

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου
Φυσικού Αερίου (LNG Carrier)

ΜΑΥΡΟΓΕΩΡΓΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

Τριμελής Επιτροπή :

Γ. ΖΑΡΑΦΩΝΙΤΗΣ (Επιβλέπων Καθηγητής)

Κ. ΣΠΥΡΟΥ

Ε. ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2020

Ευχαριστίες

Αυτή η διπλωματική εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Κατά τη πολυετή διάρκεια των σπουδών μου έμαθα αμέτρητα νέα πράγματα τόσο στο πεδίο της Ναυπηγικής και Μηχανολογίας όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Γεώργιο Ζαραφωνίτη που με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, αυτό των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG Carrier). Η καθοδήγηση του, όπως και της Ελευθερίας Ηλιοπούλου ήταν καθοριστική για την έρευνα στο αντικείμενο αυτό και στην ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταύρο Χατζηγηργόρη και την Maran Gas τόσο για την βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, όσο και για την πρακτική άσκηση που πραγματοποίησα στο τεχνικό τμήμα. Ευχαριστίες στον κ. Σταύρο Νιώτη από τον ABS (American Bureau of Shipping) για τη συμβολή του στις τεχνικές λεπτομέρειες των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Τέλος, δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση των σπουδών μου και της διπλωματικής εργασίας χωρίς την συνεχή υποστήριξη της οικογένειας μου. Συνεπώς, την διπλωματική αυτή την αφιερώνω στην αδελφή μου Ειρήνη και στους γονείς μου Κωνσταντίνα και Παναγιώτη.

Χαράλαμπος Μαυρογεώργης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Abstract

In our modern and fast evolving society, large amount of energy is needed for the well being of humans, which has as a result the pollution of the environment and the deterioration of human health because of the extended use fossil fuels. Apart of the numerous scientific breakthroughs in the fields of renewable energy, it is not yet possible to stop the mining of fossil fuels which arises the need to find a way to reduce the emissions to our environment. In this point of view, natural gas has gained a lot of interest in the last years, as the “greener” solution of fossil fuels. More and more households and businesses start to use natural gas for their needs, which creates the problem of supply – demand and also the transportation from the mining areas to the consumers either by pipelines or by sea.

The aim of this diploma thesis is to make a preliminary design of a Liquefied Natural Gas (LNG) carrier, to present the requirements and difficulties of LNG as a shipping cargo and investigate the advantages and disadvantages of existing designs. In the first chapters, numerous general things are presented, such as a short history of the LNG ships and the first designs. Following, there is a detailed explanation of the requirements of LNG, the rules and regulations and an explanation of the existing designs of cargo containment. Next, starts the preliminary design of an LNG carrier based on similar ships of the industry and taking into account the design challenges of the selected cargo containment, such as the geometric requirements. An analysis of the ship weight is then presented, which includes the preliminary strength assessment with the use of the program MARS2000® and the final calculation of the steel weight of the ship. Then, as all the basic characteristics known, with the use of the design package AVEVA Marine® the lines of the ships are designed, the volume of each tank is defined, the loading conditions are made and the basic intact stability requirements are examined. Next, the ship resistance is calculated with the use of CFD program SHIPFLOW® and lastly, an optimum propeller is designed for the design requirements.

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη και γρήγορα εξελισσόμενη κοινωνία απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας για τη διαβίωση των ανθρώπων, το οποίο έχει ως άμεσο αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων που επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων. Παρά τις σημαντικές εξελίξεις που έχουν γίνει στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δεν έχει καταστεί ακόμη δυνατόν να σταματήσει η εξόρυξη ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα να πρέπει άμεσα να βρεθεί κάποια λύση για τη μείωση των βλαβερών εκπομπών προς το περιβάλλον. Προκειμένου να μπορέσουν να καλυφθούν οι απαιτήσεις ενέργειας, το φυσικό αέριο έχει εισέλθει στο επίκεντρο ως την περισσότερη 'πράσινη' επιλογή των ορυκτών καυσίμων. Ολόένα και περισσότερα νοικοκυριά και επιχειρήσεις χρησιμοποιούν φυσικό αέριο για να καλύψουν τις ανάγκες τους, γεγονός που δημιουργεί το πρόβλημα της προσφοράς – ζήτησης και συνεπώς μεταφοράς του φυσικού αερίου από τις πηγές στους καταναλωτές είτε μέσω αγωγών είτε μέσω θαλάσσιων μεταφορών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πραγματοποιηθεί μια πλήρης προκαταρκτική μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (ΥΦΑ), να παρουσιασθούν οι απαιτήσεις και οι ιδιαιτερότητες του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως φορτίου και να ευρευθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υπάρχοντων σχεδιάσεων.

Αρχικά στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, όπως η ιστορική αναδρομή τους και οι πρώτες σχεδιάσεις. Έπειτα γίνεται ανάλυση των απαιτήσεων του ΥΦΑ, τους κανονισμούς που διέπουν τη μεταφορά του και παρουσιάζονται οι σχεδιάσεις που κυριαρχούν την αγορά αναλύοντας τα βασικά τεχνικά και σχεδιαστικά ζητήματα. Στη συνέχεια, ξεκινά η μελέτη και σχεδίαση ενός νέου πλοίου μεταφοράς ΥΦΑ βασιζόμενο σε στοιχεία από όμοια πλοία της αγοράς και λαβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές απαιτήσεις του επιλεγμένου συστήματος αποθήκευσης ΥΦΑ. Πραγματοποιείται ανάλυση των βαρών του υπο-σχεδίαση πλοίου στην οποία περιλαμβάνεται προμελέτη της αντοχής με το πρόγραμμα MARS2000® και συνεπώς τη τελική εκτίμηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Με γνωστά τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό σχεδίαση πλοίου, σχεδιάζονται στο σχεδιαστικό πακέτο AVEVA Marine® οι ναυπηγικές γραμμές, πραγματοποιείται η διαμερισματοποίηση των χώρων του πλοίου, η μελέτη των καταστάσεων φόρτωσης και τέλος ο έλεγχος της άθικτης ευστάθειας. Ακολουθεί ο υπολογισμός της αντίστασης του πλοίου υπό σχεδίαση με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου SHIPFLOW® και τέλος υπολογίζεται η βέλτιστη έλικα για την κατάσταση σχεδίασης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

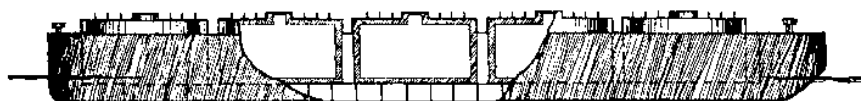
1. Ιστορική αναδρομή	7
Πιλοτικές σχεδιάσεις πλοίων ΥΦΑ	7
Ανάπτυξη πλοίων ΥΦΑ / Νεότερα συστήματα / Χρονοσειρά	10
2. Συστήματα αποθήκευσης ΥΦΑ	13
Απαιτήσεις συστήματος	13
Κατηγοριοποίηση συστημάτων ΥΦΑ	16
Συστήματα δεξαμενών αποθήκευσης	19
3. Χαρακτηριστικά πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ	37
Κατηγορίες πλοίων	37
Στατιστικά στοιχεία της αγοράς	40
4. Επιλογές σχεδίασης	41
5. Καθορισμός βασικών χαρακτηριστικών	46
Κύριες διαστάσεις	46
Αποστάσεις κατασκευαστικών νομέων	49
6. Καθορισμός απαιτήσεων αντοχής	52
7. Υπολογισμός κενού βάρους	55
Υπολογισμός βάρους της μεταλλικής κατασκευής (W_{STEEL})	55
Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού (W_{outfit}):	67
Υπολογισμός βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης ($W_{MACHINERY}$)	69
Υπολογισμός κέντρου βάρους κενού πλοίου	70
8. Ανάλυση νεκρού βάρους (DWT)	73
9. Ναυπηγικές γραμμές	75
10. Γραμμή φόρτωσης	76
11. Διαμερισματοποίηση	78
12. Καταστάσεις φόρτωσης	80
Full Load Departure (LNG=0.460 [t/m ³])	82
13. Υπολογισμός αντίστασης	87
Αντίσταση σύμφωνα με Holtrop-Mennen	87
Αντίσταση σύμφωνα με το SHIPFLOW®	89
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	91
14. Πρόωση πλοίου	92
15. Βιβλιογραφία	96
16. Παράρτημα Α – Γεωμετρία τομών στο πρόγραμμα MARS2000®	99
17. Παράρτημα Β – Σχέδιο Γενικής Διάταξης	103

18. Παράρτημα Γ – Χωρητικότητα δεξαμενών	104
19. Παράρτημα Δ – Υδροστατικός πίνακας.....	106
20. Παράρτημα Ε – Καταστάσεις φόρτωσης.....	108
Lightship	108
Full Load Departure (LNG=0.430 [t/m ³])	111
Full Load Departure (LNG=0.460 [t/m ³])	115
Full Load Departure (LNG=0.500 [t/m ³])	119
Scantling Load Departure (LNG=0.500 [t/m ³])	123
Full Load Arrival (LNG=0.460 [t/m ³])	127
Ballast Load Departure	131
Ballast Load Arrival	135
21. Παράρτημα Ζ – Αποτελέσματα Shipflow®	139
22. Παράρτημα Η – Σχέδιο έλικας.....	142

1. Ιστορική αναδρομή

Πιλοτικές σχεδιάσεις πλοίων ΥΦΑ

Η πρώτη επιτυχής μεταφορά ΥΦΑ (Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου) έγινε τον Ιανουάριο του 1959, με το πλοίο “*Methane Pioneer*”. Ο William Wood Prince, είχε την ιδέα το 1951 να μεταφέρει φυσικό αέριο σε υγροποιημένη μορφή από τη Λουιζιάνα μέχρι το ποταμό του Μισισσιπή, στις φάρμες του, μέσα σε ειδικά σχεδιασμένες δεξαμενές με τη βοήθεια φορτηγίδων. Λόγω της δυσκολίας του συγκεκριμένου εγχειρήματος, το 1954 (περίπου) ο W. Prince αποφάσισε να συνεργαστεί με την εταιρία “*Continental Oil Co.*” με έδρα την Οκλαχόμα. Έπειτα από οικονομοτεχνική έρευνα, προέκυψε ότι η μεταφορά ΥΦΑ για την διαδρομή που ο W. Prince είχε οραματιστεί δεν θα μπορούσε να είναι οικονομικά βιώσιμη, όμως παρατηρήθηκαν σημαντικές επιχειρηματικές ευκαιρίες στην αγορά, για τη μεταφορά του ΥΦΑ με πλοίο σε υπερωκεάνια ταξίδια. Άμεσο αποτέλεσμα ήταν το 1955 να δημιουργήσουν από κοινού την επιχείρηση “*Constock International Methane LTD*” που ως κύριο στόχο είχαν την έρευνα και ανάπτυξη ενός καινοτόμου πλοίου μεταφοράς ΥΦΑ. Προκειμένου να μάθουν για τις απαιτούμενες προδιαγραφές που θα πρέπει να έχει ένα τέτοιο πλοίο, αποφάσισαν το 1955 να ναυπηγήσουν μια φορτηγίδα ως «πιλοτικό» πλοίο, παρά τις οικονομικές επιπτώσεις που είχαν μελετήσει πως θα έχουν. Σχεδιαστικά, η φορτηγίδα αποτελούταν από πέντε κυλινδρικές δεξαμενές (διαμέτρου 15m) συνολικής χωρητικότητας 5.500 m³, αποτελούμενες από ανοξείδωτο χάλυβα (18/8 Grade) και ως υλικό μόνωσης χρησιμοποιήθηκε ξύλο τύπου Balsa και μονωτικός περλίτης. Το υλικό μόνωσης (ξύλο) ήταν εσωτερικά του ανοξείδωτου χάλυβα, προκειμένου να προστατεύσει το χάλυβα από τις κρυογενικές επιπτώσεις και ο μονωτικός περλίτης πάχους 1m τοποθετήθηκε εξωτερικά των δεξαμενών για θερμική μόνωση. Να σημειωθεί, ότι εκείνη την εποχή οι γνώσεις γύρω από την ψαθυρή θραύση ήταν πολύ περιορισμένες, άρα και οι σχεδιαστές δεν γνώριζαν πως να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα με τον καταλληλότερο τρόπο. Για την αποφυγή καταστροφικών συνεπειών έναντι συγκρούσεων / προσaráξεων η φορτηγίδα κατασκευάστηκε με διπλά τοιχώματα. Στην εικόνα 1, παρουσιάζεται η γενική μορφή της φορτηγίδας.



Εικόνα 1 - Φορτηγίδα Methane (πηγή: Shipping Innovation)

Μετά τη κατασκευή της φορτηγίδας, υπήρξαν πολλά προβλήματα που οδήγησαν στη μη αποδοχή της από τους νηογνώμονες (classification approval) και αφορούσαν κυρίως στην ανεπαρκή μόνωση και καταστροφή του περιβλήματος των δεξαμενών λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας. Όμως από τη διαδικασία αυτή, παρατηρήθηκαν κάποιες βασικές απαιτήσεις που θα πρέπει να καλύπτουν τα συστήματα αποθήκευσης φορτίου και πιο συγκεκριμένα, απαιτήσεις όπως ακινητοποίηση των δεξαμενών υπό την επίδραση των κινήσεων του πλοίου, προβλήματα μηχανικής καταπόνησης, ισχυρά φαινόμενα συστολής / διαστολής όλης της μεταλλικής κατασκευής και η απαίτηση συστήματος δεξαμενών που να μπορούν να ανταποκριθούν στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Έπειτα από την αποτυχημένη ναυπήγηση της φορτηγίδας, κύριος στόχος ήταν να σχεδιαστούν κατάλληλες δεξαμενές και συστήματα αποθήκευσης του φορτίου, που να αντιμετωπίζουν τις ιδιαιτερότητές του και να μπορούν να το μεταφέρουν σε μακρινές αποστάσεις. Το 1957 η πίεση για ναυπήγηση πλοίου μεταφοράς ΥΦΑ έγινε πιο αισθητή, καθώς πέρα από τη *Constock*, το Βρετανικό Συμβούλιο Αερίων Καυσίμων (British Gas Council) εισήλθε στην όλη προσπάθεια που γινόταν. Αποφασίστηκε από κοινού να γίνει η μετατροπή ενός υπάρχοντος πλοίου ξηρού φορτίου (Dry cargo ship), σε πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ. Το πλοίο που επιλέχθηκε για μετατροπή ήταν το "*Normati*", ένα πλοίο ξηρού φορτίου, που είχε χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο πλοίο ήταν λόγω των μεγάλων δεξαμενών θαλασσίου έρματος (Water Ballast Tanks) που επέτρεπαν επαρκή ευστάθεια και βύθιση λόγω της χαμηλής πυκνότητας του φορτίου (ΥΦΑ). Το πλοίο μετά την επιτυχή μετασκευή, μετονομάστηκε σε "*Methane Pioneer*".

Το "*Methane Pioneer*" μετασκευάστηκε σε πλοίο χωρητικότητας 5,000 m³ το οποίο αποτελούταν από πέντε (5) δεξαμενές πρισματικού τύπου με κύριο υλικό το αλουμίνιο και για μόνωση εξωτερικά των τοιχωμάτων της δεξαμενής, τοποθετήθηκε ξανά ξύλο τύπου Balsa πάχους 300 mm. Το ξύλο που τοποθετήθηκε εξωτερικά των δεξαμενών είχε διπλό σκοπό, πρωταρχικά τη μόνωση των δεξαμενών και δευτερευόντως τη λειτουργία του ως δευτερεύον στρώμα προστασίας σε περίπτωση διαρροής. Η πρώτη δοκιμαστική διαδρομή ξεκίνησε στις 28 Ιανουαρίου 1959 από το Calcasieu river (Λουιζιάνα, Αμερική) και έπειτα από 27 ημέρες στις 20 Φεβρουαρίου 1959 έφτασε στον προορισμό του στο Canvey Island (Μεγάλη Βρετανία) χωρίς προβλήματα, πραγματοποιώντας το πρώτο ταξίδι μεταφοράς ΥΦΑ και σηματοδοτώντας το ξεκίνημα μια νέας εποχής. Τέλος, το 1960 η "*Shell*" αγόρασε το 40% των μετοχών της "*Constock International Methane LTD*" και από κοινού μετονομάστηκε σε "*Conch International Methane*".



Εικόνα 2 - *Methane Pioneer* (Πηγή: *Shippingtandy*)

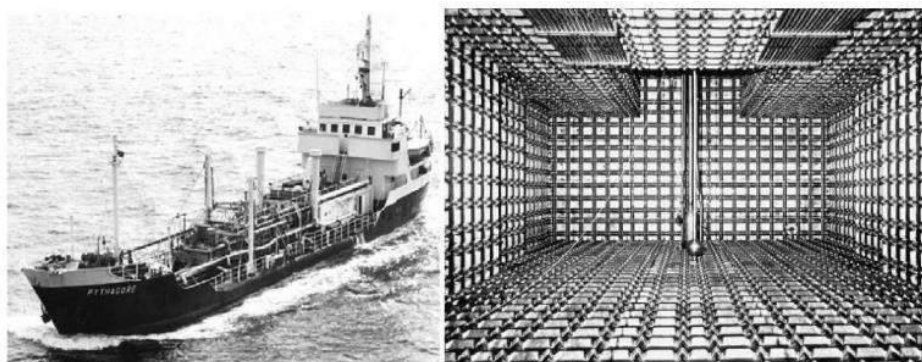
Πέρα από τη μελέτη και ανάπτυξη που γινόταν από την *Constock* και το Βρετανικό Συμβούλιο Αερίων Καυσίμων, την ίδια περίοδο υπήρχε στο παρασκήνιο και η Γαλλία που εξέταζε και έκανε δική της έρευνα πάνω στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και τα συστήματα αποθήκευσης φορτίου. Παρατηρώντας τις ευκαιρίες που υπήρχαν από την εισαγωγή ΥΦΑ στην Γαλλία, έγινε επιτακτική ανάγκη επέκτασης της ναυτιλίας στη μεταφορά ΥΦΑ, με αποτέλεσμα να γίνει μια συνεργασία μεταξύ πολλών εταιρειών όπως οι *Worms*, *Air Liquide*, *Gaz de France*, *Gazocean*, κ.α. για την πιο άμεση ανάπτυξη. Έτσι αποφασίστηκε προκειμένου να επιβεβαιώσουν όλη τη θεωρητική έρευνα που είχαν πραγματοποιήσει, να την

εφαρμόσουν πάνω σε πραγματικές καταστάσεις. Το 1961 ξεκίνησαν από κοινού τη μετασκευή ενός πλοίου τύπου “Liberty” και το 1962 ολοκλήρωσαν τη μετασκευή με την έγκριση του Bureau Veritas. Το πλοίο, με την ονομασία «*Beauvais*», μετασκευάστηκε με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ και για αυτό, η σχεδίαση του αποτελούταν από 3 δεξαμενές διαφορετικής φιλοσοφίας / τεχνολογίας. Η πρώτη δεξαμενή ήταν αλουμινένια κατασκευή πρισματικής μορφής και χωρητικότητας 400 m³ (*Atlantique Design*). Η δεύτερη είχε μια σύνθετη κυλινδρική μορφή χωρητικότητας 120 m³ κατασκευασμένη από χάλυβα με κραμάτωση 9% Νικελίου (*Dunkerque and Bordeaux*). Η τρίτη δεξαμενή ήταν αλουμινένια κατασκευής κράματος AG-4, κατακόρυφης κυλινδρικής μορφής και χωρητικότητας 120 m³ (*Chantier du Trait*).



Εικόνα 3 - *Beauvais* (Πηγή: GDF Suez)

Το 1964 χτίστηκε ακόμη ένα πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ για πειραματικούς σκοπούς με την ονομασία “*Pythagore*”, παρά την ύπαρξη εμπορικών πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ από την Conch και πιο συγκεκριμένα τα “*Methane Princess*” και “*Methane Progress*”. Η σχεδίαση του “*Pythagore*” αποτελούταν από δύο δεξαμενές μεμβρανικού και πρισματικού τύπου με συνολική χωρητικότητα 630 m³. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου πειραματικού πλοίου ΥΦΑ προήλθε από την εταιρεία *Tecnigaz*, θυγατρική εταιρία της *Gazosean*. Το καινοτόμο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου πλοίου, ήταν το μεμβρανικό του σύστημα αποθήκευσης ΥΦΑ, που έπειτα από βελτιώσεις είχε ως αποτέλεσμα τη γέννηση του συστήματος “*Tecnigaz Mark I*”. Πριν την κατασκευή του *Pythagore*, είχε γίνει καταχώρηση πατέντας του συγκεκριμένου συστήματος με εφευρέτη της ιδέας αυτής τον Bo Bengtsson.



Εικόνα 4 - *Pythagore* / Εσωτερικό δεξαμενών (Πηγή: GTT)

Σημειώνεται ότι το 1954 ο νηογνώμονας Norske Veritas έδωσε έγκριση στον Dr. Øivind Lorentzen να κατασκευάσει πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ με δεξαμενές σφαιρικής μορφής, που η συγκεκριμένη σχεδίαση μετά από κάποια χρόνια θα κυριαρχήσει την αγορά.

Ανάπτυξη πλοίων ΥΦΑ / Νεότερα συστήματα / Χρονοσειρά

Η γνώση που αποκτήθηκε από τα παραπάνω πιλοτικά πλοία (1950-1960) για τη μεταφορά ΥΦΑ, είχε ως αποτέλεσμα την εξέλιξη των συστημάτων δεξαμενών αποθήκευσης. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια αξιοσημείωτα γεγονότα:

- 1960 - 1970

Τα πρώτα πλοία που κατασκευάστηκαν εξ αρχής για εμπορικούς σκοπούς και όχι πειραματικούς ήταν τα “*Methane Princess*” και “*Methane Progress*”, που ήταν αποτέλεσμα της καλής λειτουργίας του “*Methane Pioneer*”. Τα πλοία αυτά παραδόθηκαν στις αρχές του 1964, είχαν χωρητικότητα 27,400 m³ το καθένα (9 δεξαμενές, αυτό-υποστηριζόμενες / self-supporting) και ο σκοπός τους ήταν η μεταφορά ΥΦΑ από την Αλγερία (την πηγή ΦΑ στο Hassi R'Mel), προς το Ηνωμένο Βασίλειο. Κάποιους μήνες αργότερα από την κατασκευή τους, τα δύο αυτά πλοία για πρώτη φορά στην ιστορία, εκμεταλλεύτηκαν το εξατμιζόμενο αέριο (boil-off gas) ως καύσιμο για τις κύριες μηχανές ή για τη λειτουργία βοηθητικών μηχανημάτων, σε αντίθεση με την απελευθέρωση του ΦΑ στην ατμόσφαιρα, όπως γινόταν προηγουμένως.



Εικόνα 5 - *Methane Progress* (Αρ.) (Πηγή: Helderline), *Methane Princess* (Δε.) (Πηγή: Naviearmatori)

Το 1965, τέθηκε σε λειτουργία το τρίτο πλοίο κατασκευασμένο για εμπορική χρήση, το “*Jules Verne*”, ένα πλοίο χωρητικότητας 25,500 m³ (6 κυλινδρικές δεξαμενές) Γαλλικών συμφερόντων.



Εικόνα 6 - *Jules Verne* (Πηγή: ENGIE, ELLEBE, DR)

Το 1969 κατασκευάστηκε (συμβόλαιο 1967) για πρώτη φορά πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ με σύστημα δεξαμενών μεμβρανικού τύπου από την “*Gaz Transport*”, ένα σύστημα που μέχρι και σήμερα (με βελτιώσεις) αποδεικνύεται ως ένα από τα κυρίαρχα συστήματα δεξαμενών.

Το σύστημα εφαρμόστηκε στο πλοίο “Polar Alaska”, έπειτα από επιτυχημένα πειράματα σε πλοία μεταφοράς υγραερίου (LPG – Liquefied Petroleum Gas) και η συνολική χωρητικότητα ήταν 71,500 m³.

- 1970 – 1980

Το 1971 κατασκευάστηκε το “Descartes”, το πρώτο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ με το σύστημα μεμβρανικών δεξαμενών από την “Tecnigaz”, που και αυτό με βελτιώσεις θα γίνει ένα από τα κυρίαρχα συστήματα δεξαμενών. Και σε αυτό το σύστημα είχαν πραγματοποιηθεί προηγουμένως πειράματα πάνω σε πλοία μεταφοράς υγραερίου (LPG).

Το 1973 κατασκευάστηκε το πρώτο πλοίο με σφαιρικές δεξαμενές με όνομα “Norman Lady”. Η συνολική χωρητικότητα ήταν 87,600 m³ και αποτελούταν από 5 ξεχωριστές σφαιρικές δεξαμενές. Το “Norman Lady” κατασκευάστηκε στη Νορβηγία από το ναυπηγείο Moss Rosenberg. Το συγκεκριμένο σύστημα δεξαμενών, παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχει μειωθεί δραματικά η κατασκευή του σε νεότευκτα πλοία, ήταν το σύστημα που οι περισσότεροι πλοιοκτήτες προτίμησαν την εποχή εκείνη (μέχρι το 2000), με αποτέλεσμα την ραγδαία εξέλιξη του.



Εικόνα 7 - Norman Lady (Πηγή: Fleetmon)

Τον Ιούλιο του 1979 ήταν μία σημαντική περίοδος για τη ναυτιλία και την ασφάλεια των πλοίων ΥΦΑ, διότι υπήρξαν δύο προσαράξεις πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, τον Ιούνιο το πλοίο “El Paso Paul Kaiser” και το Δεκέμβριο το “LNG Taurus”. Για να αποφευχθεί η περιβαλλοντική μόλυνση από το “El Paso Paul Kaiser” έγινε για πρώτη φορά η μεταφορά του ΥΦΑ από πλοίο σε πλοίο (ship-to-ship transfer). Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται πολύ αυτήν την εποχή στα πλοία τύπου FPSO, FSRU.

- 1980 – 1990

Το 1989 πραγματοποιήθηκε παραγγελία (παράδοση 1993) δύο πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, το “Polar Eagle” και “Arctic Sun” τα οποία είχαν ένα νέο καινοτόμο σύστημα δεξαμενών, το IHI-SPB με συνολική χωρητικότητα 87,500 m³ το καθένα. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές είναι αυτό-υποστηριζόμενες (self-supporting), έχουν ενιαία διαμήκη φρακτή στο επίπεδο συμμετρίας (center line) και αρκετά εσωτερικά εγκάρσια ενισχυτικά.

- 2000 -2010

Το 2006 κατασκευάστηκε το πρώτο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ το οποίο έχει εγκατεστημένη μονάδα επανυγροποίησης των εξατμιζόμενων αερίων (reliquefaction unit). Με το σύστημα αυτό δεν θα υπάρχουν «χαμένα» εξατμιζόμενα αέρια από το φορτίο του ναυλωτή, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της μεταφοράς ΥΦΑ.

Την ίδια χρονιά τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ, το “Provalys”, με κινητήρα διπλού καυσίμου (dual-fuel), δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιείται το γνωστό ναυτιλιακό καύσιμο (HFO) αλλά και εξατμιζόμενα αέρια από το φορτίο (boil-off gas). Το σύστημα πρόωσης είναι ηλεκτρικό (electric propulsion) και οι ηλεκτρογεννήτριες είναι διπλού καυσίμου (Diesel + LNG) από την Wärtsilä.

Το 2007 πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Αγγλία, η παράδοση του φορτίου (ΥΦΑ) σε χερσαίες εγκαταστάσεις σε αέρια και όχι σε υγροποιημένη μορφή. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει το πλεονέκτημα, ότι στις περιοχές που χρησιμοποιούν ΦΑ σε μικρή ποσότητα και δεν αποτελεί το ΦΑ την κύρια πηγή ενέργειας στη περιοχή αυτή, δεν είναι οικονομικά συμφέρον να κατασκευαστούν εγκαταστάσεις που να δέχονται το ΦΑ υγροποιημένο και να το αεριοποιούν. Έτσι, το πλοίο θα πρέπει να είναι σε θέση να παραδίδει στις περιοχές αυτές το ΦΑ σε αέρια μορφή και όχι υγροποιημένη. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτά τα πλοία δίνονται σε επόμενο εδάφιο.

2. Συστήματα αποθήκευσης ΥΦΑ

Απαιτήσεις συστήματος

Το πιο βασικό χαρακτηριστικό που καθορίζει πλήρως ένα πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ, είναι το σύστημα αποθήκευσης του φορτίου μέσα στις δεξαμενές (containment system). Όπως έχει ήδη αναφερθεί από όλα τα παραπάνω, το ΥΦΑ έχει πολύ υψηλές απαιτήσεις για να μεταφερθεί υγροποιημένο. Έτσι, ειδικά συστήματα έχουν εφευρεθεί και δοκιμαστεί σε δύσκολες συνθήκες, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εμπορικούς σκοπούς, με ασφάλεια. Η κατάσταση ενός πλοίου μεταφοράς ΥΦΑ εξαρτάται πρωταρχικά από το σύστημα δεξαμενών. Ένα καλό σύστημα δεξαμενών θα αποφέρει στον πλοιοκτήτη αυξημένα έσοδα και μείωση των εξόδων, αποφυγή διαρροής του φορτίου άρα και επισκευή των δεξαμενών ή ακόμη χειρότερα διαρροή φορτίου στη μεταλλική κατασκευή με αποτέλεσμα την αστοχία του εσωτερικού περιβλήματος του πλοίου λόγω ψαθυρής θραύσης. Οι απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτει ένα σύστημα αποθήκευσης ΥΦΑ είναι γνωστές, αλλά λόγω της μικρής ιστορίας των πλοίων αυτών (από το 1959) σε σχέση με άλλα πλοία (πχ. δεξαμενόπλοια) και λόγω της περιορισμένης έρευνας πάνω στο αντικείμενο αυτό, οι πλοιοκτήτες οφείλουν να παρακολουθούν προσεκτικά τη συμπεριφορά του φορτίου και να τηρούν επακριβώς τις διαδικασίες χειρισμού και φορτοεκφόρτωσης του φορτίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές απαιτήσεις που θα πρέπει να έχουν τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και τα συστήματα αποθήκευσης του:

- Αποθήκευση φορτίου στους -162°C (σημείο βρασμού ΥΦΑ) σε ατμοσφαιρική ή ελάχιστα υψηλότερη.

Τα υλικά που έρχονται σε επαφή με το ΥΦΑ, θα πρέπει να έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο που να μην επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά τους σε αυτή τη θερμοκρασία (πχ. μηχανική αντοχή). Περαιτέρω, θα πρέπει να έχει γίνει πρόβλεψη της μεταβολής της συμπεριφοράς των στοιχείων που έρχονται σε επαφή με το ΥΦΑ (αντλίες, σωληνώσεις, κλπ.) στη θερμοκρασία αυτή και να αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα συστολής - διαστολής.

- Επαρκή μόνωση του φορτίου για την ελαχιστοποίηση των εξατμιζόμενων αερίων (boil-off gas).

Εφόσον τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ δεν έχουν συστήματα ψύξης του φορτίου, είναι αναμενόμενο να υπάρχει ροή θερμότητας προς τις δεξαμενές, με αποτέλεσμα το φορτίο που ξεπερνάει τη θερμοκρασία βρασμού να εξατμίζεται. Για την εμπορική λειτουργία του πλοίου και τα ναυλοσύμφωνα, το ποσοστό του φορτίου το οποίο εξατμίζεται (BOG rate) είναι πολύ σημαντικό καθώς καθορίζει πόσο φορτίο θα παραδοθεί τελικά στο ναυλωτή σε σχέση με αυτό που φορτώθηκε στο πλοίο. Έτσι ένα πλοίο προτιμάται έναντι άλλου και λόγω του ποσοστού αυτού. Τυπικές τιμές του εξατμιζόμενου αερίου είναι:

$$BOG_{rate} = 0.07\% \text{ έως } 0.18\% \text{ [Volume per day]}$$

Σημειώνεται πως το BOG rate ως μέγεθος δεν έχει καθοριστική σημασία, αφού ορίζεται ως ο εξατμιζόμενος όγκος προς την ημέρα. Όμως το κάθε πλοίο έχει διαφορετική ταχύτητα υπηρεσίας, άρα και μια συγκεκριμένη διαδρομή θα καλυφθεί σε διαφορετικό χρόνο από κάθε πλοίο. Συνεπώς, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το ζεύγος ταχύτητα υπηρεσίας – BOG rate για τη ναύλωση ενός πλοίου. Περαιτέρω, πολλά πλοία (και κυρίως τα μεγαλύτερα) είναι εξοπλισμένα με μονάδες

επανυγροποίησης, με σκοπό τη μείωση του ποσοστού χαμένων εξατμιζόμενων αερίων, δηλαδή των αερίων που δε χρησιμοποιούνται ως καύσιμο. Τέλος, λόγω χρήσης των εξατμιζόμενων αερίων στην κύρια μηχανή και τον βοηθητικό εξοπλισμό του πλοίου, αν υπάρχει αυξημένη κατανάλωση τότε γίνεται εξαναγκασμένος βρασμός του ΥΦΑ (forced BOG) προκειμένου να δημιουργηθούν επιπλέον αέρια προς χρήση.

- Σύστημα διαχείρισης των εξατμιζόμενων αερίων για την αποφυγή απελευθέρωσης στην ατμόσφαιρα.

Τα πρώτα χρόνια μεταφοράς του ΥΦΑ, τα εξατμιζόμενα αέρια απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα μέχρι που το 1964 τα “Methane Progress” και το “Methane Princess” ξεκίνησαν να το εκμεταλλεύονται. Όταν δεν απελευθερώνονται τα εξατμιζόμενα αέρια υπάρχουν πολλαπλά οφέλη. Πέρα από το προφανές ότι αποτρέπεται η περιβαλλοντική ρύπανση, τα εξατμιζόμενα αέρια χρησιμοποιούνται για την πρόωση του πλοίου (αρχικά σε πρόωση με στροβίλους και έπειτα σε μηχανές διπλού καυσίμου) μειώνοντας πάρα πολύ την κατανάλωση καυσίμου ντίζελ αλλά και την ανάγκη για δεξαμενές μεγάλης χωρητικότητας σε καύσιμο (HFO Tanks). Επιπλέον, η απελευθέρωση αερίων από το πλοίο επιφέρει πολύ μεγάλα προβλήματα σε θέματα ασφαλείας, διότι το νέφος αερίων που απομακρύνεται από το πλοίο θα πρέπει να απομακρυνθεί με γρήγορο ρυθμό για μην υπάρξει ανεπιθύμητη ανάφλεξη.

- Αντοχή σε φαινόμενα δυναμικών φορτίσεων λόγω ελεύθερων επιφανειών (Sloshing)

Το φαινόμενο αυτό δεν είναι νέο, αφού είχε παρατηρηθεί στα δεξαμενόπλοια πριν από αρκετά χρόνια. Ουσιαστικά αυτό συμβαίνει όταν οι δεξαμενές δεν έχουν πληρωθεί στη μέγιστη χωρητικότητα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται επιδράσεις λόγω της ελεύθερης επιφάνειας. Στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και πιο συγκεκριμένα στα μεμβρανικά συστήματα αποθήκευσης, το φαινόμενο γίνεται πιο επίφοβο λόγω του πάχους του πρώτου περιβλήματος (primary barrier), που συνήθως είναι ιδιαίτερα λεπτό (0.7 με 1.5 mm). Όμως, πέρα από το πρώτο περίβλημα χρειάζεται λεπτομερής μελέτη στις κρουστικές αυτές φορτίσεις, διότι λόγω των παραμορφώσεων του πρώτου περιβλήματος είναι πιθανό να αστοχήσει το μονωτικό υλικό με αποτέλεσμα σε περίπτωση διαρροής φορτίου, η μόνωση να μη μπορέσει να περιορίσει τη διαρροή, όπως απαιτεί ο κώδικας IGC. Στην πράξη, για να αποφευχθεί αστοχία λόγω sloshing, οι κατασκευαστές των συστημάτων αποθήκευσης προδιαγράφουν τα όρια πλήρωσης των δεξαμενών (σε μεμβρανικού τύπου) ή κατασκευάζουν τις δεξαμενές με εγκάρσιες φρακτές που αποσβένουν την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας (swash bulkhead).

- Σύστημα αερισμού των δεξαμενών και πλήρωση τους με αδρανή αέρια.

Όπως υπάρχει στα δεξαμενόπλοια ειδικό σύστημα το οποίο εισάγει αέρια στις δεξαμενές φορτίου για να απομακρυνθεί το οξυγόνο, κάτι παρόμοιο υπάρχει και στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. Αν και δεν γίνεται εισαγωγή αδρανών αερίων όταν υπάρχει φορτίο (όπως γίνεται στα δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια του ταξιδιού), διότι ο χώρος θα έχει ήδη εξατμιζόμενα αέρια και όχι οξυγόνο, το σύστημα είναι απαραίτητο στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ για τις διαδικασίες δεξαμενισμού. Κατά το δεξαμενισμό για λόγους ασφαλείας δεν επιτρέπεται να αδειάζει η δεξαμενή από το φορτίο και να εισαχθεί σε αντικατάσταση αέρας από την ατμόσφαιρα (άρα και οξυγόνο) αφού θα οδηγήσει σε ένα ισχυρά εκρηκτικό μείγμα. Για αυτό το λόγο πρώτα απομακρύνονται

τα εξαμιζόμενα αέρια από κάποια άλλα αδρανή και όταν ολοκληρωθεί η απομάκρυνση, τότε ξεκινά η εισαγωγή αέρα στις δεξαμενές και σε όλες τις σωληνώσεις. Περαιτέρω, αδρανή αέρια χρησιμοποιούνται επίσης για την πλήρωση των χώρων εξωτερικά των περιβλημάτων των δεξαμενών και εσωτερικά του διπλού τοιχώματος του πλοίου για την αποφυγή κινδύνων στη περίπτωση διαρροής φορτίου.

- Αντοχή σε ισχυρά φαινόμενα συστολής και διαστολής

Εφόσον το φορτίο είναι στους -162°C , θα υπάρξει πολύ μεγάλη συστολή σε όλα τα υλικά που έρχονται σε επαφή με αυτό, κατά τη διάρκεια που μεταφέρεται το φορτίο. Όταν όμως δεν υπάρχει φορτίο μέσα στις δεξαμενές, όλη η μεταλλική κατασκευή του πλοίου και της δεξαμενής θα έλθει σταδιακά σε περιβαλλοντική θερμοκρασία. Έτσι άμεσο αποτέλεσμα θα είναι η διαστολή όλων των μεταλλικών υλικών. Αν δεν έχει προβλεφθεί η συμπεριφορά αυτή, θα οδηγήσει σε πλαστικές παραμορφώσεις άρα και πιθανή αστοχία του συστήματος δεξαμενών. Στη πράξη η παραπάνω περίπτωση αφορά μόνο το δεξαμενισμό του πλοίου, διότι όταν το πλοίο παραδώσει το φορτίο στο προορισμό του και γυρνά στις πηγές ΦΑ για να φορτώσει, διατηρεί μέσα σε όλες τις δεξαμενές του κάποια μικρή ποσότητα φορτίου για να αντιμετωπίσει το παραπάνω πρόβλημα συστολής και διαστολής. Όμως πέρα από το παραπάνω, διατηρεί φορτίο στις δεξαμενές προκειμένου να μειώσει σε σημαντικό βαθμό το χρόνο φόρτωσης αφού έτσι δεν απαιτείται χρόνος μέχρι να μειωθεί επαρκώς η θερμοκρασία στις δεξαμενές και σε όλα τα συστήματα που απαιτούνται για τη φόρτωση (στη περίπτωση που ήταν σε περιβαλλοντική θερμοκρασία).

- Αντοχή έναντι διαρροής φορτίου

Τα συστήματα αποθήκευσης ΥΦΑ, θα πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένα που να είναι σε θέση σε περίπτωση μικρής αστοχίας του πρώτου περιβλήματος (primary barrier), το υλικό μόνωσης και το δευτερεύον περίβλημα (secondary barrier) να μπορούν να σταματήσουν την περαιτέρω διαρροή φορτίου. Ο κώδικας IGC, προδιαγράφει πως σε περίπτωση διαρροής, θα πρέπει το δευτερεύον περίβλημα να διατηρήσει το ΥΦΑ για 15 ημέρες χωρίς να διαρρεύσει (IGC-Section 4.7.4). Να σημειωθεί ότι αν διαρρεύσει φορτίο και από το πρώτο και από το δεύτερο περίβλημα και έλθει σε επαφή με τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου (γάστρα) τότε είναι πολύ εύκολο να αστοχήσει το συγκεκριμένο σημείο λόγω ψαθυρής συμπεριφοράς του χάλυβα στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

- Συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού μόνωσης

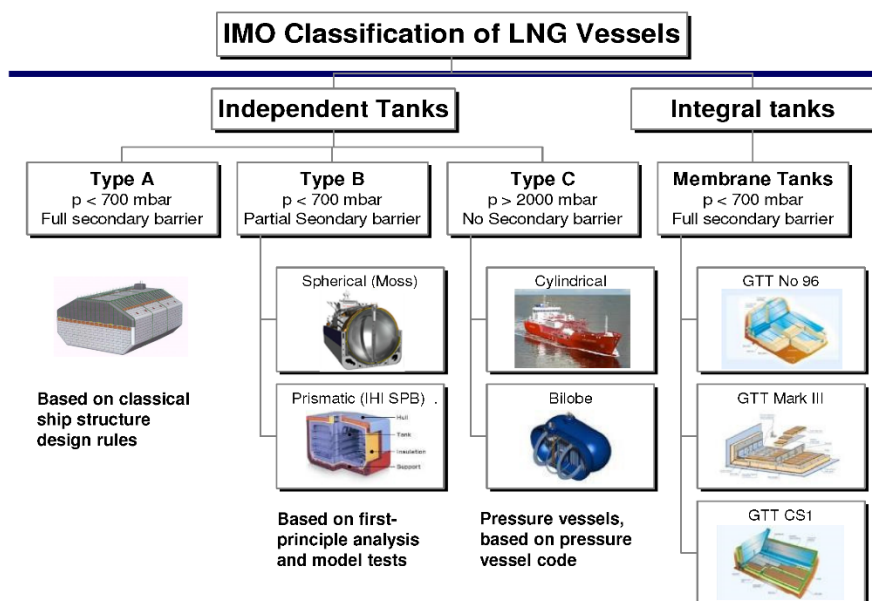
Το υλικό μόνωσης πρέπει να έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, να παραλαμβάνει διατμητικές δυνάμεις (κυρίως για στήριξη της δεξαμενής στη κάτω πλευρά στις περιπτώσεις δεξαμενές μεμβρανικού τύπου) και να μην είναι εύφλεκτο. Σημειώνεται ότι κατά τη ναυπήγηση των πλοίων έχουν καταγραφεί περιπτώσεις φωτιάς που προέκυψε από το μονωτικό υλικό. Περαιτέρω, πρέπει να ελέγχεται η συμπεριφορά του μονωτικού υλικού όταν έρχεται σε επαφή με το ΥΦΑ (σε περίπτωση διαρροής) και να μην μεταβάλλονται οι ιδιότητες του, όπως για παράδειγμα να μην αλλάζει η σύστασή του.

- Υλικό των δεξαμενών

Το υλικό από το οποίο θα γίνει η κατασκευή, θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής προκειμένου στη μεταβολή της θερμοκρασίας να υπάρξει η μικρότερη δυνατή παραμόρφωση. Η συγκολλησιμότητα και οι ατέλειες του υλικού είναι εξίσου σημαντικά τόσο για την ολική αστοχία, όσο και τη διαρροή φορτίου. Στη πράξη, χρησιμοποιείται ανοξείδωτος χάλυβας, χάλυβας με κραμάτωση νικελίου και αλουμίνιο.

Κατηγοριοποίηση συστημάτων ΥΦΑ

Ο κώδικας που έχει σημαντικό ρόλο στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ είναι ο «Διεθνής κώδικας για την κατασκευή και τον εξοπλισμό πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια» (IGC). Το 1973 με το Resolution A.328 του IMO (τότε IMCO) καθιερώνεται ο κώδικας “Gas Carrier Code” και σκοπός του ήταν η δημιουργία κανονισμών ασφαλείας διαφορετικών από του ήδη υπάρχοντα κώδικα «Κατασκευή και εξοπλισμός πλοίων που μεταφέρουν επικίνδυνα υλικά χύμα» (Bulk Chemical Code). Το 1985 με το MSC.5(48) καθιερώνεται ο κώδικας IGC που αντικαθιστά τον “Gas Carrier Code”. Τέλος, τίθεται σε εφαρμογή το 2014 με το MSC.370 (93) η σημερινή μορφή του κώδικα IGC. Σημειώνεται, όπως φαίνεται και από την ονομασία του κώδικα, ότι ο κώδικας IGC δεν αφορά μόνο πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, αλλά όλα τα πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια (πχ LPG, Ethylene, κ.α.).



Εικόνα 8 - Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον IMO-IGC (Πηγή: ABS, Moss Maritime, IHI, TGE, GTT)

Ο κώδικας (IGC) κατηγοριοποιεί τις δεξαμενές σε:

- Ενσωματωμένες (Integral Tanks): Οι δεξαμενές αυτές σχηματίζουν μια ενιαία μορφή με τη γάστρα του σκάφους, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται με τις ίδιες τάσεις που επηρεάζεται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου και να αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο της αντοχής του. Κύριος περιορισμός είναι ότι αν τοποθετηθούν τέτοιου είδους δεξαμενές στο πλοίο, το φορτίο που θα μεταφέρεται δεν θα πρέπει να έχει θερμοκρασία ατμοποίησης χαμηλότερη των -10°C , όταν βρίσκεται σε ατμοσφαιρική

πίεση. Το γεγονός αυτός κάνει τις συγκεκριμένες δεξαμενές ακατάλληλες για μεταφορά ΥΦΑ. Η πίεση σχεδίασης θα πρέπει να είναι μικρότερη των 0.25 bar (μανομετρική), εκτός αν ενισχυθεί η κατασκευή κατάλληλα και επιτραπεί να σχεδιαστεί μέχρι τη πίεση των 0.7 bar (μανομετρική).

- Ανεξάρτητες (Independent Tanks): Οι συγκεκριμένες δεξαμενές είναι αυτό-υποστηριζόμενες και ανεξάρτητες από το υπόλοιπο περίβλημα. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να λειτουργήσουν και ως δεξαμενές σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Περαιτέρω, δεν βοηθούν καθόλου στην παραλαβή φορτίσεων της μεταλλικής κατασκευής. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση (μανομετρική) δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 0.7 bar. Οι δεξαμενές αυτές κατηγοριοποιούνται σε «τύπου Α», «τύπου Β», «τύπου Γ»:

- Τύπου Α: Αφορά τις δεξαμενές που έχουν σχεδιαστεί με «Recognised Standards». Δηλαδή πρόκειται για υπολογισμούς αντοχής με τις εξισώσεις που προτείνουν οι νηογνώμονες και τη διαδικασία που γίνεται κανονικά στη μελέτη αντοχής στα πλοία.

- Τύπου Β: Οι δεξαμενές αυτές για να χαρακτηριστούν τύπου Β, θα πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί λεπτομερής ανάλυση της κατανομής των τάσεων στη δεξαμενή και να έχουν γίνει πειράματα σε κλίμακα (model test). Ακόμη, πρέπει να γίνει υπολογισμός αντοχής της δεξαμενής έναντι κόπωσης και μελέτη διάδοσης ρωγμής (crack propagation).

- Τύπου Γ: Ονομάζονται τα δοχεία υπό πίεση (pressure vessels), διότι οι δεξαμενές τους σχεδιάζονται για να αποθηκεύουν υγροποιημένο φορτίο υπό πίεση. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ορίζεται από συγκεκριμένες εξισώσεις που αναγράφονται στον κώδικα IGC και λαμβάνουν στοιχεία όπως η τάση διαρροής του υλικού.

- Μεμβρανικές (Membrane Tanks): Οι δεξαμενές αυτές έχουν σχεδιαστεί να μην παραλαμβάνουν δυνάμεις (από το φορτίο), αλλά να τις μεταφέρουν στο περίβλημα του πλοίου. Δεν είναι αυτό-υποστηριζόμενες (self-supporting). Η πίεση σχεδίασης δεν θα πρέπει να ξεπερνά την ατμοσφαιρική κατά 0.25 bar, με την εξαίρεση πραγματοποίησης λεπτομερούς μελέτης αντοχής στα σημεία συγκέντρωσης τάσης (scantlings) και στο υλικό μόνωσης, που θα εξασφαλίζει την αντοχή στη μέγιστη πίεση των 0.7 bar. Προβλέπεται ότι αυτές θα έχουν στρώματα (layers), δηλαδή ένα λεπτό πρώτο στρώμα μεμβράνης και ένα στρώμα μόνωσης εξωτερικά της. Τέλος, θα πρέπει οι παραμορφώσεις λόγω συστολής και διαστολής, να μην επιβαρύνουν τη μεμβράνη και το πάχος της μεμβράνης να μην ξεπερνά τα 10 mm. Διευκρινίζεται ακόμη ότι το πρώτο περίβλημα (primary barrier) πρέπει να είναι από μεταλλικό υλικό, εναλλακτικά πρέπει να γίνει μελέτη σε συνεργασία με τις Αρχές.
- Ημι-μεμβρανικές (Semi Membrane Tanks): Και οι συγκεκριμένες δεξαμενές δεν είναι αυτό-υποστηριζόμενες. Οι δεξαμενές επιτρέπεται να είναι μεμβρανικού τύπου σε κάποια τμήματα και να μεταβιβάζουν τις τάσεις στη γάστρα, αλλά στις ακμές θα πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένες που να μπορούν να παραλάβουν τις τάσεις διαστολής και συστολής. Η πίεση σχεδίασης δεν θα πρέπει να ξεπερνά την ατμοσφαιρική κατά 0.25 bar, με την εξαίρεση πραγματοποίησης λεπτομερούς μελέτης αντοχής στα σημεία συγκέντρωσης τάσης (scantlings) και στο υλικό μόνωσης, που θα εξασφαλίζει την αντοχή στη μέγιστη πίεση των 0.7 bar.
- Εσωτερικά μονωμένες δεξαμενές (Internal Insulation Tanks): Οι δεξαμενές δεν είναι αυτό-υποστηριζόμενες. Το στρώμα μόνωσης που διαθέτουν τοποθετείται εσωτερικά

των δεξαμενών και έρχεται σε επαφή με το φορτίο. Η πίεση σχεδίασης δεν θα πρέπει να ξεπερνά την ατμοσφαιρική κατά 0.25 bar, με την εξαίρεση πραγματοποίησης λεπτομερούς μελέτης αντοχής στα σημεία συγκέντρωσης τάσης (scantlings) και στο υλικό μόνωσης, που θα εξασφαλίζει την αντοχή στη μέγιστη πίεση των 0.7 bar. Οι δεξαμενές χωρίζονται σε:

-Τύπου 1: Το υλικό μόνωσης μαζί με ένα διαχωριστικό¹ αποτελούν το πρωτεύον περίβλημα (primary barrier) και η μεταλλική κατασκευή του πλοίου ή μία ανεξάρτητη κατασκευή δρουν ως δευτερεύον περίβλημα (secondary barrier).

-Τύπου 2: Τοποθετούνται πολλές στρώσεις από το υλικό μόνωσης και το διαχωριστικό και δρουν ως πρωτεύον και δευτερεύον περίβλημα.

Τέλος, ο κώδικας IGC, αναλόγως τη παραπάνω κατηγοριοποίηση και τη θερμοκρασία του φορτίου σε περιβαλλοντική πίεση, επιβάλλει ή μη τη χρήση ενός επιπλέον περιβλήματος, το δευτερεύον «secondary barrier».

Cargo temperature at atmospheric pressure	-10°C and above	Below -10°C down to -55°C	Below -55°C
Basic tank type	No secondary barrier required	Hull may act as secondary barrier	Separate secondary barrier where required
Integral Membrane Semi-membrane Independent: -type A -type B -type C		Tank type not normally allowed ¹ Complete secondary barrier Complete secondary barrier ² Complete secondary barrier Partial secondary barrier No secondary barrier required	
Note 1:	A complete secondary barrier shall normally be required if cargoes with a temperature at atmospheric pressure below -10°C are permitted in accordance with 4.25.1.		
Note 2:	In the case of semi-membrane tanks that comply in all respects with the requirements applicable to type B independent tanks, except for the manner of support, the Administration may, after special consideration, accept a partial secondary barrier.		

Εικόνα 9 - Απαιτήσεις για δευτερεύον περίβλημα (Πηγή: IGC code)

Στην περίπτωση που επιβάλλεται μερικό δευτερεύον περίβλημα (partial secondary barrier) αυτό τοποθετείται εξωτερικά της δεξαμενής για να προστατεύσει τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, προκειμένου αν υπάρξει διαρροή ΥΦΑ από τη δεξαμενή και αν το πλοίο λάβει εγκάρσια κλίση 30 μοιρών, το ΥΦΑ να μην έρθει σε επαφή αυτή (μεταλλική κατασκευή πλοίου).

¹ Διαχωριστικό (liner): Ονομάζεται ένα υλικό λεπτό, μη αυτό-υποστηριζόμενο, μεταλλικό ή μη, σύνθετο υλικό το οποίο αποτελεί μέρος των δεξαμενών και βοηθά στην αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων των δεξαμενών. Διαφέρει από την μεμβράνη λόγω του ότι το διαχωριστικό δεν μπορεί να αποτελέσει ένα αυτόνομο περίβλημα που περιορίζει το φορτίο.

