Σχολή Ναυπηγών
Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση Δυνατοτήτων Εγκατάστασης Πίνακα Διασύνδεσης Με Ξηρά Σε Εμπορικά Πλοία Πλοία Χύδην

Ακρίβος Νικόλαος
Α.Μ.: 08118302
Email:akrivos.nikolaos@gmail.com

Επιβλέπων

Προυσαλίδης Ιωάννης

Αθήνα 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ιωάννη Προυσαλίδη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η εμπειρία και η επιστημονική του καθοδήγηση αποτέλεσαν σημαντικό στήριγμα στην ολοκλήρωση της έρευνας.

Ευχαριστώ θερμά τους συμφοιτητές μου Θωμά Βλάχο και Καντιώτη Ιωάννη για τη συμπαράσταση, τη συνεργασία και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν. Η συμβολή τους έκανε το ταξίδι αυτό πιο ευχάριστο και δημιουργικό.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στην οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη, κατανόηση και στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια. Η εμπιστοσύνη τους στις δυνατότητές μου και η συνεχής ενθάρρυνση αποτέλεσαν για μένα πολύτιμη πηγή δύναμης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με οποιονδήποτε τρόπο συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυνατότητα εγκατάστασης συστήματος ηλεκτρικής διασύνδεσης με ξηρά (Cold Ironing) σε εμπορικά πλοία τύπου Bulk Carrier. Αρχικά παρουσιάζονται οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις των πλοίων και η σημασία τους, ενώ στη συνέχεια αναλύεται η τεχνολογία Cold Ironing, τα περιβαλλοντικά, οικονομικά και επιχειρησιακά της οφέλη, καθώς και οι τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν. Εξετάζεται το κανονιστικό πλαίσιο (IEC/IEEE και Ευρωπαϊκές οδηγίες) και παρατίθενται διεθνή παραδείγματα εφαρμογών. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση των ενεργειακών απαιτήσεων bulk carriers κατά τον ελλιμενισμό, με βάση δείγμα 93 πλοίων και κατηγοριοποίηση ανά DWT. Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την εφικτότητα και την αναγκαιότητα εφαρμογής του Cold Ironing στα bulk carriers, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη υποδομών.

Λέξεις κλειδιά: Cold Ironing, Shore Power, Bulk Carriers, Power Demand, Green Shipping

Ηλεκτροδότηση Πλοίων από Ξηράς, Ενεργειακές Απαιτήσεις

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις πλοίων 6
1.1 Συχνότητα και τάση ηλεκτρικού ρεύματος 6
1.2 Ηλεκτρικός Ισολογισμός 7
1.3 Εκτεταμένος ηλεκτρικός ισολογισμός ενεργού και άεργου ισχύος 10
1.4 Γενική τοπολογία ηλεκτρικών δικτύων πλοίου 13
1.4.1 Διαστασιολόγηση καλωδίων, ασφαλειών και διακοπτών 14
1.4.2 Υπολογισμός έντασης προσδιορισμού καλωδίων, ασφαλειών και διακοπτών 16
1.4.3 Υπολογισμός πτώσης τάσης κατά μήκος του αγωγού 17
1.4.4 Προσδιορισμός κατάλληλης διατομής αγωγών 18
2 Ηλεκτρική Διασύνδεση ελλιμενιζόμενου πλοίου-Cold ironing 23
2.1 Ορισμός και βασική αρχή λειτουργίας 23
2.2 Οφέλη από την εφαρμογή του Cold Ironing 25
2.2.1 Περιβαλλοντολογικά Οφέλη 25
2.2.2 Οικονομικά Οφέλη 25
2.2.3 Επιχειρησιακά και κοινωνικά οφέλη 26
2.3 Τεχνικές προκλήσεις και περιορισμοί 27
2.4 Παραδείγματα Εφαρμογής Σε Διεθνή Λιμάνια 28
2.4.1 Λιμάνι του Λος Άντζελες 28
2.4.2 Λιμάνι του Γκέτεμποργκ 29
2.4.3 Λιμάνι της Αμβέρσας 30
3 Κανονιστικό Πλαίσιο , Πρότυπα & Στατιστικά 32
3.1 Κανονισμοί IEC για την Ηλεκτρική Σύνδεση Πλοίων με το Δίκτυο Ξηράς (Shore Power) 32
3.1.1IEC/IEEE 80005-1 32
3.1.2 IEC/IEEE 80005-3 34
3.2 Τυπική διαμόρφωση σύμφωνα με τη σύσταση της ΕΕ. 38
3.2.2 Διάταξη συστήματος HVSC 40
3.2.3 Διάταξη συστήματος LVSC 41
3.3 Διαθεσιμότητα Δεδομένων Τάσης στον Παγκόσμιο Στόλο 42
3.4 Κατανομή Συχνότητας και Τάσης στα Πλοία με Σύστημα Χαμηλής Τάσης 44
4 BULK CARRIERS-COLD IRONING 46
4.1 Χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες των Bulk Carriers 46
4.2 Ενεργειακές απαιτήσεις Bulk Carriers σε ελλιμενισμό 48
4.2.1 Ομαδοποίηση με βάση το DWT 49

4.3 Ανάλυση δεδομένων σε δείγμα 93 bulk carriers 50
4.3.1 Γραφικές παραστάσεις φορτίου (Minimum – Maximum – Average) 55
5 Συμπεράσματα & Προτάσεις 59
5.1 Βασικά ευρήματα της μελέτης 59
5.2 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις 59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 60

1.Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις πλοίων

1.1 Συχνότητα και τάση ηλεκτρικού ρεύματος

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις πλοίων, μέχρι και το 1940, χρησιμοποιούσαν συνεχές ρεύμα με τάση 110 V, 220 V και σε ορισμένες περιπτώσεις 24 V. Σήμερα, μόνο σε μεμονωμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα, καθώς οι εγκαταστάσεις είναι σχεδόν αποκλειστικά εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα πιο διαδεδομένα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή, κίνηση και φωτισμό, η συχνότητα και η τάση είναι συνήθως:

- 60 Hz / 440 V ή 50 Hz / 380 V
- 60 Hz / 110 V ή 50 Hz / 220 V

Όταν όμως το επίπεδο της ονομαστικής τάσης λειτουργίας ξεπερνά τα 1000 V – όριο πάνω από το οποίο η τάση χαρακτηρίζεται ως **υψηλή τάση** – σε πλοία με αυξημένο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό και ιδιαίτερα ενεργοβόρα συστήματα, συναντώνται οι εξής στάθμες:

- 3 kV, 3.3 kV, 4.17 kV, 6 kV, 6.6 kV, 11 kV, 15 kV στα 60 Hz

Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές, η πιο διαδεδομένη τάση για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containers), πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) κ.ά., είναι τα **6.6 kV**, ενώ για μεγάλα κρουαζιερόπλοια συναντάται η τιμή των **11 kV**.

Η χρήση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης οφείλεται σε διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς είναι ότι με υψηλότερη τάση μειώνεται το ρεύμα λειτουργίας, γεγονός που οδηγεί σε καλωδιώσεις και εξοπλισμό μικρότερων διαστάσεων και ελαφρύτερο. Επιπλέον, με την αύξηση της τάσης μειώνονται σημαντικά οι απώλειες στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για παράδειγμα, με μετάβαση από 440 V σε 6.6 kV, δηλαδή περίπου 15 φορές μεγαλύτερη τάση, οι αντίστοιχες απώλειες περιορίζονται κατά 225 φορές, κάτι που αποτυπώνεται και στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου

Τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από δύο ή τρεις αγωγούς, εκ των οποίων ο μεσαίος είναι μονωμένος. Αντίθετα, τα μονοφασικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος διαθέτουν δύο αγωγούς, ενώ τα τριφασικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από τρεις ή τέσσερις αγωγούς, με τον ουδέτερο γειωμένο.

Σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος, οι εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν μικρότερο βάρος και κόστος, ενώ παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευκολότερη συντήρηση. Από την άλλη πλευρά, το εναλλασσόμενο ρεύμα θεωρείται πιο επικίνδυνο από άποψη ηλεκτροπληξίας σε σχέση με το συνεχές ρεύμα

1.2 Ηλεκτρικός Ισολογισμός

Ο ηλεκτρικός ισολογισμός ενός πλοίου είναι ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται από το σύνολο των καταναλωτών του, στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του. Για παράδειγμα, οι καταστάσεις αυτές μπορεί να είναι η κανονική πορεία, οι χειρισμοί, η παραμονή στο λιμάνι και άλλες.

Αρχικά, μια εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου, βασισμένη σε διάφορες εμπειρικές σχέσεις, πραγματοποιείται κατά το πρώτο στάδιο σχεδιασμού του. Στη συνέχεια, και αφού έχουν καθοριστεί με ακρίβεια τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, πρέπει να γίνει λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, είτε για την επιλογή των καλωδιώσεων είτε για την επιλογή των ηλεκτρογεννητριών του πλοίου κ.λπ.

Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του ισολογισμού καταρτίζεται ένας πίνακας που περιλαμβάνει όλους τους καταναλωτές του πλοίου, χωρισμένους σε ομάδες. Οι ομάδες αυτές μπορεί να είναι, για παράδειγμα, βοηθητικά μηχανήματα πρόωσης, βοηθητικά μηχανήματα χώρων ενδιαίτησης, πίνακες φωτισμού κ.λπ. Επιπλέον, για τη δημιουργία του πίνακα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου, όπως η κανονική πορεία, οι χειρισμοί, η παραμονή εν όρμω κ.λπ.

Είναι απαραίτητο ο πίνακας να περιλαμβάνει μια στήλη με τον βαθμό απόδοσης (η) κάθε καταναλωτή, μια στήλη με το πλήθος των όμοιων φορτίων (N), καθώς και μια στήλη με την ονομαστική αποδιδόμενη ισχύ (Ρον. αποδ.). Από αυτά τα μεγέθη, και με τη βοήθεια των κατάλληλων εξισώσεων, μπορούν να υπολογιστούν η ηλεκτρική ισχύς που απορροφά κάθε καταναλωτής (Ρον. απορ.) και η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς (Ρεγκατ.), οι οποίες καταχωρούνται στις αντίστοιχες στήλες.

$$Ρον.απορ.= Ρον.αποδ./n$$

$$Ρεγκατ.= N * Ρον.απορ.$$

Όπου:

- $\boldsymbol{Ρον.απορ.}, \boldsymbol{Ρον.αποδο.Ρεγκατ.}$ σε μονάδες (KW)

Σε κάθε κατάσταση λειτουργίας απαιτούνται τρεις στήλες. Η πρώτη περιλαμβάνει τον αριθμό των καταναλωτών, $\boldsymbol{N'}$,που βρίσκονται σε λειτουργία. Η δεύτερη περιλαμβάνει τον συντελεστή λειτουργίας κάθε καταναλωτή, $\boldsymbol{f_s}$ και η τρίτη την ισχύ λειτουργίας $\boldsymbol{Ρλειτ.}$

Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής λειτουργίας ορίζεται ως το μέσο φορτίο 24ώρου προς το ονομαστικό φορτίο και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f_s = Σ_i(P_i \cdot t_i)/(24 \cdot P_{ον}.αποδ.)$$

Όπου

- $\boldsymbol{P_i}$ ισχύς λειτουργίας κατά τη χρονική περίοδο i του 24-ώρου
- $\boldsymbol{t_i}$ ώρες λειτουργίας με ισχύ Pi κατά την διάρκεια ενός 24-ώρου

Η μέση απορροφούμενη ισχύς κατά τη λειτουργία υπολογίζεται με διαφορετικό τρόπο για τα ηλεκτροκίνητα μηχανήματα και με διαφορετικό για τις ηλεκτρικές συσκευές, τον φωτισμό κ.ά. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ισχύος λειτουργίας, ανάλογα με τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

$$P_{\lambda\varepsilon\iota t} = N' \cdot f_s \cdot P_{ον.απορ.}$$

$P_{\lambda\varepsilon\iota\tau.} = f_s \cdot P_{\varepsilon\gamma\kappa\alpha\tau}.$

Όπου :

- $\boldsymbol{P\lambda\varepsilon\iota\tau}.$ σε μονάδες (Kw)

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας σύμφωνα με τον οποίο φαίνεται πως καταστρώνεται ο ηλεκτρικός ισολογισμός.

Πίνακας 1.2.1 :Λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός.

Καταναλωτής	η	N	**Εγκατεστημένη Ισχύς**				**Ισχύς Κανονικής Πορείας**			**Ισχύς Χειρισμών**			**Ισχύς 'Εν όρμω'**		
			$P_{ον.αποδ.}$		$P_{ον.απορ.}$	$P_{εγκατ.}$	N'	f_s	$P_{λειτ.}$	N'	f_s	$P_{λειτ.}$	N'	f_s	$P_{λειτ.}$
			[PS]	[kW]	[kW]	[kW]			[kW]			[kW]			[kW]
Βοηθητικά Μηχ. Πρόωσης															
Αντλία Λαδιού Λίπανσης Κ.Μ.															
⋮															
Βοηθητικά Χώρων Ενδιαίτ.															
Συμπιεστές Κλιματισμού															
⋮															
Βοηθητικά Σκάφους															
Πλευρικός Προωστήριος Μηχ.															
⋮															
Πίνακες Φωτισμού															
Μηχανοστάσιο															
⋮															
Σύνολο															

1.3 Εκτεταμένος ηλεκτρικός ισολογισμός ενεργού και άεργου ισχύος

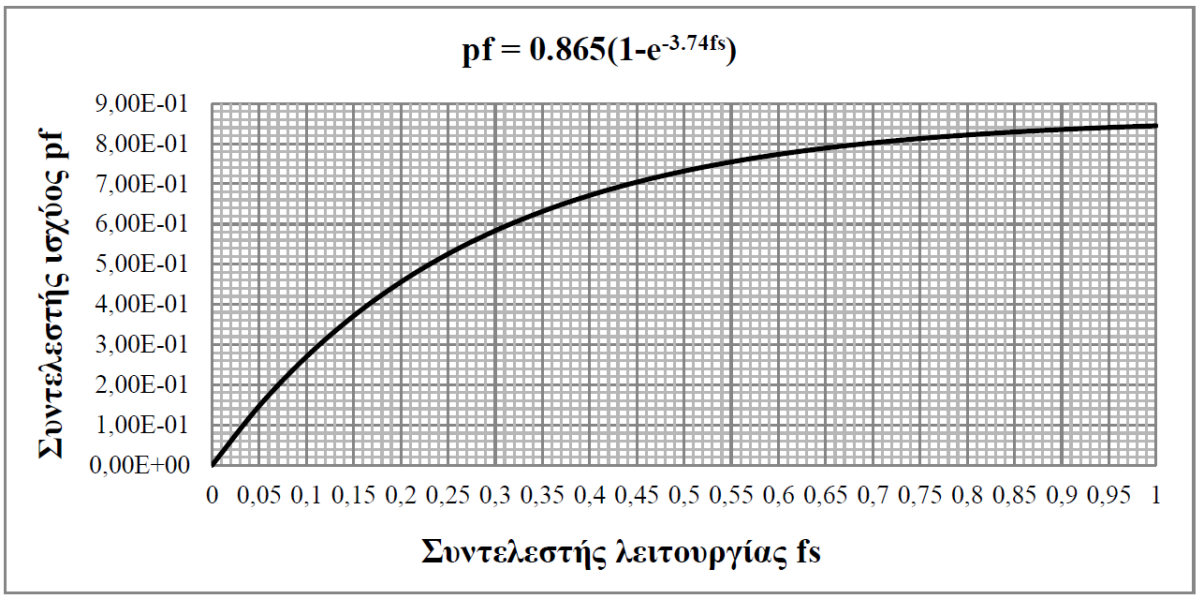
Μιας και τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο φαινόμενο εξηλεκτρισμού των ενεργειακών συστημάτων του πλοίου, θα πρέπει η μελέτη του ισολογισμού, που παρουσιάστηκε προηγουμένως, εκτός από τις ακριβείς εκτιμήσεις σε ενεργό ισχύ να συμπληρώνεται και από υπολογισμούς άεργου ισχύος. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορεί η συνολική απαίτηση σε φόρτιση των γεννητριών του πλοίου, να εκτιμηθεί.

Η άεργος ισχύς ενός ηλεκτρικού δικτύου αναφέρεται σε μια ποσότητα ενέργειας που κυκλοφορεί σε ένα κύκλωμα και η οποία μολονότι είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του κυκλώματος, δεν παράγει έργο.

Σημειώνεται επίσης ότι σε ένα ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας πλοίου, οι επαγωγικοί κινητήρες απαιτούν άεργο ισχύ ενώ από την άλλη οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν άεργο ισχύ και λειτουργούν ως πυκνωτές. Επομένως με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια ισορροπία.

Είναι σημαντικό να αποδειχθεί ότι «οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν αναλογικά μεγαλύτερες απαιτήσεις σε άεργο ισχύ όταν λειτουργούν σε μερική φόρτιση απ' ότι σε ονομαστικό φορτίο». Σύμφωνα με αυτή την παρατήρηση, πραγματοποιείται η προσπάθεια, η απαίτηση σε άεργο ισχύ των φορτίων κίνησης να ανταποδοθεί με τους αντίστοιχους περιορισμούς σε ολική αξιολογούμενη για την ενεργό ισχύ. Με τη βοήθεια του συντελεστή ισχύος, pf, ο οποίος συνδέεται με τον συντελεστή ισχύος, pf,με τον συντελεστή λειτουργίας, fs, παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\mathbf{P}f = \mathbf{0.865} \cdot \left(\mathbf{1} - e^{-\mathbf{3.74}\, f_s}\right)$$



Σχήμα 1.3.1 : Συντελεστής ισχύος ως συνάρτηση του συντελεστή λειτουργίας

Η άεργος ισχύ υπολογίζεται πλέον με την ακόλουθη σχέση.

$$Q = P \cdot \{[\sqrt{1-(pf)^2}]/pf\}$$

‘Οπου :

- Q σε μονάδες (kVAR)

Επομένως, η κατάστρωση του εκτεταμένου ισολογισμού ενεργού και άεργου ισχύος παρουσιάζεται στον πίνακα 1.3.1 , όπου οι ενεργειακές ανάγκες σε ενεργό και άεργο ισχύ για τις καταστάσεις λειτουργίας προκύπτουν από τα επιμέρους αθροίσματα των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών.

Η επιλογή των γεννητριών θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασίζεται περισσότερο στην ενεργό ισχύ, διαμέσου όμως του εκτεταμένου ισολογισμού πραγματοποιείται και η εκτίμηση του συντελεστή ισχύος στον οποίο θα λειτουργούν οι γεννήτριες, αν και κατά κανόνα η σχεδίαση τους είναι για συντελεστή ισχύος 0.8 επαγωγικό.

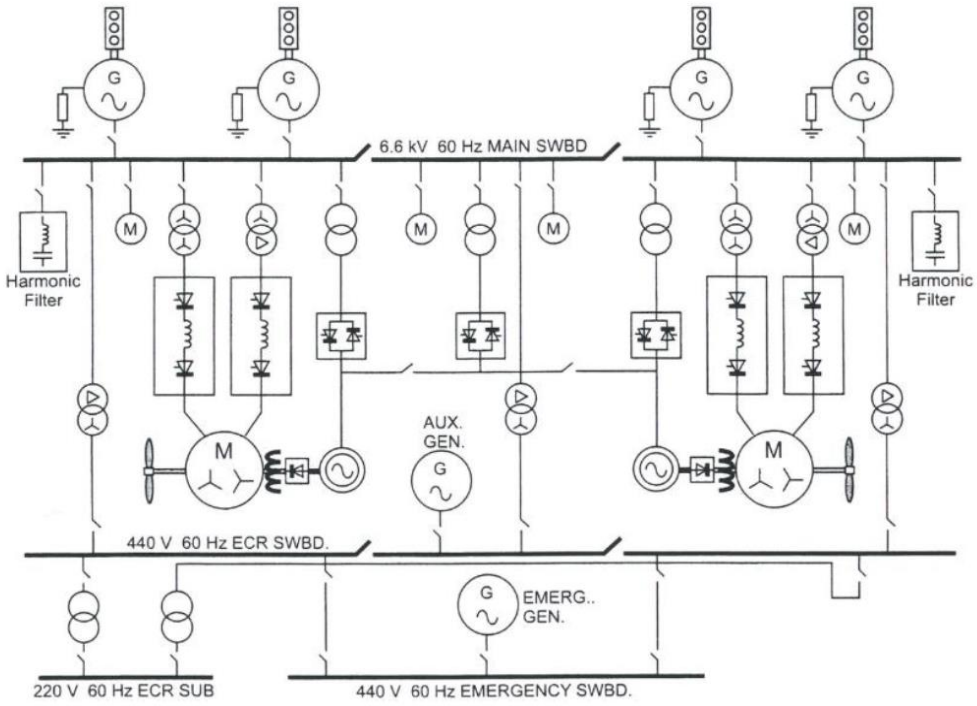
Πίνακας 1.3.1 Λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός ενεργούς και άεργους ισχύος .

