψε τον φώσφορο ως μια εναλλακτική επιλογή για το υλικό καθόδου των επαναφορτιζόμενων μπαταριών ιόντων λιθίου. Ο συνδυασμός αυτός έχει καλά ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά καθώς και χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι το αυξημένο ρεύμα φόρτισης – εκφόρτισης καθώς και η θερμική σταθερότητα, η αυξημένη ασφάλεια και η αντοχή στην κακή χρήση.

Η μπαταρία LFP είναι πιο ανθεκτική σε καταστάσεις πλήρους φόρτισης και καταπονείται λιγότερο από άλλα συστήματα ιόντων λιθίου αν διατηρηθεί σε υψηλή τάση για μεγάλο διάστημα. Ως μειονέκτημα η χαμηλότερη τάση κελίου της τάξης των 3.2V μειώνει την ειδική ενέργεια, πιο κάτω και από τις μπαταρίες LCO. Ακόμα, έχει υψηλούς ρυθμούς αυτό – εκφόρτισης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ιόντων λιθίου καθώς και πτώση της απόδοσης στις χαμηλές θερμοκρασίες ενώ στις υψηλές θερμοκρασίες μείωση της διάρκειας ζωής.

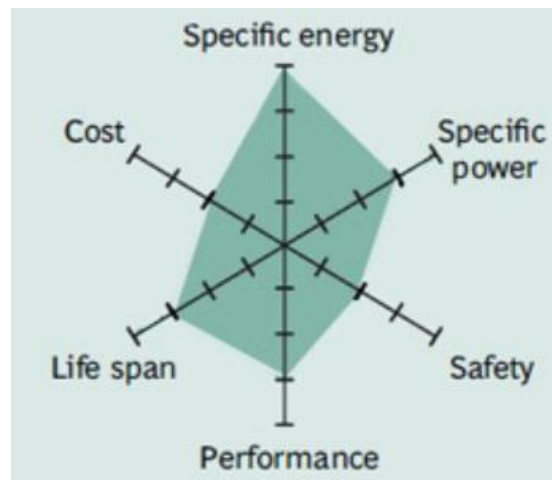
Ο συνδυασμός λιθίου – φωσφορικού σιδήρου είναι μια καλή εναλλακτική όσον αφορά τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος για την εκκίνηση (SLI) καθώς 4 κελιά εν σειρά μπορεί να παράξουν την τάση των 12.8V, παρόμοια με εκείνη των έξι μπαταριών μολύβδου οξέος με τάση κελιού τα 2.0V. Τα οχήματα φορτίζουν σταθερά τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος στα 14.4V (2.4V ανά κελί) και διατηρούν αυτή την τάση σταθερή ώστε να εμποδίζουν τη δημιουργία αυλακώσεων. Στην περίπτωση των μπαταριών LFP, κάθε κελί φορτίζεται πλήρως στα 3.6V, με την αντοχή στην υπερφόρτιση να είναι υπό αμφισβήτηση. Έτσι, πρέπει να αποσυνδέεται σύντομα κάτι που δε συμβαίνει κατά την οδήγηση. Επομένως, η τεχνολογία LFP έχει το πλεονέκτημα της αυξημένης διάρκειας ζωής με τη δυνατότητα παροχής υψηλού ρεύματος (αυξημένη ειδική ισχύς).



Εικόνα 8: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου - φωσφορικού σιδήρου

Λιθίου – οξείδιο του νικελίου, κοβαλτίου, αλουμινίου (NCA)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία μοιράζεται αρκετά χαρακτηριστικά με την τεχνολογία NMC, όπως η υψηλή ειδική ενέργεια, η σχετικά ικανοποιητική ειδική ισχύς καθώς η αυξημένη διάρκεια ζωής. Τα βασικά της μειονεκτήματα είναι η ασφάλεια και το υψηλότερο κόστος. Η ειδική ενέργεια είναι της τάξης των 200 – 260 W·h/kg αλλά μπορεί να φτάσει και τα 300 W·h/kg. Μπορεί να φτάσει τους 500 κύκλους πάντα τηρώντας το βάθος εκφόρτισης που έχει προσδιορίσει ο κατασκευαστής καθώς και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Λόγω της υψηλής ειδικής ενέργειας και ισχύς, η συγκεκριμένη μπαταρία βρίσκει εφαρμογές στην ηλεκτρική αυτοκινητοβιομηχανία όπου με ορισμένες τροποποιήσεις μπορεί να ανταποκριθεί και στη γρήγορη φόρτιση.

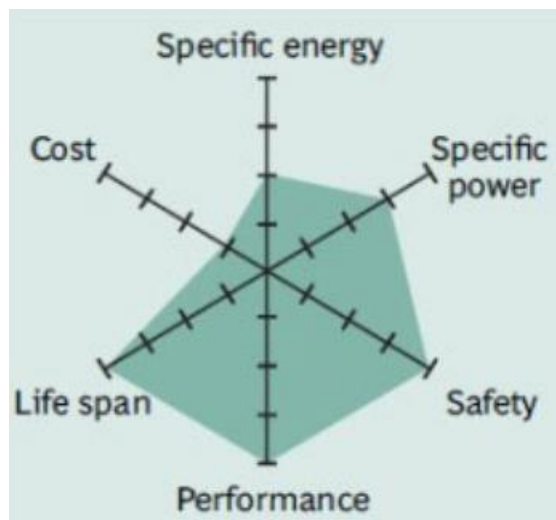


Εικόνα 9: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου - οξείδιου νικελίου, κοβαλτίου, αλουμινίου

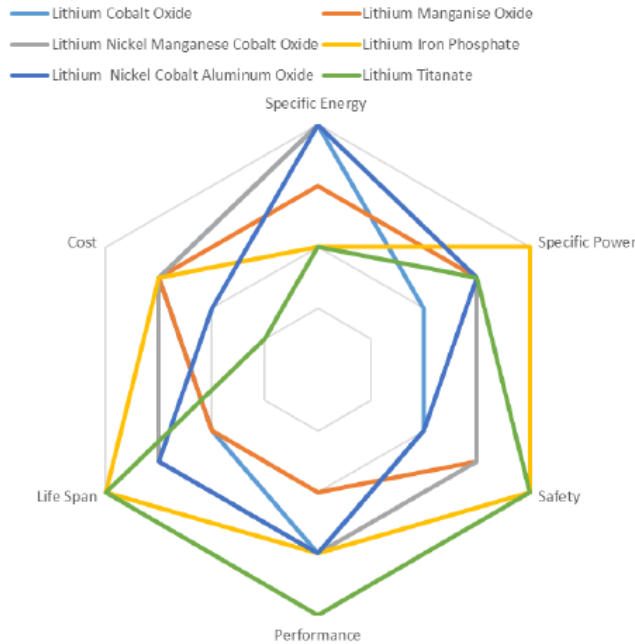
Λιθίου – οξείδιο του τιτανίου (LTO)

Το κράμα λιθίου – οξείδιο του τιτανίου αντικαθιστά τον γραφίτη στην άνοδο μιας τυπικής μπαταρίας ιόντων λιθίου όπου λόγω της εσωτερική του δομής έχει καλά ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά με χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Όσον αφορά την τάση κελιού, αυτή διαμορφώνεται στα 2.4V όπου είναι χαμηλότερη με τις άλλες τεχνολογίες ιόντων λιθίου. Βασικό της πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ταχύτατης φόρτισης της τάξης των 10C, δηλαδή το ρεύμα φόρτισης μπορεί να φτάσει το δεκαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας. Πρόκειται για μια μπαταρία με πολύ ψηλά στάνταρ ασφαλείας, περισσότερους κύκλους φόρτισης από τις άλλες μπαταρίες ιόντων λιθίου. Ακόμα, είναι σταθερή και σε χαμηλές θερμοκρασίες αφού ακόμα και στους -30°C μπορεί και διατηρεί το 80% της ονομαστικής της χωρητικότητας.

Η μπαταρία LTO έχει το πλεονέκτημα της μη δημιουργίας της επιφάνειας SEI, μεταξύ της ανόδου και του ηλεκτρολύτη που παρατηρείται σε άλλες τεχνολογίες ιόντων λιθίου κατά τη γρήγορη φόρτιση και τη φόρτιση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, είναι αρκετά σταθερή σε υψηλές θερμοκρασίες με το μειονέκτημα του κόστους το οποίο προσδιορίζεται στα \$1005 την kWh, καθιστώντας τη μια από τις πιο ακριβές μπαταρίες που βασίζονται στο λίθιο. Το βασικό της μειονέκτημα είναι η αρκετά χαμηλή ειδική ενέργεια της τάξης των 65 W·h/kg που την καθιστά συγκρίσιμη με την τεχνολογία Ni-Cd.



Εικόνα 10: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου – οξείδιο του τιτανίου



Εικόνα 11: Εξαγωνικό διάγραμμα μπαταριών λιθίου, σύγκριση τεχνολογιών

Συνοψίζοντας για τις έξι επιμέρους τεχνολογίες των μπαταριών ιόντων λιθίου που έχουν αναλυθεί:

- Η τεχνολογία LCO έχει σχετικά υψηλή ειδική ενέργεια της τάξης των 150 – 200 W·h/kg, υψηλή τάση κελιού ίση με 3.6V και ικανοποιητική διάρκεια ζωής των 500 – 1000 κύκλων. Το βασικό της μειονέκτημα είναι το χαμηλό ρεύμα φόρτισης – εκφόρτισης ίσο με 1C.
- Μια μπαταρία LMO χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα της να προσφέρει υψηλά ρεύματα εκφόρτισης της τάξης των 20 – 30 A, όντας παράλληλα μια οικονομική επιλογή. Στα αρνητικά συγκαταλέγονται η χαμηλή ειδική ενέργεια και ισχύς καθώς και η μικρή διάρκεια ζωής των 300 – 700 κύκλων.
- Η τεχνολογία NMC έχει υψηλή ειδική ενέργεια (200 – 250 W·h/kg), μπορεί να φτάσει και τους 2000 κύκλους με υψηλά στάνταρ ασφάλειας. Επιπλέον, έχει την ευελιξία να τροποποιηθεί ώστε να βελτιωθεί είτε η ειδική της ενέργεια, είτε η ειδική ισχύς μεταβάλλοντας τα ποσοστά των τριών βασικών μετάλλων.
- Μια από τις πιο ασφαλείς μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η LFP. Πρόκειται για μια τεχνολογία αρκετά ανθεκτική και με μεγάλη διάρκεια ζωής με βασικά όμως μειονεκτήματα στα οποία συγκαταλέγονται η χαμηλή τάση κελιού των 3.2V και καθ' επέκταση η χαμηλή ειδική ενέργεια που δε ξεπερνά τα 120W·h/kg.

- Η τεχνολογία NCA έχει υψηλή ειδική ενέργεια σε σχέση με τις άλλες λύσεις των ιόντων λιθίου (200 – 260 W·h/kg), με ικανοποιητική ειδική ισχύ αλλά χαμηλή διάρκεια ζωής των 500 κύκλων. Επιπλέον, είναι από τις λιγότερο ασφαλείς μπαταρίες με βάση το λίθιο χωρίς να έχει δυνατότητες ταχείς φόρτισης – εκφόρτισης (δεν πρέπει να ξεπερνά το 1C).
- Από τις πιο ανθεκτικές μπαταρίες, με μεγάλη διάρκεια ζωής, με δυνατότητες ταχείας φόρτισης και μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας είναι η LTO. Στα αρνητικά η πολύ χαμηλή ειδική ενέργεια των 70 – 80 W·h/kg.

Είναι εμφανές ότι η επιλογή της τεχνολογίας μπαταρίας που θα εφαρμοστεί και στην παρούσα μελέτη δεν είναι μια εύκολη διαδικασία καθώς υπάρχουν αρκετές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σχετικά με την εφαρμογή σε ναυτικές εφαρμογές υπάρχουν κάποιες σημαντικές παράμετροι που μπορούν να καθοδηγήσουν στην κατάλληλη επιλογή. Αρχικά, η απαίτηση για υψηλή ειδική ισχύ καθώς ένα σκάφος δεν υπόκειται σε γρήγορες επιταχύνσεις που σημαίνει ότι δεν απαιτούνται υψηλά ρεύματα εκφόρτισης. Από την άλλη πλευρά, οι ενεργειακές απαιτήσεις δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτές ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, οπότε η υψηλή ειδική ενέργεια είναι κάτι που θα παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή. Πέρα όμως και από την ειδική χωρητικότητα μια μπαταρία που θα χρησιμοποιηθεί ως η βασική πηγή ενέργειας σε μια μελέτη μετατροπής ενός σκάφους σε ηλεκτρικό πρέπει να χαρακτηρίζεται και από αυξημένη ασφάλεια αλλά και από διάρκεια στο χρόνο (υψηλούς κύκλους) ώστε να είναι και οικονομικά βιώσιμη. Λαμβάνοντας τα ανωτέρω υπόψη, φαίνεται ότι η τεχνολογία LFP ικανοποιεί τις απαιτήσεις όντας παράλληλα μια σχετικά οικονομική επιλογή της τάξης των 550 €/kW·h.

4. ΝΟΜΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Οι μπαταρίες των πλοίων μπορεί να είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερες από αυτές των οχημάτων. Οι ακραίες μορφές φόρτισης και λειτουργίας, σε συνδυασμό με το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο, δημιουργεί νέες προκλήσεις σε σχέση με την ασφάλεια, την ενσωμάτωση και τη διάρκεια ζωής μια τέτοιας μπαταρίας. Για να αποφευχθούν ατυχήματα και ανεπιθύμητα περιστατικά που ενδέχεται να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ασφάλεια και το κόστος και ενδεχομένως να σταματήσουν την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών, είναι σημαντικό τα συστήματα που σχετίζονται με τις μπαταρίες να επαληθεύονται και να επικυρώνονται σύμφωνα με τις "βέλτιστες πρακτικές".

Το σκάφος της παρούσας μελέτης πρέπει να διατηρήσει τα ίδια στάνταρ ασφαλείας και ακεραιότητας σε σχέση με την υπάρχουσα εκδοχή του. Η ασφάλεια του συστήματος των μπαταριών αποτελεί τη βασική ανησυχία και το βασικό στόχο όλων των ενδιαφερόμενων μερών των ηλεκτρικών και υβριδικών πλοίων.

Ο τεχνικός σχεδιασμός του συστήματος μπαταριών και η τοποθέτηση του στο κατάλληλο μέρος στο σκάφος περιγράφεται βάση των οδηγιών που εξέδωσε ο Αμερικάνικος Νηογνώμονας (ABS) το Γενάρη του 2022 "Use of Lithium-ion Batteries in the Marine and Offshore Industries" (Jan 2022). Η επιλογή των σχετικών οδηγιών βασίστηκε στο γεγονός ότι καθοδηγεί τη σχεδίαση και την εγκατάσταση συστημάτων μπαταριών με συνολική χωρητικότητα μεγαλύτερη των 25 kW·h για πλοία και offshore κατασκευές, ακόμα και για την περίπτωση όπου οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως η κύρια πηγή ηλεκτρικής ισχύος.

Επιπλέον οι σχετικοί κανονισμοί αφορούν τις κύριες τεχνολογίες μπαταριών ιόντων λιθίου και πιο συγκεκριμένα όλες τις προαναφερθείσες επιλογές όπως τις ιόντων λιθίου – οξείδιο του κοβαλτίου (LCO), ιόντων λιθίου – οξείδιο του μαγγανίου (LMO), ιόντων λιθίου – οξείδιο του νικελίου, μαγγανίου, κοβαλτίου (NMC), ιόντων λιθίου – οξείδιο του νικελίου, κοβαλτίου, αλουμινίου (NCA), ιόντων λιθίου – φωσφορικού σιδήρου (LFP) και ιόντων τιτανικού λιθίου (LTO).

4.1 Ορολογία

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των βασικών εννοιών που συναντώνται στους σχετικούς κανονισμούς.

Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS): Ηλεκτρονικό σύστημα που σχετίζεται με μονάδα ή πακέτο μπαταριών και έχει τη δυνατότητα να ανοίγει το κύκλωμα σε περίπτωση υπερφόρτισης, σε μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης, σε μεγάλα βάρη εκφόρτισης και υπερθέρμανσης. Εποπτεύει και διαχειρίζεται την κατάσταση του συστήματος, υπολογίζει δευτερεύοντα δεδομένα, τα εκθέτει και μπορεί και διαχειρίζεται το σύστημα με σκοπό τη διασφάλιση του, την υψηλή απόδοση και την μη καταπόνηση του.

Σύστημα μπαταρίας: Σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά, μονάδες ή πακέτα μπαταριών. Έχει σύστημα διαχείρισης που μπορεί να ανοίξει το κύκλωμα σε περίπτωση υπερφόρτισης, μεγάλου ρεύματος, βαθιάς εκφόρτισης και υπερθέρμανσης.

Διαμέρισμα μπαταριών: Ο χώρος στον οποίο τοποθετείται το σύστημα των μπαταριών.

Συστοιχία μπαταριών: Κελιά ή μονάδες μπαταριών που είναι συνδεδεμένες εν σειρά με σκοπό να παράγουν το ίδιο επίπεδο τάσης για το σύστημα της μπαταρίας.

Ισορροπία κελιών: Ο μηχανισμός που αναγκάζει όλα τα κελιά σε μια μονάδα μπαταρίας να έχουν τις ίδιες τάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός “κυκλώματος ισορροπίας” το οποίο συνήθως βρίσκεται εντός του συστήματος διαχείρισης μπαταριών. Εν απουσία αυτού του κυκλώματος, ένα ή παραπάνω κελιά (ως αποτέλεσμα της διαφορετικής γήρανσης τους) μπορεί να έχουν είτε χαμηλότερη είτε υψηλότερη φόρτωση κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία της μονάδας. Η ισορροπία των κελιών δεν είναι μια άμεση διαδικασία, μπορεί να απαιτεί κάποια επαναληψιμότητα για να πραγματοποιηθεί.

Σύστημα διαχείρισης ισχύος (PMS): Ένας ολοκληρωμένος πίνακας και σύστημα ελέγχου που καθορίζει την παραγωγή ισχύος και τη διανομή της, συμπεριλαμβανομένων πολλών πινάκων διανομής. Το PMS είναι υπεύθυνο για λειτουργίες όπως ο διαμοιρασμός του φορτίου καθώς και η απόρριψη φορτίων όταν η ανεπτυγμένη ισχύς είναι ανεπαρκής.

Ονομαστική χωρητικότητα: Η χωρητικότητα ενός κελιού ή μιας μπαταρίας που καθορίζεται από το κατασκευαστή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Θερμική φυγή: Η κατάσταση κατά την οποία ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας εντός κάποιου στοιχείου της μπαταρίας ξεπερνά το ρυθμό της μέγιστης δυνατότητας απόρριψής της. Οι αιτίες μπορεί να είναι η υπερφόρτιση της μπαταρίας, αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος, και μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του κελιού.

Έκτακτη πηγή ηλεκτρικής ισχύος: Έκτακτη πηγή ηλεκτρικής ισχύος, με σκοπό την παροχή στον έκτακτο ηλεκτρικό πίνακα διανομής σε περίπτωση αστοχίας της κύριας πηγής ηλεκτρικής ισχύος.

Έκτακτος ηλεκτρικός πίνακας διανομής: Ηλεκτρικός πίνακας διανομής που σε περίπτωση αστοχίας της κύριας πηγής ισχύος, τροφοδοτείται απευθείας από την έκτακτη πηγή ηλεκτρικής ισχύος με σκοπό την παροχή της στις συσκευές έκτακτης ανάγκης.

Αεροστεγής πόρτα αερίων: Μια στερεή, αεροστεγής πόρτα σχεδιασμένη για να εμποδίζει το πέρασμα αερίων κάτω από φυσιολογικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Κύρια πηγή ηλεκτρικής ισχύος: Πηγή που έχει ως σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ισχύος στον κύριο ηλεκτρικό πίνακα διανομής με σκοπό την παροχή της σε όλες τις συσκευές εκείνες που έχουν ως στόχο την διατήρηση του σκάφους σε φυσιολογικές λειτουργικές και κατοικήσιμες συνθήκες.

Κύριος πίνακας διανομής: Ο πίνακας εκείνος που τροφοδοτείται απευθείας από την κύρια πηγή ηλεκτρικής ισχύος με στόχο τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στις συσκευές του πλοίου.

Μεταβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης: Μια συσσωρευτική μπαταρία κατάλληλα τοποθετημένη για χρήση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, έχοντας τη δυνατότητα να λειτουργεί χωρίς επαναφόρτιση διατηρώντας την τάση της μπαταρίας καθ' όλη τη διάρκεια εκφόρτισης το πολύ 12% πάνω ή κάτω της ονομαστικής τάσης και με επαρκή χωρητικότητα ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει αυτόματα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε περίπτωση αστοχίας είτε της κύριας ή έκτακτης πηγής ηλεκτρικής ισχύος.

4.2 Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος μπαταρίας

Οι κανονισμοί αυτής της ενότητας αφορούν τα συστήματα μπαταρίας του σκάφους. Αυτά μπορεί να προορίζεται είτε για την κύρια πρόωση του σκάφους, είτε για την κύρια παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, είτε για την παροχή ηλεκτρικής ισχύος σε έκτακτη ανάγκη.