Συστήματα δεξαμενών αποθήκευσης

Από την αρχή της περιόδου λειτουργίας των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, έχουν εφευρεθεί πολλά διαφορετικά συστήματα δεξαμενών. Όμως, τα περισσότερα παρέμειναν στη θεωρία και δε πραγματοποιήθηκαν σε πλοία με εμπορικούς σκοπούς. Το αξιοσημείωτο είναι ότι τα συστήματα που κυριαρχούν την αγορά υπάρχουν πολλά χρόνια και εξελίσσονται μόνο αυτά, χωρίς να κατασκευάζονται στη πραγματικότητα νέα συστήματα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη πολυπλοκότητα και τις υψηλές απαιτήσεις ως προς την ασφάλεια, ενώ είναι δύσκολο να γίνει αξιόπιστο ένα νέο σύστημα δεξαμενών. Τέλος, εάν η ανάπτυξη ενός νέου συστήματος και η κατασκευή του δεν επιτύχει, θα επιφέρει μεγάλες ζημιές στο κατασκευαστή. Τα κυριότερα συστήματα αποθήκευσης του φορτίου αναπτύσσονται παρακάτω.

Conch Design

Το σύστημα δεξαμενών από την Conch ήταν το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ευρέως από τα πρώτα πλοία όπως το “Methane Progress” και “Methane Princess”. Αποτελούταν από δεξαμενές που ήταν ανεξάρτητες από το περίβλημα του πλοίου (free-standing), δηλαδή μπορούσαν να μεταφερθούν ως ξεχωριστό κουτί (block). Το κάθε κουτί είχε εσωτερικά δύο υδατοστεγείς εγκάρσιες φρακτές και μια διαμήκη φρακτή στο επίπεδο συμμετρίας (center line) καθ’ όλο το ύψος. Στο κάτω μέρος και οι 3 ξεχωριστοί χώροι μέσα στη δεξαμενή είχαν βαλβίδες για την επικοινωνία των δύο χώρων κατά τη φορτοεκφόρτωση. Το κύριο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το αλουμίνιο Grade 5083, δηλαδή με κραμάτωση Μαγνησίου. Περαιτέρω, στην οροφή της δεξαμενής ήταν τοποθετημένα κατάλληλα «Keys» που ο ρόλος τους ήταν να παραλαμβάνουν τις παραμορφώσεις λόγω συστολής / διαστολής. Η μόνωση των δεξαμενών ήταν από στρώματα ξύλου, δηλαδή εσωτερικά τύπου “balsa” με εξωτερικά ένα στρώμα “plywood” και από τις δύο πλευρές, που δεν επέτρεπε το ΥΦΑ να το διαπεράσει. Στα πλαϊνά τοιχώματα η μόνωση ενισχύθηκε με ίνες γυαλιού, ενώ το επάνω μέρος με το υλικό “Rockfill”. Τα μονωτικά υλικά ήταν εξωτερικά της δεξαμενής και τοποθετούταν όσο πιο σφικτά γίνεται προκειμένου να περιορίζουν τις κινήσεις της δεξαμενής σε σχέση με τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Οι δεξαμενές αυτές σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ανεξάρτητες τύπου Α.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας των πλοίων με το σύστημα αυτό, αντιμετώπισαν προβλήματα εισροής υδάτων λόγω ρωγμών στο εξωτερικό περίβλημα του πλοίου (λέγεται πως δεν ευθυνόταν το φορτίο για αυτό) που οδήγησε στην πλήρη επαφή του θαλασσινού νερού με το εξωτερικό υλικό μόνωσης, δηλαδή το ξύλο τύπου Balsa. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι η ποιότητα και η επιφάνεια της μόνωσης δεν είχε επηρεαστεί από το θαλασσινό νερό.



Εικόνα 10 - Δεξαμενές Conch πρισματικού τύπου, 1970 (Πηγή: SIGGTO/GIIGNL)

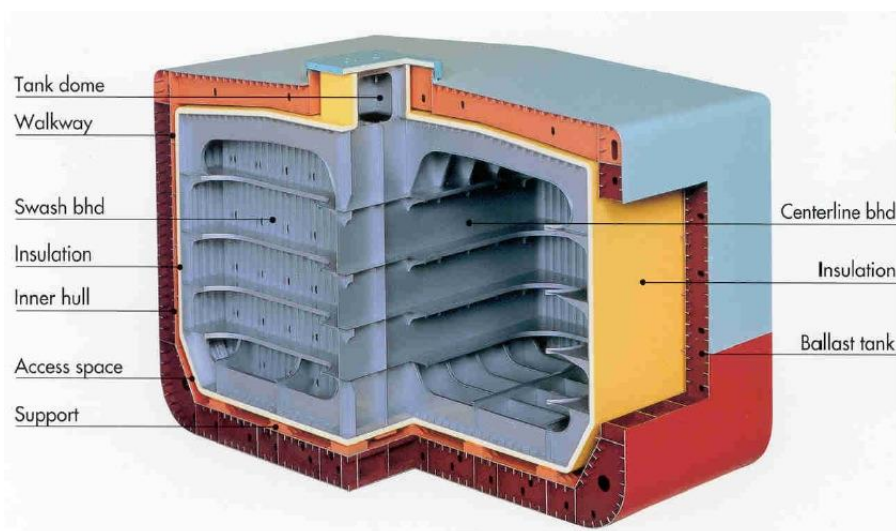
Όμως, ένα σημαντικό πρόβλημα που παρατηρήθηκε στο συγκεκριμένο σύστημα ήταν ρωγμές (cracks) στο υλικό μόνωσης το οποίο είχε ως αποτέλεσμα μεταφορά θερμότητας (όχι διαρροή ΥΦΑ) από το φορτίο προς τα εξωτερικά και κρύα σημεία (cold spots) στην εσωτερική κατασκευή του πλοίου. Η αντιμετώπιση αυτών των ρωγμών γινόταν με τον εμποτισμό ρητίνης σε αυτά τα σημεία. Αλλά όπως είναι λογικό αυτή ήταν μια προσωρινή λύση και στη περίπτωση που υπήρχε αστοχία της πρώτης μεμβράνης άρα και διαρροή φορτίου, το υλικό μόνωσης δεν θα ήταν σε θέση να λειτουργήσει ως δευτερεύον περίβλημα (secondary barrier) περιορίζοντας τη διαρροή.

Περαιτέρω, η εταιρεία “El Paso Natural Gas” αποφάσισε να κτίσει εννέα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και ανά τρία να έχουν διαφορετικό σύστημα δεξαμενών. Τρία από αυτά είχαν επιλεγεί να εξοπλιστούν με δεξαμενές τύπου Conch με καλύτερη εσωτερική ενίσχυση αντοχής, στο ναυπηγείο του Avondale. Τα υλικά μόνωσης επιλέχθηκαν να αποτελούνται από διαφορετικές στρώσεις πολυουρεθάνης (PUF) ανάμεσα στις δεξαμενές και τη μεταλλική κατασκευή και από τη κάτω πλευρά ξύλο τύπου balsa/plywood για τη παραλαβή των δυνάμεων του βάρους του φορτίου και τις υπόλοιπες δυνάμεις. Με την ολοκλήρωση και των τριών πλοίων το 1979 και τη δοκιμή αερίων (gas trials) βρέθηκαν πολλές ρωγμές στο υλικό μόνωσης (πολυουρεθάνη-PUF), με αποτέλεσμα η εταιρεία “El Paso Natural Gas” να αρνηθεί τη παραλαβή των πλοίων. Ακόμη έπειτα από λεπτομερή ανάλυση, λήφθηκε η απόφαση ότι δεν είναι οικονομικά βιώσιμη η επισκευή αυτών των πλοίων και χαρακτηρίστηκαν “total loss”. Το σύστημα δεξαμενών που ανέπτυξε η Conch δεν εφαρμόζεται στα καινούρια πλοία μεταφοράς ΥΦΑ.

SPB δεξαμενές

Το σύστημα δεξαμενών SPB (Self-supporting Prismatic-shape IMO type B) παρουσιάστηκε από την εταιρεία “IHI Corporation” (Ishikawajima Heavy Industries, Ιαπωνία), η οποία ξεκίνησε με κύρια απασχόληση τα ναυπηγεία και σήμερα δραστηριοποιείται σε πολλούς μηχανολογικούς κλάδους. Είναι το «νεότερο» σύστημα που εμφανίστηκε στην αγορά, με την είσοδο του το 1993 με τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ “Polar Eagle” και “Arctic Sun”, χωρητικότητας 89,880 m³ το καθένα. Όμως, το συγκεκριμένο σύστημα από τότε που παρουσιάστηκε δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί για πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ. Έχει χρησιμοποιηθεί άλλες δύο φορές σε πλοία μεταφοράς υγραερίου (LPG) και πρόσφατα στα τέλη του 2017 κατασκευάστηκε μια μονάδα FSRU. Το αξιοσημείωτο σε αυτές τις δεξαμενές

είναι πως από τότε που παραδόθηκαν σε λειτουργία, δεν έχει αναφερθεί κανένα πρόβλημα στο σύστημα αποθήκευσης του, όπως ζημιά στα τοιχώματα ή παρουσία ρωγμής. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι το 2014 έγινε συμβόλαιο για τη κατασκευή τεσσάρων πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ με τις συγκεκριμένες δεξαμενές από το ναυπηγείο JMU (Japan Marine United Corp) με παράδοση το 2018 – 2019. Φημολογείται ότι υπάρχουν προβλήματα στην εγκατάσταση του μονωτικού υλικού σε συνεργασία με τη δεξαμενή και τη μεταλλική κατασκευή του. Επίσης, πάλι το 2014 έγινε παραγγελία δύο FSRU μονάδων με τις δεξαμενές SPB.



Εικόνα 11 - Μέση τομή του SPB (Πηγή: ABS)

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η σχεδίαση του συγκεκριμένου συστήματος δεξαμενών. Το εσωτερικό περίβλημα της δεξαμενής, συμπεριλαμβανομένων και των φρακτών (centerline & swash) κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό, είτε από κράματα αλουμινίου, είτε από χάλυβες με κραμάτωση Νικελίου (9% Ni), είτε από ανοξείδωτο χάλυβα αναλόγως την προτίμηση του πλοιοκτήτη. Περαιτέρω για τη σημαντική μείωση του κόστους, γίνεται έρευνα για χρήση χάλυβα με κραμάτωση από Μαγγάνιο, ως κύριο υλικό των δεξαμενών.

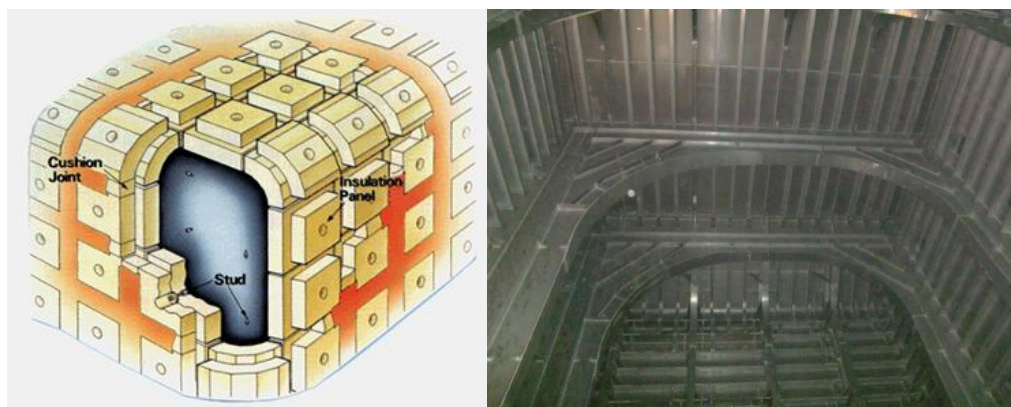


Εικόνα 12 - Δεξαμενές SPB (Αρ.), Στήριγμα δεξαμενής "Polar Eagle", (18 χρονών) (Δε.), (Πηγή: JMU)

Οι δεξαμενές είναι ανεξάρτητες από το περίβλημα του πλοίου και είναι αυτό-υποστηριζόμενες, «τύπου Β» (IMO) (εικόνα 12). Από την ίδια εικόνα μπορεί να γίνει κατανοητό, ότι ένα από τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου συστήματος, είναι η προσαρμογή της γεωμετρίας της δεξαμενής αναλόγως τις απαιτήσεις της εσωτερικής γεωμετρίας του πλοίου. Εφόσον οι δεξαμενές αυτές είναι αυτό-υποστηριζόμενες και

ανεξάρτητες από το πλοίο, για να τοποθετηθούν μόνιμα στο πλοίο με ασφάλεια, πρέπει να μην υπάρχει περιθώριο σχετικής κίνησης (δεξαμενή-πλοίο) ενώ παράλληλα για να μεταφέρονται αποδοτικά οι τάσεις στη μεταλλική κατασκευή, τοποθετούνται κατάλληλα στηρίγματα όπως φαίνεται στη εικόνα 12.

Η σχεδίαση εσωτερικά της δεξαμενής έχει μια διαμήκη φρακτή που τη διαχωρίζει πλήρως σε δύο χώρους. Λόγω της συγκεκριμένης σχεδίασης των δεξαμενών, δηλαδή με την ικανότητα τοποθέτησης ενισχυτικών εσωτερικά των δεξαμενών, η αντοχή της δεξαμενής μπορεί να ενισχυθεί. Για την τοποθέτηση των ενισχυτικών γίνεται λεπτομερής μελέτη αντοχής και προκύπτει η κατάλληλη διαμόρφωση. Περαιτέρω, για να αποφευχθεί ένα πολύ μεγάλο πρόβλημα όλων των δεξαμενών ΥΦΑ, το κρουστικό φορτίο λόγω κίνησης της ελεύθερης επιφάνειας (sloshing), τοποθετούνται εγκάρσιες φρακτές (swash bulkhead, σχήμα 11) που επιτρέπουν τη διέλευση φορτίου και περιορίζουν την κίνηση του, αποσβένοντας την ενέργεια. Άρα ένα ακόμη πλεονέκτημα που υπάρχει είναι ότι οι δεξαμενές αυτές δεν έχουν κανένα περιορισμό σε πλήρωση φορτίου, γεγονός που ενισχύει την ασφάλεια των συστημάτων και παράλληλα δημιουργεί νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες, όπως στη χρήση ΥΦΑ ως καύσιμο, ή σε μονάδες FSRU.

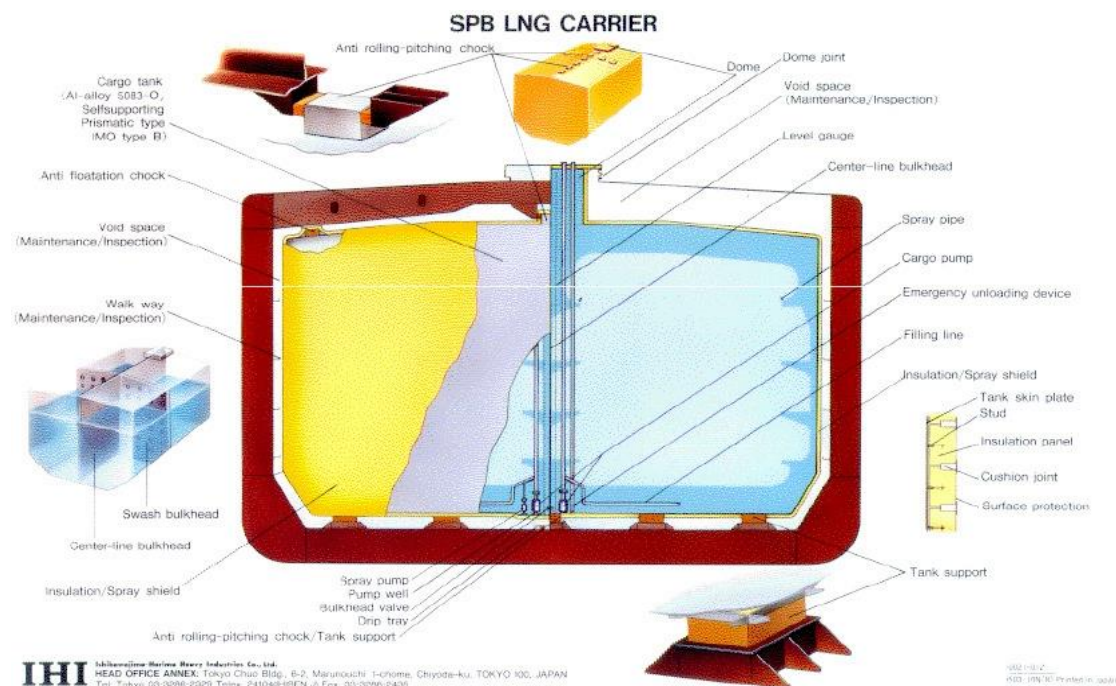


Εικόνα 13 - Μονωτικό υλικό δεξ. SPB (Αρ.), Εσωτερικό δεξαμενής του "Polar Eagle", (18 χρονών) (Δε.) (Πηγή: JMU)

Το μονωτικό υλικό γύρω από τις δεξαμενές είναι στρώμα πολυουρεθάνης (PUF-Polyurethane foam insulation). Η εγκατάσταση των πάνελ των μονωτικών υλικών γίνεται μετά την εγκατάσταση της δεξαμενής στο πλοίο, πάνω στις κατάλληλες στηρίξεις. Πάνω στο εξωτερικό περίβλημα της δεξαμενής συγκολλούνται βίδες (εικόνα 13 – stud) (ανάλογα προσαρμοσμένες) οι οποίες είναι υπεύθυνες για να συγκρατούν το κάθε μονωτικό πάνελ στη θέση του. Ακόμη ένα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι η μόνωση έναντι άλλων συστημάτων είναι καλύτερη διότι σε αυτές τις δεξαμενές επιλέγεται το υλικό με την καλύτερη θερμική μόνωση, ενώ σε άλλα συστήματα δεξαμενών το μονωτικό υλικό πέρα από μόνωση λαμβάνει και ρόλους αντοχής, άρα εν τέλει είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί ένα υλικό που να πραγματοποιεί ικανοποιητικά και τις δυο απαιτήσεις.

Σε περίπτωση σύγκρουσης και εισροής υδάτων στον εξωτερικό χώρο από τη δεξαμενή (αλλά εσωτερικά του διπλού τοιχώματος της γάστρας), η δεξαμενή είναι σε θέση να αντέξει από την εξωτερική πίεση ενώ στην πάνω πλευρά της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί κατάλληλες σφήνες (Anti-floating chocks, εικόνα 14) έτσι ώστε αν η δεξαμενή αποκτήσει επαρκή πλευστότητα, να μη μετακινηθεί από τη θέση της. Οι διατάξεις σταθεροποίησης των δεξαμενών έναντι πλευστότητας (anti-floatation arrangements), είναι απαραίτητες σύμφωνα με τον κώδικα IGC. Παράλληλα, στην πάνω πλευρά στο διαμήκη

άξονα έχουν τοποθετηθεί κατάλληλες σφήνες (anti-rolling & anti-pitching chocks), που σταθεροποιούν τη δεξαμενή σε κινήσεις προνευτασμού και διατοιχισμού του πλοίου. Σύμφωνα με τον κώδικα IGC, η συγκεκριμένη δεξαμενή απαιτείται να έχει μερικό δευτερεύον περίβλημα (partial secondary barrier), για την περίπτωση διαρροής φορτίου.



Εικόνα 14 - SPB λεπτομερή στοιχεία δεξαμενής (Πηγή: IHI, ABS)

Όσον αφορά τον έλεγχο της δεξαμενής (inspection), τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά μπορεί πολύ εύκολα να πραγματοποιηθεί. Με το συγκεκριμένο σύστημα μόνωσης είναι πολύ εύκολο να αποσυναρμολογηθεί ένα μέρος των πάνελ προκειμένου να γίνει έλεγχος της κατάστασης της εξωτερικής μεταλλικής κατασκευής της δεξαμενής. Περαιτέρω, τα εσωτερικά διαμήκη ενισχυτικά που διαθέτει, λειτουργούν σαν πλατφόρμα που μπορεί εύκολα κάποιος να πατήσει επάνω και να ελέγξει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη κατασκευή. Το ίδιο ισχύει και στην εξωτερική γεωμετρία με τα διαμήκη ενισχυτικά που υπάρχουν για τη σταθεροποίηση της δεξαμενής (εικόνα 11, 14).

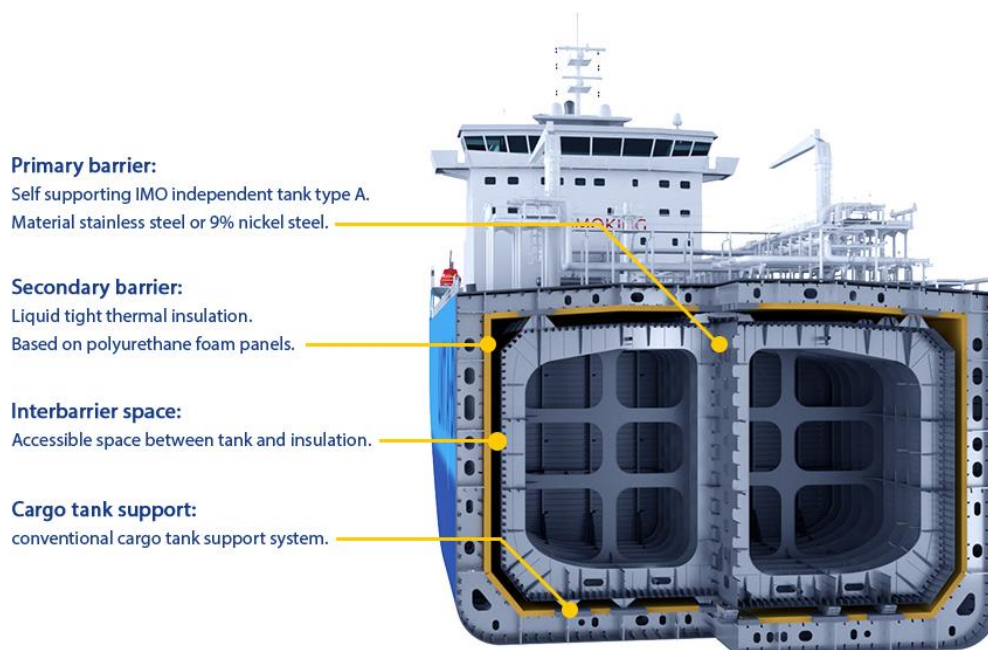
Πλεονεκτήματα: Εύκολη προσαρμογή στη γεωμετρία του πλοίου, ασφάλεια ως προς την κόπωση, ασφάλεια ως προς το sloshing, εύκολη αύξηση πάχους μόνωσης, εύκολος έλεγχος (inspection), μερική πλήρωση, ασφάλεια λόγω ανεξάρτητης δεξαμενής, κατάλληλη για δεξαμενή προς χρήση ΥΦΑ ως καύσιμο, κατάλληλη για FSRU & FPSO.

Μειονεκτήματα: Εμπειρία μόνο από δύο πλοία μεταφοράς ΥΦΑ κατασκευασμένα πριν χρόνια, κόστος κατασκευής, δυσκολία στη συγκολλησιμότητα και κατεργασία του υλικού.

LNT A-Box

Το σύστημα δεξαμενών LNT A-Box είναι ένα προϊόν της “LNG New Technologies (LNT)” (Σιγκαπούρη). Το συγκεκριμένο σύστημα, εφευρέθηκε για να εξυπηρετήσει τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ μεσαίου μεγέθους (25,000 – 90,000 m³) καθώς έχουν κατασκευαστεί πολύ λίγα μέχρι τώρα σε αυτή τη χωρητικότητα. Το πρώτο πλοίο που θα διαθέτει το συγκεκριμένο σύστημα, θα παραδοθεί το 2020 από το ναυπηγείο China Merchants Heavy Industry (CMHI)

προς την εταιρεία «Saga LNG Shipping» και θα είναι συνολικής χωρητικότητας περίπου 45,000 m³. Στόχος της “LNG New Technologies (LNT)”, είναι το LNT A-Box, να είναι οικονομικότερο των ανταγωνιστών του και να μπορεί να κατασκευαστεί ευκολότερα από περισσότερα ναυπηγεία με χαμηλότερη τεχνολογία.



Εικόνα 15 - Τυπική τομή συστήματος A-Box (Πηγή: LNT)

Οι συγκεκριμένες δεξαμενές είναι αυτό-υποστηριζόμενες (self-supporting) «τύπου Α» σύμφωνα με το κώδικα IGC. Τα υλικά από τα οποία αποτελείται όλη η μεταλλική κατασκευή των δεξαμενών είναι είτε από ανοξείδωτο χάλυβα είτε από χάλυβα με κραμάτωση Νικελίου (9% Ni). Οι συγκεκριμένες δεξαμενές μοιάζουν πολύ σε φιλοσοφία με τις δεξαμενές SPB που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αρχικά, σύμφωνα με τον IGC, η μελέτη αντοχής έχει γίνει με τις εξισώσεις και μεθόδους που προτείνουν οι νηογνώμονες και δεν έχουν πραγματοποιηθεί πλήρεις αναλυτικοί υπολογισμοί και έλεγχος αντοχής έναντι κόπωσης, γεγονός που δρα αποθαρρυντικά. Το σύστημα δεξαμενών A-Box εφόσον είναι αυτόνομο (όπως και το SPB), στηρίζεται στη κάτω πλευρά από συγκεκριμένα σημεία – βάσεις. Στις επάνω πλευρές των δεξαμενών έχουν τοποθετηθεί και σε αυτές (όπως και στο SPB) στηρίγματα έναντι πλευστότητας (απαίτηση από κώδικα IGC) και κίνησης διατοιχισμού (anti-flotation & anti-rolling chocks), όπως φαίνονται και στην εικόνα 16 (στον άξονα συμμετρίας και στα άκρα). Εσωτερικά, η δεξαμενή διαχωρίζεται με μία διαμήκη υδατοστεγή φρακτή, και για τη μείωση της κίνησης της ελεύθερης επιφάνειας του ΥΦΑ, άρα και των δυναμικών φορτίων (sloshing), έχουν τοποθετηθεί εγκάρσια ενισχυτικά σε κατάλληλη γεωμετρία για την αλλαγή της ιδιοπεριόδου της ελεύθερης επιφάνειας σε σχέση με την κίνηση του πλοίου.

Μια ακόμη διαφορά του συστήματος LNT A-Box από το SPB, είναι πως το μονωτικό υλικό και το δευτερεύον περίβλημα (secondary barrier) δεν τοποθετούνται σε επαφή με τη δεξαμενή, αλλά σε επαφή με την εσωτερική γεωμετρία του πλοίου, δηλαδή πάνω στο διπλό τοίχωμα του πλοίου (double hull). Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι πως ο έλεγχος (inspection) του πρώτου περιβλήματος γίνεται χωρίς καμία τροποποίηση στο σύστημα, με αποτέλεσμα τον πιο συχνό και εκτενή έλεγχο στο πρώτο περίβλημα που είναι το σημαντικότερο. Σημειώνεται όμως, πως ο χώρος μεταξύ του πρώτου περιβλήματος και της μόνωσης-δεύτερου περιβλήματος, θα βρίσκεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη

διάρκεια που μεταφέρεται ΥΦΑ. Ακόμη, πλεονέκτημα του σχεδιασμού αυτού είναι η υψηλότερη ασφάλεια, καθώς σε περίπτωση ατυχήματος (πχ. σύγκρουση), δεν θα αστοχήσουν και τα δύο περιβλήματα (της δεξαμενής) ταυτοχρόνως αφού υπάρχει σημαντική απόσταση μεταξύ τους (όπως και στο SPB). Το μονωτικό υλικό είναι τύπου πολυουρεθάνης και τοποθετείται με μορφή πάνελ. Σύμφωνα με τον IGC, εφόσον η δεξαμενή είναι τύπου Α, θα πρέπει να έχει ένα ολόκληρο δευτερεύον περίβλημα (και όχι μερικό-partial όπως η SPB), με αποτέλεσμα να αυξάνει λίγο το κόστος όσον αφορά το περίβλημα.



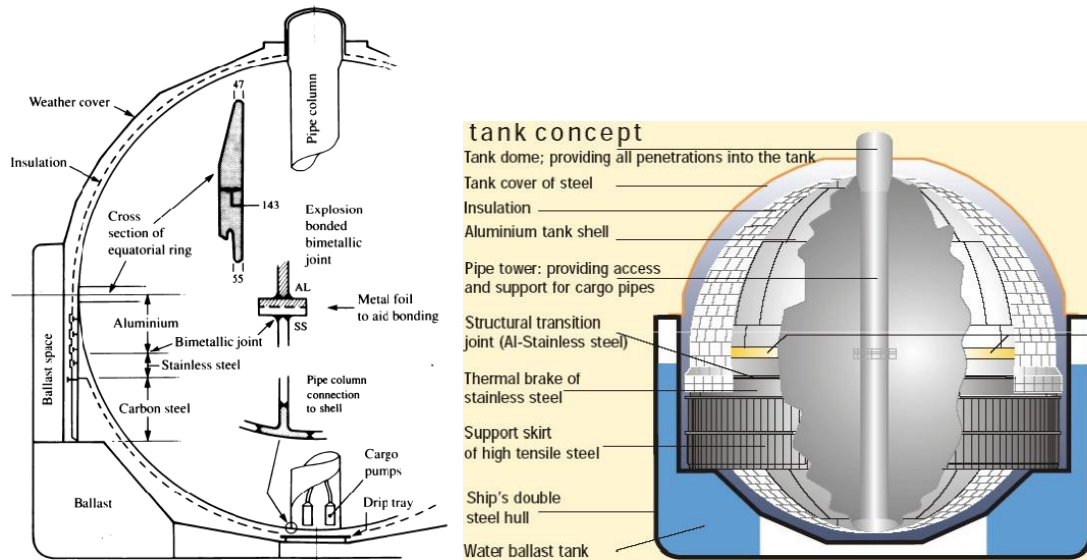
Εικόνα 16 - SAGA / LNT A-Box υπό κατασκευή, 2018 (Πηγή: LNG World News)

Πλεονεκτήματα: Ανεξάρτητη δεξαμενή, Πλήρωση δεξαμενής σε επιθυμητό ποσοστό (sloshing), Προσαρμοστικότητα γεωμετρίας στην εσωτερική μεταλλική κατασκευή, Υψηλότερη ασφάλεια έναντι σύγκρουσης, Πλήρης εκμετάλλευση διαθέσιμου χώρου, Ευκολότερη κατασκευή από το SPB λόγω κατηγοριοποίησης ως δεξαμενής τύπου Α, Ασφάλεια λόγω ανεξάρτητης δεξαμενής

Μειονεκτήματα: Αντοχή σε κόπωση, Διάδοση ρωγμών, Πλήρες δευτερεύον περίβλημα (κόστος), Καθόλου εμπειρία σε πραγματική λειτουργία

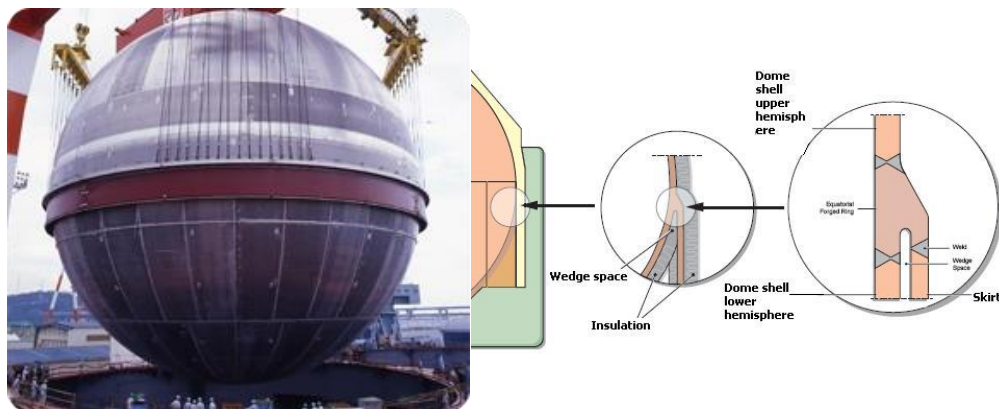
Σφαιρικές δεξαμενές (MOSS)

Το σύστημα δεξαμενών MOSS Type (σφαιρική δεξαμενή) κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από την Moss Rosenberg Shipyard, στη Νορβηγία. Το πλοίο που κατασκευάστηκε πρώτο, ήταν το Norman Lady (εικόνα 7) με συνολική χωρητικότητα 87,600 m³. Σύμφωνα με τον IGC, οι δεξαμενές είναι «τύπου Β» και αυτό-υποστηριζόμενες. Το σύστημα αυτό, ήταν το σύστημα με το μεγαλύτερο ποσοστό εγκαταστάσεων πάνω σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης (πριν το 2000) και έχουν κατασκευαστεί, μέχρι και το 2017, 117 πλοία (Πηγή [17]). Όμως τα τελευταία χρόνια χάνει συνεχώς έδαφος στην αγορά των νεότευκτων πλοίων έναντι άλλων συστημάτων και κυρίως των μεμβρανικών.



Εικόνα 17 - Εγκάρσια τομή (Πηγή: ABS, MOSSMARITIME)

Το Norman Lady κατασκευάστηκε με κύριο υλικό (των δεξαμενών) το χάλυβα, με κραμάτωση νικελίου (9% Ni), αλλά γρήγορα στα αμέσως νεότερα πλοία, αντικαταστάθηκε από το αλουμίνιο. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μόνο δύο πλοία κατασκευάστηκαν με χάλυβα κραμάτωσης Νικελίου, το “Norman Lady” και το αδελφό πλοίο “LNG Challenger”. Το 1998 έπειτα από εκτενή έλεγχο του “LNG Challenger”, βρέθηκε ότι σε μεγάλο ποσοστό των συγκολλήσεων όλων των δεξαμενών, υπήρχαν ρωγμές λόγω παρουσίας υδρογόνου (ψυχρή ρωγμάτωση). Λόγω αυτού, έγινε έλεγχος και στο “Norman Lady” που και εκεί βρέθηκαν ρωγμές ίδιου τύπου αλλά σε μικρότερη έκταση. Έπειτα από τα αποτελέσματα του ελέγχου, θεώρησαν ότι οι ρωγμές αυτές ενδέχεται να υπήρχαν από τότε που κατασκευάστηκαν τα πλοία. Το αξιοσημείωτο είναι πως και στα δύο πλοία πραγματοποιούνταν συνεχώς εκτενής έλεγχος, αλλά δεν είχε βρεθεί κάποια ρωγμή καθώς -μέχρι τότε- δεν γνώριζαν ότι αυτός ο χάλυβας ήθελε συγκεκριμένη διαδικασία μη-καταστρεπτικού ελέγχου.



Εικόνα 18 - Σφαιρική δεξαμενή (2016) (Πηγή: Bureau Veritas, Αρ.) – Δακτύλιος ισημερινού (Πηγή: Liquefied Gas Carrier, Δε.)

Όλη η φιλοσοφία του συστήματος είναι ότι κατασκευάζεται μία αυτόνομη σφαίρα (εικόνα 18, Αρ.), η οποία τοποθετείται πάνω στο πλοίο και το μόνο στοιχείο σύνδεσης της σφαίρας με τη γάστρα είναι ο λεγόμενος δακτύλιος ισημερινού (Equatorial ring) (Εικόνα 18 αριστερά με κόκκινο χρώμα και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια δεξιά). Ο δακτύλιος ισημερινού είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού της δεξαμενής για διάφορους λόγους. Το

σημείο αυτό μεταβιβάζει τις τάσεις στήριξης της δεξαμενής στη γάστρα και τις τάσεις που δημιουργούνται λόγω κίνησης του ΥΦΑ μέσα στη δεξαμενή. Περαιτέρω, ο δακτύλιος θα πρέπει να μπορεί να παραλαμβάνει τις τάσεις που δημιουργούνται λόγω συστολής και διαστολής. Τέλος, στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνεται σύνδεση δύο διαφορετικών υλικών, δηλαδή του αλουμινίου (υλικό δεξαμενής) και του χάλυβα (γάστρα του πλοίου). Λόγω των παραπάνω απαιτήσεων, θεωρείται πως η καταλληλότερη σύνδεση είναι εκατέρωθεν του δακτυλίου, στο κατακόρυφο έλασμα-φούστα (skirt, εικόνα 17 Δεξιά) με την ένωση δύο φλαντζών στο κάθε υλικό όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 17 (Αριστερά). Παρατηρώντας προσεκτικά την ίδια εικόνα, φαίνεται ότι στο σημείο σύνδεσης της δεξαμενής με τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου παρεμβάλλεται ένα κομμάτι ανοξειδωτού χάλυβα. Ο λόγος που γίνεται αυτή η σύνδεση και δικαιολογεί τη παραπάνω πολυπλοκότητα, είναι διότι αν γινόταν σύνδεση του αλουμινίου (δεξαμενή) απευθείας στο χάλυβα της μεταλλικής κατασκευής, θα υπήρχε υψηλή ροή αγωγής θερμότητας που θα έθετε σε κίνδυνο τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου (χαμηλή θερμοκρασία άρα ψαθυρή θραύση) και παράλληλα θα υπήρχε υψηλότερο ρυθμός δημιουργίας των εξατμιζόμενων αερίων (BOF rate). Έτσι, για να αποφευχθούν αυτά, ο ανοξειδωτός χάλυβας λαμβάνει το ρόλο της μόνωσης και εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας.

Η μόνωση της δεξαμενής γίνεται με την τοποθέτηση μονωτικού υλικού απευθείας πάνω στην επιφάνεια του πρώτου περιβλήματος. Στην πάνω πλευρά των δεξαμενών (επάνω ημικύκλιο) που δεν καλύπτεται από το κατακόρυφο πλάγιο έλασμα της γάστρας (κούλο), τοποθετείται μια εξωτερική κατασκευή (σαν κάλυμμα) προκειμένου η δεξαμενή και το μονωτικό υλικό να μην είναι εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες το οποίο φαίνεται στην εικόνα 17. Το κάλυμμα αυτό λαμβάνει και ρόλο στήριξης του εξοπλισμού, αφού όλες οι σωληνώσεις και οι κατασκευές που απαιτούνται για τις δεξαμενές στηρίζονται πάνω σε αυτό.

Όσον αφορά το σύστημα ασφαλείας του συστήματος αυτού, η σχεδίαση της δεξαμενής και η επιλογή του υλικού της, έχει γίνει κατάλληλα προκειμένου πριν την πλήρη αστοχία της δεξαμενής να προέλθει διαρροή του φορτίου (leak before failure), άρα ουσιαστικά να γίνει κάποιου είδους «προειδοποίηση» πριν γίνει κάτι καταστροφικό. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μελέτη διάδοσης της ρωγμής (και κατανομής τάσεων) έτσι ώστε η διάδοση να είναι τόσο αργή, που πριν τη πλήρη καταστροφή θα υπάρχει τόσο μεγάλη ρωγμή που σίγουρα θα έχει οδηγήσει προηγουμένως σε διαρροή φορτίου. Περαιτέρω, στην περίπτωση που υπάρξει διαρροή από το πρώτο περίβλημα (primary barrier) όπως και από τη στρώση μόνωσης, υπάρχει το μερικώς δευτερεύον περίβλημα (partial secondary barrier) που επιβάλλεται από τον κώδικα IGC, και τοποθετείται πάνω στη μεταλλική κατασκευή της γάστρας με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να συγκεντρώνει όλο το ΥΦΑ στο κατώτατο επίπεδο, στο λεγόμενο “Drip tray” (σαν μορφή λακούβας). Το Drip tray πρέπει να είναι από υλικό που να εμποδίζει τη διαρροή ΥΦΑ από αυτό προς τη μεταλλική κατασκευή ενώ σε περίπτωση που συγκεντρωθεί ΥΦΑ στο σημείο αυτό, θα πρέπει να μπορεί να διατηρήσει το ΥΦΑ για τουλάχιστον 15 μέρες, πριν διαρρεύσει από αυτό. Σε περίπτωση διαρροής, πραγματοποιείται εσκεμμένα αεριοποίηση και απομάκρυνση του ΥΦΑ που έχει συγκεντρωθεί στο Drip tray, με την εισαγωγή αζώτου (Nitrogen), για την αποφυγή κινδύνου. Παράλληλα γίνεται συνεχώς εισαγωγή αδρανών αερίων στη περιοχή μεταξύ της «φούστας» και της σφαιρικής δεξαμενής, για να προβλεφθεί κάποιο ατύχημα σε περίπτωση διαρροής. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το “Norman Lady”, το οποίο ήταν το πρώτο που κατασκευάστηκε με τις δεξαμενές αυτές, παρέμεινε σε λειτουργία 40 χρόνια (αποσύρθηκε το 2013) αποδεικνύοντας τα επίπεδα κατασκευής και αξιοπιστίας του συστήματος αυτού. Τέλος, σε περίπτωση αστοχίας της μεταλλικής κατασκευής σε δεξαμενές «τύπου Β» υπάρχει χαμηλότερη πιθανότητα για

διαρροή φορτίου σε σχέση με τις δεξαμενές μεμβρανικού τύπου λόγω της ανεξαρτησίας των δεξαμενών από το γεωμετρία της γάστρας (αυτό-υποστηριζόμενες).

Η σφαιρική σχεδίαση των δεξαμενών παρά τη μεγάλη αξιοπιστία και εμπειρία, έχει μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το σφαιρικό σχήμα οδηγεί σε κακή εκμετάλλευση χώρου ιδιαίτερα χαμηλά και στην έμφορτη κατάσταση έχει υψηλό κέντρο βάρους σε σχέση με πλοία αντιστοιχίας χωρητικότητας. Από την άλλη πλευρά όμως, η κακή εκμετάλλευση του χώρου χαμηλά, οδηγεί σε πολύ υψηλά επίπεδα ασφαλείας τόσο σε περιπτώσεις προσάραξης όσο και σύγκρουσης. Περαιτέρω, το απόλυτα σφαιρικό σχήμα βοηθά τους μελετητές να προσδιορίσουν με απόλυτη ακρίβεια την κατανομή των τάσεων άρα και να τοποθετούν με σιγουριά καταλληλότερα πάχη ελασμάτων. Η κακή εκμετάλλευση χώρου, έχει ως αποτέλεσμα οι πλοιοκτήτες να επωμίζονται πολύ υψηλότερα τέλη προκειμένου να πλεύσουν σε διώρυγες, πορθμεία και να ελλιμενιστούν. Επιπροσθέτως, η κακή εκμετάλλευση χώρου στην επάνω πλευρά, εισάγει προβλήματα όπως μικρή επιφάνεια καταστρώματος και πολύπλοκες κατασκευές προκειμένου να στηριχθούν οι σωληνώσεις και οι πλατφόρμες ελέγχου. Το σφαιρικό σχήμα των δεξαμενών έχει ως αποτέλεσμα την καλή συμπεριφορά του ΥΦΑ στη περίπτωση που υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια (φαινόμενα sloshing), άρα και μπορεί να πληρωθούν οι δεξαμενές σε οποιαδήποτε επιθυμητό επίπεδο. Λόγω της απλότητας του συστήματος δεξαμενών, τα πλοία με το συγκεκριμένο σύστημα έχουν τις λιγότερες περιπτώσεις έκτακτων ελέγχων και επισκευών. Τέλος, οι διαστάσεις των πλοίων με σφαιρικές δεξαμενές έχουν φτάσει σχεδόν στα άκρα, διότι όντας η δεξαμενή σφαιρικού σχήματος, το πλάτος των πλοίων περιορίζεται σημαντικά. Με περιορισμό στο πλάτος, άρα και τη διάμετρο της σφαίρας, για να υπάρξει αύξηση στη χωρητικότητα θα πρέπει να προστεθεί μία επιπλέον δεξαμενή κατά μήκος, άρα και να αυξηθεί το μήκος του πλοίου κατ' ελάχιστο για 35-40 μέτρα, που μπορεί να οδηγήσει σε πολλά σχεδιαστικά προβλήματα όπως ευστάθειας και αντοχής.

Σφαιρικές δεξαμενές – Νεότερα συστήματα

Λόγω της μεγάλης επιτυχίας που είχε το σύστημα των σφαιρικών δεξαμενών MOSS στα πρώτα χρόνια, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να εκσυγχρονιστεί και να βελτιωθούν τα ελαττώματα του συγκεκριμένου συστήματος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα (που αναφέρεται παραπάνω) είναι η αδυναμία των συγκεκριμένων πλοίων να αυξήσουν τη χωρητικότητά τους. Έτσι, οι νέες σχεδιάσεις επικεντρώνονται στην καλύτερη εκμετάλλευση χώρου και αύξηση της συνολικής χωρητικότητας.

Τα συστήματα που έχουν προταθεί και κατασκευαστεί είναι τα εξής:

- SayaENDO
- SayaRINGO

Πιο αναλυτικά:

- SayaENDO

Το συγκεκριμένο σύστημα έχει προταθεί από τη Mitsubishi Heavy Industries. Τα πρώτα πλοία που κατασκευάστηκαν ήταν το 2014 τα “LNG Venus”, “Esshu Maru” και “Seishu Maru”.



Εικόνα 19 - Πλοία τύπου SayaENDO (Πηγές: Jasnaoe (Αρ.) και MHI (Δε.))

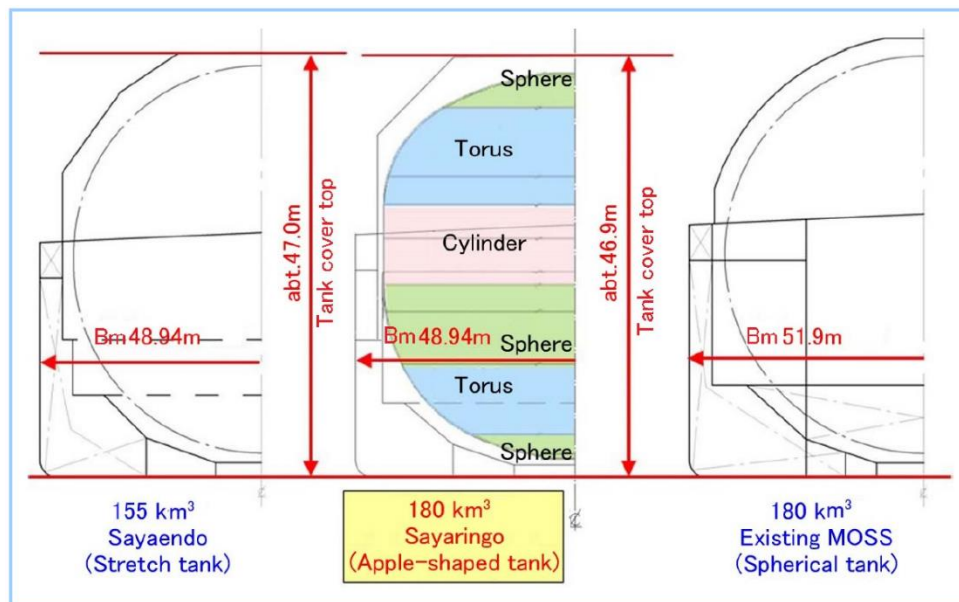
Το σύστημα δεξαμενών έχει δύο σημαντικές διαφορές από το αρχικό σύστημα των σφαιρικών δεξαμενών. Αρχικά όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, όλες οι δεξαμενές καλύπτονται στην επάνω πλευρά από μία ενιαία κατασκευή που ξεκινά πριν τη πρώτη δεξαμενή και φτάνει μέχρι και την υπερκατασκευή. Αυτή η κατασκευή έχει πολλά οφέλη στη συνολική απόδοση του πλοίου. Από την πλευρά της αντοχής, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να βοηθάει στη παραλαβή τάσεων και ιδιαίτερα τις καμπτικές τάσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Τα σφαιρικά καλύμματα που έχουν οι τυπικές σχεδιάσεις Moss (όπως το Norman Lady) δεν συνεισφέρουν σχεδόν καθόλου στη παραλαβή τάσεων. Όμως στη σχεδίαση “SayaENDO” η κατασκευή ενισχύεται τόσο πολύ, που επιτρέπει τη μείωση του πάχους των ελασμάτων άρα και τελικά τη μείωση του βάρους του κενού σκάφους (Lightship Weight). Περαιτέρω, μπορούν να τοποθετηθούν σωληνώσεις και καλωδιώσεις πάνω στο κάλυμμα, απαλείφοντας έτσι την απαίτηση για πολύπλοκα στηρίγματα των σωληνώσεων της κάθε δεξαμενής, που αναγκαστικά υπήρχαν στη κλασική σχεδίαση. Τέλος, λόγω καλύτερης αεροδυναμικής μορφής επιτυγχάνεται χαμηλότερη αντίσταση λόγω αέρα.

Η δεύτερη διαφορά που υπάρχει, είναι ότι οι δεξαμενές δεν έχουν απόλυτα σφαιρικό σχήμα αλλά έχουν το σχεδιασμό “stretched spherical tank”, δηλαδή ένα στρεβλό σφαιρικό σχήμα. Στις δεξαμενές αυτές, τοποθετείται ένα κυλινδρικό κομμάτι στην υπάρχουσα σφαίρα, με διάμετρο ίση με τη διάμετρο της σφαίρας στην περιοχή πάνω από τον ισημερινό, με αποτέλεσμα να επεκτείνεται η δεξαμενή προς τα πάνω. Αυτό οδηγεί στην αύξηση της συνολικής χωρητικότητας κατά 5.4% (από 147,000 σε 155,000 m³) χωρίς να αυξηθεί το πλάτος του πλοίου, εφόσον διατηρείται η ίδια διάμετρος των δεξαμενών. Στη συγκεκριμένη σχεδίαση, έχει προστεθεί ένας κυλινδρικός δακτύλιος στον ισημερινό δακτύλιο ύψους σχεδόν 1.5 m. Ο επιπρόσθετος δακτύλιος τοποθετείται σε όλες τις δεξαμενές πέρα από την πρωραία, διότι αν επεκταθεί και η πρωραία δεξαμενή, τότε θα οδηγήσει σε σχεδιαστικά προβλήματα και μη συμμόρφωση με τους κανονισμούς, λόγω χαμηλής ορατότητας από τη γέφυρα. (IMO – Visibility Line)

- SayaRINGO

Το σύστημα SayaRINGO, είναι ένα σύστημα που έχει κατασκευαστεί πάλι από τη Mitsubishi Heavy Industries και το πρώτο πλοίο παραδόθηκε το 2018 με όνομα “Diamond Gas Orchid”. Ουσιαστικά το σύστημα SayaRINGO είναι μία βελτιωμένη έκδοση του συστήματος SayaENDO, αφού διατηρεί το συνεχές κάλυμμα πάνω από τις δεξαμενές άρα διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα που αναλύθηκαν παραπάνω. Η μόνη διαφορά που εισάγουν στο σύστημα SayaRINGO, όσον αφορά τα συστήματα δεξαμενών (δεν θα αναλυθούν οι βελτιώσεις στη

προωστήρια εγκατάσταση), είναι το βελτιωμένο σχήμα των δεξαμενών. Έχοντας αρχικά τις σφαιρικές δεξαμενές, έπειτα τις σφαιρικές δεξαμενές με επιπρόσθετο δακτύλιο στο κέντρο, στο σύστημα SayaRINGO οι δεξαμενές λαμβάνουν ένα σχήμα σαν το μήλο, όπως φαίνεται στην εικόνα 20. Ουσιαστικά γίνεται η προσπάθεια να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου αλλά διατηρώντας τις βασικές αρχές των σφαιρικών δεξαμενών και τη μεγάλη αξιοπιστία τους.



Εικόνα 20 - Σύγκριση SayaENDO, Sayaringo, Spherical (Πηγή: MHI)

Η νέα μορφή των δεξαμενών αποτελείται από ένα κυλινδρικό κομμάτι στον ισημερινό δακτύλιο, ένα κομμάτι σφαιρικής γεωμετρίας στη κάτω πλευρά του ισημερινού δακτυλίου για την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων, μετά ένα κομμάτι μορφής τόρου για την καλύτερη εκμετάλλευση χώρου και τέλος στο κατώτατο τμήμα ένα σφαιρικό σχήμα. Στην πάνω πλευρά του κυλινδρικού δακτυλίου υπάρχει κατευθείαν η μορφή τόρου και το ανώτατο τμήμα έχει σφαιρικό σχήμα. Περαιτέρω σε σχέση με το σύστημα SayaENDO, το σύστημα SayaRINGO λόγω της μορφής του, έχει λίγο χαμηλότερο κέντρο βάρους σε έμφορτη κατάσταση σε σχέση με τη δεξαμενή SayaENDO ίδιας χωρητικότητας.

Η συνολική χωρητικότητα ενός πλοίου τύπου SayaRINGO αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με πλοίο τύπου SayaENDO χωρητικότητας 155,000 m³, χωρίς να μεταβάλλεται καθόλου το πλάτος του πλοίου, που είναι καθοριστικό, προκειμένου τα συγκεκριμένα πλοία να περνούν από τη νέα διώρυγα του Παναμά. Το μήκος του πλοίου όμως δε παραμένει σταθερό, αλλά αυξάνεται αναλόγως τη τελική χωρητικότητα του πλοίου. Παρόλα αυτά, οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι με το συγκεκριμένο σύστημα δεξαμενών μπορεί να κατασκευαστεί πλοίο συνολικής χωρητικότητας 180,000 m³ και να εξακολουθεί να περνά από τη διώρυγα του Παναμά.

Συστήματα μεμβρανικού τύπου

Τα τελευταία χρόνια τα περισσότερα νεότευκτα πλοία κατασκευάζονται με συστήματα αποθήκευσης ΥΦΑ με μεμβράνες. Υπάρχουν δύο συστήματα μεμβρανικού τύπου που έχουν τοποθετηθεί στη πραγματικότητα και κυριαρχούν στην αγορά, τα οποία και τα

δύο ανήκουν στην “GTT” (GazTransport & Technigaz). Η “GTT” σχηματίστηκε το 1994 και προήλθε από δύο πολύ σημαντικές εταιρείες με μεγάλη εμπειρία στο τομέα μεταφοράς του ΥΦΑ, τη “Gaz Transport” και “Technigaz”. Το πρώτο πλοίο που κατασκευάστηκε με δεξαμενές μεμβρανικού τύπου ήταν το “Polar Alaska”, χωρητικότητας 71,500 m³, στο οποίο εγκαταστάθηκαν δεξαμενές από τη “Gaz Transport” το 1969, ενώ το πρώτο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ για εμπορικούς σκοπούς με συστήματα δεξαμενών από την “Technigaz”, ήταν το “Descartes” χωρητικότητας 50,000 m³. Νεότευκτα πλοία κατασκευάζονται σε πολλά ναυπηγεία (περίπου 26) σε όλο το κόσμο, με τα οποία συνεργάζεται η “GTT” και για κάθε νέα κατασκευή τα ναυπηγεία πληρώνουν ένα χρηματικό ποσό προς την εταιρεία αυτή. Τα συστήματα που προσφέρουν είναι τα “Mark III”, “NO96” και συνδυασμό αυτών “CS1”, ενώ προσφέρει και εξελίξεις αυτών.