Καταναλωτής	η	*pf*	*N*	**Εγκατεστημένη Ισχύς**				**Ισχύς Κανονικής Πορείας**					**Ισχύς Χειρισμών**					**Ισχύς 'Εν όρμω'**				
				$P_{ον.αποδ.}$		$P_{ον.απορ.}$	$P_{εγκατ.}$	*N'*	f_s	$P_{λειτ.}$	*pf*	$Q_{λειτ.}$	*N'*	f_s	$P_{λειτ.}$	*pf*	$Q_{λειτ.}$	*N'*	f_s	$P_{λειτ.}$	*pf*	$Q_{λειτ.}$
				[PS]	[kW]	[kW]	[kW]			[kW]		[kVAR]			[kW]		[kVAR]			[kW]		[kVAR]
Βοηθητικά Μηχ. Πρόωσης																						
Αντλία Λαδιού Λίπανσης Κ.Μ.																						
⋮																						
Βοηθητικά Χώρων Ενδιαίτ.																						
Συμπιεστές Κλιματισμού																						
⋮																						
Βοηθητικά Σκάφους																						
Πλευρικός Προωστήριος Μηχ.																						
⋮																						
Πίνακες Φωτισμού																						
Μηχανοστάσιο																						
⋮																						
Σύνολο																						

1.4 Γενική τοπολογία ηλεκτρικών δικτύων πλοίου

Στα περισσότερα πλοία το ηλεκτρικό δίκτυο είναι τριφασικό εναλλασσόμενου ρεύματος με ονομαστική τάση 440V ή 380V. Παράλληλα, ο φωτισμός του πλοίου καθώς και διάφορα μονοφασικά φορτία μικρής ισχύος λειτουργούν συνήθως σε τάση 220V, μέσω κατάλληλων μετασχηματιστών. Όλοι οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούνται από τον κεντρικό πίνακα του ηλεκτροστασίου, μέσω του κύριου δικτύου διανομής και των τοπικών πινάκων.

Επιπρόσθετα, υπάρχει και ξεχωριστό δίκτυο διανομής ανάγκης (emergency distribution system), το οποίο τροφοδοτείται είτε από τη γεννήτρια ασφαλείας (emergency generator) είτε από άλλη εφεδρική πηγή, όπως συσσωρευτές. Το δίκτυο αυτό παρέχει τη δυνατότητα να τροφοδοτούνται συγκεκριμένοι κρίσιμοι καταναλωτές, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία και την ασφάλεια του πλοίου, σε περίπτωση που το κύριο δίκτυο τεθεί εκτός λειτουργίας.



Σχήμα 1.4.1 Ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου (HV/LV

Σε μεγάλα επιβατηγά πλοία, οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας κατανέμονται σε δύο ή τρεις υποσταθμούς διανομής, οι οποίοι τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις μέσα στο πλοίο, ώστε να μην απαιτείται άμεση σύνδεση με τον κεντρικό πίνακα. Με τον τρόπο αυτό, οι ηλεκτρικές απώλειες μειώνονται, ενώ παράλληλα η εγκατάσταση καθίσταται πιο οικονομική.

1.4.1 Διαστασιολόγηση καλωδίων, ασφαλειών και διακοπτών

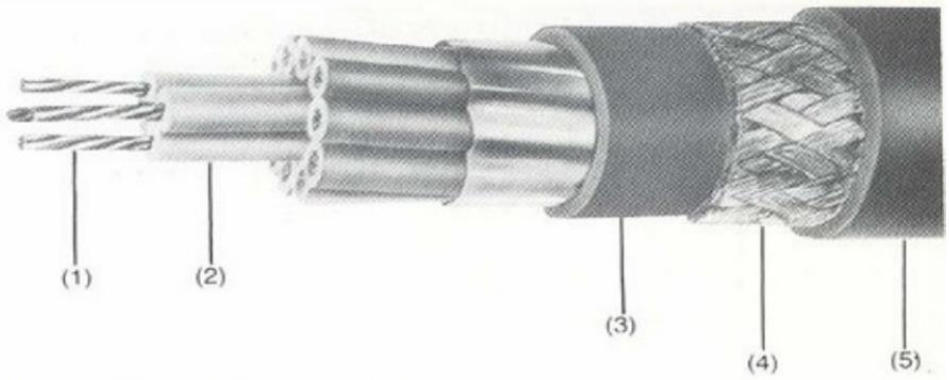
Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρικό δίκτυο ενός πλοίου πρέπει να είναι εγκεκριμένου «ναυτικού τύπου» και πιστοποιημένα από νηογνώμονα, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας τους διαφέρουν από εκείνες ενός κλασικού δικτύου διανομής στη στεριά, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία, η υγρασία κ.ά.

Επιπλέον, τα καλώδια αυτά οφείλουν να είναι άφλεκτα και στεγανά, δηλαδή σε περίπτωση πυρκαγιάς να μην καταστρέφονται και να μην αναφλέγονται, ώστε να αποτρέπεται η μετάδοση της φωτιάς. Γι' αυτό τα καλώδια διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους: σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα.

Τα εύκαμπτα καλώδια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή σε επαναλαμβανόμενες καμπές, όπως για παράδειγμα σε φορητές ηλεκτρικές συσκευές. Αντίθετα, τα δύσκαμπτα καλώδια χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις όπου δεν χρειάζεται συχνή κάμψη, όπως σε κυκλώματα ηλεκτρικής διανομής, και χαρακτηρίζονται από υψηλή ανθεκτικότητα στη θερμότητα και στη φλόγα. Τέλος, η πλειονότητα των καλωδίων που χρησιμοποιούνται στα πλοία διαθέτει εξωτερική θωράκιση.

Τα βασικά λοιπόν μέρη που αποτελούν ένα καλώδιο είναι:

- Ηλεκτρικοί αγωγοί
- Μονωτικά υλικά
- Παρεμβάσματα
- Προστατευτική επένδυση



(1) Ηλεκτρικός αγωγός Cu
(2) Ηλεκτρική μόνωση μεταξύ αγωγών -FPR καουτσούκ
(3) Εσωτερική επένδυση
(4) Θωράκιση καλωδίου Cu
(5) Εξωτερική επένδυση Polychloroprene καουτσούκ

Σχήμα 1.4.1.1: Τυπική δομή καλωδίων ναυτικού τύπου

Οι ηλεκτρικοί αγωγοί κατατάσσονται ανάλογα με τον αριθμό τους σε μονοπολικά (ένας αγωγός), τριπολικά (τρεις αγωγοί), τετραπολικά (τέσσερις αγωγοί) κ.ο.κ., και κατασκευάζονται από χαλκό υψηλής καθαρότητας. Τα υλικά μόνωσης είναι συνήθως αιθυλοπροπυλένιο ή χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), ενώ στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν υλικά όπως το λάστιχο ή το χαρτί, τα οποία όμως πλέον έχουν σχεδόν εγκαταλειφθεί.

Για την πλήρωση των κενών που μπορεί να προκύψουν ανάμεσα στους μονωμένους αγωγούς τοποθετούνται παρεμβάσματα, τα οποία συμβάλλουν στη διατήρηση της κυλινδρικής μορφής του καλωδίου. Η προστατευτική επένδυση αποτελείται συνήθως από μεταλλικό πλέγμα χάλυβα, ορείχαλκου ή αλουμινίου και προσφέρει αντοχή απέναντι σε μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και προστασία από την υγρασία.

Στην υποενότητα 1.4.4 παρουσιάζονται τυποποιημένα μεγέθη καλωδίων καθώς επίσης και η αντοχής τους σε ηλεκτρική ένταση σε μονάδες (A). Στον παρακάτω πίνακα όμως παρουσιάζονται τυποποιημένα μεγέθη ασφαλειών και διακοπτών όπου οι αριθμοί δίνουν τη μέγιστη ένταση σε μονάδες (A) για συνεχή λειτουργία.

6	10	16	20	25	35	50
63	80	100	125	160	200	250
400	630	1000	1250	1600	2000	3150

Σχήμα 1.4.1.2 : Μεγέθη ασφαλειών και διακοπτών σε μονάδες (A)

1.4.2 Υπολογισμός έντασης προσδιορισμού καλωδίων, ασφαλειών και διακοπτών

Για την κατάσταση πλήρους φορτίου, *P*, υπολογίζεται η ένταση γραμμής, *Iγ* σε μονάδες (A), με την βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων.

- Συνεχές ρεύμα:

$$\mathrm{I\gamma} = \mathrm{P} / \mathrm{V}$$

- Μονοφασικός καταναλωτής εναλλασσόμενου ρεύματος:

$$I_\gamma = P/(V \cdot cos\varphi)$$

- Τριφασικός καταναλωτής:

$$\mathrm{I\gamma} = \mathrm{P} / (\sqrt{3} \cdot \mathrm{V} \cdot \mathrm{cos\varphi})$$

Όπου:

- ***P*** = ***Pον.απορ.***
  Ονομαστική απορροφούμενη ισχύς σε μονάδες (W)
- ***V***
  Ονομαστική τάση του καταναλωτή σε μονάδες (V)
- ***cosφ***
  Ονομαστικός συντελεστής ισχύος
  *Για καθαρά ωμικό φορτίο ισχύει ότι cosφ = 1

Αφού υπολογιστεί η ένταση γραμμής θα πρέπει στη συνέχεια να υπολογιστεί η ένταση, *I* σε μονάδες (A), ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός των καλωδίων, των ασφαλειών και των διακοπτών.

Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εξισώσεις.

- Δίκτυο φωτισμού:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I_\gamma}$$

- Γραμμή που τροφοδοτεί μόνο έναν ηλεκτροκινητήρα συνεχούς λειτουργίας:

$$\mathbf{I} = \mathbf{1.25} \cdot \mathbf{I_\gamma}$$

- Δίκτυο που τροφοδοτεί περισσότερους από έναν ηλεκτροκινητήρα συνεχούς λειτουργίας:

$$I = 1.25 \cdot I_{\gamma 1} + \Sigma_{i \neq 1} I_{\gamma i} + 0.5 \cdot \Sigma_j I_{sj}$$

Όπου:

- $\mathbf{I_{\gamma 1}}$: Ονομαστική ένταση γραμμής του μεγαλύτερου κινητήρα του συγκροτήματος.
- $\mathbf{I_{\gamma i}}$**,** $\boldsymbol{i \neq 1}$**:** Ονομαστική ένταση γραμμής για τον καθένα από τους υπόλοιπους κινητήρες.
- $\mathbf{I_{sj}}$: Ονομαστική ένταση του εφεδρικού διακόπτη j, όταν προβλέπονται εφεδρικοί διακόπτες στον πίνακα.

Τέλος «για δίκτυα που τροφοδοτούν ηλεκτροκινητήρες διακεκομμένης λειτουργίας, όπως για παράδειγμα φορτωτήρες, εργάτης άγκυρας κ.λπ, καθώς και για άλλες ειδικές περιπτώσεις θα πρέπει να δει κανείς τους κανονισμούς των νηογνωμόνων».

1.4.3 Υπολογισμός πτώσης τάσης κατά μήκος του αγωγού

Η μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης κατά μήκος του αγωγού δίνεται σαν ποσοστό της ονομαστικής τάσης λειτουργίας και ισχύουν τα εξής:

- **6%**
  Σε εγκαταστάσεις πλοίων (κατά LRS)
- **1%**
  Σε εγκαταστάσεις στεριάς για δίκτυα φωτισμού
- **3%**
  Σε εγκαταστάσεις στεριάς για δίκτυα κινήσεως

Για να υπολογιστεί λοιπόν η πτώση τάσης, σε μονάδες (V), κατά μήκος μιας γραμμής θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις.

- Δίκτυο συνεχούς ρεύματος (DC) δύο αγωγών:

$$\mathbf{\Delta V = (2 \cdot l \cdot \rho \cdot I) / S}$$

- Δίκτυο μονοφασικό εναλλασσόμενου ρεύματος (AC):

$$\mathbf{\Delta V = (2 \cdot l \cdot \rho \cdot I) / S}$$

- Δίκτυο τριφασικό τριών ενεργών αγωγών εναλλασσόμενου ρεύματος (AC):

$$\mathbf{\Delta V} = (\sqrt{\mathbf{3}} \cdot \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{I}) / \mathbf{S}$$

Όπου:

- **l**
  Μήκος της γραμμής τροφοδοσίας σε μονάδες (m)
- **ρ**
  Ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού σε μονάδες (Ωmm²/m)
  - Χαλκός: ρ = 0.0176 Ωmm²/m
  - Αλουμίνιο: ρ = 0.0294 Ωmm²/m
- **I**
  Ένταση ρεύματος σε μονάδες (A), σύμφωνα με την υποενότητα 1.4.2
- **S**
  Διατομή του αγωγού σε μονάδες (mm²)

«Οι κανονισμοί LRS απαιτούν αποκλειστική χρήση χάλκινων αγωγών στις εγκαταστάσεις πλοίων». (Φραγκόπουλος – Προυσαλίδης, 2019)

1.4.4 Προσδιορισμός κατάλληλης διατομής αγωγών

Για τον καθορισμό της διατομής των αγωγών ισχύει ότι, σύμφωνα με τους κανονισμούς του GL και γνωρίζοντας την ένταση υπολογισμού *I*, επιλέγεται η αντίστοιχη τυποποιημένη διατομή αγωγού από τον πίνακα 1.4. Στον πίνακα αυτόν παρατίθενται οι δυνατότητες μεταφοράς ρεύματος των καλωδίων σε θερμοκρασίες 80°C και 85°C, τόσο για συνεχή λειτουργία όσο και για διάρκεια λειτουργίας 30 ή 60 λεπτών.

Ονομαστική Διατομή	Θερμοκρασία Λειτουργίας 80°C			Θερμοκρασία Λειτουργίας 85°C		
	Συνεχή Λειτουργία	Λειτουργία 30 λεπτών	Λειτουργία 60 λεπτών	Συνεχή Λειτουργία	Λειτουργία 30 λεπτών	Λειτουργία 60 λεπτών
[mm^2]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
Μονοπολικά Καλώδια						
1.0	15	16	16	16	17	17
1.5	19	20	20	20	21	21
2.5	26	28	28	28	30	30
4.0	35	37	37	38	40	40
6.0	45	48	43	48	51	51
10	63	67	67	67	71	71
16	84	89	89	90	95	95
25	110	118	117	120	128	127
35	140	151	148	145	157	154
50	165	180	175	180	196	191
70	215	239	228	225	250	239
95	260	294	278	275	311	294
120	300	348	321	320	371	342
150	340	401	367	365	431	394
185	390	476	425	415	506	452
240	460	580	511	490	617	544
300	530	694	599	560	734	633
Διπολικά Καλώδια						
1.0	13	13	13	14	14	14
1.5	16	17	17	17	18	18
2.5	22	24	23	24	26	25
4.0	30	32	32	32	35	34
6.0	38	41	40	41	45	43
10	53	59	56	57	63	60
16	71	80	76	76	86	81
25	93	111	100	102	121	110
Τριπολικά ή Τετραπολικά Καλώδια						
1.0	10	11	11	11	12	12
1.5	13	14	14	14	15	15
2.5	18	19	19	20	22	21
4.0	24	26	25	27	29	29
6.0	31	34	33	34	37	36
10	44	49	47	47	53	50
16	59	67	63	63	72	67
25	77	92	84	84	101	92
35	98	122	108	101	125	111
50	115	150	129	126	164	141
70	150	206	173	157	215	181
95	182	262	217	192	276	228
120	210	315	256	224	336	273
Πολυκλωνικά Καλώδια						
5 x 1.5	11			12		
7 x 1.5	11			10		
10 x 1.5	9			9		
12 x 1.5	8			9		
14 x 1.5	8			8		
16 x 1.5	7			8		
19 x 1.5	7			7		
24 x 1.5	7			7		

Πίνακας:1.4.4.1: Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος φόρτισης καλωδίων για διάφορες διατομές καλωδίων

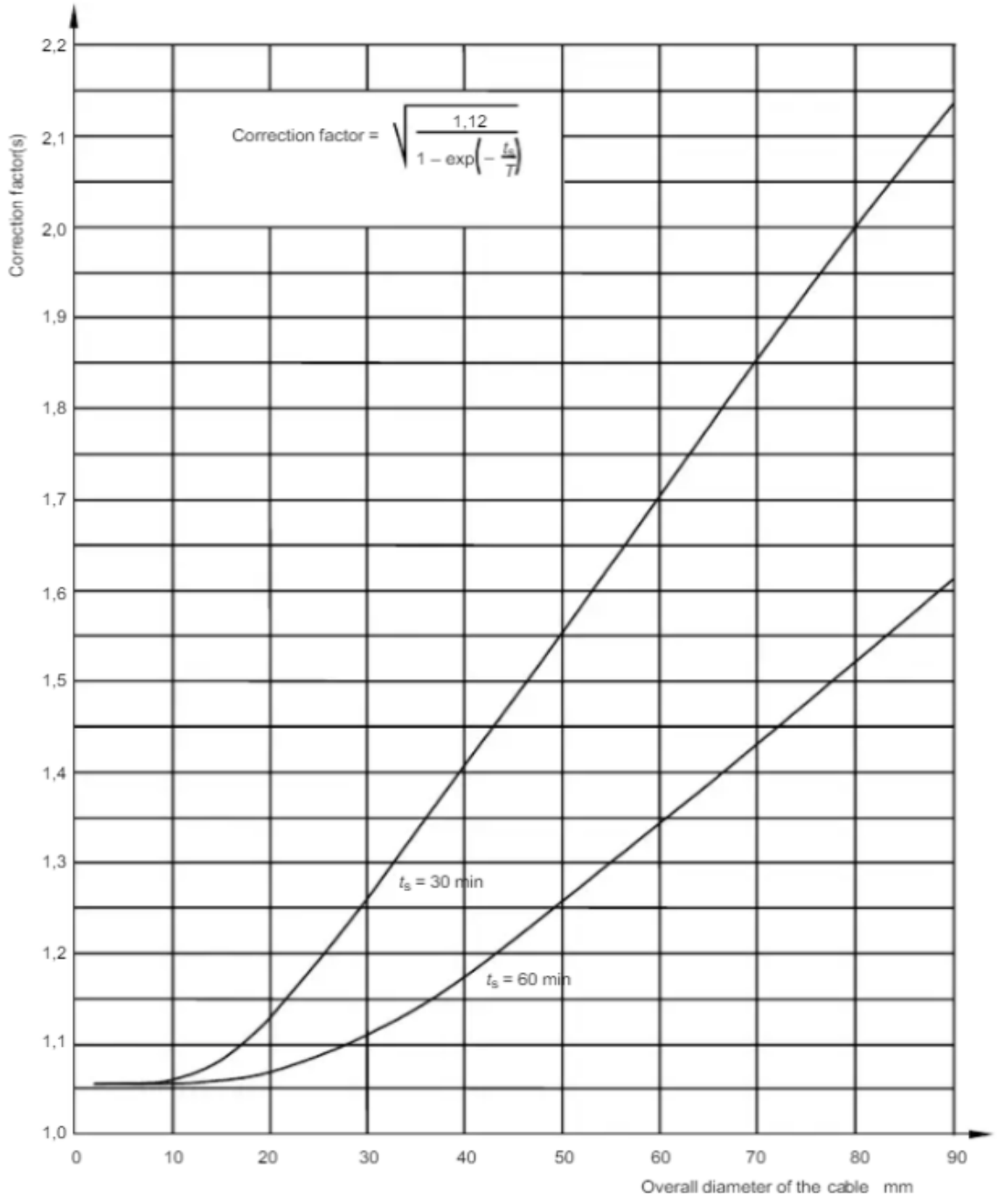
Επιπλέον, είναι δυνατόν να επιλεγεί τυποποιημένη διατομή καλωδίου από τον ακόλουθο πίνακα, εφόσον είναι γνωστή η ένταση υπολογισμού ***I***. Παράλληλα, μπορεί να προσδιοριστεί και η αντίστοιχη ασφάλεια θερμικής προστασίας. Στον πίνακα 1.4.4.2 παρουσιάζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος φόρτισης των καλωδίων καθώς και των αντίστοιχων ασφαλειών, σε θερμοκρασία 85°C για συνεχή λειτουργία.