Γενικά όσον αφορά το σύστημα μπαταρίας αυτό πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω:

- Το περίβλημα των κελιών και των μονάδων των μπαταριών πρέπει να είναι κατασκευασμένο από ανθεκτικό, όχι εύφλεκτο, ανθεκτικό στην υγρασία υλικό το οποίο θα είναι αδρανές στο θαλάσσιο περιβάλλον και στις θερμοκρασίες που θα εκτίθενται.
- Το περίβλημα των μονάδων των μπαταριών πρέπει να έχει βαθμό προστασίας μεγαλύτερο του IP44.
- Το σύστημα μπαταρίας πρέπει να είναι εξοπλισμένο με μηχανισμό τερματισμού έκτακτης ανάγκης ο οποίος θα βρίσκεται κοντά αλλά έξω από το διαμέρισμα των μπαταριών. Αυτός ο μηχανισμός πρέπει να είναι ανεξάρτητος οποιουδήποτε κυκλώματος ελέγχου, εποπτείας και συναγερμού. Αν το σύστημα μπαταρίας χρησιμοποιείται με σκοπό την παροχή ισχύος για την πρόωση του σκάφους, πρέπει να υπάρχει ακόμα ένας μηχανισμός τερματισμού έκτακτης ανάγκης στη γέφυρα ή στον κεντρικό σταθμό ελέγχου (CCS).
- Αν το σύστημα μπαταρίας χρησιμοποιείται ως μέρος της έκτακτης πηγής ηλεκτρικής ισχύος, δεν πρέπει να είναι εγκατεστημένο στον ίδιο χώρο με τον πίνακα έκτακτης ανάγκης. Αν το σύστημα μπαταριών χρησιμοποιείται σε συνεργασία με κάποια έκτακτη πηγή ηλεκτρικής ισχύος (όπως για παράδειγμα κάποια γεννήτρια) τότε δεν πρέπει να βρίσκονται και τα δύο στον ίδιο χώρο. Οι δύο χώροι πρέπει να είναι προσβάσιμοι και όσο πιο κοντά γίνεται.
- Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται στο ίδιο κύκλωμα κελιά μπαταριών διαφορετικών φυσικών χαρακτηριστικών, χημείας και ηλεκτρικών παραμέτρων.
- Το σύστημα μπαταρίας πρέπει να έχει μηχανισμούς οι οποίοι μπορούν να το απομονώσουν σε περίπτωση συντήρησης. Αυτός ο μηχανισμός πρέπει να είναι ανεξάρτητος του συστήματος έκτακτης ανάγκης.
- Όλα τα εξερχόμενα κυκλώματα του συστήματος μπαταρίας πρέπει να είναι προστατευμένα από υπερφόρτωση και βραχυκύκλωμα, εξαιρώντας τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση της μηχανής.

- Τα τερματικά των κελιών ή των μονάδων των μπαταριών πρέπει να είναι προσβάσιμα, επισημασμένα και προστατευμένα έναντι μηχανικής βλάβης και τυχαίας επαφής με την μεταλλική κατασκευή και βραχυκυκλώματος.

Όσον αφορά τα συστήματα ελέγχου, εποπτείας, συναγερμού και ασφάλειας:

- Τα συστήματα ελέγχου, εποπτείας και συναγερμού πρέπει να έχουν εγκαταστάσεις αυτό – ελέγχου. Σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος ή της παροχής ισχύος πρέπει να ενεργοποιείται κάποιος συναγερμός.
- Το σύστημα ασφάλειας πρέπει να είναι σχεδιασμένο με στόχο την εξάλειψη των συνεπειών σε περίπτωση αστοχίας. Πρέπει να είναι δομημένο με βάση την αρχή “fail – safe”, δηλαδή ότι ακόμα και σε περίπτωση αστοχίας αυτή να συμβεί με έναν προβλέψιμο τρόπο και να καταλήξει σε κάποια “ασφαλή κατάσταση”.
- Οι αισθητήρες που προορίζονται για τις λειτουργίες ασφαλείας πρέπει να είναι ανεξάρτητοι από τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για άλλους σκοπούς (όπως για παράδειγμα το σύστημα συναγερμού).
- Οι αισθητήρες πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αντέχουν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το περίβλημα των αισθητήρων και του καλωδίου πρέπει να είναι κατάλληλο για το χώρο στον οποίο βρίσκονται. Οποιαδήποτε δυσλειτουργία των αισθητήρων πρέπει να είναι εύκολα αντιληπτή.

Σύστημα μπαταρίας ως κύρια πηγή ηλεκτρικής ισχύος

Σε περίπτωση που το σύστημα μπαταρίας χρησιμοποιείται σαν την κύρια πηγή ηλεκτρικής ισχύος του σκάφους με σκοπό την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών ισχύος πρέπει να ικανοποιεί αρχικά τους κανονισμούς της σημαίας και της σύμβασης SOLAS και περαιτέρω αυτούς που αφορούν στην ενεργειακή εφεδρεία του σκάφους, τη χωρητικότητα, το σύστημα διαχείρισης ισχύος, τα προστατευτικά συστήματα, την εποπτεία, την πυροπροστασία και τις απαραίτητες δοκιμές που πρέπει να πραγματοποιηθούν.

Ξεκινώντας από την ενεργειακή εφεδρεία του σκάφους, πρέπει καθ’ ελάχιστο να υπάρχουν δύο ανεξάρτητα συστήματα μπαταρίας τα οποία θα βρίσκονται και σε διαφορετικούς χώρους. Αυτό δικαιολογείται από το αυξημένο ρίσκο θερμικής διαφυγής, έτσι ώστε σε αυτήν την περίπτωση να

μην αστοχήσουν και τα δύο συστήματα. Επιπλέον, η σχεδίαση του συστήματος πρόωσης πρέπει να έχει τουλάχιστον δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους συστήματα.

Όσον αφορά τη χωρητικότητα των μπαταριών αυτή θα εκτιμηθεί με βάση το επιχειρησιακό ενεργειακό προφίλ που θα έχει το σκάφος. Ακόμα απαραίτητη είναι η ύπαρξη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας (PMS), όπως και προστατευτικά συστήματα τα οποία θα αποτελούνται από συστήματα προστασίας των κυκλωμάτων καθώς και διατάξεις ρίψης φορτίων.

Όσον αφορά την εποπτεία πρέπει αφενός για τα συστήματα μπαταριών να εμφανίζεται στον χειριστή η κατάσταση φόρτισης (SoC) καθώς και η υγεία των μπαταριών (SoH). Ακόμα, το σύστημα διαχείρισης ισχύος πρέπει να παρέχει πληροφορίες στη γέφυρα σχετικά με την διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών, τη διαθέσιμη ισχύ καθώς και την απομένουσα αυτονομία του σκάφους με βάση την προγραμματισμένη διαδρομή.

Όσον αφορά την πυροπροστασία των διαμερισμάτων που περιέχουν τα συστήματα μπαταριών, αυτά θεωρούνται μηχανοστάσια κατηγορίας A με βάση τη σύμβαση SOLAS II-2 και υπόκεινται στις σχετικές απαιτήσεις πυροπροστασίας. Η πυροπροστασία και η μόνωση στα διαμερίσματα των συστημάτων μπαταριών πρέπει να είναι ικανά να διατηρήσουν τυχόν πυρκαγιά στο χώρο από τον οποίο ξεκίνησε. Η πυροπροστασία που παρέχεται από μόνωση A-60 πρέπει να είναι κατάλληλη για όλα τα συσσωρευτικά φορτία εντός των χώρων των μπαταριών και των συνορευόντων δεξαμενών. Τα θερμικά φορτία που σχετίζονται με τους χώρους των μπαταριών και των συγγενών χώρων δεν πρέπει να ξεπερνούν την αντοχή των τμημάτων κατηγορίας A-60.

Σύστημα μπαταρίας ως πηγή ισχύος έκτακτης ανάγκης

Εφόσον το σύστημα μπαταριών είναι και η πηγή ισχύος έκτακτης ανάγκης πρέπει να ικανοποιεί και τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Σε περίπτωση αστοχίας της κύριας πηγής ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να συνδέεται αυτόματα στον ηλεκτρικό πίνακα διανομής έκτακτης ανάγκης.
- Πρέπει άμεσα να μπορεί να τροφοδοτήσει τα φώτα έκτακτης ανάγκης και πλοήγησης καθώς και τα συστήματα επικοινωνίας και συναγερμού.
- Τους κανονισμούς της σημαίας όσον αφορά τα συστήματα έκτακτης ανάγκης.
- Πρέπει να είναι εγκατεστημένο αρκετά κοντά αλλά όχι στον ίδιο χώρο με τον ηλεκτρικό πίνακα έκτακτης ανάγκης.

- Το σύστημα εξαερισμού του διαμερίσματος των μπαταριών πρέπει να είναι λειτουργικό σε περίπτωση αστοχίας της κύριας πηγής ηλεκτρικής ισχύος.

Σύστημα φόρτισης

Όσον αφορά το σύστημα φόρτισης των μπαταριών αυτό πρέπει να ικανοποιεί τα εξής:

- Οι εγκαταστάσεις φόρτισης πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να αναπληρώσουν το 80% της χωρητικότητας του συστήματος μπαταριών σε τουλάχιστον λιγότερο από δέκα ώρες, εκτός αν απαιτείται ταχύτερος ρυθμός φόρτισης.
- Ο φορτιστής πρέπει να μπορεί να λειτουργεί στα όρια που ορίζονται (φόρτισης και εκφόρτισης) στο σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS).
- Πρέπει να είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί ανάμεσα στα όρια τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας που έχει ορίσει ο κατασκευαστής των μπαταριών.
- Πρέπει να είναι ενσωματωμένο και να ελέγχεται από το σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS).
- Σε περίπτωση αστοχίας του πρέπει να ενεργοποιείται σχετικός συναγερμός.

Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS)

Το σύστημα διαχείρισης μπαταριών αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο ελέγχου του συστήματος μπαταριών καθώς διασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία του και ενημερώνει το χειριστή για την κατάσταση του. Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί συνοψίζονται στις εξής:

- Αρχικά το σύστημα μπαταριών πρέπει απαραίτητα να έχει και σύστημα διαχείρισης του (BMS).
- Το BMS πρέπει καθ' ελάχιστο να εποπτεύει την τάση κελιού, τη θερμοκρασία και το ρεύμα της συστοιχίας των κελιών.
- Το BMS πρέπει να έχει αδιάκοπη παροχή ισχύος και να ενεργοποιεί έναν συναγερμό σε περίπτωση αστοχίας της κύριας πηγής ισχύος.
- Σε περίπτωση που συμβεί κάτι από τα παρακάτω συμβάντα τότε πρέπει να ενεργοποιούνται οπτικοί και ακουστικοί συναγερμοί σε συγκεκριμένο χώρο όπου υπάρχει πάντα ανθρώπινη παρουσία.

Αυτά τα συμβάντα είναι:

1. Υπέρταση κελιού.
 2. Υπόταση κελιού.
 3. Ανισορροπία τάσης κελιών.
 4. Υπερθέρμανση κελιού.
 5. Βλάβη γείωσης μονάδας/πακέτου μπαταριών.
 6. Ενεργοποίηση μηχανισμού που παρέχει ηλεκτρική μόνωση.
 7. Αστοχία επικοινωνίας με το σύστημα μπαταριών.
 8. Λοιπές συστάσεις που θα προκύψουν από μια διαδικασία εκτίμησης ρίσκου.
- Σε περίπτωση που προκύψουν συγκεκριμένες συνθήκες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβη το σύστημα μπαταριών ιόντων λιθίου θα πρέπει να ενεργοποιείται το σύστημα ασφαλείας. Οποιαδήποτε ενεργοποίηση του αυτόματου συστήματος ασφαλείας πρέπει να ενεργοποιεί το συναγερμό σε συγκεκριμένο χώρο που υπάρχει μόνιμη ανθρώπινη παρουσία.
 - Το εγκατεστημένο λογισμικό πρέπει να έχει τη δυνατότητα να εμποδίζει το πλήρωμα από το να παρακάμπτει και να αγνοεί σημαντικά συστήματα συναγερμού και τερματισμού. Η χειροκίνητη παράκαμψη του συστήματος ασφαλείας δεν επιτρέπεται.
 - Τέλος το BMS πρέπει να είναι ικανό για τα παρακάτω:
 1. Τη μέτρηση και την επικοινωνία της τάσης, του ρεύματος, της εσωτερικής θερμοκρασίας, της ισορροπίας των μπαταριών και αστοχίας της γείωσης.
 2. Να υπολογίζει και να ενημερώνει για την κατάσταση φόρτισης (SoC), κατάσταση υγείας (SoH) και τον εναπομείναντα χρόνο του συστήματος.
 3. Να ισορροπεί τα φορτία στις μπαταρίες.
 4. Να απομονώνει τμήματα των μπαταριών σε περίπτωση αστοχίας ή λανθασμένου χειρισμού.

4.3 Σχεδίαση και Ασφάλεια διαμερίσματος μπαταριών

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εισάγουν νέες προκλήσεις όσον αφορά τη σχεδίαση του διαμερίσματος τοποθέτησης τους εντός του πλοίου, καθώς πρόκειται για μια τεχνολογία που ναι μεν έχει γίνει ασφαλέστερη με το πέρασμα των χρόνων αλλά δεν παύει να εμπεριέχει συγκεκριμένους κινδύνους που μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιά. Γι' αυτό το σκοπό πρέπει το διαμέρισμα των μπαταριών να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια:

- Το διαμέρισμα μπαταριών πρέπει να βρίσκεται πρύμνηθεν της προωραίας φρακτής σύγκρουσης.
- Δεν πρέπει να περιέχουν αντικείμενα υψηλής θερμοκρασίας και πηγές θερμότητας.
- Η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών πρέπει να προσδιορίζεται με βάση τη θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο τοποθέτησης τους.
- Η υψηλή θερμοκρασία στο χώρο των μπαταριών πρέπει να ελέγχεται και να ειδοποιεί συνεχώς επανδρωμένη τοποθεσία.
- Πρέπει να υπάρχουν εγκατεστημένα κατάλληλα μέσα για την απαγωγή τυχόν αερίων που μπορεί να δημιουργηθούν σε τυχόν λανθασμένη λειτουργία των μπαταριών.
- Οι χώροι των μπαταριών πρέπει να αερίζονται μηχανικά και οι εκκενώσεις από το σύστημα εξαερισμού να οδηγούνται σε συγκεκριμένο μέρος στο ανοιχτό κατάστρωμα όπου δε θα προκαλέσουν πυρκαγιά ή τοξικό κίνδυνο στο προσωπικό. Οι αγωγοί εισόδου και εξόδου του εξαερισμού πρέπει να είναι από και προς μια ασφαλή τοποθεσία στο ανοιχτό κατάστρωμα. Ο εξαερισμός πρέπει να έχει την ικανότητα να ελαχιστοποιήσει τη συγκέντρωση εύφλεκτων ατμών, ιδίως σε τυχόν λανθασμένη λειτουργία των μπαταριών. Ο αγωγός εξαερισμού για τον χώρο των μπαταριών πρέπει να είναι ξεχωριστός από τα συστήματα HVAC που χρησιμοποιούνται για τον αερισμό άλλων χώρων του σκάφους.
- Στο χώρο των μπαταριών πρέπει να είναι εγκαταστημένοι αισθητήρες που ανιχνεύουν τυχόν εύφλεκτα και τοξικά αέρια. Σε περίπτωση που η συγκέντρωση τους ξεπεράσει το 30% LEL τότε θα πρέπει να ειδοποιείται συνεχώς επανδρωμένη τοποθεσία.
- Οι αγωγοί εξαερισμού πρέπει να είναι πλήρως συγκολλημένοι και τα υλικά αγωγών να είναι συμβατά με τα αέρια που παράγονται σε περίπτωση θερμικής διαφυγής. Οι αγωγοί που εξυπηρετούν αυτούς τους χώρους δεν πρέπει να διέρχονται από χώρους διαμονής του πληρώματος, χώρους ελέγχου και χώρους εργασίας.

- Ο εξαερισμός πρέπει να εξασφαλίζει ότι με την είσοδο του διαμερίσματος μπαταριών ανοιχτή, ο αέρας θα διέρχεται από αυτή και μέσα στο χώρο. Αντιστροφή αυτής της ροής θα πρέπει να ειδοποιεί συνεχώς επανδρωμένη τοποθεσία.
- Τα μέσα για την αποσύνδεση των μπαταριών σε περίπτωση που υπάρξει πυρκαγιά στο χώρο των μπαταριών ιόντων λιθίου θα πρέπει να βρίσκονται έξω από τον προστατευόμενο χώρο.
- Αν η έκκλιση εύφλεκτων αερίων είναι φυσιολογική κατά την ομαλή λειτουργία των μπαταριών τότε θα πρέπει το σύστημα εξαερισμού να είναι κλειδωμένο με το σύστημα φόρτισης ώστε να εμποδίζει τη φόρτιση σε περίπτωση που αυτό δε λειτουργεί.
- Η πρόσβαση στο χώρο θα πρέπει να γίνεται από αεροστεγείς πόρτες με συναγεμμό ή από αεροστεγείς πόρτες που θα κλείνουν αυτόματα χωρίς διάταξη συγκράτησης.

Πυροπροστασία

Όσον αφορά την πυροπροστασία στο χώρο των μπαταριών πρέπει να ισχύει:

- Οι χώροι των μπαταριών πρέπει να θεωρούνται χώροι βοηθητικών μηχανημάτων ή χώροι μηχανημάτων εκτός της κατηγορίας A όπως περιγράφονται στη SOLAS II-2 και υπόκεινται σε περαιτέρω δομικές απαιτήσεις πυροπροστασίας. Οι συγκεκριμένοι χώροι κατά βάση δεν είναι επανδρωμένοι. Η κλάση της μόνωσης έναντι πυρκαγιάς για τα όρια των διαμερισμάτων μπαταριών πρέπει να είναι τέτοια που θα απομονώνει την πυρκαγιά εν τη γενέσει της. Τα θερμικά φορτία που σχετίζονται με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου θα πρέπει να μην ξεπερνούν τα όρια αντοχής των κατηγοριοποιημένων διαμερισμάτων έναντι πυρκαγιάς.
- Το διαμέρισμα μπαταριών πρέπει να έχει κατάλληλο σύστημα πυρόσβεσης, συμβατό με την τεχνολογία των μπαταριών. Όπου το σύστημα πυρόσβεσης απαιτεί την φραγή του αερισμού, κατάλληλα μέτρα πρέπει να ληφθούν ώστε να μη δημιουργηθεί υπερπίεση ή συγκέντρωση τοξικών αερίων καθώς η πυρκαγιά από μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι αυτοδιαιωσιζόμενη.
- Απαραίτητη είναι η ύπαρξη πυροσβεστήρων όπου σε περίπτωση που η χημική σύσταση της μπαταρίας μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά κατηγορίας D, πρέπει να είναι κατάλληλοι και γι' αυτή. Επιπλέον, το πλήρωμα πρέπει να έχει τον κατάλληλο προστατευτικό εξοπλισμό κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση.

Διαμερίσματα μπαταριών γειτονικά σε δεξαμενές καυσίμου

Σε περίπτωση που ο χώρος των μπαταριών βρίσκεται γειτονικά σε δεξαμενές υγρού καυσίμου που έχουν σημείο ανάφλεξης 60° C ή παραπάνω, πρέπει να ικανοποιούνται και οι παρακάτω απαιτήσεις:

- Οι φρακτές που αποτελούν τα όρια μεταξύ των χώρων μπαταριών και των δεξαμενών καυσίμου πρέπει να έχουν μόνωση τάξης A-60 και η μόνωση αυτή να έχει πάχος τουλάχιστον 450 mm.
- Οι άνω και κάτω επιφάνειες των χώρων μπαταριών δεν πρέπει να είναι σε άμεση επαφή με τις άνω και κάτω επιφάνειες των δεξαμενών καυσίμου.
- Εναλλακτικά, πρέπει οι άνω και κάτω επιφάνειες των διαμερισμάτων μπαταριών να έχουν cofferdams. Τα cofferdams πρέπει να είναι εξοπλισμένα με μηχανισμούς αποστράγγισης για την αποφυγή συσσώρευσης καυσίμου σε περίπτωση διαρροής από τη δεξαμενή.

Όταν ο χώρος των μπαταριών βρίσκεται γειτονικά από δεξαμενές καυσίμου χαμηλού σημείου ανάφλεξης τότε πρέπει ο χώρος να είναι χωρισμένος από διαμερίσματα cofferdam μήκους τουλάχιστον 900 mm όπου θα έχει και μόνωση έναντι πυρκαγιάς κλάσης A-60.

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΕΡΙΑΣ & ΣΚΑΦΟΥΣ

Αρκετά OSV, όπως και το υπό μελέτη είναι εξοπλισμένα με από δύο μέχρι τέσσερα προωθητήρια azipods, όπου το καθένα/κάθε ζεύγος βρίσκεται σε κάθε μία από τις δύο γάστρες, εφόσον ο τύπος του σκάφους είναι καταμαράν. Οι κινητήρες αυτών των azipods βρίσκονται στα επιμέρους μηχανοστάσια – τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους - κάθε μιας από τις γάστρες, όπως και οι γεννήτριες οι οποίες κατά βάση είναι δύο όπως και στο υπό μελέτη σκάφος.

Τα πλήρως εξηλεκτρισμένα σκάφη απαιτούν επαρκή και αξιόπιστη τροφοδοσία ισχύος κατά τη φόρτιση τους, η οποία πρέπει να έχει σταθερή τάση και συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτές οι απαιτήσεις δεν μπορούν να καλυφθούν από απλές διατάξεις, επομένως πρέπει να υπάρχει και στη στεριά η απαραίτητη υλικοτεχνική δομή.

Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη φόρτιση του σκάφους αντλείται από το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Το βασικό πλεονέκτημα του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου είναι ότι το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται μπορεί να προέρχεται και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον, ακόμα και αν αυτό δεν είναι εφικτό, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε σταθμούς στη στεριά είναι κατά βάση πιο «καθαρή» από εκείνη που παράγεται στις μηχανολογικές εγκαταστάσεις του πλοίου.

Οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται στη στεριά για τη φόρτιση του πλοίου είναι κάθε άλλο από απλές καθώς απαιτούνται αυτοματισμοί και συναγερμοί ώστε να επιτευχθούν αποδεκτά επίπεδα ασφάλειας. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τον έλεγχο, την εποπτεία και τη λειτουργία των καλωδίων υψηλής ή χαμηλής τάσης και των συσκευών σύνδεσης καλείται Σύστημα Διαχείρισης Καλωδίων (Cable Management System – CMS).