Σύμφωνα με τον IGC, μεμβρανικού τύπου λέγονται: «οι δεξαμενές που είναι υποστηριζόμενες από το πλοίο, αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα (μεμβράνη), το οποίο βασίζεται πάνω στο μονωτικό υλικό και αυτό το μονωτικό υλικό βασίζεται πάνω στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Η μεμβράνη πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη που οι συστολές και διαστολές δεν θα επιβαρύνουν τη δεξαμενή». Άρα όλη η φιλοσοφία είναι ότι τοποθετείται ένα πρώτο λεπτό περίβλημα, ένα στρώμα μόνωσης και ένα δεύτερο περίβλημα (full secondary barrier, για λόγους ασφαλείας), τα οποία όλα στηρίζονται πάνω στη γάστρα του πλοίου. Το δευτερεύον περίβλημα είναι υποχρεωτικό από το κώδικα IGC για δεξαμενές μεμβρανικού τύπου.

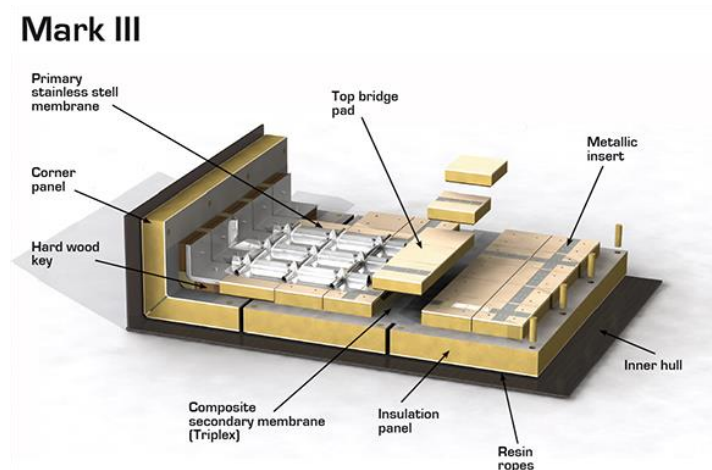
Το κύριο μειονέκτημα των δεξαμενών μεμβρανικού τύπου είναι η κακή αντοχή σε κρουστικά φορτία λόγω κίνησης του υγρού (sloshing). Η σχεδίαση της δεξαμενής δεν περιορίζει καθόλου την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας, όπως για παράδειγμα στην SPB και επιπλέον το λεπτό περίβλημα σε συνδυασμό με τη μόνωση δεν μπορούν να αντέξουν υψηλά κρουστικά φορτία. Το μονωτικό υλικό στις δεξαμενές μεμβρανικού τύπου λαμβάνει και ρόλο υποστήριξης πέρα από μόνωσης, αφού οι δεξαμενές δεν είναι αυτό-υποστηριζόμενες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό μόνωσης να μην επιλέγεται με κύριο γνώμονα τη μονωτική του ικανότητα αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τις μηχανικές του ιδιότητες. Υπενθυμίζεται πως σύμφωνα με τον IGC, η μόνωση και το δευτερεύον περίβλημα θα πρέπει σε περίπτωση διαρροής να διατηρήσουν το ΥΦΑ για τουλάχιστον 15 μέρες. Έτσι απαιτείται προσοχή να μην ταλαιπωρείται το μονωτικό υλικό από τα κρουστικά φορτία.

Το πρόβλημα του sloshing έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα μεμβρανικών δεξαμενών να μην είναι κατάλληλα σε πλοία FSRU & FPSO, που οι δεξαμενές βρίσκονται συνεχώς σε μερική πλήρωση όπως και σε δεξαμενές χρήσης ΥΦΑ ως καύσιμο που δεν αποφεύγεται η μερική πλήρωση. Βέβαια, οι δεξαμενές που τοποθετούνται για χρήση ΥΦΑ ως καυσίμου είναι σημαντικά πιο μικρές από τις δεξαμενές σε ένα πλοίο ΥΦΑ, άρα και τα κρουστικά φορτία δεν είναι τόσο υψηλά. Σε όλα τα νεότευκτα πλοία γίνεται μελέτη αντοχής έναντι του συγκεκριμένου φαινομένου, αφού υπάρχει επίδραση λόγω ελεύθερων επιφανειών τόσο στη μέγιστη χωρητικότητα όσο και στη χαμηλή. Στη μέγιστη πλήρωση των δεξαμενών στο 98.5%, κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, δημιουργείται και πάλι πρόβλημα λόγω sloshing στις αλλαγές γεωμετρίας εσωτερικά της δεξαμενής, δηλαδή στις επάνω πλευρές και γωνίες, διότι μέρος το φορτίου εξατμίζεται συνεπώς η στάθμη της δεξαμενής χαμηλώνει. Στη πολύ χαμηλή πλήρωση, δημιουργούνται αντίστοιχα προβλήματα στις αλλαγές γεωμετρίας χαμηλά, και παρατηρούνται κρουστικά φορτία στα παλαιά τοιχώματα της δεξαμενής. Τα ίδια προβλήματα είχαν παρατηρηθεί από την αρχή που τοποθετήθηκαν αυτά τα συστήματα, για παράδειγμα το 1969 στο πλοίο «Polar Alaska» που με πλήρωση 20%

έπαθε ατύχημα λόγω των κρουστικών φορτίων (sloshing). Τέλος, ο πύργος που είναι τοποθετημένες οι αντλίες φορτίου (rump tower) δέχεται και αυτός δυνάμεις λόγω της κίνησης του φορτίου, κυρίως όμως δυνάμεις αντίστασης. Οι μέθοδοι καταπολέμησης της επίδρασης του sloshing, είναι να τροποποιηθεί η κάθε δεξαμενή και να χωριστεί κατά το διάμηκες σε δύο μικρότερες αυτόνομες δεξαμενές, να αλλάξει η σχεδίαση και διάταξη του μονωτικού υλικού προκειμένου να αντέχει υψηλότερες πιέσεις και τέλος η πλήρωση της δεξαμενής σε συγκεκριμένα όρια.

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα των μεμβρανικών δεξαμενών είναι πως ανάμεσα σε δύο αμπάρια (δεξαμενές) τοποθετείται διπλή εγκάρσια φρακτή, με την ίδια φιλοσοφία που τοποθετείται το διπλό περίβλημα. Στο κενό χώρο ανάμεσα στις δύο εγκάρσιες φρακτές (cofferdam), τοποθετούνται συστήματα που θερμαίνουν τον αέρα και τη μεταλλική κατασκευή. Αυτό γίνεται διότι σύμφωνα με τον IGC, δεν επιτρέπεται να φτάσει κάποιο μέρος της μεταλλικής κατασκευής κάτω από τη θερμοκρασία που θα μεταβάλλει την αντοχή του και πιο συγκεκριμένα ο IGC προδιαγράφει συγκεκριμένη ελάχιστη θερμοκρασία σε κάθε σημείο. Έτσι το σύστημα αυτό δεν εκμεταλλεύεται τους συγκεκριμένους χώρους και αυξάνει τη πολυπλοκότητα με την εισαγωγή ενός επιπλέον συστήματος (θέρμανση) με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Όμως σε σχέση με τις σφαιρικές δεξαμενές, εκμεταλλεύεται τους διαθέσιμους χώρους σε πολύ υψηλότερο βαθμό. Τέλος, οι δεξαμενές μεμβρανικού τύπου έχουν μεγάλη δυσκολία στην προσαρμογή τους στις απαιτήσεις της γάστρας (δηλαδή σε περίπλοκη γεωμετρία, αφού το σύστημα αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό από προκατασκευασμένα ευθύγραμμα πάνελ.

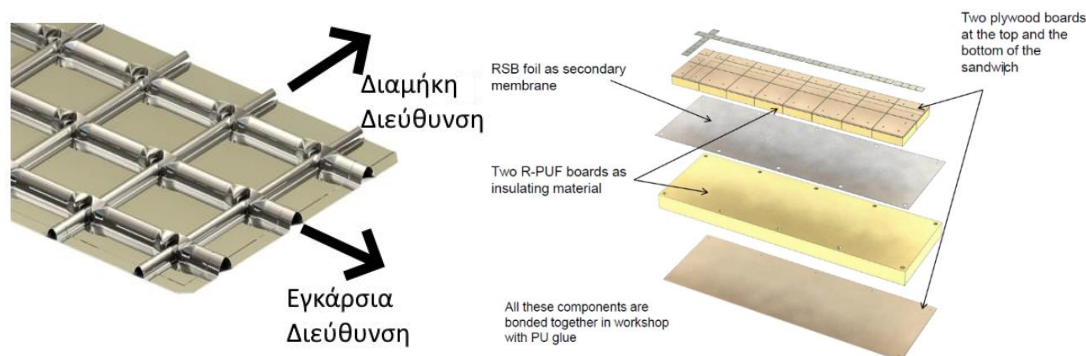
- Mark III (Technigaz)



Εικόνα 21 - Διάταξη συστήματος Mark III (Πηγή: GTT)

Το πρωτεύον περίβλημα (primary barrier) έχει κατασκευαστεί από ανοξείδωτο χάλυβα (τύπου 304 L) και έχει πάχος 1.2 mm. Έχει κυματοειδή μορφή (πτυχώσεις - corrugation)(εικόνα 22 Αρ.) και στις δύο κάθετες διευθύνσεις προκειμένου να μπορεί να παραλάβει τις μετατοπίσεις λόγω συστολής και διαστολής. Προσοχή απαιτείται στις ενώσεις των δύο κάθετων διευθύνσεων, καθώς το σημείο αυτό είναι το πιο ευαίσθητο. Για να μειωθεί η ευαισθησία, οι πτυχώσεις είναι διαφορετικού μεγέθους και πιο συγκεκριμένα οι εγκάρσιες είναι μεγαλύτερες από τις διαμήκειες πτυχώσεις, προκειμένου η μία πτύχωση να περνά πάνω από την άλλη. Κατά το διαμήκη άξονα του πλοίου, που τα φαινόμενα διαστολής και συστολής

είναι τα μεγαλύτερα, οι πτυχώσεις επιτρέπουν τη μεγαλύτερη παραμόρφωση της μεμβράνης.



Εικόνα 22 - - Πρώτο περίβλημα (Αρ.), Διάταξη μόνωσης και δεύτερου περιβλ.(Δε.) (Πηγή: GTT)

Το μονωτικό υλικό είναι τύπου ενισχυμένης πολυουρεθάνης (Reinforced Polyurethane Foam "R-PUF"). Είναι ενισχυμένη πολυουρεθάνη και όχι απλή, διότι όπως θα αναλυθεί παρακάτω, το μονωτικό υλικό πρέπει να μεταδώσει όλες τις τάσεις στη γάστρα. Το δευτερεύον περίβλημα αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου και εξωτερικά από αυτό υπάρχει και από τις δύο πλευρές ένα φύλλο υφάσματος γυαλιού. Λόγω της κακής μηχανικής αντοχής του μονωτικού υλικού, η ένωση του πρώτου περιβλήματος με τη πρώτη μόνωση και η ένωση τη δεύτερης μόνωσης με τη γάστρα γίνεται με ξύλο τύπου 'plywood', όπως φαίνεται στην εικόνα 22, (δεξιά). Τέλος, όλες αυτές οι στρώσεις (εικόνα 22, Δεξιά, πέρα από το πρωτεύον περίβλημα), ενώνονται πριν τη τοποθέτηση τους στο πλοίο, με ρητίνη προκειμένου να είναι ένα ενιαίο κομμάτι. Προσπάθειες γίνονται να αυξηθεί η αντοχή του μονωτικού υλικού μέσα από την αύξηση της πυκνότητάς του, προκειμένου να αντέχει σε υψηλότερες φορτίσεις, αφού όπως έχει προαναφερθεί οι τάσεις παραλαβής όλων των φορτίων λόγω του ΥΦΑ μεταφέρονται στη γάστρα.

Κατά τη κατασκευή, η διαδικασία είναι πολύ αυτοματοποιημένη στο μεγαλύτερο μέρος της, αφού είναι ευθείες πλευρές και έρχονται έτοιμα κομμάτια από το εργοστάσιο. Όμως, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη σύνδεση μεταξύ πλευρών και ιδιαίτερα στο τρίεδρο (γωνίες). Λόγω της συγκεκριμένης δυσκολίας, είναι σύνηθες οι γωνίες της δεξαμενής να είναι είτε 90°, είτε 135° χαρακτηριστικό που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό του πλοίου.

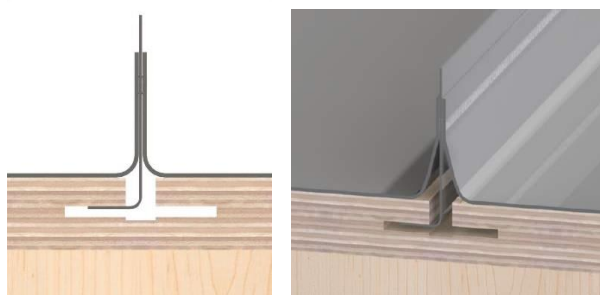
- Mark No.96 (Gaz Transport)

Ένα ακόμη προϊόν της GTT, που είναι το δεύτερο σύστημα που κυριαρχεί τις αγορές σε δεξαμενές μεμβρανικού τύπου, είναι το No.96. Το πρωτεύον περίβλημα είναι από το υλικό "Invar" το οποίο είναι χάλυβας με υψηλή κραμάτωση Νικελίου (36% Nickel-Steel Alloy) και έχει πάχος 0.7 mm. Το πρώτο περίβλημα αποτελείται από ξεχωριστά πάνελ σε σχήμα ανάποδου Π, τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους. Η φιλοσοφία του συστήματος είναι πως το πρωτεύον περίβλημα στηρίζεται πάνω σε ένα ξύλινο κουτί (από ξύλο plywood), το οποίο στηρίζεται πάνω στο δευτερεύον περίβλημα και το δευτερεύον περίβλημα στηρίζεται σε άλλο κουτί και μέσω «σχοινιών» στηρίζεται πάνω στη γάστρα.



Εικόνα 23 - Διάταξη συστήματος Mark NO.96 (Πηγή: GTT)

Εσωτερικά των ξύλινων κουτιών μπορεί να τοποθετηθεί οποιοδήποτε μονωτικό υλικό απαιτείται και συνήθως τοποθετούνται δύο διαφορετικά μονωτικά υλικά. Τα υλικά μόνωσης που χρησιμοποιούνται είναι αφρός πολυουρεθάνης, υαλοβάμβακας (glass wool) ή μονωτικός περλίτης.



Εικόνα 24 - Σκαρίφημα ένωσης ελασμάτων, Απεικόνιση σημείου σύνδεσης σε συστολή (Δε.) (Πηγή: GTT)

Το πρωτεύον και δευτερεύον περίβλημα είναι από ίδιο υλικό και προσδένονται πάνω στα κουτιά με τον ίδιο τρόπο. Τοποθετείται πάνω στο κουτί ένα έλασμα σε μορφή ανάποδου Γ και πάνω σε αυτό συγκολλούνται (στο επάνω μέρος), τα φύλλα ελάσματος που αποτελούν το περίβλημα. Η συγκόλληση γίνεται σε υψηλό σημείο, προκειμένου όπως φαίνεται και στην εικόνα 24 (δεξιά) να μπορούν να παραληφθούν τα φαινόμενα διαστολής και συστολής, χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα.

Ιδιαιτερότητα της κατασκευής είναι η σύνδεση μεταξύ των δύο κουτιών και του κατώτατου στρώματος, διότι εφαρμόζονται ειδικά διαμορφωμένες διατάξεις (coupler) που είναι υπεύθυνα για τη παραλαβή μετατοπίσεων (σε σχέση με τη γάστρα) αφού με ελατήρια και συνδέσμους δεν περιορίζει τη μετατόπιση. Αυτό γίνεται τόσο για τα φαινόμενα συστολής / διαστολής όσο και για τις παραμορφώσεις των ελασμάτων κατά τον ερματισμό του πλοίου. Τέλος, απαιτείται προσαρμοσμένη διάταξη στις γωνίες και (συνήθως) στη δεξαμενή N.1 που πρέπει να λάβει προσαρμοσμένο σχήμα και όχι τετραγωνοποιημένο.

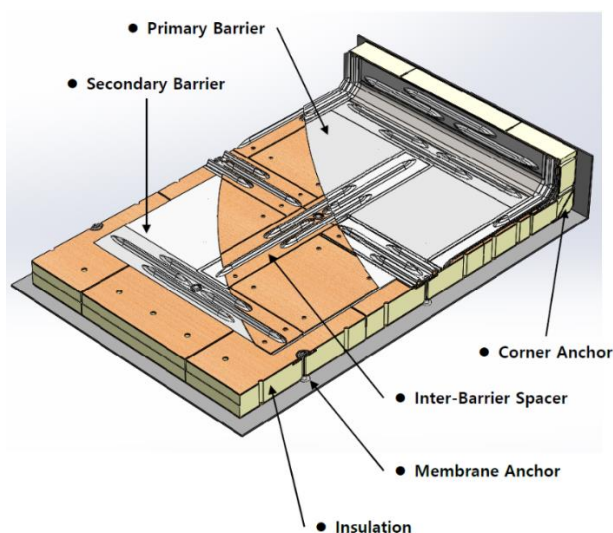
- Εξελίξεις από τη GTT

Η GTT παρά την ευρεία αποδοχή των δύο συστημάτων Mark III και NO96, που έχουν κυριαρχήσει την αγορά, προσπαθεί να βελτιώνει συνεχώς τα συστήματα της και για αυτό έχει αναπτύξει τα συστήματα όπως το Mark III Flex, Mark V, NO96 Max, NO96-GW, NO96-L03 . Το

κάθε σύστημα βελτιώνει κάποιο συγκεκριμένο τομέα όπως το ρυθμό εξατμιζόμενων αερίων, αντοχή, κόστος.

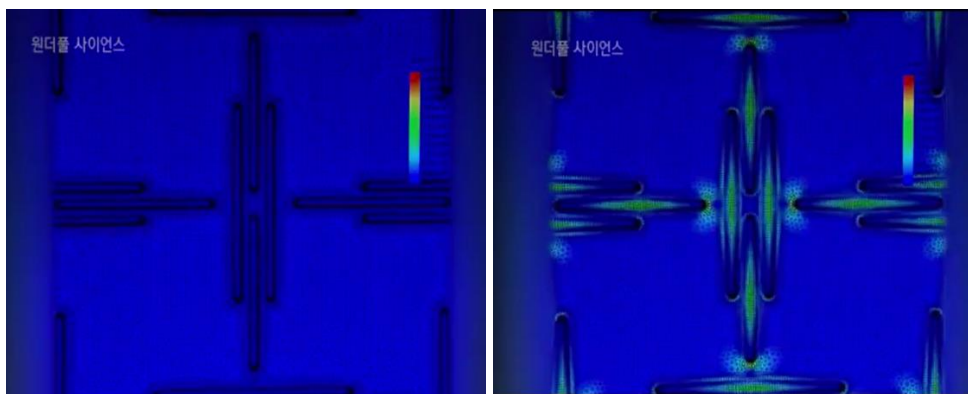
- KC-1

Το σύστημα μεμβρανικού τύπου «KC-1» είναι ένα νέο σύστημα, όχι όμως καινοτόμο, καθώς είναι μια προσπάθεια να λάβει τα θετικά χαρακτηριστικά των μεμβρανικών δεξαμενών και των συστημάτων της GTT. Το σύστημα αναπτύσσεται από την «KC-LNG Tech» μια Κορεάτικη εταιρεία, που μέσα από αυτό το σύστημα θα επιτραπεί σε πολλά ναυπηγεία να χτίσουν πλοία μεταφοράς ΥΦΑ χωρίς να πληρώνουν το αρκετά υψηλό κόστος δικαιωμάτων στη GTT. Η συγκεκριμένη εταιρεία ιδρύθηκε από κοινού από τη KOGAS και τα ναυπηγεία DSME, HHI και SHI. Το σύστημα έχει λάβει DA (Development Approval) από νηογνώμονες όπως ABS, LR, BV, KR. Το 2017 παραδόθηκαν τα δύο πρώτα πλοία (SK Serenity και SK Spica) εξοπλισμένα με αυτό το σύστημα και αποτελούν δύο από τα συνολικά 6 που έχουν συμφωνηθεί.



Εικόνα 25 - Διάταξη συστήματος KC-1

Το πρωτεύον και δευτερεύον περίβλημα είναι από υλικό ανοξείδωτου χάλυβα τύπου 304-L, πάχους 1.5 mm. Το πρωτεύον και δευτερεύον περίβλημα έχουν πτυχώσεις σταυροειδούς μορφής (εικόνα 25) και βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση. Μεταξύ αυτών υπάρχει ένα πολύ λεπτό υλικό (συνήθως ξύλο) που τα χωρίζει τόσο ώστε πιθανή ζημιά στο ένα να μην οδηγήσει ταυτοχρόνως και στη ζημιά του άλλου περιβλήματος. Μετά το δευτερεύον περίβλημα υπάρχει ένα χοντρό (περίπου 270mm) στρώμα μόνωσης πολυουρεθάνης με ένα λεπτό ξύλο τύπου plywood στα άκρα του. Όσον αφορά τα φαινόμενα συστολής/ διαστολής, η διαμόρφωση που έχουν οι πτυχώσεις επιτρέπουν τις παραμορφώσεις και στις δύο διευθύνσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 26.



Εικόνα 26 - Αρ. Απαραμόρφωτο, Δε. Παραμορφωμένο (Πηγή: YouTube)

Διαφορές με το Mark III της GTT, είναι η ευκολότερη κατασκευή διότι αποτελείται από μία στρώση μόνωσης και όχι δύο (όπως GTT) και σε περίπτωση διαρροής ΥΦΑ το δευτερεύον περίβλημα δεν θα δεχτεί απότομη αλλαγή θερμοκρασίας λόγω της μικρής απόστασης από το πρωτεύον περίβλημα. Βέβαια, αυτό βοηθά μόνο σε περιπτώσεις βίαιης διαρροής φορτίου που γίνεται σπάνια σε σχέση με τη διαρροή φορτίου από μία μικρή ατέλεια ή ρωγμή, με μειωμένο ρυθμό. Το μονωτικό υλικό είναι πολυουρεθάνη (PUF) και όχι ενισχυμένη πολυουρεθάνη (R-PUF) (λόγους αντοχής) με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή αγωγής κατά 10%.

Διάφορα συστήματα

Κατά καιρούς, πολλές εταιρείες και ναυπηγεία προσπαθούν να καινοτομήσουν στο τομέα των συστημάτων αποθήκευσης ΥΦΑ με αποτέλεσμα να έχουν δοθεί από νηογνώμονες αρκετά AiP (Approval in Principle), αλλά πολύ λίγα έως κανένα δεν έχει αναπτυχθεί σε πραγματικές εγκαταστάσεις πάνω σε πλοία. Παρακάτω δίδονται παραδείγματα συστημάτων αποθήκευσης ΥΦΑ:

- SOLIDUS (Μεμβρανικό σύστημα) από τη Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (2017).
- SCA (Μεμβρανικό σύστημα) από τη Samsung Heavy Industries (2011).
- ACTIB (Aluminum Cargo Tank Independent IMO type-B) από την DSME (2012).
- MCTIB (Manganese Cargo Tank Independent IMO type-B) από την DSME (2017).
- CDTs (Cubic Donut Tank System), από την Altair Product Design (2015).
- Δεξαμενές από σύνθετα υλικά με έρευνα από τον ABS, Scorpius Space Launch Company και Ocean Finance (2018, development).

3. Χαρακτηριστικά πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ

Κατηγορίες πλοίων

Όπως σε όλα τα πλοία γίνεται διαχωρισμός των πλοίων αναλόγως τη χωρητικότητά τους, έτσι και στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ γίνεται διαχωρισμός.

Τα πλοία κατηγοριοποιούνται σε:

- Q – Max: Χωρητικότητα 260,000 m³. (Συνήθεις διαστάσεις: μήκος 345m, πλάτος 53.8m και βύθισμα 12m). Είναι τα μεγαλύτερα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και το πρώτο πλοίο αυτής της κατηγορίας κατασκευάστηκε το 2008. Οι διαστάσεις του πλοίου αυτού είναι οι μέγιστες που μπορούν να προσεγγίσουν τις εγκαταστάσεις φόρτο-εκφόρτωσης στο Qatar (Ras Laffan terminal).
- Q – Flex: Χωρητικότητα 200,000 με 230,000 m³.
- Conventional: Χωρητικότητα 100,000 με 190,000 m³. Στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν τα περισσότερα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ που έχουν κατασκευαστεί.
- Medmax: Χωρητικότητα 50,000 με 75,000 m³.
- Bunkering: Χωρητικότητα 2,000 με 10,000 m³. Τα πλοία αυτά είναι πολύ μικρής χωρητικότητας και ο κύριος σκοπός τους, είναι να βοηθήσουν το ανεφοδιασμό πλοίων που χρησιμοποιούν το ΥΦΑ ως καύσιμο

Πέρα από το διαχωρισμό των πλοίων ως προς τη χωρητικότητα, υπάρχουν διάφοροι τύποι πλοίων που διαχειρίζονται (αποθηκεύουν / μεταφέρουν / επεξεργάζονται) το ΥΦΑ. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι:

- LNG carrier with reliquefaction system (Πλοία μεταφοράς ΥΦΑ με εγκατεστημένη μονάδα επανυγροποίησης).

Τα συγκεκριμένα πλοία είναι ίδια με τα τυπικά πλοία που μεταφέρουν ΥΦΑ, με τη διαφορά ότι διαθέτουν μια μονάδα που επανυγροποιεί τα εξατμιζόμενα αέρια (boil-off gas), με αποτέλεσμα να μην χάνεται ωφέλιμο φορτίο κατά τη μεταφορά. Όμως η μονάδα αυτή δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα σε όλες τις περιπτώσεις. Συνηθίζεται να τοποθετείται σε πλοία που μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα ΥΦΑ που σαν αποτέλεσμα έχουν μεγάλη ποσότητα εξατμιζόμενων αερίων. Σε μικρά πλοία δεν τοποθετείται τέτοια μονάδα διότι, τα εξατμιζόμενα αέρια χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία της κύριας μηχανής και των βοηθητικών συστημάτων της. Όταν όμως δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα εξατμιζόμενων αερίων προς χρήση, τότε το πλήρωμα εξαναγκάζει την αεριοποίηση του ΥΦΑ (forced boil-off) για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Άρα στα μικρά πλοία που πολλές φορές γίνεται εξαναγκασμένη αεριοποίηση, η χρήση μιας μονάδας επανυγροποίησης πέρα από το επιπλέον αρχικό κόστος επένδυσης, αυξάνει τη πολυπλοκότητα των συστημάτων και απαιτεί υψηλή συντήρηση. Η συγκεκριμένη μονάδα τοποθετείται συνήθως πρώτα από την υπερκατασκευή αλλά αρκετά κοντά σε αυτήν, για να μην περιορίζει την ορατότητα. Η μονάδα φαίνεται στην εικόνα 27.



Εικόνα 27 - Μονάδα επανυδροποίησης (Πηγή: Marine Traffic)

- FSRU (Floating Storage Regasification Unit)



Εικόνα 28 - FSRU (Πηγή: Excelebrate Energy)

Τα πλοία αυτά είναι ουσιαστικά πλοία μεταφοράς ΥΦΑ τα οποία διαθέτουν επιπλέον μία μονάδα που αεριοποιεί το ΥΦΑ. Οι μονάδες αυτές είναι είτε κινητές είτε σταθερές. Σε πολλές περιοχές η κατανάλωση ΦΑ δεν αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας, αλλά είτε βοηθά συμπληρωματικά, όταν άλλα καύσιμα δεν είναι διαθέσιμα για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, ή η χωρητικότητα που δέχεται η περιοχή από χερσαίους αγωγούς ΦΑ είναι πολύ μικρή. Άρα εφόσον απαιτείται η τροφοδότηση της περιοχής με ΥΦΑ δηλαδή να μεταφερθεί από πλοία για κάποιες λίγες φορές, δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να εγκατασταθεί στις περιοχές αυτές μια μόνιμη χερσαία εγκατάσταση που να λαμβάνει το ΥΦΑ, να το αεριοποιεί και να το στέλνει στους κατάλληλους αγωγούς προς χρήση. Έτσι τα πλοία FSRU, καλούνται να αναλάβουν αυτό το ρόλο και να μην παραδίδουν το φορτίο σε υγροποιημένη μορφή αλλά σε αεριοποιημένη. Ένα τέτοιο πλοίο μπορεί είτε να παραμένει σταθερό (αγκυρωμένο) για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα στη περιοχή αυτή και να χρησιμοποιείται για την αεριοποίηση και όχι τη μεταφορά του ΥΦΑ (δηλαδή άλλα πλοία μεταφέρουν το ΥΦΑ από τις πηγές και το ξεφορτώνουν σε αυτό) ή να μεταφέρει το ΥΦΑ από τις πηγές σε κάποια περιοχή (διαφορετική κάθε φορά) και να το αεριοποιεί. Στη περίπτωση που τα πλοία σχεδιάζονται για να λειτουργούν κυρίως ως σταθερά, τότε τοποθετείται στο πρωραίο τμήμα μία κατάλληλη διαμόρφωση για να μπορέσει να αγκυρώνεται και να περιστρέφεται. Όπως είναι λογικό τα πλοία FSRU μπορούν να λειτουργήσουν και σαν απλά πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, αλλά η συγκεκριμένη μονάδα αεριοποίησης δημιουργεί νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες. Όμως υπάρχει αυξημένη πολυπλοκότητα (όχι όσο σε ένα FPSO), επιπλέον κόστος κατασκευής και συντήρησης σε σχέση με ένα απλό πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ. Σημειώνεται πως μέχρι και τα τέλη

του 2017 είχαν κατασκευαστεί 28 τέτοιες μονάδες. Στην εικόνα 28, φαίνεται ένα πλοίο FSRU και με κύριο χαρακτηριστικό του την υψηλή πολυπλοκότητα στο κατάστρωμα και η μονάδα που υπάρχει στο πρωραίο τμήμα επί του καταστρώματος.

- FPSO (Floating Production Storage and Off-loading Unit) ή FLNG (Floating LNG Unit)

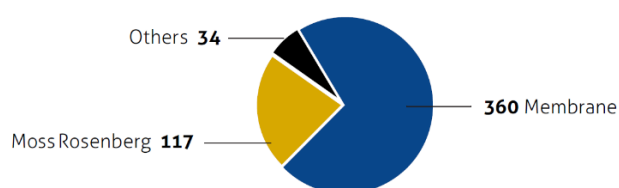


Εικόνα 29 - FPSO "Ichthys Explorer" (Πηγή: hrmonline.com.au) (Αρ.), FLNG "Prelude" (Πηγή: Inpex) (Δε.)

Τα πλοία αυτά αγκυρώνονται στο βυθό της θάλασσας και εξορύσσουν το φυσικό αέριο από τα κοιτάσματα – πηγές ΦΑ. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και ο σκοπός των συστημάτων αυτών είναι να εκμεταλλευτούν πολλές περιοχές που διαθέτουν κοιτάσματα φυσικού αερίου που είναι όμως απόμακρες και διαθέτουν μικρή χωρητικότητα σε ΦΑ. Έτσι δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να κατασκευαστούν ειδικές πλατφόρμες εξόρυξης και υγροποίησης του ΦΑ, όπως γίνεται στη περίπτωση του πετρελαίου και γι' αυτό κατασκευάζονται οι συγκεκριμένες μονάδες που αφού υγροποιήσουν το ΦΑ, το αποθηκεύουν στις δεξαμενές τους μέχρις ότου το ξεφορτώσουν σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. Όπως είναι λογικό αυτές οι μονάδες απαιτούν συγκεκριμένη μελέτη, ξεκινώντας από την αγκύρωση, το σύστημα που θα παραλαμβάνονται οι τάσεις από την αγκύρωση, η περιστροφή του πλοίου αναλόγως τη διεύθυνση ανέμου, το σύστημα εξόρυξης, την υγροποίηση και ασφαλώς το σύστημα αποθήκευσης. Μεγάλη προσοχή απαιτείται στη διαχείριση του φορτίου κατά τη διάρκεια θαλασσοταραχής διότι είναι πιθανό να υπάρξει αστοχία στο σύστημα αποθήκευσης ΥΦΑ λόγω ελεύθερης επιφάνειας (sloshing), αφού η μερική πλήρωση των δεξαμενών είναι βέβαιη. Μερικές από αυτές τις μονάδες που διαθέτει είναι: εξόρυξη ΦΑ, σταθεροποίηση συμπυκνώματος και υδρογονανθράκων (Condensate stabilization), απομάκρυνση όξινων αερίων, απομάκρυνση υγραερίου (LPG), υγροποίηση ΦΑ, παραγωγή ενέργειας για τις διεργασίες, συστήματα αποθήκευσης ΥΦΑ, μεταφορά ΥΦΑ.

Στατιστικά στοιχεία της αγοράς

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το σύστημα αποθήκευσης με το οποίο κατασκευάζεται ένα πλοίο χαρακτηρίζει πλήρως το πλοίο αυτό, τόσο στην ποιότητα και κόστος κατασκευής όσο και στη διάρκεια ζωής του. Άρα, το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό που οι πλοιοκτήτες αποφασίζουν εξαρχής πριν από οποιαδήποτε άλλο χαρακτηριστικό είναι ποιο σύστημα αποθήκευσης ΥΦΑ θα εγκατασταθεί πάνω στο πλοίο. Τα πρώτα χρόνια στην αγορά κυριαρχούσαν τα συστήματα αποθήκευσης σφαιρικών δεξαμενών (MOSS), αλλά τα τελευταία χρόνια που η τεχνολογία εξελίσσεται και υπάρχει μεγαλύτερη εμπειρία από την λειτουργία των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, τα συστήματα μεμβρανικού τύπου κυριαρχούν στην αγορά που ουσιαστικά είναι τα συστήματα από τη "GTT". Όμως η ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει σε νέες καινοτόμες σχεδιάσεις που ενδέχεται να αλλάξουν τις προτιμήσεις της αγοράς στο μέλλον. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια στατιστικά στοιχεία της αγοράς των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ.

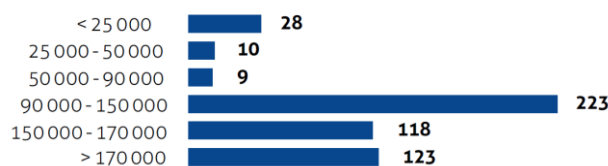


Εικόνα 30 - Στοιχεία από Clarkson's Research έως τα τέλη του 2017 (Πηγή:GIIGNL)

Από το παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται πως οι δεξαμενές μεμβρανικού τύπου λαμβάνουν κυρίαρχο ρόλο στη αγορά, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κάποιος ότι το συγκεκριμένο διάγραμμα αφορά τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ που είναι σε λειτουργία από το 1970. Άρα, αν γίνει ένα αντίστοιχο διάγραμμα για τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ για τα πλοία μετά το 2000, τότε οι δεξαμενές μεμβρανικού τύπου θα ξεπερνούν το 90% του πλήθους των πλοίων που ναυπηγήθηκαν. Από τα μεμβρανικού τύπου, 184 πλοία έχουν σύστημα από την Technigaz (δηλαδή με το σύστημα Μαρκ III) και 171 από την Gaz Transport (δηλαδή με το σύστημα NO.96) (μέχρι το 2017) που και τα δύο ανήκουν στην "GTT".

Περαιτέρω, δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα το πλήθος των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ που έχουν κατασκευαστεί μέχρι τα τέλη του 2017 αναλόγως τη χωρητικότητά τους. Σημειώνεται ότι και αυτό το διάγραμμα είναι επηρεασμένο από τις σφαιρικές δεξαμενές, αφού η χωρητικότητα ενός πλοίου με σφαιρικές δεξαμενές βρισκόταν στη περιοχή της συνολικής χωρητικότητας από 120,000 έως 150,000 m³. Όσο εξελίσσεται η τεχνολογία και αποκτάται μεγαλύτερη εμπειρία, τόσο η χωρητικότητα των πλοίων αυξάνεται λόγω των συμφερόντων της οικονομίας κλίμακας. Τέλος, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται πως κατασκευάζονται πλοία με συνολική χωρητικότητα γύρω στα 170,000 m³.

ACCORDING TO CARGO CAPACITY (IN M³)



Εικόνα 31 - Στοιχεία από Clarkson's Research έως τα τέλη του 2017 (Πηγή:GIIGNL)

4. Επιλογές σχεδίασης

Σύστημα αποθήκευσης

Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της αγοράς που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα συστήματα μεμβρανικού τύπου κυριαρχούν στην αγορά, ως σύστημα αποθήκευσης του ΥΦΑ. Για το λόγο αυτό, το πλοίο που θα σχεδιαστεί θα εξοπλιστεί με σύστημα μεμβρανικού τύπου και πιο συγκεκριμένα σύστημα από την εταιρία "GTT". Ανάμεσα στα δύο συστήματα της εταιρίας αυτής, δηλαδή το Mark III και το No.96, παρατηρείται μια καλή ισορροπία στην αγορά μεταξύ των πλοίων που χρησιμοποιούν συστήματα μεμβρανικού τύπου. Βέβαια, η επιλογή για το ποιο σύστημα μεμβράνης θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το ναυπηγείο που θα χτιστεί το πλοίο, διότι τα ναυπηγεία που έχουν έγκριση να κατασκευάζουν συστήματα μεμβρανικού τύπου, κατασκευάζουν πλοία μόνο από το ένα σύστημα αποθήκευσης (κατά κύριο λόγο) και όχι και από τα δύο.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα μεμβρανικού τύπου No.96, διότι ότι είναι πολύ πιο ευέλικτα στη κατασκευή τους, τόσο λόγω της μη-τετραγωνικής μορφής της πρωραίας δεξαμενής, αλλά και για την ευκολία στις επιτρεπόμενες διαστάσεις των δεξαμενών. Για παράδειγμα το σύστημα No.96 έχει περιορισμό στο μέγιστο μήκος της δεξαμενής, ενώ το Mark III πέρα από το μέγιστο μήκος της δεξαμενής, θα πρέπει το μήκος, το πλάτος και ύψος να είναι πολλαπλάσια συγκεκριμένων μεγεθών.

Απαιτήσεις συστήματος αποθήκευσης No.96

Το σύστημα αποθήκευσης No.96 της εταιρείας GTT, έχει κάποιες συγκεκριμένες απαιτήσεις για την σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία. Από τη σχεδιαστική πλευρά, οι διαστάσεις της δεξαμενής πρέπει να ικανοποιούν κάποια συγκεκριμένα κριτήρια, τα οποία παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

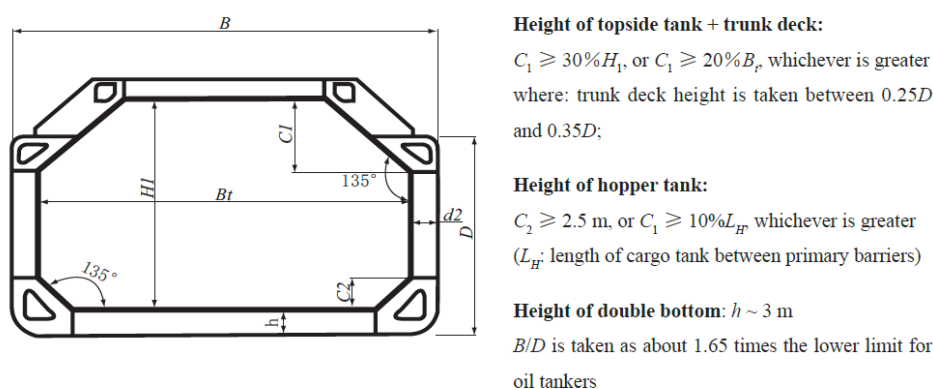


Figure 3.2.2.5 Requirements for GTT No. 96 Section

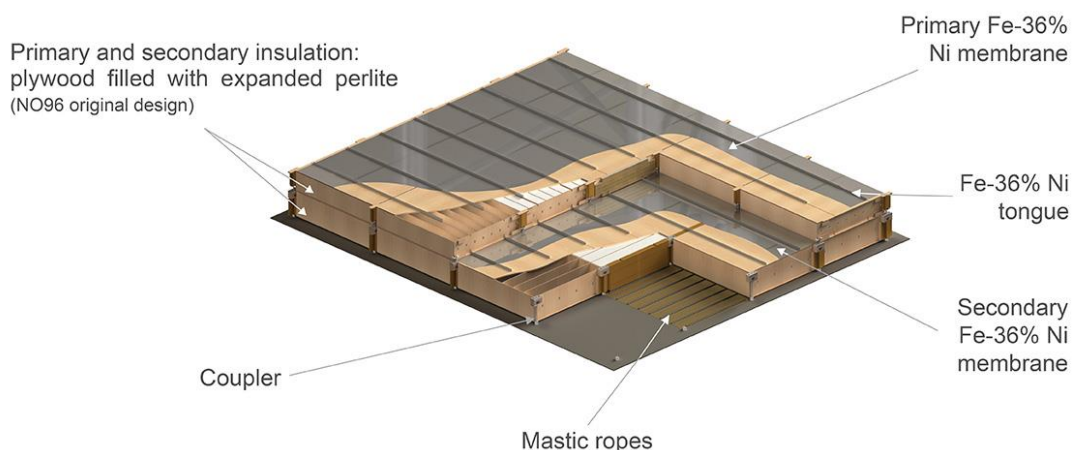
Εικόνα 32 - Απαιτήσεις συστήματος αποθήκευσης (Πηγή: Κινέζικος Νηογνώμονας)

Περαιτέρω, σχεδιαστική απαίτηση αναφορικά με τη διαμήκη αντοχή, είναι ότι οι τάσεις στο εσωτερικό περίβλημα (π.χ. εσωτερικός πυθμένας) δεν θα πρέπει να ξεπεράσουν τα 120 [MPa] [21]. Έτσι η διατομή θα πρέπει να προσαρμοστεί αναλόγως, προκειμένου να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση πέρα από την διαρροή των χαλύβων.

Οι λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος αυτού, είναι ότι η πλήρωση των δεξαμενών θα πρέπει να είναι μεταξύ κάποιων συγκεκριμένων ορίων προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα λόγω sloshing.

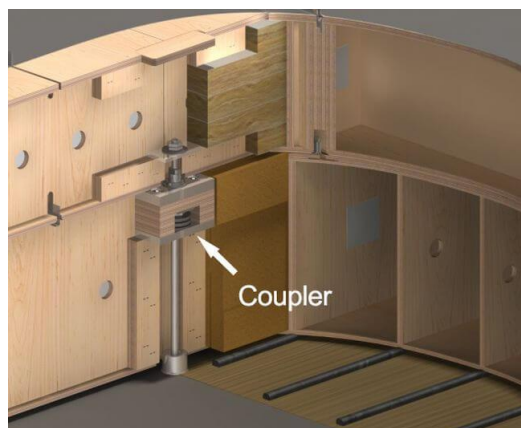
Στη συνέχεια θα γίνει η ανάλυση των κύριων χαρακτηριστικών του συστήματος No.96:

Οι μεμβράνες (πρωτεύον και δευτερεύον περίβλημα) είναι από υλικό Invar® πάχους 0.7 [mm], το οποίο έχει πολύ καλές κρυογενικές ιδιότητες και περαιτέρω έχει πολύ μικρό συντελεστή γραμμικής διαστολής, με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις του συστήματος μεταξύ ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και θερμοκρασίας λειτουργίας (-163°C) να είναι πολύ μικρές.



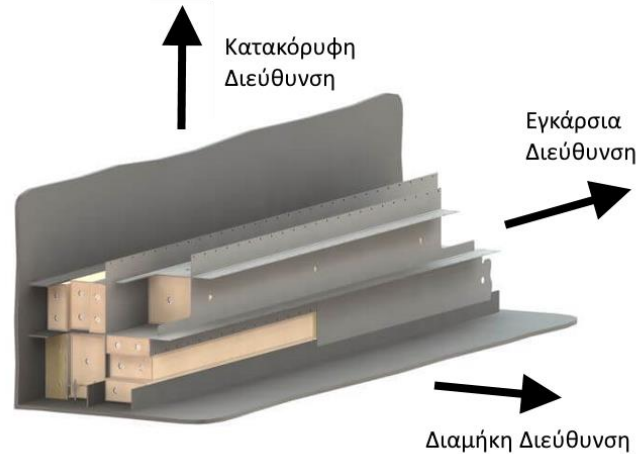
Εικόνα 33 - Σύστημα No.96 (Πηγή: GTT Website)

Στην διεπιφάνεια μεταξύ εσωτερικής γάστρας του πλοίου και των κουτιών υπάρχουν λαστιχένια σχοινιά (mastic rope), των οποίων το πάχος μεταβάλλεται από 7 έως 25 [mm]. Σκοπός των σχοινιών αυτών είναι να εξομαλύνουν την επιφάνεια της εσωτερικής γάστρας από ανωμαλίες – διακυμάνσεις που δημιουργήθηκαν κατά την κατασκευή του πλοίου. Έτσι αρχικά γίνεται μέτρηση της επιφάνειας των ελασμάτων και μετά αναλόγως τη θέση των κουτιών τοποθετείται το αντίστοιχο πάχος σχοινιού, προκειμένου οι μεμβράνες να είναι όσο το δυνατό σε ένα ενιαίο επίπεδο. Ανομοιομορφή διάταξη των κουτιών είναι ένας σημαντικός λόγος για να αστοχήσει η μεμβράνη, καθώς στην ένωση μεταξύ των κουτιών, ένα μικρό κομμάτι μεμβράνης μπορεί να παραμείνει ανυποστήρικτο.



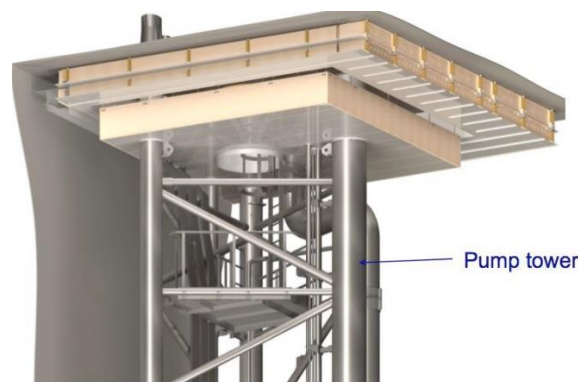
Εικόνα 34 - No.96 Coupler (Πηγή: MarineInsight Website)

Ειδικά διαμορφωμένη διάταξη (coupler) υπάρχει για να σταθεροποιεί τα κουτιά στην εσωτερική γάστρα. Στη μία τους πλευρά η διάταξη είναι συγκολλημένη στο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα και η άλλη πλευρά της είναι προσδεδεμένη στο κουτί. Σχεδιαστικά υπάρχει ανοχή στο coupler, η οποία επιτρέπει στις μικρό-μετατοπίσεις των κουτιών σε σχέση με τον εσωτερικό πυθμένα προκειμένου σε υψηλές φορτίσεις (πχ. ερματισμός) να μπορούν να παραληφθούν οι φορτίσεις από τον εσωτερικό πυθμένα, χωρίς να δημιουργηθεί αστοχία στο σύστημα αποθήκευσης.



Εικόνα 35 - No.96 - Invar Tube (Πηγή: MarineInsight Website)

Για να παραληφθούν οι αξονικές τάσεις που δημιουργούνται λόγω των καμπτικών ροπών και της συστολής/διαστολής, υπάρχει στα άκρα των εγκάρσιων φρακτών μια ειδική κατασκευή (invar tube, Εικόνα 35). Η διάταξη αυτή υπάρχει περιμετρικά σε όλη την εγκάρσια φρακτή και σε συνεργασία με ενισχυτικά στην πλευρά του κενού χώρου (cofferdam), μεταδίδονται οι τάσεις ομοιόμορφα από το σύστημα αποθήκευσης στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου και αντιστρόφως.



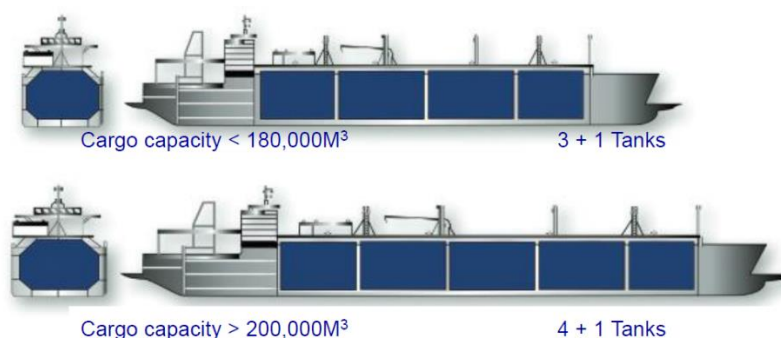
Εικόνα 36 - Πύργος αντλιών (Πηγή: [15])

Τέλος, στην κάθε δεξαμενή τοποθετείται στο πρυμναίο τμήμα, επι το πλείστον, ο πύργος αντλιών και συστημάτων (rump tower) ο οποίος εξυπηρετεί στη διαχείριση του φορτίου. Στην κάτω πλευρά του πύργου είναι τοποθετημένες οι αντλίες που αντλούν το ΥΦΑ από την κάτω πλευρά της δεξαμενής και μέσω σωληνώσεων το απομακρύνουν από τις δεξαμενές. Περαιτέρω, ο πύργος αντλιών παρέχει πρόσβαση για έλεγχο και επιθεώρηση της δεξαμενής και χρησιμοποιείται η κατασκευή ως στήριξη των μετρητικών οργάνων και των επιπλέον σωληνώσεων που βοηθούν στην φόρτωση και ψύξη της δεξαμενής (spraying).

Χωρητικότητα – Πλήθος δεξαμενών

Η χωρητικότητα που θα έχει το πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ το οποίο μελετάται, πέρα από τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, περιορίζεται κυρίως από το σύστημα αποθήκευσης. Για παράδειγμα στα συστήματα αποθήκευσης σφαιρικών δεξαμενών υπάρχει ένα τυπικό εύρος της χωρητικότητας ενός πλοίου. Αυτό ο περιορισμός δημιουργείται, διότι όντας οι δεξαμενές σφαιρικές, δεν μπορούν να μεγαλώσουν σημαντικά σε διάμετρο γιατί υπάρχουν περιορισμοί στο πλάτος των πλοίων. Έτσι, για να μεγαλώσει η χωρητικότητα ενός πλοίου με σφαιρικές δεξαμενές, θα πρέπει να τοποθετηθεί μια επιπλέον δεξαμενή η οποία θα αυξήσει κατά πολύ τη χωρητικότητα και το μήκος του πλοίου, γεγονός που κάνει το σύστημα αυτό μειονεκτικό ως προς την σχεδίαση και την προσαρμογή.

Στα συστήματα μεμβρανικού τύπου πάλι υπάρχουν περιορισμοί αλλά δεν είναι τόσο περιοριστικοί όσο στην περίπτωση των σφαιρικών δεξαμενών. Στην περίπτωση των δεξαμενών μεμβρανικού τύπου υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς αν πρέπει αναγκαστικά να τροποποιηθεί η χωρητικότητα, είναι δυνατό να αλλάξει το πλήθος των δεξαμενών. Όμως στην πράξη, πρέπει να συμπεριληφθούν οι οικονομικοί και οι λειτουργικοί παράγοντες με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα «άτυπο» εύρος χωρητικότητας. Οι λειτουργικοί παράγοντες αφορούν ότι οι δεξαμενές έχουν ένα μέγιστο μέγεθος που μπορούν να κατασκευασθούν τόσο για λόγους ασφάλειας όσο και για να μην παρουσιάζουν προβλήματα λόγω sloshing που είναι το κυριότερο θέμα των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ. Από την άλλη πλευρά δεν είναι ούτε οικονομικά συμφέρον αλλά ούτε και λειτουργικά συμφέρον οι δεξαμενές να είναι πολύ μικρές, γιατί έτσι αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η επιφάνεια του συστήματος μεμβράνης (άρα και το κόστος) και επιπλέον θα πρέπει να γίνονται πιο επίπονοι έλεγχοι σε μεγαλύτερες επιφάνειες για να διαπιστωθεί αν χρειάζεται συντήρηση - επισκευή κάποιο σημείο του συστήματος. Επιπλέον, όσο μικρότερες είναι οι δεξαμενές, τόσο χειρότερη είναι η εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου λόγω της προσαύξησης του πάχους του συστήματος και του άδειου χώρου μεταξύ των εγκάρσιων φρακτών (cofferdam).



Εικόνα 37 - Τυπικό πλήθος δεξαμενών

Διπλέλικα πλοία

Πολύ μεγάλη τάση τα τελευταία χρόνια στις σχεδιάσεις πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, είναι να σχεδιάζονται πλοία με δύο έλικες. Αυτό βέβαια οδηγεί σε αυξημένη πολυπλοκότητα στη σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ. Όμως σύμφωνα με τα ναυπηγεία [34] και με μελέτες [19,20], τα πλοία με δύο έλικες παρουσιάζουν σημαντική μείωση της απαιτούμενης ισχύος από τις μηχανές, της τάξης του 6% με 11%. Αυτό

επιδιώκεται κυρίως λόγω αυξημένου βαθμού πρόωσης που επιτυγχάνεται λόγω της λειτουργίας της έλικας. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό ομόρου είναι αρκετά χαμηλό και ο βαθμός σχετικής περιστροφής υψηλός συνεπώς ο βαθμός πρόωσης είναι υψηλός.