Ονομαστική Διατομή	**Μέγιστη Επιτρεπόμενη Ένταση Ρεύματος Συνεχούς Λειτουργίας σε Θερμοκρασία 85°C**	**Ονομαστική Ένταση Ρεύματος Συνεργαζόμενης Ασφάλειας**
[mm^2]	[A]	[A]
Μονοπολικά Καλώδια		
1.5	20	20
2.5	28	25
4.0	38	35
6.0	48	50
10	67	63
16	90	80
25	120	100
35	145	125
50	180	160
70	225	224
95	275	250
120	320	315
150	363	-
185	415	-
240	490	-
300	560	-
Τριπολικά ή Τετραπολικά Καλώδια		
1.5	14	16
2.5	20	20
4.0	27	25
6.0	34	35
10	47	50
16	63	63
25	84	80
35	101	100
50	126	125
70	157	160
95	192	200
120	224	224

Πίνακας 1.4.4.2: Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος φόρτισης καλωδίων και συνεργαζόμενων ασφαλειών για διάφορες διατομές καλωδίων

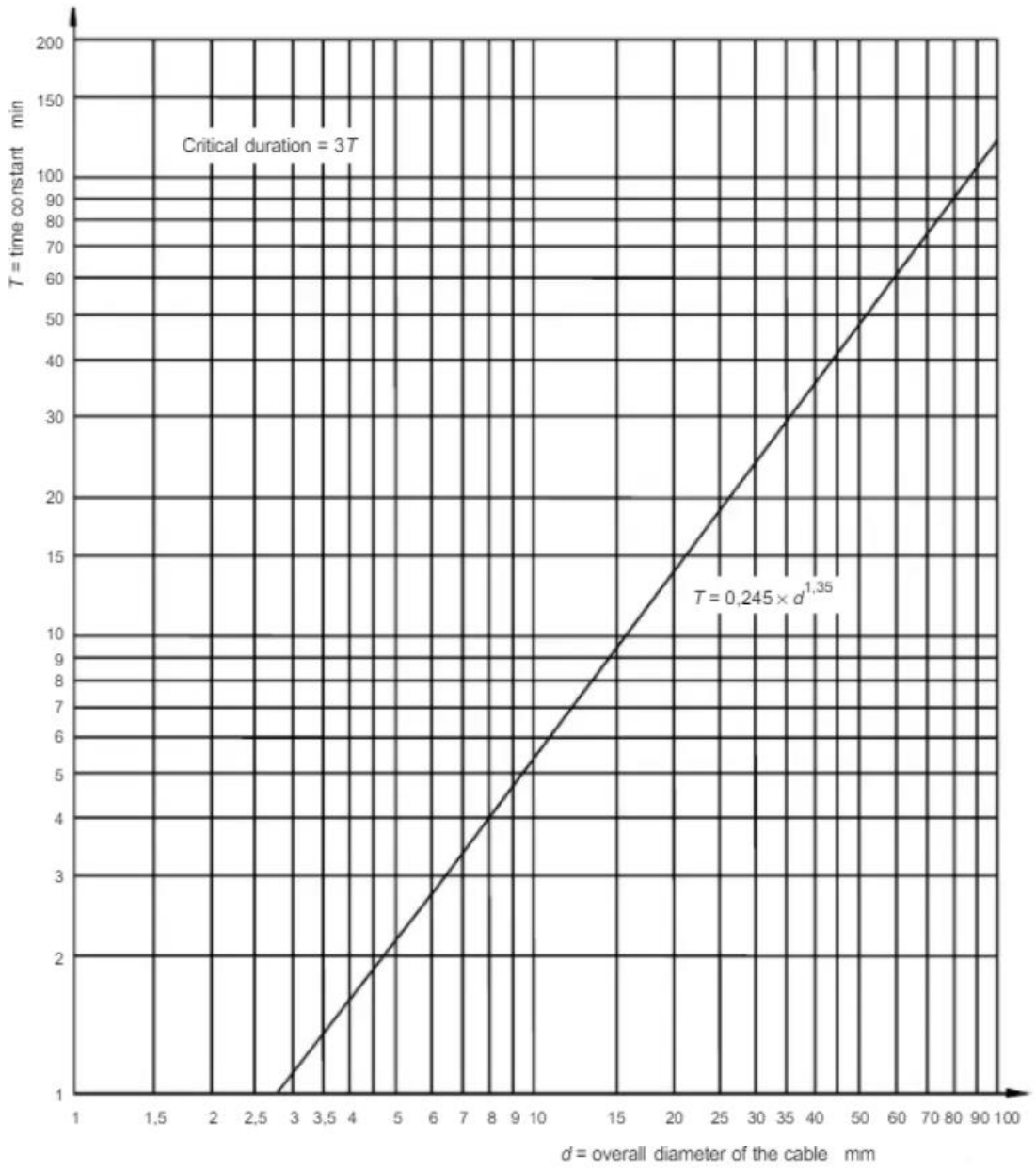
Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη πτώση τάσης από τον κύριο πίνακα έως τον καταναλωτή και, σε περίπτωση που υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τιμή, επιλέγεται η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τυποποιημένη διατομή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Πιο συγκεκριμένα ισχύει ότι, εάν ένα καλώδιο το οποίο προορίζεται για την τροφοδοσία εξοπλισμού που θα λειτουργεί μόνο για διάστημα 30 λεπτών ή 60 λεπτών, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος που έχει προσδιοριστεί για συνεχή λειτουργία θα πρέπει να αυξηθεί σύμφωνα με τους συντελεστές διόρθωσης που φαίνονται στο σχήμα 1.4.4.1.



Σχήμα 1.4.4.1 Συντελεστής διόρθωσης για μισή ώρα και μία ώρα λειτουργίας

«Επιπλέον για τον υπολογισμό του χρόνου T, της εξίσωσης χρησιμοποιείται το διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω.»



Σχήμα 1.4.4.2 : Σταθερά χρόνου καλωδίων

2 Ηλεκτρική Διασύνδεση ελλιμενιζόμενου πλοίου-Cold ironing

2.1 Ορισμός και βασική αρχή λειτουργίας

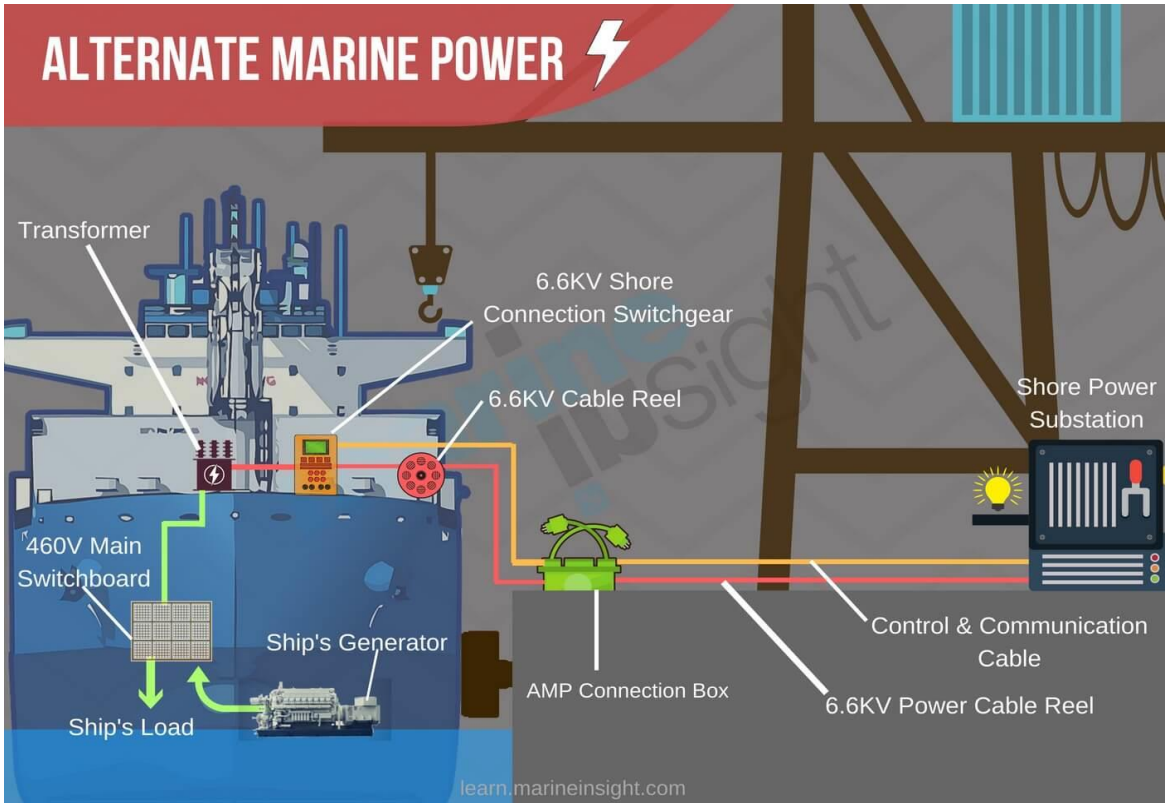
Ο όρος **Cold Ironing** αναφέρεται στη διαδικασία παροχής ηλεκτρικής ισχύος από την ξηρά σε ένα πλοίο, με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών κατά τη διάρκεια της παραμονής του στο λιμάνι. Μέσω αυτής της πρακτικής, τα πλοία έχουν τη δυνατότητα να απενεργοποιούν τους κύριους κινητήρες τους ενώ είναι αγκυροβολημένα και να συνδέονται σε μία εξωτερική, σταθερή πηγή ενέργειας. Η ισχύς που παρέχεται από την ξηρά μεταφέρεται απευθείας στα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου, διασφαλίζοντας αδιάλειπτη λειτουργία των απαραίτητων υπηρεσιών χωρίς διακοπή, μέσω μίας χερσαίας σύνδεσης.
Με τον τρόπο αυτό, ο εξοπλισμός ανάγκης – όπως φωτισμός, θέρμανση, ψύξη και λοιπά ηλεκτρικά συστήματα – συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά κατά τη διάρκεια της παραμονής στο λιμάνι, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να πραγματοποιείται φόρτωση ή εκφόρτωση φορτίου.

Ο όρος **Cold Ironing** καθιερώθηκε αρχικά την εποχή που τα πλοία ήταν εξοπλισμένα με μηχανές καύσης άνθρακα. Όταν τα πλοία αγκυροβολούσαν στο λιμάνι και διέκοπταν την τροφοδοσία των μηχανών τους με κάρβουνο, οι μηχανές πρόωσης σταματούσαν πλήρως και παρέμεναν ψυχρές. Από αυτό το φαινόμενο προέκυψε και η ονομασία της μεθόδου, **Cold Ironing – Κρύο Σίδερο**.

Στις μέρες μας, όταν τα πλοία παραμένουν σταθμευμένα στο λιμάνι, συνεχίζουν να λειτουργούν με τη βοήθεια των βοηθητικών κινητήρων, προκειμένου να καλύψουν κρίσιμες ανάγκες, όπως φωτισμός, ψύξη, επικοινωνίες κ.ά. Ωστόσο, η χρήση αυτών των κινητήρων οδηγεί στην εκπομπή ρύπων, όπως SOx, NOx και CO_2, καθώς και στη δημιουργία σωματιδίων, θορύβου και κραδασμών. Για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτών, η τεχνολογία **Cold Ironing** αποτελεί σημαντικό εργαλείο, καθώς προσφέρει έναν αποτελεσματικό τρόπο μείωσης της ρύπανσης. Συγκεκριμένα, αντί να χρησιμοποιούνται γεννήτριες diesel, προτείνεται η αξιοποίηση του χερσαίου ηλεκτρικού δικτύου ως πηγή ενέργειας κατά τον ελλιμενισμό των πλοίων.

Γενικά η συμμετοχή του πλοίου στην ατμοσφαιρική ρύπανση δεν περιορίζεται μόνο στα πονοπόρα πλοία αλλά και σε αυτά που αγκυροβολούν. Ειδικά, ένα πλοίο το οποίο είναι αγκυροβολημένο στο λιμάνι απαιτεί ένα ορισμένο επίπεδο ενέργειας που συνήθως παρέχεται από μία ή περισσότερες γεννήτριες diesel, ανάλογα με την ζήτηση ενέργειας και με την τεχνολογία του πλοίου. Έτσι σε κάθε λιμάνι του κόσμου καταναλώνονται αρκετοί τόνοι καυσίμων την ημέρα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κακή ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος.

Προκειμένου λοιπόν να μειωθεί η ρύπανση των λιμένων, η Διεθνή Σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL) έβαλε όρια στη περιεκτικότητα του θείου στα καύσιμα. Επιπλέον η οδηγία 2005/33/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης περιόρισε την περιεκτικότητα του θείου στα καύσιμα σε 0.1% για τα σκάφη εσωτερικής ναυσιπλοΐας και για αυτά που βρίσκονται αγκυροβολημένα σε λιμάνι. Παρά τους κανονισμούς αυτούς, μια από τις καλύτερες λύσεις για τη μείωση της ρύπανσης των λιμένων είναι το Cold Ironing.



Σχήμα 2.1 Παρουσίαση εγκατάστασης για την τροφοδότηση των ενεργειακών αναγκών πλοίου από την ξηρά – Cold Ironing

Παρά τα αδιαμφισβήτητα περιβαλλοντικά οφέλη της, η τεχνολογία **Cold Ironing** αποτελεί ένα πολυσύνθετο τεχνικό σύστημα, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1 , το οποίο προϋποθέτει την ύπαρξη ποικίλων υποδομών. Αρχικά, απαιτείται η ανάπτυξη της κατάλληλης ηλεκτρικής υποδομής στους λιμένες, με την εγκατάσταση εξειδικευμένων μηχανικών και τεχνολογικών συστημάτων, τα οποία να μπορούν να προσαρμοστούν στις διαφορετικές προδιαγραφές κάθε λιμένα. Επιπλέον, τα πλοία θα πρέπει να διαθέτουν τις απαραίτητες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις – είτε μέσω τροποποιήσεων είτε μέσω νέων κατασκευών – ώστε να καθίσταται δυνατή η σύνδεσή τους με το σύστημα Cold Ironing.

Αναγκαία είναι, επίσης, η ύπαρξη κατάλληλων μηχανισμών σύνδεσης και ελέγχου, προκειμένου να διασφαλίζεται η ασφάλεια του πληρώματος αλλά και η αδιάλειπτη μεταφορά ενέργειας από την ξηρά στο πλοίο. Ιδιαίτερη σημασία έχει και ο εξοπλισμός του ίδιου του πλοίου, ο οποίος θα πρέπει να είναι πλήρης και να περιλαμβάνει τα απαραίτητα συστήματα για τη σύνδεσή του με το σημείο παροχής ισχύος στο λιμάνι. Τέλος, για την πλήρη αξιοποίηση του συστήματος, είναι απαραίτητος εξοπλισμός που να υποστηρίζει την αυτόματη μεταφορά ενέργειας προς και από το πλοίο, διασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή ροή ισχύος από τον σταθμό παραγωγής του λιμένα προς το πλοίο και αντίστροφα.

2.2 Οφέλη από την εφαρμογή του Cold Ironing

2.2.1 Περιβαλλοντολογικά Οφέλη

Η τεχνολογία **Cold Ironing** προσφέρει κυρίως περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς η ορθή εφαρμογή της μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα μέσω της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Σύμφωνα με μετρήσεις, η αξιοποίηση του Cold Ironing μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO_2 έως και κατά 30%, ενώ οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) και των αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να περιοριστούν ακόμη και σε ποσοστά άνω του 95%.Γενικότερα η εφαρμογή του Cold Ironing συμβάλλει έτσι στην επίτευξη των στόχων της Ε.Ε. για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και προάγει την «πράσινη» μετάβαση στον ναυτιλιακό τομέα.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που ένα κρουαζιερόπλοιο παραμείνει αγκυροβολημένο στο λιμάνι για 10 ώρες, οι εκπομπές του μπορούν να μειωθούν από 72,2 σε 50,1 τόνους CO_2, από 1,45 σε 0,04 τόνους οξειδίων του αζώτου και από 1,23 σε 0,04 τόνους οξειδίων του θείου.

2.2.2 Οικονομικά Οφέλη

Η εφαρμογή του Cold Ironing, πέρα από τα προφανή περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, συνεπάγεται και σημαντικά **οικονομικά οφέλη** τόσο για τους πλοιοκτήτες όσο και για τις λιμενικές αρχές. Αν και η αρχική επένδυση σε εξοπλισμό και υποδομές μπορεί να είναι υψηλή – καθώς απαιτείται εγκατάσταση συστημάτων παροχής ισχύος στα λιμάνια, καθώς και τροποποιήσεις ή αναβαθμίσεις στα πλοία – το λειτουργικό κόστος μακροπρόθεσμα μπορεί να μειωθεί αισθητά.

Η μείωση της κατανάλωσης ναυτιλιακών καυσίμων κατά τη διάρκεια παραμονής των πλοίων στα λιμάνια είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες οικονομικής εξοικονόμησης. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το χερσαίο δίκτυο, η οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι φθηνότερη από τα καύσιμα τύπου marine diesel ή heavy fuel oil, περιορίζει τα καθημερινά λειτουργικά έξοδα των πλοίων. Επιπλέον, η μικρότερη φθορά των μηχανών λόγω της μειωμένης χρήσης τους στο λιμάνι, επιμηκύνει τον κύκλο ζωής του εξοπλισμού και μειώνει τις ανάγκες για συντήρηση και ανταλλακτικά.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τα πλοία που εφαρμόζουν τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, όπως το Cold Ironing, τείνουν να είναι **περισσότερο ελκυστικά για λιμένες που εφαρμόζουν περιβαλλοντικά κριτήρια πλοήγησης (green port policies)**. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να μεταφράζεται και σε οικονομικά κίνητρα, όπως **μειωμένα λιμενικά τέλη**, προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση, ή πρόσβαση σε επιδοτούμενες λιμενικές υπηρεσίες.

Τέλος, η συμμόρφωση με τις ισχύουσες και μελλοντικές περιβαλλοντικές ρυθμίσεις (π.χ. MARPOL Annex VI, Ευρωπαϊκή Οδηγία 2005/33/ΕΚ) επιτρέπει στους πλοιοκτήτες να

αποφεύγουν πρόστιμα ή περιορισμούς που επιβάλλονται σε πλοία με υψηλές εκπομπές ρύπων, κάτι που σε βάθος χρόνου μπορεί να αποφέρει ουσιαστική οικονομική ωφέλεια.

2.2.3 Επιχειρησιακά και κοινωνικά οφέλη

Η υιοθέτηση του Cold Ironing δεν περιορίζεται μόνο σε περιβαλλοντικές και οικονομικές διαστάσεις, αλλά επεκτείνεται και στον επιχειρησιακό και κοινωνικό τομέα, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη τόσο για τη λειτουργία των πλοίων όσο και για τις τοπικές κοινωνίες. Σε επιχειρησιακό επίπεδο, η δυνατότητα παροχής σταθερής και αξιόπιστης ηλεκτρικής ισχύος από τη στεριά διασφαλίζει την **αδιάλειπτη λειτουργία των βασικών συστημάτων του πλοίου**, χωρίς την ανάγκη ενεργοποίησης των βοηθητικών μηχανών. Αυτό συνεπάγεται χαμηλότερη μηχανική καταπόνηση, μείωση των τεχνικών φθορών και μεγαλύτερη αξιοπιστία κατά την παραμονή στο λιμάνι. Επιπλέον, περιορίζονται οι απαιτήσεις για τεχνική υποστήριξη εν πλω, γεγονός που ενισχύει την επιχειρησιακή αποδοτικότητα.

Από κοινωνικής πλευράς, η εφαρμογή του Cold Ironing συμβάλλει σημαντικά στη **βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων** περιοχών που βρίσκονται κοντά σε λιμάνια με έντονη ναυτιλιακή δραστηριότητα. Ο περιορισμός της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σε συνδυασμό με τη σημαντική μείωση του θορύβου και των κραδασμών που προκαλούνται από τις γεννήτριες των πλοίων, οδηγεί σε πιο υγιές και ήσυχο αστικό περιβάλλον. Οι βελτιωμένες συνθήκες συμβάλλουν επίσης στην ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής της λιμενικής δραστηριότητας, η οποία πολλές φορές τίθεται υπό αμφισβήτηση εξαιτίας των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων.

Τέλος, τα πλοία που κάνουν χρήση shore power ενισχύουν τη γενικότερη εικόνα υπευθυνότητας και κοινωνικής ευαισθησίας των ναυτιλιακών εταιρειών, κάτι που αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα στο σύγχρονο επιχειρηματικό περιβάλλον, όπου η βιωσιμότητα και η περιβαλλοντική συμμόρφωση αποτελούν κρίσιμα κριτήρια αξιολόγησης.

2.3 Τεχνικές προκλήσεις και περιορισμοί

Παρά τα σημαντικά οφέλη που προσφέρει η τεχνολογία Cold Ironing, η ευρεία εφαρμογή της συνοδεύεται από ένα σύνολο τεχνικών προκλήσεων και περιορισμών. Πρώτιστο ζήτημα αποτελεί η απουσία πλήρους εναρμόνισης ως προς τα διεθνή πρότυπα σύνδεσης και λειτουργίας. Αν και έχει θεσπιστεί το πρότυπο IEC/ISO/IEEE 80005-1 για τη σύνδεση πλοίων με χερσαία παροχή ισχύος, λιμένες και πλοιοκτήτες εξακολουθούν να υιοθετούν διαφορετικά επίπεδα τάσης ,συχνότητας και συστημάτων σύνδεσης, κάτι που δυσχεραίνει τη διαλειτουργικότητα. Σύμφωνα με μελέτη της DNV (2020), μόνο το 23% των μεγάλων εμπορικών λιμένων διαθέτουν πλήρως συμβατές υποδομές. Περαιτέρω, το κόστος εγκατάστασης για έναν σταθμό shore power, ιδίως σε προβλήτες που εξυπηρετούν πλοία μεγάλης ισχύος, μπορεί να φθάσει τα 5 έως 10 εκατομμύρια ευρώ, ενώ για τα πλοία απαιτούνται επιπλέον 300.000 έως 1.000.000 ευρώ για την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού. Τα οικονομικά αυτά δεδομένα λειτουργούν ανασταλτικά, ιδίως για λιμένες με περιορισμένους προϋπολογισμούς ή για πλοία παλαιότερης κατασκευής που δεν έχουν σχεδιαστεί με βάση τις απαιτήσεις του Cold Ironing.