Στη συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους ηλεκτρικές τοπολογίες από την πλευρά του σκάφους και από την πλευρά του καταστρώματος.

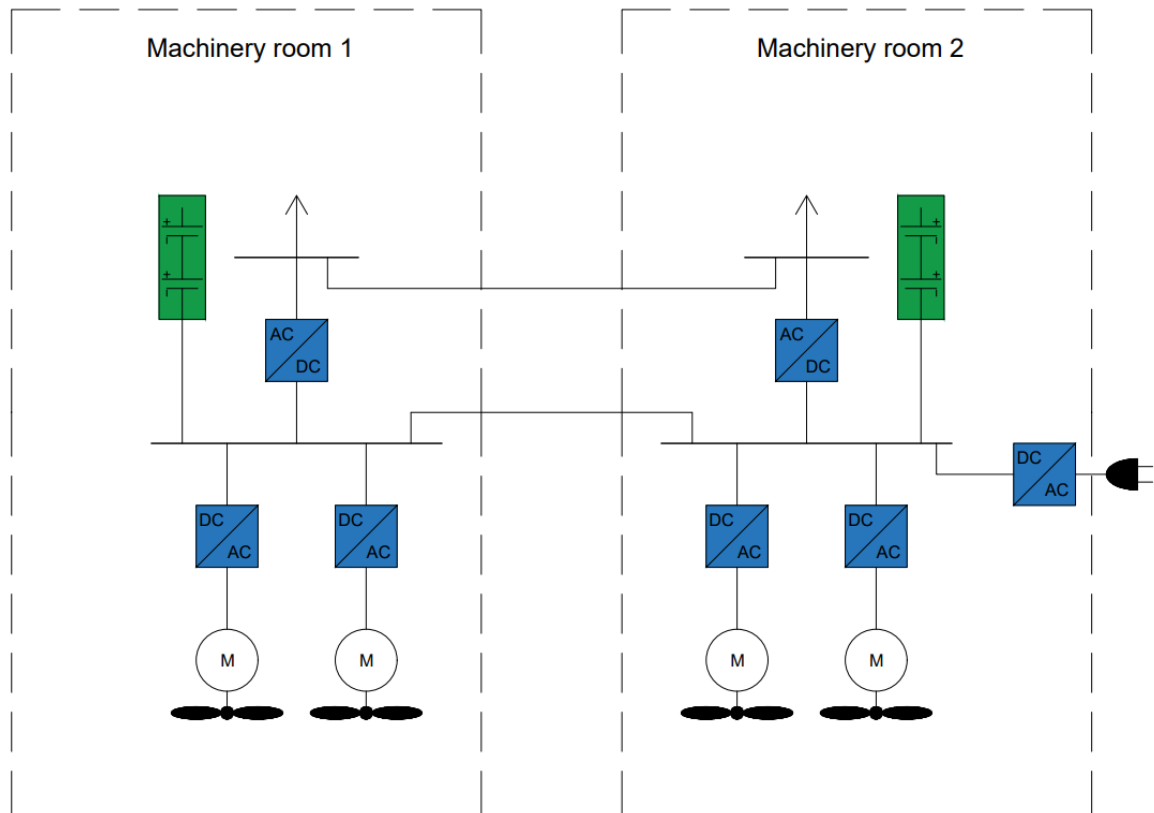
5.1 Τοπολογία από την πλευρά του σκάφους

Αρχικά, από την πλευρά του σκάφους υπάρχει πληθώρα ηλεκτρικών τοπολογιών που μπορεί να εφαρμοστούν. Η βασική τους διάκριση συνίσταται στο αν το ηλεκτρικό δίκτυο θα είναι εναλλασσόμενου ρεύματος ή συνεχούς. Βέβαια από τη στιγμή που η πηγή ισχύος είναι το σύστημα μπαταριών και καθ' επέκταση το συνεχές ρεύμα, η ηλεκτρική τοπολογία συνεχούς ρεύματος έχει συγκεκριμένα οφέλη και κυρίως τη χρήση λιγότερων διατάξεων ηλεκτρικών ισχύος. Αν και στο υπό μελέτη σκάφος θα εφαρμοστεί η λύση του δικτύου συνεχούς ρεύματος, για λόγους πληρότητας θα παρουσιαστούν και οι δύο τοπολογίες.

5.1.1 Ηλεκτρική τοπολογία Συνεχούς Ρεύματος (Σ.Ρ.)

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι σε κάθε περίπτωση γίνεται μόνο μια μετατροπή από Σ.Ρ. σε Ε.Ρ. Τα βασικά στοιχεία της συγκεκριμένης διάταξης είναι:

- Τέσσερις μετατροπείς ισχύος (Inverters DC/AC) για τον έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων ονομαστικής ισχύος ίσης ή μεγαλύτερης από την ονομαστική ισχύ των κινητήρων,
- Δύο μετατροπείς ισχύος (Inverters DC/AC), ένας για κάθε σύστημα μπαταρίας που θα τροφοδοτεί τα υπάρχοντα ηλεκτρικά εναλλασσόμενα φορτία (κλιματισμός π.χ.) και θα δουλεύουν σταθερά στα 50 Hz.
- Ένας ανορθωτής (Rectifier AC/DC) που θα χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών από την πηγή της στεριάς,
- Ένα καλώδιο DC για τη σύνδεση του συστήματος μπαταριών μεταξύ των δύο διαμερισμάτων μπαταριών και ένα αντίστοιχα για τη σύνδεση των ζυγών των ηλεκτρικών φορτίων,
- Τέσσερις ζυγούς (Busbars), ένας για κάθε σύστημα μπαταρίας για τη τροφοδοσία των κινητήρων και δύο ακόμα από κάθε σύστημα μπαταρίας για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών φορτίων του σκάφους.



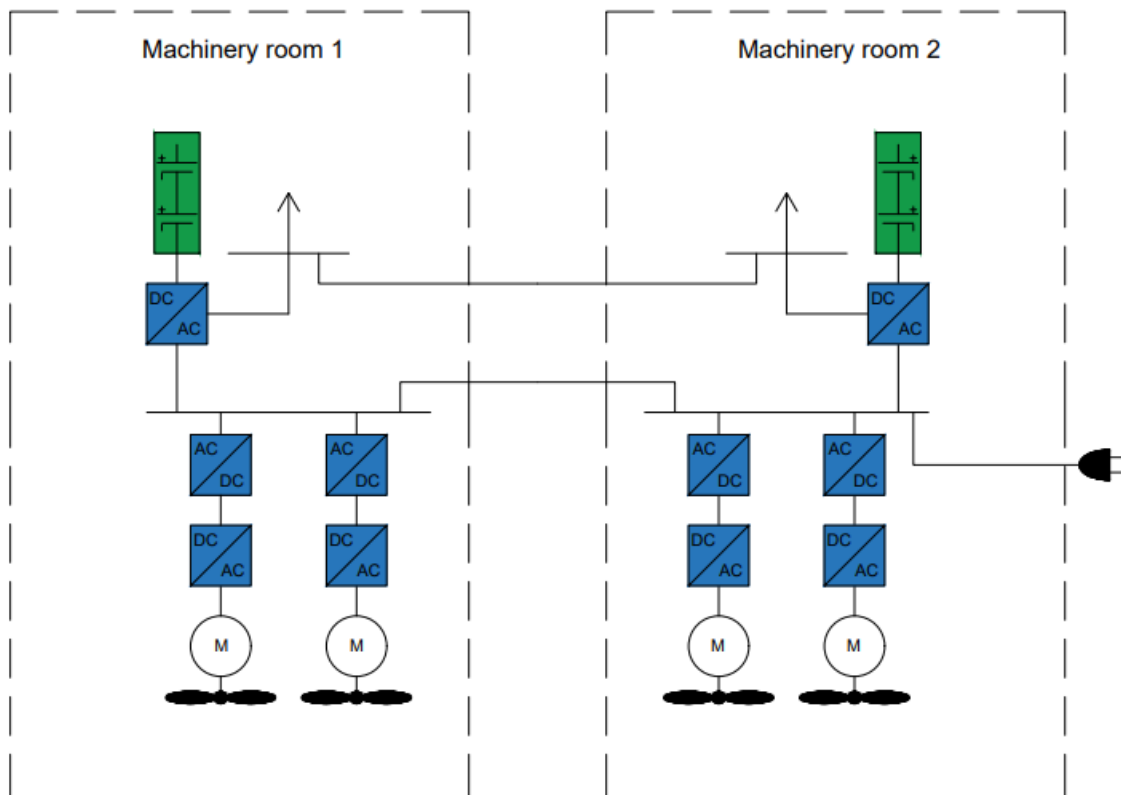
Εικόνα 12: Ηλεκτρική τοπολογία σκάφους σταθερού ρεύματος

5.1.2 Ηλεκτρική τοπολογία Εναλλασσόμενου Ρεύματος (E.P.)

Στη συγκεκριμένη διάταξη απαιτείται η μετατροπή του ρεύματος που προέρχεται από το σύστημα των μπαταριών σε εναλλασσόμενο σταθερής συχνότητας, ίση με 50 Hz. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο του σκάφους λειτουργεί σε αυτά τα Hz. Έτσι απαιτούνται:

- Δύο μετατροπείς ισχύος (DC/AC), ένας μετά από κάθε σύστημα μπαταριών όπου θα δημιουργεί E.P. σταθερής συχνότητας, 50 Hz.
- Τέσσερις οδηγούς μεταβλητής συχνότητας (Variable Frequency Drives – VFDs) όπου θα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των κινητήρων. Τα VFDs μετατρέπουν αρχικά το E.P. σε Σ.Ρ. και στη συνέχεια πάλι σε E.P. συγκεκριμένης συχνότητας.

- Όπως και στην περίπτωση του Σ.Ρ. απαιτείται ανορθωτής (AC/DC) για τη φόρτιση των μπαταριών, ωστόσο από τη στιγμή που το δίκτυο του σκάφους είναι εναλλασσόμενο ρεύματος, υπάρχει η δυνατότητα να τροφοδοτηθεί απευθείας από το δίκτυο της στεριάς.
- Ένα τριφασικό AC καλώδιο για τη σύνδεση των ζυγών των ηλεκτροκινητήρων μεταξύ των δύο μηχανοστασίων και ένα αντίστοιχα για τη σύνδεση των ζυγών των ηλεκτρικών φορτίων,
- Τέσσερις ζυγούς (Busbars), ένας για κάθε σύστημα μπαταρίας για την τροφοδοσία των κινητήρων και δύο ακόμα από κάθε σύστημα μπαταρίας για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών φορτίων του σκάφους.

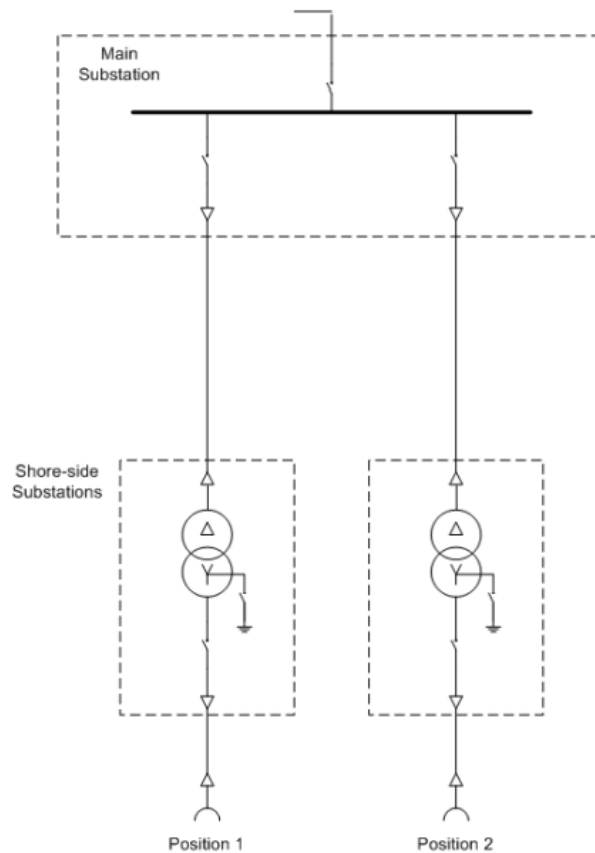


Εικόνα 13: Ηλεκτρική τοπολογία σκάφους εναλλασσόμενου ρεύματος

5.2 Τοπολογία από την πλευρά της στεριάς

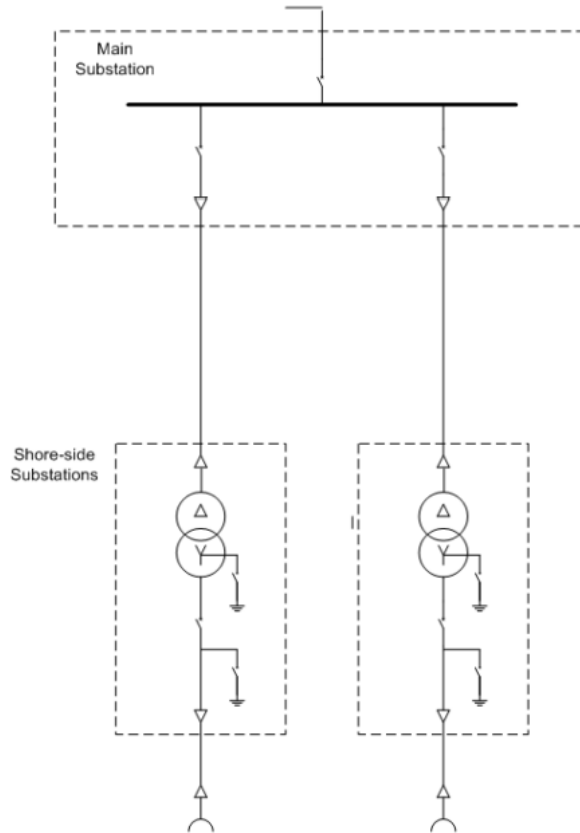
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση των μπαταριών. Οι εκάστοτε διατάξεις αποτελούνται κατά βάση από έναν κεντρικό υποσταθμό, ο οποίος τροφοδοτεί τους επιμέρους υποσταθμούς στο λιμάνι. Ξεκινώντας από τη διάταξη του σχήματος 14 η οποία είναι χαμηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος και περιλαμβάνει:

- Τον κεντρικό υποσταθμό ο οποίος αποτελείται από πίνακα υψηλής τάσης που τροφοδοτεί τους υποσταθμούς και,
- Από τους υποσταθμούς οι οποίοι τροφοδοτούν το σκάφος και περιλαμβάνουν:
 - Μετασχηματιστή διάταξης τριγώνου – αστέρα με σκοπό την πτώση της τάσης δικτύου στην κατάλληλη τάση, με τον ουδέτερο γειωμένο (συνήθως με μια αντίσταση συνδεδεμένη με το έδαφος).
 - Εξερχόμενο πίνακα που τροφοδοτεί τις συνδέσεις μεταξύ του λιμανιού και του σκάφους.



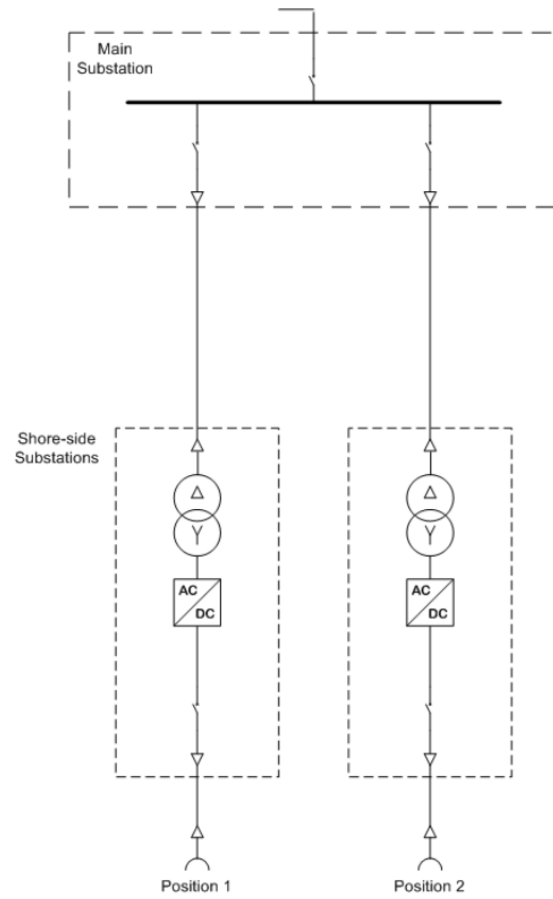
Εικόνα 14: Ηλεκτρική τοπολογία στεριάς χαμηλής τάσης

Σε περίπτωση που η μέγιστη ισχύς φόρτισης ξεπερνά το 1MW, πρέπει η σύνδεση πλοίου – στεριάς να μετατραπεί σε υψηλής τάσης. Αυτό απαιτεί έναν επιπλέον διακόπτη γείωσης μετά τον εξερχόμενο διακόπτη κυκλώματος, για τη γείωση που βρίσκεται στο καλώδιο υψηλής τάσης όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 15: Ηλεκτρική τοπολογία στεριάς, υψηλής τάσης

Σε περίπτωση που απαιτείται σύνδεση σταθερού ρεύματος μεταξύ σκάφους – λιμανιού τότε πρέπει να τοποθετηθεί και ένας ανορθωτής μετά τον μετασχηματιστή τάσης, ώστε να μετατρέψει το εναλλασσόμενο ρεύμα της υποβαθμισμένης τάσης του δικτύου σε σταθερό. Βέβαια ο συγκεκριμένος ανορθωτής μπορεί να βρίσκεται και στην πλευρά του σκάφους, ώστε να μην περιορίζονται οι δυνατότητες φόρτισης που προσφέρει ο λιμένας.



Εικόνα 16: Ηλεκτρική τοπολογία στεριάς, με ανορθωτή

6. ΠΛΟΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (OFFSHORE SUPPORT VESSELS - OSV)

Καθώς η ανάπτυξη πεδίων πετρελαίου και φυσικού αερίου κατευθύνεται σε όλο και πιο βαθιά νερά και πιο εχθρικά περιβάλλοντα, σημειώθηκε μια δραματική αύξηση της ζήτησης για νέα σκάφη, εξοπλισμό και τεχνολογία ικανή να λειτουργήσει σε αυτήν τη δραματική αρένα. Η κλίμακα, η πολυπλοκότητα και η καινοτομία των λύσεων που απαιτούνται για την επίλυση των συνεχώς εξελισσόμενων προκλήσεων των υπεράκτιων κατασκευών βαθέων υδάτων, σπάνια παραλληλίζονται στην ανθρώπινη ιστορία. Τα πλοία υποστήριξης ανοικτής θάλασσας λειτουργούν στις πιο σκληρές συνθήκες εργασίας και η αξιοπιστία τους είναι υψίστης σημασίας για την προστασία του πληρώματος τους, του περιβάλλοντος και της υποδομής των πεδίων όπου λειτουργούν. Η υπεράκτια βιομηχανία είναι ένας τομέας στον οποίο λειτουργούν πολλοί τύποι σκαφών, εκτελώντας πολλές διαφορετικές εργασίες με συχνά μοναδικά συστήματα και εξοπλισμό. Αυτά τα πλοία μπορούν να κυμαίνονται από ειδικά κατασκευασμένα πλοία που μπορεί, για παράδειγμα, να εκτελούν μόνο καταδύσεις, μέχρι σκάφη που έχουν επανειλημμένα μετατραπεί από έναν τύπο σκάφους σε άλλο καθώς αλλάζει η φύση της επιχείρησης (Ritchie, 2008).

Η προέλευση των σκαφών υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων μπορεί να εντοπιστεί στον Κόλπο του Μεξικού όπου η εξερεύνηση πετρελαίου μετακινήθηκε για πρώτη φορά στην ανοικτή θάλασσα στη δεκαετία του 1950. Στη συνέχεια, τα σκάφη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου που δε χρησιμοποιούνταν πια, τα ξύλινα αλιευτικά σκάφη και οι μηχανότρατες γαρίδων χρησιμοποιήθηκαν για την προμήθεια υπεράκτιων εγκαταστάσεων με τσιμέντο, λάσπη, ανταλλακτικά, προσωπικό, καύσιμα και τρόφιμα. Το 1955, οι Alden και John Laborde ανέπτυξαν το πρώτο ειδικά κατασκευασμένο σκάφος για την προμήθεια πλατφορμών με ένα τιμόνι και ένα μακρύ επίπεδο κατάστρωμα που έγινε το πρότυπο για τα offshore support vessels. Αυτός ο πρωτοποριακός σχεδιασμός έχει γίνει πλέον ένας αυτόνομος γενικός τύπος πλοίου. Ως τύπος πλοίου του είχε δοθεί μια ποικιλία ονομάτων με πιο σύνηθες το «σκάφη υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων» (offshore support vessels). Άλλες ονομασίες είναι υπεράκτια σκάφη εφοδιασμού, πλοίο χειρισμού και εφοδιασμού, πλοία ρυμούλκησης και εφοδιασμού ή άλλοι συνδυασμοί, ανάλογα με τις λειτουργίες που έχει σχεδιαστεί και εξοπλιστεί για να εκτελέσει (Sarchy, 2005).

Τα εν λόγω πλοία έχουν τις εξής δυνατότητες στο σχεδιασμό τους: Μεγάλο και ανοιχτό πίσω κατάστρωμα και εξοπλισμός για εργασίες φορτίου, αγκύρωσης και ρυμούλκησης. Μεγάλη ευελιξία, ιδιαίτερα σε χαμηλές ταχύτητες ή στατικές λειτουργίες. Αποθήκευση αναλώσιμων υλικών για δραστηριότητες υπεράκτιας εξερεύνησης και παραγωγής: όπως υδάτινες γεωτρήσεις, χύδην λάσπη και τσιμέντο, πόσιμο νερό, καύσιμα, χημικά κ.λπ.

