



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ
ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΤΙΩΝ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΣΕ
ΥΠΑΡΧΟΝ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΥΔΗΝ

DESK STRESS ANALYSIS STUDY FOR SAILS INSTALLATION IN
AN EXISTING BULK CARRIER

Συγγραφέας: Ιωάννης Μιτάκης MEng, Oly (Α.Μ.: 2012)

Επιβλέπων: Α. Θεοδουλίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

ΑΙΓΑΛΕΩ, 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

Διπλωματική εργασία:

Μελέτη αντοχής καταστρώματος για την εγκατάσταση ιστίων υποβοήθησης πρόωσης σε υπάρχον πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην.

Συγγραφέας:

Ιώαννης Μιτάκης MEng, Oly (Α.Μ.: 2012)

Επιβλέπων:

Δρ. Αλέξανδρος Θεοδουλίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

Ημερομηνία εξέτασης:

02/03/2022

Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Αλέξανδρος
Θεοδουλίδης, Επίκουρος
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Δρ. Κωσταντίνος Πολίτης,
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Δρ. Θωμάς Μαζαράκος,
Επίκουρος Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ιωάννης Μιτάκης του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 2012 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ιωάννης Μ. Μιτάκης

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες:

Στον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α. Δρ. Α. Θεοδουλίδη, για την ανάθεση και την επίβλεψη της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, καθώς και όσους βοήθησαν με τον οποιονδήποτε τρόπο στη διαμόρφωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Αιγάλεω, Μάρτιος 2022
Ιωάννης Μιτάκης MEng, Oly

Σύνοψη

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΤΙΩΝ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΣΕ ΥΠΑΡΧΟΝ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΥΔΗΝ

Ιωάννης Μιτάκης MEng, OLY

Επιβλέπων: Δρ. Α. Θεοδουλίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Κύριος στόχος της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας εκμετάλλευσης του ανέμου για υποβοήθηση της πρόωσης σύγχρονων εμπορικών πλοίων. Θα μελετηθεί η εφαρμογή ιστιοφορίας σε υπάρχον πλοίο Bulk Carrier με έμφαση στην απαιτούμενη ενίσχυση του καταστρώματος στην περιοχή έδρασης των ιστών.

Αναλυτικότερα θα γίνει υπολογισμός των δυνάμεων άωσης και οπισθέλκουσας για ένα εύρος τιμών πλεύσης που μπορεί να ταξιδέψει ένα πλοίο και στη συνέχεια θα παραχθεί η τρισδιάστατη απεικόνιση ενός μέρους του καταστρώματος χρησιμοποιώντας το λογισμικό Inventor Professional 2022 και θα γίνει έλεγχος της αντοχής της κατασκευής.

Λέξεις – κλειδιά: Εμπορικό πλοίο, Οπισθέλκουσα δύναμη, Δύναμη άωσης, Δύναμη πρόωσης, Φαινόμενο Magnus, Τρισδιάστατη σχεδίαση, Ιστία

Abstract

DESK STRESS ANALYSIS STUDY FOR SAILS INSTALLATION IN AN EXISTING BULK CARRIER

Ioannis Mitakis MEng, OLY

Supervisor: Dr. A. Theodoulidis, Assistant Professor UN.W.A.

The main objective of this Master Thesis is to explore the possibility of exploiting the wind to assist the propulsion of modern merchant ships. The application of sails on an existing Bulk Carrier ship will be studied with emphasis on the required deck reinforcement in the mast - bearing area.

The Lift and Drag forces will be calculated in detail for a range of wind angles that a ship can sail and then 3D representation of a part of the deck will be simulated with Inventor Professional 2022 software to check the strength ability of the construction.

Keywords: Keywords: Bulk Carrier, Drag force, Lift force, Thrust force, Magnus effect, 3D design, Sails

Περίληψη Εργασίας

Προκειμένου να προχωρήσουμε προς την εποχή μιας κοινωνίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, είναι απαραίτητη η δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ από μεγάλα εμπορικά πλοία που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ορυκτού πετρελαίου. Έτσι, μια αλλαγή ενεργειακής πηγής για την πρόωση του πλοίου είναι απολύτως απαραίτητη για την επόμενη γενιά εμπορικών πλοίων. Οι πιθανές ενεργειακές πηγές μπορεί να είναι ο άνεμος, η πυρηνική ενέργεια, οι μπαταρίες, το βιοκαύσιμο κλπ. Από την άποψη της βιωσιμότητας και ενεργειακού κόστους, είναι σαφές ότι η ωκεάνια αιολική ενέργεια που είναι ελεύθερη, είναι πιθανότατα η καλύτερη λύση για την πρόωση πολύ μεγάλων εμπορικών πλοίων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προέκυψε το αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας και η αναγκαιότητα του ελέγχου των υπάρχων ενισχυτικών στην έδραση των γερανών σε Bulk Carrier ώστε να ελεγχθεί η αντικατάσταση τους με ιστία. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε η ανάγκη διερεύνησης των ιστίων καθώς η χρήση των Rotors έχει ήδη μελετηθεί από το 1852.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα σχεδιαστικά προγράμματα απεικόνισης για την καλύτερη και πιο ενδελεχή εξέταση του προβλήματος. Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την τρισδιάστατη ανάλυση είναι το Inventor Professional 2022 με τη χρήση του οποίου παράγονται παραμετρικά μοντέλα και προσομοίωση των παραμορφώσεων με τις εκάστοτε φορτίσεις.

Από τις προσομοιώσεις για δυσμενή ένταση ανέμου υπό ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης, προκύπτει ότι παρέχεται επαρκής ενίσχυση στο κατάστρωμα του πλοίου. Προτείνεται όμως, να γίνει η αντικατάσταση των γερανών με ιστία, μετά από διερεύνηση.