Ένα ακόμη σημαντικό εμπόδιο είναι η ανεπάρκεια των ηλεκτρικών υποδομών σε μεγάλο αριθμό λιμένων, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα παροχής της απαιτούμενης ισχύος. Η έκθεση του ESPO (2021) αναφέρει ότι μόλις το 2,3% των ευρωπαϊκών λιμένων διαθέτουν επαρκείς εγκαταστάσεις για εξυπηρέτηση πλοίων με cold ironing. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη σχετικής υποδομής στο λιμάνι του Ρότερνταμ απαίτησε ισχύ 25 MVA για δύο μόλις προβλήτες. Παράλληλα, η ασφαλής και αποτελεσματική σύνδεση πλοίων στο δίκτυο shore power απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και εκπαιδευμένο προσωπικό, καθώς ο χειρισμός συστημάτων υψηλής τάσης ενέχει σημαντικούς κινδύνους. Η DNV καταγράφει ότι περίπου το 25% των λειτουργικών καθυστερήσεων ή δυσλειτουργιών σχετίζονται με προβλήματα κατά τη διαδικασία σύνδεσης. Τέλος, η τεχνολογία καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη στην εφαρμογή για παλαιότερα πλοία ή για συγκεκριμένους τύπους (όπως Ro-Ro ή μικρά φορτηγά), τα οποία δεν διαθέτουν ηλεκτρικά συστήματα προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της. Εφόσον το 60% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου είναι ηλικίας άνω των 15 ετών , η αναβάθμιση των υφιστάμενων σκαφών συνεπάγεται σημαντικό κόστος και τεχνικές προσαρμογές, οι οποίες συχνά δεν είναι εφικτές.

2.4 Παραδείγματα Εφαρμογής Σε Διεθνή Λιμάνια

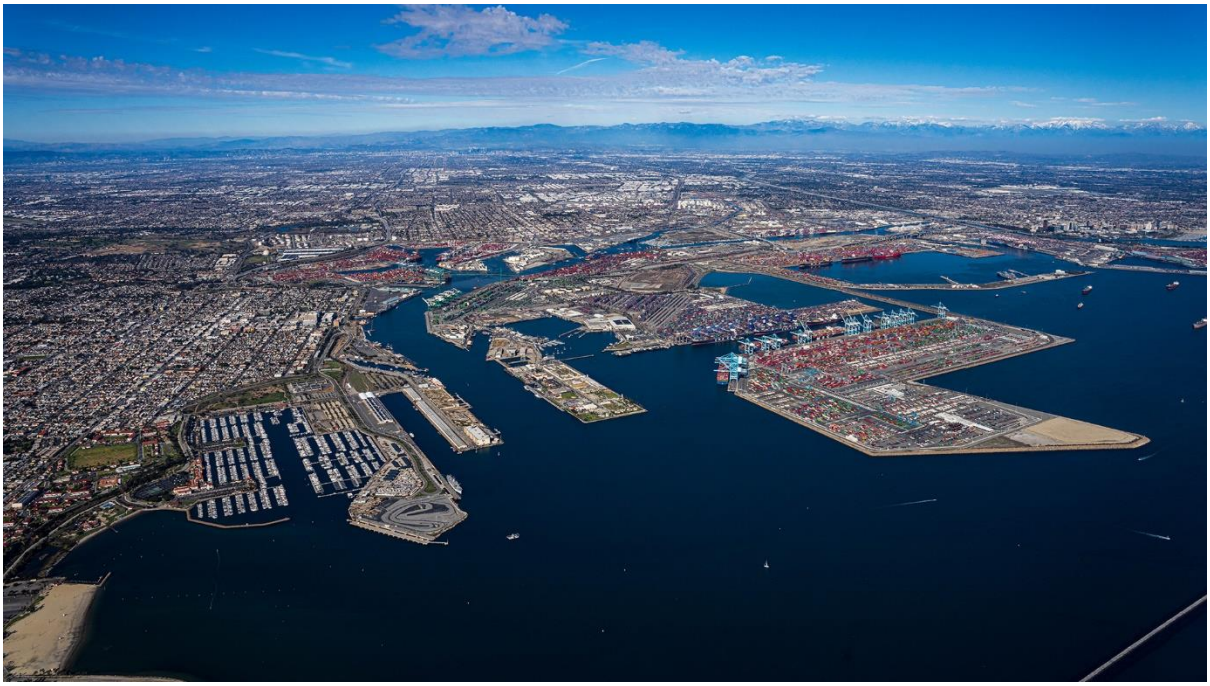
2.4.1 Λιμάνι του Λος Άντζελες

Το λιμάνι του Λος Άντζελες αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πρότυπης εφαρμογής της τεχνολογίας Cold Ironing ή Alternative Maritime Power (AMP). Αναγνωρισμένο διεθνώς ως ένα από τα πιο καινοτόμα προγράμματα περιβαλλοντικής διαχείρισης, το λιμάνι επικεντρώνεται κυρίως στη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο λιμάνι. Ενώ η χρήση του Cold Ironing είχε ήδη υιοθετηθεί από πορθμεία της Βαλτικής και από κρουαζιερόπλοια στην Αλάσκα, το λιμάνι του Λος Άντζελες υπήρξε το πρώτο παγκοσμίως που εφάρμοσε τη συγκεκριμένη τεχνολογία ειδικά για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Η εφαρμογή του Cold Ironing ξεκίνησε επίσημα στις 21 Ιουνίου 2004, με την ενεργοποίηση της προβλήτας 100 στον τερματικό σταθμό West Basin, ο οποίος διέθετε από την αρχή υποδομές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από ξηράς. Λίγες εβδομάδες αργότερα, στις 9 Αυγούστου του ίδιου έτους, το πλοίο NYK Atlas έγινε το πρώτο container ship με δυνατότητες AMP που κατέπλευσε στο λιμάνι. Έκτοτε, η εγκατάσταση σχετικού εξοπλισμού επεκτάθηκε σε επιπλέον προβλήτες, όπως ο τερματικός σταθμός Yusen στην προβλήτα 214 (2006), ο τερματικός σταθμός Sea Side της Evergreen στην προβλήτα 230 (2010), καθώς και ο σταθμός εξυπηρέτησης κρουαζιερόπλοιων στις προβλήτες 92 και 93A (2011).

Σύμφωνα με κανονιστικές απαιτήσεις που ορίστηκαν από το California Air Resources Board (CARB), το Τμήμα Λιμένων προχώρησε στην τοποθέτηση 24 μονάδων AMP σε διάφορους σταθμούς ελλιμενισμού, οι οποίες τέθηκαν σε ισχύ από 1η Ιανουαρίου 2014. Η πρωτοβουλία αυτή αντανακλά την ενεργή στάση του λιμανιού στην αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από μεγάλα πλοία μεταφοράς φορτίου, συμβάλλοντας καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Ένα σημαντικό ορόσημο καταγράφηκε στις 24 Φεβρουαρίου 2011, όταν το λιμάνι του Λος Άντζελες έγινε το πρώτο στον κόσμο που παρείχε ταυτόχρονα shore power σε τρεις διαφορετικές εταιρείες κρουαζιέρας. Το Παγκόσμιο Κέντρο Κρουαζιέρας του λιμανιού είναι εξοπλισμένο με συστήματα που επιτρέπουν τη σύνδεση δύο πλοίων ταυτόχρονα, παρέχοντας ισχύ έως και **20 MW ανά πλοίο**, μέσω συστημάτων 6,6 kV ή 11 kV, ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε σκάφους. Η συνολική διαθέσιμη ισχύς της εγκατάστασης ανέρχεται στα **40 MW**, με τη ζήτηση να κυμαίνεται τυπικά μεταξύ **8 και 13 MW**. Το παράδειγμα του Λος Άντζελες αναδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο η συστηματική περιβαλλοντική στρατηγική μπορεί να μετασχηματίσει ένα μεγάλο εμπορικό λιμάνι σε υπόδειγμα βιώσιμης ναυτιλιακής ανάπτυξης.



Σχήμα 2.4.1.1: Λιμάνι του Λος Άντζελες

2.4.2 Λιμάνι του Γκέτεμποργκ

Το λιμάνι του Γκέτεμποργκ, το μεγαλύτερο της Σκανδιναβικής χερσονήσου, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στο ευρωπαϊκό θαλάσσιο εμπόριο και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κόμβους για τη μεταφορά φορτίων και επιβατών στην περιοχή. Η γεωγραφική του θέση του προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς διαθέτει εκτεταμένες σιδηροδρομικές διασυνδέσεις και αναπτύσσεται σε ένα ευρύ δίκτυο θαλάσσιων διαδρομών που εξυπηρετούν τόσο τη Σκανδιναβία όσο και τη Βαλτική. Λειτουργεί ως βασική πύλη εξαγωγών για επιχειρήσεις της ευρύτερης περιοχής, ενώ ταυτόχρονα συνδέεται άμεσα με διεθνείς προορισμούς μέσω συχνών και τακτικών θαλάσσιων γραμμών. Οι λιμενικές του υποδομές έχουν σχεδιαστεί με τρόπο που εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, όπως φορτία Ro-Ro, εμπορευματοκιβώτια, υγρά καύσιμα, οχήματα και επιβατική κίνηση, καθιστώντας το ένα από τα πιο εξειδικευμένα και ευέλικτα λιμάνια της Ευρώπης.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην περιβαλλοντική στρατηγική του λιμένα, καθώς το Γκέτεμποργκ αποτέλεσε το πρώτο λιμάνι παγκοσμίως που εισήγαγε την τεχνολογία Cold Ironing, προσφέροντας ηλεκτρική ενέργεια υψηλής τάσης σε ελλιμενισμένα πλοία. Η υλοποίηση αυτής της καινοτομίας ξεκίνησε το 2000 στον τερματικό σταθμό Ro-Ro, επιτρέποντας στα πλοία να απενεργοποιούν πλήρως τόσο τις κύριες μηχανές όσο και τις βοηθητικές γεννήτριες κατά τη διάρκεια παραμονής στο λιμάνι. Από τότε, το λιμάνι έχει αναπτύξει περαιτέρω τις εγκαταστάσεις του, επεκτείνοντας τη διαθεσιμότητα ηλεκτροδότησης σε περισσότερα σημεία. Σήμερα, εκτιμάται ότι περίπου ένα στα τρία πλοία που προσεγγίζουν το λιμάνι μπορούν να συνδεθούν με συστήματα Cold Ironing, γεγονός που συνεπάγεται σημαντική μείωση της λειτουργίας ρυπογόνων μηχανών και κατ’ επέκταση των επιβλαβών

εκπομπών, ενισχύοντας έτσι τη συμβολή του λιμένα στη βελτίωση της τοπικής ποιότητας αέρα.

Στο πλαίσιο της δέσμευσής του για περιβαλλοντική υπευθυνότητα, το λιμάνι αξιοποιεί και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως δύο τοπικές ανεμογεννήτριες, για την παραγωγή ηλεκτρισμού που τροφοδοτεί τα συστήματα Cold Ironing. Η χρήση της αιολικής ενέργειας ενισχύει τον οικολογικό χαρακτήρα της εγκατάστασης, καθώς μειώνει σημαντικά την ανάγκη για συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται με εκπομπές ρύπων, όπως τα οξείδια του αζώτου (NOx) και του θείου (SOx). Η τεχνολογική υποδομή του λιμανιού περιλαμβάνει και εξειδικευμένους μετατροπείς συχνότητας, οι οποίοι μετατρέπουν το ρεύμα από τη στάνταρ ευρωπαϊκή συχνότητα των 50 Hz στα 60 Hz, ώστε να είναι συμβατό με τα περισσότερα εμπορικά πλοία διεθνούς ναυσιπλοΐας. Αυτή τη στιγμή, τα διαθέσιμα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως από φέρι και φορτηγά οχηματαγωγά, ωστόσο οι λιμενικές αρχές βρίσκονται σε φάση διερεύνησης της δυνατότητας επέκτασης της εφαρμογής τους και σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων καθώς και σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια που δραστηριοποιούνται εντός των ευρωπαϊκών θαλασσών. Αυτή η προοπτική εντάσσεται σε μια ευρύτερη στρατηγική ενίσχυσης της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στη ναυτιλιακή βιομηχανία μέσω της σταδιακής απανθρακοποίησης των λιμενικών δραστηριοτήτων.

Σχήμα 2.4.2.1: Λιμάνι του Γκέτεμποργκ

2.4.3 Λιμάνι της Αμβέρσας

Το λιμάνι της Αμβέρσας, ένα από τα πλέον σημαντικά εμπορικά λιμάνια της Ευρώπης, βρίσκεται σε πλεονεκτική γεωγραφική θέση στο ανώτερο τμήμα των εκβολών του ποταμού Σέλντε, επιτρέποντας την προσέγγιση πλοίων μεγάλου μεγέθους, ακόμη και τύπου capesize, σε απόσταση περίπου 80 χιλιομέτρων εντός της ενδοχώρας. Η δυνατότητα πλοήγησης πλοίων άνω των 100.000 κόρων αποτελεί χαρακτηριστικό πλεονέκτημα του λιμένα. Επιπλέον, η σύνδεσή του με εκτεταμένα δίκτυα μεταφορών – σιδηροδρομικά, οδικά και πλωτά – του προσδίδει έναν καθοριστικό ρόλο ως διαμετακομιστικό κέντρο υψηλής στρατηγικής σημασίας. Ο λιμένας κατατάσσεται σταθερά μεταξύ των μεγαλύτερων στην Ευρώπη όσον

αφορά το συνολικό όγκο διακινούμενων εμπορευμάτων, καταλαμβάνοντας τη δεύτερη θέση μετά το Ρότερνταμ.

Στο πλαίσιο των προσπαθειών για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής του επίδοσης, τον Μάιο του 2008 το λιμάνι της Αμβέρσας εγκαινίασε μια σημαντική πρωτοβουλία με σκοπό τη μείωση των ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία. Ξεκίνησε η εφαρμογή τεχνολογιών ηλεκτροδότησης από ξηράς, αξιοποιώντας την εμπειρία από υφιστάμενες παροχές ενέργειας σε φορτηγίδες, ρυμουλκά και βυθοκόρους του λιμενικού στόλου. Η εφαρμογή αυτή βασίστηκε σε συνεργασία μεταξύ των τοπικών αρχών, της φλαμανδικής περιφέρειας και του Independent Maritime Terminal, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τον ελλιμενισμό κυρίως πλοίων της Independent Container Line (ICL). Πρόκειται για πιλοτική εφαρμογή που λειτούργησε ως αφετηρία για τη σταδιακή ενσωμάτωση της τεχνολογίας Cold Ironing σε πλοία διεθνών γραμμών.

Η ενσωμάτωση της παροχής ρεύματος από την ξηρά στο λιμάνι της Αμβέρσας εντάσσεται σε μια ευρύτερη στρατηγική περιβαλλοντικής υπευθυνότητας. Μέσα από αυτή την τεχνολογική μετάβαση, το λιμάνι επιχειρεί να μειώσει τις εκπομπές ρύπων που παράγονται από τη λειτουργία των πλοίων εντός των λιμενικών εγκαταστάσεων, βελτιώνοντας την ποιότητα του αέρα και ανταποκρινόμενο στις σύγχρονες απαιτήσεις για βιώσιμη ανάπτυξη. Η πρωτοβουλία αυτή ενισχύει τη δέσμευση των λιμενικών αρχών για ουσιαστική συμβολή στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μέσω ενεργών και στοχευμένων παρεμβάσεων στον τομέα της ναυτιλίας.

Σχήμα 2.4.3.1: Λιμάνι της Αμβέρσας

3 Κανονιστικό Πλαίσιο , Πρότυπα & Στατιστικά

3.1 Κανονισμοί IEC για την Ηλεκτρική Σύνδεση Πλοίων με το Δίκτυο Ξηράς (Shore Power)

Για ποικίλους λόγους, στους οποίους περιλαμβάνονται και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, απαιτείται πλέον όλο και συχνότερα τα πλοία να απενεργοποιούν τις γεννήτριές τους και να συνδέονται με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα κατά την παραμονή τους στο λιμάνι. Η ενέργεια αυτή όπως προαναγέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο αποκαλείται Cold Ironing, σύμφωνα με το πρότυπο IEC/IEEE 80005-1 (2019).

Για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής από την πλευρά του πλοίου, κρίθηκε αναγκαία η καθιέρωση διεθνών τεχνικών προτύπων. Στην κατεύθυνση αυτή εκπονήθηκαν οι IEC PAS 80005-3 και IEC/IEEE 80005-1. Το πρώτο, που θεσπίστηκε το 2014, αφορά στις βασικές απαιτήσεις για τα συστήματα σύνδεσης πλοίων με πηγή ηλεκτροδότησης χαμηλής τάσης από την ξηρά (Low Voltage Shore Connection – LVSC). Το δεύτερο, το IEC/IEEE 80005-1, θεσπιστηκε το 2012 και αναθεωρήθηκε το 2019, καθορίζει τις γενικές προδιαγραφές για τη σύνδεση πλοίων με συστήματα παροχής ρεύματος υψηλής τάσης από τη στεριά (High Voltage Shore Connection – HVSC).

3.1.1IEC/IEEE 80005-1

Το ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012 είναι ένα διεθνές πρότυπο που αφορά ειδικά τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη λειτουργία συστημάτων High Voltage Shore Connection (HVSC). Το πρότυπο αυτό διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής ενσωμάτωσης τεχνολογιών Cold Ironing σε λιμενικά περιβάλλοντα.

Το πρότυπο ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012 θεσπίζει τις θεμελιώδεις αρχές και τις τεχνικές προδιαγραφές για τα συστήματα HVSC, καλύπτοντας πτυχές όπως η ηλεκτρική υποδομή, οι μηχανισμοί μεταφοράς ισχύος και τα ζητήματα ασφάλειας. Παρέχει καθοδήγηση για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση εξοπλισμού HVSC, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού shore supply, μετασχηματιστών, μετατροπέων, καλωδίων και πινάκων διανομής..

Τηρώντας το πρότυπο αυτό, οι λιμενικές αρχές, οι σχεδιαστές συστημάτων και οι κατασκευαστές εξοπλισμού μπορούν να διασφαλίσουν τη συμβατότητα, την αξιοπιστία και τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων HVSC. Το πρότυπο προωθεί τη συνέπεια στην εφαρμογή των τεχνολογιών Cold Ironing, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με διάφορους τύπους πλοίων και διαμορφώσεις λιμένων.

Επιπλέον, το πρότυπο ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012 συμβάλλει στην ασφάλεια του προσωπικού και των περιουσιακών στοιχείων, καθορίζοντας απαιτήσεις για τη μόνωση, τις διατάξεις προστασίας, τη γείωση και τα συστήματα παρακολούθησης. Αντιμετωπίζει

σημαντικά ζητήματα όπως η πρόληψη ηλεκτρικών κινδύνων, η προστασία από συνθήκες υπερέντασης και βραχυκυκλώματος και η διαθεσιμότητα ενδείξεων και συναγερμών για την παρακολούθηση της κατάστασης των συνδέσεων ισχύος..

Η συμμόρφωση με το πρότυπο ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012 διασφαλίζει ότι τα συστήματα HVSC πληρούν τα διεθνή πρότυπα ποιότητας, απόδοσης και ασφάλειας. Προωθεί την αποτελεσματική αξιοποίηση των τεχνολογιών shore supply, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μειώνοντας τις εκπομπές από τα πλοία σε λιμενικές περιοχές. Ως εκ τούτου, το πρότυπο αυτό χρησιμεύει ως πολύτιμο σημείο αναφοράς για την επιτυχή υλοποίηση και λειτουργία συστημάτων HVSC παγκοσμίως.

Το πρότυπο IEC/IEEE 80005-1 υψηλής τάσης σύνδεσης ξηράς καλύπτει πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια μεταφοράς πετρελαίου, χημικών προϊόντων και υγροποιημένου αερίου, φορτηγά πλοία ro-ro, ropax, μεταφορείς οχημάτων και επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία, αλλά δεν καλύπτει τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, τα ψυγεία χύδην φορτίου και τα πλοία γενικού φορτίου, τα οποία χρησιμοποιούν σύστημα χαμηλής τάσης επί του πλοίου.Για αυτό ο κανονισμός IEC/IEEE 80005-3 ορίζει τις απαιτήσεις σύνδεσης χαμηλής τάσης στην ξηρά.

Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα τάσης των πλοίων για τον υπάρχοντα στόλο, τις διάφορες κατηγορίες τμημάτων πλοίων και τον αριθμό τους στον υπάρχοντα στόλο, έγινε αξιολόγηση για να ελεγχθεί ποια τμήματα πλοίων και οι αντίστοιχοι αριθμοί τους καλύπτονται τεχνικά από το πρότυπο IEC/IEEE 80005-1 HVSC.