Καθώς οι δραστηριότητες εξερεύνησης και παραγωγής μετακινούνται σε βαθύτερα νερά, είναι εμφανής μια συγκεκριμένη αλλαγή στο βασικό σχεδιασμό των offshore support vessels. Τα βαθιά νερά σημαίνουν επίσης μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή, και αυτό σημαίνει την ανάγκη για υψηλότερη ταχύτητα. Η ανάπτυξη και βελτίωση αγκυρών διαφόρων τύπων σε βαθιά νερά χρειάζονται ισχυρότερα βαρούλκα από ό,τι για ρηχά νερά. Αυτοί και άλλοι παράγοντες υποκινούν, συνολικά, τα σύγχρονα offshore support vessels να είναι μεγαλύτερα, ανθεκτικότερα και να αξιοποιήσουν τις εξελίξεις στον σχεδιασμό σύγχρονου εξοπλισμού με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο. Σε αυτές τις προκλήσεις προστίθεται η απαίτηση για αυτά τα σκάφη να είναι εξοπλισμένα για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Έτσι, οι δυνατότητες απόκρισης, όπως η καταπολέμηση της πυρκαγιάς, η διάσωση, και η καταπολέμηση της ρύπανσης προστίθενται, σε διάφορους βαθμούς, στον ήδη πολυλειτουργικό τους ρόλο. Επομένως, τα σύγχρονα offshore support vessels είναι σκάφη «παντός καιρού» (Sarchy, 2005).

6.1 Βασικοί τύποι offshore support vessels

Προκειμένου να αναλυθούν λεπτομερώς τα κύρια χαρακτηριστικά σχεδιασμού που μπορεί να αναμένονται σε ένα offshore support vessel, είναι σημαντικό να καθοριστούν οι τύποι σκαφών που περιλαμβάνονται σε αυτήν την κατηγορία και ως εκ τούτου να καθοριστούν οι ρόλοι που ενδέχεται να απαιτείται να εκπληρώσουν αυτά τα σκάφη. Ο όρος Offshore Support Vessel μπορεί να περιλαμβάνει πολλούς τύπους σκαφών και είναι ασυνήθιστο για ένα μόνο σκάφος να εκπληρώνει μόνο μία συγκεκριμένη λειτουργία, επομένως ένα σκάφος μπορεί να εκτελέσει καταδύσεις, ROV, έρευνες και κατασκευές υποστήριξης (Ritchie, 2008).

6.1.1 Σκάφη υποστήριξης κατάδυσης

Τα σκάφη υποστήριξης καταδύσεων στην υπεράκτια βιομηχανία είναι εφοδιασμένα με καταδυτικό εξοπλισμό και χρησιμοποιούνται για υποβρύχιες εργασίες, όπως η συντήρηση και η επιθεώρηση κινητών πλατφορμών, αγωγών και των συνδέσεών τους, φρεάτια κλπ. Μπορούν να κυμαίνονται από μετατρεπόμενα σκάφη εξοπλισμένα με στοιχειώδη εξόπλιση αέρα κατάδυσης

έως δομημένα σκάφη εξοπλισμένα με εκτεταμένα και σύνθετα συστήματα καταδύσεων κορεσμού (κατάδυση με υποστήριξη από την επιφάνεια).

Ο εξοπλισμός και τα συστήματα που απαιτούνται για μια λειτουργία αυτόνομης κατάδυσης είναι προφανώς πολύ διαφορετικά από αυτά που απαιτούνται για καταδύσεις κορεσμού σε βαθιά νερά και υπάρχουν πολλές διαφορές στο σχεδιασμό και τη λειτουργία από το ένα σύστημα στο άλλο. Ωστόσο, οι γενικές αρχές σχεδίασης για ένα σκάφος υποστήριξης κατάδυσης θα περιλαμβάνουν εκείνες για ένα τυπικό Offshore Support Vessel, με πρόσθετες απαιτήσεις για συστήματα υποστήριξης κατάδυσης, καταδυτικού κώδωνα (άκαμπτος περικλειστος χώρος που χρησιμοποιείται στη μεταφορά των δυτών από και προς την επιφάνεια της θάλασσας σε ανοιχτά νερά), συστήματα χειρισμού κωδώνων κατάδυσης και συστήματα εκκένωσης έκτακτης ανάγκης (Ritchie, 2008). Οι γενικές δυνατότητες σχεδίασης για τα σκάφη υποστήριξης κατάδυσης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Ένα υψηλό επίπεδο ακρίβειας θέσης και εξαιρετικές δυνατότητες διατήρησης αυτής, είναι απαραίτητα για οποιοδήποτε σκάφος από το οποίο θα εκτελούνται καταδυτικές εργασίες. Τα σκάφη υποστήριξης κατάδυσης είναι επομένως εξοπλισμένα με άρτιο συστήματα δυναμικής τοποθέτησης, ένα σύστημα ελεγχόμενο από υπολογιστή για να διατηρεί αυτόματα τη θέση και την κατεύθυνση ενός σκάφους χρησιμοποιώντας τις δικές του κύριες και βοηθητικές προπέλες. Επομένως, τα σκάφη υποστήριξης κατάδυσης αναμένεται να διαθέτουν πλεονασμό στον τεχνικό σχεδιασμό και ανεξάρτητο εφεδρικό χειριστήριο.
- Τα συστήματα ελιγμών και πρόωσης είναι μείζονος σημασίας, με την απαίτηση το πλοίο να λειτουργεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα είτε σε χαμηλή ταχύτητα είτε στατικά και να διατηρείται η θέση του σκάφους σε πολύ υψηλό βαθμό ακρίβειας. Ο πλεονασμός των μηχανημάτων, των ελιγμών και των συστημάτων προώθησης είναι υψίστης σημασίας λόγω της πιθανότητας πρόκλησης τραυματισμού στους δύτες σε περίπτωση απώλειας θέσης (Ritchie, 2008).
- Η θέση και ο τύπος των προωθητήρων (thrusters) και της κύριας πρόωσης που χρησιμοποιούνται καθορίζεται ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια των δυτών στα κατάλληλα βάθη νερού και των συστημάτων που διατηρούνται επί του σκάφους. Γενικά τα καταδυτικά συστήματα θα βρίσκονται στη μέγιστη οριζόντια απόσταση από προωθητήρες ή μονάδες πρόωσης.

- Μια προστατευμένη και σταθεροποιημένη θέση για τους θαλάμους κατάδυσης, τους καταδυτικούς κώδωνες και τα συστήματα χειρισμού αυτών είναι απαραίτητη. Γενικά οι θάλαμοι και οι κώδωνες θα τοποθετηθούν κατά το διάμηκες του σκάφους, επί της κεντρικής γραμμής (C.L.) με τους θαλάμους να προστατεύονται καλά από τη δομή των πλοίων.
- Οι ρυθμίσεις διπλής γέφυρας είναι απαραίτητες για τα σκάφη υποστήριξης κατάδυσης με όλα τα κύρια και βοηθητικά χειριστήρια να εξυπηρετούν την καλή ορατότητα. Αν και είναι απίθανο οι αξιωματικοί της γέφυρας να είναι σε θέση να δουν τα συστήματα εκτόξευσης κώδωνων από τη γέφυρα, είναι απαραίτητη μια καλή συνολική ορατότητα του καταστρώματος εργασίας και της γύρω περιοχής λειτουργίας. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία όταν μπορεί να εκτελούνται διαδοχικά πολλαπλές λειτουργίες, όπως καταδύσεις και εργασίες γερανού. Η πλήρης εκτίμηση της θέσης του γερανού, του σύρματος γερανού και του γάντζου, ενώ οι δύτες βρίσκονται στο νερό, είναι υψίστης σημασίας (Ritchie, 2008).

6.1.2 Σκάφη υποστήριξης κατασκευαστικών έργων (Offshore Construction Vessels)

Αυτού του είδους τα σκάφη είναι πολλαπλών χρήσεων ικανά να υποστηρίξουν την κατασκευή και τη συντήρηση υπεράκτιων κατασκευών, όπως η υποστήριξη εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου κ.α. (τροφοδοσία, κατάσταση αναμονής, υποθαλάσσιες εργασίες)

Ωστόσο, έχουν κοινούς διακριτικούς τρόπους λειτουργίας, όπως: αναμονή στο λιμάνι, φόρτωση και εκφόρτωση στο λιμάνι, διέλευση από και προς τα κοιτάσματα πετρελαίου, αναμονή ή εκτέλεση λειτουργιών αναμονής στα κοιτάσματα πετρελαίου και την εκτέλεση της προβλεπόμενης εργασίας τους στις εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου σε λειτουργία DP. Η ετήσια διάρκεια κάθε τρόπου λειτουργίας θα ποικίλει ανάλογα με τον ρόλο υποστήριξης και τη γεωγραφική περιοχή στην οποία υπηρετούν (Lindstad et al., 2017).

Συνεπώς τα Construction Vessels θα έχουν πολλά από τα γενικά χαρακτηριστικά καθώς και στοιχεία σχεδιασμού που σχετίζονται με τα σκάφη υποστήριξης κατάδυσης, συν τα ακόλουθα:

- Ένα υψηλό επίπεδο ακρίβειας θέσης και εξαιρετικές δυνατότητες διατήρησης της θέσης είναι ουσιαστικής σημασίας κατά τη διάρκεια εργασιών όπου οποιοδήποτε υποθαλάσσιο ή υπερθαλάσσιο φορτίο μεταφέρεται από ή στο κατάστρωμα του Offshore Construction Vessel. Σε τέτοιες συνθήκες, η πιθανότητα τραυματισμού του προσωπικού ή βλάβης στο

σκάφος ή του φορτίου λόγω ανεξέλεγκτων ενεργειών πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο. Η σταθερή διατήρηση της θέσης του σκάφους είναι επομένως απαραίτητη.

- Η κύρια λειτουργία του Offshore Construction Vessel είναι η εγκατάσταση και ο παροπλισμός υποθαλάσσιων και υπερθαλάσσιων εγκαταστάσεων, επομένως ο τύπος, η χωρητικότητα και η τοποθέτηση του γερανού θα είναι ένα από τα κύρια ζητήματα σχεδιασμού.
- Η τοποθέτηση του γερανού θα καθοριστεί ώστε να παρέχει τη μέγιστη προσέγγιση στην προτιμώμενη πλευρά του σκάφους με τη μέγιστη χωρητικότητα. Ο οδηγός γερανών θα πρέπει να έχει μια καλή θέαση όλων των καταστρωμάτων και των παράκτιων περιοχών χωρίς εμπόδια.
- Θα υπάρχουν ειδικά συστήματα έρματος ή αντίβαρου για χρήση σε εργασίες ανύψωσης βαρέων φορτίων, όπου η σταθερότητα του σκάφους επηρεάζεται από το βάρος και τη θέση των φορτίων που φορτώνονται ή εκφορτώνονται.
- Θα μπορεί να προβλεφθεί η αντοχή και η αντιστάθμιση ώστε ο γερανός να είναι σε θέση να πραγματοποιεί ασφαλείς και ακριβείς λειτουργίες τοποθέτησης φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες συνθήκες θάλασσας (Ritchie, 2008).

6.1.3 Σκάφη για την τοποθέτηση σωλήνων

Ορισμένα χαρακτηριστικά σχεδιασμού των συστημάτων και του εξοπλισμού στα πλοία τοποθέτησης σωλήνων μπορεί να διαφέρουν από σκάφος σε σκάφος. Ωστόσο, καθώς όλα αυτά τα σκάφη εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες, μια σειρά από κοινά ή γενικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω.

Όπως και στην πλειονότητα των Offshore Support Vessels, έτσι και στα σκάφη για την τοποθέτηση σωλήνων υπάρχει συχνά ένας διπλός σταθμός ελέγχου για χειροκίνητους ελιγμούς. Για τις εργασίες τοποθέτησης σωλήνων, το σκάφος θα κινείται με αργή ταχύτητα. Ως εκ τούτου, η ικανότητα ελέγχου του σκάφους με την οπτική παρατήρηση των λειτουργιών και του συστήματος καταστρώματος και σωλήνων είναι απαραίτητη για την ασφαλή λειτουργία του σκάφους (Ritchie, 2008).

6.2 Συστήματα ελιγμών

Όλες οι πτυχές του πεδίου εργασίας των εν λόγω πλοίων, είτε αφορούν καταδύσεις, είτε μεταφορά, είτε έρευνες, είτε εργασίες με γερανό κλπ κλπ, απαιτούν το σκάφος να παραμείνει σε όσο το δυνατόν πιο σταθερή και ακριβή θέση. Ως εκ τούτου, τα συστήματα ελιγμών σε οποιοδήποτε Offshore Support Vessel απαιτείται να είναι πολυάριθμα, ισχυρά και εξαιρετικά αποδοτικά. Σε σκάφη όπως τα OSV, η απαίτηση να διατηρείται το σκάφος σε πολύ ακριβή θέση ενώ πραγματοποιούνται καταδύσεις, απαιτεί όχι μόνο μια ποικιλία συστημάτων ελιγμών, αλλά και πολλούς εφεδρικούς μηχανισμούς σε περίπτωση βλάβης ή διακοπής λειτουργίας του συστήματος. Ως εκ τούτου, τα συστήματα ελιγμών σε τέτοια σκάφη είναι πολύ πιο σημαντικά κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του σκάφους συγκριτικά με άλλους τύπους σκαφών. Η ποικιλία των διαθέσιμων συστημάτων ελιγμών είναι αρκετά διαφορετική και οι διάφοροι τύποι πρόωσης, πηδαλίων και προπελών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι πάρα πολλοί (Ritchie, 2008).

Τα Offshore Support Vessels, διαθέτουν πολλαπλούς κινητήρες εσωτερικής καύσης και συστήματα δυναμικής τοποθέτησης για να διασφαλίσουν ότι μπορούν να εκτελέσουν τα καθήκοντά τους με υψηλή αξιοπιστία σε σχεδόν οποιαδήποτε θαλάσσια κατάσταση. Το Dynamic Positioning (DP) είναι ένα σύστημα ελεγχόμενο από υπολογιστή που διατηρεί αυτόματα τη θέση και την κατεύθυνση ενός σκάφους χρησιμοποιώντας τις δικές του έλικες και τους δικούς του προωθητήρες. Η λειτουργία DP πρέπει να διατηρεί τους πόρους ισχύος ανά πάσα στιγμή επαρκείς ώστε να χειρίζεται τα φορτία αιχμής που προκαλούνται από ακραία κύματα και μεταβολές του ανέμου, ακόμη και σε συνδυασμό με βλάβη ενός από τους κύριους κινητήρες του σκάφους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ένα γενικό πρότυπο λειτουργίας με σκάφη τα οποία λειτουργούν πολλαπλά μοτέρ ταυτόχρονα, ακόμη και σε ήρεμες συνθήκες θάλασσας όταν εξυπηρετούν εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, δηλαδή σε ακτίνες 500 μέτρων (Lindstad et al., 2017).

6.3 Κατανάλωση καυσίμων και εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας

Όταν οι κινητήρες λειτουργούν με χαμηλότερη ισχύ, η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγωγής (ανά kWh) που παράγεται αυξάνεται. Για το κόστος της λειτουργίας, αυτή η αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε χαμηλότερα φορτία έχει μικρό αντίκτυπο σε σύγκριση με το συνολικό κόστος της λειτουργίας. Αντίθετα, για τις εκπομπές, τα χαμηλά φορτία αποφέρουν μεγαλύτερη αύξηση στις εκπομπές καυσαερίων όπως οξείδια του αζώτου (NO_x) (Duran et al., 2012) και αερολύματα όπως ο μαύρος άνθρακας (BC) (Lack & Corbett, 2012). Οι εκπομπές σε μια περιοχή μπορεί να οδηγήσουν σε μια άμεση κλιματική επιβάρυνση που διαφέρει σε μέγεθος από την ίδια ποσότητα που μπορεί να εκπέμπεται σε άλλη περιοχή (Lindstad et al., 2016).

Αυτό οφείλεται στις διαφορές ανάμεσα στις περιφέρειες, στην έκταση των θαλάσσιων πάγων, την ηλιακή ακτινοβολία και τις ατμοσφαιρικές οπτικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η εναπόθεση μαύρου άνθρακα πάνω σε ιδιαίτερα ανακλαστικές επιφάνειες, όπως το χιόνι και ο πάγος, μειώνει τη λευκαύγεια αυτών των επιφανειών, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία τους. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε αυξημένη τήξη και τις πρόσθετες μειώσεις της έκτασης χιονιού/πάγου και κατά συνέπεια περαιτέρω μειώσεις στην επιφανειακή λευκαύγεια, δηλαδή έχει σημαντικό ενισχυτικό αποτέλεσμα (Sand et al., 2013)

Συνεπώς, απαιτούνται χαρακτηρισμοί των ειδικών περιφερειών για την υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP) με επιπτώσεις εκπομπών που εκφράζονται ως «ισοδύναμα CO₂» για τον ακριβέστερο ποσοτικό προσδιορισμό των κλιματικών επιπτώσεων κάθε είδους εκπομπών (Shine, 2009). Οι αρνητικές τιμές χρησιμοποιούνται για τα καυσαέρια και τα σωματίδια που έχουν ψυκτικό αποτέλεσμα ενώ οι θετικές χρησιμοποιούνται για αυτά που έχουν θερμαντικό αποτέλεσμα. Μερικά από τα αέρια εκπομπών έχουν βραχυχρόνιες κλιματικές επιπτώσεις, με αντίκτυπο στο κλίμα σε σχετικά σύντομες χρονικές περιόδους. Άλλα όπως το CO₂ διατηρούνται στην ατμόσφαιρα για πάρα πολλά χρόνια.

Μια επιλογή για τη μείωση των εκπομπών και των κλιματικών επιπτώσεων στη θαλάσσια ναυτιλία είναι μέσω της υβριδικής τεχνολογίας ισχύος. Είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρο για σκάφη που λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες όπως Offshore Support Vessels λόγω της μεγάλης διακύμανσης των πραγματικών φορτίων και της μεγάλης ανάγκης τους για πιθανή φόρτωση και εκφόρτωση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Υβριδική τεχνολογία ισχύος σημαίνει την προσθήκη χωρητικότητας ηλεκτρικής μπαταρίας στη συμβατική παραγωγή ισχύος, διευκολύνοντας την

παραγωγή ενέργειας ώστε να είναι πιο προσαρμοσμένη στη ζήτηση των διαφόρων τρόπων λειτουργίας (Lindstad et al., 2017).

Οι μπαταρίες έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: Πρώτον, μπορούν να αντισταθμίσουν τις διακυμάνσεις φορτίου, επιτρέποντας στους κινητήρες καύσης να λειτουργούν με πιο σταθερό και βελτιστοποιημένο φορτίο. Δεύτερον, αποφεύγεται η λειτουργία κινητήρων καύσης σε πολύ χαμηλά φορτία και ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί περισσότερο σε μεσαία έως υψηλή ισχύ με χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. Τρίτον, οι μπαταρίες ενεργοποιούνται άμεσα και μπορούν να παρέχουν οποιαδήποτε μέγιστη ισχύ που απαιτείται από το σύστημα DP. Τέταρτον, επιτρέπουν στο σκάφος να διακόψει τη λειτουργία DP με ασφάλεια, υποθέτοντας ότι όλοι οι κινητήρες πρέπει να σταματήσουν και να μην ξεκινήσουν ξανά.

Για τους λόγους αυτούς, η εγκατάσταση μπαταριών μπορεί να επιτρέψει τη μείωση του αριθμού των κύριων μηχανών καύσης, που είναι εγκατεστημένες επί του παρόντος, συγκεκριμένα από τέσσερις ή τρεις σε τρεις ή δύο.

Τα Offshore Support Vessels είναι μεταξύ άλλων «καλοί υποψήφιοι» για να σχεδιαστούν γύρω από ένα ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης. Πραγματοποιούν πολύπλοκες θαλάσσιες επιχειρήσεις στις οποίες απαιτούνται συνιστώσες όπως η ασφάλεια, η λειτουργική διαθεσιμότητα, η ευελιξία και η λειτουργία DP κ.α. (Sørensen, 2012). Από την άλλη πλευρά, οι πολιτικές για την κλιματική αλλαγή δημιουργούν σημαντικούς περιορισμούς όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στον θαλάσσιο τομέα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν προστατευόμενες περιοχές στις οποίες τα σκάφη πρέπει να λειτουργούν εκπέμποντας χαμηλό και ελεγχόμενο ποσοστό ρύπων.

Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την παροχή φορτίων σε όλα τα ηλεκτρικά πλοία παράγεται συνήθως από δύο ή περισσότερες γεννήτριες πετρελαίου ή αερίου και διανέμεται μέσω του κεντρικού πίνακα, συνήθως σε χαμηλή ή μέση τάση εναλλασσόμενου ρεύματος (Ådnanes, 2003). Ως εκ τούτου, τα σύγχρονα συστήματα ισχύος των πλοίων (συστήματα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος ή συνεχούς ρεύματος σχεδιασμένα γύρω από τη χρήση μετατροπών ηλεκτρονικής ισχύος και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας) μπορούν να βελτιστοποιηθούν ως προς την κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές και τις λειτουργικές δαπάνες σύμφωνα με την ισχύ και τους τρόπους λειτουργίας του σκάφους (Valera & Atutxa 2018).

7. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

7.1 Φιλοσοφία σχεδίασης

Η παρούσα μελέτη θα χωριστεί σε 3 μέρη τα οποία θα καλύπτουν τις βασικές πτυχές τις εν λόγω μετατροπής:

- Στο πρώτο μέρος θα γίνει αναφορά στο μέγεθος που θα πρέπει να έχει ένα σύστημα μπαταρίας. Αυτό το μέρος αποσκοπεί στην απόδειξη του αν ένα σύστημα μπαταρίας είναι τεχνικά βιώσιμο σε ένα OSV, τόσο στο κομμάτι της ισχύος, όσο και στο κομμάτι της ασφάλειας. Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, μια μετατροπή ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης σε ένα ηλεκτροδοτούμενο σύστημα μπαταριών, θα καταλαμβάνει αρκετό χώρο μέσα στο πλοίο. Χώρος που θα πρέπει να είναι διαθέσιμος.
- Στο δεύτερο μέρος θα πρέπει προσδιοριστεί η ποσότητα των ρύπων που μπορεί να έχει ένα OSV το οποίο κινείται με μπαταρία. Φυσικά, ένα σύστημα κίνησης με μπαταρίες δεν παράγει ρύπους, εντούτοις, κατά την επαναφόρτιση του στους εκάστοτε σταθμούς (λιμάνια, αποβάθρες κλπ.), χρησιμοποιείται ηλεκτρικό ρεύμα, του οποίου η παραγωγή, αποτελεί μια ρυπογόνο διαδικασία. Έτσι, λοιπόν, αφού υπολογιστεί η ποσότητα των ρύπων, από τη διαδικασία επαναφόρτισης της μπαταρίας, θα πρέπει να συγκριθεί με αυτή συμβατικών OSV, τα οποία θα έχουν πανομοιότυπα λειτουργικά προφίλ.
- Στο τελευταίο μέρος θα εξεταστεί το αν μια τέτοια μετατροπή είναι οικονομικά συμφέρουσα. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό το κομμάτι της μελέτης θα αξιολογηθεί το κατά πόσο μια τέτοια επένδυση έχει οικονομικά οφέλη για την εκάστοτε εταιρία που διαχειρίζεται τα πλοία. Αυτή η αξιολόγηση θα γίνει συγκρίνοντας τα λειτουργικά κόστη, καθώς και αυτά της συντήρησης μεταξύ ενός ηλεκτροκίνητου OSV και ενός συμβατικού.

Το πλοίο που θα μελετήσουμε στην περίπτωση μας είναι το «**OOO NERZ**» της εταιρείας «**OPIELOK OFFSHORE Carriers**» κι έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά υπό μελέτη σκάφους

Type	Catamaran	Main diesel engines	4 x Volvo D13-700 High Speed Diesel
LOA [m]	26.2	Thrusters	4 x Volvo Penta IPS 900
B [m]	8.9	Engine Rating	4 x 515 kW
T_{DESIGN} [m]	1.75	Generators	2 x Cummins Onan 27 eKW
Year built	2016	Fuel [Lt]	35000
V_{SERVICE} [kn]	25	Crew	4
V_{MAX} [kn]	27	Passengers	12-36

Το OOO NERZ είναι ένα Crew Transfer Vessel (CSV), το οποίο βοηθά στη μεταφορά ανθρώπων, εξειδικευμένου προσωπικού και εξοπλισμού, σε πλωτά αιολικά πάρκα (Offshore Wind Farms), με στόχο την επισκευή και συντήρηση των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών. Το συγκεκριμένο σκάφος μεταφέρει το προσωπικό στο θαλάσσιο αιολικό πάρκο της Αγγλίας, ονομαζόμενο Walney Extension offshore wind farm, το οποίο είναι εξοπλισμένο με 87 ανεμογεννήτριες, με δυνατότητα παραγωγής 659 MW (κάθε ανεμογεννήτρια έχει τη δυνατότητα παραγωγής 8.25 MW ή 7 MW).

Το υπό μελέτη σκάφος πραγματοποιεί τη διαδρομή από το λιμάνι του Barrow-in-Furness μέχρι το αιολικό πάρκο, μια απόσταση που υπολογίζεται στα δέκα – εννιά (19 km), δηλαδή 10.25 ναυτικά μίλια. Το συγκεκριμένο πάρκο έχει τη δυνατότητα να ηλεκτροδοτεί ετησίως παραπάνω από μισό εκατομμύριο νοικοκυριά, με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και μεγάλο οικονομικό συμφέρον.



Εικόνα 17: Τοποθεσία αιολικού πάρκου και διαδρομή του υπό μελέτη σκάφους

Βασικός στόχος του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου είναι η διαστασιολόγηση του συστήματος μπαταριών καθώς πέρα από το κατά πόσον αυτό είναι τεχνικά βιώσιμο, το σύστημα των μπαταριών είναι και ο πιο οικονομικά κοστοβόρος παράγοντας της επένδυσης. Η εκτίμηση του θα προκύψει με βάση τις ενεργειακές ανάγκες του σκάφους, το διαθέσιμο χρόνο φόρτισης μέσα στη μέρα, το διαθέσιμο χώρο για την εγκατάσταση τους χωρίς την υπερεκτίμηση τους που θα επηρεάσει αρνητικά την οικονομική επένδυση. Επομένως, είναι αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη με σκοπό το βέλτιστο υπολογισμό του συστήματος μπαταριών.

Όπως αναφέρθηκε, η διαστασιολόγηση των μπαταριών θα προκύψει από τις ενεργειακές ανάγκες του σκάφους. Αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ πρόωσης και από τα ηλεκτρικά φορτία του σκάφους και από το διαθέσιμο χρόνο που θα έχει για φόρτιση στην αρχή ή/και ενδιάμεσα του ταξιδιού, δηλαδή και κατά τη διάρκεια που σταθμεύει στο αιολικό πάρκο.

Η διάταξη του συστήματος μπαταριών θα αποτελείται από πολλές παράλληλες συστοιχίες των οποίων ο υπολογισμός θα εξαρτηθεί από τις διαθέσιμες επιλογές της αγοράς. Το από πόσες

μονάδες μπαταρίες θα αποτελείται η κάθε συστοιχία θα εξαρτηθεί από την ονομαστική τάση που προσφέρει η κάθε μπαταρία και από την ονομαστική τάση με την οποία λειτουργεί ο ηλεκτρικός κινητήρας που θα τοποθετηθεί. Τοποθετώντας πολλές μπαταρίες εν σειρά, η συνολική τάση προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τάσεων κάθε μπαταρίας. Όσον αφορά το πόσες συστοιχίες θα τοποθετηθούν παράλληλα, που καθορίζει τη χωρητικότητα του συστήματος, θα εξαρτηθεί από το επιχειρησιακό προφίλ.

Κατά την μετατροπή του συστήματος πρόωσης σε πλήρως εξηλεκτρισμένο, τα κύρια στοιχεία που θα αλλάξουν είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης που θα μετατραπούν σε ηλεκτροκινητήρες, οι γεννήτριες που θα αντικατασταθούν από τις μπαταρίες, πέρα από την τοποθέτηση των απαραίτητων ηλεκτρονικών ισχύος όπως για παράδειγμα τα VFDs. Τα azipods και οι άξονες τους θα παραμείνουν αναλοίωτα.

Οι απαιτήσεις ισχύος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του σκάφους, την κατάσταση φόρτωσης και το βύθισμα. Στο συγκεκριμένο σκάφος πέρα από την ταχύτητα, το βύθισμα και κατ' επέκταση το DWT δε μεταβάλλονται σε σημαντικό βαθμό.

Η πιο ακριβής μέθοδος υπολογισμού των ενεργειακών απαιτήσεων πρόωσης θα ήταν η σχεδίαση της μορφολογίας της γάστρας και των παρελκομένων σε κάποιο σχεδιαστικό πακέτο CAD και η πραγματοποίηση CFD υπολογισμών με σκοπό την εκτίμηση της ισχύος για εύρος σημαντικών παραμέτρων (ταχύτητα, βύθισμα, εκτόπισμα, αντίσταση σε κυματισμούς). Στην πράξη αυτό δεν κατέστη δυνατό καθώς αφενός δεν υπήρχαν οι γραμμές του σκάφους για να εξαχθεί το τρισδιάστατο μοντέλο, αλλά και δεδομένα για την έλικα του και αφετέρου δεν υπήρχαν συστηματικές σειρές για να εκτιμηθεί η αντίσταση με βάση αυτόν τον τρόπο. Ωστόσο ακόμα και αν υπήρχαν αυτά τα δεδομένα θα μπορούσε να γίνει μια βελτιστοποίηση του συστήματος πρόωσης, όπως για παράδειγμα αλλαγή των azipods ή αλλαγή της προπέλας καθώς θα μπορούσε να επιτευχθεί ένας καλύτερος βαθμός απόδοσης του συστήματος με την παρουσία των ηλεκτροκινητήρων. Βέβαια αυτή η διαδικασία ξεπερνά το σκοπό της παρούσας διπλωματικής.

Οι παραπάνω μεθοδολογίες αν και πιο ακριβείς έχουν το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να γενικευθούν για διάφορα μοντέλα πλοίων και να εφαρμοστούν ταχύτερα σε προκαταρκτικά στάδια σχεδίασης.

Με βάση τα προαναφερθέντα, στην πράξη η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στην δημιουργία ενός ενεργειακού ισοζυγίου με βάση το υπάρχον επιχειρησιακό προφίλ του σκάφους λαμβάνοντας υπόψη την ονομαστική ισχύ των υπάρχουσών μηχανών ντίζελ μαζί με τον ηλεκτρικό ισολογισμό του σκάφους για την εκάστοτε επιχειρησιακή κατάσταση.

Στόχος μας στο πλοίο αυτό είναι να ελαττώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τους αέριους ρύπους που προκαλούνται από την εσωτερική καύση των κινητήρων diesel καθώς και των ηλεκτρογεννητριών.

Στην προκειμένη περίπτωση το σκάφος φέρει τέσσερις κύριες μηχανές diesel (δύο σε κάθε γάστρα) από τις οποίες η καθεμία είναι συνδεδεμένη με εγκατάσταση πρόωσης τύπου aziprod οι οποίες συνεισφέρουν στην καλή συμπεριφορά του σκάφους σε ελιγμούς. Επίσης, οι δύο εγκατεστημένες ηλεκτρικές γεννήτριες που βρίσκονται στο μηχανοστάσιο (μία σε κάθε γάστρα) καλύπτουν τις ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου.

Βασικός σκοπός είναι η μετατροπή του σκάφους σε πλήρως εξηλεκτρισμένο με το λιγότερο δυνατό κόστος. Γι' αυτό το σκοπό αρκετά στοιχεία θα μείνουν ως έχει. Η μετατροπή του ηλεκτρικού δικτύου του σκάφους από εναλλασσόμενο σε συνεχές, έχει το πλεονέκτημα του ότι δεν πραγματοποιείται διπλή μετατροπή της ενέργειας από ΕΡ σε ΣΡ και πάλι σε ΕΡ όπως θα συνέβαινε στην περίπτωση του δικτύου με εναλλασσόμενο ρεύμα. Ακόμα, οι τέσσερις κινητήρες diesel θα αντικατασταθούν από τέσσερις επαγωγικούς κινητήρες χαμηλής – μεσαίας τάσης, ενώ οι γεννήτριες θα αφαιρεθούν και τα ηλεκτρικά φορτία θα τροφοδοτούνται από το σύστημα των μπαταριών. Επιπλέον, για τον έλεγχο των ηλεκτροκινητήρων θα τοποθετηθούν τέσσερις μετατροπείς ισχύος (inverters) ονομαστικής ισχύος ίσης ή μεγαλύτερης αυτής των ηλεκτροκινητήρων. Τέλος, από τη στιγμή που θα διατηρηθούν όλες οι υπάρχουσες ηλεκτρικές συσκευές και φορτία του σκάφους, τα οποία τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα, θα χρειαστεί και η τοποθέτηση δύο ακόμα μετατροπών ισχύος οι οποίοι θα παράγουν ΕΡ σταθερής συχνότητας ίσης με 50 Hz.

Οι βασικές διαστάσεις του σκάφους όπως και η αντίσταση του δεν θα ληφθούν υπόψη στη διαστασιολόγηση των ηλεκτροκινητήρων/μπαταριών, καθώς όπως αναφέρθηκε δεν μπορεί να εκτιμηθεί η καμπύλη ισχύος του σκάφους. Από τη στιγμή που οι υπάρχοντες μηχανολογικές

εγκαταστάσεις επαρκούν για την πρόωση του σκάφους, θα αντικατασταθούν με αντίστοιχες ηλεκτρικές ίσης ονομαστικής ισχύος.

Όπως αναφέρθηκε αυτό που ορίζει σε μεγάλο βαθμό το τελικό κόστος της επένδυσης είναι το απαιτούμενο μέγεθος του συστήματος μπαταριών. Είναι λογικό ότι από τη στιγμή που η αυτονομία είναι εκείνη που ορίζει και πόσες μπαταρίες θα χρειαστούν, θα εξεταστούν δύο σενάρια επιχειρησιακής λειτουργίας. Το βασικό σενάριο είναι ότι το σκάφος θα φορτίζει πριν το κάθε ταξίδι, δηλαδή μόνο στο λιμάνι αναχώρησης ενώ το εναλλακτικό σενάριο θα είναι να φορτίζει και στον τερματικό που υπάρχει στο αιολικό πάρκο. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι για να υπάρχει αυτή η δυνατότητα πρέπει στο αιολικό πάρκο να υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας καθώς δεν μπορεί να διασφαλιστεί απρόσκοπτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία εξαρτάται σημαντικά από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες.

Κάθε ταξίδι του σκάφους μπορεί να αναλυθεί χρονικά σε δύο επιμέρους τμήματα, το χρόνο που απαιτείται κατά το ταξίδι και το χρόνο που παραμένει στο λιμάνι. Ο χρόνος που απαιτείται για την κατάσταση ελιγμών θεωρείται αμελητέος λόγω αφενός του μεγέθους του σκάφους και αφετέρου λόγω των σημαντικών ελικτικών ικανοτήτων που παρέχουν τα azipods. Έτσι έχουμε:

$$1. \text{ Trip} = 2 \times \text{ Voyages} + 2 \times \text{ Port Stand-by}$$

$$2. \text{ Time per Trip} = 2 \times T_{\text{Crusing}} + 2 \times T_{\text{Port}}$$

Το σκάφος θα πραγματοποιεί ένα ταξίδι την ημέρα, όπου θα παραμένει στο πάρκο για οκτώ ώρες και θα επιστρέφει. Η απόσταση του πάρκου και του λιμένος αναχώρησης υπολογίζεται στα 10.25 nm. Είναι προφανές ότι περισσότερα ταξίδια ανά υπηρεσία απαιτούν και μεγαλύτερο μέγεθος μπαταριών όπως και οι τυχόν δυνατότητες για φόρτιση στο ενδιάμεσο του ταξιδιού. Επιπλέον, η συχνότητα φόρτισης καθώς και το ρεύμα με το οποίο γίνεται αυτή επηρεάζει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών και καθ' επέκταση την οικονομική εκτίμηση αφού αυτή θα γίνει με βάση τη διάρκεια ζωής των μπαταριών που ορίζει ο κατασκευαστής τους, μιας και στο τέλος θα πρέπει να αντικατασταθούν.

7.2 Εξισώσεις και παράμετροι του μοντέλου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι απαραίτητες εξισώσεις και τα δεδομένα για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων και καθ' επέκταση των επιχειρησιακών σεναρίων του σκάφους:

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του σκάφους, απαιτούνται τα παρακάτω δεδομένα:

- Ο αριθμός των κύριων μηχανών και η ονομαστική ισχύς τους,
- Ο αριθμός των κύριων μηχανών που λειτουργούν για την επίτευξη της επιχειρησιακής ταχύτητας,
- Ο συντελεστής φόρτισης των κύριων μηχανών,
- Ο αριθμός των ηλεκτρογεννητριών και η ονομαστική ισχύς τους,
- Ο συντελεστής φόρτισης των ηλεκτρικών γεννητριών,
- Το ισοζύγιο ηλεκτρικής ισχύος κατά την πλεύση του σκάφους,
- Το ισοζύγιο ηλεκτρικής ισχύος κατά την παραμονή στο λιμάνι,
- Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων,
- Η ονομαστική τάση του συστήματος (εξαρτάται από τους ηλεκτροκινητήρες).

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά της διαδρομής απαιτούνται:

- Η απόσταση του ταξιδιού (nm),
- Ο χρόνος του ταξιδιού (min),
- Η διάρκεια παραμονής στο λιμένα/τερματικό,
- Ο μέγιστος αριθμός των ταξιδιών ανά υπηρεσία.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του συστήματος μπαταριών είναι απαραίτητα:

- Η ονομαστική τάση (V),
- Οι διαστάσεις (m),
- Η χωρητικότητα τους (A·h),
- Ο όγκος τους (m³),
- Το βάρος τους (kg),
- Το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης για τη βέλτιστη διάρκεια ζωής,
- Το C – rate,
- Το ονομαστικό βάθος εκφόρτισης (nominal D.O.D).

Η απαίτηση ισχύος ανά ταξίδι, $E_{PR/VOYAGE}$ υπολογίζεται ως:

$$E_{PR/VOYAGE} = \left[P_{THRUST} \cdot N_{THRUST} \cdot L_f \cdot T_{CRUISING}/60 \right] \cdot 1/\eta_{EL.MOTOR} \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

Όπου: P_{THRUST} : Ονομαστική ισχύς των κινητήρων,

N_{THRUST} : Ο αριθμός των κινητήρων που λειτουργούν κατά την πλεύση,

L_f : Ο βαθμός φόρτισης των κινητήρων (%),

$T_{CRUISING}$: Ο χρόνος πλεύσης (min),

$\eta_{EL.MOTOR}$: Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων.

Όσον αφορά την ενέργεια που καταναλώνουν τα ηλεκτρικά φορτία ανά ταξίδι, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$E_{HOT/VOYAGE} = 2 \cdot \left[P_{HOT/SEA} \cdot D_f \cdot T_{CRUISING}/60 \right] + \left[P_{HOT/PORT} \cdot D_f \cdot \frac{T_{PORT}}{60} \right] \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

Όπου: $P_{HOT/SEA}$: Ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας στη θάλασσα (kW),

$P_{HOT/PORT}$: Ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας στη στεριά (kW),

D_f : Ο βαθμός φόρτισης των κινητήρων (%),

$T_{CRUISING}$: Ο χρόνος πλεύσης (min),

T_{PORT} : Ο χρόνος παραμονής στο λιμένα (min).

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ο ηλεκτρικός ισολογισμός του σκάφους, τα ηλεκτρικά φορτία μπορούν να υπολογιστούν με ανάλογο τρόπο όπως και η ισχύς πρόωσης.

Έτσι η συνολική ενέργεια που απαιτείται ανά ταξίδι υπολογίζεται ως:

$$E_{TRIP} = 2 \cdot E_{PR/VOYAGE} + E_{HOT/VOYAGE} \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

Έτσι η συνολική ενέργεια που απαιτείται ημερησίως, εξαρτάται από τον αριθμό των ταξιδιών:

$$E_{TOTAL/DAY} = N_{TRIPS} \cdot E_{TRIP} \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

Όπου: N_{TRIPS} : Αριθμός ταξιδιών ανά ημέρα.

Η ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη ενέργεια στο σκάφος, $E_{MIN,INSTALLED}$ για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών με βάση τις ημερήσιες ανάγκες του, θεωρώντας ότι το σύστημα των

μπαταριών θα λειτουργεί στο βέλτιστο βάθος εκφόρτισης D.O.D. με σκοπό τη μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής μπορεί να υπολογιστεί με τους δύο παρακάτω τρόπους, ανάλογα αν υπάρχει η δυνατότητα ενδιάμεσης φόρτισης ή όχι:

Με δεδομένο αριθμό ταξιδιών χωρίς δυνατότητα ενδιάμεσης φόρτισης:

$$E_{MIN,INSTALLED} = \left(\frac{E_{TOTAL/DAY}}{N_x} \right) / DOD \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

Με βάση τη δυνατότητα φόρτισης σε κάθε λιμάνι για δεδομένο χρόνο:

$$E_{MIN,INSTALLED} = \frac{E_{TOTAL/DAY}}{((N_{TRIPS} - 1) \cdot f + DOD)} \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

Όπου: DOD: Βέλτιστο βάθος εκφόρτισης για μέγιστη διάρκεια ζωής (%),

N_x : Αριθμός ταξιδιών χωρίς δυνατότητα ενδιάμεσης φόρτισης,

f: Παράμετρος για την εκτίμηση της επίδρασης του διαφορετικού ρεύματος φόρτισης και χρόνου που απαιτείται για τη σύνδεση των συστημάτων μπαταριών στο δίκτυο (%)

$$f = \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \cdot \frac{(T_{PORT} - T_{PLUG})}{T_{100}}$$

Όπου: C_1 : Ρεύμα φόρτισης,

C_2 : Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης,

T_{100} : Συνολικός χρόνος που απαιτείται για την πλήρη φόρτιση (0-100%) της μπαταρίας με το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης,

T_{PLUG} : Ο απαιτούμενος χρόνος για τη σύνδεση του σκάφους στο δίκτυο.

Ο απαιτούμενος αριθμός των μονάδων μπαταριών που πρέπει να συνδεθούν σε σειρά, $N_{Bt, Series}$ εξαρτάται από την τάση του συστήματος V_{SYST} καθώς και την ονομαστική τάση των μονάδων:

$$N_{Bt, SERIES} = V_{SYST} / V_{Bt}$$

Όπου: V_{SYST} : Η τάση του κύριου ζυγού του συστήματος (εξαρτάται κατά βάση από την ονομαστική ισχύ των ηλεκτροκινητήρων (V),

V_{Bt} : Η ονομαστική τάση των μονάδων μπαταριών (V)

Ο απαιτούμενος αριθμός των παράλληλων συστοιχιών που απαιτείται μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$N_{Bt,PARAL} = \frac{E_{MIN,INSTALLED}}{(N_{Bt,SERIES} \cdot V_{Bt} \cdot Ah_{Bt})}$$

Όπου: Ah_{Bt} : Ονομαστική χωρητικότητα της μονάδας μπαταρίας.

Από τη στιγμή που υπάρχουν αφενός δύο μηχανοστάσια αλλά και για λόγους ύπαρξης εφεδρικής πηγής ενέργειας σε περίπτωση βλάβης του ενός εκ των δύο συστημάτων μπαταριών, η υπολογισμένη ποσότητα μπαταριών $N_{Bt,PARAL}$ πρέπει να διορθωθεί ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός σε κάθε μηχανοστάσιο.