Επιπροσθέτως, η δύο έλικες βελτιώνουν σημαντικά το επίπεδο ασφάλειας, αφού σε λειτουργία βρίσκονται 2 μηχανές συνδεδεμένες με ανεξάρτητες έλικες έναντι μίας. Τέλος, τα πλοία με δύο έλικες παρουσιάζουν βελτιωμένες ελικτικές ικανότητες του πλοίου. Για τους λόγους αυτούς, το πλοίο υπό σχεδίαση θα έχει δύο έλικες.

5. Καθορισμός βασικών χαρακτηριστικών

Κύριες διαστάσεις

Για να υπολογιστούν τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου υπό σχεδίαση, θα ληφθούν εμπειρικά στοιχεία από άλλα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. Προσοχή απαιτείται στην επιλογή των όμοιων πλοίων καθώς για να ληφθούν βοηθητικά δεδομένα, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής περιορισμοί:

- Πλοία χωρητικότητας $165,000 [m^3] \pm 10\%$
- Πλοία ίδιας σχεδίασης δεξαμενών (πχ. μεμβρανικών – σφαιρικών)
- Εύρος ταχύτητας $V_s = \pm 1.5 [knots]$. Ταχύτητα σχεδίασης $19.5 [knots]$
- Αποκλεισμός αδελφών πλοίων

Πίνακας 1 - Χαρακτηριστικά όμοιων πλοίων

Ship	N.1	N.2	N.3	N.4	N.5	N.6	N.7
Tank Volume [m ³]	154,982.0	159,800.0	165,500.0	171,800.0	173,870.0	173,600.0	205,941.0
DWT [t]	79592	79087.1	82187	96100	91305	93796	121504
Displacement Δ [t]	112206	111629	113609	130957	125563	128986	164504
L.S [t]	32614	32452	31422	34857	34258	35190	43000
$w_{is} = L.S / (L * B * D)$ [t/m ³]	0.101606792	0.1001661	0.098976	0.1049173	0.0975045	0.1026096	0.1050376
DWT/Δ	0.709338182	0.7084817	0.7234198	0.7338287	0.7271648	0.7271797	0.7386082
L/B	6.1704	6.4364	6.3364	6.0917	6.1957	6.2882	6.0551559
L/D	10.6154	10.8923	10.3383	10.7308	10.6343	11.0769	11.2220
B/T	3.7213	3.5200	3.5809	3.9483	3.8558	3.6640	3.6740
D/T	2.1630	2.0800	2.1947	2.2414	2.2464	2.0800	1.9823
L _{OA} [m]	289.93	294.20	285.00	298.00	298.43	299.90	315.00
L _{BP} [m]	276	283.2	275	279	285	288	303
B [m]	44.73	44	43.4	45.8	46	45.8	50.04
T _{max} [m]	12.02	12.5	12.12	11.6	11.93	12.5	13.62
D [m]	26	26	26.6	26	26.8	26	27
Block Coefficient	0.73698	0.69851	0.76549	0.86110	0.78248	0.76248	0.77641
Speed [kn]	20.2	19.9	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
Total Power [kW]	29420	34200	33900	37100	33914	30000	33100
Propulsion Type	Turbine	Diesel Electric	Diesel Electric	Diesel Electric	Diesel Electric	Diesel Electric	Motor Diesel
Single / Twin skeg	Single	Single	Single	Twin Skeg	Single	Single	Twin Skeg
GTT Tank	No.96	No.96	Mark III	No.96	Mark III	No.96	No.96
Admiralty C _{AD}	651.7617	534.2171	513.0732	515.4055	548.2340	630.9733	672.5535

Σημειώνεται ότι τα πλοία στον παραπάνω πίνακα έχουν κατασκευασθεί μεταξύ του 2008 και του 2013.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται ο μέσος όρος των βασικών χαρακτηριστικών των όμοιων πλοίων.

Πίνακας 2 - Μέσος όρος βασικών χαρακτηριστικών

Μέσος όρος βασικών χαρακτηριστικών			
	Μέσος όρος	Ελάχιστο	Μέγιστο
W_{is}	0.1015	0.0975	0.1050
DWT/Δ	0.7240	0.7085	0.7386
L/B	6.2248	6.0552	6.4364
L/D	10.7872	10.3383	11.2222
B/T	3.7092	3.5200	3.9483
D/T	2.1411	1.9824	2.2464
C_b	0.7691	0.6985	0.8611

Επιλέγονται για το υπό-σχεδίαση πλοίο τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 3 - Βασικά χαρακτηριστικά

Βασικά χαρακτηριστικά		
Μήκος μεταξύ καθέτων	L_{BP}	278.1 [m]
Πλάτος	B	45.2 [m]
Μέγιστο βύθισμα	T_{max}	12.5 [m]
Κοίλο	D	26.5 [m]
Λόγος Μήκους/Πλάτους	L/B	6.1527
Λόγος Μήκους/Κοίλου	L/D	10.4943
Λόγος Κοίλου/Βυθίσματος	D/T	2.12
Συντελεστής γάστρας	C_b	0.7780

Συντελεστές μορφής

→ Συντελεστής μέση τομής (C_M):

Από εμπειρικούς τύπους [2] θα υπολογιστεί ο συντελεστής μέσης τομής. Πιο συγκεκριμένα :

- $C_{M1} = 0.9 + 0.1 * C_B = 0.97784$
- $C_{M2} = 1.006 - 0.0056 * C_B^{-3,56} = 0.99234$
- $C_{M3} = \frac{1}{1+(1-C_B)^{3.5}} = 0.9949$

Ο πρώτος εμπειρικός τύπος δίνει διαφορετικό αποτέλεσμα σε σχέση με τους άλλους δύο και για το λόγο αυτό, δεν θα ληφθεί υπόψη.

$$\text{Άρα } C_M = \frac{C_{M2} + C_{M3}}{2} \Rightarrow C_M = \mathbf{0.9936}$$

→ Πρισματικός συντελεστής (C_P) :

Εφόσον έχει υπολογιστεί ο συντελεστής γάστρας (C_B) και ο συντελεστής μέσης τομής (C_M), εύκολα υπολογίζεται και ο πρισματικός συντελεστής (C_P):

$$C_P = C_B / C_M \Rightarrow C_P = \mathbf{0.7834}$$

→ Συντελεστής επιφάνειας ισάλου (C_{WL}):

Από εμπειρικούς τύπους [2]:

- $C_{WL} = \frac{1+2 \cdot C_B}{3} \Rightarrow C_{WL1} = 0.8523$
- $C_{WL} = 0.778 \cdot C_B + 0.248 \Rightarrow C_{WL2} = 0.8536$

$$C_{WL} = \frac{C_{WL1} + C_{WL2}}{2} \Rightarrow C_{WL} = 0.8530$$

Εγκατεστημένη ισχύς

Η επιλογή της εγκατεστημένης ισχύος, δεν θα ληφθεί από τον πίνακα με τα όμοια πλοία (δηλαδή μέσω του συντελεστή Αγγλικού Ναυαρχείου C_{AD}), διότι η ισχύς επηρεάζεται σημαντικά από το μέσο πρόωσης (Turbine, Diesel-Electric) και από τη μονή / διπλή έλικα. Έτσι, η εγκατεστημένη ισχύς θα ληφθεί από τον παρακάτω διάγραμμα, για πλοία διπλής έλικας και εμβολοφόρας μηχανής εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου (Diesel + LNG).

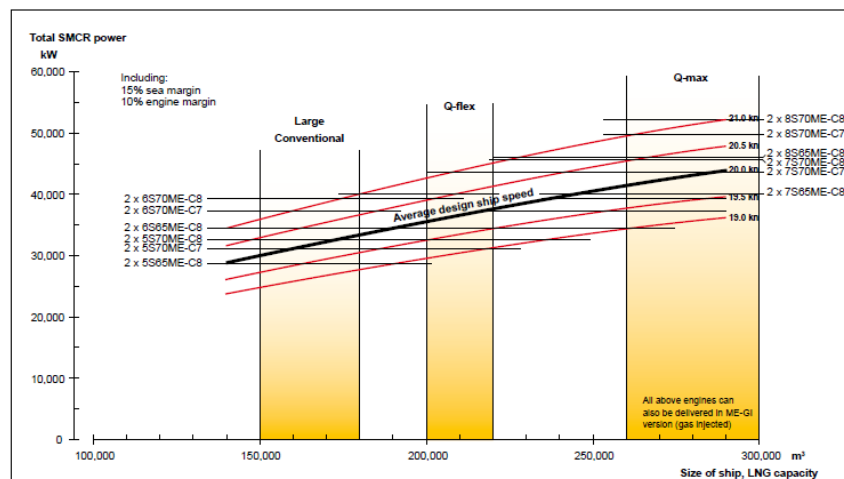


Fig. 16: Propulsion SMCR power demand of an average LNG carrier (membrane type), Large Conventional, Q-flex and Q-max – twin-skeg and twin-screw

Εικόνα 38 - Απαίτηση ισχύος (Πηγή: MAN Diesel & Turbo[22])

Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα για μεταφορική ικανότητα περίπου 165,000 [m³], η απαίτηση σε ισχύ (από τις κύριες μηχανές) για την ταχύτητα των 19.5 κόμβων ισούται με $P_{SMCR} = 29500 [kW]$

Υπολογισμός εκτίμησης εκτοπίσματος

$$\Delta = c\gamma * LBT * c_b \Rightarrow \Delta = 125,422.8 [t]$$

Επιλέγεται ο όρος $c\gamma$ να ληφθεί ίσος με 1.026 [t/m³]. Ο όρος αυτός εμπεριέχει την πυκνότητα του νερού (1.025 t/m³) και τη διόρθωση για τα πάχη ελασμάτων, παρατροπίδιων κ.α. .

Αποστάσεις κατασκευαστικών νομέωνΧώρος φορτίου - L_{CARGO}

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή των δεξαμενών του χώρου φορτίου, θα πρέπει οι δεξαμενές N.2, N.3 και N.4 να έχουν μέγιστο μήκος περίπου 17% του L_{BP} η καθεμία (μετρούμενη από την εσωτερική πλευρά του πρωτεύοντος περιβλήματος)[23].

Με βάση τις σχεδιάσεις πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, επιλέγεται η ισαπόσταση των νομέων να είναι ίση με $F.S.=3450$ [mm] (Frame Spacing). Προκύπτει άμεσα το μήκος των δεξαμενών βασισμένο στις απαιτήσεις του κατασκευαστή και παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 4 - Μήκος δεξαμενών

	$L_{external}$ [mm]	$L_{internal}$ [mm]	% L_{BP}	Frame Spacing	No. Frames
N.1 Tank	34500	33415	12.02%	3450	10
N.2 Tank	48300	47215	16.98%	3450	14
N.3 Tank	48300	47215	16.98%	3450	14
N.4 Tank	48300	47215	16.98%	3450	14

$L_{external} = L_{internal} + 2 * (t_{insulation} + t_{mastic,rope})$. Όπου 530 [mm] το πάχος μόνωσης και 12.5 [mm] (μέσος όρος) το πάχος των μονωτικών σχοινιών (mastic rope).

Η απόσταση μεταξύ της εγκάρσιας φρακτής της δεξαμενής και της κύριας εγκάρσιας φρακτής του πλοίου ορίζεται στα 2800 [mm]

Συνεπώς $L_{cargo} = 5 * 2800 + 34500 + 48300 * 3 \Rightarrow L_{cargo} = 193400$ [mm]

Χώρος μηχανοστασίου & πρύμνης - $L_{ENGINE ROOM}$ & L_{AFT}

Το μήκος του μηχανοστασίου είναι μεγαλύτερο από αντίστοιχα πλοία (πχ. δεξαμενόπλοια-πλοία χύδην φορτίου) τόσο λόγω της διπλής έλικας, όσο και των απαιτούμενων διαστάσεων λόγω των μηχανών και των βοηθητικών συστημάτων του φυσικού αερίου. Η ισαπόσταση των νομέων ορίζεται στα $F.S.=800$ [mm]. Με βάση τις σχεδιάσεις πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, ορίζεται το μηχανοστάσιο και το πρυμναίο τμήμα να αποτελείται από 66 νομείς (μετρούμενο από τη πρυμναία κάθετο). Συνεπώς:

$$L_{ER} = 66 * 800 \Rightarrow L_{ER} = 52800$$

Το μήκος πρύμνηθεν της πρυμναίας φρακτής έως την πρυμναία κάθετο, ορίζεται στους 14 νομείς. Συνεπώς:

$$L_{AFT} = 14 * 800 \Rightarrow L_{AFT} = 11200$$

Μήκος προραίου τμήματος - L_{FORE}

Το μήκος του προραίου τμήματος υπολογίζεται από το συνολικά απαιτούμενο μήκος μεταξύ καθέτων. Η ισαπόσταση των νομέων θα είναι ίση με το πρυμναίο τμήμα, δηλαδή ίση με $F.S.=800$ [mm]. Σημειώνεται ότι τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ σε αυτό το τμήμα διαθέτουν τις δεξαμενές καυσίμου πρύμνηθεν της φρακτής σύγκρουσης.

$$L_{FORE} + L_{FO} = L_{BP} - L_{AFT} - L_{ER} - L_{CARGO} \Rightarrow L_{FORE} + L_{FO} = 31900 [mm]$$

Φρακτή σύγκρουσης

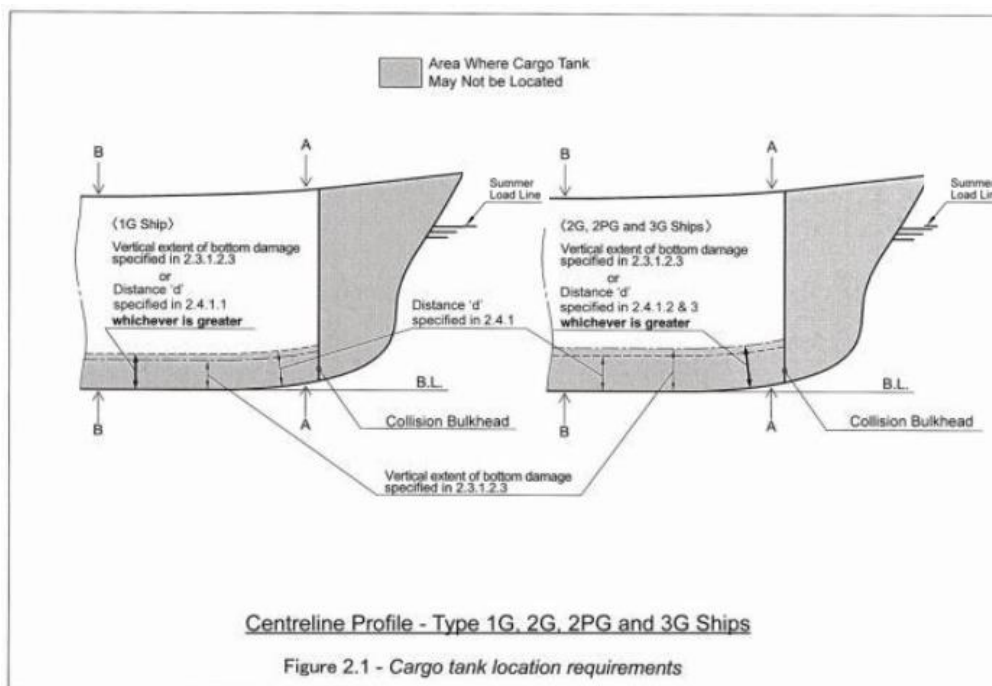
Σύμφωνα με το διεθνή κανονισμό της SOLAS, η πρωραία φρακτή σύγκρουσης θα πρέπει να τοποθετηθεί σε ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση από τη πρωραία κάθετο ή το βολβό². Λόγω της ύπαρξης βολβού, το πρωραίο σημείο μέτρησης είναι ίσο με 3 [m] πλώραθεν της πρωραίας καθέτου. Συνεπώς, προκύπτει ότι το μήκος της φρακτής μετρούμενης από την πρωραία κάθετο θα πρέπει να είναι:

$$7 \leq l_{coll.bulkhead} \leq 19.248 [m]$$

Η πρωραία φρακτή τοποθετείται στα 8 [m] από την πρωραία κάθετο.

Ύψος διπυθμένου

Το ύψος διπυθμένου θα πρέπει να είναι τόσο ώστε να προστατευτούν οι δεξαμενές και να αποτραπεί διαρροή φορτίου σε περίπτωση προσάραξης (grounding). Πρακτικά όμως στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, η απόσταση του διπυθμένου ορίζεται μεγαλύτερη των κανονισμών διότι η απόσταση αυτή καθορίζει κατά κύριο λόγο τον όγκο των δεξαμενών θαλάσσιου έρματος. Ο κώδικας IGC ορίζει την ελάχιστη απόσταση των δεξαμενών σύμφωνα με το κανονισμό (2.4 Location of Cargo Tanks) και το παρακάτω Figure ότι:



Εικόνα 39 - Κανονισμός IGC, θέση δεξαμενών φορτίου

² Να σημειωθεί ότι σύμφωνα με του κανονισμούς η απόσταση της φρακτής σύγκρουσης d , θα πρέπει να είναι μεταξύ των ορίων: $\min \left\{ \frac{5\%L_{BP}}{10 [m]} \right\} \leq d \leq 8\%L_{BP}$

Περαιτέρω, η απόσταση d μετριέται από το σημείο α λόγω ύπαρξης βολβού.

$a = \min\{(Μέσο του βολβού), (1,5\%L_{BP} \text{ πλώραθεν της FP}), (3m \text{ πλώραθεν της FP})\}$

IGC (2.4.1.2): “Types 2G/2PG: from the moulded line of the bottom shell at centreline not less than the vertical extent of damage specified in 2.3.1.2.3 and nowhere less than “d” as indicated in 2.4.1.1 (see figures 2.1 and 2.3).”

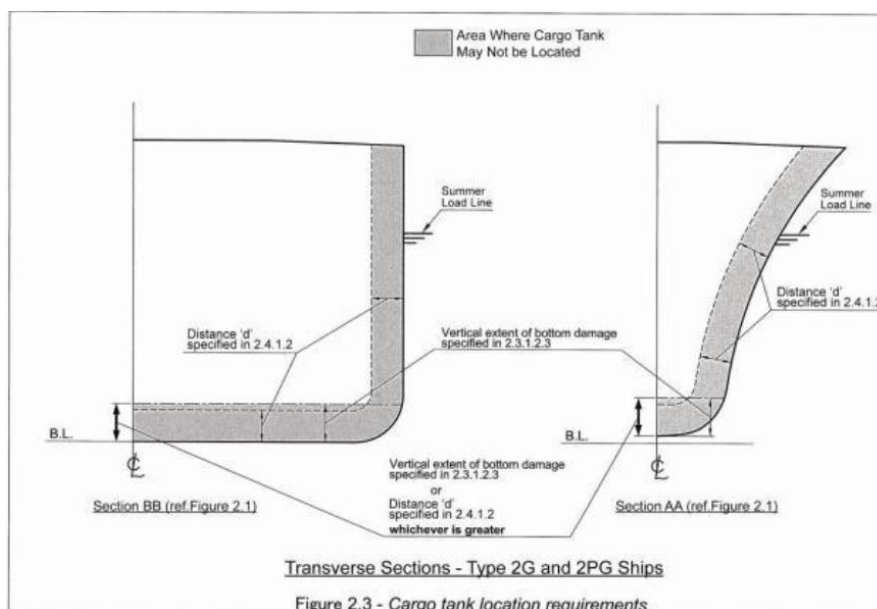
- Κατακόρυφη απόσταση ζημιάς (vertical extent of damage specified in 2.3.1.2.3), ορίζεται το $\min\left(\frac{B}{15}, 2[m]\right) = \min\left(\frac{3.01[m]}{15}, 2[m]\right) = 2[m]$
- IGC (2.4.1.1) Type 1G: For $V_c \geq 30000 [m^3]$, $d = 2 [m]$

Συνεπώς η ελάχιστη απόσταση διτυθμένου ορίζεται στα 2 μέτρα. Γίνεται επιλογή το ύψος διτυθμένου να είναι $h_{DB} = 3200 [mm]$

Περαιτέρω, η ελάχιστη απόσταση του εξωτερικού περιβλήματος από τις δεξαμενές καθορίζεται αναλόγως τον τύπο της δεξαμενής. Σύμφωνα με IGC (2.4.2) “For the purpose of tank location, the vertical extent of bottom damage shall be measured to the inner bottom when membrane or semi-membrane tanks are used, otherwise to the bottom of the cargo tanks. The transverse extent of side damage shall be measured to the longitudinal bulkhead when membrane or semi-membrane tanks are used, otherwise to the side of the cargo tanks. The distances indicated in 2.3 and 2.4 shall be applied as in figures 2.5(a) to (e). These distances shall be measured plate to plate, from the moulded line to the moulded line, excluding insulation.”

Απόσταση διπλών τοιχωμάτων

Ο κώδικας IGC ορίζει την ελάχιστη απόσταση των δεξαμενών και την απόσταση των διπλών τοιχωμάτων σύμφωνα με το κανονισμό (2.4 Location of Cargo Tanks) και το παρακάτω Figure ότι:



Εικόνα 40 - Κανονισμός IGC, θέση δεξαμενών φορτίου

Συνεπώς, η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση είναι ίση με 2 μέτρα.

Στο υπο-σχεδίαση πλοίο επιλέγεται η απόσταση να είναι ίση με 2700 [mm].

6. Καθορισμός απαιτήσεων αντοχής

Σε αυτό το προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης θα καθοριστούν οι ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής με βάση τους κανονισμούς των νηογνώμωνων και πιο συγκεκριμένα η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης και οι μέγιστες επιτρεπόμενες καμπτικές ροπές σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς “Rules for the Classification of Steel Ships” του νηογνώμονα Bureau Veritas (BV), τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ πρέπει να ικανοποιούν όλους τους κανονισμούς του παραρτήματος “Part D – Chapter 9 – LIQUEFIED GAS CARRIERS”. Σύμφωνα με αυτό, οι απαιτήσεις αντοχής θα ληφθούν από το κεφάλαιο “Part B” των κανονισμών.

- Ροπή αντίστασης

Pt.B/Ch.6/Sec.2/4.2 “Section modulus within 0.4L amidships”, λαμβάνεται η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$Z_{R,MIN} = n_1 * C * L^2 * B * (C_B + 0.7) * k * 10^{-6}$$

$$\text{Όπου: } - C = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5} \text{ for } 90 \leq L \leq 300 [m] \Rightarrow C = 10.6475$$

- $k = 1$, για χάλυβα κανονικής αντοχής (235 MPa)

- L : Scantling Length. Σε αυτή το στάδιο της μελέτης λαμβάνεται $L = L_{BP} = 278.1 [m]$

- $n_1 = 1$, for Unrestricted navigation

Άρα υπολογίζεται ότι:

$$Z_{R,MIN} = 55.01 [m^3]$$

Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή αφορά τη μέση τομή με ελάσματα που έχουν προσαυξηθεί λόγω διάβρωσης, όπως απαιτείται στον κανονισμό Pt.B/Ch.4/Table.2 (Gross section moduli) και οι προσαυξήσεις παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα 5. Περαιτέρω, σύμφωνα με τους κανονισμούς θα πρέπει να ισχύει ότι $Z_{NET} \geq 0.9 * Z_{GROSS}$. (NET: Διατομή χωρίς προσαυξήσεις λόγω διάβρωσης, GROSS: Διατομή με προσαυξήσεις λόγω διάβρωσης)

- Εφαρμοζόμενες ροπές

Pt.B/Ch.5/Sec.2/3 “Wave loads”, λαμβάνεται ότι για να υπολογιστούν οι καμπτικές ροπές λόγω κυματισμού ($M_{wv,s}$ & $M_{wv,h}$) θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$M_{wv,H} = 190 * F_M * n * C * L^2 * B * C_B * 10^{-3} \text{ Wave Hogging Moment}$$

$$M_{wv,S} = -110 * F_M * n * C * L^2 * B * (C_B + 0.7) * 10^{-3} \text{ Wave Sagging Moment}$$

Όπου: - $F_M = 1$, for $0.4L \leq x \leq L$

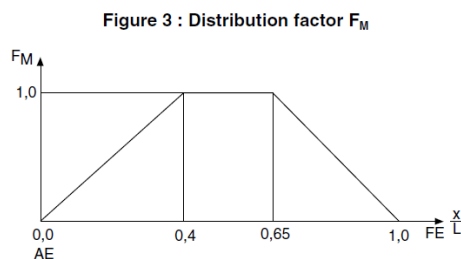
- $n = 1$, for Unrestricted navigation

Άρα υπολογίζεται ότι:

$$M_{wv,H} = 5,502,008.0 \text{ [kNm]}$$

$$M_{wv,S} = -6,051,390.5 \text{ [kNm]}$$

Να σημειωθεί ότι οι εφαρμοζόμενες καμπτικές ροπές λόγω κυματισμού, κατανέμονται στον διαμήκη άξονα σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα (μέσω του συντελεστή F_M):



Εικόνα 41 - Κατανομή συντελεστή F_M (Καμπτική ροπή λόγω κυματισμού)

Από το κανονισμό Pt.B/Ch.5/Sec.2/2.2 “Still water bending moments”, θα ληφθούν οι μέγιστες επιτρεπόμενες καμπτικές ροπές σε ήρεμο νερό (σε απόλυτη τιμή):

$$M_{sw,H} = 175 * n_1 * C * L^2 * B * (C_B + 0.7) * 10^{-3} - M_{wv,H}, \quad S.W. \text{ Hogging Moment}$$

$$M_{sw,S} = 175 * n_1 * C * L^2 * B * (C_B + 0.7) * 10^{-3} + M_{wv,S}, \quad S.W. \text{ Sagging Moment}$$

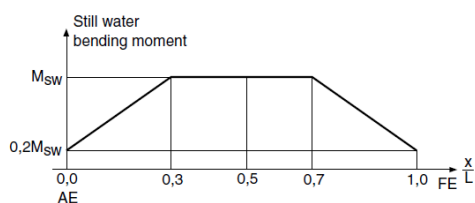
Άρα υπολογίζεται ότι:

$$M_{sw,H} = 4,124,204.2 \text{ [kNm]}$$

$$M_{sw,S} = 3,575,821.7 \text{ [kNm]}$$

Να σημειωθεί ότι οι εφαρμοζόμενες καμπτικές ροπές σε ήρεμο νερό κατανέμονται στον διαμήκη άξονα, σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα:

Figure 2 : Preliminary still water bending moment distribution



Εικόνα 42 - Κατανομή καμπτικής ροπής σε ήρεμο νερό

Παρακάτω παρουσιάζονται οι προσαυξήσεις λόγω διάβρωσης που πρέπει να γίνουν σε κάθε πλευρά του ελάσματος / ενισχυτικού αναλόγως τη θέση που είναι τοποθετημένα.

Πίνακας 5 - Προσαυξήσεις λόγω διάβρωσης (Bureau Veritas)

Table 2 : Corrosion additions t_c , in mm, for each exposed side

Compartment type		General (1)	Special cases
Ballast tank (2)		1,00	1,25 in upper zone (7)
Cargo oil tank and fuel oil tank (3)	Plating of horizontal surfaces	0,75	1,00 in upper zone (7)
	Plating of non-horizontal surfaces	0,50	1,00 in upper zone (7)
	Ordinary stiffeners and primary supporting members	0,75	1,00 in upper zone (7)
Independent tank of ships with service notation liquefied gas carrier or LNG bunkering ship (4) Independent gas fuel tanks of ships with the additional service feature gasfuel or dualfuel (5)		0,00	
Cofferdam in cargo area of ships with the service notation liquefied gas carrier or LNG bunkering ship Cofferdam adjacent to the gas fuel tank on ships with the additional service feature dualfuel or gasfuel		1,00	
Dry bulk cargo hold (6)	General	1,00	
	Inner bottom plating Side plating for single hull ship Inner side plating for double hull ship Sloping stool plate of hopper tanks and lower stool Transverse bulkhead plating	1,75	
	Frames, ordinary stiffeners and primary supporting members	1,00	1,50 in lower zone (8)
Tanks for fresh water		0,5	
Tanks dedicated to water-based or oil-based process muds		1,25	
Tanks for drilling brines		1,25	
Moonpool		1,75	
Compartment located between independent tank and inner side of ships with the additional service feature asphalt carrier		1,00	
Hopper well of dredging ships		2,00	
Accommodation space (9)		0,00	
Compartments other than those mentioned above (9) Outside sea and air		0,50	
<p>(1) General: corrosion additions t_c are applicable to all members of the considered item with possible exceptions given for upper and lower zones.</p> <p>(2) Ballast tank: does not include cargo oil tanks which may carry ballast according to Regulation 18 of MARPOL 73/78 as amended.</p> <p>(3) For ships with the service notation chemical tanker ESP, the corrosion addition t_c may be taken equal to 0 for cargo tanks covered with a protective lining or coating (see IBC, 6).</p> <p>(4) The corrosion addition t_c specified for cargo tanks is to be applied when required in Pt D, Ch 9, Sec 4, [2.1.5].</p> <p>(5) The corrosion addition t_c specified for gas fuel tanks is to be applied when required in NR529, 6.4.1.</p> <p>(6) Dry bulk cargo hold: includes holds, intended for the carriage of dry bulk cargoes, which may carry oil or water ballast.</p> <p>(7) Upper zone: area within 1,5 m below the top of the tank. This is to be applied only to tanks with weather deck as the tank top.</p> <p>(8) Lower zone: area within 3 m above the bottom of the tank or the hold.</p> <p>(9) When not covered by any sheeting, AC Room, galleys, technical areas and crew staircases are to be considered as "other compartments"</p>			

7. Υπολογισμός κενού βάρους

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού, είναι να υπολογιστεί το βάρος του κενού πλοίου (Light ship L.S.). Οι υπολογισμοί που θα πραγματοποιηθούν είναι σύμφωνα με εμπειρικές μεθόδους και με αναλυτικούς υπολογισμούς. Σημειώνεται ότι το βάρος του κενού πλοίου που θα υπολογιστεί παρακάτω, αποτελεί μια εκτίμηση του πραγματικού, αφού ο τρόπος να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια είναι να πραγματοποιηθεί το πείραμα ευστάθειας (Inclining Experiment), μετά την κατασκευή του πλοίου.

Η ανάλυση του βάρους κενού σκάφους γίνεται ως εξής:

$$L.S. = W_{STEEL} + W_{OUTFIT} + W_{MACHINERY} \quad (1)$$

Όπου: - W_{steel} : Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής.

- W_{outfit} : Το βάρος των εξαρτημάτων του πλοίου.

- $W_{machinery}$: Το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης.

Υπολογισμός βάρους της μεταλλικής κατασκευής (W_{STEEL})

Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής W_{steel} , θα υπολογιστεί με τρεις (3) μεθόδους υπολογισμού:

- Watson
- Schneekluth + Muller-Köster
- MARS2000® – Αναλυτικός προσδιορισμός

Υπολογισμός του W_{STEEL} κατά Watson:

$$E_N = L(B + T) + 0.8 * L(D - T) + 0.85 * \sum_{i=1}^{n_1} h_{1i} * l_{1i} + 0.75 * \sum_{i=1}^{n_2} h_{2i} * l_{2i}$$

Όπου h_{1i} , l_{1i} το μήκος και ύψος των υπερστεγασμάτων και h_{2i} , l_{2i} των υπερκατασκευών. Ο ορισμός της υπερκατασκευής και υπερστεγάσματος είναι ίδιος με τη διεθνή σύμβαση της γραμμής φόρτωσης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αναλυτικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 6 - Στοιχεία υπερκατασκευών για το υπό-σχεδίαση πλοίο

Στοιχεία υπερκατασκευών / υπερστεγασμάτων				
DECKS	Height [m]	Length [m]	h*L [m ²]	B [m]
Forecastle	-	-	-	-
Upper Deck (F)	4.25	12	51.0	32.8
Upper Deck (A)	4.25	16	68.0	34.5
A – Deck (F)	3.25	18.4	59.8	32.8
A – Deck (A)	3.25	16	52.0	34.5
B – Deck (F)	3.2	18.4	58.9	32.8
B – Deck (A)	3.2	16	51.2	34.5
C – Deck (F)	3.2	18.4	58.9	32.8
C – Deck (A)	3.2	16	51.2	21.3
D – Deck (F)	3.2	18.4	58.9	32.8

D – Deck (A)	3.2	16	51.2	15.6
Nav. Deck (F)	3.0	16.3	48.9	21.4
Cargo Control	6.75	26.88	181.4	16.65
Trunk Deck	7.3	193.4	1411.8	4.2

Σημειώνεται ότι όλα τα καταστρώματα (Deck) του παραπάνω πίνακα έχουν θεωρηθεί ως υπερκατασκευάσματα, πέρα από το Trunk Deck. Το Trunk Deck έχει ληφθεί ως υπερκατασκευή και έχει συμπεριληφθεί προκειμένου να υπολογιστεί και το βάρος της μεταλλικής κατασκευής πάνω από το κοίλο (D).

$$E_N = 278.1(45.2 + 12.5) + 0.8 * 278.1(26.5 - 12.5) + 0.85 * 791.4 + 0.75 * 1411.8 \\ \Rightarrow E_N = 20892.63 [m^2]$$

Από βιβλιογραφία [1] σελ. 220, διαγρ. 2.45, υπολογίζεται ότι $W_{st}^* = 23000 [t]$

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Watson, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί διόρθωση για $C_{B,0.8D} \neq 0.7$. Καθώς δεν είναι γνωστή η τιμή του C_b στα 0.8 του D, θα υπολογιστεί προσεγγιστικά με βάση τον παρακάτω τύπο.

Από [Βιβλίο Συλλογή Βοηθημάτων] δίδεται ότι:

$$C_{B_1} = C_{B_0} * \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{C_{Wl_0}}{C_{B_0}} - 1} \Rightarrow C_{B_1} = 0.8188$$

Όπου: - T_0 : Βύθισμα με γνωστό το συντελεστή γάστρας (C_{B0})

- T_1 : Βύθισμα για το οποίο γίνεται εκτίμηση του συντελεστή γάστρας (C_{B1})

Συνεπώς υπολογίζεται ότι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Watson είναι ίσο με:

$$W_{st,WATSON} = W_{st}^* * [1 + 0.5(C_{B,0.8D} - 0.7)] \Rightarrow W_{st,WATSON} = 24366.2 [t]$$

• Υπολογισμός του W_{STEEL} κατά Schneekluth + Muller Köster:

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής χωρίζεται σε βάρος μέχρι το κοίλο (μέθοδος Schneekluth) και προστίθεται το βάρος των υπερκατασκευών (μέθοδος Muller-Köster).

Μέθοδος Schneekluth:

$$W'_{ST} = \nabla_U C'_{ST} * [1 + 0.033(L/D - 12)]. [1 + 0.06(n - D/D_0)]. [1 + 0.05(1.85 - B/D)]. [1 + 0.2(T/D - 0.85)]. [0.92 + (1 - C_{BD})^2]. [1 + 0.75C_{BD}(C_M - 0.98)] \quad (2)$$

• Υπολογισμός όγκου κάτω από το κοίλο ∇_U :

$$\nabla_U = \nabla_D + \nabla_S + \nabla_b + \nabla_h - \nabla_{STERN}$$

$$- \nabla_D = L * B * D * C_{BD},$$

Για το C_{BD} , επειδή δεν είναι γνωστός ο συντελεστής για το κοίλο (D), θα υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$C_{BD} = C_B + \frac{C_1(D-T)}{T} * (1 - C_B) \Rightarrow C_{BD} = 0.8404$$

Με $C_1 = 0.25$ για πλοία με μικρό άνοιγμα νομέων υπεράνω της ισάλου.

$$\text{Συνεπώς } \Rightarrow \nabla_D = 279944.1 [m^3]$$

$$- \nabla_S = L_s * B(S_F + S_A) * C_2, \text{ με } L_s \text{ η έκταση σιμότητας, } S_F \text{ και } S_A \text{ ύψος σιμότητας πλώρα και πρύμα. Στο υπό σχεδίαση πλοίο δεν υπάρχει σιμότητα. Συνεπώς, } \nabla_S = 0 [m^3]$$

- $\nabla_b = L * B * b * C_3$, με $C_3 = 0.7 * C_{BD} \Rightarrow C_3 = 0.5883$ και $b=0.5$ [m] η κυρτότητα μέσης τομής. Άρα προκύπτει: $\Rightarrow \nabla_b = 3697.5 [m^3]$
- ∇_L : Ο όγκος πάνω από το D που υπάρχει λόγω των πρισματικών δεξαμενών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο επιπρόσθετος όγκος.

Πίνακας 7 - Διαστάσεις όγκου πάνω από το κοίλο (D)

	L [m]	h [m]	B _{up} [m]	B _{low} [m]	V _{L-i} [m ³]
Tank N.1	34.5	7.3	29 (A) / 8.3 (F)	38.84 (A) / 18.2 (F)	5939.9
Tank N.2	48.3	7.3	29	38.84	11959.8
Tank N.3	48.3	7.3	29	38.84	11959.8
Tank N.4	48.3	7.3	29	38.84	11959.8

$$\text{Για παράδειγμα, } \nabla_{L_1} = \frac{\left[\frac{29+38.84}{2} + \frac{8.3+18.2}{2} \right]}{2} * 7.3 * 34.5 \Rightarrow \nabla_{L_1} = 5939.9 [m^3]$$

$$\nabla_L = \Sigma(\nabla_{L-i}) \Rightarrow \nabla_L = 41819.3 [m^3]$$

- ∇_{Stern} : Αφορά τον όγκο στην πρύμνη που βρίσκεται κάτω από το κοίλο D, και δεν έχει μεταλλική κατασκευή. (Στο μέρος πίσω από την υπερκατασκευή, η μεταλλική κατασκευή του πλοίου σταματά σε ύψος 21 [m] και όχι D=26.5 [m]. Έτσι ο όγκος αυτός θα αφαιρεθεί.

$$\nabla_{Stern} = A * h \Rightarrow \nabla_{Stern} = 638 * 5,35 \Rightarrow \nabla_{Stern} = 3413 [m^3]$$

Άρα υπολογίζεται ότι:

$$\nabla_U = \nabla_D + \nabla_S + \nabla_b + \nabla_H - \nabla_{Stern} \Rightarrow \nabla_U = 322,049.0 [m^3]$$

- Υπολογισμός C'_{ST} . Από βιβλιογραφία [1] σελ. 231, για δεξαμενόπλοια³ ο συντελεστής λαμβάνεται από τη σχέση:

$$C'_{ST} = [0.112 + L * 10^{-4}] * (0.95 \text{ έως } 1,05) \Rightarrow C'_{ST} = [0.112 + 278.1 * 10^{-4}] * 1 \Rightarrow C'_{ST} = 0.13981$$

Άρα κατόπιν υπολογισμών της εξίσωσης (2), προκύπτει:

$$W'_{STEEL} = 322049 * 0.13981 * 0.950313 * 0.6625 * 1.0072169 * 0.924339622 * 0.94547216 * 1.00857208 \Rightarrow W_{ST} = 25166.5 [t]$$

Έπειτα πραγματοποιούνται διορθώσεις για το βάρος της μεταλλικής κατασκευής λόγω ύπαρξης βολβού. Ο συντελεστής αύξησης κυμαίνεται από 0.4 % έως 0.7 % . Λόγω της ύπαρξης μικρού βολβού και του μεγάλου μεγέθους του πλοίου, η προσαύξηση επιλέγεται να είναι ίση με 0.5 %.

$$W'_{STEEL,SCNEEKLUTH} = W'_{STEEL} * 1.005 \Rightarrow W'_{STEEL,SCNEEKLUTH} = 25292.3 [t]$$

Μέθοδος Muller-Köster:

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, η μέθοδος Muller-Köster αφορά το βάρος της μεταλλικής κατασκευής για όλες τις υπερκατασκευές και υπερστεγάσματα. Σε αυτή θα συμπεριληφθεί και το βάρος του Cargo Control Room.

Τα υπερστεγάσματα και οι υπερκατασκευές που θα τοποθετηθούν θα έχουν τις παρακάτω διαστάσεις, από όπου θα γίνει υπολογισμός του βάρους τους:

³ Γίνεται η παραδοχή ότι ο συντελεστής C'_{ST} λαμβάνεται για δεξαμενόπλοια καθώς έχουν την πλησιέστερη μορφή γάστρας σε σχέση με τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ.

Υπολογισμός Βάρους Υπερστεγασιμάτων με τη μέθοδο Muller - Koster													
	A_o [m ²]	A_u [m ²]	A_o/A_u	C_{PH} [kp/m ³]	A_m	h	k_1	L_i [m]	L_{DH} [m]	L_i/L_{DH}	k_2	k_3	W_{DH} [kp]
Upper Deck (Θέση I)	674.8	619.5	1.089	59.49	647.15	4.25	1.033	166.1	18.4	9.03	0.7736	1.156	151099.3
A Deck (Θέση II)	682.7	611.6	1.116	58.71	647.15	3.25	1.013	151.8	18.4	8.25	0.8125	1.156	117440.5
B-Deck (Θέση III)	662.1	603.4	1.097	54.72	632.75	3.20	1.012	224.6	18.4	12.21	0.6147	1.156	79638.6
C-Deck (Θέση IV)	645.1	603.4	1.069	54.39	624.25	3.20	1.012	245.4	18.4	13.34	0.5582	1.156	70916.4
D-Deck (Θέση V)	698.1	609.9	1.145	57.06	654.00	3.20	1.012	239.8	18.4	13.03	0.5733	1.156	80065.3
Nav. Bridge (Οικιστήριο)	698.1	698.1	1.000	40.00	698.10	3.00	1.008	63.3	18.6	3.40	1.0548	1.156	102923.7
Cargo Control Room	447.2	447.2	1.000	40.00	447.20	6.75	1.083	16.6	26.9	0.62	1.1941	1.156	180431.6
Upper Deck (Θέση I) AFT	612.3	553.4	1.106	59.97	582.85	3.85	1.025	91.6	16.0	5.73	0.9388	1.156	149617.0
A Deck (Θέση II) AFT	551.7	551.7	1.000	55.00	551.70	5.00	1.048	62.8	16.0	3.93	1.0288	1.156	189007.0
B-Deck (Θέση III) AFT	453.1	340.4	1.331	60.94	396.75	4.80	1.044	62.4	16.0	3.90	1.0300	1.156	144201.0
C-Deck (Θέση IV) AFT	380.6	343.7	1.107	56.00	362.15	3.50	1.018	72.2	16.0	4.51	0.9994	1.156	83437.2
D-Deck (Θέση V) AFT	147.4	147.4	1.000	53.00	147.40	6.30	1.074	0.0	16.0	0.00	1.2250	1.156	74821.1
Total Li [m]=		6129.7				Total Li [m]=		1396.6				Total W _{DH} [kp]=	1423598.3

Πίνακας 8 - Μέθοδος Muller-Köster για το πατρικό

Ο συντελεστής C_{DH} έχει ληφθεί από [1] σελ.238, πίνακας 2.13. Ο συντελεστής C_{DH} για το Cargo Control Room λαμβάνεται ίδιος με το Οιακιστήριο λόγω μειωμένων απαιτήσεων αντοχής, συνεπώς και πάχους ελάσματος.

Η διόρθωση κ_3 , προκύπτει από γραμμική παρεμβολή για $L=278.1$ [m].

Συνεπώς, προσθέτοντας τα βάρη όλων των καταστρωμάτων (Decks) προκύπτει ότι $W_{DECKHOUSES}=1423.6$ [t].

Άρα συνολικό βάρος μεταλλικής κατασκευής των υπερκατασκευών / υπερστεγασμάτων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία Muller-Köster είναι ίσο με :

$$\begin{aligned} W_{STEEL,MULLER-KOSTER} &= W_{FORECASTLE} + W_{DECKHOUSES} \Rightarrow W_{STEEL,MULLER-KOSTER} \\ &= 0 + 1423.6 \Rightarrow W_{STEEL,MULLER-KOSTER} = \mathbf{1423.6 [t]} \end{aligned}$$

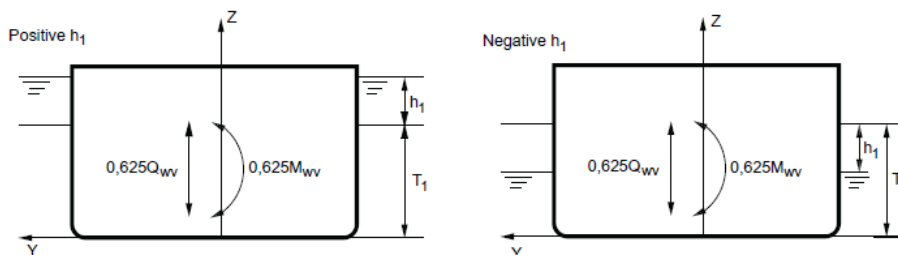
• Υπολογισμός του W_{STEEL} αναλυτικά

Για να υπολογιστεί το βάρος της μεταλλικής κατασκευής με πιο αναλυτικό τρόπο, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα MARS2000® του νηογνώμονα Bureau Veritas (BV). Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιεί μελέτη αντοχής των τομών του πλοίου, σύμφωνα με τους τρέχοντες κανονισμούς "Rules for the Classification of Steel Ships - 2019". Στο πρόγραμμα τοποθετούνται οι μορφές των τομών του πλοίου, καθορίζονται οι κατασκευαστικοί νομείς, οι χώροι φορτίου, οι δεξαμενές και λοιπά απαραίτητα στοιχεία τα οποία λαμβάνονται υπόψη για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί αντοχής για τις καταστάσεις αυτές. Άμεσο αποτέλεσμα των υπολογισμών αντοχής, είναι ο καθορισμός των διαστάσεων των ελασμάτων και των ενισχυτικών, συνεπώς μπορεί να υπολογιστεί το βάρος του κάθε νομέα ανά τρέχον μέτρο άρα και μετέπειτα το βάρος της μεταλλικής κατασκευής.

Η μελέτη αντοχής περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις εξωτερικής φόρτισης:

- Περίπτωση «α»: Αφορά για πλοίο σε ισοβύθιστη κατάσταση και περιλαμβάνει τις κάθετες καμπτικές ροπές στο επίπεδο συμμετρίας (sagging-hogging) σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς και τις διατμητικές δυνάμεις.

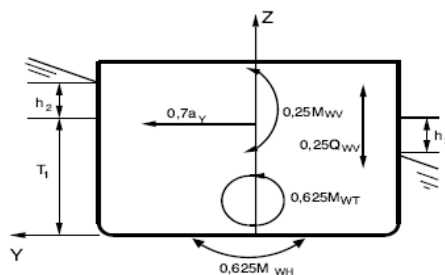
Figure 1 : Wave loads in load case "a"



Εικόνα 43 - Περίπτωση «α»

- Περίπτωση «b». Είναι ίδια με τη περίπτωση «α» και περαιτέρω συνυπολογίζονται οι κινήσεις του πλοίου (κατακόρυφη κίνηση (heave) + προνευτασμό (pitch)) που δημιουργούνται λόγω των κυματισμών του πλοίου
- Περίπτωση «c». Αφορά πλοίο με εγκάρσια κλίση, στο οποίο εφαρμόζονται κάθετες καμπτικές ροπές, διατμητικές δυνάμεις, κατακόρυφες καμπτικές ροπές και στρεπτικές ροπές γύρω από τον διαμήκη άξονα. Περαιτέρω, συνυπολογίζονται οι κινήσεις του πλοίου που δημιουργούνται (sway, roll, yaw) λόγω το κυματισμών.

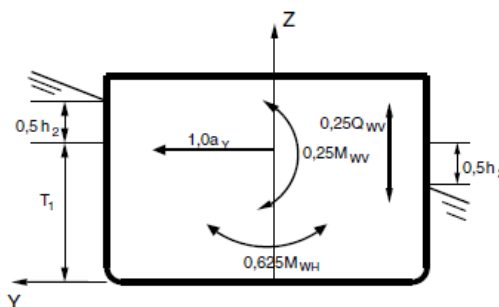
Figure 3 : Wave loads in load case "c"



Εικόνα 44 - Περίπτωση «c»

- Περίπτωση «d». Αφορά πλοίο με εγκάρσια κλίση, στο οποίο εφαρμόζονται κάθετες καμπτικές ροπές, διατμητικές δυνάμεις και κατακόρυφες καμπτικές ροπές. Περαιτέρω, συνυπολογίζονται οι κινήσεις του πλοίου που δημιουργούνται (εγκάρσια οριζόντια κίνηση (sway), διατοιχισμός (roll), στροφική οριζόντια κίνηση (yaw)) λόγω το κυματισμών. Οι διαφορές από την περίπτωση «c» είναι πως δεν υπάρχει στρέψη, και οι παράμετροι των κινήσεων του πλοίου είναι διαφορετικοί.

Figure 4 : Wave loads in load case "d"



Εικόνα 45 - Περίπτωση «d»

Πέρα από τις εξωτερικές επιβαλλόμενες φορτίσεις, στο πρόγραμμα MARS2000® μοντελοποιούνται και οι εσωτερικές φορτίσεις, όπως το βάρος των δεξαμενών φορτίου, δεξαμενών καυσίμου, βάρος των υπερκατασκευών και βάρος της κύριας μηχανής. Έτσι μπορεί να γίνει υπολογισμός του κάθε ελάσματος και ενισχυτικού στην κατάλληλη θέση το οποίο βρίσκεται. Τέλος, στον υπολογισμό συμπεριλαμβάνονται και οι προσαυξήσεις λόγω διάβρωσης στην κάθε πλευρά του ελάσματος - ενισχυτικού.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

- Ορισμός βασικών στοιχείων (κύριες διαστάσεις, καμπτικές ροπές).
- Ορισμός γεωμετρίας εγκαρσίων τομών.
- Καθορισμός διαμερισμάτων και εσωτερικών φορτίσεων.
- Ορισμός πάχους ελασμάτων.
- Ορισμός θέσης και διαστάσεων ενισχυτικών.
- Εφαρμογή κανονισμών και έλεγχος τάσεων σε όλα τα σημεία για όλες τις πιθανές καταστάσεις φόρτωσης (κατάσταση πλήρους φορτίου και κατάσταση ερματισμού).
- Επαναληπτική διαδικασία του ορισμού πάχους ελασμάτων, διαστάσεων ενισχυτικών και εφαρμογή κανονισμού έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο σχεδίασης.

Σημειώνεται ότι οι τομές του πλοίου ακολουθούν στο Παράρτημα Α.

Μέση τομή

Σύμφωνα με τις καταστάσεις φόρτωσης, τη γεωμετρία των δεξαμενών και τις φορτίσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως, προκύπτουν όλα τα χαρακτηριστικά των ελασμάτων και των διαμήκων ενισχυτικών, τα οποία παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 9 - Ελάσματα μέσης τομής

ΜΕΣΗ ΤΟΜΗ				
Θέση	Πάχος ελάσματος t [mm]		Θέση	Πάχος ελάσματος t [mm]
-	t [mm]		-	t [mm]
Keel Plate	19		Upper Deck (inner)	16
Inner Keel Plate	19		Trunk deck	17+25
Bottom	18		Girder CL	16
Inner Bottom	18		Girder CL (upper)	20
Bilge	19		Girder (2.5 OCL)	15
Hopper	18		Girder (8 OCL)	15
Side shell	17		Girder (10.9 OCL - Upper)	14
Inner side shell	18.5		Girder (15.5 OCL)	15
Sheer strake	17		Girder (7.6 ABL)	13
Inner Topside	17.5+21		Girder (15 ABL)	12
Upper Deck	17		Girder (23 ABL)	12

Πίνακας 10 - Διαστάσεις ενισχυτικών μέσης τομής

Διαμήκη Ενισχυτικά Μέσης τομής						
Τύπος	Χαρακτηριστικά	Αριθμός		Τύπος	Χαρακτηριστικά	Αριθμός
Γ	250*12+90*16	27		T	450*12*150*16	8
T	300*12+120*15	14		T	450*14+150*16	15
T	325*12+100*15	13		FB	150*12	9
T	325*12+120*15	7		FB	175*12	5
T	325*12+150*15	3		FB	250*19	2
T	350*12+120*16	14		FB	275*12	3
T	350*12+150*15	14		FB	275*20	3
T	400*12+120*16	6		FB	300*20	8
T	400*12+140*16	21				

Σύμφωνα με τη διατομή που προέκυψε, έχει ως αποτέλεσμα η ροπή αντίστασης να είναι ίση με $Z_{actual-GROSS} = 76.9 [m^3]$ & $Z_{actual-NET} = 71.56 [m^3]$. Παρατηρείται ότι η διατομή που επιλέχθηκε έχει ροπή αντίστασης αρκετά μεγαλύτερη από ότι απαιτείται στους κανονισμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κριτήριο σχεδίασης δεν είναι μόνο το όριο διαρροής του χάλυβα (είτε 235 [MPa] είτε 315 [MPa]), αλλά το επιτρεπόμενο όριο του συστήματος αποθήκευσης. Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία του συστήματος αποθήκευσης, για το σύστημα τύπου No.96, απαιτείται οι τάσεις στο επίπεδο της εσωτερικής γάστρας να μην ξεπερνούν τα 120 [MPa]. Συνεπώς, υπάρχει μια αύξηση των διαστάσεων των ελασμάτων και των ενισχυτικών, σε σχέση με το απαιτούμενο σε κάθε θέση.