Ο πίνακας 3.1.1.1 δείχνει ποια τμήματα δοχείων καλύπτονται από το IEC/IEEE 80005-1 και ποια όχι. Σε αυτό, η κατηγορία «Διάφορα» εξαιρείται.

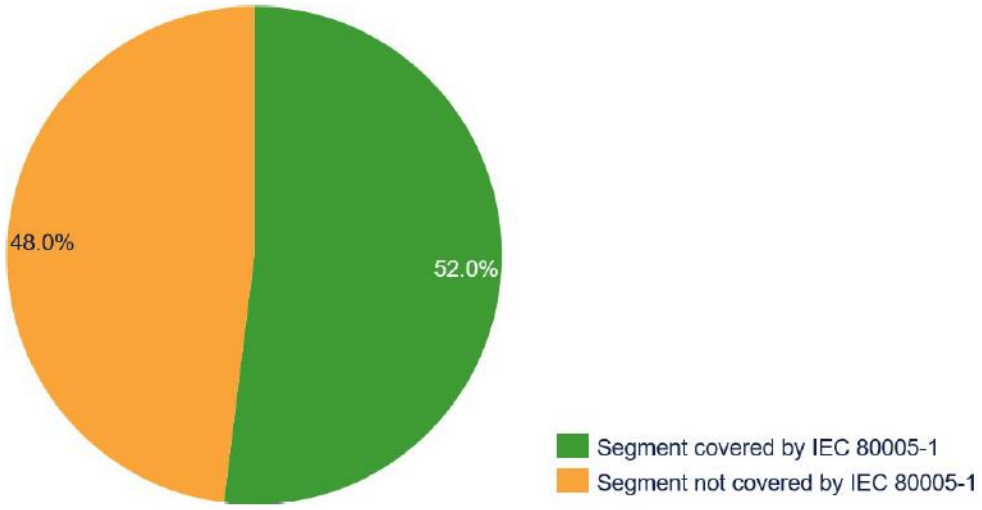
Στο τμήμα σκαφών "Διάφορα" περιλαμβάνονται ρυμουλκά, αλιευτικά σκάφη, αποβατικά σκάφη, βυθοκόροι, ερευνητικά σκάφη και άλλα σκάφη δραστηριοτήτων.

Τμήμα σκάφους	Καλύπτεται από το IEC 80005-1 (Ναι/Οχι)
Πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοίο γενικού φορτίου, πλοίο μεταφοράς χύδην ψυγείων, άλλο δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγρών και άλλο πλοίο μεταφοράς επιβατών/οχηματαγωγό πλοίο	Όχι
Εμπορευματοκιβώτια, κρουαζιερόπλοια, φορτηγά πλοία ro-ro. ropax, ferry-pax και μεταφορείς οχημάτων	Ναι
Δεξαμενόπλοια μεταφοράς πετρελαίου, χημικών προϊόντων και υγροποιημένου αερίου	Ναι (επί του παρόντος ενημερωτικό)

Πίνακας 3.1.1.1: Τμήματα σκαφών που καλύπτονται και δεν καλύπτονται από το IEC/IEEE 80005-1

Με βάση τα τμήματα σκαφών που καλύπτονται από το IEC/IEEE 80005-1, αριθμός των σκαφών που ανήκουν σε διαφορετικά τμήματα σκαφών προστίθεται και διαπιστώθηκε ότι το

52% του υπάρχοντος παγκόσμιου στόλου καλύπτεται από το IEC/IEEE 80005-1 (εξαιρουμένων των διαφόρων σκαφών), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.1.1

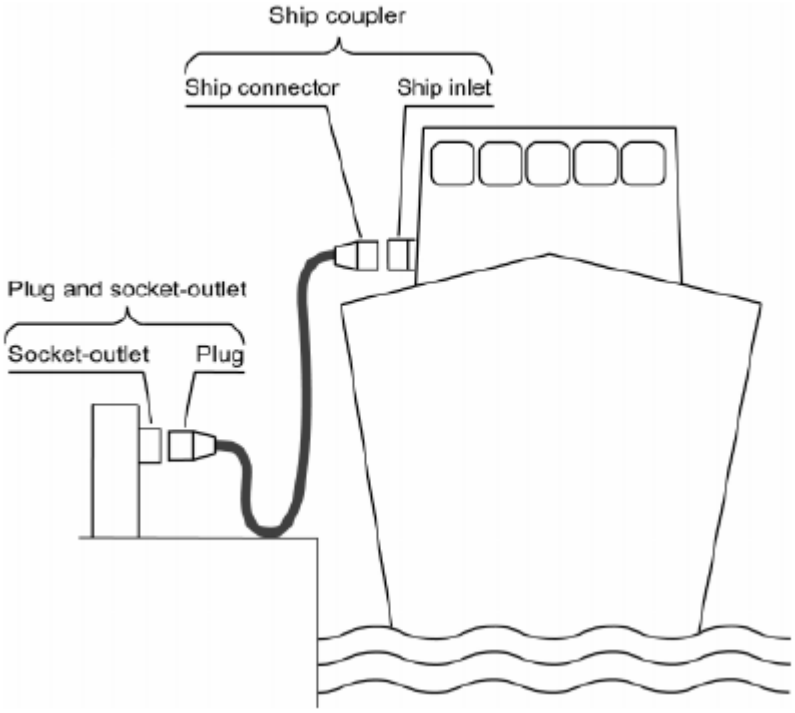


Σχήμα 3.1.1.1: Κατανομή του αριθμού των σκαφών που καλύπτονται και δεν καλύπτονται από το IEC/IEEE 80005-1 σύμφωνα με τον σημερινό στόλο.

3.1.2 IEC/IEEE 80005-3

Ο σκοπός αυτού του κανονισμού είναι να καθορίσει τις απαιτήσεις που χρειάζονται για την εφαρμογή κατάλληλων λειτουργικών πρακτικών, την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συνδέσεων συμβατών πλοίων με συμβατά τροφοδοτικά χαμηλής τάσης στην ξηρά, μέσω συμβατής σύνδεσης από την ξηρά προς το πλοίο.

Με την υποστήριξη επαρκούς προγραμματισμού, συνεργασίας μεταξύ πλοίων και τερματικών εγκαταστάσεων καθώς και κατάλληλων λειτουργικών διαδικασιών, ο κανονισμός αυτός προορίζεται να επιτρέψει τη σύνδεση διαφορετικών πλοίων, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ή πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου, με την ακτή, σε διαφορετικά αγκυροβόλια, μέσω συστήματος χαμηλής τάσης (LVSC). Από την άλλη πλευρά τα πλοία τα οποία δεν θα εφαρμόζουν αυτόν τον κανονισμό θα είναι αδύνατο να συνδεθούν με συμβατή ακτή.



Σχήμα 3.1.2.1: Σχήμα που δείχνει την διάταξη των εξαρτημάτων

Επιπλέον το διεθνές αυτό πρότυπο επισημαίνει, τις πιθανές επιπτώσεις στη συμβατότητα εάν υπάρξουν αποκλίσεις από τις απαιτήσεις και τις συστάσεις που έχει ορίσει.

Μέσα στον κανονισμό αυτό αναφέρονται δώδεκα ρήτρες οι οποίες προορίζονται για την εφαρμογή όλων των συστημάτων LVSC. Αυτές αφορούν κυρίως την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων LVSC με ένα ελάχιστο επίπεδο απαιτήσεων, που θα τυποποιηθούν σε μία λύση. Περιλαμβάνεται επίσης μέσα στον κανονισμό η απαίτηση να ολοκληρωθεί μία λεπτομερής αξιολόγηση συμβατότητας για κάθε συνδυασμό πλοίου και ακτής πριν πραγματοποιηθεί η άφιξη ενός συγκεκριμένου πλοίου το οποίο θα συνδεθεί με μία συγκεκριμένη παράκτια παροχή για πρώτη φορά.

Τέλος τα άλλα παραρτήματα αυτού του προτύπου περιλαμβάνουν πρόσθετες απαιτήσεις οι οποίες σχετίζονται με την τυποποίηση λύσεων για την επίτευξη συμβατότητας για συμβατά πλοία σε διαφορετικά συμμορφούμενα αγκυροβόλια και με την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας. Τα παραρτήματα αυτά χρησιμοποιούν την ίδια αρίθμηση με τις δώδεκα ρήτρες απλώς πριν την αρίθμηση υπάρχει το γράμμα του αντίστοιχου παραρτήματος. Πιο συγκεκριμένα η αρίθμηση δεν είναι απαραίτητα συνεχής και επίσης όπου υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις η ρήτρα δεν εμφανίζεται. (**IEC PAS 80005-3, 2014**)

Το τρέχον σχέδιο του IEC/IEEE 80005-3 αποτελεί συμπλήρωμα του ήδη καθιερωμένου προτύπου σύνδεσης HV-shore IEC/IEEE 80005-1. Το σχέδιο προτύπου που ορίζεται από το IEC/IEEE 80005-3, περιορίζεται σε μέγιστη ονομαστική ισχύ μεταφοράς 1 MVA. Ο περιορισμός αυτός βασίζεται στην πρακτική σκέψη να διατηρηθεί ο αριθμός των παράλληλων καλωδιακών συνδέσεων μεταξύ ξηράς και πλοίου ελεγχόμενος όσον αφορά το χώρο και το χειρισμό. Το ανώτατο όριο του 1 MVA διατηρεί επίσης έναν καθαρό διαχωρισμό μεταξύ των εγκαταστάσεων LVSC και HVSC.

Εντός του εύρους ισχύος 1 MVA, οι λιμένες και τα πλοία έχουν την ελευθερία να προσαρμόζουν τον αριθμό των συνδέσεων υποδοχών με βάση τις πραγματικές απαιτήσεις φορτίου των πλοίων που προσεγγίζουν ένα συγκεκριμένο σημείο ελλιμενισμού. Αυτό επιτρέπει τόσο στους λιμένες όσο και στα πλοία να τοποθετούν μόνο τον απαιτούμενο αριθμό συνδέσεων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η χρήση μιας διάταξης πριζών και βυσμάτων ανεξάρτητα από τον τύπο του πλοίου, επιτρέποντας τη σύνδεση διαφορετικών τύπων πλοίων στην ίδια θέση ελλιμενισμού.

Ορισμένοι ευρωπαϊκοί λιμένες, ιδίως θαλάσσιοι λιμένες με εσωτερική ναυσιπλοΐα, μπορεί να διαθέτουν χώρους ελλιμενισμού και πρόσδεσης που μοιράζονται μεταξύ πλοίων εσωτερικής ναυσιπλοΐας και θαλάσσιων πλοίων. Η κατάσταση αυτή υποδηλώνει την πιθανή χρήση μιας κοινής υποδομής τροφοδοσίας ξηράς για τα πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας και τα ποντοπόρα πλοία, ωστόσο, από άποψη συμβατότητας, πεδίου εφαρμογής και κανονιστικής συμμόρφωσης, προτείνεται να διατηρηθεί χωριστή η παροχή σύνδεσης ξηράς για τα πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας και τα ποντοπόρα πλοία.

Η επιλογή 690V 60Hz ως τάση μετάδοσης έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά τον αριθμό των παράλληλων συνδέσεων που απαιτούνται για την παροχή. Η στάθμιση αυτών των πλεονεκτημάτων σε σχέση με το γεγονός ότι πολλά σκάφη λειτουργούν με 440V 60Hz, θα συνιστούσε την επιλογή 440V 60Hz ως τάση μετάδοσης αντί για 690V 60Hz.

Ανεξαρτήτως από τα παραπάνω, αξίζει να εξεταστεί το ενδεχόμενο παροχής διαφορετικών τάσεων σε μια (περιφερειακή) εμπορική περιοχή, για παράδειγμα μεταξύ ευρωπαϊκών λιμένων.

Σε αυτό το πλαίσιο, το επίπεδο τάσης και η ονομαστική ισχύς θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ξεχωριστές οντότητες — αντιπροσωπεύοντας διαφορετικές απαιτήσεις σχεδιασμού. Ωστόσο, οι δύο παράμετροι είναι στενά αλληλένδετες στην πράξη. Η σωστή κατανόηση της σχέσης μεταξύ του επιπέδου τάσης και των πιθανών ονομαστικών τιμών ισχύος είναι κρίσιμη, ιδίως όταν εξετάζεται η υλοποίηση παράλληλων συνδέσεων καλωδίων για τη μετάδοση ενέργειας. Ο ακόλουθος πίνακας απεικονίζει αυτήν τη σχέση, προσφέροντας ένα χρήσιμο εργαλείο αξιολόγησης για τις ανάγκες σχεδιασμού και λειτουργίας εγκαταστάσεων σύνδεσης πλοίου με την ξηρά.

	Επίπεδο τάσης μετάδοσης:		
Αριθμός παράλληλης σύνδεσης καλωδίου με βύσμα και πρίζες ονομαστικής ισχύος 350 A	400 V	440V	690V
1	242 kVA	267 kVA	418 kVA
2	485 kVA	533 kVA	837 kVA
3	727 kVA	800 kVA	1000 kVA[1)]
4	970 kVA	1000 kVA[1)]	
5	1000 kVA[1)]		
Σημείωση:	[1)]Η υπολογιζόμενη ονομαστική ισχύς της σύνδεσης είναι υψηλότερη, αλλά το πεδίο εφαρμογής του προτύπου περιορίζεται ≤ 1000 kVA		

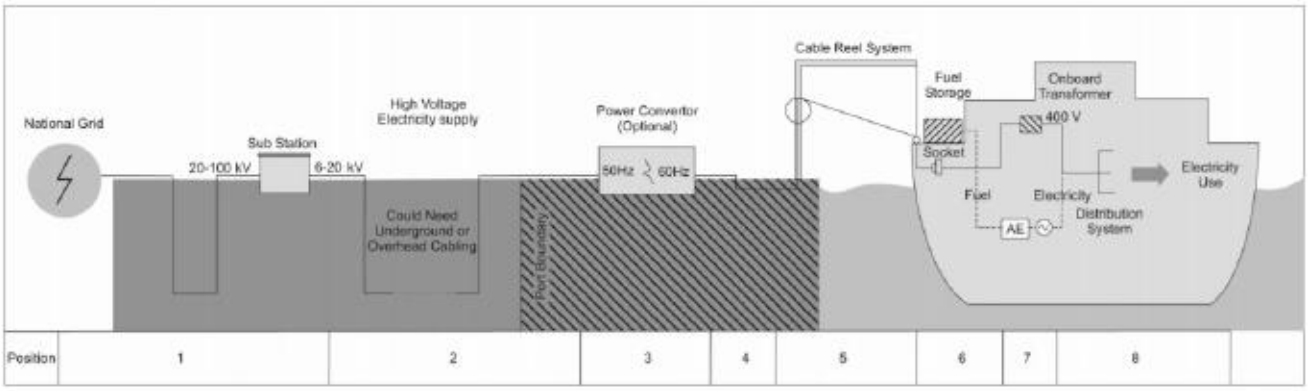
Σχήμα 3.1.2.2 : Ονομαστική ισχύς σύνδεσης με βάση τον αριθμό παράλληλων καλωδίων (350 A) και το επίπεδο τάσης μετάδοσης.

Η τάση μετάδοσης που αναφέρεται στο σχήμα 3.1.2.2 ταιριάζει με την πιο συνηθισμένη τάση που χρησιμοποιούν τα πλοία. Όταν η τάση του ρεύματος από την ξηρά είναι ίδια με αυτήν του πλοίου, δεν χρειάζονται επιπλέον μετασχηματιστές (που συνήθως χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την τάση).

Αυτό είναι καλό για το πλοίο, γιατί απαιτείται μικρότερος εξοπλισμός πάνω του, μειώνοντας το κόστος και διευκολύνοντας τον χειρισμό. Επίσης, διευκολύνει την παροχή ρεύματος από τη στεριά, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται σταθεροί μετατροπείς συχνότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αν το ρεύμα είναι πολύ υψηλό, μπορεί να ενεργοποιήσει την παροχή από την ξηρά πιο δύσκολα, οπότε η σωστή αντιστοίχιση βοηθά και σε αυτό.

3.2 Τυπική διαμόρφωση σύμφωνα με τη σύσταση της ΕΕ.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει παράσχει μια τυπική διαμόρφωση για την τροφοδοσία ρεύματος από την ξηρά σύμφωνα με τη σύστασή της 2006/339/EC. Η διαμόρφωση αυτή, που απεικονίζεται στο σχήμα 3.2.1 προσφέρει μια τυποποιημένη προσέγγιση για τη σύνδεση των πλοίων με το σύστημα shore power. Παρόλο που είναι δυνατές παραλλαγές ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, η σύσταση της ΕΕ χρησιμεύει ως βάση για τη δημιουργία μιας αξιόπιστης και αποδοτικής εγκατάστασης cold ironing



Σχήμα 3.2.1: Επισκόπηση της διάταξης Cold Ironing σύμφωνα με τη σύσταση 2006/339/EC της ΕΕ

Στην πρώτη αυτή εκδοχή, το σημείο 1 αναφέρεται στη σύνδεση με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο, μεταφέροντας ενέργεια με τάση από 20 έως 100 kV προς έναν υποσταθμό. Στο σημείο 2, χρησιμοποιούνται καλώδια για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο τάσης 6-20 kV, από τον υποσταθμό προς το τελικό σημείο στον λιμένα. Αν απαιτείται, η μετατροπή της συχνότητας ισχύος πραγματοποιείται στο σημείο 3, ιδιαίτερα όταν το πλοίο λειτουργεί με συχνότητα 60 Hz και η παροχή του δικτύου είναι στα 50 Hz, όπως συμβαίνει συνήθως στις παροχές κοινής ωφέλειας.

Στο σημείο 4 περιλαμβάνεται η διανομή των καλωδίων εντός του τερματικού σταθμού, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί υπόγεια, χρησιμοποιώντας υφιστάμενα ή νέα κανάλια. Προκειμένου να διευκολυνθεί η χρήση των καλωδίων υψηλής τάσης, το σημείο 5 αφορά σε ένα ειδικό σύστημα διαχείρισης καλωδίων που τοποθετείται στον προβλήτα. Το σύστημα αυτό διαθέτει τροχήλατο μηχανισμό, ο οποίος μπορεί να μετακινείται μεταξύ πλοίου και αποβάθρας, αναλαμβάνοντας την απελευθέρωση, επαναφορά και αποθήκευση των καλωδίων. Μπορεί να τροφοδοτείται από το δίκτυο και να προσαρμόζεται ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου.

Στο τελικό στάδιο, το σημείο 6 περιλαμβάνει την ύπαρξη πρίζας για τη σύνδεση του καλωδίου υψηλής τάσης με το πλοίο. Αν το πλοίο διαθέτει εσωτερικά σύστημα που λειτουργεί με 400 V, τότε η μετατροπή της υψηλής τάσης σε χαμηλή τάση πραγματοποιείται επί του σκάφους, με την ενέργεια να μεταφέρεται στο πλοίο μέσω κατάλληλης διάταξης. Η σύνδεση ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται από τον χρήστη όταν επιθυμεί να θέσει εκτός λειτουργίας τις βοηθητικές μηχανές και να στραφεί στην παροχή ενέργειας από τη στεριά.

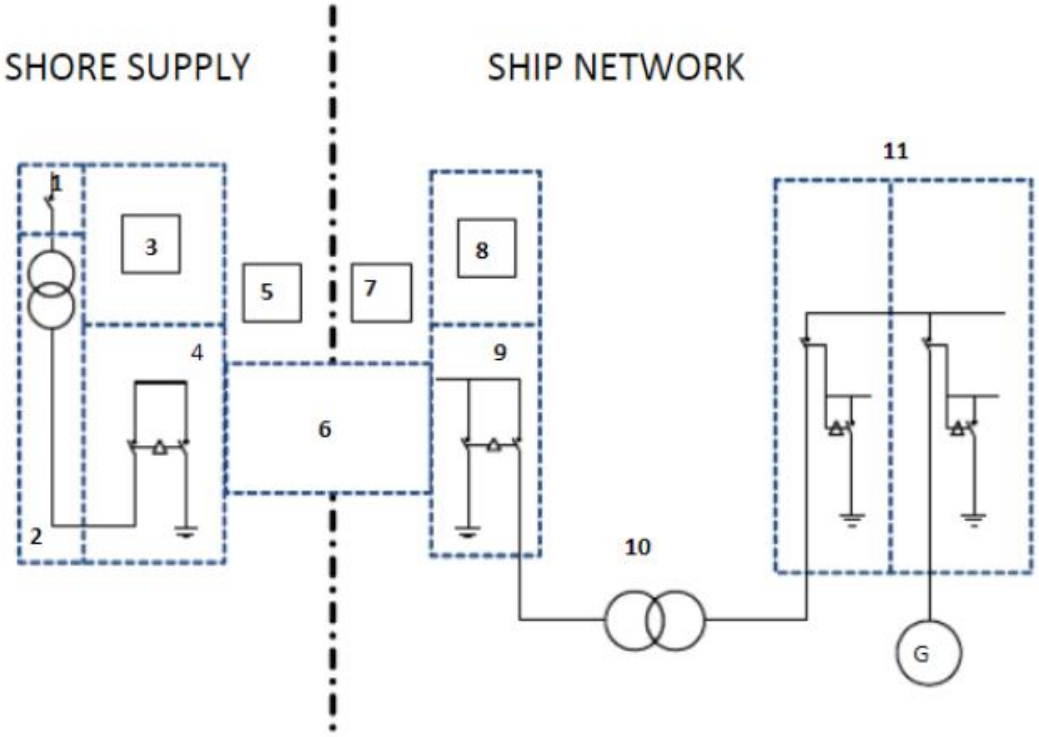
Σε πολλές εγκαταστάσεις εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης εφαρμόζεται σύστημα αποσυγκεντρωμένης τροφοδοσίας, όπου κάθε πλοίο διαθέτει τον δικό του μετατροπέα. Μια τέτοια διάταξη επιτρέπει την ανεξάρτητη μετατροπή της συχνότητας και της τάσης, ιδανική για περιπτώσεις που υπάρχει αυξημένο φορτίο στον προβλήτα. Αντίθετα, η συγκεντρωτική διανομή θεωρείται καταλληλότερη για μικρότερες εγκαταστάσεις ή για λιμένες με περιορισμένη απαίτηση σε ισχύ.