Ο συνολικός αριθμός των μονάδων μπαταριών που πρέπει να εγκατασταθούν στο σκάφος είναι ίσος με, $N_{Bt,TOTAL}$ ενώ η συνολική ενέργεια που είναι εγκατεστημένη στο σκάφος είναι ίση με $E_{INSTALLED}$:

$$N_{Bt,TOTAL} = N_{PACKS} \cdot N_{Bt,PACK} \cdot N_{Bt,SERIES}$$

$$E_{INSTALLED} = N_{Bt,TOTAL} \cdot V_{Bt} \cdot Ah_{Bt} (kW \cdot h)$$

Σε περίπτωση που υπάρξει βλάβη του ενός εκ των δύο συστημάτων μπαταριών πρέπει η εναπομένουσα ενέργεια E_{REMAIN} να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται για την επιστροφή, δηλαδή την ενέργεια που απαιτείται για ένα ταξίδι, E_{VOYAGE} .

$$E_{REMAIN} = (1 - DOD) \cdot E_{INSTALLED} \cdot \left(1 - \frac{1}{N_{PACKS}}\right) (kW \cdot h)$$

$$E_{VOYAGE} = \frac{E_{TRIP}}{2}$$

Το συνολικό βάρος και ο όγκος των συστημάτων μπαταριών που θα εγκατασταθούν προκύπτει γνωρίζοντας το βάρος και τον όγκο της κάθε μονάδας, χαρακτηριστικά που προσδιορίζει ο κατασκευαστής:

$$W_{TOTAL} = N_{Bt,TOTAL} \cdot W_{Bt} (tn)$$

$$V_{TOTAL} = N_{Bt,TOTAL} \cdot V_{Bt} (m^3)$$

Όπου: W_{Bt} : Το βάρος της κάθε μονάδας μπαταρίας (tn),

V_{Bt} : Ο όγκος της κάθε μονάδας μπαταρίας (m^3).

Για τον υπολογισμό των ημερήσιων κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης πρέπει να ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο ενδιάμεσης φόρτισης των μπαταριών μεταξύ των διαδρομών. Σε περίπτωση που δεν

υπάρχει αυτή η δυνατότητα τότε οι ημερήσιοι κύκλοι $Cycles_{Daily}$ είναι ίση με τις φορτίσεις που πραγματοποιούνται ανά ημέρα ενώ αντίθετα μπορούν να υπολογιστούν με βάση την παρακάτω σχέση:

$$Cycles_{Daily} = \frac{T_{CHARGING} \cdot (N_{TRIPS} - 1) + 1}{DOD \cdot T_{CHARG(0-100)}}$$

$$LifeExpectancy = \frac{Cycles_{NOMINAL}}{Cycles_{Daily}}$$

Όπου: $Cycles_{Daily}$: Οι ημερήσιοι κύκλοι του συστήματος μπαταριών,

$Cycles_{NOMINAL}$: Οι βέλτιστοι κύκλοι φόρτισης εφόσον το σύστημα λειτουργεί με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή,

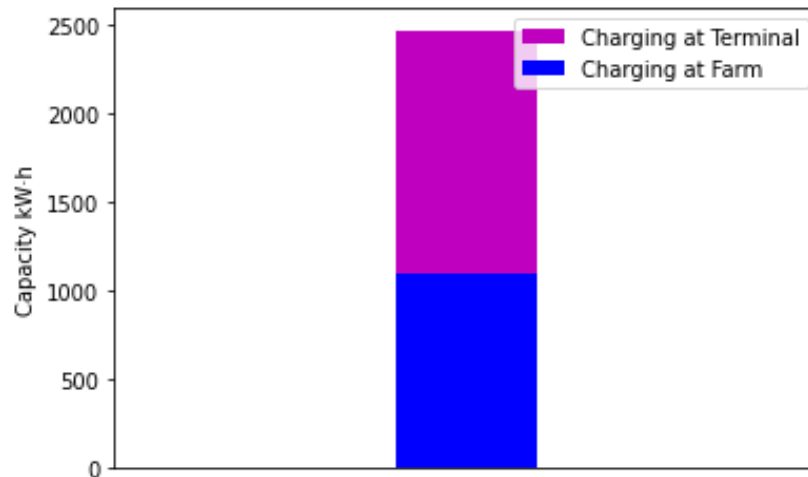
$T_{CHARGING}$: Ο χρόνος φόρτισης,

$T_{CHARGE0-100}$: Ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση των μπαταριών από το 0-100% με το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης.

7.3 Γενικά στοιχεία σχεδίασης

Με βάση την προαναφερθείσα μεθοδολογία, τα σενάρια σχεδίασης διακρίνονται σε δύο κύρια. Το πρώτο σενάριο αφορά την πραγματοποίηση του ημερήσιου ταξιδιού χωρίς τη δυνατότητα ενδιάμεσης φόρτισης στο πάρκο, ενώ στο δεύτερο σενάριο υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Αυτό σημαίνει αυτόματα ότι η διαστασιολόγηση του συστήματος μπαταριών μπορεί να πραγματοποιηθεί αφενός με σκοπό την κάλυψη όλων των απαιτήσεων του ταξιδιού (ισχύς πρόωσης, κατανάλωση ηλεκτρικών φορτίων κατά την πλεύση και κατανάλωση ηλεκτρικών φορτίων κατά τη στάθμευση στο πάρκο), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η διαστασιολόγηση μπορεί να γίνει θεωρώντας ότι η χωρητικότητα πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις του ταξιδιού και μόνο αυτές καθώς όλη η ενέργεια θα αναπληρώνεται στο πάρκο. Έτσι η συνολική χωρητικότητα και για τις δύο καταστάσεις προκύπτει ως:

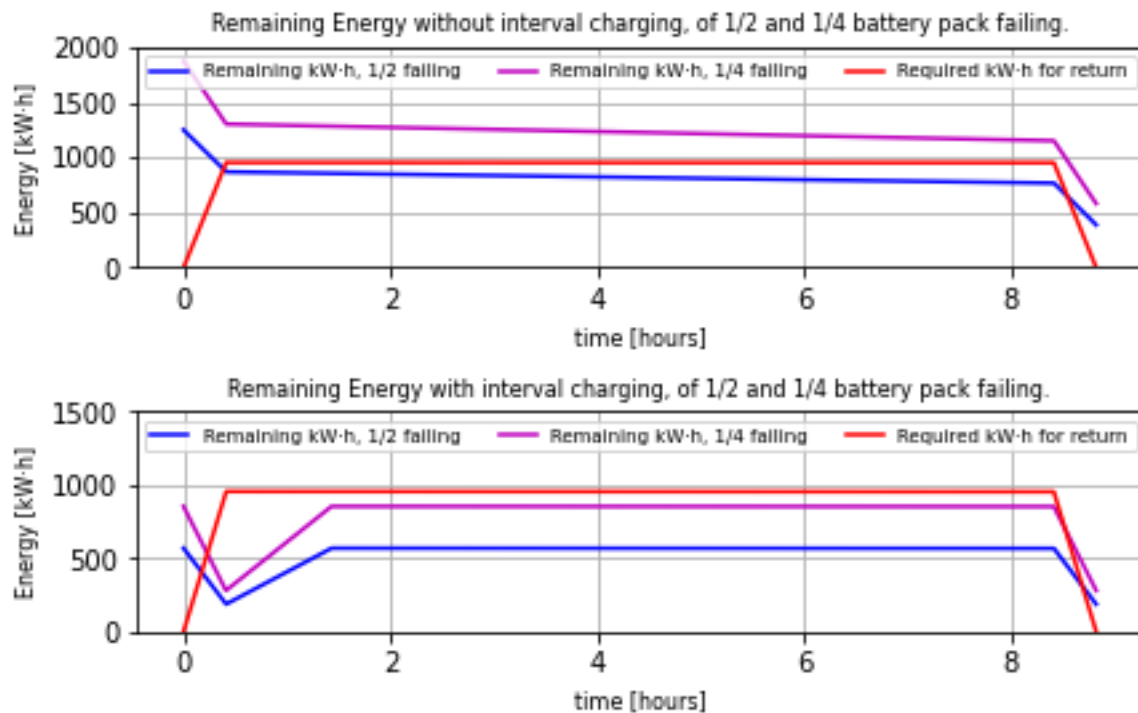
Battery Systems' Total Capacity (kW·h) (70% D.O.D.)	
Without charging at Wind Farm	2464.8
With charging at Wind Farm	1090.5



Εικόνα 18: Μεταβολή απαιτούμενης χωρητικότητας μεταξύ της φόρτισης στο λιμάνι αναχώρησης καθώς και της ενδιάμεσης φόρτισης

Είναι προφανές ότι εφόσον υπάρχει η δυνατότητα φόρτισης στο αιολικό πάρκο, το σύστημα μπαταριών που απαιτείται προκύπτει παραπάνω από 50% μικρότερης χωρητικότητας από την περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα αυτή. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε πρέπει να ελεγχθεί και η εναπομένουσα χωρητικότητα σε περίπτωση βλάβης ενός συστήματος μπαταριών. Αυτό θα

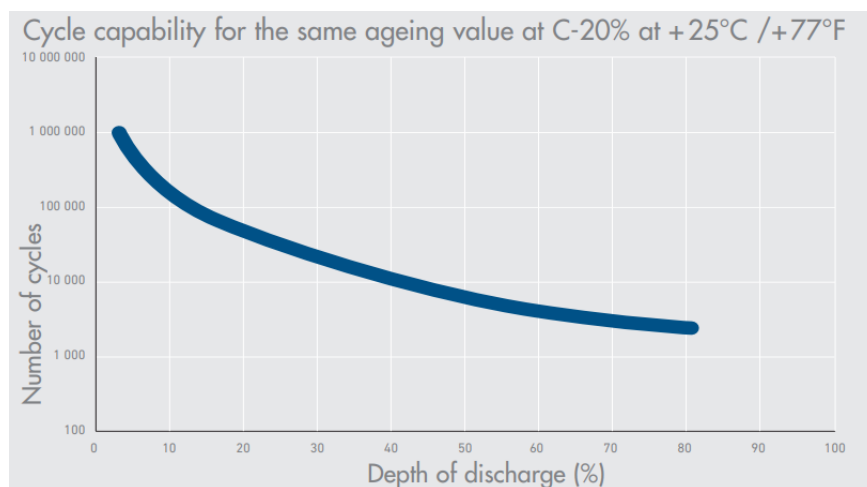
ελεγχθεί και για τις δύο περιπτώσεις, όπου τα συστήματα μπαταριών θα χωριστούν σε δύο και τέσσερα αντίστοιχα, ενώ για την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για επιστροφή του σκάφους στο λιμάνι, θεωρήθηκε μια προσαύξηση της τάξης του 25%, σαν συντελεστής ασφαλείας (s.f.=1.25).



Εικόνα 19: Απεικόνιση διαθέσιμης ενέργειας και ελάχιστης απαιτούμενης σε περίπτωση βλάβης ενός εκ των συστημάτων μπαταριών

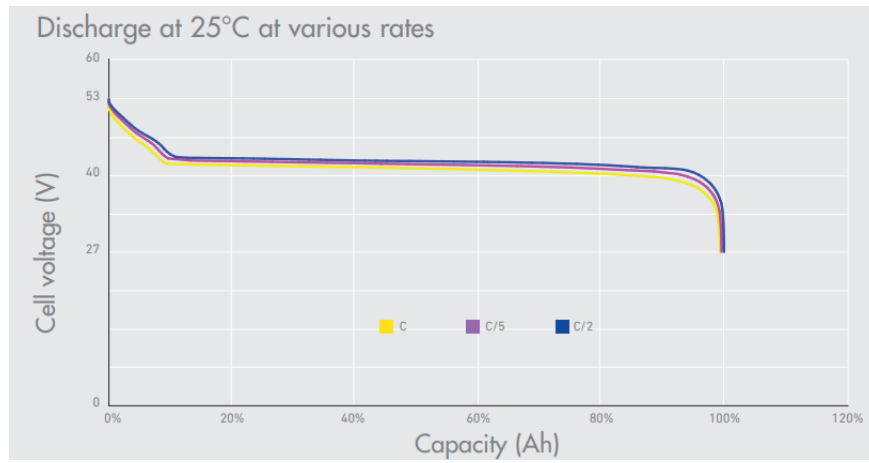
Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούν να βγουν δύο βασικά συμπεράσματα. Αρχικά, η διαστασιολόγηση του συστήματος μπαταριών με την προϋπόθεση ότι το σκάφος θα φορτίζει στο αιολικό πάρκο αν και εφικτή και σίγουρα πιο οικονομική από το σενάριο μη φόρτισης, δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις εφεδρείας έναντι βλάβης ενός εκ των συστημάτων μπαταριών ακόμα και στην περίπτωση που το σύστημα χωριστεί σε τέσσερα υποσυστήματα, καθώς η εναπομείνουσα χωρητικότητα δεν αρκεί. Από την άλλη πλευρά, το σενάριο με τα τέσσερα υποσυστήματα προσφέρει τη μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια καθώς η εφεδρεία (η διαφορά της εναπομείνουσας ενέργειας από αυτήν που απαιτείται για την επιστροφή) είναι αρκετά υψηλή, η ελάχιστη τιμή της προκύπτει ίση με 200 kW·h.

Πέρα από την ενεργειακή εφεδρεία που προσφέρει η λύση του συστήματος της υψηλής χωρητικότητας, το σύστημα θα φορτίζει μία φορά την ημέρα, όπου το μέγιστο βάθος εκφόρτισης φτάνει το 70%. Στο παρακάτω γράφημα, όπου περιγράφει τους μέγιστους κύκλους φόρτισης σε σχέση με το βάθος εκφόρτισης του κατασκευαστή, είναι προφανές ότι επιλέγοντας ένα DOD της τάξης του 70%, οι κύκλοι φόρτισης μπορούν να φτάσουν τους 5000. Πρόκειται για τη βέλτιστη λύση καθώς αφενός το γεγονός ότι θα φορτίζουν οι μπαταρίες πλήρως μια φορά την ημέρα, που συνεπάγεται λίγους κύκλους φόρτισης και αφετέρου το ότι θα εκφορτίζεται στο 70%, συνεπάγεται τη μέγιστη διάρκεια ζωής των μπαταριών, χωρίς την υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος.



Εικόνα 20: Επίδραση του βάθους εκφόρτισης στους μέγιστους κύκλους της μπαταρίας

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι η μπαταρία δεν παρουσιάζει γραμμικά χαρακτηριστικά λειτουργίας. Αυτό έχει σημαντική επίδραση σε ορισμένες σημαντικές ιδιότητες της, όπως η τάση που μπορεί να προσφέρει. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι σταθερή για ένα μεγάλο εύρος του DOD (από το 100-10%), ενώ κάτω από 10% φθίνει ταχύτατα. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας του σκάφους, δεν πρέπει ποτέ η χωρητικότητα του συστήματος να πιάσει τιμή χαμηλότερη του 10% καθώς η τάση που θα παράγει το σύστημα μπαταριών δε θα είναι αρκετή για την εύρυθμη λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης. Επομένως, κατά τη λειτουργία του σκάφους και σε όλη τη διάρκεια ζωής του, πρέπει να θεωρείται ότι η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι κατά προσέγγιση το 90% της ονομαστικής τιμής.



Εικόνα 21: Επίδραση διαθέσιμης χωρητικότητας στην τάση της μπαταρίας

7.4 Αποτελέσματα

Ακολουθούν τα αποτελέσματα τα οποία βασίζονται στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην ενότητα 7.2 και τα οποία βασίζονται και στη φιλοσοφία σχεδίασης που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ώστε το σκάφος να είναι εξασφαλισμένο και στην περίπτωση βλάβης ενός εκ των συστημάτων μπαταριών.

Αρχικά όσον αφορά το σύστημα των μπαταριών, επιλέχθηκε η Seanergy 48M (Energy). Τα κύρια χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά επιλεγθείσας μπαταρίας

Battery module specifications Seanergy 48M (Energy)		
Nominal module voltage [V]		46.2
Nominal capacity [A·h] (C/5)		82
Nominal energy [kW·h] (C/5)		3.8
Dimensions [m]		448x133x602.5
Weight [kg]		39.5
Volume [m ³]		0.036
Specific energy [W·h/kg]		96
Energy density [W·h/lt]		106
Electrical characteristics at 25°C	Maximum discharge current [A]	240
	Maximum charge current [A]	80
	Recharge time at nominal current (95% SoC) [h]	2
Cycle life @ 20°C [cycles]		6000 – 1 million

Με βάση το υπηρεσιακό προφίλ, η επιλογή του συστήματος ενέργειας έγινε με σκοπό να εξασφαλίζεται η επιστροφή του σκάφους στο λιμάνι σε περίπτωση βλάβης ενός εκ των συστημάτων μπαταριών. Έτσι, επιλέχθηκαν τέσσερα ανεξάρτητα μεταξύ τους συστήματα μπαταριών όπου το σκάφος θα φορτίζει μόνο στο λιμάνι αναχώρησης καθώς όπως φαίνεται και από το γράφημα 19 (πιο πάνω), είναι το μοναδικό σενάριο που έχει μεγάλο περιθώριο ασφάλειας σε περίπτωση βλάβης. Επιπλέον, η επιλογή φόρτισης στο αιολικό πάρκο απαιτεί και ένα επιπλέον κόστος για την εγκατάσταση ενός συστήματος μπαταριών καθώς δεν είναι δεδομένη η ύπαρξη

ηλεκτρικής ενέργειας σε καθημερινή βάση, επομένως πρέπει να υπάρχει και μια πηγή ενέργειας που θα προσφέρει ενέργεια στο σκάφος σε ώρες που το πάρκο δεν έχει τη δυνατότητα παραγωγής.

Με βάση τα παραπάνω η ηλεκτρική ενέργεια που πρέπει να έχει το σκάφος υπολογίστηκε ίση με:

$$E_{Min,Installed} = 2464.8 \text{ kW} \cdot h$$

Η επιλογή του ηλεκτροκινητήρα βασίστηκε αφενός στο να έχει παρόμοια ονομαστική ισχύ με τον υπάρχον κινητήρα και αφετέρου παρόμοια ταχύτητα. Βέβαια οι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να δουλέψουν σε ένα μεγάλο εύρος στροφών, με σταθερή ροπή, ωστόσο η ονομαστική τους ταχύτητα εξαρτάται αφενός από τη συχνότητα των ρευμάτων (50 – 60 Hz) και αφετέρου από τον αριθμό των πόλων τους. Ο κινητήρας που επιλέχθηκε ήταν ο Valiadis K400M-4 ο οποίος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά επιλεγθέντα κινητήρα

Valiadis K400M-4	
Rated Power [kW]	560
Speed [RPM]	1490
Rater Voltage – Y [V]	690
Frequency [Hz]	50
Full load current -Y [A]	546.17
Weight [kg]	3400
%Efficiency @ 100% Load	96.0

Επιπλέον, η επιλογή του κινητήρα βασίστηκε και στην ονομαστική του τάση σε συνδεσμολογία αστέρα. Είναι κινητήρας χαμηλής τάσεως επομένως απαιτούνται μικρός αριθμός μπαταριών εν σειρά ώστε να μπορούν να τροφοδοτήσουν τον κινητήρα στην ονομαστική του τάση. Έτσι με βάση την ονομαστική του τάση απαιτούνται 15 μπαταρίες εν σειρά:

$$N_{Bt,series} = roundup\left(\frac{690}{46.2}\right) = roundup(14.93) = 15$$

$$V_{system} = N_{Bt,series} \cdot Nominal \text{ module voltage} = 15 \cdot 46.2 = 693 \text{ V}$$

Ο αριθμός των παράλληλων συστοιχιών που απαιτείται υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$N_{Bt,parallel} = roundup\left(\frac{E_{Min,Installed} \cdot 1000}{V_{system} \cdot Nominal\ capacity}\right) = roundup(43.37) = 44$$

Από τη στιγμή που επιλέγονται τέσσερα ανεξάρτητα συστήματα μπαταριών, πρέπει το κάθε ένα να έχει ακέραιο αριθμό παράλληλων συστοιχιών.

$$N_{Bt,pack} = \frac{N_{Bt,parallel}}{4} = \frac{44}{4} = 11$$

Επομένως απαιτείται η εγκατάσταση συνολικά των παρακάτω μπαταριών:

$$N_{Bt,Total} = N_{Bt,series} \cdot N_{Bt,parallel} = 15 \cdot 44 = 660$$

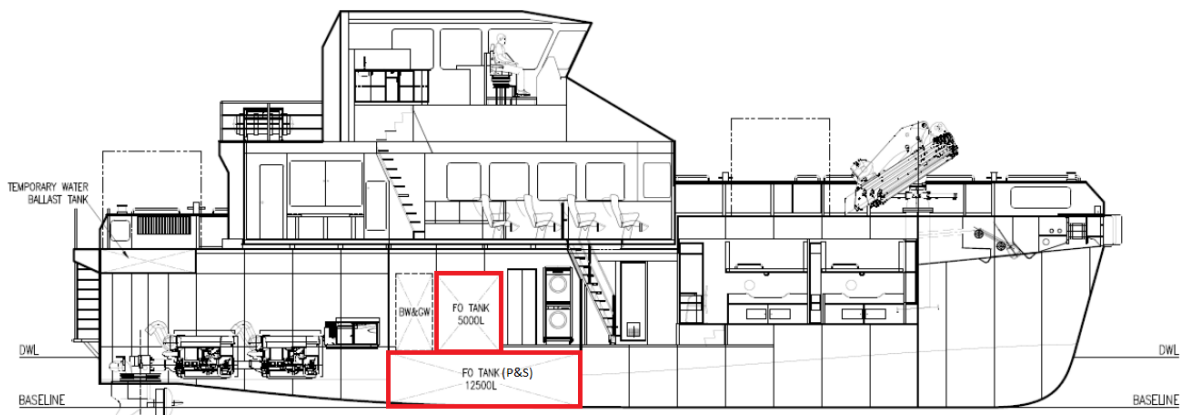
Και η συνολική εγκατεστημένη ενέργεια είναι:

$$E_{Installed} = N_{Bt,Total} \cdot Nominal\ energy = 660 \cdot 3.6 = 2508\ kW \cdot h$$

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά συστήματος μπαταριών

Minimum Energy Installed [kW·h]	2464.8
Number of modules in series	15
Number of parallel battery strings	44
Total number of batteries	660
Energy installed on board [kW·h]	2508
Minimum remaining energy after failure of one battery pack [kW·h]	390
Total weight of battery system [kg]	26070
Total volume of battery system [m ³]	23.7
Cycles daily [70% DOD]	1
Life expectancy [years] [70% DOD]	11

Το συγκεκριμένο σύστημα μπαταριών θα τοποθετηθεί στους χώρους που φαίνονται στο παρακάτω σκαρίφημα, δηλαδή στις τέσσερις δεξαμενές που βρίσκονται σε port και starboard side αντίστοιχα. Η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών αυτών είναι 35 m³ που είναι υπεραρκετή για την τοποθέτηση των μπαταριών.