Νομέας 122

Ο νομέας αυτός βρίσκεται εντός του χώρου φορτίου και πιο συγκεκριμένα στο πρωραίο τμήμα του. Και σε αυτό το νομέα, η τομή θα είναι ενισχυμένη παραπάνω του ορίου διαρροής των χαλύβων όπως στη μέση τομή, προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση του συστήματος αποθήκευσης. Τα ελάσματα και τα ενισχυτικά που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 11 - Ελάσματα Νομέα 122

Νομέας 122				
Θέση	Πάχος ελάσματος		Θέση	Πάχος ελάσματος
-	t [mm]		-	t [mm]
Keel Plate	19		Upper Deck (inside)	15.5
Inner Keel Plate	19		Trunk deck	20
Bottom	19		Girder CL	14
Inner Bottom	19		Girder CL (upper)	20
Hopper	19		Girder (2.5 OCL)	15
Side shell	17		Girder (7 OCL)	15
Inner side shell	17+18+18.5		Girder (2.4 OCL - Upper)	14
Sheer strake	15		Girder (7.6 ABL)	13
Inner Topside	15.5+16.5		Girder (15 ABL)	12
Upper Deck	15		Girder (23 ABL)	12

Πίνακας 12 - Διαστάσεις ενισχυτικών νομέα 122

Νομέας 122 – Διαμήκη ενισχυτικά						
Τύπος	Χαρακτηριστικά	Αριθμός		Τύπος	Χαρακτηριστικά	Αριθμός
T	250*12+100*14	18		T	425*12+160*16	7
T	250*12+120*14	11		T	450*14+150*16	8
T	300*12+150*15	11		FB	120*12	4
T	325*12+100*16	18		FB	150*12	12
T	350*12+140*14	15		FB	200*12	4
T	350*12+150*15	2		FB	250*12	3
T	400*12+120*16	18		FB	250*20	5
T	400*12+150*15	6		FB	300*20	9

Νομέας 139

Ο νομέας 139 βρίσκεται πρώραθεν του χώρου φορτίου, στις πρωραίες δεξαμενές καυσίμου. Τα ελάσματα και τα ενισχυτικά που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 13 - Ελάσματα νομέα 139

Νομέας 139				
Θέση	Πάχος ελάσματος		Θέση	Πάχος ελάσματος
-	t [mm]		-	t [mm]
Bottom	20		Girder CL	14
Inner Bottom	18		Girder CL (upper)	14

Hopper	18	Girder (1.7 OCL)	14
Side shell	16+17+18	Girder (7.2 OCL - Upper)	14
Inner side shell	12+15	Girder (7.6 ABL)	12
Sheer strake	16	Girder (15 ABL)	12
Lower Deck (23 ABL)	12	Girder (23 ABL)	12
Upper Deck	15		

Πίνακας 14 - Διαστάσεις ενισχυτικών νομέα 139

Νομέας 139 – Διαμήκη ενισχυτικά		
Τύπος	Χαρακτηριστικά	Αριθμός
T	300*12+120*14	20
T	325*12+120*16	17
T	350*12+120*16	13
T	400*12+120*16	24
FB	200*12	50

Νομέας 45

Ο νομέας αυτό βρίσκεται στο χώρο του μηχανοστασίου και συγκεκριμένα στην έδραση της μηχανής. Σημειώνεται ότι έχει τοποθετηθεί στο πρόγραμμα ως κατανεμημένο φορτίο η μηχανή και το βάρος των υπερκατασκευών στα ανάλογα σημεία.

Πίνακας 15 - Ελάσματα νομέα 45

Νομέας 45			
Θέση	Πάχος ελάσματος	Θέση	Πάχος ελάσματος
-	t [mm]	-	t [mm]
Bottom	20	Upper Deck	12
Inner Bottom	19	Lower Deck (21 ABL)	10
Side shell	17.5	Lower Deck (16 ABL)	10
Sheerstrake	18	Lower Deck (10 ABL)	11
Inner side shell	12	Lower Deck (7 ABL)	10
Long. (4 OCL)	10.5	Girders	16
Long. (16 OCL)	11		

Πίνακας 16 - Διαστάσεις ενισχυτικών νομέα 45

Νομέας 45- Διαμήκη ενισχυτικά		
Τύπος	Χαρακτηριστικά	Αριθμός
T	150*90+90*9	148
T	150*12+90*12	28
T	200*10+90*14	5

Εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές

Στο πρόγραμμα MARS2000®, μοντελοποιήθηκαν οι εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές και υπολογίστηκαν τα πάχη ελασμάτων και εγκάρσια / κατακόρυφα ενισχυτικά για να ικανοποιούνται οι κανονισμοί και οι φορτίσεις. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά των φρακτών.

Πίνακας 17 - Ελάσματα και ενισχυτικά τυπικής φρακτής

Τυπική εγκάρσια φρακτή			
Έλασμα	Πάχος [mm]	Ενισχυτικά	Πλήθος
Upper Hold Plate	15	(T) 380*12+100*16	8
Lower Hold Plate	17	(T) 350*11+100*16	8
Floor Plate	18+19	(T) 320*11+100*16	9
Side Tranverse Plate	17	(T) 300*11+100*16	9
Trunk Tranverse Plate	13+16	(FB) 300*18	19
		(FB) 250*15	15
		(FB) 200*12	24

Πίνακας 18 - Ελάσματα και ενισχυτικά πρωραίας φρακτής

Πρωραία εγκάρσια φρακτή (θέση φορτίου)			
Έλασμα	Πάχος [mm]	Ενισχυτικά	Πλήθος
Upper Hold Plate	15	(T) 350*12+120*16	28
Lower Hold Plate	18	(T) 325*12+100*14	6
Floor Plate	20	(A) 300*12+100*14	14
Side Tranverse Plate	17	(A) 280*12+80*14	17
Trunk Tranverse Plate	12+15	(FB) 200*12	15

Με βάση όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, μπορεί να υπολογιστεί το βάρος της κάθε τομής και εγκάρσιας φρακτής συμπεριλαμβανομένου και των ενισχυτικών τους. Σημειώνεται ότι στο βάρος αυτό εμπεριέχονται οι προσαυξήσεις λόγω διάβρωσης.

Πίνακας 19 - Βάρη κάθε νομέα / φρακτής

MARS2000® STEELWEIGHT			
	FRAME	Value	Units
Διαμήκη Ελάσματα & Ενισχυτικά	Fr45	49.3	[t/m]
	Midship	60.9	[t/m]
	Fr122	47.1	[t/m]
	Fr139	32.8	[t/m]
Φρακτές & Νομείς	Typical Bulkhead	243.3	[t/bulkhead]
	Fore Bulkhead	153.6	[t/bulkhead]
	Web Frame Fr.45	34.3	[t/frame]
	Web Frame Midship	47.1	[t/frame]
	Web Frame Fr.122	46.5	[t/frame]
	Web Frame Fr.139	29.9	[t/frame]

Σημειώνεται ότι στο πρόγραμμα MARS2000® δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μελέτη αντοχής για τους νομείς (Web frame). Συνεπώς για να υπολογιστεί το βάρος των νομέων θα

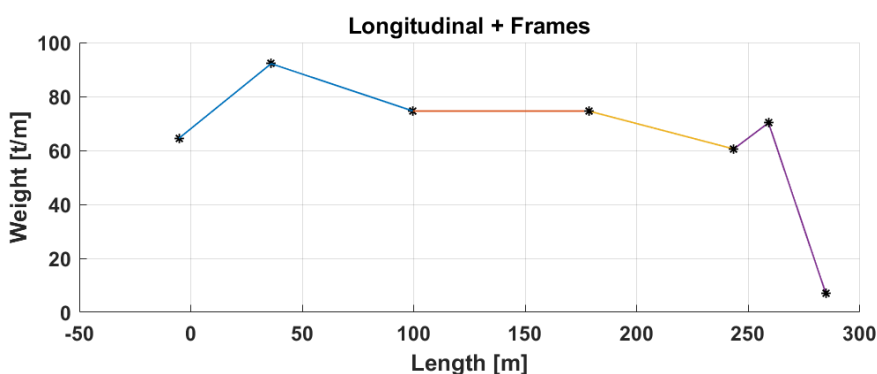
ληφθούν δεδομένα από τον υπολογισμό της αντοχής των εγκάρσιων φρακτών. Πιο συγκεκριμένα τα ενισχυτικά των νομέων θα ληφθούν ίδια με τις εγκάρσιες φρακτές και το πάχος του ελάσματος των ενισχυμένων νομέων θα ληφθεί από το ελάχιστο επιτρεπόμενο των κανονισμών, δηλαδή ίσο με 12 [mm].

Όπως φαίνεται στο πίνακα 19, οι μονάδες δεν είναι ίδιες για όλα τα στοιχεία, αλλά εξαρτάται αναλόγως τους νομείς - φρακτές. Έτσι, για να προκύψει το βάρος ανά τρέχον μέτρο, τα βάρη που είναι σε μονάδες [t/frame] θα μετατραπούν σε [t/m] με βάση την ισαπόσταση των νομέων (το frame spacing [m/frame]). Έτσι θα προκύψουν τα παρακάτω βάρη:

Πίνακας 20 - Βάρη ανά τρέχον μέτρο

Steel weight distribution			
	FRAME	Value	Units
Διαμήκη Ελάσματα & Ενισχυτικά	Fr45	49.3	[t/m]
	Midship	60.9	[t/m]
	Fr122	47.1	[t/m]
	Fr139	32.8	[t/m]
Νομείς	Web Frame Fr.45	42.9	[t/m]
	Web Frame Midship	13.7	[t/m]
	Web Frame Fr.122	13.5	[t/m]
	Web Frame Fr.139	37.4	[t/m]

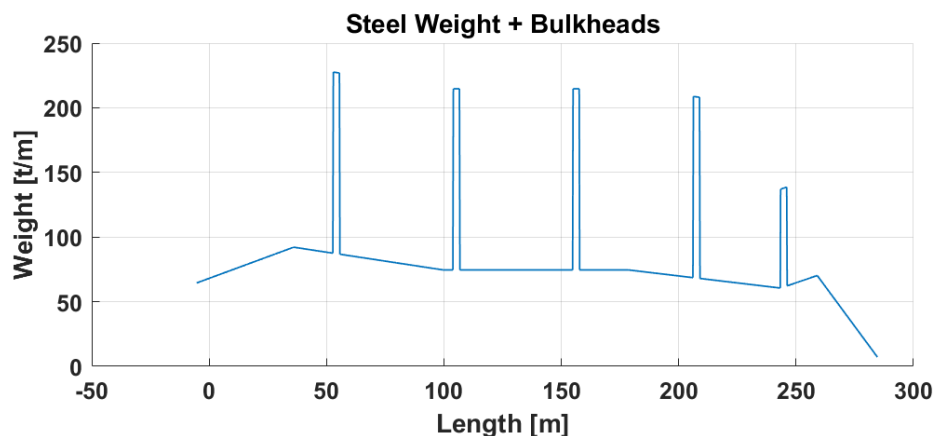
Έπειτα με βάση αυτές τις τομές γίνεται υπολογισμός του βάρους με παρεμβολή των σημείων (εικόνα 46). Ο υπολογισμός του εμβαδού οδηγεί σε $W_{1-steel} = 21323$ [t]. Προκειμένου να υπολογιστεί το συνολικό βάρος, γίνεται η θεώρηση στα ακραία σημεία του πλοίου το βάρος στην πρύμνη να είναι ίσο με το 70% του νομέα 45 και αντίστοιχα στη πλώρη να ισούται με 10% του νομέα 139.



Εικόνα 46 - Κατανομή βάρους διαμήκων στοιχείων και νομέων

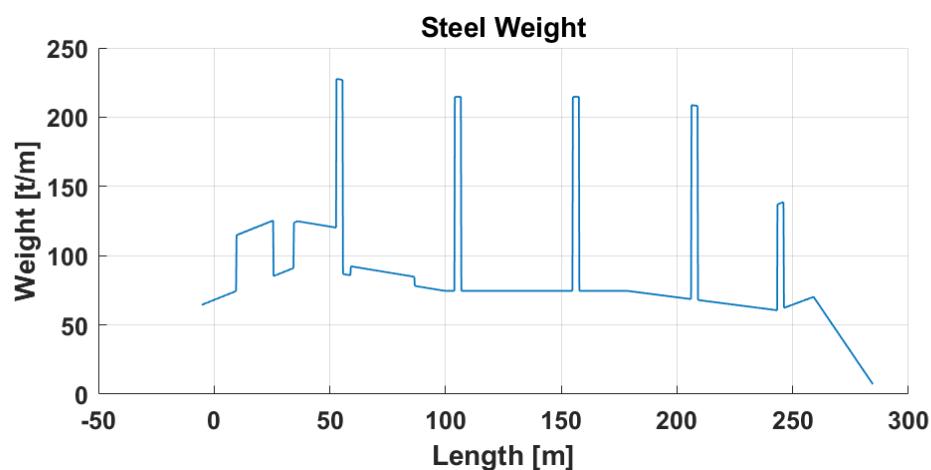
Σημειώνεται ότι η αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής στη πλώρη και πρύμνη, οφείλεται στο γεγονός ότι η ισαπόσταση των νομέων γίνεται από 3.45 [m] (χώρος φορτίου) σε 0.8 [m], συνεπώς οι εγκάρσιες ενισχύσεις αυξάνουν το βάρος.

Σε συνέχεια αυτού, θα προστεθεί το βάρος των 10 εγκάρσιων φρακτών, όπως έχει υπολογισθεί παραπάνω και το βάρος των υπερκατασκευών.



Εικόνα 47 - Κατανομή βάρους διαμήκων στοιχείων, νομέων και φρακτών

Τέλος προστίθεται το βάρος των υπερκατασκευών.



Εικόνα 48 - Κατανομή βάρους μεταλλικής κατασκευής

Άρα προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 21 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Βάρος	Πλήθος	t/bulkhead	[t]
Longitudinals + Frames	-	-	21323
Midship Bulkheads	8	196.2	1569
Fore Bulkhead	2	107.1	214
Additions (+5%)	-	-	1150
Wsteel			24146

Να σημειωθεί ότι η διαφορά του βάρους των εγκάρσιων φρακτών στον πίνακα 21 σε σχέση με τον πίνακα 19 οφείλεται στη διαφορά του βάρους του νομέα από την εγκάρσια φρακτή. Αυτό γίνεται διότι το βάρος του νομέα έχει ήδη συμπεριληφθεί στο βάρος ανά τρέχον μέτρο, και στη θέση της εγκάρσιας φρακτής θα υπολογιζόταν ξανά.

Τέλος, προστίθεται 5% επι του συνολικού βάρους της μεταλλικής κατασκευής, προκειμένου να συνυπολογιστούν όλα τα βάρη που παραλείφθηκαν, όπως τις τοπικές ενισχύσεις (κυρίως πλήρη και πρύμνη), τις συγκολλήσεις και τα μπρακέτα των ενισχυτικών.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα W_{STEEL} :

- Κατά Watson: $W_{stWATSON} = 24366.2 [t]$
- Κατά Schneekluth + Muller-Köster : $W_{stSNEEK+MULLKOS} = 25292.3 + 1423.6 \Rightarrow$
 $W_{stSNEEK+MULLKOS} = 26715.9[t]$
- Κατά Mars2000® + Muller-Köster: $W_{stMARS+MULLKOS} = 24146 + 1423.6 \Rightarrow$
 $W_{stMARS+MULLKOS} = 25569.6 [t]$

$$W_{steel} = \frac{24366.2 + 26715.9 + 25569.6}{3} = 25550.6 [t]$$

Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού (W_{outfit}):

Ο υπολογισμός του βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού, θα χωριστεί σε δύο ομάδες. Η πρώτη θα είναι το βάρος της ενδιαίτησης και εξοπλισμού (όπως έχουν όλα τα πλοία) και το δεύτερο το βάρος των δεξαμενών αποθήκευσης ΥΦΑ. Η πρώτη ομάδα θα υπολογιστεί με δυο διαφορετικές μεθόδους, δηλαδή τις:

1. Ομάδες βαρών W_{out} κατά Schneekluth
2. Προσεγγιστικός τύπος μέσω εμπειρικών συντελεστών

Αναλυτικότερα:

1. Ομάδες βαρών κατά Schneekluth

II) Φορτοεκφορτωτικά μέσα

Το πλοίο διαθέτει 5 γερανούς :

Δυο γερανοί με φορτωτική ικανότητα 10 [t] και ακτίνα λειτουργίας $R=25 [m]$. Άρα από βιβλιογραφία [1] σελ. 263 προκύπτει ότι ο κάθε γερανός ζυγίζει περίπου 21 [t]. Δύο γερανοί με φορτωτική ικανότητα 5 [t] και ακτίνα λειτουργίας $R=20 [m]$, που ζυγίζουν ο κάθε γερανός 16 [t]. Τέλος, ένα γερανό με φορτωτική ικανότητα 6 [t] και ακτίνα λειτουργίας $R=10 [m]$ και ζυγίζει 14 [t].

Άρα συνολικό βάρος γερανών: $W_{II}=2*21+2*16+1*14 \Rightarrow W_{II}=88 [t]$

III) Ενδιαίτηση

Από τον πίνακα 7, προκύπτει ότι $\sum_{i=1}^n Au_i = 6129.7 [m^2]$.

Για μεγάλα φορτηγά πλοία ο συντελεστής λαμβάνει τις τιμές 180 έως 200 [kp/m^2]. (βιβλιογραφία [1] σελ.267). Γίνεται επιλογή στα 200 [kp/m^2], καθώς τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ έχουν υψηλό επίπεδο ενδιαίτησης κυρίως για λόγους ασφάλειας.

Άρα προκύπτει: $W_{III} = 200 \left[\frac{kp}{m^2} \right] * 6129.7 [m^2] \Rightarrow W_{III} = 1225.9 [t]$

IV) Λοιπά βάρη

$W_{IV} = (L * B * D)^{\frac{2}{3}} * C_1$, με $C_1 = 0.18$ έως 0.26. Επιλέγεται $C_1=0.26$.

$$\Rightarrow W_{IV} = (278.1 * 45.2 * 26.5)^{\frac{2}{3}} * 0.26 \Rightarrow W_{IV} = 1249.4[t]$$

Επιλέγεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή καθώς τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ έχουν πολλά επιπλέον βάρη όπως αυξημένη πυρασφάλεια, σωληνώσεις εκτός μηχανοστασίου κ.α.

$$W_{OUTFIT, SCHNEEKLUTH} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV} \Rightarrow W_{OUTFIT, SCHNEEKLUTH} = 0 + 88 + 1225.94 + 1249.4 \Rightarrow W_{OUTFIT, SCHNEEKLUTH} = 2563.3 [t]$$

2. Προσεγγιστικός τύπος μέσω εμπειρικών συντελεστών

Σύμφωνα με βιβλιογραφία [1], σελ. 257 λαμβάνεται ότι:

$W_{out} = K_{ot} * L * B$, με K_{ot} από 0.17 για δεξαμενόπλοια με L περίπου στα 300 [m]. Γίνεται αύξηση στο συντελεστή αυτό λόγω του περισσότερου εξοπλισμού.

Επιλέγεται $K_{ot} = 0.18$ [kr/m²]. Άρα :

$$W_{out,b} = 0.18 * 278.1 * 45.2 \Rightarrow W_{out,b} = 2262.6 [t]$$

Άρα με μέσο όρο μεταξύ των δύο μεθόδων το βάρος W_{out} χωρίς το βάρος των δεξαμενών είναι ίσο με:

$$W_{outfit_{no-tanks}} = \frac{2563.3 + 2262.6}{2} \Rightarrow W_{outfit_{no-tanks}} = 2413.0 [t]$$

Βάρος δεξαμενών

Σημαντικό επιπρόσθετο βάρος για το υπό σχεδίαση πλοίο είναι το βάρος των δεξαμενών. Το βάρος αυτό εξαρτάται σε υψηλό βαθμό αναλόγως το σύστημα δεξαμενών που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση του συστήματος δεξαμενών No96 της GTT, το βάρος θα προσεγγισθεί με τη βοήθεια συντελεστή.

Σύμφωνα με βιβλιογραφία [34], λαμβάνεται ότι ο συντελεστής βάρους για το σύστημα No.96 ίσος με : $C_{tank} = 114$ [kg/m²].

Συνεπώς το βάρος θα υπολογιστεί από: $W_{TANK} = C_{Tank} * A_{developed}$

Όπου $A_{developed}$: η ανεπτυγμένη επιφάνεια της δεξαμενής.

Πίνακας 22 - Διαστάσεις δεξαμενών 2,3,4

	Mult. Number	L [m]	b [m]	$A_{developed}$ [m ²]
Tank N.2 & N.3 & N.4 Bottom	2	48.3	15.5	1497.3
Tank N.2 & N.3 & N.4 Hopper	2	48.3	6.2	598.9
Tank N.2 & N.3 & N.4 Side Shell	2	48.3	15.5	1497.3
Tank N.2 & N.3 & N.4 Top Side	2	48.3	12.7	1226.8
Tank N.2 & N.3 & N.4 Upper shell	2	48.3	10.9	1052.9
Tank N.2 & N.3 & N.4 Transverse Bulkhead	2	-	-	2096.4
Total				7969.7

Συνεπώς για τις δεξαμενές 2 & 3 ισχύει ότι $A_{dev} = 7969.7$ [m²]

$$W_2 = W_3 = W_4 = 908.5 [t]$$

Για τη δεξαμενή 1, η ανεπτυγμένη επιφάνεια υπολογίζεται με μεγαλύτερη δυσκολία λόγω της σύνθετης μορφής της δεξαμενής.

Πίνακας 23 - Διαστάσεις πρωραίας δεξαμενής

	n	L [m]	Angle [deg]	L_{active} [m]	b_{AFT} [m]	b_{FORE} [m]	$A_{developed}$ [m ²]
Tank N.1 Bottom	2	34.5	90	34.5	15.5	7	776.3
Tank N.1 Hopper	2	34.5	75	35.8	6.2	6.2	443.9
Tank N.1 Side Shell	2	34.5	75	35.8	15.5	15.5	1109.8
Tank N.1 Top Side	2	34.5	75	35.8	12.7	12.7	909.3
Tank N.1 Upper shell	2	34.5	90	34.5	10.9	2.4	458.9

Tank N.1 Transverse Bulkhead - AFT	1	-	-	-	-	-	1048.2
Tank N.1 Transverse Bulkhead - FORE	1	-	-	-	-	-	558
Total							5304.3

Όπου Angle [deg] η γωνία του ελάσματος ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Centerline).

Για τη δεξαμενή 1, υπολογίζεται ότι:

$$W_1 = 604.7 [t]$$

$$W_{Tanks} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \Rightarrow W_{tanks} = 3330.2 [t]$$

Στο βάρος αυτό γίνεται προσαύξηση κατά 4% λόγω της ενίσχυσης του ανοίγματος στην επάνω πλευρά (tank dome) και λόγω του πύργου στήριξης αντλιών (pump tower).

Έτσι $W'_{Tanks} = W_{TANKS} * 1.04 \Rightarrow W'_{Tanks} = 3463.4 [t]$

Προσθέτοντας το βάρος το δεξαμενών λαμβάνεται το τελικό βάρος εξοπλισμού και ενδαιήτησης είναι ίσο με:

$$W_{outfit} = W_{outfit_{no-tanks}} + W_{Tanks} \Rightarrow W_{outfit} = 2413.0 + 3463.4 \Rightarrow$$

$$W_{outfit} = \mathbf{5876.4 [t]}$$

Υπολογισμός βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης ($W_{MACHINERY}$)

Η διαδικασία υπολογισμού θα πραγματοποιηθεί με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

- 1) Μέθοδος ομάδων βαρών κατά Strohbusch
- 2) Τύπος Watson-Gilfillan
- 3) Προσεγγιστικός τύπος μέσω εμπειρικών συντελεστών

1) Μέθοδος ομάδων βαρών κατά Strohbusch

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Strohbusch βιβλιογραφία [1] σελ. 273, υπολογίζεται το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης ως εξής:

$$W_M = W_{MR} + W_{MS} + W_{MM} \quad (3)$$

- $W_{MR} = w_2 * SHP$. Ο συντελεστής w_2 κυμαίνεται από 35 έως 50 [kr/HP] για φορτηγά πλοία. Λαμβάνεται ίσος με $w_2=42.5$ [kr/HP]. Σημειώνεται ότι δεν λαμβάνεται η τιμή του συντελεστή για δεξαμενόπλοια, διότι τα δεξαμενόπλοια κινούνται με πολύ διαφορετικό τρόπο λειτουργίας σε σχέση με τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. SHP είναι η ισχύς στον άξονα σε ίππους [HP] και θα θεωρηθεί μηδενική απώλεια ισχύος (δεν υπάρχει μειωτήρας). Άρα προκύπτει:

$$\Rightarrow W_{MR} = 42.5 \left[\frac{kp}{HP} \right] * \frac{29500}{0.746} [HP] \Rightarrow W_{MR} = 1680.6 [t]$$

- $W_{MS} = w_3 * SHP$. Ο συντελεστής w_3 κυμαίνεται από 5 έως 10 [kr/HP] για φορτηγά πλοία. Λαμβάνεται ίσος με $w_3=7.5$ [kr/HP].

$$\Rightarrow W_{MS} = 7.5 \left[\frac{kp}{HP} \right] * \frac{29500}{0.746} [HP] \Rightarrow W_{MS} = 296.6 [t]$$

- $W_{MM} = w_4 * SHP$. Ο συντελεστής w_4 κυμαίνεται από 30 έως 40 [kr/HP] για φορτηγά πλοία. Λαμβάνεται ίσος με $w_4=35$ [kr/HP].

$$\Rightarrow W_{MM} = 35 \left[\frac{kp}{HP} \right] * \frac{29500}{0.746} [HP] \Rightarrow W_{MM} = 1384.0 [t]$$

$$\text{Άρα από (3)} \Rightarrow W_M = 1680.6 + 296.6 + 1384.0 \Rightarrow W_{M1} = 3361.2 [t]$$

2) Τύπος Watson-Gilfillan

Από βιβλιογραφία [1] σελ.272 χρησιμοποιείται ο τύπος $W_M [t] = C_{MD} * P_B^{0,89}$

Με το συντελεστή C_{MD} να κυμαίνεται από 0.3 σε 0.5. Επιλέγεται $C_{MD}=0.4$.

Η ισχύς P_B είναι η ισχύς πέδης σε μονάδες [kW].

$$\Rightarrow W_M = 0.4 * (29500)^{0,89} \Rightarrow W_{M2} = 3803.7 [t]$$

3) Προσεγγιστικός τύπος μέσω εμπειρικών συντελεστών

Σύμφωνα με βιβλιογραφία [1] σελ. 273 , προκύπτει ότι : $W_M = w_5 * SHP$. Ο συντελεστής w_5 κυμαίνεται από 85 έως 90 [kp/HP]. Επιλέγεται $w_5=87.5$ [kp/HP] .

$$\Rightarrow W_M = 87.5 * \frac{29500}{0.746} \Rightarrow W_{M3} = 3460.1 [t]$$

Άρα το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής, προκύπτει ίσο με:

$$W_M = \frac{W_{M1} + W_{M2} + W_{M3}}{3} \Rightarrow W_M = \frac{3361.2 + 3803.7 + 3460.1}{3} \Rightarrow W_M = 3541.7 [t]$$

Τελικός υπολογισμός βάρους κενού σκάφους υπό σχεδίαση πλοίου (L.S)

Ός γνωστόν από την εξίσωση (1) υπολογίζεται το L.S. του υπό σχεδίαση πλοίου.

$$(1) \Rightarrow L.S_{.calc} = 25550.6 + 5876.4 + 3541.7 \Rightarrow L.S_{.calc} = 34968.7 [t]$$

Σημειώνεται ότι στο υπολογισθέν βάρος του κενού σκάφους (L.S.), δεν θα πραγματοποιηθεί κάποια διόρθωση, καθώς οι ίδιες μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε παρόμοια πλοία (διπλής τρόπιδας) και ίδιας σχεδίασης δεξαμενών και τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στην πραγματικότητα, με απόκλιση μικρότερη του 2%.

Υπολογισμός κέντρου βάρους κενού πλοίου

Διαμήκης θέση κέντρου βάρους

Στο εδάφιο αυτό, θα γίνει υπολογισμός της διαμήκης θέσης του κέντρου βάρους και του κατακόρυφου κέντρου βάρους. Ο υπολογισμός αυτός θα βασιστεί τόσο σε εμπειρικά στοιχεία, αλλά και σε αναλυτικά. Πιο συγκεκριμένα, για το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, η διαμήκη θέση του κέντρου βάρους μπορεί να υπολογιστεί μαθηματικά, εφόσον είναι γνωστή η κατανομή του βάρους στον διαμήκη άξονα (εικόνα 48). Έτσι, προκύπτει ότι :

$$LCG_{Wsteel} = 125.043 [m]$$

Από βιβλιογραφία, είναι γνωστό ότι το κέντρο βάρους της μεταλλικής κατασκευής βρίσκεται στα 47-48% του L. Στην περίπτωση εδώ, το βάρος βρίσκεται στο 45% του L, γεγονός που δικαιολογείται από τη διπλή τρόπιδα του υπό-σχεδίαση πλοίου, αφού υπάρχει αυξημένο βάρος μεταλλικής κατασκευής στο πρυμναίο τμήμα.

Το κέντρο βάρους του εξοπλισμού, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, σε αυτήν του γενικού εξοπλισμού και των δεξαμενών. Το κέντρο βάρους του γενικού εξοπλισμού από βιβλιογραφία ορίζεται στο 42% του L για δεξαμενόπλοια. Τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, έχουν παρόμοια βάρη με τα δεξαμενόπλοια με τις διαφορές ότι έχουν επιπλέον εξοπλισμό για τη διαχείριση του φορτίου που βρίσκεται στο cargo control room και έχουν επιπλέον βάρος στη μέση τομή λόγω των ειδικών τερματικών συνδέσεων (manifolds). Έτσι το κέντρο βάρους του γενικού εξοπλισμού θα τοποθετηθεί στο 42% του L. Η διαμήκης θέση του κέντρου βάρους των δεξαμενών αποθήκευσης μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά εφόσον η γεωμετρία τους και το βάρος τους είναι γνωστό. Συνεπώς προκύπτει ότι:

$$LCG_{Tanks} = 148.155 [m]$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο τελικός υπολογισμός της διαμήκης θέσης του κέντρου βάρους του κενού πλοίου.

Πίνακας 24 - Στοιχεία υπό σχεδίαση πλοίου στη L.S.

	Weight [t]	LCG/L	LCG [m]
W_{st}	25550.6	0.450	125.043
W_{ot}	2413	0.450	125.145
W_{tank}	3463.4	0.532	148.155
W_M	3541.7	0.100	27.810
L.S.	34968.7	0.422	117.350

Συνεπώς,

$$LCG_{L.S.} = 117.35 [m]$$

Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους

Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους, θα ξαναγίνει ανάλυση των επιμέρους βαρών. Για το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του κέντρου βάρους αναλυτικά εφόσον είναι γνωστές οι τομές του πλοίου και συνεπώς το κέντρο βάρους κάθε τομής, το οποίο παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 25 - Κατακόρυφο κέντρο βάρους κάθε τομής

Κατακόρυφο κέντρο βάρους κάθε τομής	
Νομέας	KG [m]
Fr45	13.090
Midship	16.155
Fr122	16.649
Fr139	14.435
Total KG	15.103

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζεται το κέντρο βάρους της μεταλλικής κατασκευής, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι υπερκατασκευές. Από την ανάλυση της μεθοδολογίας της Muller Köster, μπορεί να υπολογισθεί ότι το κέντρο βάρους των υπερκατασκευών βρίσκεται στα 8.631[m] πάνω από το κοίλο. Συνεπώς,

$$KG_{ss} = 26.5 + 8.631 \Rightarrow KG_{ss} = 35.131 [m]$$

Άρα

$$KG_{steel} = 16.002 [m]$$

Από βιβλιογραφία [2], για δεξαμενόπλοια, το KG/D για το βάρος εξοπλισμού βρίσκεται στα 0.8-1.0. Συνεπώς θα θεωρηθεί ότι βρίσκεται στα 0.9 του D. Το βάρος των δεξαμενών

υπολογίζεται αναλυτικά και βρίσκεται στα 0.665 του D. Για την μηχανολογική εγκατάσταση, το κέντρο βάρους ορίζεται στα 0.5 του D. Έτσι συνολικά προκύπτει ότι:

Πίνακας 26 - Κατακόρυφο κέντρο βάρους κενού πλοίου (Lightship)

Κατακόρυφο κέντρο βάρους κενού πλοίου (Lightship)			
	Weight	KG/D [m]	KG [m]
W_{steel}	25550.6	0.619	16.002
W_{outfit}	2413	0.900	23.850
W_{tanks}	3463.4	0.665	17.619
$W_{\text{machinery}}$	3541.7	0.500	13.250
L.S	34968.7	0.620	16.425

Συνεπώς

$$KG_{L.S.} = 16.425 [m]$$

8. Ανάλυση νεκρού βάρους (DWT)

Στο εδάφιο αυτό, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση του νεκρού βάρους, του ωφέλιμου φορτίου και θα υπολογιστεί η κάθε κατηγορία βάρους ξεχωριστά. Έτσι θα γίνει η ανάλυση :

$$DWT = W_{PAYLOAD} + W_{FO} + W_{DO} + W_{LO} + W_{FW} + W_{PROV} + W_{CREW} + W_{CONST} \quad (4)$$

Τα παραπάνω βάρη που εμφανίζονται στη σχέση (4), θα υπολογιστούν στη κατάσταση Scantling Load Departure (SLD).

Παρακάτω, θα επιτευχθεί ο υπολογισμός των επιμέρους μεταβλητών της εξίσωσης (4) σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1] σελ.281 .

Βάρος καυσίμου κύριων μηχανών (W_{FO} – Heavy Fuel Oil)

$$W_{F1} = P_{B,1} * b_1 * t_1 * C * 10^{-6} \quad (4.2)$$

- όπου:
- $W_{F,1}$ = Βάρος καυσίμου κύριας μηχανής σε [t]
 - $P_{B,1}$ = Ισχύς της κύριας μηχανής (SMCR) σε [kW] = 29500 [kW]
 - b_1 = Ειδική κατανάλωση καυσίμου = 162 [gr/kWh] (ME-GI)
 - t_1 = Χρόνος ταξιδιού μετ' επιστροφής σε [hr]
 - C = 1.2 έως 1.4 . Συντελεστής για εφεδρεία καυσίμων για τυχόν λόγο. Επιλέγεται $C=1.3$

Η ακτίνα αδράνειας επιλέγεται ίση με $R=15000$ [nm], με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται μόνο βαρύ καύσιμο και όχι φυσικό αέριο. Άρα, ο χρόνος είναι ίσος με:

$$R = V_{ship} * t_1 \Rightarrow t_1 = 769 [hr] \text{ ή } 32 [days]$$

Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί το βάρος του βαρέως καυσίμου από τον παραπάνω τύπο:
 $\Rightarrow W_{FO} = 4777.6 [t]$

Βάρος καυσίμου (W_{DO} – Diesel Oil)

Για να υπολογισθεί το βάρος καυσίμου ντίζελ, από βιβλιογραφία [1] ορίζεται ως 5-7% του καυσίμου της κύριας μηχανής. Όμως, στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ είναι πολύ αυξημένες λόγω του συστήματος τροφοδοσίας του φυσικού αερίου ως καύσιμο και όλες τις επιπρόσθετες λειτουργίες για τη διαχείριση του φορτίου. Έτσι με βάση όμοια πλοία, θα ληφθεί ότι βρίσκεται γύρω στο 13% του βάρους του καυσίμου της κύριας μηχανής. Συνεπώς: $W_{DO} = 0.13 * W_{FO} \Rightarrow W_{DO} = 621.1 [t]$

Βάρος λιπαντικών W_{LO}

Από βιβλιογραφία [1], σελ.284, λαμβάνεται ότι:

$$W_{LO} = 5\% * (W_{FO} + W_{DO}) \Rightarrow W_{LO} = 269.9 [t]$$

Βάρος εφοδίων νερού W_{FW}

Σύμφωνα με βιβλιογραφία [1], σελ.284, προκύπτουν πως το πόσιμο νερό κυμαίνεται από 10 έως 20 [kg/personday] και το νερό καθαριότητας 200 [kg/personday].

Για το πλοίο υπό σχεδίαση θεωρείται αρχικά ότι θα έχει πλήρωμα 45 ανθρώπους συν 6 ανθρώπους όταν περνά τη διώρυγα του Σουέζ. Άρα υπολογίζονται τα παρακάτω:

$$W_{FW} = (15 + 200) \left[\frac{kg}{person * days} \right] * 51[person] * 32[days] \Rightarrow W_{FW} = 310 [t]$$

Στην ποσότητα του νερού θα υπολογιστεί επιπλέον 25%, προκειμένου να επαρκεί το νερό σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή μόλυνσης του νερού.

Έτσι $W'_{FW} = W_{FW} * 1.25 \Rightarrow W'_{FW} = 440 [t]$

Βάρος εφοδίων – Τροφίμων $W_{PROVISIONS}$

Σύμφωνα με βιβλιογραφία [1], σελ.285, προκύπτει ότι:

$$W_{PROV} = 11.5 \left[\frac{kg}{person * day} \right] * 45[pers.] * 32[days] \Rightarrow W_{PROV} = 16.6 [t]$$

Βάρος πληρώματος και αποσκευών $W_{crew+effects}$

Σύμφωνα με βιβλιογραφία [1], σελ.285, προκύπτει ότι:

$$W_{crew} = 75 \left[\frac{kg}{person} \right] * 45[persons] \Rightarrow W_{crew} = 3.4[t]$$

$$W_{effects} = 60 \left[\frac{kg}{perosn} \right] * 45[persons] \Rightarrow W_{effects} = 2.7 [t]$$

Βάρος σταθερών και λοιπών $W_{const&misc}$

Για το βάρος των σταθερών αλλά και λοιπών βαρών, ο υπολογισμός θα βασιστεί σε στοιχεία από πατρικό πλοίο, άλλης διπλωματικής εργασίας [14]. Σε αυτό, το βάρος $W_{const&misc}$ είναι ίσο με 687 [t] και το κέντρο βάρους αυτό $LCG=61.12$ [m], το οποίο χωρίζεται σε κατηγορίες Crew&Effects, Stores, Provisions, Water&Oil in ER, Water&Oil in Hull Spare Anchor. Με βάση τα στοιχεία αυτά, τα βάρη θα παραμείνουν ίδια, πέρα από το Water & Oil in ER, το οποίο θα αυξηθεί κατά 50% λόγω των δύο κύριων μηχανών. Οι θέσεις των κέντρων βαρών θα προκύψουν διατηρώντας τους ίδιους λόγους θέσης προς μήκος πλοίου και θέσης προς κόιλου. Έτσι θα προκύψουν τα παρακάτω στοιχεία:

Πίνακας 27 - Const & Misc. πατρικού πλοίου στην FLD

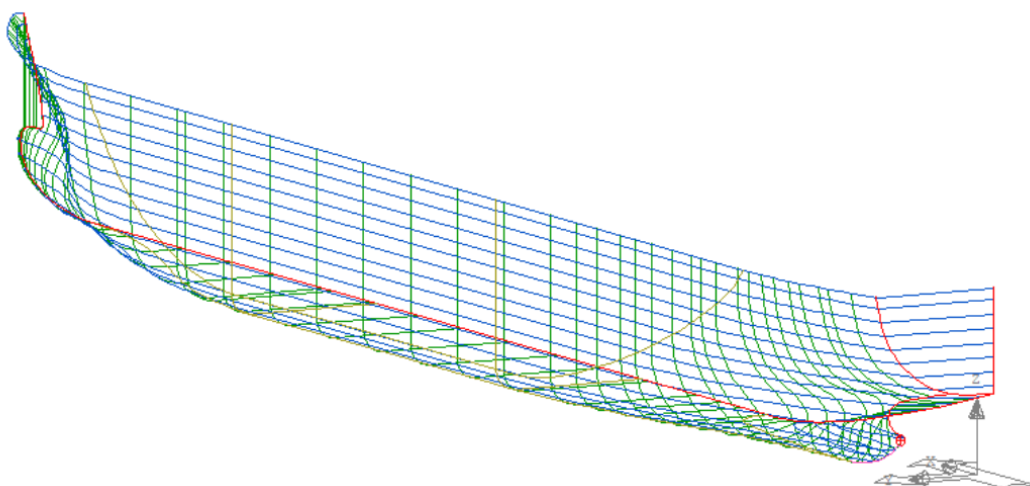
Constants & Miscellaneous στην FLD			
	Weight [t]	LCG [m]	VCG [m]
Crew & their effects	6.1	43.6	36.2
Stores	120	101.1	26.9
Provisions	16.6	40.5	28.4
Water & Oil in ER	675	32.4	4.6
Water & Oil in Hull	85	127.4	6.1
Spar Anchor	13.4	234.9	30.6
TOTAL	916.1	53.4	8.7

9. Ναυπηγικές γραμμές

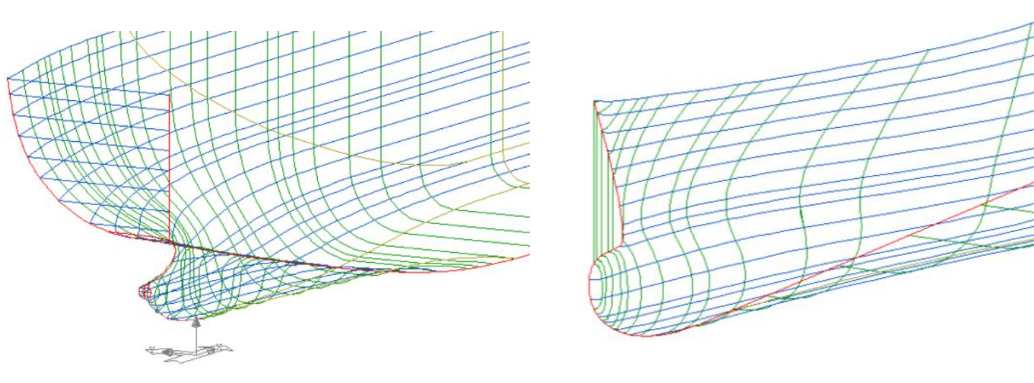
Οι γραμμές για το υπό σχεδίαση πλοίο έχουν ληφθεί από πραγματικό πλοίο. Αρχικά έγινε μετατροπή των γραμμών για τις διαστάσεις του υπό σχεδίαση πλοίου και έπειτα πραγματοποιήθηκε εξομάλυνση των γραμμών. Για τη διαδικασία επεξεργασίας των γραμμών, χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα AVEVA Lines® του σχεδιαστικού πακέτου AVEVA Marine®. Τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για τον καθορισμό των γραμμών είναι τα παρακάτω:

- Εισαγωγή και εξομάλυνση βασικών καμπυλών (Προφίλ πρύμνης και πλήρης, καθρέπτης, προφίλ τρόπιδας και εφαπτομενικές καμπύλες Flat of Side-FOS & Flat of Bottom – FOB).
- Εισαγωγή νομέων και εξομάλυνση αυτών.
- Παρεμβολή των νομέων από ισάλους και τρισδιάστατες καμπύλες.
- Καθορισμός κέντρου άντωσης και συντελεστή γάστρας.
- Επαναληπτική διαδικασία παρεμβολής νομέων, ισάλων & τρισδιάστατων καμπυλών, μέχρι την ομοιόμορφη εξομάλυνση.
- Αύξηση αριθμού νομέων και εκ νέου επαναληπτική διαδικασία (όπως προηγούμενο βήμα).
- Δημιουργία καμπυλότητας πλήρης (Stem End Surface) και παρεμβολής νομέων και ισάλων.

Να σημειωθεί ότι λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας της πρύμνης στο σημείο της τρόπιδας, για την εξομάλυνση χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατες καμπύλες, προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία εξομάλυνσης και η τελική τρισδιάστατη μορφή της γάστρας να είναι καλύτερη.



Εικόνα 49 – Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμών πλοίου



Εικόνα 50 - Γραμμές στην περιοχή της πρύμνης (Αρ.) και στην περιοχής της πλώρης (Δε.)

10. Γραμμή φόρτωσης

Με γνωστή τη γεωμετρία της γάστρας του πλοίου, μπορεί να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος ικανοποίησης των απαιτήσεων της Διεθνής Σύμβασης Γραμμής Φορτώσεως του 1966 (International Load Live Convention - ILLC) και ο καθορισμός του ύψους εξάλων. Παρακάτω ακολουθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί:

Τύπος Πλοίου : “Α”

Κοίλο (D) για το ύψος εξάλων: $D = 21 [m]$

(Σημειώνεται ότι το κοίλο για το ύψος εξάλων είναι ίσο με 21 [m] καθώς στη περιοχή της πρύμνης η μεταλλική κατασκευή σε αυτό το ύψος)

Πλάτος πλοίου: $B = 45.2 [m]$

Μήκος πλοίου για το ύψος εξάλων: $L_{ILLC} = \max(L_{BP-0.85D}, 0.96 * L_{WL-0.85D}) = \max(279.735, 0.96 * 284.945) \Rightarrow L_{ILLC} = 279.735 [m]$

Πάχος ελάσματος υδρορροής καταστρώματος εξάλων: 15 [mm]

Συντελεστής γάστρας στα $0,85 * D$: $C_{B-0.85D} = 0.812$

- Βασικό ύψος εξάλων (Κανονισμός 28), $YE1 = 3175 [mm]$
- Διόρθωση για συντελεστή γάστρας (Κανονισμός 30) για $C_{b-0.85D} > 0.68$,

$$YE5 = \frac{C_{b-0.85D} + 0.68}{1.36} = 1.0997$$

- Διόρθωση για το πλευρικό ύψος (Κανονισμός 31)
- Διόρθωση για υπερκατασκευές και υπερστεγάσματα (Κανονισμοί 33 έως 37)

$$YE6 = \left(D_F - \frac{L}{15}\right) * R = 591.8 [mm], \text{ με } R=250 \text{ για } L \geq 120 [m]$$

Κατάστρωμα εξάλων είναι το κατάστρωμα με ύψος 21 μέτρα (ύψος πρύμνης). Ως υπερκατασκευή λαμβάνεται η προέκταση της μεταλλικής κατασκευής από το κατάστρωμα εξάλων έως το κύριο κατάστρωμα (26.5 [m]). Συνεπώς υπολογίζεται ότι:

- Ύψος υπερκατασκευής : $h = 5.5 [m]$
- Κανονικό ύψος υπερκατασκευής σύμφωνα με κανονισμούς:

$$h_s = 2.3 [m]$$

- Μήκος υπερκατασκευής : $l_{ss} = 270.943 [m]$ σε ύψος 2.3 άνωθεν του καταστρώματος εξάλων. (Κανονισμός 34 / 3.b)
- Πλάτος υπερκατασκευής : $b = B = 45.2 [m]$
- Ενεργό μήκος υπερκατασκευής : $l_E = l_{ss} * \frac{b}{B_s} = 270.943$ για $h_s > h$
- Ποσοστό έκπτωσης από τον πίνακα 37.1 : $P = 96.9\%$

$$YE7 = -1070 * P = -1028.6 [mm]$$

- Διόρθωση για σιμότητα: Το υπό μελέτη πλοίο, δεν διαθέτει σιμότητα. Για το λόγο αυτό θα πραγματοποιηθεί διόρθωση λόγω διαφοράς από την «κανονική» σιμότητα.

$$YE8 = (M_N - M_S) * \left(0.75 - \frac{l_{ss}}{2L}\right) = 343.1 [mm]$$

Ύψος εξάλων θέρους (Summer Freeboard):

$$FB_{summer} = YE1 * YE5 + YE6 + YE7 + YE8 = 3389.4 [mm]$$

Μέγιστο έμφορτο βύθισμα:

$$T_{ILLC} = D_F - FB_{summer} = 17.626 [m]$$

Ελάχιστο ύψος πλώρας: $F_b = 6142.4 [mm]$

Πραγματικό ύψος πλώρας: $F_{b-REAL} = 8874 [mm]$ (για βύθισμα κατά ILLC)

Ύψος εξάλων στην τροπική ζώνη: $FB_{Tropical} = 3023 [mm]$

Ύψος εξάλων Χειμώνα: $FB_{winter} = 3757 [mm]$

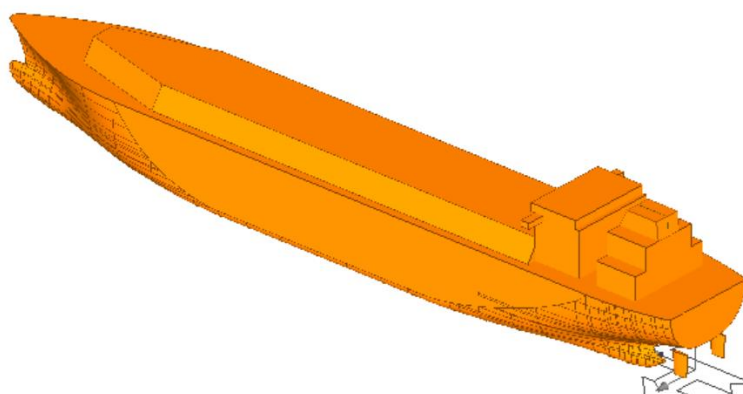
Ύψος εξάλων σε γλυκό νερό: $FB_{fw} = 2996 [mm]$

11. Διαμερισματοποίηση

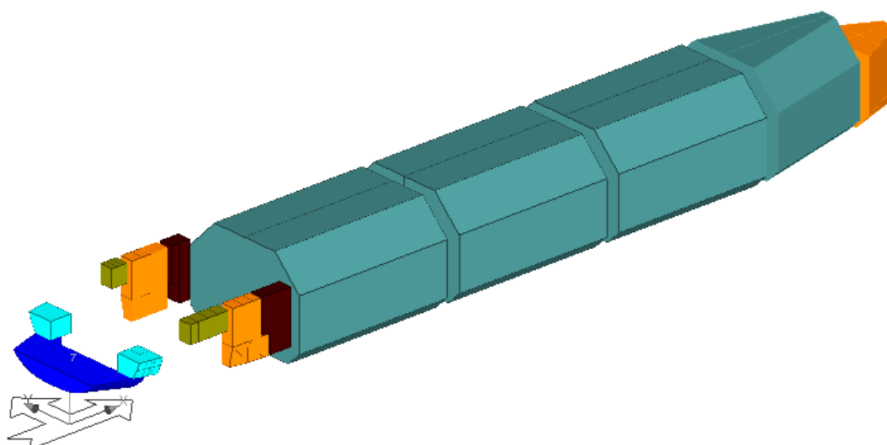
Με την ολοκλήρωση της εξομάλυνσης των γραμμών της γάστρας, θα πραγματοποιηθεί η διαμερισματοποίηση του πλοίου, προκειμένου να καθοριστούν οι τελικοί διαθέσιμοι χώροι του υπό-σχεδίαση πλοίου. Συνεπώς θα προκύψουν οι χωρητικότητες και τα κέντρα βάρους των δεξαμενών φορτίου, δεξαμενών θαλάσσιου έρματος, δεξαμενών καυσίμου και λιπαντικών. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα AVEVA Surface & Compartment® του σχεδιαστικού πακέτου AVEVA Marine®. Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Εισαγωγή γάστρας πλοίου.
- Δημιουργία παρελκομένων και υπερκατασκευών.
- Καθορισμός κατασκευαστικών νομέων (transverse).
- Καθορισμός καταστρωμάτων (decks).
- Καθορισμός διαμήκων φρακτών.
- Δημιουργία χώρων δεξαμενών βάση των απαιτήσεων χωρητικότητας, κανονισμών και απαιτήσεων σχεδίασης.

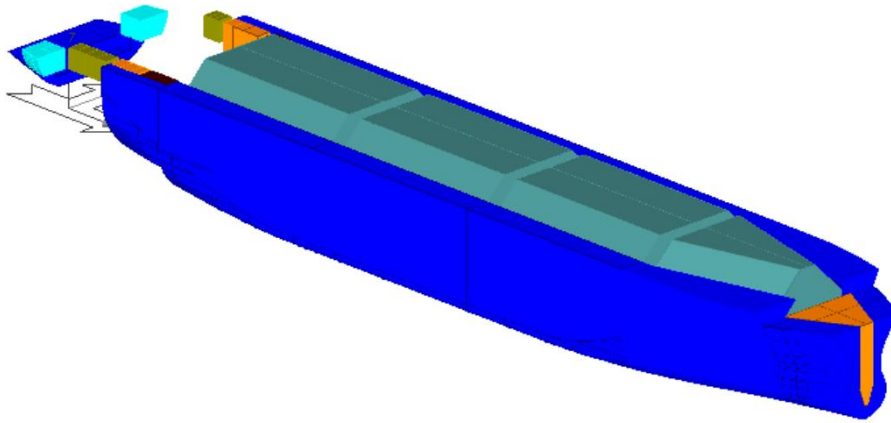
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η τελική διαμερισματοποίηση:



Εικόνα 51 - Εξωτερική μορφή πλοίου



Εικόνα 52 - Εσωτερική διαμερισματοποίηση



Εικόνα 53 - Εσωτερική διαμερισματοποίηση

12. Καταστάσεις φόρτωσης

Με την ολοκλήρωση της διαμερισματοποίησης των χώρων του πλοίου, θα πραγματοποιηθούν φορτώσεις προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του πλοίου στις φορτώσεις, δηλαδή να βρεθεί το βύθισμα πλευσης, η διαγωγή, η κατανομή των καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων και η ικανοποίηση των απαιτήσεων ευστάθειας. Για τους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί το υπολογιστικό πρόγραμμα AVEVA Hydrostatics & Hydrodynamics® του σχεδιαστικού πακέτου AVEVA Marine®.

Οι καταστάσεις φόρτωσης που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Lightship
- Full Load Departure (LNG=0.430 [t/m³])
- Full Load Departure (LNG=0.460 [t/m³])
- Full Load Departure (LNG=0.500 [t/m³])
- Scantling Load Departure (LNG=0.500 [t/m³])
- Full Load Arrival (LNG=0.460 [t/m³])
- Ballast Load Departure
- Ballast Load Arrival

Σημείωση: Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζεται η κατάσταση σχεδίασης “Full Load Departure (LNG=0.460 [t/m³])” αναλυτικά, ένας συγκεντρωτικός πίνακας των καταστάσεων φόρτωσης και οι λοιπές παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ε.

Ακολουθεί η ανάλυση των στοιχείων στις καταστάσεις φόρτωσης:

Στην κατάσταση αναχώρησης, τα αναλώσιμα φορτώνονται στο μέγιστο δυνατό. Οι δεξαμενές που εμπεριέχουν πετρελαιοειδή δεν επιτρέπεται να πληρωθούν παραπάνω από το 98% της μέγιστης χωρητικότητας τους για λόγους ασφάλειας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των φορτίων / αναλωσίμων.