Σε περιπτώσεις όπου το λιμάνι δεν διαθέτει υποδομές για γαλβανική απομόνωση, προτείνεται η εγκατάσταση μετασχηματιστών εντός του πλοίου. Ακόμα και αν το σκάφος διαθέτει τέτοιο εξοπλισμό, καλό είναι να προβλέπεται απομόνωση και από την πλευρά της ξηράς, για λόγους ασφάλειας. Ιδανικά, τα δύο ηλεκτρικά δίκτυα (ξηράς και πλοίου) πρέπει να παραμένουν διαχωρισμένα, διασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχει άμεση σύνδεση χωρίς μετασχηματισμό. Αυτή η πρακτική είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος ηλεκτροδότησης από τη στεριά.

Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που η εγκατάσταση γείωσης της ξηράς δεν είναι επαρκής ή υπάρχει υψηλός κίνδυνος διαρροής ρεύματος, συστήνεται η εγκατάσταση μονωτικών συσκευών στο πλοίο. Αυτές εξασφαλίζουν την απομόνωση του κυκλώματος και επιτρέπουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος ακόμη και σε περιβάλλοντα με έντονες ηλεκτρικές παρεμβολές. Τέτοιες λύσεις θεωρούνται απαραίτητες για την ομαλή και ασφαλή εφαρμογή του συστήματος, ιδίως σε ευαίσθητες περιοχές.

3.2.2 Διάταξη συστήματος HVSC

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την διάταξη ενός συστήματος HVSC σύμφωνα με τα πρότυπα της ISO/IEC/IEEE 80005-1.



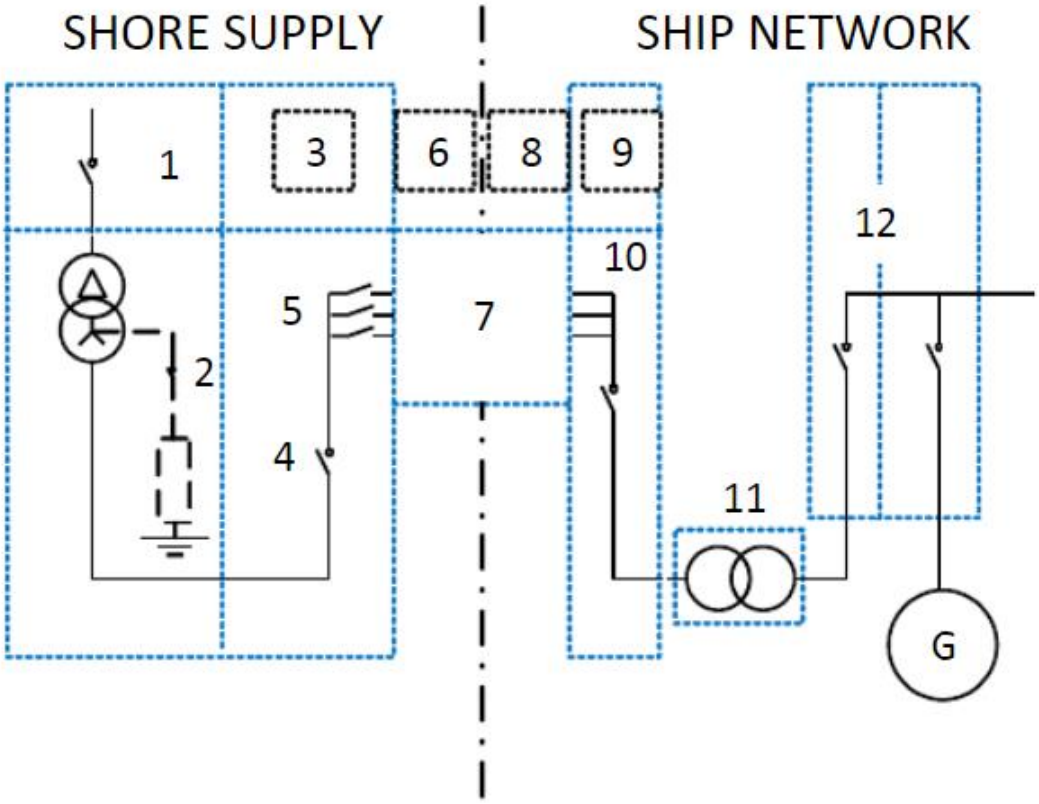
Σχήμα 3.2.2.1: Διάταξη συστήματος HVSC

Η διάταξη του συστήματος HVSC αποτελείται από τα εξής στοιχεία :

1. Σύστημα παροχής από το λιμάνι
2. Μετασχηματιστής στη ξηρά
3. Προστατευτικά ρελέ στην ξηρά
4. Διακόπτης κυκλώματος (ρεύματος) και διακόπτης γείωσης στη στεριά
5. Πίνακας ελέγχου στη στεριά
6. Σύνδεση πλοίου – λιμανιού και εξοπλισμός διασύνδεσης
7. Σύστημα ελέγχου στο πλοίο
8. Προστατευτικά ρελέ στο πλοίο
9. Πίνακας ελέγχου σύνδεσης με την ξηρά
10. Μετασχηματιστής πάνω στο πλοίο
11. Πίνακας διανομής στο πλοίο

3.2.3 Διάταξη συστήματος LVSC

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την διάταξη ενός συστήματος LVSC σύμφωνα με τα πρότυπα της ISO/IEC/IEEE 80005-3.



Σχήμα 3:Διάταξη συστήματος LVSC.

Η διάταξη του συστήματος LVSC αποτελείται από τα εξής στοιχεία :

1. Σύστημα τροφοδοσίας από το λιμάνι
2. Μετασχηματιστή στην ξηρά με αντίσταση γείωσης στον ουδέτερο κόμβο η κάνοντας χρήση συστήματος IT.
3. Προστατευτικά ρελέ στην ξηρά
4. Διακόπτης κυκλώματος στη στεριά
5. Διακόπτες τροφοδοσίας στη στεριά
6. Σύστημα ελέγχου στη στεριά
7. Συνδεσμολογία πλοίου – λιμανιού και εξοπλισμός διασύνδεσης
8. Σύστημα ελέγχου στο πλοίο
9. Προστατευτικά ρελέ στο πλοίο
10. Πίνακας ελέγχου σύνδεσης ακτής – πλοίου
11. Μετασχηματιστής στο πλοίου (όπου απαιτείται)
12. Πίνακας διανομής στο πλοίο

3.3 Διαθεσιμότητα Δεδομένων Τάσης στον Παγκόσμιο Στόλο

Η αξιολόγηση της εφαρμογής των συστημάτων Shore Power στον παγκόσμιο στόλο απαιτεί πρώτα την κατανόηση της διαθεσιμότητας βασικών ηλεκτροτεχνικών δεδομένων, όπως η τάση λειτουργίας του κύριου πίνακα διανομής επί του πλοίου. Το παρον υποκεφάλαιο παρουσιάζει συγκεντρωτικά στοιχεία για τη διαθεσιμότητα τέτοιων δεδομένων, τόσο για τον υφιστάμενο στόλο όσο και για τα πλοία υπό ναυπήγηση.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της βάσης δεδομένων **IHS Fairplay**, τα οποία αξιοποιήθηκαν στη μελέτη της **DNV**, ποσοστό περίπου **31% του υφιστάμενου στόλου** διαθέτει καταγεγραμμένα δεδομένα για το επίπεδο τάσης. Το αντίστοιχο ποσοστό για τα **νεότευκτα πλοία** είναι σημαντικά χαμηλότερο, περίπου στο **5%**, γεγονός που αποδίδεται στο στάδιο ολοκλήρωσης των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων κατά την περίοδο παραγγελίας.

Οι διάφοροι τύποι πλοίων που λαμβάνονται υπόψιν για την ταση λειτουργιας τους είναι :

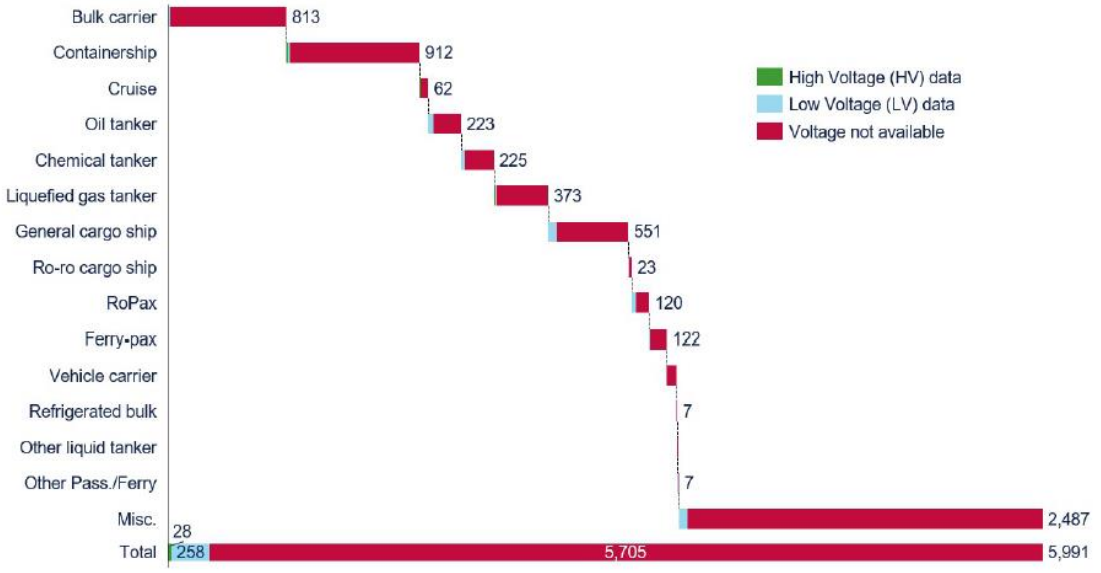
- Μεταφορέας χύδην φορτίου
- Κρουαζιερόπλοιο
- Δεξαμενόπλοιο πετρελαίου
- Δεξαμενόπλοιο υγροποιημένου αερίου
- Εμπορικό πλοίο Ro-ro
- Επιβατηγό πλοίο
- Ψυγείο χύδην
- Άλλοι επιβάτες/οχηματαγωγά πλοία
- Πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
- Δεξαμενόπλοιο χημικών
- Πλοίο γενικού φορτίου
- RoPax
- Μεταφορέας οχήματος
- Άλλα δεξαμενόπλοια υγρών
- Διάφορα

Στην ομάδα σκαφών "Διάφορα" περιλαμβάνονται ρυμουλκά, αλιευτικά , αποβατικά , ερευνητικά και άλλα σκάφη δραστηριοτήτων. Τα υπεράκτια σκάφη εξαιρούνται από τη μελέτη, καθώς έχουν μοναδικές απαιτήσεις και δεν εμπίπτουν στο θαλάσσιο στόλο.

Η **διαθεσιμότητα αυτών των δεδομένων** αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την περαιτέρω αξιολόγηση της δυνατότητας ηλεκτροδότησης από την ξηρά, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την επιλογή μεταξύ συστημάτων χαμηλής ή υψηλής τάσης, όσο και τον σχεδιασμό της αντίστοιχης υποδομής σε λιμενικό επίπεδο.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απεικονίζονται στα **Σχήματα 3.3.1 και 3.3.2** , στα οποία παρουσιάζεται ο αριθμός των πλοίων ανά κατηγορία με ή χωρίς διαθέσιμα δεδομένα τάσης.

Σχήμα 3.3.1: Διαθεσιμότητα δεδομένων τάσης για τον υφιστάμενο παγκόσμιο στόλο



Σχήμα 3.2.2: Διαθεσιμότητα δεδομένων τάσης για τα νεότευκτα σκάφη

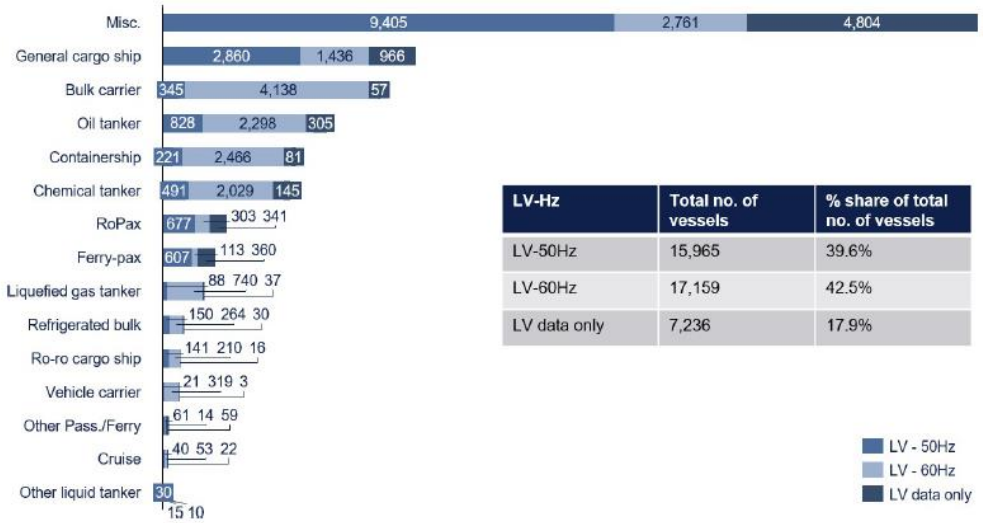
3.4 Κατανομή Συχνότητας και Τάσης στα Πλοία με Σύστημα Χαμηλής Τάσης

Η καταγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών λειτουργίας των πλοίων με σύστημα χαμηλής τάσης (LV) αποτελεί βασικό εργαλείο αξιολόγησης για την εφαρμογή της ηλεκτρικής σύνδεσης με το δίκτυο ξηράς (Shore Power). Ιδιαίτερα κρίσιμα είναι τα στοιχεία που αφορούν τη **συχνότητα λειτουργίας του συστήματος ισχύος** (50 Hz ή 60 Hz), καθώς επηρεάζουν τόσο την επιλογή εξοπλισμού όσο και τη διαμόρφωση των λιμενικών υποδομών.

Προκειμένου να είναι δυνατή η κατανόηση των συνδυασμών τάσης-συχνότητας που χρησιμοποιούνται στα πλοία, είναι σημαντικό να υπάρχει επίσης επισκόπηση των διαθέσιμων δεδομένων συχνότητας για το σύστημα χαμηλής τάσης που είναι εγκατεστημένο στα πλοία.

Για τα διαθέσιμα συστήματα χαμηλής τάσης δεδομένων, η κατανομή των δεδομένων συχνότητας για τα διάφορα τμήματα πλοίων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4.1 για τον υπάρχοντα στόλο και στο σχήμα 3.4.2 για τα νεόκτευτα.

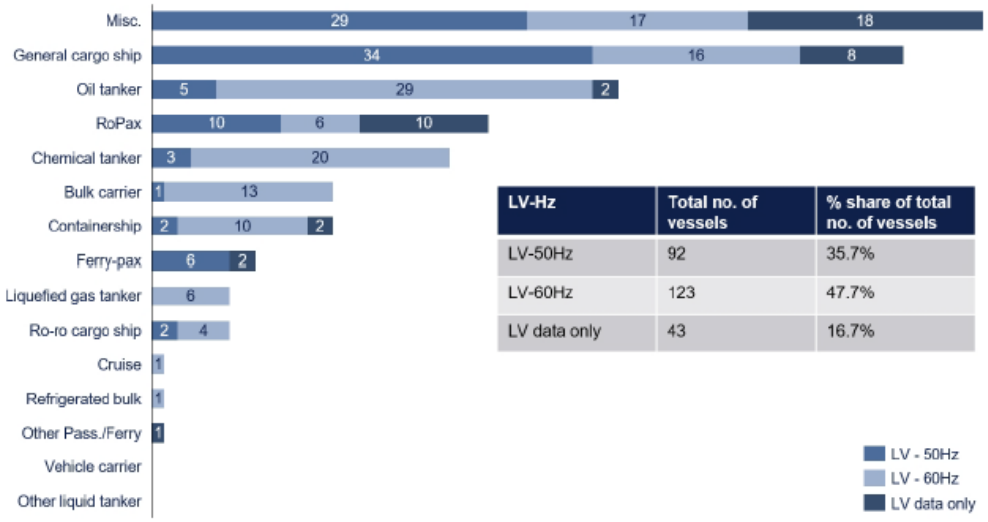
Για το διαθέσιμο μερίδιο δεδομένων χαμηλής τάσης στον υφιστάμενο παγκόσμιο στόλο, το 82,1% των πλοίων που είναι εξοπλισμένα με συστήματα χαμηλής τάσης έχουν συχνότητα λειτουργίας 50 ή 60Hz .Για το υπόλοιπο 17,9%, η κατανομή της συχνότητας είναι άγνωστη. Για τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα δεξαμενόπλοια υγροποιημένου αερίου και τα πλοία μεταφοράς οχημάτων, πάνω από το 85% των πλοίων με διαθέσιμα δεδομένα χαμηλής τάσης λειτουργούν με συχνότητα 60Hz. Όσον αφορά τα ferry-pax, τα πλοία γενικού φορτίου, τα διάφορα πλοία, τα άλλα δεξαμενόπλοια υγρών και τα πλοία ro-ro, πάνω από το 50% των πλοίων με διαθέσιμα στοιχεία χαμηλής τάσης λειτουργούν σε συχνότητα 50Hz.



LV-Hz	Total no. of vessels	% share of total no. of vessels
LV-50Hz	15,965	39.6%
LV-60Hz	17,159	42.5%
LV data only	7,236	17.9%

Σχήμα 3.4.1: : Κατανομή του αριθμού των σκαφών με διαφορετική συχνότητα λειτουργίας(υπαρχοντα πλοια)

Όσον αφορά τα πλοία στο αρχείο παραγγελιών και με διαθέσιμα στοιχεία χαμηλής τάσης, το 83,3% αυτών λειτουργούν σε συχνότητα 50 ή 60Hz. Για το υπόλοιπο 16,7% η κατανομή της συχνότητας είναι άγνωστη. Από το σχήμα 3.4.2 φαίνεται ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία τάσης και συχνότητας για τα υπό ναυπήγηση δεξαμενόπλοια μεταφοράς οχημάτων και άλλα δεξαμενόπλοια υγρών. Το τμήμα των πετρελαιοφόρων έχει υψηλότερο ποσοστό συχνότητας λειτουργίας 60Hz για τα νεότευκτα σε σύγκριση με τα πετρελαιοφόρα του υφιστάμενου στόλου (σχήμα 6)



LV-Hz	Total no. of vessels	% share of total no. of vessels
LV-50Hz	92	35.7%
LV-60Hz	123	47.7%
LV data only	43	16.7%

Σχήμα 3.4.2: Κατανομή του αριθμού των πλοίων με διαφορετική συχνότητα λειτουργίας(νεοτευκτα)

Συμπερασματικά, η ανάλυση της συχνότητας λειτουργίας στα πλοία με διαθέσιμα δεδομένα χαμηλής τάσης αποκαλύπτει ότι η πλειονότητα του στόλου λειτουργεί είτε σε 50 Hz είτε σε 60 Hz, με σαφή υπεροχή της δεύτερης επιλογής σε συγκεκριμένους τύπους πλοίων. Παράλληλα, ένα σημαντικό ποσοστό σκαφών εξακολουθεί να στερείται καταγεγραμμένων στοιχείων, γεγονός που περιορίζει την πληρότητα της τεχνικής εικόνας του στόλου και αναδεικνύει την ανάγκη για συστηματικότερη τεκμηρίωση. Η διακύμανση μεταξύ 50 Hz και 60 Hz ενισχύει την ανάγκη για ευέλικτες υποδομές Shore Power, ικανές να ανταποκριθούν στην υφιστάμενη τεχνική ετερογένεια.