Εικόνα 22: Διαθέσιμοι χώροι για την τοποθέτηση των μπαταριών

Επιπλέον, το συνολικό βάρος των καυσίμων, θεωρώντας μια πληρότητα των αντίστοιχων δεξαμενών της τάξης του 98%, είναι ίσο με 31.5 tn ενώ το αντίστοιχο βάρος των μπαταριών είναι ίσο με 26 tn. Δηλαδή με την τοποθέτηση των μπαταριών υπάρχει εξοικονόμηση χώρου της τάξης του 25% ενώ και μείωση βάρους της τάξης του 18%, ένα ακόμα πλεονέκτημα της λύσης της ηλεκτροκίνησης που βέβαια συνοδεύεται και από μείωση της αυτονομίας του σκάφους που ωστόσο στην παρούσα μελέτη δεν είναι σημαντική καθώς το σκάφος λειτουργεί σε συγκεκριμένη διαδρομή και για δεδομένο σκοπό.

Πέρα από τη διαστασιολόγηση των κινητήρων και των μπαταριών απαραίτητη είναι και η διαστασιολόγηση των inverters καθώς και του rectifier που θα έχει ως σκοπό τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος από το λιμένα σε σταθερό για τη φόρτιση των μπαταριών, καθώς και την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του σκάφους κατά την παραμονή του στο λιμάνι.

Όσον αφορά τους inverters, πρέπει η ονομαστική τους ισχύς να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη των συσκευών που καλούνται να τροφοδοτήσουν – ελέγξουν, επομένως από τη στιγμή που ο κάθε ένας inverter θα τροφοδοτεί έναν κινητήρα η ονομαστική του ισχύ θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη των 560 kW της ονομαστικής ισχύς των κινητήρων λαμβάνοντας υπόψη και πιθανές απώλειες μετάδοσης αλλά και του ίδιου του inverter. Όσον αφορά τους inverters που θα καλύπτουν τις ηλεκτρικές ανάγκες του hoteling, η ισχύ τους θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της ονομαστικής ισχύος των γεννητριών που αντικαταστάθηκαν, δηλαδή των 54 kW. Επομένως:

Inverters
4 x Inverters @ 600 kW
2 x Inverters @ 60 kW

Για τη διαστασιολόγηση του ανορθωτή θα ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η ονομαστική τάση φόρτισης των μπαταριών, το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης καθώς και η ηλεκτρική ισχύς του hoteling κατά τη παραμονή στο λιμένα. Η ονομαστική τάση φόρτισης βάση του κατασκευαστή είναι στα 46 V καθώς και το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης τα 40 A. Από τη στιγμή που υπάρχουν 15 μπαταρίες εν σειρά, η τάση φόρτισης μετά τον ανορθωτή πρέπει να είναι ίση με:

$$\text{Charging voltage} = N_{Bt,series} \cdot \text{Nominal charging voltage} = 15 \cdot 46 = 690 \text{ V}$$

Το ρεύμα φόρτισης είναι ίσο με το ονομαστικό επί τον αριθμό των παράλληλων συστοιχιών, επομένως:

$$\text{Charging current} = N_{Bt,parallel} \cdot \text{Nominal charging current} = 44 \cdot 40 = 1760 \text{ A}$$

Επομένως η ισχύς φόρτισης είναι ίση με:

$$\text{Charging Power} = \text{Charging Voltage} \cdot \text{Charging current} = \frac{690 \cdot 1760}{1000} = 1214.5 \text{ kW}$$

Επομένως ο rectifier πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί ηλεκτρική ισχύ, μεγαλύτερη ή ίση των 1214.5 kW.

7.5 Εκτίμηση ρύπων

Η εκτίμηση των ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα κατά τη λειτουργία του σκάφους με το μηχανικό σύστημα πρόωσης που έχει πριν την μετασκευή του, βασίζεται στις κατευθυντήριες γραμμές του πρωτοκόλλου Tier – III όπου οι τιμές εισόδου που απαιτούνται για τον υπολογισμό των εκάστοτε εκπομπών είναι οι επιμέρους καταναλώσεις των κύριων μηχανών καθώς και των ηλεκτρογεννητριών.

Για την ημερήσια λειτουργία του σκάφους το ποσό κάθε ρύπων μπορεί να εκφραστεί ως:

$$EM_{day_p} = EM_{auxiliary_{i,p,m}} + EM_{main\ engine_{i,p,m}}(g)$$

Οι δύο παραπάνω όροι στο δεξί μέλος της εξίσωσης μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$EM_{auxiliary_{i,p,m}} = N \cdot t_i \cdot Lf_i \cdot P \cdot EF_{i,p,m,f}(g)$$

$$EM_{main\ engine_{i,p,m}} = N \cdot t \cdot Lf_i \cdot P \cdot EF_{i,p,m,f}(g)$$

Όπου: *i*: Η κατάσταση που βρίσκεται το σκάφος (Cruising/Port),

N: Ο αριθμός των μηχανών που λειτουργούν κατά την εκάστοτε κατάσταση,

t: Ο χρόνος που το πλοίο λειτουργεί στην εκάστοτε κατάσταση,

Lf: Ο συντελεστής φόρτισης της μηχανής,

P: Η ονομαστική ισχύς της μηχανής,

EF: Συντελεστής εκπομπών ανάλογα με το σκάφος.

Η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται όταν η κατανάλωση της μηχανής δεν είναι a priori γνωστή, ή όταν δεν υπάρχουν δεδομένα που να προσδιορίζουν την κατανάλωση της μηχανής, συναρτήσει του συντελεστή ισχύος (όπως για παράδειγμα καμπύλη Power – SFOC). Από τη στιγμή που είναι γνωστά η ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς των κύριων μηχανών καθώς και των γεννητριών, ο συντελεστής ισχύος αυτών σε κάθε κατάσταση λειτουργίας του σκάφους καθώς και ο χρόνος αυτών μπορούν εύκολα να υπολογιστούν οι εκπομπές ρύπων.

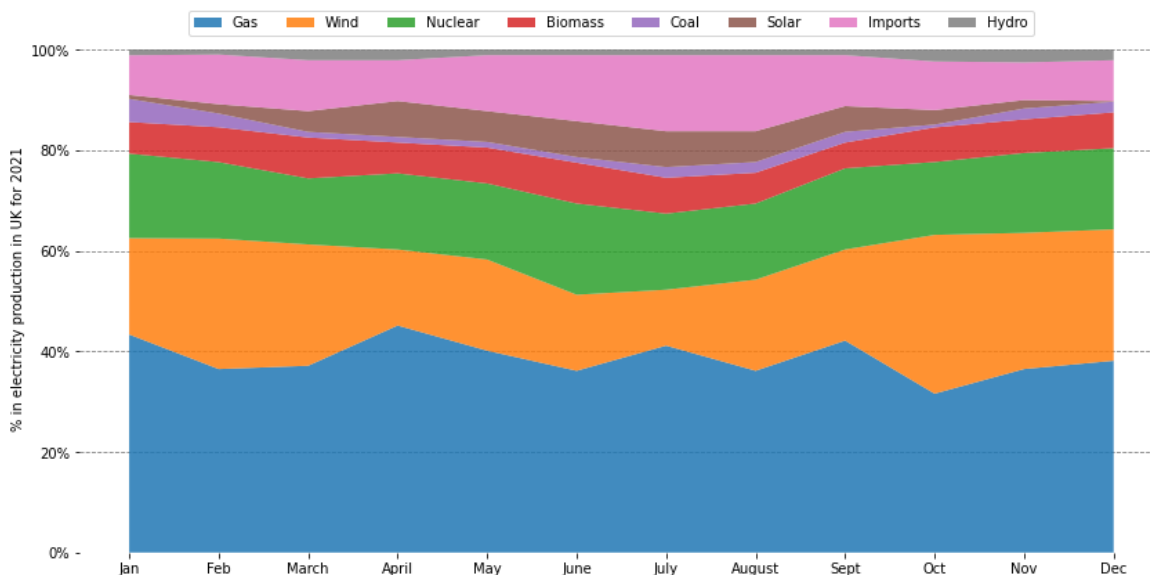
Οι ετήσιες εκπομπές ρύπων, θεωρώντας ότι το σκάφος λειτουργεί όλες τις μέρες του χρόνου μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$EM_{annual_p} = EM_{mission_p} \cdot 360 \cdot 10^{-6} (tn)$$

Μετά τη μετασκευή οι ρύποι που θα παράγονται πάνω στο σκάφος θα είναι πρακτικά μηδενικοί, ωστόσο πρέπει να εκτιμηθούν εκείνοι που παράγονται κατά τη φόρτιση του σκάφους, από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που τροφοδοτούν το δίκτυο. Έτσι, είναι απαραίτητα σχετικά δεδομένα που προσδιορίζουν τις διάφορες ενεργειακές πηγές που συμμετέχουν στην παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου. Αυτά τα δεδομένα προήλθαν από την ιστοσελίδα nationalgridESO.com, όπου ήταν συγκεντρωμένα για κάθε μήνα του έτους 2021. Κατά μέσο όρο η ηλεκτρική παραγωγή του έτους 2021 καλύφθηκε από:

Πίνακας 10: Ποσοστό συμμετοχής ενεργειακών τομέων στην παραγωγή ηλ. ρεύματος στο ΗΒ, το 2021

% της ηλεκτρικής παραγωγής, UK 2021	
Gas	38.65
Wind	20.81
Nuclear	15.53
Biomass	6.81
Coal	1.92
Solar	4.18
Imports	10.49
Hydro	1.59



Εικόνα 23: Stacked area chart των ενεργειακών τομέων που συμμετείχαν στην ηλεκτρική παραγωγή του ΗΒ, το 2021

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται για κάθε μήνα η επιμέρους συμμετοχή διαφόρων πηγών στην παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος. Κατά μέσο όρο οι ΑΠΕ μαζί με την πυρηνική ενέργεια καλύπτουν το 47.3% της παραγωγής ηλεκτρισμού της Αγγλίας και στη συνέχεια τη μεγαλύτερη συμμετοχή έχει το φυσικό αέριο, τάξης 39% μαζί με τη βιομάζα που κυμαίνεται στο 7% και τον άνθρακα στο 2%. Αν και οι εισαγωγές φτάνουν στο 10.5% δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η πηγή τους και το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ των γειτονικών κρατών σε αυτή, επομένως θα κατανεμηθεί ανάλογα σε κάθε μία από τις άλλες. Επομένως για τον υπολογισμό των εκπομπών από τις μονάδες παραγωγής του δικτύου διανομής θα χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω ποσοστά:

Πίνακας 11: Αναδιανομή ποσοστών συμμετοχής ηλεκτρικής παραγωγής στο ΗΒ, το 2021

% της ηλεκτρικής παραγωγής, UK 2021, με τις εισαγωγές κατανεμημένες σε Gas, Biomass, Coal	
Gas	47.39
Wind	20.81
Nuclear	15.53
Biomass	8.32
Coal	2.35
Solar	4.18
Hydro	1.59

Για την εκτίμηση των ρύπων χρειάζεται μια εκτίμηση και των Emission Factors ανά τύπο ρύπου. Για την εκτίμηση των σχετικών συντελεστών για τις μονάδες παραγωγής του δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν σχετικά δεδομένα από σχετική συλλογή στατιστικών δεδομένων της Νορβηγίας¹, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

¹ https://www.ssb.no/_attachment/288060/binary/93858?_version=539789

Πίνακας 12: Συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλ. ρεύματος από επίγειους σταθμούς

	% el. production	CO ₂ [g/kW·h]	SO ₂ [g/kW·h]	NO _x [g/kW·h]	PM [g/kW·h]
Gas	47.39	584.8	0.02	0.3	0.03
Wind	20.81	0	0	0	0
Nuclear	15.53	0	0	0	0
Biomass	8.32	230	11.2	5	
Coal	2.35	984.3	2.8	2.3	1.02
Solar	4.18	0	0	0	0
Hydro	1.59	0	0	0	0
El. production weighted average	100.0	319.4	1.007	0.612	0.038

Για την εκτίμηση των ρύπων από τη λύση της συμβατικής πρόωσης, πριν τη μετατροπή σε ηλεκτρικό, χρησιμοποιήθηκαν σχετικά δεδομένα από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EEA), με βάση σχετική μελέτη του 2019 και προσφάτως ενημερωμένη το έτος 2021 ('EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019')². Για την εκτίμηση των εκπομπών CO₂, από τη στιγμή που καίγεται MGO/MDO θα χρησιμοποιηθεί ο σχετικός συντελεστής μετατροπής που προτείνεται από τον IMO, ίσος με 3.206 tCO₂/tfuel.

Πίνακας 13: Συντελεστής εκπομπών ρύπων, για ταχύστροφη Κ.Μ. και γεννήτριες

Engine	Phase	Engine type	Fuel type	CO ₂ [g/kW·h]	SO ₂ [g/kW·h]	NO _x [g/kWh·h]	PM [g/kW·h]	SFOC (gfuel/kW·h)
Main	Cruise	High-speed diesel	MDO/MGO	657.23	11.8	8.53	0.188	205
Auxiliary	Cruise	High-speed diesel	MDO/MGO	679.67	2.5	9.94	0.290	212
Auxiliary	Hoteling	High-speed diesel	MDO/MGO	679.67	2.14	8.53	0.221	212

² https://www.ssb.no/_attachment/288060/binary/93858?_version=539789

Λαμβάνοντας υπόψιν αυτούς τους συντελεστές σε συνδυασμό με το επιχειρησιακό προφίλ του σκάφους, οι ετήσιες εκπομπές πριν την μετατροπή, ήταν ως εξής:

Πίνακας 14: Ετήσιοι τόνοι εκπομπών CO₂, SO₂, NO_x και PM με τη συμβατική πρόωση

Diesel propulsion	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM
Total annual emissions [tn]	1439.6	25.01	18.68	0.41

Η ετήσια ποσότητα ρύπων που παράχθηκε από την παροχή ενέργειας μέσω της στεριάς, λόγω της μετατροπής του σκάφους σε ηλεκτρικό και η ποσοστιαία διαφορά με την αντίστοιχη ποσότητα πριν την μετατροπή, υπολογίστηκαν όπως φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 15: Ετήσιοι τόνοι εκπομπών CO₂, SO₂, NO_x και PM με την ηλεκτροπρόωση

El. propulsion	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM
Total annual emissions [tn]	198.183	0.625	0.380	0.024
Reduction of emissions %	86.23	97.5	97.96	94.29

7.6 Κόστος μετασκευής, λειτουργίας και συντήρησης

Στο σημείο αυτό θα υπολογιστεί το κόστος της συνολικής μετασκευής του CSV OOC NERZ καθώς και η διερεύνηση του κατά πόσο είναι οικονομικά βιώσιμη αυτή η μετατροπή. Ο αναλυτικός υπολογισμός του κόστους μετασκευής του σκάφους, όπου περιέχει την τιμή αγοράς και εγκατάστασης του νέου εξοπλισμού καθώς και την πώληση του μεταχειρισμένου μηχανολογικού εξοπλισμού, αλλά και τη σύγκριση των λειτουργικών εξόδων και εξόδων συντήρησης μεταξύ της συμβατικής εγκατάστασης πρόωσης καθώς και της ηλεκτρικής ακολουθεί παρακάτω.

Αρχικά αναλύονται τα κόστη αγοράς των μπαταριών, των κινητήρων, καθώς και των inverters.

Πίνακας 16: Κόστος συστήματος μπαταριών

Κόστος μπαταριών	
Κόστος μπαταριών, συμπεριλαμβανόμενου του κόστους για τα συστήματα BMM, BMU, MBMM καθώς και το λογισμικό [€/kW·h]	550
Εγκατεστημένη ισχύς [kW·h]	2508
Κόστος [€]	1379400

Η επιλογή των inverters έγινε με σκοπό η ονομαστική τους ισχύ να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την ισχύ των ηλεκτροκινητήρων που τροφοδοτούν.

Πίνακας 17: Κόστος ηλεκτροκινητήρων και inverters

Κόστη ηλεκτροκινητήρων & inverters		
<i>Battery Inverters</i>	200 €/kW	
4 x Inverters 580 kW	2320 kW	464000
2 x Inverters 60 kW	120 kW	24000
<i>Electric Motors</i>	80 €/kW	
4 x Electric Motors 560 kW	2240 kW	179200
Rectifier # kW	# €/kW	100
Απρόβλεπτα κόστη 10%	€	217660
Συνολικό κόστος εξηλεκτρισμού	€	1014860

Επιπλέον, το κόστος της μετατροπής μπορεί να μειωθεί από την πώληση των μεταχειρισμένων κύριων μηχανών καθώς και των γεννητριών.

Πίνακας 18: Κέρδη πώλησης μεταχειρισμένων Κ.Μ και Η/Γ

Πώληση μεταχειρισμένων κινητήρων και γεννητριών		
Main engines	40 €/kW	
4 x Main Engines 517 kW	2068 kW	82720
Generators	38 €/kW	
2 x Generators 27 kW	54 kW	1944
Cost reduction	€	84664
Retrofit cost	€	2309596

Πίνακας 19: Σύγκριση εξόδων λειτουργίας συμβατικής - ηλεκτροπρόωσης

Σύγκριση εξόδων λειτουργίας μεταξύ της συμβατικής και της ηλεκτρικής πρόωσης	
<i>Ηλεκτρική πρόωση</i>	
Ετήσιες ημέρες λειτουργίας	360
Απαιτούμενη ενέργεια ανά ταξίδι [kW·h]	1723.5
Απαιτούμενη ενέργεια σε ετήσια βάση [kW·h]	620476.7
Μέση τιμή € της kW·h για την αγορά επιχειρήσεων στο ΗΒ το 2021 ³	0.223
Συνολικό κόστος €	138366.3
<i>Συμβατική πρόωση</i>	
Ημερήσια παραγωγή ενέργειας από Κ.Μ. [kW·h]	2871.6
Ημερήσια παραγωγή ενέργειας από γεννήτριες [kW·h]	253.2
SFOC Κ.Μ. [g/kW·h]	224
SFOC G/E [g/kW·h]	213
Ετήσια παραγωγή ισχύος από Κ.Μ. [kW·h]	1033790
Ετήσια παραγωγή ισχύος από G/E [kW·h]	91160.3
Τιμή MDO [€/tn]	766
Συνολικό κόστος € MDO το χρόνο	192255.4
Εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας € ετησίως	53889.1

³ https://www.globalpetrolprices.com/United-Kingdom/electricity_prices/

Όσον αφορά τα έξοδα συντήρησης:

Πίνακας 20: Σύγκριση εξόδων συντήρησης συμβατικής - ηλεκτροπρόωσης

Σύγκριση εξόδων συντήρησης μεταξύ της συμβατικής και της ηλεκτρικής πρόωσης	
<i>Ηλεκτρική πρόωση</i>	
Σταθερά κόστη συντήρησης 2% του κόστους μπαταριών €	27588
Μεταβλητά κόστη συντήρησης [€/kW·h]	1
Μεταβλητά κόστη για την εγκατεστημένη ισχύ €	2508
<i>Συμβατική πρόωση</i>	
Έξοδα συντήρησης [€/HP]	13
Έξοδα συντήρησης για εγκατεστημένη ισχύ €	36052
Εξοικονόμηση κόστους συντήρησης € ετησίως	5956

7.7 Οικονομική ανάλυση

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της οικονομικής μελέτης, αξίζει να τονιστούν τα παρακάτω:

- Η οικονομική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με χρονικό ορίζοντα τη διάρκεια ζωής του συστήματος μπαταριών, δηλαδή τα 11 έτη.
- Τα έσοδα τα οποία θα συμπεριληφθούν αφορούν τα οφέλη από τη μη χρήση καυσίμου, καθώς και την εξοικονόμηση των κοστών συντήρησης και λειτουργίας από την μετατροπή του σκάφους σε αμιγώς ηλεκτρικό.
- Η υπολειπόμενη αξία του εξοπλισμού στο τέλος της επένδυσης εκτιμάται στο 30% για τις μπαταρίες και στο 70% για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, δηλαδή τους κινητήρες, τους inverters, καλωδιώσεις κ.τ.λ.
- Θα εξεταστούν και σενάρια χρηματοδότησης από την Ε.Ε. της τάξης των 10%, 20%, 30%, 40% και 50%.

- Η δυνατότητα εξασφάλισης χρηματοδότησης από την Ε.Ε. είναι ένα αρκετά πραγματοποιήσιμο σενάριο καθώς η Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του European Green Deal, έχει ως στόχο να ενισχύσουν την προσπάθεια της ναυτιλιακού κλάδου ως προς την μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου, χρηματοδοτώντας έως και το 60% των επενδύσεων για έργα μικρής κλίμακας της τάξης των 5 εκατομμυρίων ευρώ.
- Θα υπολογιστούν οι δείκτες της Χρηματοοικονομικής Καθαρής Παρούσα Αξίας (FNPV) καθώς και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (FRR) του έργου, αλλά και ο απαιτούμενος χρόνος για την ανάκτηση των κεφαλαίων που δαπανήθηκαν για την επένδυση.
- Όσον αφορά τα λειτουργικά κόστη, θεωρείται μια ετήσια αύξηση της τιμής του καυσίμου της τάξης του 3.5% καθώς και της αύξησης του ηλεκτρικού ρεύματος της τάξης του 2%.