Πίνακας 28 – Στοιχεία φορτίου / αναλωσίμων

Στοιχεία φορτίου / αναλωσίμων		
-	Πυκνότητα [t/m ³]	Μέγιστη πλήρωση [%]
Γλυκό νερό (FW)	1.000	100
Δεξαμενές θαλασσίου έρματος (WB)	1.025	100
ΥΦΑ (LNG) – Ελαφρύ	0.430	98.5
ΥΦΑ (LNG) – Μεσαίο	0.460	98.5
ΥΦΑ (LNG) – Βαρύ	0.500	98.5
Λιπαντικό (LO)	0.900	98
Καύσιμο ηλεκτρ/ων(LSMDO)	0.850	98
Καύσιμο κύριων μηχανών (LSHFO)	0.980	98

Περαιτέρω, στην κατάσταση αναχώρησης, θα θεωρηθεί ότι το βάρος καυσίμου (LSHFO & LSMDO) δεν έχει πληρωθεί στο 98%, αλλά στο 50% (πέρα της Scantling Departure). Η

διαφορά αυτή υπάρχει διότι ως γνωστό, ένα μέρος του φορτίου εξατμίζεται από τις δεξαμενές και απομακρύνεται από αυτές. Το ποσό που απομακρύνεται χρησιμοποιείται ως καύσιμο στις κύριες μηχανές και τις ηλεκτρογεννήτριες. Συνεπώς η κατανάλωση καυσίμου LSHFO & LSMDO θα είναι πολύ μικρή, εφόσον η μόνη κατανάλωση που θα υπάρχει σε κανονική λειτουργία θα είναι το πιλοτικό καύσιμο (pilot fuel), το οποίο βοηθά στην ανάφλεξη του αερίου μέσα στο κύλινδρο καύσης. Συνεπώς, οι δεξαμενές θα πληρωθούν στο 50%, προκειμένου να υπάρχει εφεδρεία καυσίμου και σε περίπτωση βλάβης στο σύστημα καυσίμου του αερίου, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα καυσίμου LSHFO & LSMDO.

Σημειώνεται ότι η πλήρωση των δεξαμενών φορτίου στην κατάσταση αναχώρησης γίνεται μέχρι το 98.5%. Σύμφωνα με το κανονισμό IGC, οι δεξαμενές δεν θα πρέπει να πληρωθούν παραπάνω του 98%, εκτός αν πραγματοποιηθεί μελέτη και δοθεί άδεια⁴ να πληρώνονται μέχρι το 98.5%. Σε αυτό το σύστημα αποθήκευσης ΥΦΑ (μεμβρανικού τύπου), η απαίτηση ικανοποιείται σχεδόν σε όλα τα πλοία, με αποτέλεσμα στα πλαίσια της διπλωματικής να θεωρηθεί ότι στη κατάσταση αναχώρησης θα πληρωθούν οι δεξαμενές μέχρι το 98.5%.

Για την κατάσταση άφιξης, τα αναλώσιμα θα θεωρηθούν ότι βρίσκονται στο 10% της μέγιστης χωρητικότητας των δεξαμενών. Για τις δεξαμενές φορτίου όπως ειπώθηκε προηγουμένως, κάποιο μέρος του φορτίου θα εξατμιστεί και θα απομακρυνθεί από τις δεξαμενές, με αποτέλεσμα στη κατάσταση φόρτωσης να παραμένει λιγότερο φορτίο. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή των δεξαμενών, η απώλεια φυσικού αερίου από τις δεξαμενές για το σύστημα No.96 GW ανέρχεται στο 0.125%. Συνεπώς για μια υποθετική (μέγιστη) διαδρομή 32 ημερών, το βάρος του φορτίου θα είναι ίσο με:

$$Cargo_{arrival} = Cargo_{departure} * (1 - 0.125 * 32) = Cargo_{departure} * 0.96\% \Rightarrow$$

$$Cargo_{arrival} = 79989.5 [t]$$

Για την κατάσταση ερματισμού (Ballast), σε αντίθεση με πλοία άλλου τύπου (πχ bulk carrier), στις δεξαμενές φορτίου παραμένει μικρή ποσότητα φορτίου για πολλούς λόγους. Πρώτον διότι κάποια μικρή ποσότητα (περίπου στο 0.4%) δεν μπορεί να φύγει από τις δεξαμενές καθώς η στάθμη του υγρού είναι πολύ χαμηλή και οι αντλίες δεν μπορούν να τροφοδοτηθούν με υγρό (unpumpable). Δεύτερον, η ποσότητα αυτή δεν επιτρέπει στις δεξαμενές να πλησιάσουν την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (δηλαδή να ζεσταθούν). Τρίτον, σε μία από τις δεξαμενές παραμένει υγρό φορτίο (περίπου 1500 έως 2000 m³) προκειμένου αρχικά να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο (καθώς είναι οικονομικότερο του βαρύ πετρελαίου) και περαιτέρω να χρησιμοποιηθεί για να ψύξει όλο το δίκτυο σωληνώσεων και των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία φόρτωσης του φορτίου έτσι ώστε να μη χαθεί πολύτιμος χρόνος στον τερματικό σταθμό (heel).

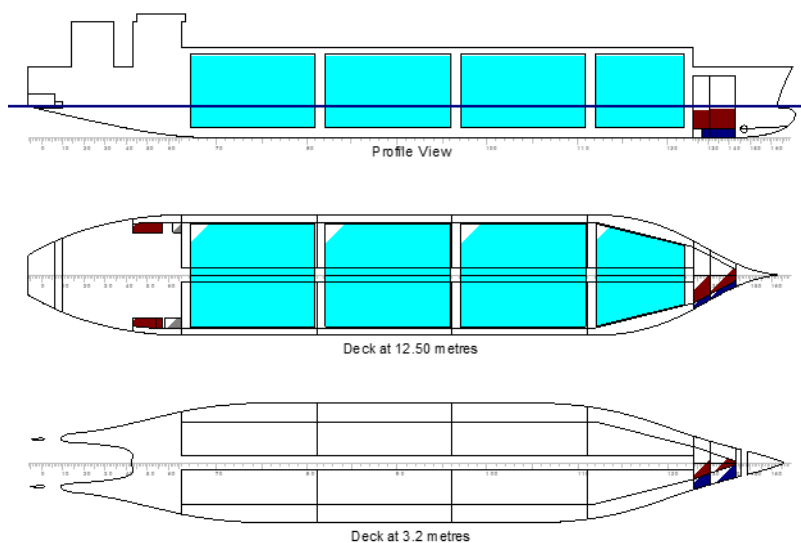
Σε κάθε κατάσταση φόρτωσης πραγματοποιείται έλεγχος ικανοποίησης των κανονισμών ευστάθειας. Σύμφωνα με τον κανονισμό IGC, θα πρέπει τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ να ικανοποιούν τον κανονισμό "International Code on Intact Stability". Έτσι, τα κριτήρια που εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα Hydrostatics & Hydrodynamics είναι αυτά που υπάρχουν στον κώδικα αυτό.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των φορτώσεων:

⁴ Κανονισμός IGC, Chapter 15, "Filling limits for cargo tanks" & 15.4 "Determination of increased filling limit"

Πίνακας 29 - Πίνακας Φορτώσεων

Κατάσταση	Εκτόπισμα [t]	TA	TF	Cargo [t]	WB [t]	FO [t]	DO [t]	LO [t]	FW [t]	DWT const [t]
Lightship	34968.7	6.395	1.232	-	-	-	-	-	-	-
FLD (0.43)	111233.3	11.186	11.178	69774.4	1996.0	2529.8	330.2	267.1	451.2	916.1
FLD (0.46)	115487.1	11.576	11.561	74642.4	1381.8	2529.8	330.2	267.1	451.2	916.1
FLA (0.46)	109255.6	11.024	10.975	71656.7	1074.7	501.2	66.0	27.3	45.2	916.1
FLD (0.50)	121167.0	12.080	12.086	81133.0	571.1	2529.8	330.2	267.1	451.2	916.1
SLD (0.50)	125146.5	12.336	12.561	81133.0	1853.4	4910	647.0	267.1	451.2	916.1
BLD	96671.1	10.024	9.637	860.0	56348.3	2529.8	330.2	267.1	451.2	916.1
DLA	97867.8	10.428	9.425	303.2	61040.6	501.2	66.0	27.3	45.2	916.1

Full Load Departure (LNG=0.460 [t/m³])

Πίνακας 30 - Ανάλυση βαρών

Title	Frames	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	98.5	0.46	11355.6	224.473	0.002	16.57	5246.3
No.2 Cargo Tank	97-111	98.5	0.46	21095.6	181.95	0.005	16.771	21432.5
No.3 Cargo Tank	82-96	98.5	0.46	21095.6	130.85	0.005	16.771	21432.5
No.4 Cargo Tank	67-81	98.5	0.46	21095.6	79.75	0.005	16.771	21432.5
Total Cargo				74642.4	145.093	0.004	16.74	69543.8
<i>WB</i>								
Fore No.1 WB	131-143	45	1.025	837.4	257.374	0.009	4.787	1413
Fore No.2 WB	123-131	45	1.025	544.4	249.534	0.025	4.566	2672.4
Total WB				1381.8	254.285	0.015	4.7	4085.4
<i>FW</i>								
FW_DW	10-14	100	1	62.7	9.6	14	18.85	0
FW (P)	6-14	100	1	225.6	8.1	-15.633	18.969	0
FW (S)	6-14	100	1	162.9	7.522	16.263	19.015	0
Total FW				451.2	8.1	0.001	18.969	0
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	35	0.98	578.2	256.493	0.007	7.674	816.6

No.2 HFO Tank	123-131	35	0.98	744.2	249.175	0.019	7.452	3006.1
HFO Tank (P)	43-57	98	0.98	406.9	41.471	-17.909	16.945	23.3
HFO Tank (S)	43-57	98	0.98	316.1	40.647	17.898	15.682	11.6
HFO Serv (P)	43-47	98	0.98	121.1	36	-17.949	21.349	15.5
HFO Serv (S)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	17.951	21.349	15.5
HFO Set (P)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	-17.949	21.349	15.5
HFO_Set (S)	43-47	98	0.98	121.1	36	17.951	21.349	15.5
Total LSHFO				2529.8	150.88	-0.637	12.718	3919.6
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	50	0.85	40.2	48.4	-17.949	18.925	10.1
MDO Stor (P)	62-66	50	0.85	83.3	51.2	-17.949	14.725	13.4
MDO Serv (S)	55-58	50	0.85	40.2	45.2	17.951	18.925	10.1
MDO Stor (S)	58-66	50	0.85	166.5	49.6	17.951	14.725	26.9
Total LSMDO				330.2	49.322	4.528	15.747	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	98	0.8	25.4	32	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	98	0.8	25.4	30.4	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	98	0.8	25.4	28.8	-17.949	23.848	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	98	0.8	50.9	31.2	17.951	23.848	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	98	0.8	50.9	28	17.951	23.848	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	98	0.8	38.2	22	17.951	23.848	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	98	0.8	50.9	24.8	17.951	23.848	12.7
Total OIL				267.1	27.829	7.694	23.848	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				80518.4	144.556	0.028	16.348	77675.7
Total Displacement				115487.1	136.32	0.02	16.371	77675.7
Buoyancy				115487.2	136.319	0.07	6.048	1670015.7
Total Buoyancy				115487.2	136.319	0.07	6.048	1670015.7

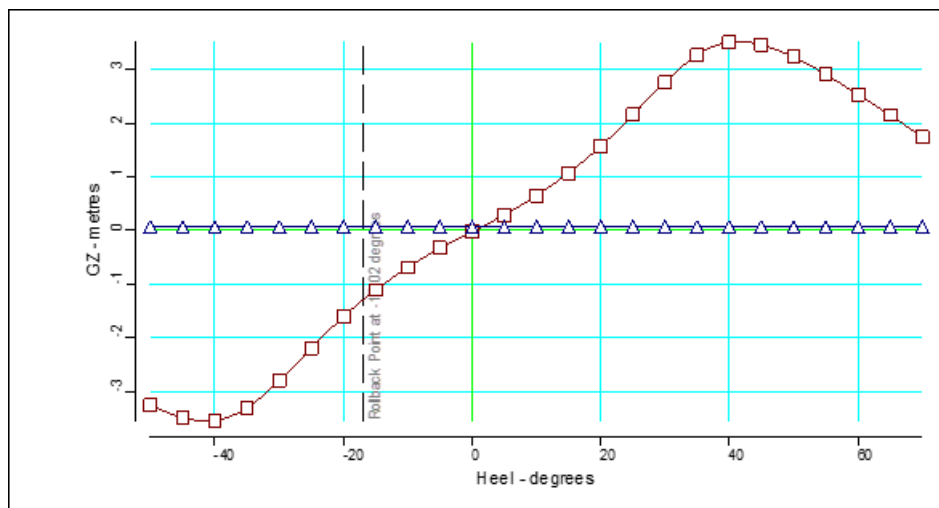
Πίνακας 31 - Βυθίσματα

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	11.569	11.588	metres
Draft aft at marks	11.576	11.595	metres
Draft fwd at marks	11.561	11.580	metres
Draft at AP	11.576	11.595	metres
Draft at FP	11.561	11.580	metres
Mean draft at midships	11.569	11.588	metres

Πίνακας 32 - Υδροστατικά στοιχεία

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.27	degrees
Trim	No trim	
KG	16.371	metres
FSC	0.673	metres
KGf	17.044	metres
GMt	3.463	metres
BMt	14.461	metres
BMI	469.643	metres
Waterplane area	10748.93	sq.metres
LCG	136.32	metres
LCB	136.319	metres
TCB	0.07	metres
LCF	129.255	metres
TCF	0.07	metres
TPC	110.176	tonnes/cm
MTC	1950.294	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	2.826	metres
Actual percentage immersion	134.05	%

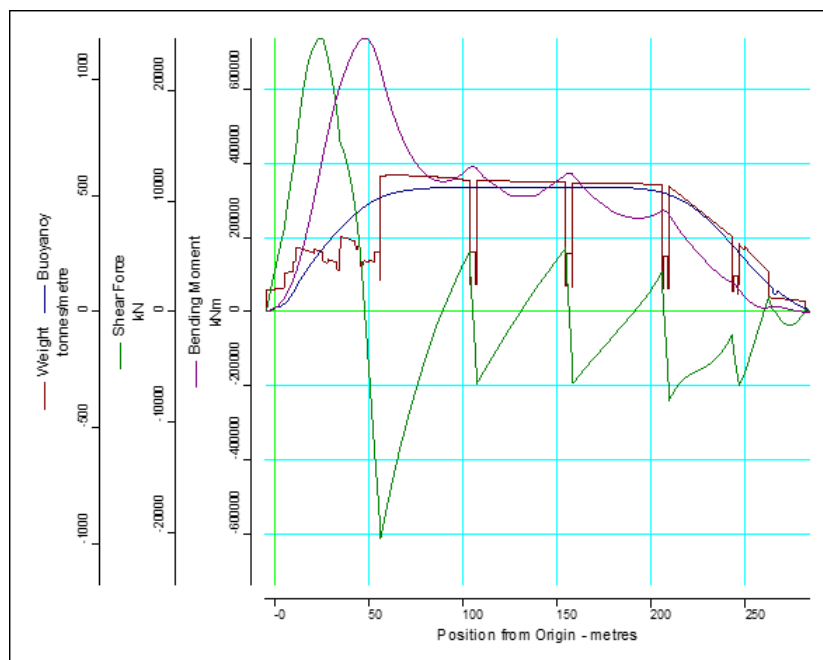


Εικόνα 54 - Καμπύλα μοχλοβραχίονα επαναφοράς

Πίνακας 33 - Έλεγχος άθικτης ευστάθειας

#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.623	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.566	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.189	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	3.463	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	3.536	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	41.197	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	1.086	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	8.523	1

Condition complies with the regulations



Εικόνα 55 - Διάγραμμα κατανομής διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών

Πίνακας 34 - Ανάλυση διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών

Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.62	--	0	0
24.02	--	24758.1	383106.1
47.69	--	0	738279.6
56.13	--	-20511	652487.3

88.85	--	0	351427.7
103.37	--	5366.6	389312.5
105.09	--	0	390535.7
107.23	--	-6509.9	386272.7
130.52	--	0	312990.1
154.47	--	5764.5	371635.8
156.28	--	0	373080.8
158.33	--	-6464.9	369042.8
190.85	--	0	253066.6
205.57	--	3613.3	271428.3
206.65	--	0	272501.5
209.43	--	-8030.2	261227.1
246.66	--	-6636.3	59159.8
259.79	--	0	10483.7
262.2	#143	1302.5	11735.3
265.54	--	0	13085.9
273.27	--	-1237	6560.1
281.27	--	0	-242.7
282	--	212.3	-181.6
<i>Maximum BM</i>			
47.76			738285.2
<i>Maximum SF</i>			
24.02		24758.1	

13. Υπολογισμός αντίστασης

Βασικό χαρακτηριστικό της προκαταρκτικής μελέτης ενός πλοίου είναι ο υπολογισμός της αντίστασης του πλοίου σε ήρεμο νερό. Γνωρίζοντας την αντίσταση, μπορεί να υπολογισθεί η προωστήρια εγκατάσταση και τα χαρακτηριστικά της έλικας. Ο καλύτερος τρόπος για να υπολογιστεί η αντίσταση σε τελικό στάδιο μελέτης, είναι να πραγματοποιηθεί πείραμα αντίστασης σε δεξαμενή. Στην διαδικασία αυτή γίνεται κατασκευή ενός μοντέλου το οποίο αντιπροσωπεύει το πλοίο υπό σχεδίαση σε κλίμακα και τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή. Έπειτα το μοντέλο προσδένεται πάνω σε ειδικά διαμορφωμένη διάταξη (φορείο), το οποίο ρυμουλκεί και καταγράφει τις δυνάμεις που δημιουργούνται μεταξύ του μοντέλου και του φορείου. Έπειτα με συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων από το μοντέλο στο πραγματικό πλοίο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο υπολογισμός της αντίστασης θα περιοριστεί μόνο σε εμπειρικές μεθόδους (Holtrop-Mennen) και στο υπολογιστικό πακέτο Shipflow®, ενώ δε θα πραγματοποιηθούν πειράματα αντίστασης.

Αντίσταση σύμφωνα με Holtrop-Mennen

Ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αντίστασης είναι η ημι-εμπειρική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Holtrop – Menner [32],[33]. Η μέθοδος αυτή δίνει στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης, μια πρώτη εκτίμηση της αντίστασης ρυμούλκησης στην περίπτωση που δεν έχουν προκύψει οι γραμμές του πλοίου ή δεν είναι δυνατή η επίλυση της ροής με υπολογιστικό πακέτο.

Η συνολική αντίσταση υπολογίζεται από:

$$R_{total} = R_F * (1 + k_1) + R_{app} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

Όπου: - R_F : Αντίσταση λόγω τριβής (ITTC).

- R_{app} : Αντίσταση των παρελκομένων και εξαρτημάτων.

- R_W : Αντίσταση λόγω δημιουργίας κυματισμού.

- R_B : Επιπρόσθετη αντίσταση που δημιουργείται λόγω ύπαρξης πρωραίου βολβού.

- R_{TR} : Επιπρόσθετη αντίσταση που δημιουργείται λόγω βύθισης πρυμναίου καθρέπτη

- R_A : Αντίσταση συσχέτισης μοντέλου – πλοίου.

Ο υπολογισμός αντίστασης πραγματοποιείται για το βύθισμα σχεδίασης ($T=11.6$ [m]). Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά :

Πίνακας 35 - Βασικά χαρακτηριστικά

Βασικά χαρακτηριστικά					
Μήκος ισάλου	L_{wl} [m]	282.152	Συντελεστής γάστρας	C_B []	0.773
Πλάτος	B [m]	45.2	Πρισματικός συντελεστής	C_P []	0.778
Βύθισμα	T [m]	11.6	Συντελεστής μέσης τομής	C_M []	0.993
Εκτόπισμα	$Displ$ [t]	115487.2	Συντελεστής ισάλου	C_{wl} []	0.855

Διαμήκης κέντρο πλευστότητας	LCB [m]	136.319	Επιφάνεια παρελκομένων	S_{app} [m ²]	172.8
Βρεχόμενη επιφάνεια	WS [m ²]	16323.3	Επιφάνεια βυθισμένου καθρέπτη	A_{tr} [m ²]	0

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των παραμέτρων της μεθοδολογίας.

Πίνακας 36 - Παράμετροι μεθοδολογίας Holtrop-Mennen

Παράμετροι μεθοδολογίας			
C_1	1.4168	$(1+k_1)$	1.2872
C_{12}	0.4959	$(1+k_2)_{EQ}$	2.8
C_{13}	1.015	C_{STERN}	+5
C_{15}	-1.6939	λ	0.9377
C_{16}	1.1815	m_1	-1.8815
C_2	0.74698	i_E	19
C_3	0.02382	C_{BTO}	0.008
C_4	0.04	C_A	0.000267
C_5	1	P_B	2.0056
C_7	0.16020	m_2	Μεταβαλλόμενη
		F_{ni}	Μεταβαλλόμενη

Με βάση τη μεθοδολογία παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 37 – Αποτελέσματα μεθοδολογίας Holtrop - Mennen

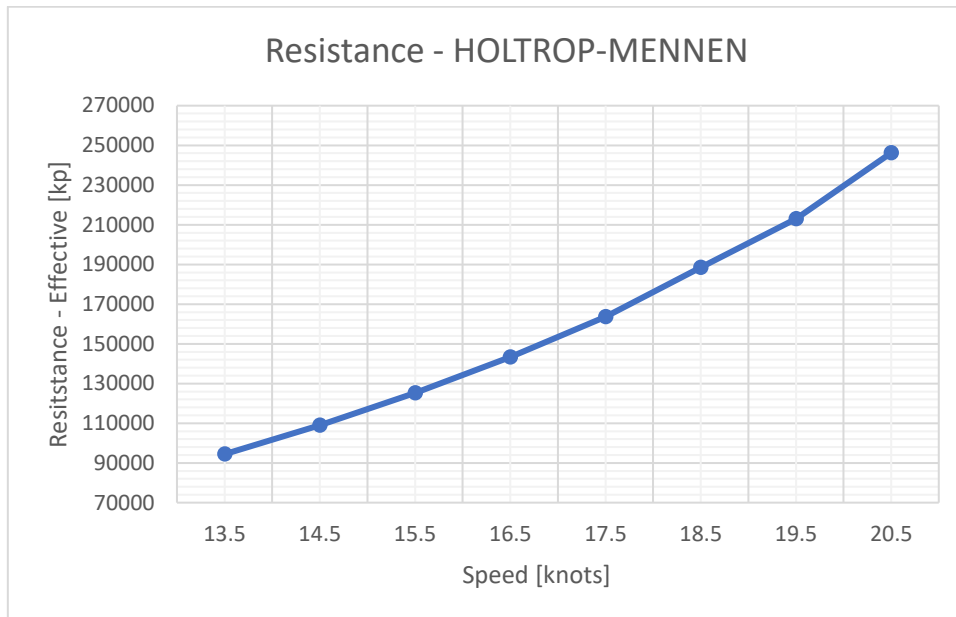
V_s	R_F	R_{BT}	R_{app}	Coef. m_2	R_w	R_{tr}	R_a	F_{ni}	R_B	R_{total}
[knots]	[kp]	[kp]	[kp]	-	[kp]	[kp]	[kp]	-	[kp]	[kp]
13.5	58985.6	214.2	1748.4	-3.30E-03	1079.7	0.0	11008.5	1.073	4437.4	94413.3
14.5	67467.9	247.1	1999.8	-7.08E-03	2236.9	0.0	12699.8	1.138	4958.0	108984.9
15.5	76483.8	282.3	2267.1	-1.32E-02	4254.1	0.0	14511.9	1.200	5467.9	125231.7
16.5	86029.4	319.9	2550.0	-2.20E-02	7384.3	0.0	16444.8	1.259	5964.1	143398.6
17.5	96101.4	359.9	2848.5	-3.37E-02	11832.5	0.0	18498.5	1.316	6444.7	163684.0
18.5	106696.2	402.2	3162.6	-4.82E-02	19939.4	0.0	20673.0	1.370	6908.2	188422.7
19.5	117810.8	446.9	3492.0	-6.55E-02	27169.2	0.0	22968.4	1.422	7353.8	213074.1
20.5	129442.4	493.9	3836.8	-8.51E-02	42111.8	0.0	25384.5	1.472	7781.1	246223.8

Πίνακας 38 – Αποτελέσματα μεθοδολογίας Holtrop - Mennen

V_s	V_s	Froude	Reynolds	C_f -ITTC	C_w	C_T	R_{total}	EHP	EHP
[knots]	[m/s]	-	-	[*10 ³]	[*10 ³]	[*10 ³]	[kp]	[PS]	[kW]
13.5	6.944	0.132	1.72E+09	1.433	0.026	2.064	94413.3	8741.9	6429.7
14.5	7.459	0.142	1.85E+09	1.420	0.047	2.065	108984.9	10838.6	7971.8
15.5	7.973	0.152	1.98E+09	1.409	0.078	2.076	125231.7	13313.3	9791.9
16.5	8.488	0.161	2.10E+09	1.399	0.120	2.098	143398.6	16228.1	11935.8
17.5	9.002	0.171	2.23E+09	1.389	0.171	2.129	163684.0	19646.4	14449.9
18.5	9.516	0.181	2.36E+09	1.380	0.258	2.193	188422.7	23908.1	17584.4
19.5	10.031	0.191	2.48E+09	1.371	0.316	2.232	213074.1	28497.4	20959.8
20.5	10.545	0.200	2.61E+09	1.363	0.444	2.334	246223.8	34619.7	25462.8

Όπου: - R_{BT} : Επιπλέον αντίσταση για ύπαρξη πρωραίου μηχανισμού πηδαλιουχίας (Bow-thruster)

- F_{ni} : Αριθμός Froude, σύμφωνα με τη βύθιση



Εικόνα 56 - Αντίσταση σύμφωνα με τη μέθοδο των Holtrop-Mennen

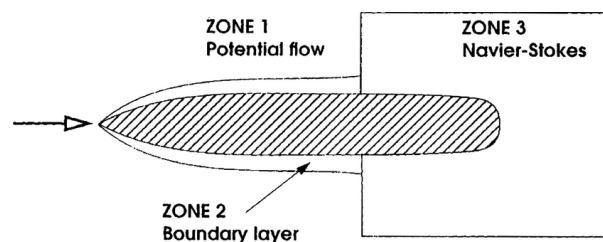
Αντίσταση σύμφωνα με το SHIPFLOW®

Πέρα από την εμπειρική μέθοδο των Holtrop-Mennen, θα πραγματοποιηθούν υπολογισμοί αντίστασης μέσω του Shipflow® για την περαιτέρω εξακρίβωση της αντίστασης. Στο πρόγραμμα αυτό γίνεται εισαγωγή της επιφάνειας της γάστρας του υπό-σχεδίαση πλοίου και υπολογίζεται η ροή γύρω από το πλοίο με επαναληπτική διαδικασία.

Ο υπολογισμός της αντίστασης θα προκύψει από την εξίσωση:

$$C_T = C_F * (1 + k) + C_W$$

Το υπο-πρόγραμμα XPAN του Shipflow® θα υπολογίσει με επίλυση των εξισώσεων για ιδανική ροή (potential flow) τον συντελεστή C_w , το υπο-πρόγραμμα XCHAP του Shipflow® θα υπολογίσει με επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes μέσω αλγορίθμου RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) το συντελεστή μορφής “κ” και τέλος ο συντελεστής C_F θα υπολογιστεί σύμφωνα με την ITTC. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την επίλυση των εξισώσεων RANS είναι η “ZONAL”, στην οποία για να αποφευχθούν οι μεγάλοι χρόνοι επίλυσης και η απαίτηση για μεγάλη υπολογιστική ισχύ, η ροή γύρω από το πλοίο χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές ζώνες (εικόνα 57).



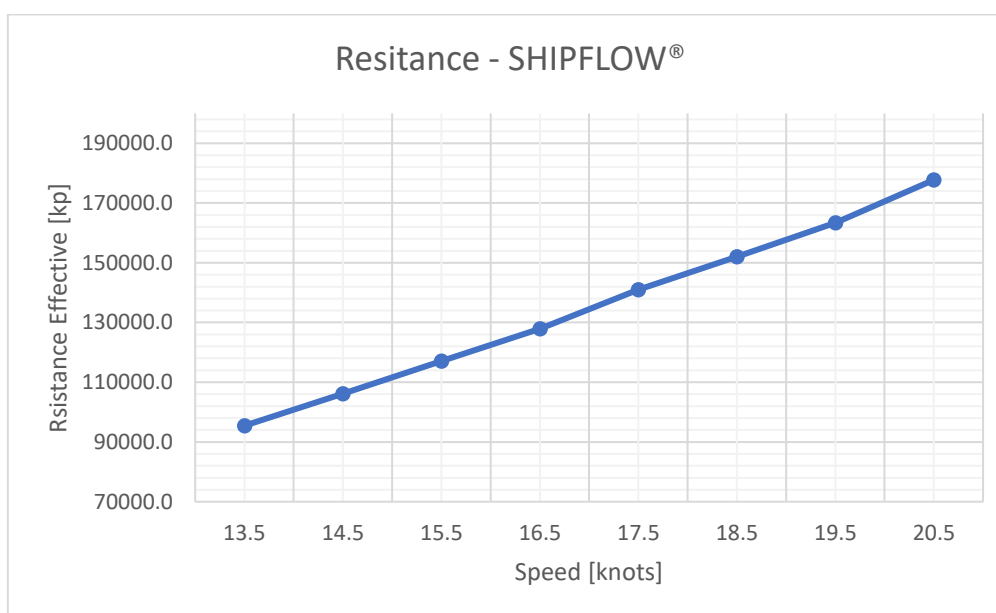
Εικόνα 57 - ZONAL approach

Η πρώτη ζώνη υπολογίζεται με επίλυση των εξισώσεων για ιδανική ροή (potential flow equations) και αφορά το πρωραίο τμήμα του πλοίου έξω από το οριακό στρώμα που δημιουργείται. Στη δεύτερη ζώνη χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις για την ορμή στο οριακό στρώμα (momentum boundary integral equation). Η τρίτη περιοχή αφορά το πρυμναίο τμήμα στο οποίο γίνεται επίλυση της ροής με ιξώδες με την βοήθεια των εξισώσεων Navier-Stokes. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Z παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα Shipflow® όπως για παράδειγμα μοντέλο τύρβης, αριθμός κελιών, αδιάστατη απόσταση Y^+ , κλπ.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πλοίου:

Πίνακας 39 - Αποτελέσματα από το Shipflow®

Vs	Vs	k	CF - ITTC	RF	Cw	Rw	CT	Rtotal	EHP	EHP
[kn]	[m/s]	-	[10 ³]	[kp]	[10 ³]	[kp]	[10 ³]	[kp]	[PS]	[kW]
13.5	6.944	0.212	1.433	58985.6	0.582	23963.8	2.318	95454.4	17181.8	6500.6
14.5	7.459	0.213	1.420	67467.9	0.512	24320.4	2.235	106159.0	20524.1	7765.1
15.5	7.973	0.213	1.409	76483.8	0.447	24262.5	2.156	117037.3	24187.7	9151.2
16.5	8.488	0.214	1.399	86029.4	0.381	23434.6	2.079	127874.4	28132.4	10643.6
17.5	9.002	0.219	1.389	96101.4	0.344	23801.2	2.037	140948.8	32888.0	12442.9
18.5	9.516	0.220	1.380	106696.2	0.282	21805.1	1.965	151974.4	37487.0	14182.9
19.5	10.031	0.221	1.371	117810.8	0.228	19587.0	1.902	163434.1	42492.9	16076.8
20.5	10.545	0.222	1.363	129442.4	0.206	19558.7	1.872	177737.3	48581.5	18380.4



Εικόνα 58 - Αντίσταση σύμφωνα με το SHIPFLOW

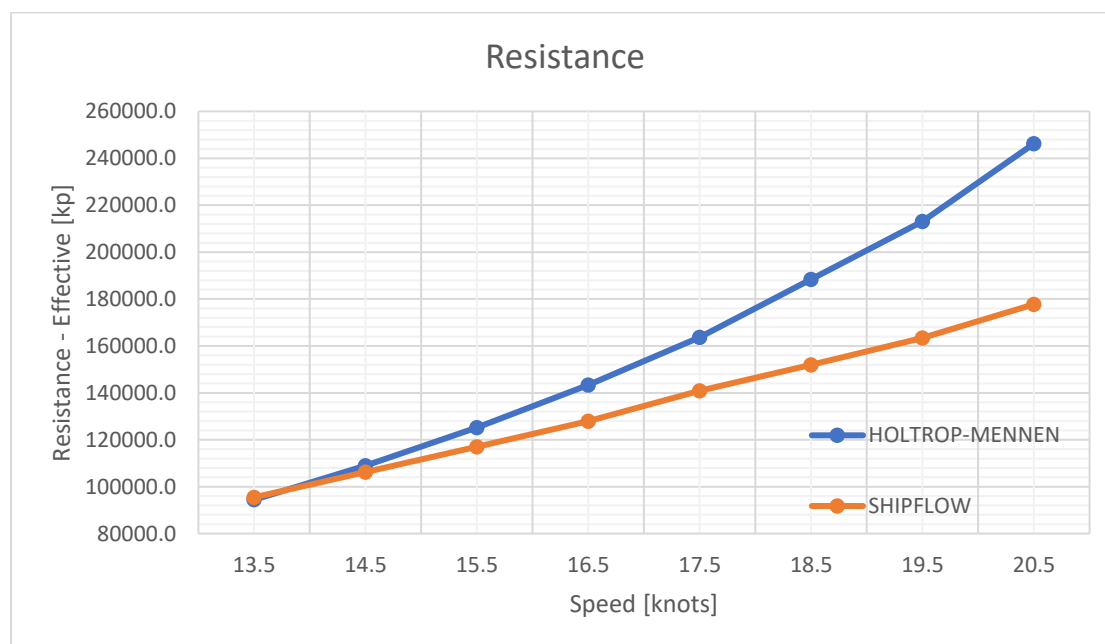
Σημειώνεται ότι στο παράρτημα Z παρουσιάζονται αποτελέσματα από το Shipflow®.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο παρακάτω πίνακα και γράφημα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων.

Πίνακας 40 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Vs	Vs	Rtotal	Rtotal	EHP	EHP
		Holtrop	Shipflow®	Holtrop	Shipflow®
[kn]	[m/s]	[kp]	[kp]	[kW]	[kW]
13.5	6.944	94413.3	58985.6	6429.7	6500.6
14.5	7.459	108984.9	67467.9	7971.8	7765.1
15.5	7.973	125231.7	76483.8	9791.9	9151.2
16.5	8.488	143398.6	86029.4	11935.8	10643.6
17.5	9.002	163684.0	96101.4	14449.9	12442.9
18.5	9.516	188422.7	106696.2	17584.4	14182.9
19.5	10.031	213074.1	117810.8	20959.8	16076.8
20.5	10.545	246223.8	129442.4	25462.8	18380.4



Εικόνα 59 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Από το διάγραμμα είναι αντιληπτό ότι οι δύο διαφορετικές μέθοδοι έχουν σημαντική διαφορά και πιο συγκεκριμένα, για τη ταχύτητα σχεδίασης η Holtrop-Mennen υπερεκτιμά την αντίσταση ρυμούλκησης κατά 30%. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η μέθοδος των Holtrop-Mennen είναι ημι-εμπειρική, με αποτέλεσμα παρόλο που λαμβάνει πολλά στοιχεία για τον υπολογισμό της, να μη μπορεί να προβλέψει σε επαρκή ακρίβεια την αντίσταση. Λόγω της σημαντικής διαφοράς, τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας Holtrop-Mennen θα απορριφθούν και δεν θα χρησιμοποιηθούν. Έτσι η αντίσταση ρυμούλκησης θα ληφθεί εξολοκλήρου από το υπολογιστικό πρόγραμμα Shipflow®.

14. Πρόωση πλοίου

Στο εδάφιο αυτό θα μελετηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της πρόωσης. Η μελέτη θα περιοριστεί στην εύρεση της βέλτιστης έλικας σύμφωνα με τις απαιτήσεις της γάστρας για την ταχύτητα σχεδίασης του υπό-σχεδίαση πλοίου. Θα πραγματοποιηθεί μια επαναληπτική διαδικασία μεταβολής των κύριων παραμέτρων της έλικας, όπως ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας, λόγος βήματος – διαμέτρου και στροφών προκειμένου να βρεθεί η έλικα με το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και ταυτόχρονα η έκταση της σπηλαίωσης να είναι μειωμένη.

Βασικά χαρακτηριστικά έλικας

Ο τύπος της έλικας θα είναι της σειράς Wageningen – B (Troost Series).

Ο αριθμός των ελίκων είναι δύο και αριθμός πτερυγίων θα είναι ίσος με $Z=4$.

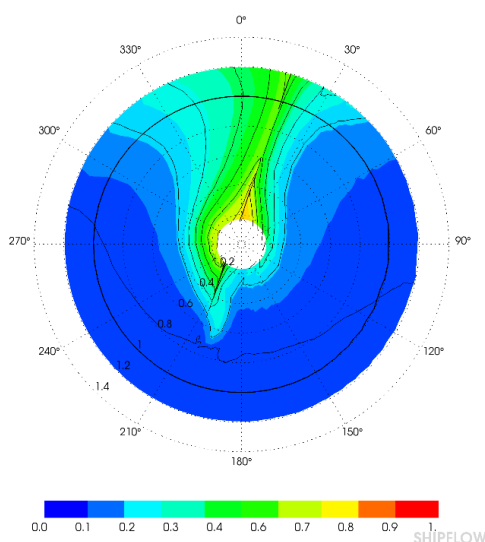
Διάμετρος της έλικας είναι 8.2 [m].

Λόγω ύπαρξης δύο ελίκων, η φορά περιστροφής των ελίκων λαμβάνουν σημαντικό ρόλο. Σύμφωνα με τις πηγές [19], [20], η κίνηση των ελίκων προς το διάμηκες επίπεδο (inward turning) οδηγούν σε βελτιωμένο βαθμό πρόωσης.

Ποσοστό ομόρου (w)

Το ποσοστό ομόρου ορίζεται ως: $w = 1 - \frac{V_{prop}}{V_{ship}}$, όπου V_{prop} η μέση ταχύτητα που δέχεται η έλικα (χωρίς να ληφθεί υπόψη η ροή που η ίδια δημιουργεί) και V_{ship} η ταχύτητα του πλοίου.

Από την ανάλυση της ροής γύρω από το πλοίο με την επίλυση των εξισώσεων RANS στο Shipflow®, μπορεί να υπολογισθεί το ποσοστό ομόρου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή του μέτρου της ταχύτητας στο νοητό δίσκο της έλικας.



Εικόνα 60 - Κατανομή ταχύτητας στο νοητό δίσκο της έλικας (αριστερή πλευρά)

Από τα αποτελέσματα του Shipflow® λαμβάνεται ότι το ποσοστό ομόρου είναι ίσο με:

$$w = 0.1970$$

Περαιτέρω, αξίζει να γίνει σύγκριση του υπολογισμένου ποσοστού ομόρου από το Shipflow® με τα αποτελέσματα εμπειρικών εξισώσεων:

- $w = 0.81 * C_B - 0.34$ (*Kruger 1976 for cargo ships – twin screw*)
=> $w = 0.2861$
- $w = 0.7 * C_P - 0.3$ (*Heckscher for cargo ships – twin screw*)
=> $w = 0.2446$
- $w = 0.55 * C_B - 0.2$ (*Taylor for cargo ships – twin screw*)
=> $w = 0.2252$
- $w = [0.71 - 2.39 * C_B + 2.33 * C_B^2] + [0.12 * C_B^4 * (6.5 - \frac{L}{B})]$ (*Harvald for cargo ships – twin screw, C_B range 0.525 – 0.675, L/B range 6.5 – 7.5*)⁵
=> $w = 0.2687$
- $w = 0.3095 * C_B + 10 * C_V * C_B - 0.23 * \frac{D}{\sqrt{B*T}}$ (*Holtrop – Mennen for cargo ships – twin screw*)
=> $w = 0.1726$
Όπου ο συντελεστής C_V έχει προκύψει από τη μέθοδο των Holtrop-Mennen σύμφωνα με την εξίσωση $C_V = (1+k_1) * C_F + C_A$.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, η εξίσωση του Taylor και των Holtrop-Mennen έχουν τα πιο κοντινά αποτελέσματα με το υπολογισθέν από το Shipflow®.

Ποσοστό μείωσης ώσης (t):

Το ποσοστό μείωσης ώσης ορίζεται ως $t = 1 - \frac{R_0}{T}$, όπου T είναι η απαιτούμενη ώση της έλικας και R_0 η αντίσταση ρυμούλκησης του πλοίου.

Θα υπολογιστεί σύμφωνα με τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις:

- $t = 0.5 * C_P - 0.18$ (*Heckscher for cargo ships*)
=> $t = 0.2090$
- $t = 0.52 * C_B - 0.18$ (*Danckwardt for cargo ships*)
=> $t = 0.2220$
- $t = 0.325 * C_B - 0.1885 * \frac{D}{\sqrt{B*T}}$ => $t = 0.1829$ (*Holtrop – Menner 1978*)
- $t = w * (1.67 - 2.3 * \frac{C_B}{C_{wp}} + 1.5 * C_B)$ (*SSPA for cargo ships*)
=> $t = 0.1922$

Συνεπώς με μέσο όρο των αποτελεσμάτων υπολογίζεται ότι:

$$t = 0.2015$$

⁵ Η εξίσωση έχει προκύψει από την βιβλιογραφία [18] βασισμένο στα στοιχεία διαγράμματος του Harvald. Στο πλοίο υπο-σχεδίαση ο συντελεστής γάστρας είναι εκτός των προτεινόμενων ορίων.

Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R

Ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής υπολογίζεται από τη σχέση $\eta_R = \frac{Q_0}{Q}$, όπου Q_0 είναι η απαιτούμενη ροπή της έλικας σε ελεύθερη ροή και Q η απαιτούμενη ροπή της έλικας όταν βρίσκεται σε λειτουργία στο πλοίο. Θα υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$\eta_R = 0.9737 + 0.111 * (C_P - 0.0225 * lcb) - 0.06325 * \frac{P}{D} \quad (\text{Holtrop} - \text{Mennen} 1978)$$

$$\Rightarrow \eta_R = 1.0073$$

Να σημειωθεί ότι προέκυψε από επαναληπτική διαδικασία της μελέτης πρόωσης για το λόγο βήματος – διαμέτρου (P/D).

Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας

Πρώτη εκτίμηση για τον λόγο εκτεταμένης επιφάνειας θα προκύψει από την εμπειρική σχέση του Keller:

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{(1.3 + 0.3 * z) * T}{(p_0 - p_v) * D^2} + k \Rightarrow \frac{A_E}{A_0} = 0.38$$

Όπου:

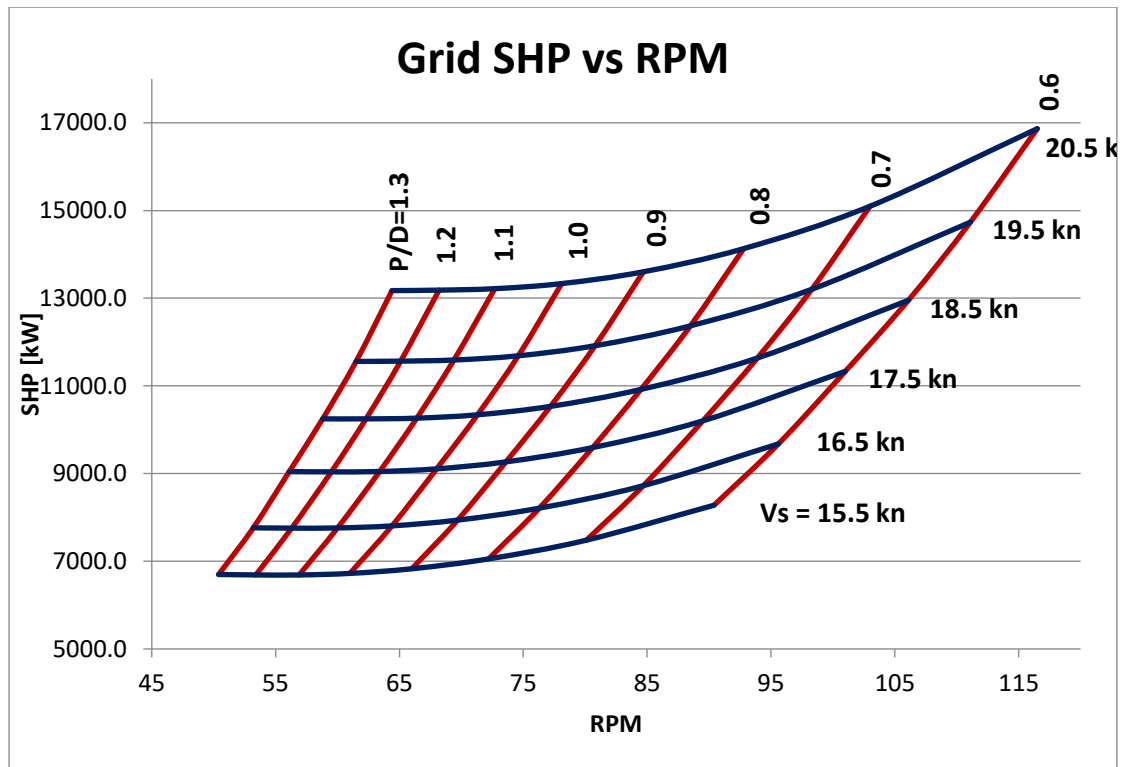
- Z: αριθμός πτερυγίων
- T: ώση κάθε έλικας (αριθμός ελίκων 2) [κρ]
- P_0 : πίεση στο κέντρο του άξονα [κρ/μ²]
- P_v : πίεση βρασμού [κρ/μ²]
- $k=0.1$ για διπλέλικα πλοία.
- D: Διάμετρος έλικας

Από την τυποποίηση της σειράς Wageningen-B, γίνεται τυποποίηση σε $\frac{A_E}{A_0} = 0.4$.

Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία ελέγχου της σπηλαίωσης, επιλέχθηκε η εκτεταμένη επιφάνεια να αυξηθεί σε σχέση με αυτή που προτείνει ο τύπος του Lap Keller. Έτσι, η έλικα που θα σχεδιαστεί θα έχει λόγο εκτεταμένης επιφάνειας ίσο με $\frac{A_E}{A_0} = 0.55$, για να μειωθεί το ποσοστό σπηλαίωσης.

Βέλτιστος λόγος βήματος διαμέτρου (P/D)

Για να βρεθεί ο βέλτιστος λόγος βήματος διαμέτρου για το υπό-σχεδίαση πλοίο, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα GRID, του κ. Πολίτη που διατίθεται μέσα στο βιβλίο [3]. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα:



Εικόνα 61 - Διάγραμμα απαιτούμενης ισχύς (στον άξονα) - στροφών

Συνεπώς για την ταχύτητα των 19.5 κόμβων, θα επιλεγθούν τα εξής:

- $P/D=1.1$
- $A_E/A_0=0.55$
- $N=69.4$ [rpm]
- $SHP=11590$ [kW]
- $N_{MCR}=71.6$ [rpm]
- $MCR=13640$ [kW]

Πριν τη τελική επιλογή της έλικας, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος σπηλαίωσης.

Πίνακας 41 - Παράμετροι υπολογισμών σπηλαίωσης

Απόλυτη ταχύτητα στα $0.7 \cdot R$	$V_{0.7R}$ [m/s]	23.144
Αριθμός σπηλαίωσης	$\sigma_{0.7R}$ []	0.5310
Συντελεστής	t_c []	0.1543
Μέγιστη συνιστάμενη τιμή από διάγραμμα Burrill (1953)	t_{max} []	0.1950

Συνεπώς από το διάγραμμα του Burrill, προκύπτει ότι το ποσοστό σπηλαίωσης είναι κοντά στο 2%, το οποίο είναι αποδεκτό.

Στο παράρτημα Η, παρουσιάζεται το σχέδιο της έλικας.

15. Βιβλιογραφία

Βιβλία - Αναφορές

- [1] Απόστολου Δ. Παπανικολάου, “Μελέτη Πλοίου – Μεθοδολογίες Προμελέτης”, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ (2009).
- [2] Απόστολου Δ. Παπανικολάου, “Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου Ι – Συλλογή Βοηθημάτων”, Πανεπιστημιακές εκδόσεις (2009).
- [3] Γεράσιμου Κ. Πολίτη, “Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου”, Πανεπιστημιακές εκδόσεις (2016).
- [4] International Maritime Organization, “IGC Code: International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gases in Bulk”, IMO Publishing (2016).
- [5] “Rules for the Classification of Steel Ships”, Bureau Veritas (2019).
- [6] R.I.N.A., “Design and operation of gas carriers”, International Conference (2004).
- [7] D.Eyres, G.Bruce, “Ship Construction – 7th Edition”, Butterwoth-Heinemann Publ. (2012).
- [8] Group of Authorities, T.Lamb, “Ship Design and Construction”, SNAME (2003).
- [9] S.Mokhatab, J.Mark, J.Valappil, D.Wood, ‘Handbook of Liquefied Natural Gas’, Gulf Professional Publishing (2014).
- [10] M.Tusiani, G.Shearer, “LNG – A nontechnical guide”, PennWell Corp. (2007).
- [11] N.Wijnolst, T.Wergeland, “Shipping Innovation”, IOS Press – Delft university Press (2009).
- [12] “LNG Shipping at 50”, Commemorative SIGTTO/GIIGNL Publication (2014).
- [13] A. Norberg, “MsC Thesis: Interrelationships of LNG cargo containment systems and machinery configurations on LNG carrier - design and operational factors with economic assessment”, NTNU (2012).
- [14] Χ.Γεωργίου, “Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ (2015).
- [15] Γ. Μουκλιώτη, “Η Μεταλλική Κατασκευή των Πλοίων Μεταφοράς Υγροποιημένων Αερίων”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ (2014).
- [16] Π.Σκαβαράς, “Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου – LNG carrier”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ (2014).
- [17] “GIIGNL Annual Report 2018”, GIIGNL (2018).
- [18] A.Molland, S.Turnock, D.Hudson, “Ship Resistance and Propulsion”, Cambridge Publ. (2011).

Επιστημονικά άρθρα – Τεχνικά φυλλάδια

- [19] K.Kim, F.Tillig, N. Bathfield, H.Liljenberg, “Hydrodynamic optimization of twin-skeg LNG ships by CFD and model testing”, SSPA Sweden AB, International Journal Naval Architect Ocean Engineering (2014) 6:392-405 .
- [20] H.Valkhof, E.Minguito, K.Kooiker, “New Promising Generation of Twin-Gondola LNG Carriers Optimized with the Aid of CFD Calculations”, Maritime Research Institute Netherlands (MARIN) (2005).
- [21] China Classification Society, “Guidelines for survey of membrane tanks LNG carriers”, (2007).

- [22] MAN, “Propulsion Trends in LNG Carriers”, MAN Diesel and Turbo (2013)
- [23] J.Tessier, L.Spittaël, “Operating membrane LNG carriers – Partial Loading cases for 160000 cbm vessels and beyond”, Gat Transport & Tecnigaz.
- [24] J.Andreassen, S.Valsgard, “Managing Innovation using the Norman Lady and Hoegh Galleon as Case studies”, Det Norske Veritas (2003).
- [25] O.Iversen, R.Sorensen, “Advances in design and layout of Moss LNG carriers”, Moss Maritime – GasTech (2005).
- [26] S.Hiramatsu, K.Kuwahata, K.Hirota, T.Ishida, H.Tsukamoto, K.Ishibashi, “SAYARINGO STaGE – Next Generation MOSS type LNG carrier with hybrid propulsion plant”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.53 No.2 (2016).
- [27] M.Watanabe, R.Takada, T.Okafuji, H.Tsujii, M.Kashiwagi, Y.Kamitani, “Structural Design and Construction Method for Aple-Shaped Liquefied Natural Gas Cargo Tank for LNG carriers”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.53 No.2 (2016).
- [28] S.Hiramatsu, K.Tsumura, R.Takada, T.Ishida, K.Hiraoka, “The 155k-m³ Sayaendo: A New Generation LNG Carrier with a continuous Integrated Tank Cover”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.49 No.1 (2012).
- [29] Nagasaki Ship & Ocean Engineering Department, Shipbuilding & Ocean Development Division, “New Generation LNG Carrier “SAYAENDO””, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.52 No.1 (2015).
- [30] M.Toyoda, H.Kusumoto, K.Watanabe, “Intrinsically Safe Cryogenic Cargo Containment System of IHI-SPB LNG Tank”, IHI Engineering Review Vol.47, No.2 (2015).
- [31] ABS Presentation at NTUA, ‘LNG & LPG Carriers: Technical & Operational Overview’, (2018).
- [32] J.Holtrop and G. Mennen, “A statistical power prediction method”, International Shipbuilding Progress, 25(290):253–256, (1978).
- [33] J.Holtrop and G. Mennen, “An approximate power prediction method”, International Shipbuilding Progress, 29(335):166–170, (1982).
- [34] H.Kim, D.Lee, “Core Design Issues of Large LNG Carrier”, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., GASTECH (2005).
- [35] Presentation “Oil & Gas Update – LNG Focus”, GTT (2016).

Διαδικτυακές πηγές

- [36] GTT, <https://www.gtt.fr/> , (2019).
- [37] IHI (Ishikawajima H.I), https://www.ihico.jp/offshore/spbmenu_e.htm , (2019).
- [38] LNG New Technologies, <http://www.lngnewtech.com/> , (2019).
- [39] LNG World News, <https://www.lngworldnews.com/> , (2019).
- [40] LNG World Shipping, <https://www.lngworldshipping.com/> , (2019).
- [41] KC-LNG Tech, <http://www.kclng.co.kr/en/> , (2019).

Προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή

[42] AVEVA MARINE® (Lines, Surfaces & Compartments, Hydrostatics & Hydrodynamics)

[43] MARS 2000® (Bureau Veritas)

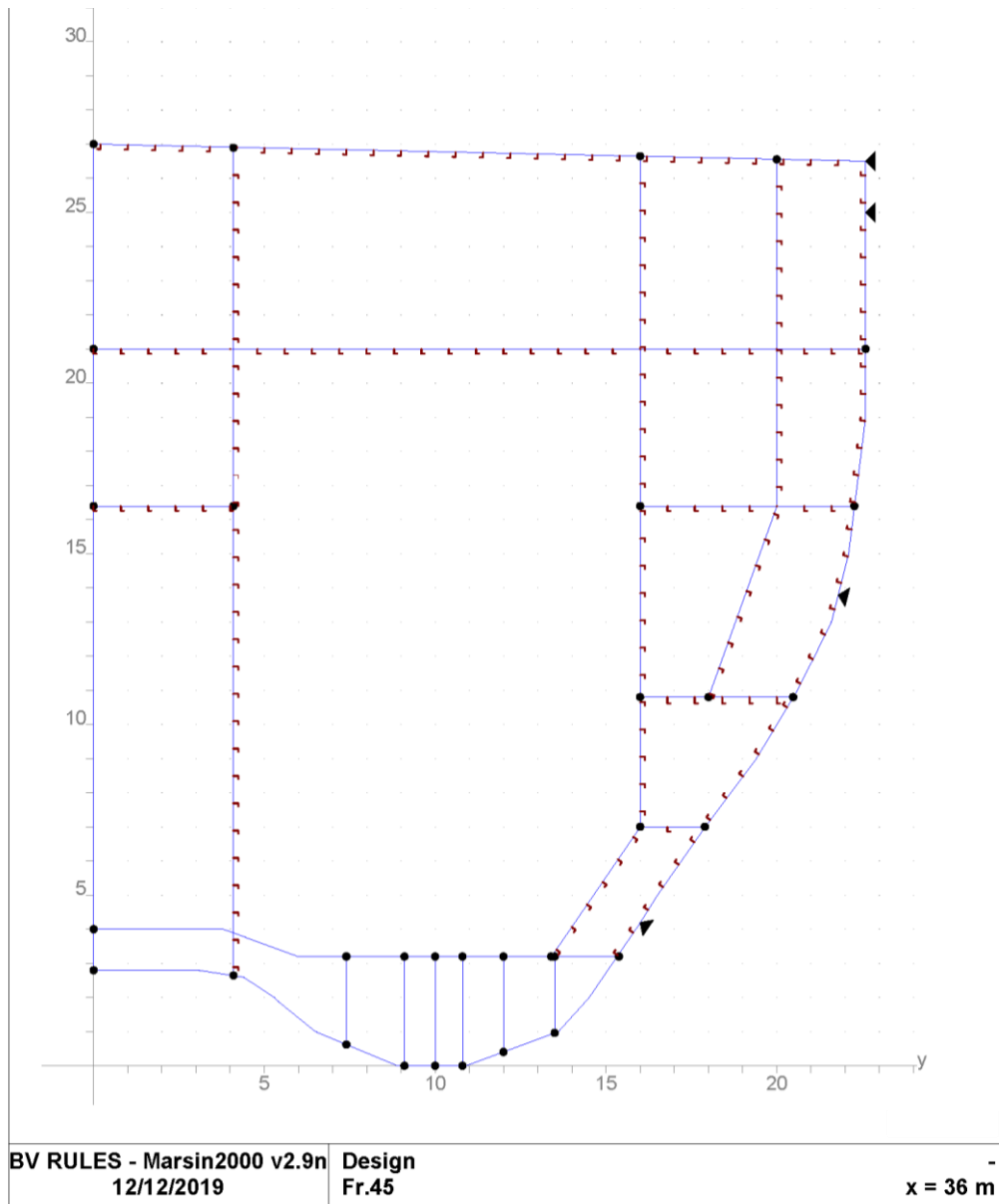
[44] SHIPFLOW® (Flowtech International)

[45] AUTOCAD®

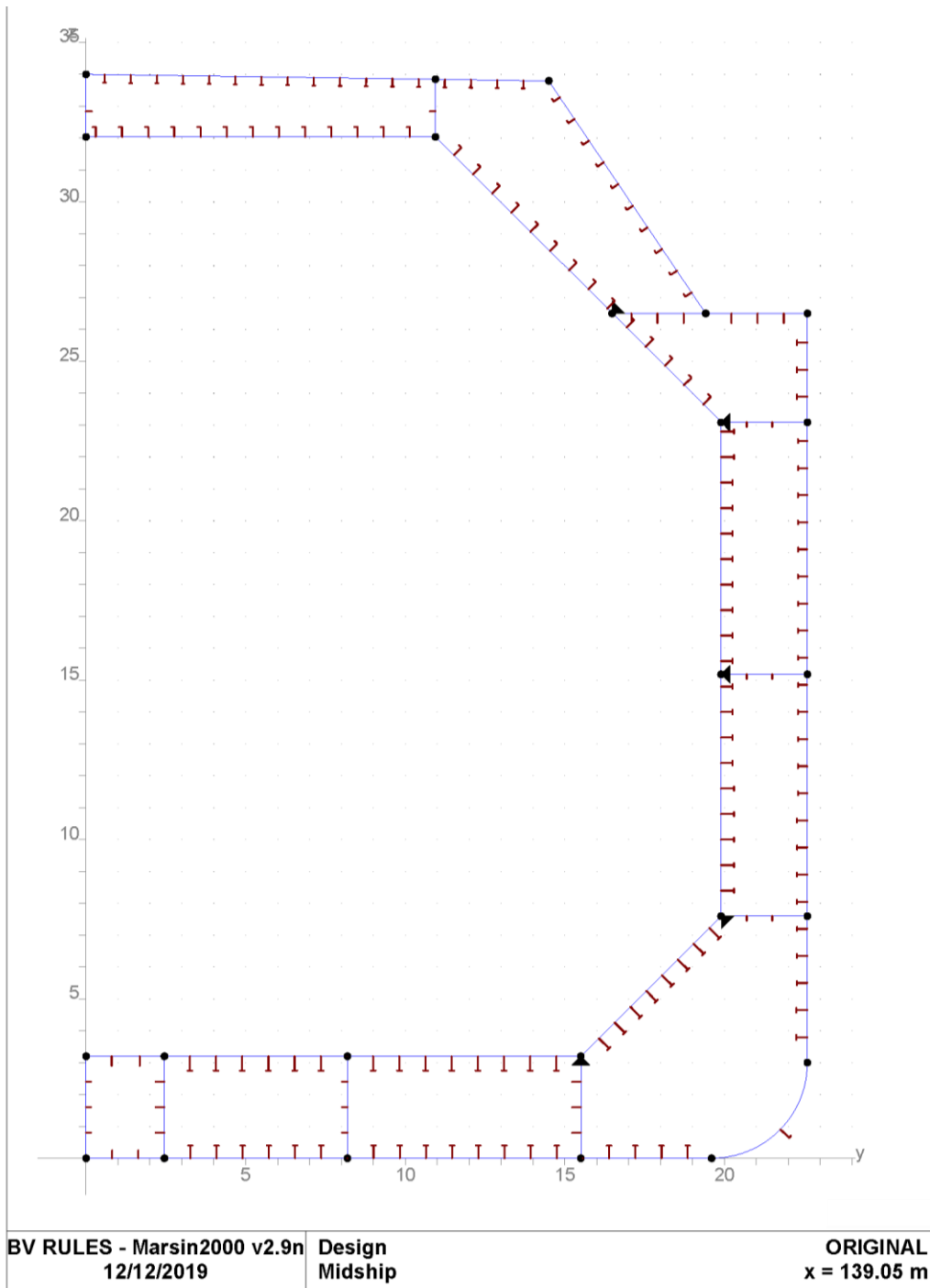
[46] MATLAB®

[47] Microsoft Office®

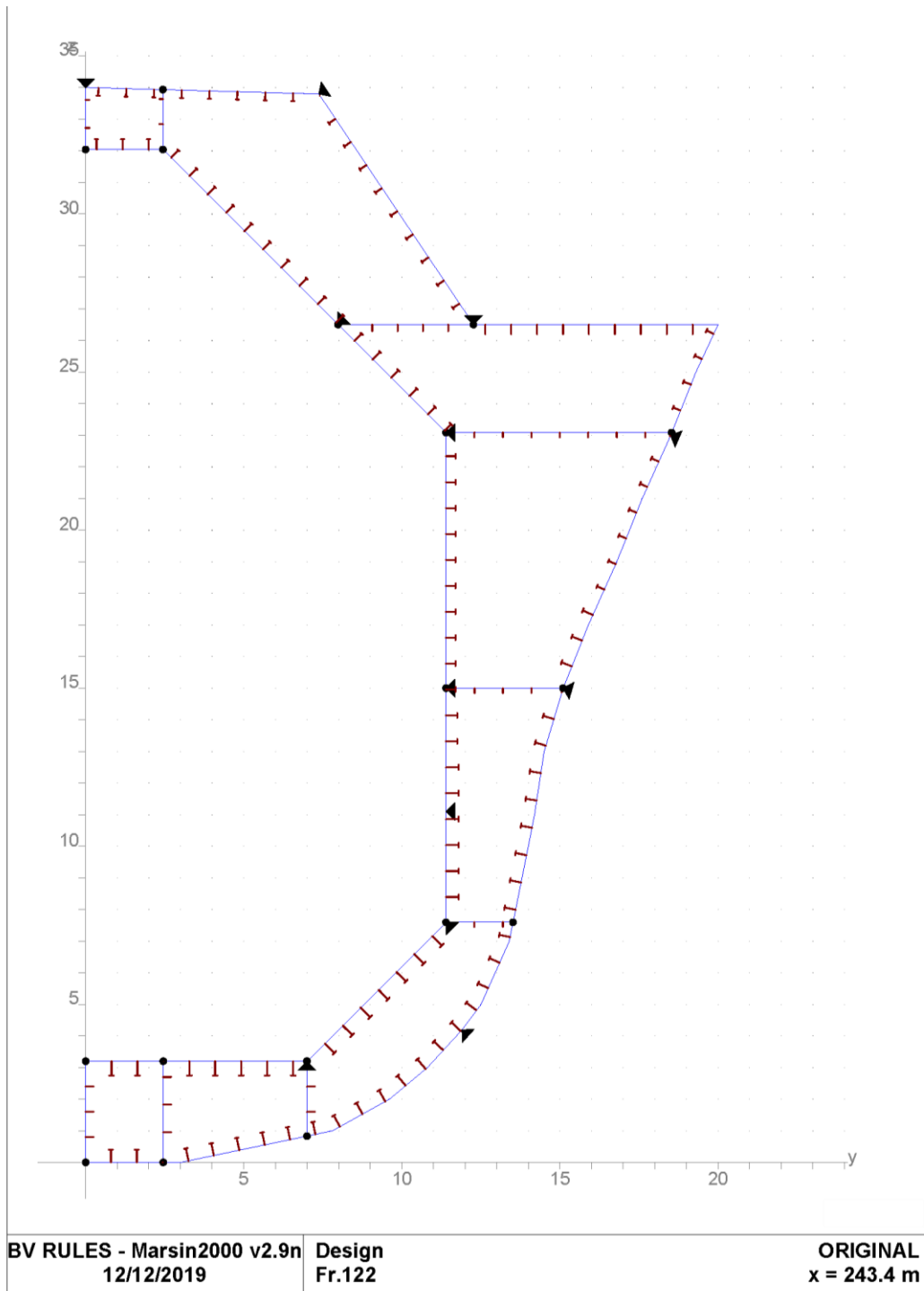
16. Παράρτημα Α – Γεωμετρία τομών στο πρόγραμμα MARS2000®



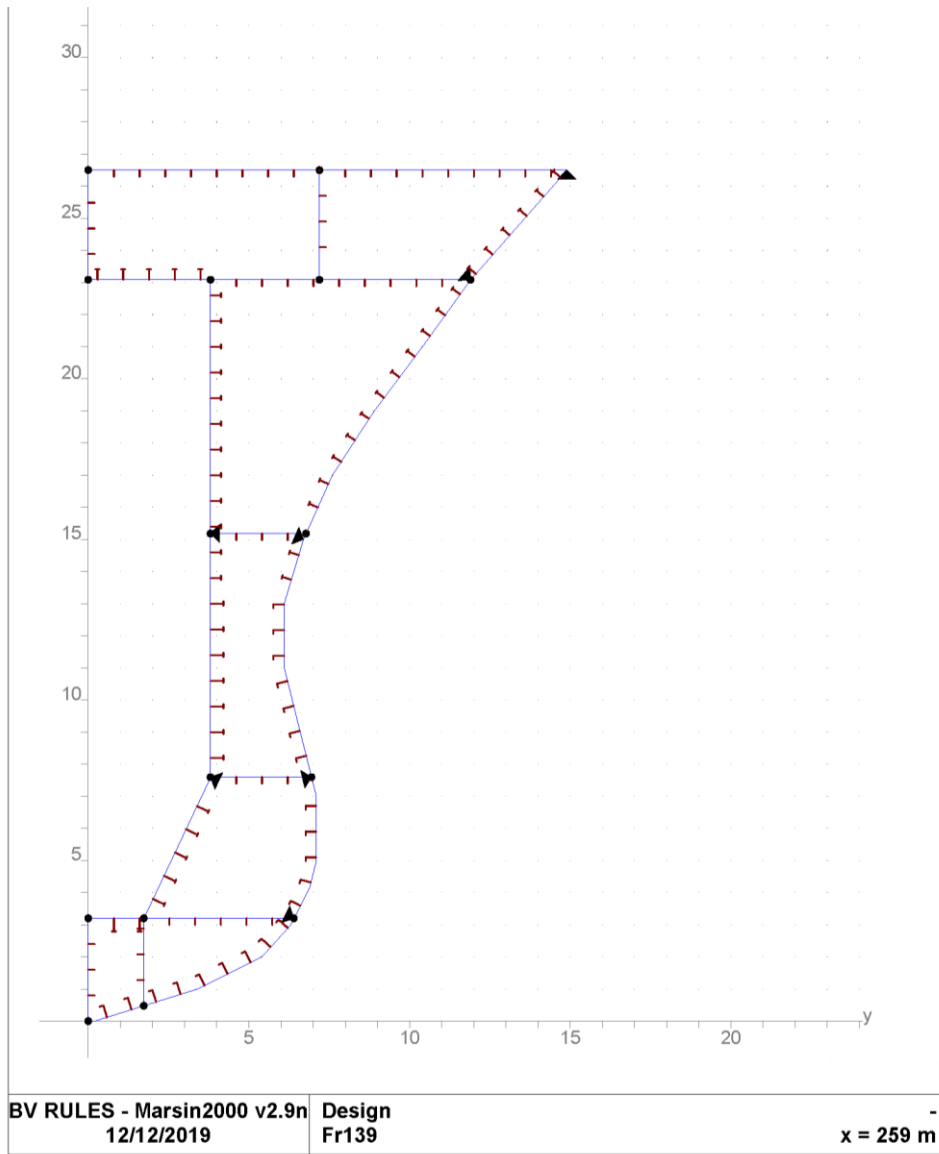
Εικόνα 62 - Νομέας 45



Εικόνα 63 - Μέση τομή

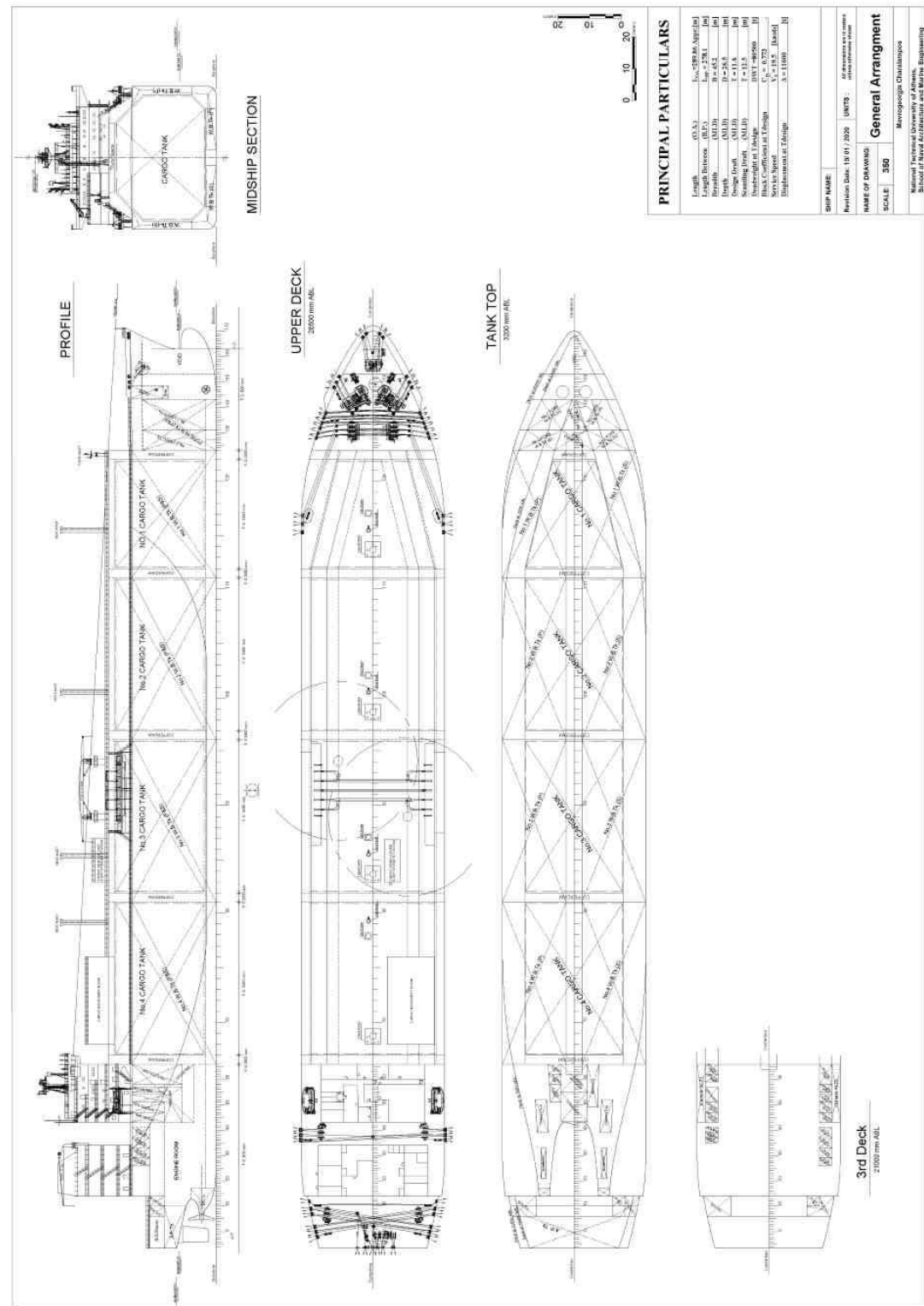


Εικόνα 64 - Νομέα 122



Εικόνα 65 - Νομέα 139

17. Παράρτημα Β – Σχέδιο Γενικής Διάταξης



PRINCIPAL PARTICULARS

Length	60.52	Loc. Code	Agriou
Length Between Perfs.	58.75	Age	2781
Beam	10.00	Area	100.00
Depth	2.50	DM (m)	0.25
Design Draft	11.8	Design Draft	11.8
Scantling Draft	13.5000	Scantling Draft	13.5000
Block Coefficient at Design	0.720	Block Coefficient at Design	0.720
Service Speed	11.5	Service Speed	11.5
Engine Room Length	11.000	Engine Room Length	11.000

SHIP NAME:
 Revision Date: 18.01/2020 UNITS:
 NAME OF DRAWING:
 SCALE: 3:50
 General Arrangement
 Mavrougeos Charalambos
 National Technical University of Athens
 School of Naval Architecture and Marine Engineering

18. Παράρτημα Γ – Χωρητικότητα δεξαμενών

Cargo					
Compartment	Frames	Volume	LCG	TCG	VCG
		(m ³)	(m)	(m)	(m)
No.1 Cargo Tank	112-122	25061.932	224.448	0	16.788
No.2 Cargo Tank	97-111	46558.454	181.95	0	16.987
No.3 Cargo Tank	82-96	46558.454	130.85	0	16.987
No.4 Cargo Tank	67-81	46558.454	79.75	0	16.987
Total		164737.28	145.089	0	16.957

Water Ballast (SG = 1.025 tonnes/cu.m)						
Compartment	Frames	Volume	LCG	TCG	VCG	IT
		(m ³)	(m)	(m)	(m)	(m ⁴)
No.1 WB Tank	111-123	12460.83	226.304	-0.001	12.893	227134
No.2 WB Tank	96-111	14250.273	180.314	0	8.852	382583
No.3 WB Tank	81-96	14426.524	129.45	0	8.765	392705
No.4 WB Tank	66-81	13836.313	79.035	0	9.043	357334
A.P. WB Tank	-7-10	1571.298	1.334	0.001	13.865	33797
E/R WB Tank (P)	43-66	904.053	43.937	-20.939	17.18	57
E/R WB Tank (S)	43-66	904.053	43.937	20.939	17.18	57
Fore No.1 WB Tank	131-143	1815.588	257.402	0	12.434	12528
Fore No.2 WB Tank	123-131	1180.265	249.466	-0.001	12.293	15195
Total		61349.19	149.861	0	10.241	

Fresh Water (SG = 1.000 tonnes/cu.m)						
Compartment	Frames	Volume	LCG	TCG	VCG	IT
		(m ³)	(m)	(m)	(m)	(m ⁴)
Drinking Water Tank (S)	10-14	62.72	9.6	14	18.85	17
Fresh Water Tank (P)	6-14	225.592	8.1	-15.633	18.969	287
Fresh Water Tank (S)	6-14	162.886	7.522	16.263	19.015	198
Total		451.2	8.1	0.001	18.969	

LSHFO (SG = 0.980 tonnes/cu.m)						
Compartment	Frames	Volume	LCG	TCG	VCG	IT
		(m ³)	(m)	(m)	(m)	(m ⁴)
No.1 LSHFO Tank	131-143	1685.649	256.521	0	13.937	833
No.2 LSHFO Tank	123-131	2169.633	249.191	0	13.774	3067
LSHFO Tank (P)	43-57	423.649	41.505	-17.91	17.131	55
LSHFO Tank (S)	43-57	329.113	40.674	17.899	15.891	55
LSHFO Serv. Tank (P)	43-47	126.047	36	-17.95	21.45	15
LSHFO Serv. Tank (S)	47-51	126.048	39.2	17.95	21.45	15
LSHFO Set. Tank (P)	47-51	126.048	39.2	-17.95	21.45	15
LSHFO Set. Tank (S)	43-47	126.047	36	17.95	21.45	15
Total		5112.24	200.105	-0.332	14.999	

LSMDO (SG = 0.850 tonnes/cu.m)						
Compartment	Frames	Volume	LCG	TCG	VCG	IT
		(m ³)	(m)	(m)	(m)	(m ⁴)
LSMDO Serv. Tank (P)	59-62	94.536	48.4	-17.95	21.45	11
LSMDO Stor. Tank (P)	62-66	195.936	51.2	-17.95	18.65	15
LSMDO Serv. Tank (S)	55-58	94.536	45.2	17.95	21.45	11
LSMDO Stor. Tank (S)	58-66	391.872	49.6	17.95	18.65	31
Total		776.89	49.322	4.527	19.331	

Lubricant Oil (SG = 0.800 tonnes/cu.m)						
Compartment	Frames	Volume	LCG	TCG	VCG	IT
		(m ³)	(m)	(m)	(m)	(m ⁴)
LO GE Tank (P)	39-41	32.448	32	-17.95	23.9	7
LO GE Stor. Tank No.1 (P)	37-39	32.448	30.4	-17.95	23.9	7
LO GE Stor. Tank No.2 (P)	35-37	32.448	28.8	-17.95	23.9	7
LO ME CYL No.1 Tank (S)	37-41	64.896	31.2	17.95	23.9	15
LO ME CYL No.1 Tank (S)	33-37	64.896	28	17.95	23.9	15
LO ME SYST Set. Tank (S)	26-29	48.672	22	17.95	23.9	11
LO ME SYST Stor. Tank (S)	29-33	64.896	24.8	17.95	23.9	15
Total		340.72	27.829	7.693	23.9	

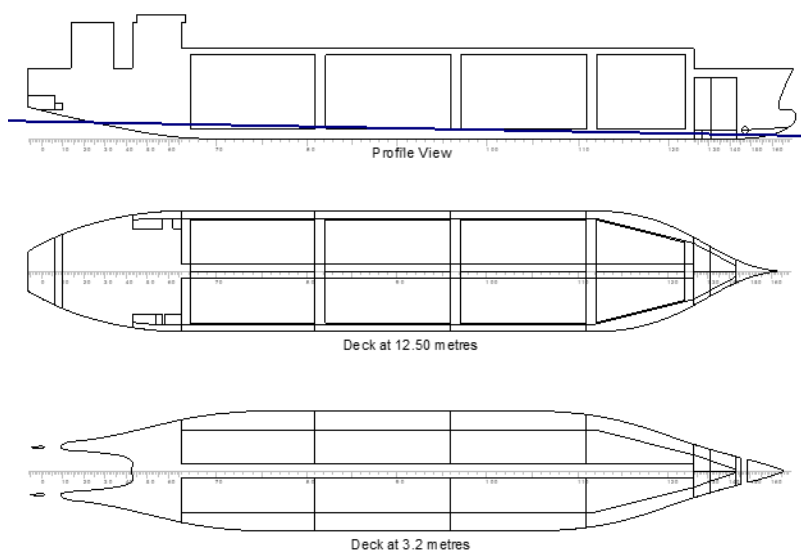
19. Παράρτημα Δ – Υδροστατικός πίνακας

Draft	Displ	Vol.(mld)	LCB	VCB	WPA	LCF	KML	KMT	WSA
(m)	(t)	(m ³)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m ²)
2	17015.82	16421.67	138.798	1.041	9002.91	138.703	2060.064	77.383	9428.05
3	26464.75	25624.5	138.659	1.566	9373.38	138.334	1448.546	54.003	10250.96
4	36216.07	35123.5	138.557	2.09	9628.37	138.234	1130.792	41.882	11013.33
5	46205.31	44854.8	138.496	2.613	9842.64	138.345	938.377	34.674	11765.93
6	56376.93	54764.93	138.444	3.136	9988.33	137.982	796.957	29.97	12471.19
7	66691.1	64814.63	138.312	3.657	10122.88	137.139	697.61	26.763	13150.22
8	77136.49	74992.54	138.076	4.179	10245.28	135.956	623.033	24.491	13819.5
8.25	79767.21	77555.91	138.001	4.309	10274.91	135.615	607.244	24.032	13987.22
8.5	82405.54	80126.68	137.918	4.44	10305.06	135.242	592.559	23.608	14156.34
8.75	85051.84	82705.2	137.829	4.57	10335.54	134.851	578.832	23.217	14326.31
9	87705.63	85291.05	137.732	4.701	10364.83	134.462	565.673	22.857	14495.72
9.25	90367.14	87884.4	137.63	4.831	10395.47	134.04	553.518	22.525	14666.86
9.5	93036.26	90485.13	137.52	4.962	10427.43	133.596	542.249	22.22	14839.63
9.75	95714.68	93094.9	137.404	5.093	10461.12	133.127	531.846	21.941	15014.35
10	98401.08	95712.28	137.279	5.224	10496.69	132.629	522.265	21.685	15198.55
10.25	101095.95	98338.14	137.151	5.354	10527.03	132.195	512.159	21.446	15371.65
10.5	103799.9	100972.79	137.014	5.485	10566.64	131.637	504.093	21.234	15547.26
10.75	106514.49	103617.8	136.87	5.617	10606.89	131.055	496.447	21.041	15724.85
11	109239.75	106273.18	136.717	5.748	10646.59	130.445	488.994	20.863	15904.58
11.25	111975.23	108938.62	136.557	5.88	10690.6	129.916	482.811	20.699	16079.35
11.5	114722.08	111615.16	136.392	6.011	10735.14	129.407	477.049	20.547	16253.59
11.6	115824	112688.88	136.324	6.064	10753.19	129.207	474.864	20.49	16323.32
11.75	117480.38	114302.87	136.222	6.143	10780.63	128.911	471.722	20.407	16428
12	120250.37	117002.02	136.048	6.276	10824.74	128.456	466.455	20.279	16600.85
12.25	123030.45	119711.13	135.872	6.408	10861.14	128.115	460.311	20.16	16767.41
12.5	125819.48	122429	135.696	6.54	10895.16	127.824	454.12	20.051	16931.87
13	131422.79	127889.46	135.349	6.806	10959.46	127.333	442.081	19.859	17257.69
14	142721.07	138900.03	134.686	7.336	11072.93	126.691	419.28	19.56	17897.2
15	154128.92	150017.62	134.08	7.867	11174.38	126.351	398.772	19.358	18529.14
16	165636.52	161232.61	133.537	8.398	11268.18	126.226	380.506	19.238	19157.88
17	177236.74	172537.96	133.058	8.929	11355.54	126.27	364.203	19.183	19785.66
18	188924.13	183928.36	132.643	9.46	11438.55	126.444	349.643	19.186	20413.74

Draft	TPC	MTC	BML	BMT	WSA	CB	CM	CP	CW
(m)	(t/cm)	(t-m/cm)	(m)	(m)	(m ²)				
2	92.28	1259.83	2059.023	76.342	9428.05	0.653	0.959	0.681	0.716
3	96.08	1376.99	1446.98	52.438	10250.96	0.68	0.972	0.699	0.746
4	98.69	1469.87	1128.702	39.793	11013.33	0.699	0.979	0.714	0.766
5	100.89	1554.74	935.765	32.061	11765.93	0.714	0.983	0.726	0.783
6	102.38	1609.25	793.821	26.834	12471.19	0.726	0.986	0.736	0.795
7	103.76	1664.17	693.952	23.106	13150.22	0.737	0.988	0.746	0.805
8	105.01	1716.51	618.854	20.312	13819.5	0.746	0.99	0.754	0.815
8.25	105.32	1729.39	602.934	19.722	13987.22	0.748	0.99	0.756	0.817
8.5	105.63	1742.69	588.119	19.168	14156.34	0.75	0.99	0.757	0.82
8.75	105.94	1756.28	574.262	18.647	14326.31	0.752	0.99	0.759	0.822
9	106.24	1769.16	560.973	18.156	14495.72	0.754	0.991	0.761	0.825
9.25	106.55	1782.93	548.686	17.694	14666.86	0.756	0.991	0.763	0.827
9.5	106.88	1797.45	537.287	17.258	14839.63	0.758	0.991	0.764	0.83
9.75	107.23	1812.95	526.753	16.848	15014.35	0.76	0.991	0.766	0.832
10	107.59	1829.47	517.042	16.462	15198.55	0.761	0.992	0.768	0.835
10.25	107.9	1842.35	506.804	16.091	15371.65	0.763	0.992	0.77	0.837
10.5	108.31	1861.04	498.608	15.749	15547.26	0.765	0.992	0.771	0.841
10.75	108.72	1879.92	490.83	15.424	15724.85	0.767	0.992	0.773	0.844
11	109.13	1898.23	483.246	15.115	15904.58	0.769	0.992	0.774	0.847
11.25	109.58	1920.34	476.932	14.819	16079.35	0.77	0.993	0.776	0.85
11.5	110.04	1943.13	471.037	14.536	16253.59	0.772	0.993	0.778	0.854
11.6	110.22	1952.47	468.799	14.426	16323.32	0.773	0.993	0.778	0.855
11.75	110.5	1966.79	465.578	14.264	16428	0.774	0.993	0.779	0.858
12	110.95	1989.81	460.179	14.003	16600.85	0.776	0.993	0.781	0.861
12.25	111.33	2008.05	453.903	13.752	16767.41	0.777	0.993	0.783	0.864
12.5	111.68	2024.96	447.579	13.51	16931.87	0.779	0.993	0.784	0.867
13	112.33	2057	435.276	13.053	17257.69	0.783	0.994	0.788	0.872
14	113.5	2114.1	411.944	12.224	17897.2	0.789	0.994	0.794	0.881
15	114.54	2166.48	390.905	11.491	18529.14	0.796	0.994	0.8	0.889
16	115.5	2216.28	372.108	10.84	19157.88	0.802	0.995	0.806	0.896
17	116.39	2264.21	355.274	10.254	19785.66	0.807	0.995	0.811	0.903
18	117.25	2310.99	340.183	9.726	20413.74	0.813	0.995	0.817	0.91

20. Παράρτημα Ε – Καταστάσεις φόρτωσης

Lightship



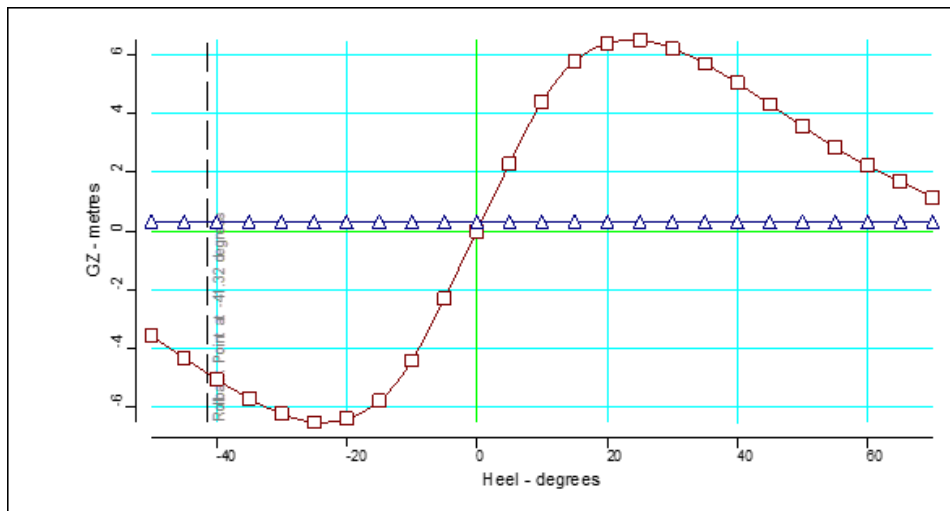
Title	Frames	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425
Deadweight				0	0	0	0
Total Displacement				34968.7	117.355	0	16.425
Buoyancy				34968.7	117.09	0	2.232
Total Buoyancy				34968.7	117.09	0	2.232

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	3.918	3.937	metres
Draft aft at marks	6.395	6.414	metres
Draft fwd at marks	1.232	1.251	metres
Draft at AP	6.395	6.414	metres
Draft at FP	1.232	1.251	metres
Mean draft at midships	3.813	3.832	metres

Density of water	1.026	tonnes/cu.m
Heel	No heel	
Trim by the stern	5.163	metres
KG	16.425	metres
FSC	0	metres
KGf	16.425	metres
GMt	26.404	metres
BMt	40.609	metres

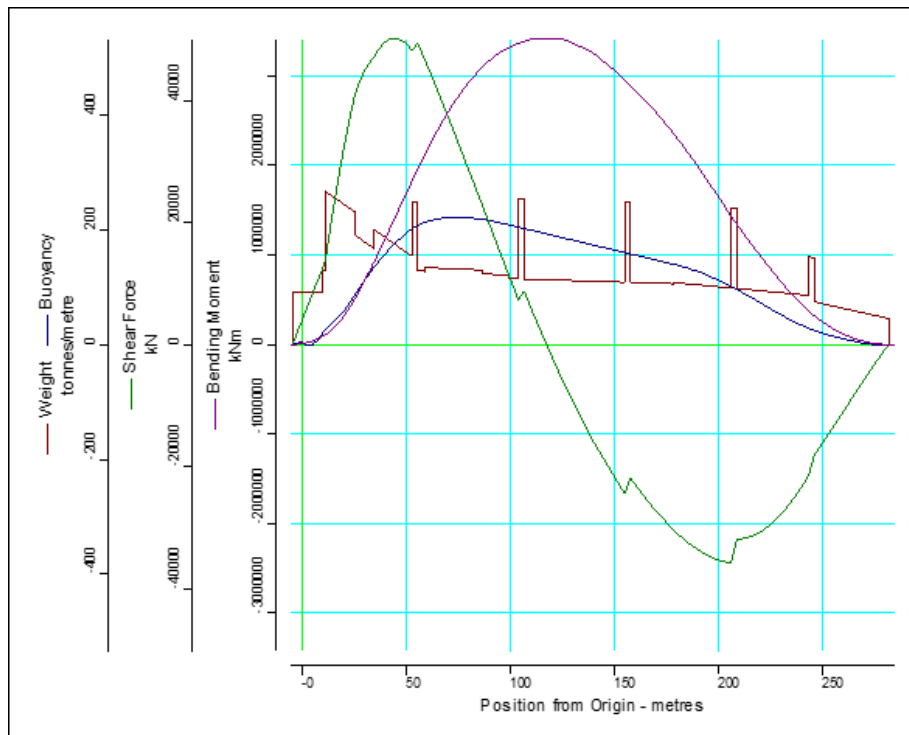
BMI	1128.576	metres
Waterplane area	9527.21	sq.metres
LCG	117.355	metres
LCB	117.091	metres
TCB	0	metres
LCF	133.345	metres
TCF	0	metres
TPC	97.749	tonnes/cm
MTC	1419.085	tonnes-m/cm

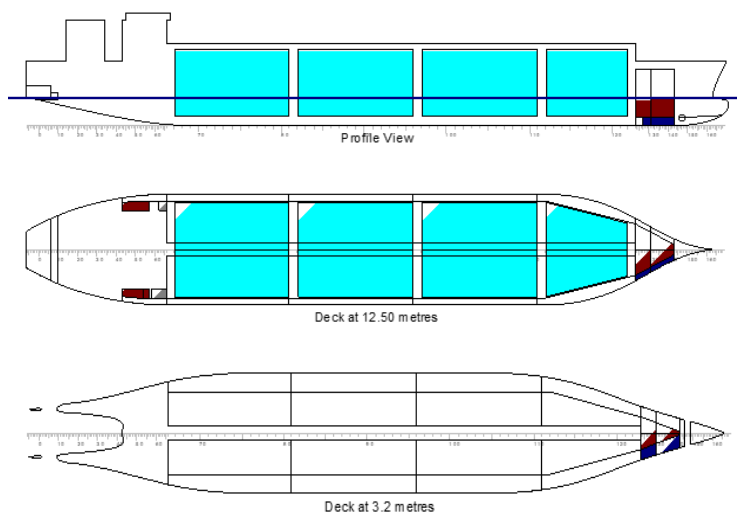
Propeller tip immersion	-2.444	metres
Actual percentage immersion	70.554	%



#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	2.514	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.99	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	3.504	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	26.404	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	6.525	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	23.793	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.467	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	1.03	1

**** Condition does not comply ****



Full Load Departure (LNG=0.430 [t/m³])

Title	Frames	% full	SG (t/m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	98.5	0.43	10615	224.473	0.002	16.57	4904.2
No.2 Cargo Tank	97-111	98.5	0.43	19719.8	181.95	0.005	16.771	20034.7
No.3 Cargo Tank	82-96	98.5	0.43	19719.8	130.85	0.005	16.771	20034.6
No.4 Cargo Tank	67-81	98.5	0.43	19719.8	79.75	0.005	16.771	20034.7
Total Cargo				69774.4	145.093	0.004	16.74	65008.2
<i>WB</i>								
Fore No.1 WB	131-143	65	1.025	1209.6	257.379	0.017	7.886	4089.7
Fore No.2 WB	123-131	65	1.025	786.4	249.483	0.042	7.766	6975.7
Total WB				1996	254.268	0.027	7.839	11065.4
<i>FW</i>								
FW_DW	10-14	100	1	62.7	9.6	14	18.85	0
FW (P)	6-14	100	1	225.6	8.1	-15.633	18.969	0
FW (S)	6-14	100	1	162.9	7.522	16.263	19.015	0
Total FW				451.2	8.1	0.001	18.969	0
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	35	0.98	578.2	256.493	0.007	7.674	816.6
No.2 HFO Tank	123-131	35	0.98	744.2	249.175	0.019	7.452	3006.1
HFO Tank (P)	43-57	98	0.98	406.9	41.471	-17.909	16.945	23.3
HFO Tank (S)	43-57	98	0.98	316.1	40.647	17.898	15.682	11.6
HFO Serv (P)	43-47	98	0.98	121.1	36	-17.949	21.349	15.5
HFO Serv (S)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	17.951	21.349	15.5
HFO Set (P)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	-17.949	21.349	15.5
HFO_Set (S)	43-47	98	0.98	121.1	36	17.951	21.349	15.5
Total LSHFO				2529.8	150.88	-0.637	12.718	3919.6
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	50	0.85	40.2	48.4	-17.949	18.925	10.1
MDO Stor (P)	62-66	50	0.85	83.3	51.2	-17.949	14.725	13.4
MDO Serv (S)	55-58	50	0.85	40.2	45.2	17.951	18.925	10.1

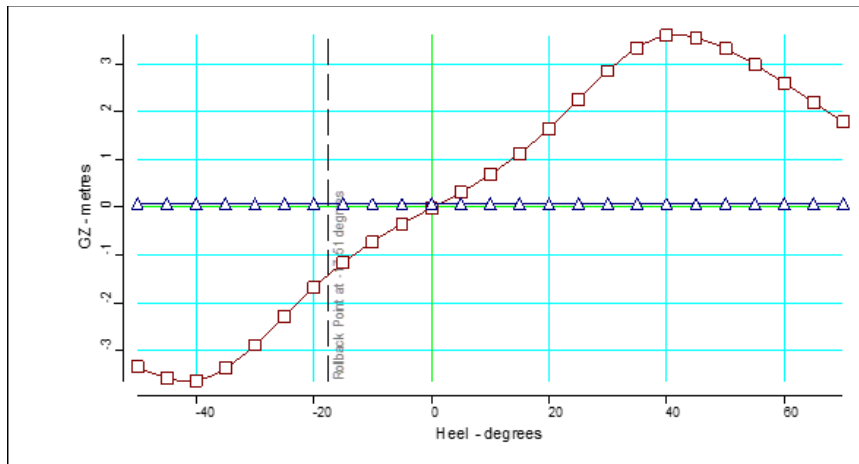
MDO Stor (S)	58-66	50	0.85	166.5	49.6	17.951	14.725	26.9
Total LSMDO				330.2	49.322	4.528	15.747	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	98	0.8	25.4	32	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	98	0.8	25.4	30.4	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	98	0.8	25.4	28.8	-17.949	23.848	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	98	0.8	50.9	31.2	17.951	23.848	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	98	0.8	50.9	28	17.951	23.848	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	98	0.8	38.2	22	17.951	23.848	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	98	0.8	50.9	24.8	17.951	23.848	12.7
Total OIL				267.1	27.829	7.694	23.848	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				76264.6	145.405	0.03	16.311	80120.1
Total Displacement				111233.3	136.587	0.021	16.347	80120.1
Buoyancy				111233.3	136.587	0.07	5.844	1657311.3
Total Buoyancy				111233.3	136.587	0.07	5.844	1657311.3

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	11.182	11.201	metres
Draft aft at marks	11.186	11.205	metres
Draft fwd at marks	11.178	11.197	metres
Draft at AP	11.186	11.205	metres
Draft at FP	11.178	11.197	metres
Mean draft at midships	11.182	11.201	metres

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.27	degrees
Trim	No trim	
KG	16.347	metres
FSC	0.72	metres
KGf	17.067	metres
GMt	3.675	metres
BMt	14.899	metres
BMI	478.699	metres
Waterplane area	10679.4	sq.metres
LCG	136.587	metres
LCB	136.587	metres
TCB	0.07	metres
LCF	130.049	metres
TCF	0.067	metres

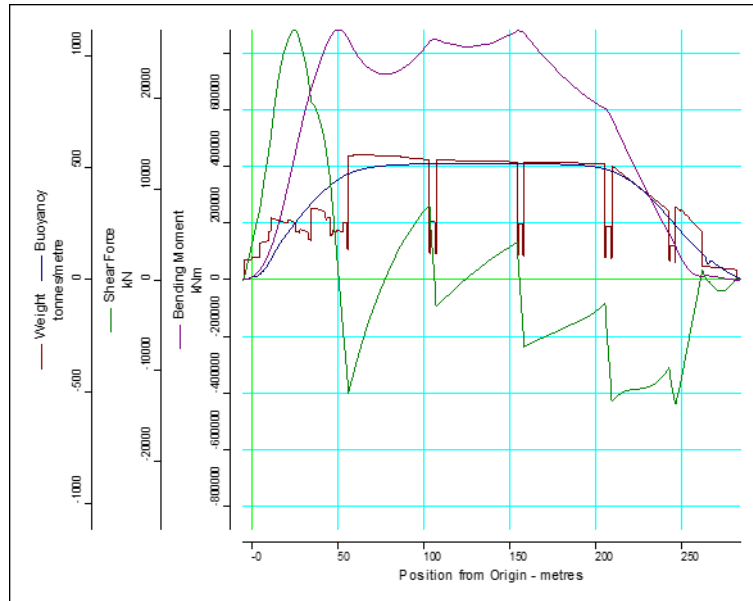
TPC	109.464	tonnes/cm
MTC	1914.682	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	2.436	metres
Actual percentage immersion	129.349	%

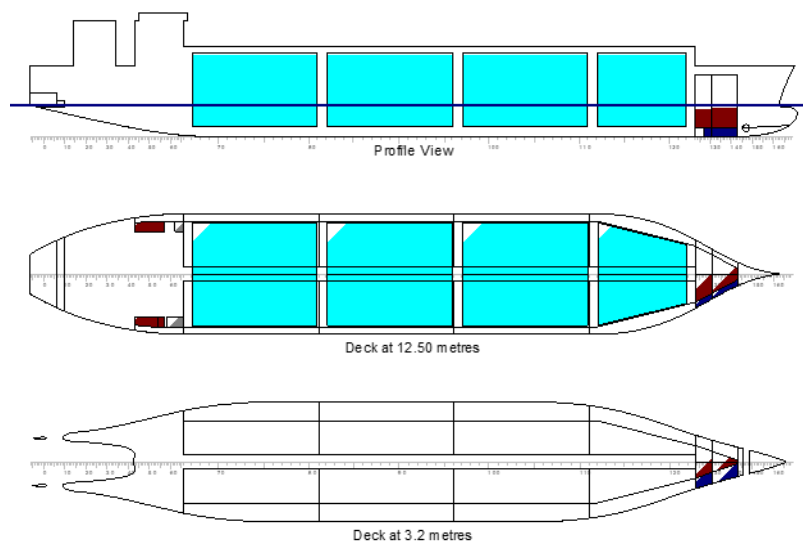


#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.653	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.578	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.231	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	3.675	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	3.617	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	41.208	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	1.076	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	7.836	1

Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.62	--	0	0
25.26	--	27536.3	446590.1
50.64	--	0	883790.9
56.13	--	-12531.9	849569.8
77.37	--	0	726116.9
103.37	--	8218.9	841276.1
106.34	--	0	850756.7
107.23	--	-2975.2	850450.3
124	--	0	822999
154.47	--	4145.6	879421.5
155.78	--	0	879316.2
158.33	--	-7403.6	871724.7
209.43	--	-13471.7	572388.5
246.66	--	-13725	116929.5
261.1	--	0	12900
262.2	#143	1057.7	13221.2
264.57	--	0	14045.8
273.27	--	-1264.9	6669.6
281.27	--	0	-236.4
282	--	212.3	-177.4
<i>Maximum BM</i>			
50.46			883805.2
<i>Maximum SF</i>			
25.26		27536.3	

Full Load Departure (LNG=0.460 [t/m³])

Title	Frames	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	98.5	0.46	11355.6	224.473	0.002	16.57	5246.3
No.2 Cargo Tank	97-111	98.5	0.46	21095.6	181.95	0.005	16.771	21432.5
No.3 Cargo Tank	82-96	98.5	0.46	21095.6	130.85	0.005	16.771	21432.5
No.4 Cargo Tank	67-81	98.5	0.46	21095.6	79.75	0.005	16.771	21432.5
Total Cargo				74642.4	145.093	0.004	16.74	69543.8
<i>WB</i>								
Fore No.1 WB	131-143	45	1.025	837.4	257.374	0.009	4.787	1413
Fore No.2 WB	123-131	45	1.025	544.4	249.534	0.025	4.566	2672.4
Total WB				1381.8	254.285	0.015	4.7	4085.4
<i>FW</i>								
FW_DW	10-14	100	1	62.7	9.6	14	18.85	0
FW (P)	6-14	100	1	225.6	8.1	-15.633	18.969	0
FW (S)	6-14	100	1	162.9	7.522	16.263	19.015	0
Total FW				451.2	8.1	0.001	18.969	0
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	35	0.98	578.2	256.493	0.007	7.674	816.6
No.2 HFO Tank	123-131	35	0.98	744.2	249.175	0.019	7.452	3006.1
HFO Tank (P)	43-57	98	0.98	406.9	41.471	-17.909	16.945	23.3
HFO Tank (S)	43-57	98	0.98	316.1	40.647	17.898	15.682	11.6
HFO Serv (P)	43-47	98	0.98	121.1	36	-17.949	21.349	15.5
HFO Serv (S)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	17.951	21.349	15.5
HFO Set (P)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	-17.949	21.349	15.5
HFO_Set (S)	43-47	98	0.98	121.1	36	17.951	21.349	15.5
Total LSHFO				2529.8	150.88	-0.637	12.718	3919.6
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	50	0.85	40.2	48.4	-17.949	18.925	10.1

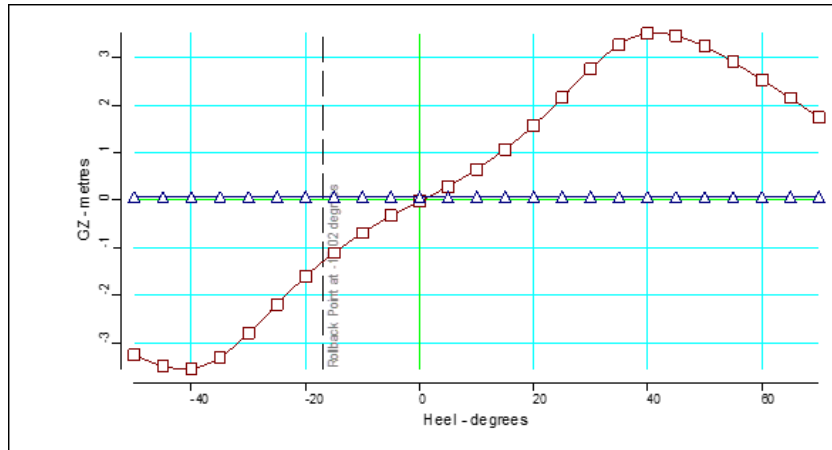
MDO Stor (P)	62-66	50	0.85	83.3	51.2	-17.949	14.725	13.4
MDO Serv (S)	55-58	50	0.85	40.2	45.2	17.951	18.925	10.1
MDO Stor (S)	58-66	50	0.85	166.5	49.6	17.951	14.725	26.9
Total LSMDO				330.2	49.322	4.528	15.747	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	98	0.8	25.4	32	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	98	0.8	25.4	30.4	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	98	0.8	25.4	28.8	-17.949	23.848	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	98	0.8	50.9	31.2	17.951	23.848	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	98	0.8	50.9	28	17.951	23.848	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	98	0.8	38.2	22	17.951	23.848	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	98	0.8	50.9	24.8	17.951	23.848	12.7
Total OIL				267.1	27.829	7.694	23.848	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				80518.4	144.556	0.028	16.348	77675.7
Total Displacement				115487.1	136.32	0.02	16.371	77675.7
Buoyancy				115487.2	136.319	0.07	6.048	1670015.7
Total Buoyancy				115487.2	136.319	0.07	6.048	1670015.7

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	11.569	11.588	metres
Draft aft at marks	11.576	11.595	metres
Draft fwd at marks	11.561	11.58	metres
Draft at AP	11.576	11.595	metres
Draft at FP	11.561	11.58	metres
Mean draft at midships	11.569	11.588	metres

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.27	degrees
Trim	No trim	
KG	16.371	metres
FSC	0.673	metres
KGf	17.044	metres
GMt	3.463	metres
BMt	14.461	metres
BMI	469.643	metres
Waterplane area	10748.93	sq.metres
LCG	136.32	metres
LCB	136.319	metres
TCB	0.07	metres

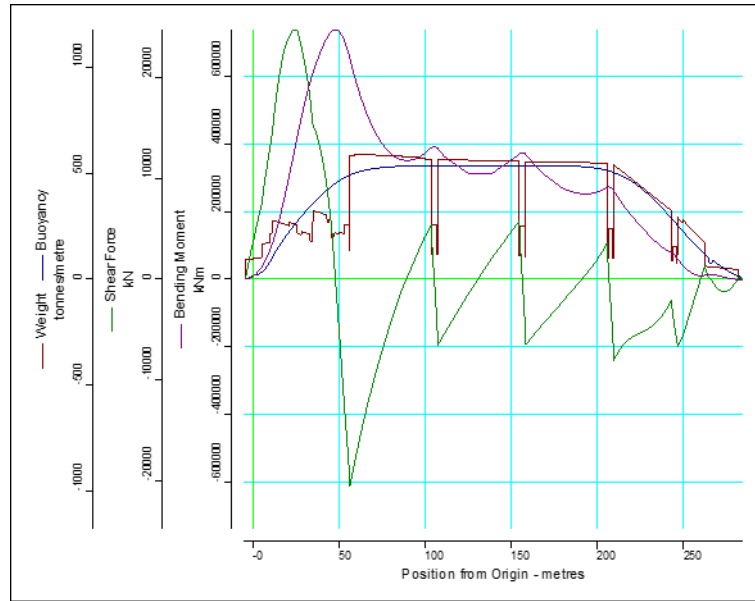
LCF	129.255	metres
TCF	0.07	metres
TPC	110.176	tonnes/cm
MTC	1950.294	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	2.826	metres
Actual percentage immersion	134.05	%