4 BULK CARRIERS-COLD IRONING

4.1 Χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες των Bulk Carriers

Τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (Bulk Carriers) αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες του παγκόσμιου εμπορικού στόλου, καλύπτοντας περίπου το 42% του συνολικού deadweight capacity (DWT). Πρόκειται για πλοία σχεδιασμένα ειδικά για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων μη συσκευασμένων φορτίων, όπως σιδηρομεταλλεύματα, άνθρακας, τσιμέντο και δημητριακά. Τα φορτία αυτά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (όγκο, ειδικό βάρος, συντελεστή στοιβασίας), γεγονός που επηρεάζει τόσο τον σχεδιασμό όσο και τη λειτουργία των bulk carriers.

Από κατασκευαστική άποψη, τα bulk carriers είναι πλοία απλής και στιβαρής δομής, με μονή γάστρα και μεγάλα αμπάρια που χωρίζονται με διάφραγματα. Οι καταπακτές τους έχουν μεγάλο άνοιγμα για να διευκολύνουν τη γρήγορη φορτοεκφόρτωση, ενώ σε πολλές περιπτώσεις φέρουν ίδιους γερανούς ή άλλο εξοπλισμό φόρτωσης. Σε αντίθεση με τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων, τα bulk carriers χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές ταχύτητες πλεύσης, ενώ ο συντελεστής γάστρας (block coefficient) είναι υψηλός (CB ≈ 0.85), προκειμένου να μεγιστοποιείται η χωρητικότητα φορτίου.

Οι ιδιαιτερότητες των bulk carriers σε σχέση με το cold ironing εντοπίζονται κυρίως στο επιχειρησιακό τους προφίλ. Η διάρκεια παραμονής τους στα λιμάνια είναι συνήθως μεγαλύτερη από άλλους τύπους πλοίων, λόγω του όγκου φορτίου και της διαδικασίας φορτοεκφόρτωσης, η οποία μπορεί να φτάσει ακόμη και τις δύο ημέρες σε μεγάλα λιμάνια εκφόρτωσης άνθρακα ή μεταλλευμάτων. Αυτό σημαίνει ότι οι ανάγκες ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις: από σχετικά χαμηλά επίπεδα όταν το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, έως πολύ υψηλές απαιτήσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας των γερανών, των αντλιών ή άλλων συστημάτων διαχείρισης φορτίου. Επιπλέον, η μορφή του φορτίου (ξηρό, συχνά με μεγάλη σκόνη ή υγρασία) μπορεί να απαιτεί τη συνεχή λειτουργία συστημάτων εξαερισμού και απορρόφησης σκόνης, αυξάνοντας περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι τα bulk carriers προσεγγίζουν λιμάνια με διαφορετικές προδιαγραφές και δυνατότητες ηλεκτροδότησης. Αυτό δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για την εφαρμογή του cold ironing, καθώς τα πλοία πρέπει να διαθέτουν ευελιξία στη διασύνδεση με εγκαταστάσεις που μπορεί να λειτουργούν είτε σε υψηλή είτε σε χαμηλή τάση. Παράλληλα, η ηλικία μεγάλου μέρους του στόλου των bulk carriers —συχνά άνω των 15 ή και 20 ετών— σημαίνει ότι απαιτούνται εκτεταμένες ηλεκτρολογικές αναβαθμίσεις για να μπορούν να δεχτούν shore power, γεγονός που αυξάνει το κόστος υλοποίησης.

Επομένως, τα bulk carriers αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία για την εφαρμογή του cold ironing, καθώς η διαστασιολόγηση του συστήματος πρέπει να καλύπτει όχι μόνο τις βασικές ανάγκες λειτουργίας του πλοίου, αλλά και τις αιχμές ζήτησης που προκύπτουν κατά τις διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης. Παράλληλα, απαιτείται προσαρμοστικότητα στις τεχνικές προδιαγραφές και αναβάθμιση του υπάρχοντος εξοπλισμού, ώστε η σύνδεση με την ξηρά να είναι ασφαλής και αξιόπιστη.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι τα bulk carriers προσεγγίζουν λιμάνια με διαφορετικές προδιαγραφές και δυνατότητες ηλεκτροδότησης. Αυτό δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για

την εφαρμογή του cold ironing, καθώς τα πλοία πρέπει να διαθέτουν ευελιξία στη διασύνδεση με εγκαταστάσεις που μπορεί να λειτουργούν είτε σε υψηλή είτε σε χαμηλή τάση. Παράλληλα, η ηλικία μεγάλου μέρους του στόλου των bulk carriers —συχνά άνω των 15 ή και 20 ετών— σημαίνει ότι απαιτούνται εκτεταμένες ηλεκτρολογικές αναβαθμίσεις για να μπορούν να δεχτούν shore power, γεγονός που αυξάνει το κόστος υλοποίησης.

Επομένως, τα bulk carriers αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία για την εφαρμογή του cold ironing, καθώς η διαστασιολόγηση του συστήματος πρέπει να καλύπτει όχι μόνο τις βασικές ανάγκες λειτουργίας του πλοίου, αλλά και τις αιχμές ζήτησης που προκύπτουν κατά τις διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης. Παράλληλα, απαιτείται προσαρμοστικότητα στις τεχνικές προδιαγραφές και αναβάθμιση του υπάρχοντος εξοπλισμού, ώστε η σύνδεση με την ξηρά να είναι ασφαλής και αξιόπιστη.

Συνολικά, τα bulk carriers είναι πλοία μεγάλης σημασίας για το παγκόσμιο εμπόριο, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σχεδίασης και λειτουργίας. Η μελέτη των ενεργειακών τους αναγκών κατά τον ελλιμενισμό αποτελεί βασικό βήμα για την αξιολόγηση της εφαρμογής του cold ironing σε αυτή την κατηγορία πλοίων.

Σχήμα 4.1.1: Πλοίο ξηρού φορτίου χύδην

4.2 Ενεργειακές απαιτήσεις Bulk Carriers σε ελλιμενισμό

Κατά τον ελλιμενισμό, τα bulk carriers παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς όλα τα συστήματα που υποστηρίζουν τη λειτουργία του πλοίου και την ευημερία του πληρώματος παραμένουν σε λειτουργία. Επιπλέον, οι διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης χύδην φορτίου συνεπάγονται μεταβλητές και συχνά υψηλές καταναλώσεις ισχύος, οι οποίες δεν μπορούν να παραβλεφθούν στον σχεδιασμό συστημάτων cold ironing.

Οι βασικές κατηγορίες ηλεκτρικών καταναλώσεων περιλαμβάνουν:

- **Βασικά φορτία πλοίου**, όπως φωτισμός καταστρώματος και αμπαριών, συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης, επικοινωνίες και ηλεκτρονικά ναυσιπλοΐας.
- **Συστήματα διαβίωσης**, όπως θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός (HVAC), που εξασφαλίζουν συνθήκες άνεσης για το πλήρωμα.
- **Λειτουργικά φορτία**, όπως αντλίες έρματος, μηχανισμοί καταπακτών και κυρίως ο εξοπλισμός φορτοεκφόρτωσης (γερανοί, ταινιόδρομοι, συστήματα απορρόφησης σκόνης).
- **Βοηθητικά συστήματα ασφαλείας**, όπως συναγερμοί, πυρανίχνευση και πυρόσβεση, τα οποία πρέπει να παραμένουν συνεχώς ενεργά.

Η ιδιαιτερότητα των bulk carriers είναι ότι η κατανάλωση τους παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Σε περιόδους αναμονής, όπου το πλοίο βρίσκεται δεμένο χωρίς να πραγματοποιεί φορτοεκφόρτωση, η κατανάλωση περιορίζεται σε μερικές εκατοντάδες kW, αρκετά χαμηλότερη από άλλα είδη πλοίων όπως τα κρουαζιερόπλοια ή τα containerships. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια φορτοεκφόρτωσης, η λειτουργία γερανών και άλλων μηχανημάτων μπορεί να εκτοξεύσει την κατανάλωση σε επίπεδα πολλαπλάσια. Σε μεγάλα Capesize, για παράδειγμα, η διαφορά μεταξύ “idle mode” και πλήρους λειτουργίας μπορεί να υπερβεί το 200%.

Επιπλέον, η **διάρκεια παραμονής στα λιμάνια** είναι παράγοντας που επιβαρύνει τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες. Ένα bulk carrier μπορεί να παραμείνει αγκυροβολημένο για 24 έως και 48 ώρες, ανάλογα με το φορτίο και τις δυνατότητες του λιμένα. Αυτό σημαίνει ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι μόνο υψηλή κατά τις αιχμές, αλλά και εκτεταμένη χρονικά, οδηγώντας σε σημαντική συνολική απαίτηση ενέργειας ανά επίσκεψη σε λιμάνι.

Για την ανάλυση των ενεργειακών αναγκών, είναι πρακτική η ομαδοποίηση με βάση το **Deadweight (DWT)**, καθώς το μέγεθος του πλοίου σχετίζεται άμεσα με τον αριθμό και την ισχύ των συστημάτων που φέρει. Τα μικρότερα bulk carriers (Handysize – Supramax) διαθέτουν περιορισμένο εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης και επομένως χαμηλότερες καταναλώσεις, ενώ τα μεγαλύτερα (Capesize, VLBC) απαιτούν σημαντικά περισσότερη ισχύ.

4.2.1 Ομαδοποίηση με βάση το DWT

Η εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών των bulk carriers μπορεί να γίνει αποτελεσματικά με βάση το **Deadweight (DWT)**, το οποίο αποτελεί το βασικότερο κριτήριο κατηγοριοποίησης αυτής της ομάδας πλοίων. Η χωρητικότητα ενός bulk carrier καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την ισχύ των βοηθητικών μηχανημάτων όσο και το μέγεθος του εξοπλισμού φορτοεκφόρτωσης που διαθέτει, επομένως σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τον ελλιμενισμό.

Οι κύριες κατηγορίες που συναντώνται είναι οι εξής:

- **Handysize (10.000 – 35.000 DWT)**
- **Handymax / Supramax (35.000 – 60.000 DWT)**
- **Panamax (60.000 – 80.000 DWT)**
- **Capesize (80.000 – 200.000 DWT)**
- **Very Large Bulk Carriers – VLBC (>200.000 DWT)**

Η ενεργειακή απαίτηση διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθος. Τα μικρότερα πλοία (Handysize – Supramax) διαθέτουν περιορισμένα μέσα φορτοεκφόρτωσης και κατά συνέπεια χαμηλότερη κατανάλωση, ενώ τα μεγαλύτερα (Capesize, VLBC) έχουν πολλαπλάσιες ανάγκες, οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τα 2–3 MW κατά τη διάρκεια έντονης λειτουργίας.

Ενδεικτικά, τα εύρη κατανάλωσης τοποθετούνται ως εξής:

- **Handysize – Supramax**: 400 – 800 kW
- **Panamax**: 700 – 1.300 kW
- **Capesize**: 1.000 – 2.500 kW
- **VLBC**: > 2.500 kW

Η παρουσίαση αυτών των εύρων καταδεικνύει ότι η αύξηση του DWT συνοδεύεται από σημαντική άνοδο των ενεργειακών απαιτήσεων. Για τον σχεδιασμό συστημάτων cold ironing, αυτό σημαίνει ότι τα λιμάνια που υποδέχονται μεγαλύτερα bulk carriers πρέπει να διαθέτουν εγκαταστάσεις shore power με επαρκή ισχύ ώστε να καλύπτουν τις αιχμές κατανάλωσης που εμφανίζονται κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση φορτίου.

4.3 Ανάλυση δεδομένων σε δείγμα 93 bulk carriers

Στη μελέτη αυτή συλλέχθηκαν δεδομένα από δείγμα **93 πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (bulk carriers)**. Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν αφορούσαν αποκλειστικά τις **ενεργειακές απαιτήσεις των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό**, και συγκεκριμένα τις **μέγιστες** και τις **ελάχιστες** τιμές ηλεκτρικού φορτίου. Οι μέγιστες τιμές συνδέονται κυρίως με καταστάσεις **φορτοεκφόρτωσης** και πιθανώς ταυτόχρονης διαδικασίας **ballasting/de-ballasting**, ενώ οι ελάχιστες αντιστοιχούν σε περιόδους **παραμονής σε κατάσταση αναμονής (idle mode)**, όπου οι ενεργειακές ανάγκες είναι σαφώς περιορισμένες.

Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν με τη χρήση του προγράμματος **Excel**, με στόχο την κατηγοριοποίηση των πλοίων βάσει του Deadweight (DWT) και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις ενεργειακές απαιτήσεις των bulk carriers σε διαφορετικές κλίμακες χωρητικότητας. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η συσχέτιση των ενεργειακών αναγκών με το μέγεθος του πλοίου, καθώς και η δημιουργία μαθηματικών συσχετίσεων που μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόβλεψη της απαιτούμενης ισχύος σε μελλοντικές εφαρμογές cold ironing.

Για να καταστεί δυνατή η επεξεργασία των δεδομένων και η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, κρίθηκε απαραίτητη η ομαδοποίηση των bulk carriers σε κατηγορίες με βάση το Deadweight (DWT). Η παράμετρος αυτή αποτελεί το κυριότερο μέγεθος ταξινόμησης, καθώς αντανακλά την ικανότητα μεταφοράς φορτίου του πλοίου και σχετίζεται άμεσα με τις ενεργειακές του ανάγκες κατά τον ελλιμενισμό.

Στο πλαίσιο αυτό, τα 93 πλοία του δείγματος ταξινομήθηκαν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- 30.000 – 40.000 DWT
- 50.000 – 65.000 DWT
- 70.000 – 95.000 DWT
- 170.000 – 185.000 DWT

Για την επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν τρεις υπολογισμοί ποσοστών που σχετίζονται με την απόδοση των γεννητριών σε συνθήκες ελλιμενισμού. Οι δείκτες αυτοί αφορούσαν:

- το ποσοστό του μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου κατά τις διαδικασίες φόρτωσης/εκφόρτωσης σε σχέση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των γεννητριών,
- το ποσοστό του μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου κατά την παραμονή στο λιμάνι σε σχέση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ,
- και το ποσοστό του μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου κατά τις φορτοεκφορτώσεις σε σχέση με τη διαθέσιμη ισχύ των γεννητριών.

Η σημασία αυτών των υπολογισμών έγκειται στο γεγονός ότι αποτυπώνουν **τον βαθμό καταπόνησης των γεννητριών** στις διαφορετικές λειτουργικές φάσεις του πλοίου. Με άλλα λόγια, δείχνουν πόσο κοντά φτάνει το ηλεκτρικό φορτίο στις δυνατότητες του πλοίου, επιτρέποντας μια αρχική εκτίμηση για το εάν η εγκατεστημένη και διαθέσιμη ισχύς επαρκούν ώστε να καλύψουν τις αιχμές ζήτησης. Αν και τα αποτελέσματα αυτά δεν ενσωματώνονται στις μαθηματικές σχέσεις που ακολουθούν, η ανάλυσή τους θεωρήθηκε χρήσιμη για την καλύτερη κατανόηση της αξιοπιστίας και της αντοχής των ηλεκτροπαραγωγών συστημάτων.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες, στους οποίους αποτυπώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις τόσο κατά το στάδιο της φόρτωσης και εκφόρτωσης όσο και κατά την παραμονή του πλοίου στο λιμάνι, καθώς και τα ποσοστά που προαναφέρθηκαν.

No	DWT	Install Generator Capacity	Available Generator Capacity	Total Load (Cargo)	Total Load (Port)	Install Generator Load Factor % (cargo)	Install Generator Load Factor % (Port)	Generator Load Factor % (Cargo)
1	31896	800	800	674	254.9	84.25	31.86	84.25
2	32581	1320	880	702.26	250.8	53.20	19.00	79.80
3	33755	1800	1200	1055.7	304.5	58.65	16.92	87.98
4	33755	1800	1200	1055.7	304.5	58.65	16.92	87.98
5	33757	1800	1200	1055.7	304.5	58.65	16.92	87.98
6	34000	1710	1140	856.4	377.7	50.08	22.09	75.12
7	34000	1260	840	765	229.1	60.71	18.18	91.07
8	35300	1530	1020	831.4	299.8	54.34	19.59	81.51
9	37000	1500	1000	835	260	55.67	17.33	83.50
10	37000	1800	1800	1117.4	264	62.08	14.67	62.08
11	37000	1710	1140	1030.75	249.8	60.28	14.61	90.42
12	37000	1860	1860	1318.5	632	70.89	33.98	70.89

Πίνακας 4.3.1: Παρουσιάζει τα αποτελέσματα για bulk carriers της κατηγορίας 30.000 – 40.000 DWT, όπου καταγράφονται οι μέγιστες και ελάχιστες απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου κατά τον ελλιμενισμό, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές φόρτισης των γεννητριών

No	DWT	Install Generator Capacity	Available Generator Capacity	Total Load (Cargo)	Total Load (Port)	Install Generator Load Factor % (cargo)	Install Generator Load Factor % (Port)	Generator Load Factor % (Cargo)
13	52000	1320	880	826.3	306	62.60	23.18	93.90
14	55567	1440	1440	884.2	294.79	61.40	20.47	61.40
15	55616	1440	960	857.7	381	59.56	26.46	89.34
16	56015	1440	960	887.6	165	61.64	11.46	92.46
17	56032	1800	1200	1017.8	173	56.54	9.61	84.82
18	56704	1800	1200	1017.8	203.5	56.54	11.31	84.82
19	56716	1800	1200	1017.8	203.5	56.54	11.31	84.82
20	56804	1800	1200	1050	340	58.33	18.89	87.50
21	56810	1800	1200	1017.8	340	56.54	18.89	84.82
22	56816	2160	1440	1247.7	340	57.76	15.74	86.65
23	56898	2160	1440	1247.7	429.5	57.76	19.88	86.65
24	56899	2160	1440	1247.7	340	57.76	15.74	86.65
25	56988	2160	1440	1247.7	405.9	57.76	18.79	86.65
26	57050	2160	1440	1247.7	632	57.76	29.26	86.65
27	57070	1800	1200	1024	396.3	56.89	22.02	85.33
28	57081	1860	1240	1089	364	58.55	19.57	87.82
29	57185	1875	1250	1039.6	448.3	55.45	23.91	83.17
30	57227	1860	1240	1039.6	346.7	55.89	18.64	83.84
31	57266	1860	1240	1039.6	448.3	55.89	24.10	83.84
32	57275	1860	1300	1088.1	448.3	58.50	24.10	83.70
33	57573	1950	1000	901	448.3	46.21	22.99	90.10
34	57981	1500	960	835.1	321.5	55.67	21.43	86.99
35	58000	1440	960	815.32	375.4	56.62	26.07	84.93
36	58163	1440	1000	903.6	185.9	62.75	12.91	90.36
37	58677	1500	1440	837.44	190.2	55.83	12.68	58.16
38	58689	1440	1000	887.1	173	61.60	12.01	88.71
39	58731	1440	1220	957.5	192.3	66.49	13.35	78.48
40	60000	1500	2040	1198.7	183.8	79.91	12.25	58.76
41	63270	1440	2040	1135.4	221.2	78.85	15.36	55.66
42	63270	1500	1320	1147.1	369.2	76.47	24.61	86.90
43	63500	1830	1320	980.15	369.2	53.56	20.17	74.25
44	64000	2040	1560	1303.32	371.6	63.89	18.22	83.55
45	64000	2040	800	422.1	409.59	20.69	20.08	52.76

Πίνακας 4.3.2: Παρουσιάζει τα αποτελέσματα για bulk carriers της κατηγορίας 50.000 – 65.000 DWT, όπου αποτυπώνονται οι μέγιστες και ελάχιστες απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου κατά τον ελλιμενισμό, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές φόρτισης των γεννητριών.

.