Πίνακας 21: Οικονομική μελέτη επένδυσης χωρίς χρηματοδότηση με προεξοφλητικό επιτόκιο 6%

Χωρίς χρηματοδότηση - NPV 6%													
Επιτόκιο αναγωγής %	6												
Υπολογισμός αξίας επένδυσης	Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Construction	Operation										
Αρχικό κόστος επένδυσης €		-2309596	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Όφελος από καύσιμο και Ο/Μ €		-	59845	63807	67948	72278	76801	81528	86464	91619	97001	102620	108483
Αναχθέντα στο παρόν €		-2309596	56458	56788	57051	57251	57390	57474	57504	57483	57415	57302	57148
Υπολειπόμενη αξία επένδυσης €		592226											1124222
FNPV €		-1107888											
%FRR		-1.4											

Πίνακας 22: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 10% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%

Με χρηματοδότηση 10% - NPV 6%													
Επιτόκιο αναγωγής %	6												
Υπολογισμός αξίας επένδυσης	Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Construction	Operation										
Αρχικό κόστος επένδυσης €		-2078636	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Όφελος από καύσιμο και Ο/Μ €		-	59845	63807	67948	72278	76801	81528	86464	91619	97001	102620	108483
Αναχθέντα στο παρόν €		-2078636	56458	56788	57051	57251	57390	57474	57504	57483	57415	57302	57148
Υπολειπόμενη αξία επένδυσης €		592226											1124222
FNPV €		-857148											
%FRR		-0.25											

Πίνακας 23: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 20% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%

Με χρηματοδότηση 20% - NPV 6%													
Επιτόκιο αναγωγής %	6												
Υπολογισμός αξίας επένδυσης	Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Construction	Operation										
Αρχικό κόστος επένδυσης €		-1847677	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Όφελος από καύσιμο και Ο/Μ €		-	59845	63807	67948	72278	76801	81528	86464	91619	97001	102620	108483
Αναχθέντα στο παρόν €		-1847677	56458	56788	57051	57251	57390	57474	57504	57483	57415	57302	57148
Υπολειπόμενη αξία επένδυσης €		592226											1124222
FNPV €		-626188											
%FRR		1.07											

Πίνακας 24: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 30% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%

Με χρηματοδότηση 30% - NPV 6%													
Επιτόκιο αναγωγής %	6												
Υπολογισμός αξίας επένδυσης	Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Construction	Operation										
Αρχικό κόστος επένδυσης €		-1616717	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Όφελος από καύσιμο και Ο/Μ €		-	59845	63807	67948	72278	76801	81528	86464	91619	97001	102620	108483
Αναχθέντα στο παρόν €		-1616717	56458	56788	57051	57251	57390	57474	57504	57483	57415	57302	57148
Υπολειπόμενη αξία επένδυσης €		592226											1124222
FNPV €		-395228											
%FRR		2.60											

Πίνακας 25: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 40% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%

Με χρηματοδότηση 40% - NPV 6%													
Επιτόκιο αναγωγής %	6												
Υπολογισμός αξίας επένδυσης	Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Construction	Operation										
Αρχικό κόστος επένδυσης €		-1385758	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Όφελος από καύσιμο και Ο/Μ €		-	57337	61299	65440	69770	74293	79020	83956	89111	94493	100112	105975
Αναχθέντα στο παρόν €		-1385758	54092	54556	54945	55264	55516	55706	55836	55909	55931	55902	55827
Υπολειπόμενη αξία επένδυσης €		592226											1124222
FNPV €		-184049											
%FRR		4.25											

Πίνακας 26: Οικονομική μελέτη επένδυσης με χρηματοδότηση 50% και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%

Με χρηματοδότηση 50% - NPV 6%													
Επιτόκιο αναγωγής %	6												
	Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Υπολογισμός αξίας επένδυσης		Construction		Operation									
Αρχικό κόστος επένδυσης €		-1154798	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Όφελος από καύσιμο και Ο/Μ €		-	59845	63807	67948	72278	76801	81528	86464	91619	97001	102620	108483
Αναχθέντα στο παρόν €		-1154798	56458	56788	57051	57251	57390	57474	57504	57483	57415	57302	57148
Υπολειπόμενη αξία επένδυσης €		592226											1124222
FNPV €		66691											
%FRR		6.71											

Πίνακας 27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χωρίς και με χρηματοδότηση για εύρος προεξοφλητικών επιτοκίων

Χρηματοδότηση	NPV 4%	NPV 5%	NPV 6%	NPV 7%	NPV 8%	NPV 9%	NPV 10%	FRR%
0%	-872442	-985829	-1088107	-1180497	-1264074	-1339784	-1408464	-1.40
10%	-641483	-754869	-857148	-949538	-1033114	-1108824	-1177504	-0.25
20%	-410523	-523910	-626188	-718578	-802155	-877865	-946545	1.07
30%	-179563	-292950	-395228	-487618	-571195	-646905	-715585	2.60
40%	29425	-82823	-184049	-275465	-358140	-433013	-500916	4.25
50%	282356	168969	66691	-25699	-109276	-184986	-253667	6.71

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση των ρύπων έχει ένα επιπλέον άμεσο όφελος στη δημόσια υγεία της περιοχής, όπου επιχειρεί το σκάφος. Το όφελος αυτό εφόσον υπολογιστεί με τους κατάλληλους δείκτες και συντελεστές για την εν λόγω περιοχή, μπορεί να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς της ΚΠΑ και να λάβουμε ακόμα πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα

- Η μετατροπή του OSV σε πλήρως εξηλεκτρισμένο είναι τεχνικά βιώσιμη.
- Το σύστημα μπαταριών μπορεί να τοποθετηθεί στο χώρο των δεξαμενών diesel και μάλιστα υπάρχει εξοικονόμηση χώρου της τάξης του 25% ενώ και μείωση βάρους της τάξης του 18%.
- Η αυτονομία του σκάφους μειώνεται αισθητά, ωστόσο αρκεί για τη συγκεκριμένη διαδρομή που θα πραγματοποιηθεί.
- Ακόμα και σε περίπτωση βλάβης ενός εκ των συστημάτων μπαταριών, υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα ενέργειας έχει χωριστεί σε τέσσερα υποσυστήματα μπαταριών, εξασφαλίζεται η επιστροφή του σκάφους στο λιμένα αναχώρησης.
- Η διάρκεια ζωής των μπαταριών, θεωρώντας ένα DoD της τάξης του 70% υπολογίζεται στα 11 χρόνια, αρκετά ικανοποιητική.
- Με την υιοθέτηση της ηλεκτροπρόωσης, η μείωση των ρύπων ετησίως εκτιμάται σε 86% για το CO₂, 97.5% για τα SO₂, 97% για τα NO_x και 95% για τα PM. Είναι σημαντική μείωση που βέβαια δικαιολογείται και από το γεγονός ότι το HB παράγει περίπου το 45% της ηλεκτρικής του ενέργειας από ΑΠΕ και από πυρηνικούς σταθμούς, ενώ μεγάλο μέρος της παραγωγής του καταλαμβάνει και το φυσικό αέριο το οποίο εξ ορισμού είναι αρκετά φιλικότερο από το πετρέλαιο και τον άνθρακα.
- Η οικονομική μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρονικό ορίζοντα τα 11 έτη, όπου οι μπαταρίες θα πρέπει να αντικατασταθούν.
- Το κόστος της μετατροπής σε αμιγώς ηλεκτρικό υπολογίστηκε στα 2309596€, στο οποίο έχουν υπολογιστεί και τα κέρδη από την πώληση του μεταχειρισμένου εξοπλισμού. Ετησίως η εξοικονόμηση από τα κόστη λειτουργίας υπολογίζεται στα 53889€, ενώ από τα κόστη συντήρησης στα 5956€.
- Χρησιμοποιώντας τον οικονομικό δείκτη της Κ.Π.Α. αποδεικνύεται ότι η μετατροπή είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο αν η χρηματοδότηση ξεπεράσει το 50% της αρχικής επένδυσης.

- Η συγκεκριμένη χρηματοδότηση μπορεί να εξασφαλιστεί από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα European Green Deal καθώς καλύπτει μέχρι και το 60% του αρχικού κόστους της επένδυσης.
- Για τη φόρτιση του σκάφους στο λιμάνι αναχώρησης πρέπει να κατασκευαστεί ένας υποσταθμός υψηλής τάσης, το κόστος του οποίου πρέπει να συνεκτιμηθεί.

Συμπερασματικά, είναι προφανές ότι η μετατροπή του σκάφους σε πλήρως ηλεκτρικό είναι τεχνικά βιώσιμη και με συγκεκριμένα ισχυρά πλεονεκτήματα, όπως η σημαντική μείωση των εκπομπών καθώς και η μείωση των ετήσιων εξόδων λόγω της εξοικονόμησης από τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης. Επιπλέον, το κόστος της αρχικής επένδυσης είναι σημαντικό και αποτελεί τροχοπέδη αν δεν εξασφαλιστεί χρηματοδότηση.

Η υιοθέτηση της αμιγώς ηλεκτρικής πρόωσης δεν έχει φτάσει ακόμα σε ώριμο στάδιο. Τα ενδιαφερόμενα μέρη είναι αρκετά διστακτικά και γενικότερα ο χώρος της ναυτιλίας δεν είναι δεκτικός σε νέες αλλαγές. Το βασικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών όπου δικαιολογεί τέτοιες εφαρμογές μόνο σε μικρή κλίμακα, επομένως εκτιμάται ότι είναι σχεδόν απίθανο να εφαρμοστεί σε ποντοπόρες διαδρομές, στο άμεσο μέλλον.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση των μπαταριών βασίστηκε στον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων του σκάφους λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα εγκατάσταση και συγκεκριμένους βαθμούς απόδοσης. Αν και πρόκειται για μια απλή μέθοδο, θα ήταν πιο ακριβές να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση του σκάφους σε περιβάλλον CAD και στη συνέχεια να πραγματοποιηθούν CFD υπολογισμοί ώστε να εκτιμηθεί η καμπύλη ισχύος – ταχύτητας για ένα εύρος βυθισμάτων.

Επιπλέον, οι μπαταρίες δε χαρακτηρίζονται από γραμμική συμπεριφορά επομένως ακόμα και αν η τάση που προσφέρουν για ένα μεγάλο εύρος βάθους εκφόρτισης είναι σχετικά σταθερή, θα ήταν πιο ακριβές να σχεδιαστεί ένα δυναμικό μοντέλο τους όπου θα λαμβάνει υπόψη το % DoD και θα υπολογίζει την τάση ακροδεκτών τους.

Γενικότερα όσον αφορά τα κόστη των μπαταριών, του ρεύματος και του πετρελαίου, έχει θεωρηθεί μια ετήσια αύξηση τους της τάξης περίπου του 3%. Βέβαια, αυτή η θεώρηση ενέχει μεγάλο ρίσκο καθώς αποδεικνύεται και από την παρούσα εποχή η οποία χαρακτηρίζεται αρκετά

πληθωριστική, ότι δεν μπορεί να γίνει εύκολα κάποια οικονομική μελέτη για μια περίοδο τόσο μεγάλη όσο τα 11 έτη. Επομένως, η οικονομική μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί αν και προσφέρει μια γενικότερη εκτίμηση για την αξία της μετατροπής, ενέχει μεγάλο βαθμό ρίσκου.

Μελλοντικά, όσον αφορά της μπαταρίες αναμένεται και η αύξηση της χωρητικότητας τους αλλά και η μείωση της αξίας τους. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι την παρούσα στιγμή και ιδιαίτερα στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου τα πάντα υποστηρίζουν την υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης, επενδύονται τεράστια ποσά στην έρευνα και ανάπτυξη προηγμένων μπαταριών όπου θα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ασφάλεια, μεγάλη χωρητικότητα και όσο περνάει ο καιρός και από χαμηλότερο κόστος. Ο ναυτιλιακός κλάδος πρέπει να ακολουθήσει την εξέλιξη των μπαταριών.

Τέλος, αξίζει να πραγματοποιηθεί μελέτη μετατροπής και για άλλους τύπους σκαφών που χαρακτηρίζονται από ένα πολύπλευρο επιχειρησιακό προφίλ, όπως τα ρυμουλκά, τα πυροσβεστικά κ.α. Επιπλέον, για την περίπτωση ειδικότερα της ελληνικής επιβατηγούς ναυτιλίας, από τη στιγμή που οι διαδρομές χαρακτηρίζονται από συχνές στάσεις, θα ήταν ενδιαφέρον να εφαρμοστεί η μελέτη του πλήρως εξηλεκτρισμένου και σε επιβατηγά σκάφη όπως για παράδειγμα τα καταμαράν τα οποία έχουν και λόγω της προηγμένης τους σχεδίασης χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Μια τέτοια μετατροπή θα ωφελούσε και αρκετά τα λιμάνια αυτά καθ' αυτά καθώς αφενός θα μείωνε τις τοπικές εκπομπές ρύπων και αφετέρου το θόρυβο.

Βιβλιογραφία

- Ādnanes, A. K. (2003). Maritime electrical installations and diesel electric propulsion.
- Alexandratos I. (2018), “Techno-economic feasibility study on the retrofit of conventional harbor tugboat into a battery powered one”, Diploma thesis, NTUA September 2018.
- Asariotis, R., Benamara, H., Finkenbrink, H., Hoffmann, J., Lavelle, J., Misovicova, M., ... & Youssef, F. (2011). Review of Maritime Transport, 2016 (No. UNCTAD/RMT/2011).
- Bailey, S. A. (2015). An overview of thirty years of research on ballast water as a vector for aquatic invasive species to freshwater and marine environments. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 18(3), 261-268.
- Bakirtzoglou. C (2017), “Techno-economical feasibility study on the retrofit of double-ended Ro/Pax ferries into battery-powered ones”, Diploma thesis, NTUA March 2017.
- Brynolf, S., Lindgren, J. F., Andersson, K., Wilewska-Bien, M., Baldi, F., Granhag, L., ... & Zetterdahl, M. (2016). Improving environmental performance in shipping. In *Shipping and the Environment* (pp. 399-418). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Burgherr, P. (2007). In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources. *Journal of hazardous materials*, 140(1-2), 245-256.
- Butt, N. (2007). The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: A study of Southampton. *Marine Policy*, 31(5), 591-598.
- Corbett, J. J., Lack, D. A., Winebrake, J. J., Harder, S., Silberman, J. A., & Gold, M. (2010). Arctic shipping emissions inventories and future scenarios. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(19), 9689-9704.
- Cristea, A., Hummels, D., Puzzello, L., & Avetisyan, M. (2013). Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport. *Journal of environmental economics and management*, 65(1), 153-173.
- Darbra, R. M., Pittam, N., Royston, K. A., Darbra, J. P., & Journee, H. (2009). Survey on environmental monitoring requirements of European ports. *Journal of Environmental management*, 90(3), 1396-1403.
- Darikas, G., 2018. Design and Implementation of a Battery Management System for Lithium-Ion Batteries suitable for Automotive Applications, Diploma Thesis, AUTH May 2018

- Davidson, I. C., & Simkanin, C. (2012). The biology of ballast water 25 years later. *Biological invasions*, 14(1), 9-13.
- de La Fayette, L. A. (2009). The sound management of wastes generated at sea: MARPOL, not Basel. *Environmental Policy and Law*, 39(4/5), 207.
- Duran, V., Uriondo, Z., & Moreno-Gutiérrez, J. (2012). The impact of marine engine operation and maintenance on emissions. *Transportation research Part D: Transport and environment*, 17(1), 54-60.
- Encheva, S. (2015). Evaluation of reception facilities for ship-generated waste. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 4(7), 51-54.
- Endresen, Ø., Sjørgård, E., Sundet, J. K., Dalsøren, S. B., Isaksen, I. S., Berglen, T. F., & Gravir, G. (2003). Emission from international sea transportation and environmental impact. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D17).
- Gulas, S., Downton, M., D'Souza, K., Hayden, K., & Walker, T. R. (2017). Declining Arctic Ocean oil and gas developments: Opportunities to improve governance and environmental pollution control. *Marine Policy*, 75, 53-61.
- Han, C. H. (2010). Strategies to reduce air pollution in shipping industry. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 26(1), 7-29.
- Illiyas, F. and Mohan, K., 2021. Onshore preparedness for hazardous chemical marine vessel accidents: A case study. [online] NCBI. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6014180/> [Accessed 24 June 2021].
- Kirby, M. F., & Law, R. J. (2010). Accidental spills at sea—Risk, impact, mitigation and the need for co-ordinated post-incident monitoring. *Marine pollution bulletin*, 60(6), 797-803.
- Klemas, V. (2010). Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills. *Journal of Coastal Research*, 26(5 (265)), 789-797.
- Kontovas, C. A., Psaraftis, H. N., & Ventikos, N. P. (2010). An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data. *Marine pollution bulletin*, 60(9), 1455-1466.
- Lindstad, H. E., Eskeland, G. S., & Rialland, A. (2017). Batteries in offshore support vessels—Pollution, climate impact and economics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 409-417.

- Lindstad, H., Asbjørnslett, B. E., & Strømman, A. H. (2011). Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds. *Energy Policy*, 39(6), 3456-3464.
- Lindstad, H., Bright, R. M., & Strømman, A. H. (2016). Economic savings linked to future Arctic shipping are at odds with climate change mitigation.
- Lo, V. B., Levings, C. D., & Chan, K. M. (2012). Quantifying potential propagule pressure of aquatic invasive species from the commercial shipping industry in Canada. *Marine Pollution Bulletin*, 64(2), 295-302.
- Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Pereira, J., Otero, P., Cirano, M., Zhang, X., & Hetland, R. D. (2013). Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. *Marine pollution bulletin*, 71(1-2), 139-151.
- McCay, D. F., Rowe, J. J., Whittier, N., Sankaranarayanan, S., & Etkin, D. S. (2004). Estimation of potential impacts and natural resource damages of oil. *Journal of hazardous materials*, 107(1-2), 11-25.
- Pathan, M. A. H., Siddiki, M. R., Hasan, I., & Barua, S. (2009). Performance Analysis of Industrial Battery (Doctoral dissertation, UNITED INTERNATIONAL UNIVERSITY).
- Pham, H. T., & Nguyen, T. M. (2015). Solution to reduce air environmental pollution from ships. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9.
- Polglaze, J. (2003). Can we always ignore ship-generated food waste?. *Marine Pollution Bulletin*, 46(1), 33-38.
- Ritchie, G., 2008. OFFSHORE SUPPORT VESSELS A PRACTICAL GUIDE. London: The Nautical Institute.
- Rocha, A. C. S., Reis-Henriques, M. A., Galhano, V., Ferreira, M., & Guimarães, L. (2016). Toxicity of seven priority hazardous and noxious substances (HNSs) to marine organisms: Current status, knowledge gaps and recommendations for future research. *Science of the Total Environment*, 542, 728-749.
- Sand, M., Berntsen, T. K., Seland, Ø., & Kristjánsson, J. E. (2013). Arctic surface temperature change to emissions of black carbon within Arctic or midlatitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14), 7788-7798.
- Sarthy, A. (2005). Modern Offshore Support Vessels Class and Statutory Perspectives.
- Shine, K. P. (2009). The global warming potential—the need for an interdisciplinary retrieval.

- Sørensen, A. J. (2012). Marine control systems propulsion and motion control of ships and ocean structures lecture notes.
- Valera-García, J. J., & Atutxa-Lekue, I. (2018). On the optimal design of hybrid-electric power systems for offshore vessels. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(1), 324-334.
- Vidal, M., & Domínguez, J. (2015). Did the Prestige oil spill compromise bird reproductive performance? Evidences from long-term data on the Kentish plover (*Charadrius alexandrinus*) in NW Iberian Peninsula. *Biological Conservation*, 191, 178-184.
- Vollaard, B. (2017). Temporal displacement of environmental crime: Evidence from marine oil pollution. *Journal of Environmental Economics and Management*, 82, 168-180.
- Walker, T. R. (2016). Green marine: an environmental program to establish sustainability in marine transportation. *Marine pollution bulletin*, 105(1), 199-207.
- Walker, T. R., & MacAskill, D. (2014). Monitoring water quality in Sydney Harbour using blue mussels during remediation of the Sydney Tar Ponds, Nova Scotia, Canada. *Environmental monitoring and assessment*, 186(3), 1623-1638.
- Walker, T. R., Adebambo, O., Feijoo, M. C. D. A., Elhaimer, E., Hossain, T., Edwards, S. J., ... & Zomorodi, S. (2019). Environmental effects of marine transportation. In *World seas: An environmental evaluation* (pp. 505-530). Academic Press.
- Wallington, T. J., & Wiesen, P. (2014). N₂O emissions from global transportation. *Atmospheric Environment*, 94, 258-263.
- Wells, P. G. (2017). The iconic Torrey Canyon oil spill of 1967-Marking its legacy.
- Winnes, H., & Fridell, E. (2009). Particle emissions from ships: dependence on fuel type. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(12), 1391-1398.
- Worldshipping.org. 2021. Air Emissions | World Shipping Council. [online] Available at: <<https://www.worldshipping.org/industry-issues/environment/air-emissions/>> [Accessed 22 June 2021].
- Zuin, S., Belac, E., & Marzi, B. (2009). Life cycle assessment of ship-generated waste management of Luka Koper. *Waste management*, 29(12), 3036-3046.
- Hill, D. M., Agarwal, A., & Gully, B. (2015). A review of engineering and safety considerations for hybrid-power (lithium-Ion) systems in offshore applications. *Oil and Gas facilities*, 4(03), 068-077.

- Grace Smoot. What is the carbon footprint of Biomass energy? A Life-Cycle assessment. Available at: <https://impactful.ninja/the-carbon-footprint-of-biomass-energy/#:~:text=Biomass%20energy%20has%20the%20fourth,on%20a%20life%2Dcycle%20basis> [Accessed 15 May 2022]
- A. Boersma, J. Pels, M. Cieplik, R. van der Linden (2008). Emissions of the use of biomass fuels in stationary applications. Available at: https://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/BOLK_I_biomass_Final.pdf [Accessed 15 May 2022]