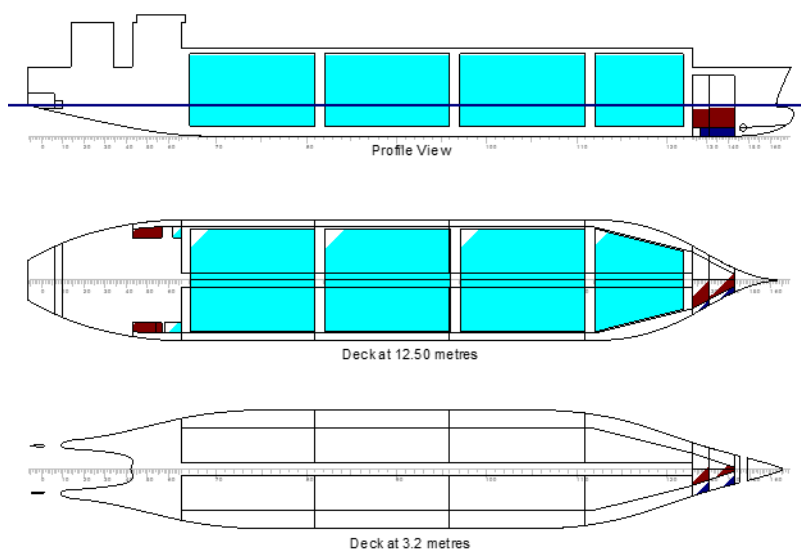


#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.623	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.566	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.189	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	3.463	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	3.536	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	41.197	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	1.086	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	8.523	1

Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.62	--	0	0
24.02	--	24758.1	383106.1
47.69	--	0	738279.6
56.13	--	-20511	652487.3
88.85	--	0	351427.7
103.37	--	5366.6	389312.5
105.09	--	0	390535.7
107.23	--	-6509.9	386272.7
130.52	--	0	312990.1
154.47	--	5764.5	371635.8
156.28	--	0	373080.8
158.33	--	-6464.9	369042.8
190.85	--	0	253066.6
205.57	--	3613.3	271428.3
206.65	--	0	272501.5
209.43	--	-8030.2	261227.1
246.66	--	-6636.3	59159.8
259.79	--	0	10483.7
262.2	#143	1302.5	11735.3
265.54	--	0	13085.9
273.27	--	-1237	6560.1
281.27	--	0	-242.7
282	--	212.3	-181.6
<i>Maximum BM</i>			
47.76			738285.2
<i>Maximum SF</i>			
24.02		24758.1	

Full Load Departure (LNG=0.500 [t/m³])

Title	Frames	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	98.5	0.5	12343	224.473	0.002	16.57	5702.9
No.2 Cargo Tank	97-111	98.5	0.5	22930	181.95	0.005	16.771	23296.4
No.3 Cargo Tank	82-96	98.5	0.5	22930	130.85	0.005	16.771	23296.4
No.4 Cargo Tank	67-81	98.5	0.5	22930	79.75	0.005	16.771	23296.4
Total Cargo				81133	145.093	0.005	16.74	75592.1
<i>WB</i>								
Fore No.1 WB	131-143	17.4	1.025	324.4	257.051	0	1.961	2129.4
Fore No.2 WB	123-131	20.4	1.025	246.7	249.586	0	1.937	2890.4
Total WB				571.1	253.826	0	1.95	5019.8
<i>FW</i>								
FW_DW	10-14	100	1	62.7	9.6	14	18.85	0
FW (P)	6-14	100	1	225.6	8.1	-15.633	18.969	0
FW (S)	6-14	100	1	162.9	7.522	16.263	19.015	0
Total FW				451.2	8.1	0.001	18.969	0
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	35	0.98	578.2	256.493	0.007	7.674	816.6
No.2 HFO Tank	123-131	35	0.98	744.2	249.175	0.021	7.452	3006.2
HFO Tank (P)	43-57	98	0.98	406.9	41.471	-17.909	16.945	23.3
HFO Tank (S)	43-57	98	0.98	316.1	40.647	17.898	15.682	11.6
HFO Serv (P)	43-47	98	0.98	121.1	36	-17.949	21.349	15.5
HFO Serv (S)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	17.951	21.349	15.5
HFO Set (P)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	-17.949	21.349	15.5
HFO_Set (S)	43-47	98	0.98	121.1	36	17.951	21.349	15.5
Total LSHFO				2529.8	150.88	-0.636	12.718	3919.7
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	50	0.85	40.2	48.4	-17.949	18.925	10.1

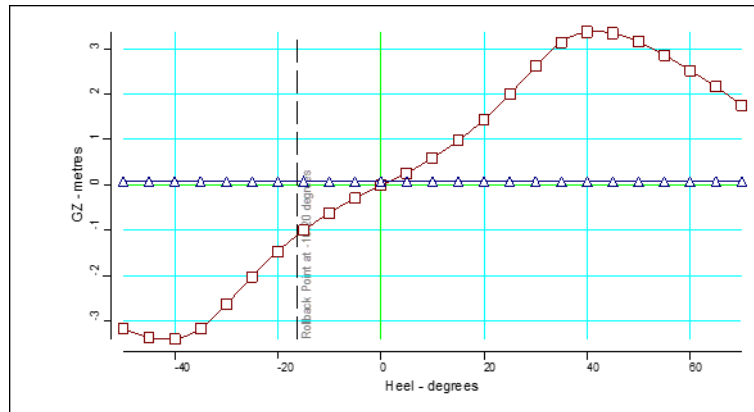
MDO Stor (P)	62-66	50	0.85	83.3	51.2	-17.949	14.725	13.4
MDO Serv (S)	55-58	50	0.85	40.2	45.2	17.951	18.925	10.1
MDO Stor (S)	58-66	50	0.85	166.5	49.6	17.951	14.725	26.9
Total LSMDO				330.2	49.322	4.528	15.747	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	98	0.8	25.4	32	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	98	0.8	25.4	30.4	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	98	0.8	25.4	28.8	-17.949	23.848	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	98	0.8	50.9	31.2	17.951	23.848	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	98	0.8	50.9	28	17.951	23.848	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	98	0.8	38.2	22	17.951	23.848	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	98	0.8	50.9	24.8	17.951	23.848	12.7
Total OIL				267.1	27.829	7.694	23.848	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				86198.3	143.562	0.027	16.469	84658.6
Total Displacement				121167	135.998	0.019	16.456	84658.6
Buoyancy				121167	135.999	0.072	6.319	1686592.2
Total Buoyancy				121167	135.999	0.072	6.319	1686592.2

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	12.082	12.101	metres
Draft aft at marks	12.08	12.099	metres
Draft fwd at marks	12.086	12.105	metres
Draft at AP	12.08	12.099	metres
Draft at FP	12.086	12.105	metres
Mean draft at midships	12.083	12.102	metres

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.29	degrees
Trim by the stern	No trim	metres
KG	16.456	metres
FSC	0.699	metres
KGf	17.155	metres
GMt	3.082	metres
BMt	13.92	metres
BMI	458.105	metres
Waterplane area	10837.01	sq.metres
LCG	135.998	metres
LCB	135.999	metres
TCB	0.072	metres

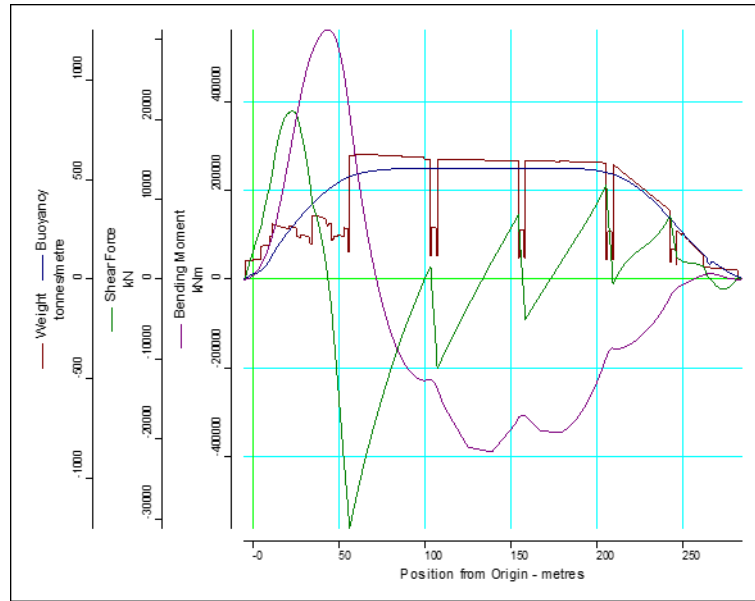
LCF	128.339	metres
TCF	0.077	metres
TPC	111.079	tonnes/cm
MTC	1995.943	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	3.330	metres
Actual percentage immersion	140.12	%



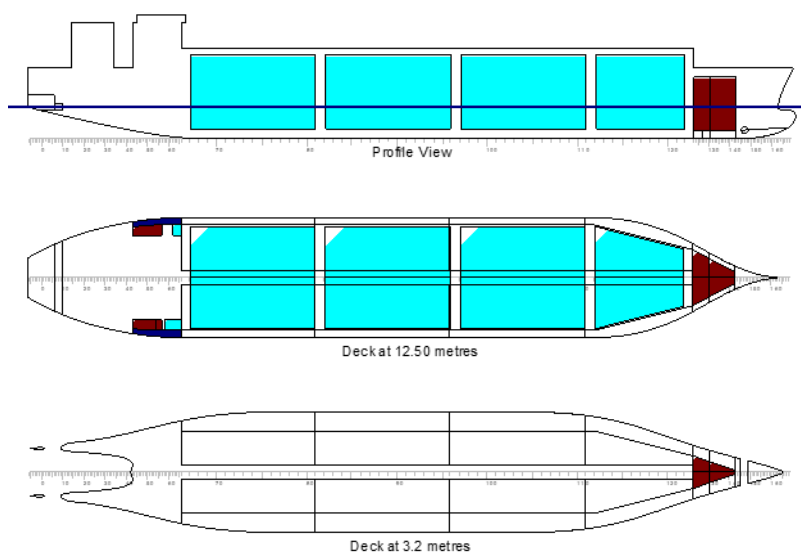
#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.572	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.54	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.112	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	3.082	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	3.387	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	41.512	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	1.144	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	9.841	1

Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.61	--	0	-1
22.71	--	21075.2	310630.4
43.65	--	0	562676.4
56.13	--	-31267.5	378133.6
99.83	--	0	-228238.2
103.37	--	1631.1	-226161.4
103.75	--	0	-226046.7
107.23	--	-11145	-245251.9
133.5	--	0	-384774.4
154.47	--	8068.3	-313140.8
156.9	--	0	-307318.3
158.33	--	-5067.5	-308435.8
172.97	--	0	-343807.8
205.57	--	11867.7	-175667.8
209.27	--	0	-155588.5
210.89	--	0	-156580.7
242.87	--	7995.5	-38220.3
266.49	--	0	12251.9
273.59	--	-1212	6053.7
281.27	--	0	-248.6
282	--	212.3	-185.4
<i>Maximum BM</i>			
43.49			562714.2
<i>Maximum SF</i>			
56.13		-31267.5	

Scantling Load Departure (LNG=0.500 [t/m³])



Title	Frames	% full	SG (t/m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	98.5	0.5	12343	224.474	0.004	16.57	5708
No.2 Cargo Tank	97-111	98.5	0.5	22930	181.954	0.01	16.771	23300.8
No.3 Cargo Tank	82-96	98.5	0.5	22930	130.854	0.01	16.771	23300.7
No.4 Cargo Tank	67-81	98.5	0.5	22930	79.754	0.01	16.771	23300.7
Total Cargo				81133	145.096	0.009	16.74	75610.2
<i>WB</i>								
E/R WB (P)	43-66	100	1.025	926.7	43.937	-20.939	17.18	0
E/R WB (S)	43-66	100	1.025	926.7	43.937	20.939	17.18	0
Total WB				1853.4	43.937	0	17.18	0
<i>FW</i>								
FW_DW	8-14	100	1	62.7	9.6	14	18.85	0
FW (P)	6-14	100	1	225.6	8.1	-15.633	18.969	0
FW (S)	6-14	100	1	162.9	7.522	16.263	19.015	0
Total FW				451.2	8.1	0.001	18.969	0
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	98	0.98	1618.9	256.519	0.005	13.747	816.6
No.2 HFO Tank	123-131	98	0.98	2083.7	249.19	0.014	13.582	3006.4
HFO Tank (P)	43-57	98	0.98	406.9	41.471	-17.909	16.945	23.3
HFO Tank (S)	43-57	98	0.98	316.1	40.647	17.898	15.682	11.6
HFO Serv (P)	43-47	98	0.98	121.1	36	-17.949	21.349	15.5
HFO Serv (S)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	17.951	21.349	15.5
HFO Set (P)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	-17.949	21.349	15.5
HFO_Set (S)	43-47	98	0.98	121.1	36	17.951	21.349	15.5
Total LSHFO				4910	200.099	-0.324	14.816	3919.9
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	98	0.85	78.7	48.4	-17.949	21.349	10.1
MDO Stor (P)	62-66	98	0.85	163.2	51.2	-17.949	18.493	13.4

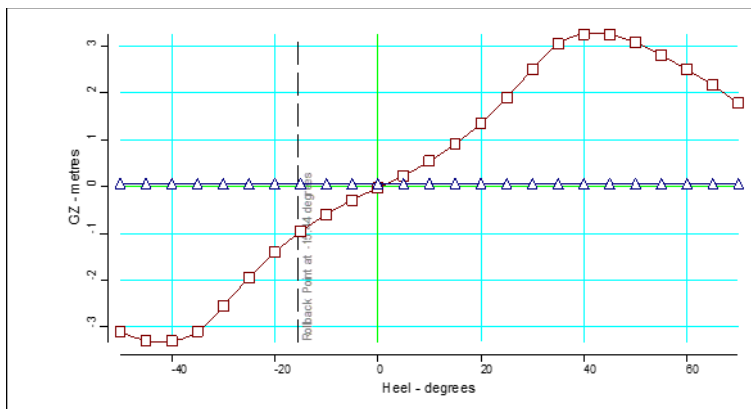
MDO Serv (S)	55-58	98	0.85	78.7	45.2	17.951	21.349	10.1
MDO Stor (S)	58-66	98	0.85	326.4	49.6	17.951	18.493	26.9
Total LSMDO				647	49.322	4.528	19.188	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	98	0.8	25.4	32	-17.948	23.848	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	98	0.8	25.4	30.4	-17.948	23.848	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	98	0.8	25.4	28.8	-17.948	23.848	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	98	0.8	50.9	31.2	17.952	23.848	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	98	0.8	50.9	28	17.952	23.848	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	98	0.8	38.2	22	17.952	23.848	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	98	0.8	50.9	24.8	17.952	23.848	12.7
Total OIL				267.1	27.829	7.695	23.848	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				90177.8	143.36	0.045	16.613	79657.1
Total Displacement				125146.5	136.094	0.033	16.56	79657.1
Buoyancy				125146.5	136.102	0.127	6.509	1696286.6
Total Buoyancy				125146.5	136.102	0.127	6.509	1696286.6

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	12.44	12.459	metres
Draft aft at marks	12.336	12.355	metres
Draft fwd at marks	12.561	12.58	metres
Draft at AP	12.336	12.355	metres
Draft at FP	12.561	12.58	metres
Mean draft at midships	12.449	12.468	metres

Density of water	1.026	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.53	degrees
Trim by the bow	0.226	metres
KG	16.56	metres
FSC	0.637	metres
KGf	17.197	metres
GMt	2.864	metres
BMt	13.554	metres
BMI	447.9	metres
Waterplane area	10877.43	sq.metres
LCG	136.094	metres
LCB	136.102	metres
TCB	0.127	metres
LCF	128.04	metres

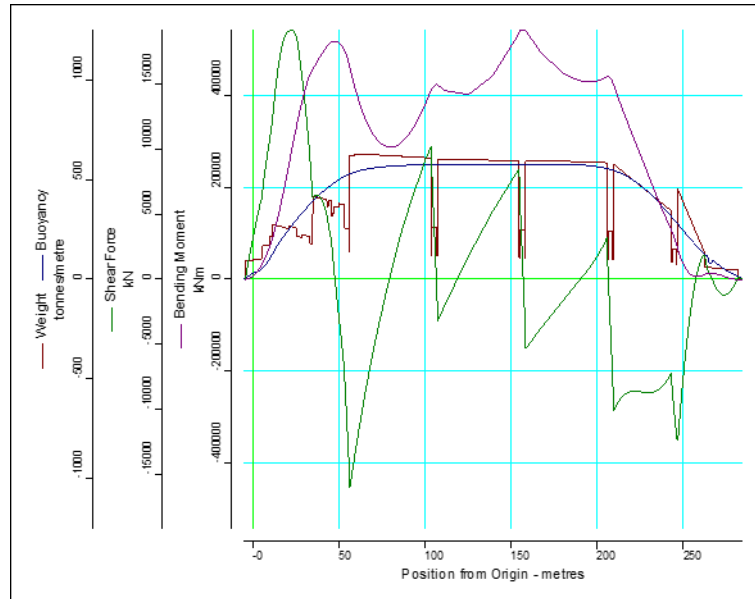
TCF	0.143	metres
TPC	111.494	tonnes/cm
MTC	2015.574	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	3.590	metres
Actual percentage immersion	143.248	%



#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.536	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.521	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.057	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	2.864	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	3.273	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	42.03	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	1.406	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	10.825	1

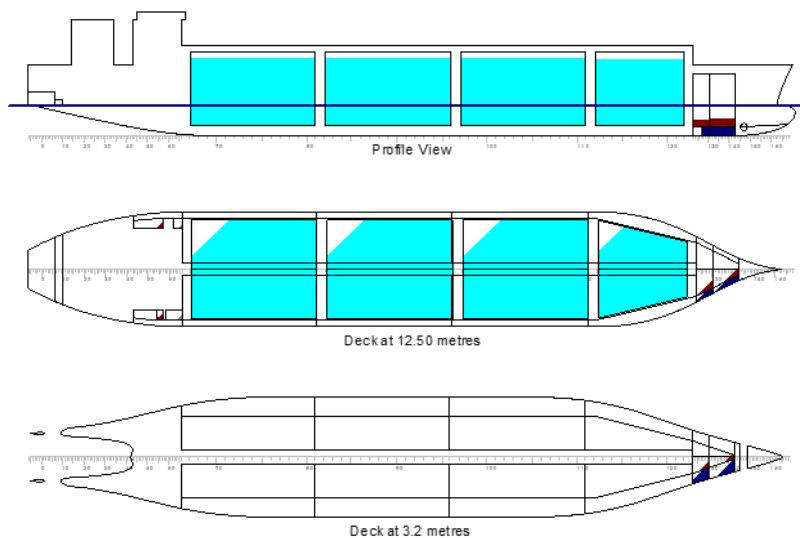
Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.58	--	0	-3.7
22.25	--	19136.6	278611.6
37.09	--	6463.2	474118.4
47.48	--	0	519586.4
56.13	--	-16019.8	463206.6
79.11	--	0	288187.4
103.37	--	10178.4	412780.3
106.44	--	0	424932.4
107.23	--	-3180.4	424407
118.6	--	0	407346.2
154.47	--	8466.6	538857.1
156.89	--	0	543921
158.33	--	-5322.8	542118.6
190.06	--	0	433531.6
205.57	--	3176.4	441558.4
206.36	--	0	441946.9
209.43	--	-10105.2	424507.7
229.4	--	-8704.2	229453.1
246.78	--	-12371	65666.7
257.19	--	0	6239.3
262.2	#143	1866.5	10494.8
266.87	--	0	12874.2
273.59	--	-1197.9	6420.9
281.27	--	0	-203.2
282	--	212.2	-155.5
Maximum BM			
157.8			544688.3

<i>Maximum SF</i>			
22.25		19136.6	

Full Load Arrival (LNG=0.460 [t/m³])



Title	Frames	% full	SG (t/m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	94.6	0.46	10901.3	224.519	0.001	16.02	9295.3
No.2 Cargo Tank	97-111	94.6	0.46	20251.8	181.949	0.001	16.219	31733
No.3 Cargo Tank	82-96	94.6	0.46	20251.8	130.849	0.001	16.219	31732.9
No.4 Cargo Tank	67-81	94.6	0.46	20251.8	79.749	0.001	16.219	31732.9
Total Cargo				71656.7	145.099	0.001	16.188	104494.1
<i>WB</i>								
Fore No.1 WB	131-143	35	1.025	651.3	257.29	0.004	3.599	2353.7
Fore No.2 WB	123-131	35	1.025	423.4	249.554	0.007	3.247	3127.8
Total WB				1074.7	254.242	0.005	3.46	5481.5
<i>FW</i>								
FW_DW: FW_DW	10-14	10	1	6.3	9.6	14.002	16.645	17.1
FW (P)	6-14	10	1	22.6	8.132	-15.089	16.689	139.1
FW (S)	6-14	10	1	16.3	7.431	15.631	16.71	97.1
Total FW				45.2	8.083	0.042	16.69	253.3
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	10	0.98	165.2	256.429	0.002	4.855	383.8
No.2 HFO Tank	123-131	10	0.98	212.6	249.132	0.007	4.707	1701.7
HFO Tank (P)	43-57	10	0.98	41.5	40.299	-17.794	11.335	44.8
HFO Tank (S)	43-57	10	0.98	32.3	40.31	17.79	11.217	44.2
HFO Serv (P)	43-47	10	0.98	12.4	36	-17.949	16.905	15.5
HFO Serv (S)	47-51	10	0.98	12.4	39.2	17.951	16.905	15.5
HFO Set (P)	47-51	10	0.98	12.4	39.2	-17.949	16.905	15.5

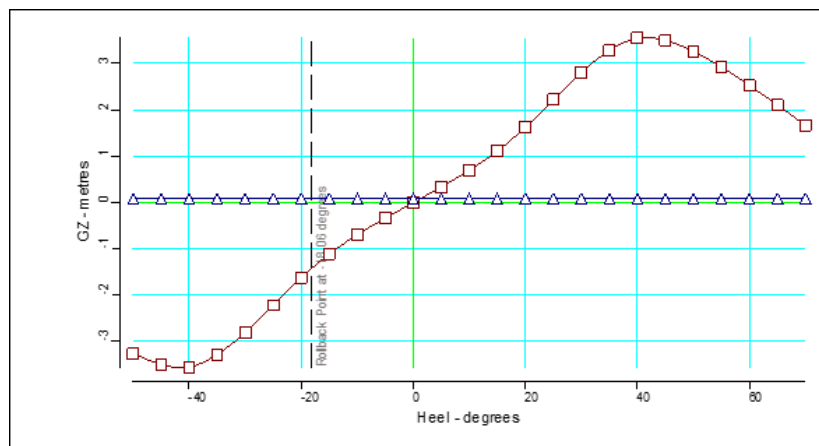
HFO_Set (S)	43-47	10	0.98	12.4	36	17.951	16.905	15.5
Total LSHFO				501.2	199.926	-0.326	6.927	2236.5
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	10	0.85	8	48.4	-17.949	16.905	10.1
MDO Stor (P)	62-66	10	0.85	16.7	51.2	-17.949	11.585	13.4
MDO Serv (S)	55-58	10	0.85	8	45.2	17.951	16.905	10.1
MDO Stor (S)	58-66	10	0.85	33.3	49.6	17.951	11.585	26.9
Total LSMDO				66	49.322	4.528	12.88	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	10	0.8	2.6	32	-17.948	21.56	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	10	0.8	2.6	30.4	-17.948	21.56	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	10	0.8	2.6	28.8	-17.948	21.56	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	10	0.8	5.2	31.2	17.952	21.56	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	10	0.8	5.2	28	17.952	21.56	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	10	0.8	3.9	22	17.952	21.56	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	10	0.8	5.2	24.8	17.952	21.56	12.7
Total OIL				27.3	27.829	7.695	21.56	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				74286.9	145.706	0.006	15.849	112592.3
Total Displacement				109255.6	136.632	0.004	16.033	112592.3
Buoyancy				109250.3	136.63	0.013	5.749	1651679.4
Total Buoyancy				109250.3	136.63	0.013	5.749	1651679.4

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	11.001	11.02	metres
Draft aft at marks	11.024	11.043	metres
Draft fwd at marks	10.975	10.994	metres
Draft at AP	11.024	11.043	metres
Draft at FP	10.975	10.994	metres
Mean draft at midships	10.999	11.018	metres

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.05	degrees
Trim by stern	0.05	meters
KG	16.033	metres
FSC	1.031	metres
KGf	17.064	metres
GMt	3.804	metres
BMt	15.118	metres
BMI	483.86	metres

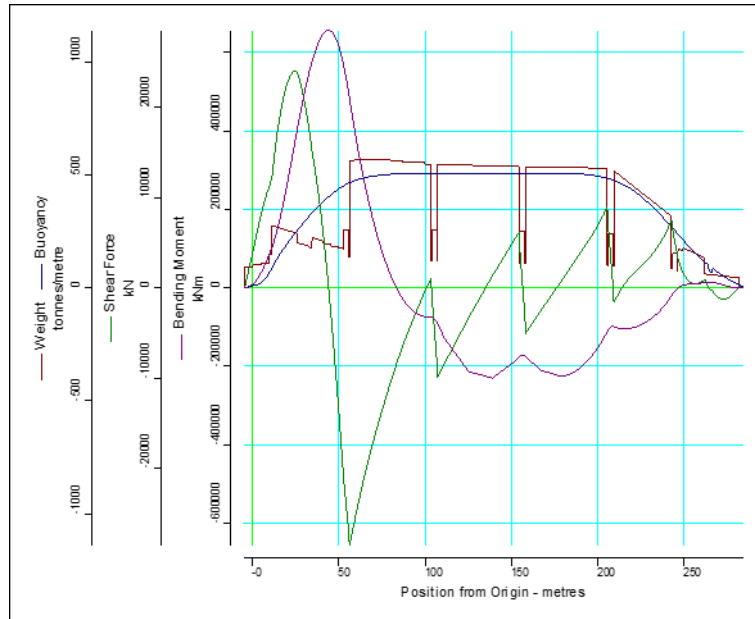
Waterplane area	10651.05	sq.metres
LCG	136.632	metres
LCB	136.63	metres
TCB	0.013	metres
LCF	130.404	metres
TCF	0.012	metres
TPC	109.173	tonnes/cm
MTC	1900.82	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	2.273	metres
Actual percentage immersion	127.391	%

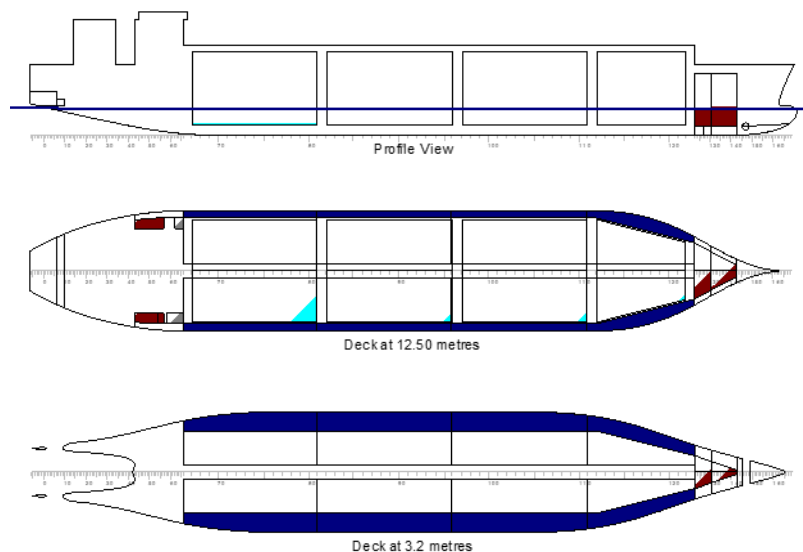


#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.645	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.568	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.212	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	3.804	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	3.573	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	41.355	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.845	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	7.546	1

Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.62	--	0	0
24.82	--	24051.7	378756.8
44.01	--	0	656244.4
56.13	--	-28570.4	483754.6
100.85	--	0	-73177.8
103.63	--	0	-73085
107.23	--	-9908.2	-91020.6
135.04	--	0	-224983
154.47	--	6179.3	-175585.3
156.62	--	0	-172589.6
158.33	--	-5056.8	-174571.6
176.24	--	0	-222105.8
205.57	--	8972.3	-111460.5
208.98	--	0	-98444.8
209.43	--	-1666.4	-98920
214.12	--	0	-104357.2
242.87	--	7497.2	-18924.3
262.2	#143	928	13684.7
264.21	--	0	14351.3
272.87	--	-1281.9	7170.9
281.27	--	0	-243.8
282	--	212.4	-182.2
<i>Maximum BM</i>			
44			656247.2
<i>Maximum SF</i>			
56.13		-28570.4	

Ballast Load Departure

Title	Frames	% full	SG	Weight	LCG	TCG	VCG	FSM
			(t/m3)	(t)	(m)	(m)	(m)	(t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	0.4	0.46	46.1	223.157	0.91	3.799	16258.2
No.2 Cargo Tank	97-111	0.4	0.46	85.7	179.923	1.599	3.798	53073.7
No.3 Cargo Tank	82-96	0.4	0.46	85.7	128.823	1.599	3.798	53073.7
No.4 Cargo Tank	67-81	3	0.46	642.5	79.465	0.251	4.204	62399.8
Total Cargo				860	102.095	0.555	4.101	184805.4
<i>WB</i>								
WB1: No.1 WB	111-123	100	1.025	12772.4	226.304	-0.001	12.893	0
WB2: No.2 WB	96-111	100	1.025	14606.5	180.314	0	8.852	0
WB3: No.3 WB	81-96	100	1.025	14787.2	129.45	0	8.765	0
WB4: No.4 WB	66-81	100	1.025	14182.2	79.035	0	9.043	0
Total WB				56348.3	151.9	0	9.793	0
<i>FW</i>								
FW_DW	10-14	100	1	62.7	9.6	14	18.85	0
FW (P)	6-14	100	1	225.6	8.1	-15.633	18.969	0
FW (S)	6-14	100	1	162.9	7.522	16.263	19.015	0
Total FW				451.2	8.1	0.001	18.969	0
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	35	0.98	578.2	256.491	0.004	7.674	816.5
No.2 HFO Tank	123-131	35	0.98	744.2	249.174	0.01	7.452	3006.1
HFO Tank (P)	43-57	98	0.98	406.9	41.47	-17.909	16.945	23.3
HFO Tank (S)	43-57	98	0.98	316.1	40.647	17.898	15.682	11.6
HFO Serv (P)	43-47	98	0.98	121.1	36	-17.95	21.349	15.5
HFO Serv (S)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	17.95	21.349	15.5
HFO Set (P)	47-51	98	0.98	121.1	39.2	-17.95	21.349	15.5

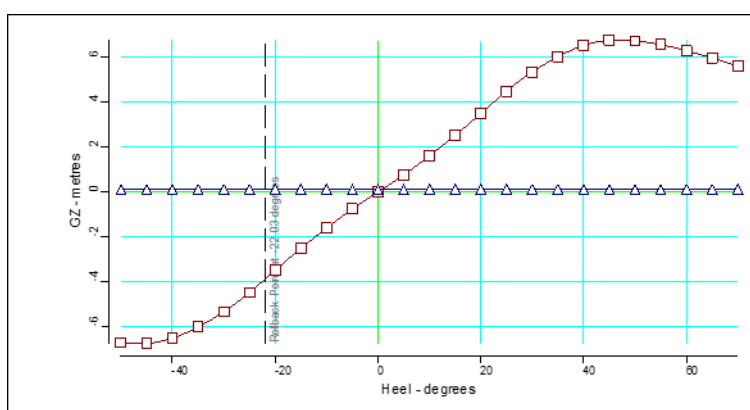
HFO_Set (S)	43-47	98	0.98	121.1	36	17.95	21.349	15.5
Total LSHFO				2529.8	150.88	-0.64	12.718	3919.5
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	50	0.85	40.2	48.4	-17.949	18.925	10.1
MDO Stor (P)	62-66	50	0.85	83.3	51.2	-17.95	14.725	13.4
MDO Serv (S)	55-58	50	0.85	40.2	45.2	17.951	18.925	10.1
MDO Stor (S)	58-66	50	0.85	166.5	49.599	17.95	14.725	26.9
Total LSMDO				330.2	49.322	4.528	15.747	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	98	0.8	25.4	32	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	98	0.8	25.4	30.4	-17.949	23.848	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	98	0.8	25.4	28.8	-17.949	23.848	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	98	0.8	50.9	31.2	17.951	23.848	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	98	0.8	50.9	28	17.951	23.848	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	98	0.8	38.2	22	17.951	23.848	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	98	0.8	50.9	24.8	17.951	23.848	12.7
Total OIL				267.1	27.828	7.693	23.848	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				61702.4	147.564	0.039	9.977	188851.9
Total Displacement				96671.1	136.636	0.025	12.31	188851.9
Buoyancy				96671.1	136.626	0.043	5.14	1617497.9
Total Buoyancy				96671.1	136.626	0.043	5.14	1617497.9

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	9.839	9.858	metres
Draft aft at marks	10.024	10.043	metres
Draft fwd at marks	9.637	9.656	metres
Draft at AP	10.024	10.043	metres
Draft at FP	9.637	9.656	metres
Mean draft at midships	9.83	9.849	metres

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.15	degrees
Trim by the stern	0.388	metres
KG	12.31	metres
FSC	1.954	metres
KGf	14.263	metres
GMt	7.705	metres
BMt	16.732	metres
BMI	526.666	metres

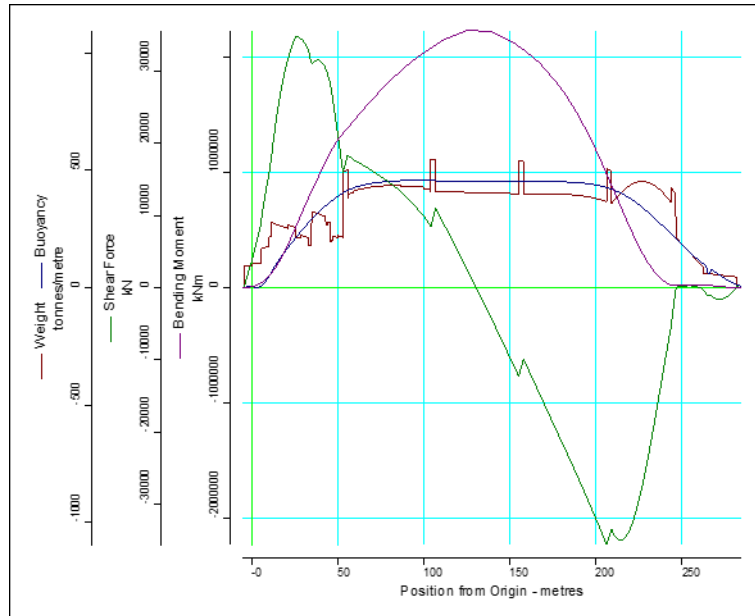
Waterplane area	10495.77	sq.metres
LCG	136.636	metres
LCB	136.626	metres
TCB	0.043	metres
LCF	132.786	metres
TCF	0.032	metres
TPC	107.582	tonnes/cm
MTC	1830.759	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	1.268	metres
Actual percentage immersion	115.271	%

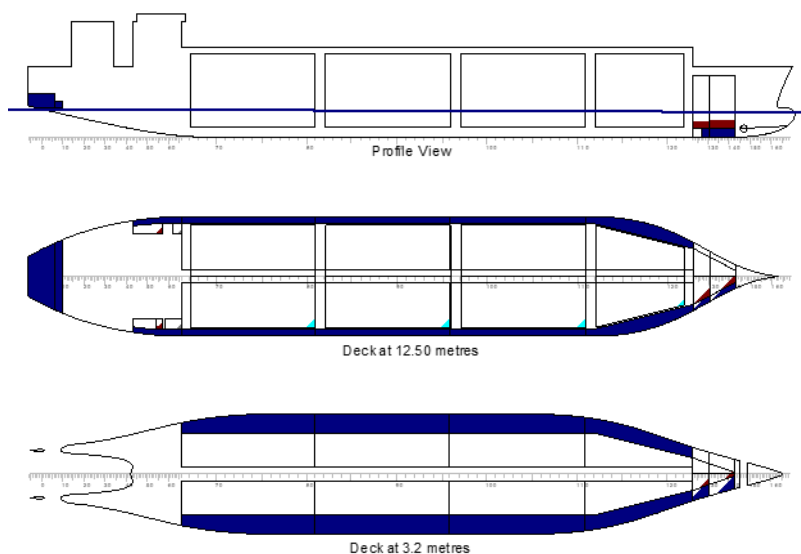


#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	1.34	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	1.038	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	2.379	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	7.705	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	6.718	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	46.42	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.608	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	4.636	1

Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
-4.62	--	0	0
25.6	#32	34848	532211.3
38.02	--	31536.3	943150.7
55.6	#67	18416.3	1382907.4
106.7	#82	10979.1	2100333.6
130.24	--	0	2224318.2
155	#96	-12299.7	2089888
206.1	#111	-35659.1	983265
214.23	--	-35027.7	704523.6
246.62	--	0	16242.5
251.8	#130	246.2	17963.3
254.07	--	259	18807.3
259.98	--	0	20457.6
271.91	--	-1622.6	9545.3
281.41	--	0	-257.9
282	--	184.8	-198.6
<i>Maximum BM</i>			
125.15			222785.8
<i>Maximum SF</i>			
206.1		-35659.1	

Ballast Load Arrival

Title	Frames	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (t-m)
<i>Cargo</i>								
No.1 Cargo Tank	112-122	0.4	0.46	46.1	221.694	0.158	3.802	16275.7
No.2 Cargo Tank	97-111	0.4	0.46	85.7	176.707	0.278	3.804	53073.7
No.3 Cargo Tank	82-96	0.4	0.46	85.7	125.607	0.278	3.804	53073.7
No.4 Cargo Tank	67-81	0.4	0.46	85.7	74.507	0.278	3.804	53073.7
Total Cargo				303.2	140.225	0.259	3.804	175496.8
<i>WB</i>								
No.1 WB	111-123	100	1.025	12772.4	226.304	-0.001	12.893	0
No.2 WB	96-111	100	1.025	14606.5	180.314	0	8.852	0
No.3 WB	81-96	100	1.025	14787.2	129.45	0	8.765	0
No.4 WB	66-81	100	1.025	14182.2	79.035	0	9.043	0
AFT WB	AE-17	100	1.025	1610.6	1.334	0.001	13.865	0
E/R WB (P)	43-66	100	1.025	926.7	43.937	-20.939	17.18	0
E/R WB (S)	43-66	100	1.025	926.7	43.937	20.939	17.18	0
Fore No.1 WB	131-143	40	1.025	744.4	257.344	0.002	4.152	1851.9
Fore No.2 WB	123-131	40	1.025	483.9	249.547	0.003	3.85	2674.4
Total WB				61040.6	146.709	0	10.009	4526.3
<i>FW</i>								
FW_DW: FW_DW	10-14	10	1	6.3	9.594	14.001	16.645	17.1
FW (P)	6-14	10	1	22.6	8.11	-15.089	16.689	139.1
FW (S)	6-14	10	1	16.3	7.409	15.62	16.71	97
Total FW				45.2	8.063	0.039	16.691	253.2
<i>LSHFO</i>								
No.1 HFO Tank	131-143	10	0.98	165.2	256.419	0.001	4.855	384.9
No.2 HFO Tank	123-131	10	0.98	212.6	249.128	0.004	4.707	1702.3
HFO Tank (P)	43-57	10	0.98	41.5	40.266	-17.793	11.335	44.9

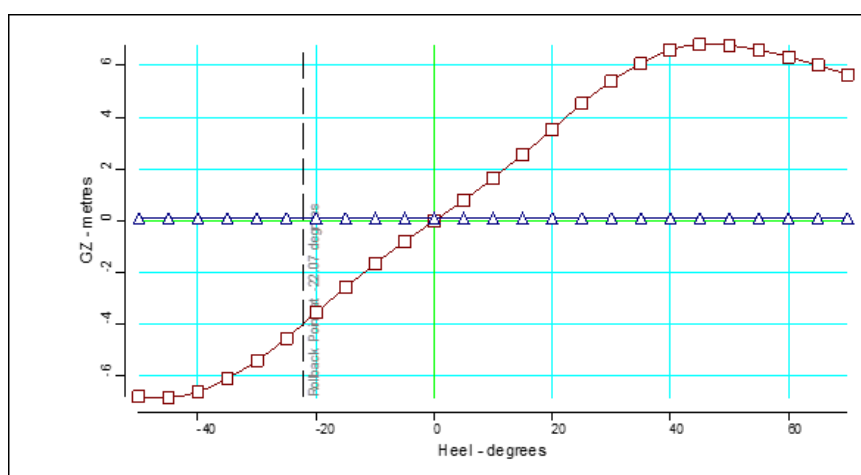
HFO Tank (S)	43-57	10	0.98	32.3	40.267	17.788	11.217	44.2
HFO Serv (P)	43-47	10	0.98	12.4	35.997	-17.949	16.905	15.5
HFO Serv (S)	47-51	10	0.98	12.4	39.197	17.95	16.905	15.5
HFO Set (P)	47-51	10	0.98	12.4	39.197	-17.949	16.905	15.5
HFO_Set (S)	43-47	10	0.98	12.4	35.997	17.95	16.905	15.5
Total LSHFO				501.2	199.915	-0.327	6.927	2238.3
<i>LSMDO</i>								
MDO Serv (P)	59-62	10	0.85	8	48.398	-17.949	16.905	10.1
MDO Stor (P)	62-66	10	0.85	16.7	51.198	-17.95	11.585	13.4
MDO Serv (S)	55-58	10	0.85	8	45.198	17.951	16.905	10.1
MDO Stor (S)	58-66	10	0.85	33.3	49.592	17.95	11.585	26.9
Total LSMDO				66	49.317	4.528	12.88	60.5
<i>OIL</i>								
LO GE (P)	39-41	10	0.8	2.6	31.998	-17.949	21.56	6.3
LO GE Stor No.1 (P)	37-39	10	0.8	2.6	30.398	-17.949	21.56	6.3
LO GE Stor No.2 (P)	35-37	10	0.8	2.6	28.798	-17.949	21.56	6.3
LO ME CYL No.1 (S)	37-41	10	0.8	5.2	31.194	17.951	21.56	12.7
LO ME CYL No.2 (S)	33-37	10	0.8	5.2	27.994	17.951	21.56	12.7
LO ME SYST Set (S)	26-29	10	0.8	3.9	21.997	17.951	21.56	9.5
LO ME SYST Stor (S)	29-33	10	0.8	5.2	24.794	17.951	21.56	12.7
Total OIL				27.3	27.824	7.694	21.56	66.5
<i>Const&Misc</i>								
				916.1	53.4	0	8.7	0
Total Const&Misc				916.1	53.4	0	8.7	0
Lightweight				34968.7	117.355	0	16.425	0
Deadweight				62899.1	145.489	0.007	9.948	182641.4
Total Displacement				97867.8	135.437	0.004	12.262	182641.4
Buoyancy				97865.1	135.411	0.007	5.201	1625989
Total Buoyancy				97865.1	135.411	0.007	5.201	1625989

	Moulded	Extreme	
Draft at LCF	9.951	9.97	metres
Draft aft at marks	10.428	10.447	metres
Draft fwd at marks	9.425	9.444	metres
Draft at AP	10.428	10.447	metres
Draft at FP	9.425	9.444	metres
Mean draft at midships	9.926	9.945	metres

Density of water	1.025	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.03	degrees
Trim by the stern	1.003	metres

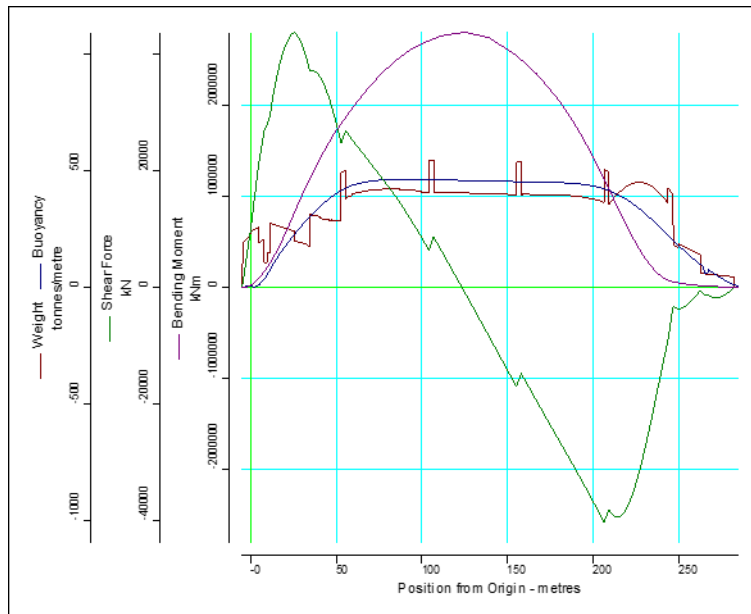
KG	12.262	metres
FSC	1.866	metres
KGf	14.129	metres
GMt	7.712	metres
BMt	16.615	metres
BMI	530.633	metres
Waterplane area	10562.43	sq.metres
LCG	135.437	metres
LCB	135.411	metres
TCB	0.007	metres
LCF	132.102	metres
TCF	0.006	metres
TPC	108.265	tonnes/cm
MTC	1867.33	tonnes-m/cm

Propeller tip immersion	1.660	metres
Actual percentage immersion	120.005	%



#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	1.374	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	1.054	0.03
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	2.428	0.09
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	7.712	0.15
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	6.806	0.2
6	Max GZ to be at an angle > 25 degrees	46.198	25
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.474	16
8	IMO Weather Criterion (Areas)	4.636	1

Condition complies with the regulations



Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
25.6	#32	43919.8	823761.6
35.74	--	37335.8	1238049.9
55.6	#67	26984.1	1874069.6
106.7	#82	8830.9	2739329.1
123.52	--	0	2811186.7
155	#96	-16996.3	2556773.5
206.1	#111	-40490.9	1197989
213.85	--	-39630.1	895824.5
249.66	--	-3790.8	52109.3
265.32	--	-1201.8	19422.8
271.41	--	-1702.6	10812.8
281.45	--	0	-239.5
282	--	175.7	-188
<i>Maximum BM</i>			
125.15			2816028.8
<i>Maximum SF</i>			
25.6		43919.8	

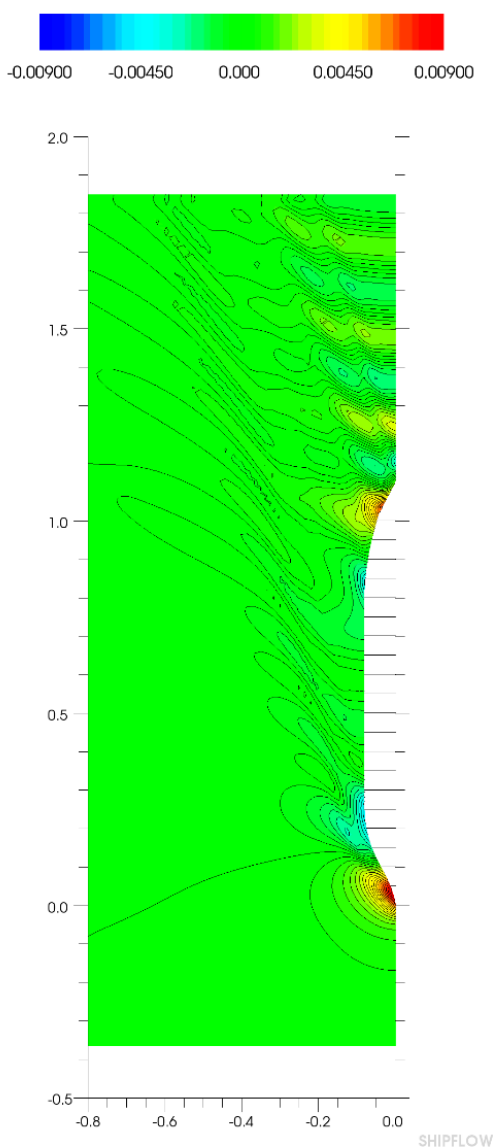
21. Παράρτημα Z – Αποτελέσματα Shipflow®

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη ταχύτητα σχεδίασης $V_s=19.5$ [knots] και αριθμό Froude $Fr=0.191$.

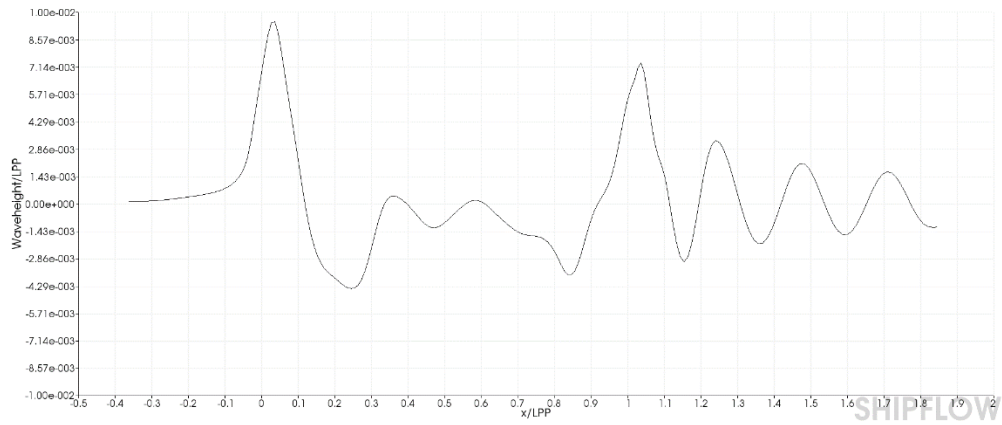
Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 42 - Παράμετροι SHIPFLOW

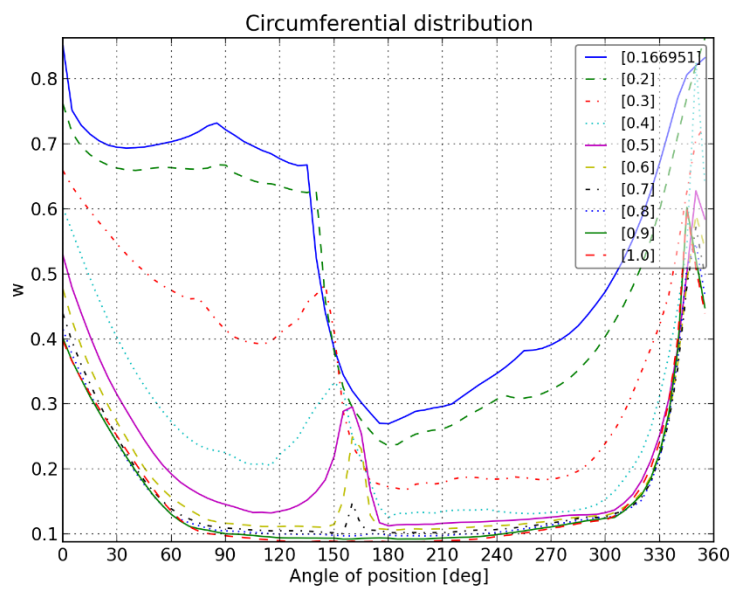
Πλέγμα	ZONAL
Αριθμός πάνελ (Ζώνη 1)	20,802.0
Αριθμός κελιών (Ζώνη 3)	1,735,344.0
Αρχή Ζώνης 3	139.05 [m]
Μοντέλο Τύρβης	EASM – Explicit Algebraic Stress Model
Απόσταση Y^+	1.0 (Target 0.7)



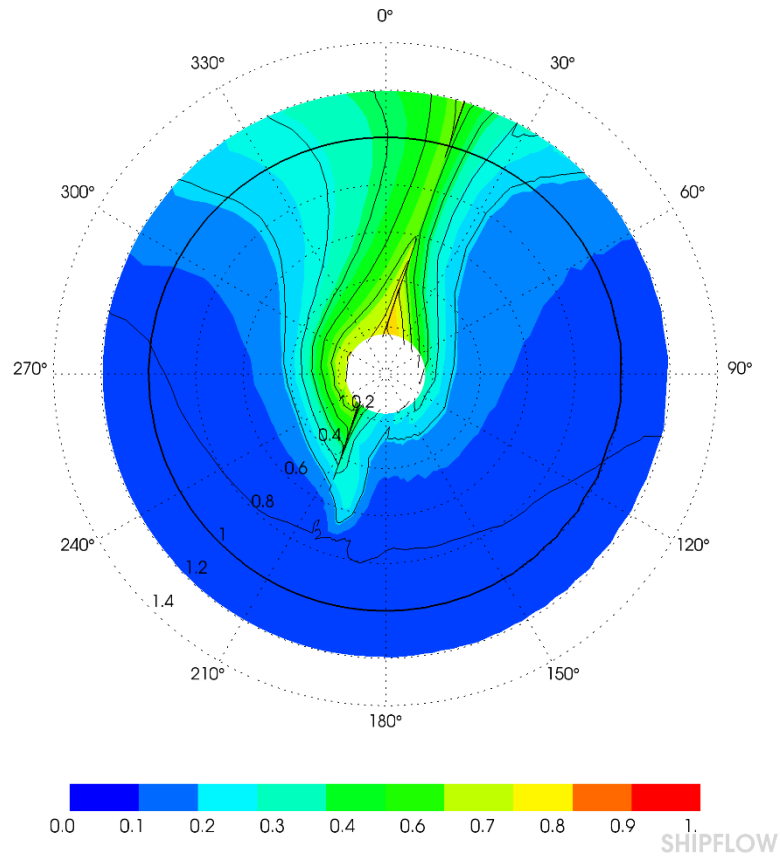
Εικόνα 66 - Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα 67 - Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα 68 - Κατανομή ποσοστού ομόρου στο δακτύλιο της έλικας



Εικόνα 69 - Ποσοστό ομόρου

22. Παράρτημα Η – Σχέδιο έλικας