No	DWT	Install Generator Capacity	Available Generator Capacity	Total Load (Cargo)	Total Load (Port)	Install Generator Load Factor % (cargo)	Install Generator Load Factor % (Port)	Generator Load Factor % (Cargo)
46	75008	1980	1300	702.7	347.66	35.49	17.56	54.05
47	75105	1980	1300	702.7	367.5	35.49	18.56	54.05
48	75172	2340	1600	770.5	245	32.93	10.47	48.16
49	75210	1800	1200	615.9	328	34.22	18.22	51.33
50	75311	1800	1200	674.75	328	37.49	18.22	56.23
51	75354	1800	1200	677.1	295	37.62	16.39	56.43
52	75750	1800	1200	536.2	200	29.79	11.11	44.68
53	76390	1800	1200	625.77	189.5	34.77	10.53	52.15
54	76583	1800	1200	651.33	165.47	36.19	9.19	54.28
55	76596	1800	1200	517.62	199.08	28.76	11.06	43.14
56	76598	1260	840	486.36	217.49	38.60	17.26	57.90
57	76619	1200	800	625.77	162.79	52.15	13.57	78.22
58	76636	1200	800	471.98	165.47	39.33	13.79	59.00
59	76633	1200	800	448.9	154.08	37.41	12.84	56.11
60	76635	1200	800	499.6	210.1	41.63	17.51	62.45
61	77997	1200	800	499.6	243.6	41.63	20.30	62.45
62	77998	1200	800	499.6	243.6	41.63	20.30	62.45
63	77998	1200	800	499.6	243.6	41.63	20.30	62.45
64	78056	1680	1120	764.7	243.6	45.52	14.50	68.28
65	79648	1680	1120	596.8	371.6	35.52	22.12	53.29
66	80800	1680	1120	473.9	264.3	28.21	15.73	42.31
67	80282	1680	1400	491	372.4	29.23	22.17	35.07
68	80310	2100	1480	491	363.9	23.38	17.33	33.18
69	80387	1530	1240	480.3	372.4	31.39	24.34	38.73
70	80686	1860	1240	480.3	372.4	25.82	20.02	38.73
71	80686	1860	1240	480.3	372.4	25.82	20.02	38.73
72	80700	2040	1360	490	372.4	24.02	18.25	36.03
73	81200	1800	1200	849.1	378.7	47.17	21.04	70.76
74	81359	1980	1320	626.8	391.9	31.66	19.79	47.48
75	82000	1840	630	801.3	353.9	43.55	19.23	127.19
76	82000	1200	1200	438.67	404.62	36.56	33.72	36.56
77	82145	1200	800	738.8	202	61.57	16.83	92.35
78	82688	1200	800	432.13	192.5	36.01	16.04	54.02
79	82936	1410	940	446.5	353.1	31.67	25.04	47.50
80	83688	2190	1460	605.9	410.1	27.67	18.73	41.50
81	93242	2250	1500	607.9	410.1	27.02	18.23	40.53
82	93268	2700	1800	621.9	507.6	23.03	18.80	34.55

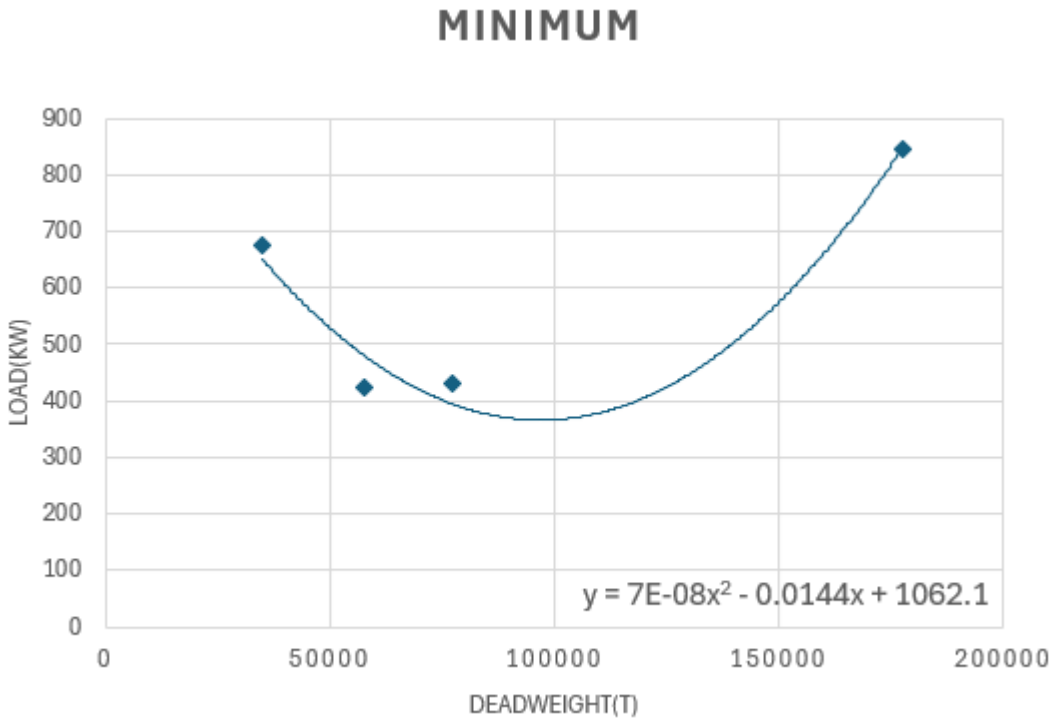
Πίνακας 4.3.3: Παρουσιάζει τα αποτελέσματα για bulk carriers της κατηγορίας 70.000 – 95.000 DWT, όπου καταγράφονται οι μέγιστες και ελάχιστες απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου κατά τον ελλιμενισμό, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές φόρτισης των γεννητριών

No	DWT	Install Generator Capacity	Available Generator Capacity	Total Load (Cargo)	Total Load (Port)	Install Generator Load Factor % (cargo)	Install Generator Load Factor % (Port)	Generator Load Factor % (Cargo)
83	174688	2190	1460	844.5	493.6	38.56	22.54	57.84
84	177897	2250	1500	1140.1	306.6	50.67	13.63	76.01
85	178838	2700	1800	1157.7	695.5	42.88	25.76	64.32
86	179166	2190	1460	1056.3	361.4	48.23	16.50	72.35
87	179276	2310	1460	888.8	324	38.48	14.03	60.88
88	179701	2280	1540	1100.98	974.4	48.29	42.74	71.49
89	179759	2280	1520	1129	210.64	49.52	9.24	74.28
90	180201	1800	1200	931.2	673.86	51.73	37.44	77.60
91	181016	2200	1800	963.36	673.86	43.79	30.63	53.52
92	181406	2250	1500	931.21	223.21	41.39	9.92	62.08
93	181447	1800	1200	958.37	218.34	53.24	12.13	79.86

Πίνακας 4.3.4: Παρουσιάζει τα αποτελέσματα για bulk carriers της κατηγορίας 170.000 – 185.000 DWT, όπου καταγράφονται οι μέγιστες και ελάχιστες απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου κατά τον ελλιμενισμό, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές φόρτισης των γεννητριών.

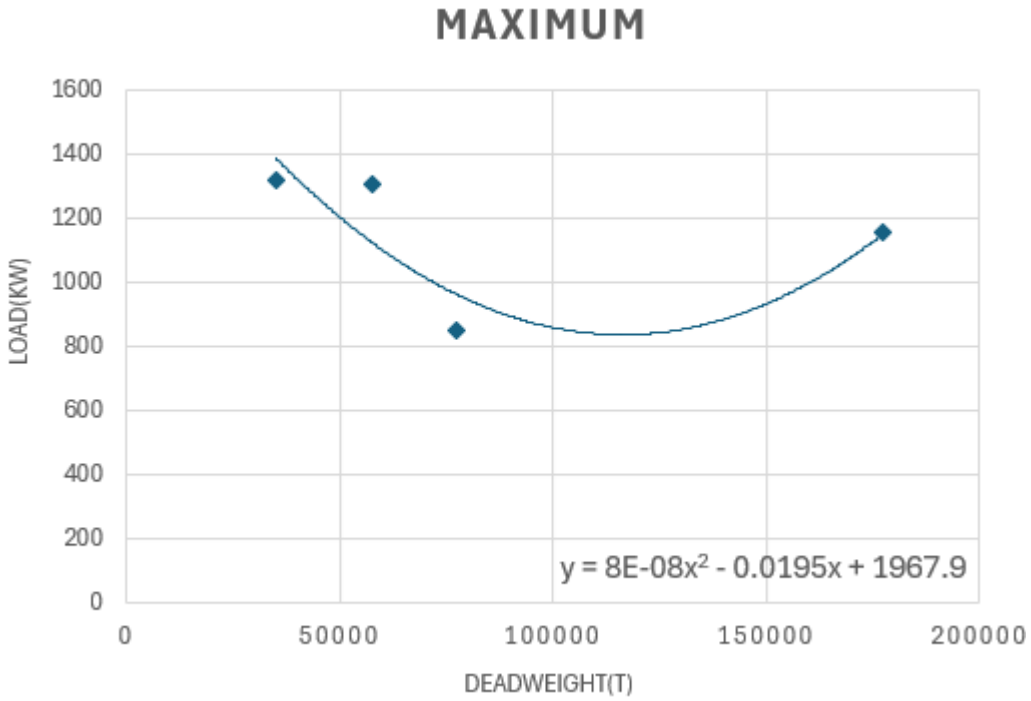
4.3.1 Γραφικές παραστάσεις φορτίου (Minimum – Maximum – Average)

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η γραφική αποτύπωση των αποτελεσμάτων για το σύνολο του δείγματος των 93 bulk carriers. Τα δεδομένα που προέκυψαν στο 5.3.1 απεικονίζονται ως συνάρτηση του Deadweight (DWT) έναντι του ηλεκτρικού φορτίου, εξετάζοντας διακριτά τις ελάχιστες, τις μέγιστες και τις μέσες τιμές κατανάλωσης κατά τον ελλιμενισμό. Για κάθε διάγραμμα χαράσσεται πολυωνυμική γραμμή τάσης δεύτερου βαθμού, ώστε να αποτυπώνεται η μη γραμμική μεταβολή των απαιτήσεων ισχύος με το μέγεθος του πλοίου· τα ευρήματα σχολιάζονται αμέσως μετά από κάθε γράφημα και αξιοποιούνται στη συνέχεια για τη διατύπωση των μαθηματικών συσχετίσεων.



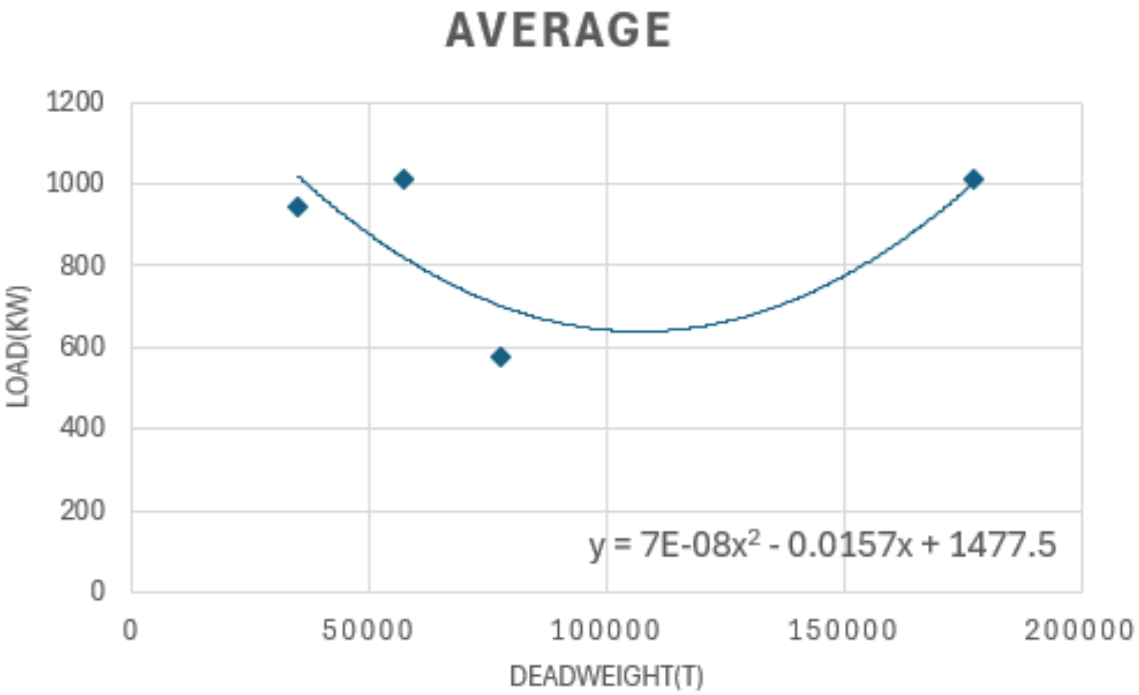
Σχήμα 4.3.1.1: Ελάχιστο ηλεκτρικό φορτίο κατά τον ελλιμενισμό συναρτήσει του Deadweight

Το διάγραμμα παρουσιάζει το ελάχιστο ηλεκτρικό φορτίο των bulk carriers σε συνάρτηση με το deadweight τους. Διαπιστώνεται ότι τα πλοία μεσαίου μεγέθους εμφανίζουν τις χαμηλότερες απαιτήσεις, ενώ μικρότερα και μεγαλύτερα πλοία παρουσιάζουν αυξημένες τιμές. Η τάση αυτή αποτυπώνεται μέσω της καμπύλης παλινδρόμησης.



Σχήμα 4.3.1.2: Μέγιστο ηλεκτρικό φορτίο κατά τον ελλιμενισμό (φόρτωση εκφόρτωση) συναρτήσει του Deadweight

Σε αντιπαραβολή με το προηγούμενο σχήμα, που απεικονίζει το ελάχιστο φορτίο, εδώ παρατηρούνται οι μέγιστες απαιτήσεις ισχύος κατά τις πιο έντονες λειτουργίες. Η καμπύλη ακολουθεί παρόμοια τάση, με χαμηλότερες τιμές στα μεσαία deadweight και αυξημένες απαιτήσεις στα άκρα, γεγονός που δείχνει ότι τα πλοία μικρού και μεγάλου μεγέθους εμφανίζουν μεγαλύτερες αιχμές κατανάλωσης σε σχέση με τα μεσαία.



Σχήμα 4.3.1.3: Μέσο ηλεκτρικό φορτίο κατά τον ελλιμενισμό συναρτήσει του Deadweight.

Τέλος το διάγραμμα του μέσου φορτίου επιβεβαιώνει την ίδια γενική συμπεριφορά που φάνηκε στα προηγούμενα δύο σχήματα (ελάχιστο και μέγιστο). Οι χαμηλότερες μέσες τιμές εμφανίζονται στα πλοία μεσαίου deadweight, ενώ οι υψηλότερες στα μικρά και στα πολύ μεγάλα πλοία. Η κατανομή αυτή υποδηλώνει ότι το μέγεθος του πλοίου επηρεάζει σημαντικά το επίπεδο κατανάλωσης, με τα μεσαία bulk carriers να παρουσιάζουν πιο «ισορροπημένες» απαιτήσεις ισχύος.

BULK CARRIER	
x: Deadweight(t)	y: Load(kW)
Ηλεκτρικό φορτίο	**Συναρτήσεις**
Μέγιστο	$y = 8E\text{-}08x^2 - 0.0195x + 1967.9$
Ελάχιστο	$y = 7E\text{-}08x^2 - 0.0144x + 1062.1$
Μέσος Όρος	$y = 7E\text{-}08x^2 - 0.0157x + 1477.5$

Σχήμα 4.3.1.4: Μαθηματικές σχέσεις συσχέτισης του Deadweight με τις ενεργειακές απαιτήσεις των bulk carriers (μέγιστο, ελάχιστο και μέσο ηλεκτρικό φορτίο).

Οι μαθηματικές σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση αποτυπώνουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη συσχέτιση ανάμεσα στο deadweight και τις ενεργειακές απαιτήσεις των bulk carriers. Μέσω αυτών των εξισώσεων μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων το ηλεκτρικό φορτίο ενός πλοίου, γνωρίζοντας μόνο το deadweight του, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά την εκτίμηση των αναγκών ηλεκτροδότησης σε εφαρμογές cold ironing. Παράλληλα, η διαφορά μεταξύ των καμπυλών ελάχιστου, μέγιστου και μέσου φορτίου αναδεικνύει το εύρος λειτουργίας των πλοίων και επιτρέπει την κατανόηση τόσο των βασικών όσο και των αιχμιακών απαιτήσεων ισχύος.

Επιπλέον, η χρησιμότητα αυτών των σχέσεων δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρητική ανάλυση αλλά επεκτείνεται και στην πράξη. Μπορούν να αξιοποιηθούν από λιμενικές αρχές και μηχανικούς για τη διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων cold ironing, διασφαλίζοντας ότι υπάρχει επαρκής αλλά και αποδοτική παροχή ισχύος για διαφορετικά μεγέθη bulk carriers.

5 Συμπεράσματα & Προτάσεις

5.1 Βασικά ευρήματα της μελέτης

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τις ενεργειακές απαιτήσεις των bulk carriers και έδειξε ότι η εφαρμογή του συστήματος cold ironing μπορεί να καλύψει τις ανάγκες τους, συμβάλλοντας στη μείωση εκπομπών και στο επιχειρησιακό όφελος. Μέσα από τη δημιουργία ηλεκτρικών ισολογισμών και τη στατιστική ανάλυση, προέκυψαν χαρακτηριστικές μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το φορτίο συναρτήσει του deadweight, παρέχοντας χρήσιμα εργαλεία για τον σχεδιασμό και την εκτίμηση απαιτήσεων ισχύος.

5.2 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις

Παρά τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία, είναι φανερό ότι υπάρχει ακόμη σημαντικό περιθώριο για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση. Ένα πρώτο βήμα είναι η συλλογή περισσότερων δεδομένων από bulk carriers σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα 93 πλοίων, ωστόσο ένας μεγαλύτερος αριθμός παρατηρήσεων θα μπορούσε να προσφέρει πιο ασφαλή και γενικευμένα συμπεράσματα. Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η καταγραφή της κατανάλωσης όχι μόνο σε ελλιμενισμό, αλλά και σε διαφορετικά επιχειρησιακά σενάρια, ώστε να αποτυπωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το προφίλ ζήτησης ισχύος των πλοίων.

Ένα δεύτερο σημείο που αξίζει περαιτέρω διερεύνηση αφορά την ανάπτυξη τυποποιημένων μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης. Οι σχέσεις που προέκυψαν στην παρούσα εργασία δείχνουν με σαφήνεια την τάση που υπάρχει μεταξύ deadweight και ηλεκτρικού φορτίου, αλλά η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εμπλουτίσει αυτά τα μοντέλα με περισσότερες παραμέτρους, όπως ο τύπος του φορτίου, η ηλικία του πλοίου ή τα χαρακτηριστικά του λιμένα. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα θα γίνουν ακόμη πιο ακριβή και πρακτικά για εφαρμογή από τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές συστημάτων cold ironing.

Τρίτον, έχει ιδιαίτερη αξία η εκπόνηση ολοκληρωμένων τεχνικοοικονομικών μελετών. Το cold ironing, αν και περιβαλλοντικά ωφέλιμο, συνοδεύεται από υψηλό κόστος εγκατάστασης και προσαρμογής, τόσο στα πλοία όσο και στις λιμενικές εγκαταστάσεις. Συνεπώς, απαιτείται μια συστηματική ανάλυση κόστους – οφέλους, η οποία να συνεκτιμά την αρχική επένδυση, τη μείωση των εκπομπών, τη συμμόρφωση με κανονισμούς και τα πιθανά οικονομικά κίνητρα. Μια τέτοια μελέτη θα μπορούσε να δείξει σε ποιες περιπτώσεις η εφαρμογή του cold ironing είναι πιο συμφέρουσα και σε ποιες απαιτούνται πρόσθετες ενισχύσεις ή εναλλακτικές λύσεις.

Τέλος, αξίζει να εξεταστούν συνδυαστικές ή υβριδικές λύσεις. Για παράδειγμα, η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στους λιμένες σε συνδυασμό με το cold ironing, ή η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα και την αξιοπιστία της τεχνολογίας. Μια τέτοια προσέγγιση θα επέτρεπε την παροχή καθαρής ενέργειας στα πλοία με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και ταυτόχρονα θα μείωνε την εξάρτηση από τα παραδοσιακά δίκτυα ηλεκτροδότησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Yara Marine. (n.d.). *Shore power system*. https://yaramarine.com/shore-power-system/?gclid=EAIaIQobChMIvITL_Nyv8AIVDxoGAB0eYQIEEAAYASAAEgJKevD_BwE

Safety4Sea. (n.d.). *Cold ironing: The role of ports in reducing shipping emissions*. https://safety4sea.com/cm-cold-ironing-the-role-of-ports-in-reducing-shipping-emissions/

D'Agostino, F., Farella, G., Mariscotti, A., & Santoro, C. (2021). *On estimating the port power demands for cold ironing applications*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/354039693_On_Estimating_the_Port_Power_Demands_for_Cold_Ironing_Applications

Port of Rotterdam. (2022). *Shore power in the port of Rotterdam*. https://www.portofrotterdam.com/en/doing-business/port-infrastructure/shore-power

DNV. (2023). Ανάλυση του ρεύματος ξηράς χαμηλής τάσης για πλοία (Αρ. Έκθεσης: 2023.156, Αναθ. 2). Havenbedrijf Rotterdam N.V.

https://ocp.teiath.gr/modules/document/file.php/NAFP_UNDER107/Εκπαιδευτικό%20υλικό/Παρουσιάσεις/10_Ηλεκτρικά_δίκτυα_πλοίων%28Εαρινό_2015%29.pdf

https://ocp.teiath.gr/modules/document/file.php/NAFP_UNDER107/Εκπαιδευτικό%20υλικό/Παρουσιάσεις/10_Ηλεκτρικά_δίκτυα_πλοίων%28Εαρινό_2015%29.pdf

http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/maritimerules/gl_i-1-3_e_new.pdf

(https://ocp.teiath.gr/modules/document/file.php/NAFP_UNDER107/Εκπαιδευτικό%20υλικό/Παρουσιάσεις/10_Ηλεκτρικά_δίκτυα_πλοίων%28Εαρινό_2015%29.pdf)

Tarnapowicz & German-Galkin, 2018,
https://www.researchgate.net/publication/322674277_International_Standardization_in_the_Design_of_Shore_to_Ship_-_Power_Supply_Systems_of_Ships_in_Port