Περιεχόμενα

<u>Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή.....</u>	<u>1</u>
1.1 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ	3
1.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	3
1.1.2 Ορισμός Ιστιοφόρων και Ιστιοπλοϊκών σκαφών.....	5
1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ	6
1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
1.4 ΣΤΑΔΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
1.5 ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
<u>Κεφάλαιο 2^ο : Ο Μηχανισμός Λειτουργίας των Ιστίων.....</u>	<u>15</u>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	17
2.2 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ BERNOULLI	18
2.3 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΙΣΤΙΑ	19
2.3.1 Αποκόλληση της ροής	20
2.3 ΣΥΝΟΨΗ.....	21
<u>Κεφάλαιο 3^ο : Φαινόμενο Magnus.....</u>	<u>23</u>
3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MAGNUS	25
3.2 FLETTNER ROTORS	26
3.2.1 Ιστορικά στοιχεία.....	26
3.2.2 Φαινόμενο Magnus και σχεδιασμός Rotors.....	26
3.2.3 Υπολογισμός Δυνάμεων Lift και Drag	28
3.3 ΣΥΝΟΨΗ.....	30
<u>Κεφάλαιο 4^ο : Bulk Carriers</u>	<u>31</u>
4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ	33
4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	33
4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	34
4.3.1 Κατηγορίες μεγέθους	34

4.3.2	Κατηγορίες περιοχής.....	35
4.4	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ.....	37
4.5	ΣΥΝΟΨΗ.....	37
<u>Κεφάλαιο 5° : Σχεδιασμός Ιστιοφορίας & Μεθοδολογία Υπολογισμού</u>		39
5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	41
5.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ LIFT ΚΑΙ DRAG.....	42
5.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ.....	44
5.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΙΣΤΙΟΦΟΡΙΑΣ.....	45
5.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΙΣΤΙΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ.....	45
5.6	ΣΥΝΟΨΗ.....	47
<u>Κεφάλαιο 6° : Σχεδιασμός Ιστιοφορίας & Μεθοδολογία Υπολογισμού</u>		49
6.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	51
6.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ AUTODESK INVENTOR.....	52
6.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΡΟΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ.....	55
6.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ INVENTOR.....	60
6.5	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	64
6.6	ΣΥΝΟΨΗ.....	66
<u>Κεφάλαιο 7° : Συμπεράσματα.....</u>		69
7.1	ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	71
7.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	71
<u>Βιβλιογραφία - Αναφορές.....</u>		73
<u>Παράρτημα Α: Αναλυτικά Σχέδια Πλοίου.....</u>		75
<u>Παράρτημα Β: Απεικονίσεις Τάσεων Von Mises και Μετατοπίσεων.....</u>		85
<u>Παράρτημα Γ: Σχέδια μοντέλου.....</u>		95

Κατάλογος Εικόνων, Σχημάτων, Πινάκων & Διαγραμμάτων

Εικόνες

Εικόνα 1.1: Αντίγραφο της αρχαίας Αθηναϊκής τριήρους	4
Εικόνα 1.2: Βρετανικό πολεμικό πλοίο, γαλέρα, του 18 ^{ου} αιώνα	5
Εικόνα 1.3: Ειδικές περιοχές σύμφωνα με την MARPOL	6
Εικόνα 2.1: Αρχαίας Αθηναϊκής τριήρης	17
Εικόνα 2.2: Ροή ιδανικού ρευστού σε σωλήνα	18
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση υποπίεσης σε Naca σε πεδίο ροής	19
Εικόνα 2.4: Απεικόνιση πίεσης και υποπίεσης σε Naca σε πεδίο ροής με κατάλληλη γωνία προσβολής	19
Εικόνα 2.5: Απεικόνιση αποκόλλησης της ροής σε naca σε πεδίο ροής	21
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση φαινομένου Magnus σε μπάλα	25
Εικόνα 3.2: Το Buckau ήταν το πρώτο πλοίο που χρησιμοποίησε Flettner Rotors	26
Εικόνα 3.3: Απεικόνιση φαινομένου Magnus σε Flettner Rotors	28
Εικόνα 4.1: Το Velemax είναι το μεγαλύτερο Bulk carrier για το 2021	36
Εικόνα 5.1: Shin - Aitoku Maru	41
Εικόνα 5.2: Beluga Sky Sail	42
Εικόνα 6.1: Μοντελοποίηση τμήματος του καταστρώματος	54
Εικόνα 6.2: Δισδιάστατο σχέδιο καταστρώματος	55
Εικόνα 6.3: Δισδιάστατο σχέδιο βολβολάμας	55
Εικόνα 6.4: Δισδιάστατο σχέδιο Flat Bar	56
Εικόνα 6.5: Δισδιάστατο σχέδιο (15)600/(15)200	56
Εικόνα 6.6: Δισδιάστατο σχέδιο (13.5)900/(16)250	57
Εικόνα 6.7: Δισδιάστατο σχέδιο (13.5)/(15)200	57
Εικόνα 6.8: Δισδιάστατο σχέδιο (20)/(28)250	58
Εικόνα 6.9: Μοντελοποίηση φράχτης	58
Εικόνα 6.10: Μοντελοποίηση βάσης	59
Εικόνα 6.11: Μοντελοποίηση βάσης ιστού	59
Εικόνα 6.12: Εξεταζόμενο μοντέλο καταστρώματος	60
Εικόνα 6.13: Μενού επιλογής υλικού στο Inventor	61
Εικόνα 6.14: Μενού επιλογής συγκεντρωμένων φορτίων στο Inventor	62

Εικόνα 6.15: Έδραση με πακτώσεις και εφαρμογή συγκεντρωμένων φορτίων στο μοντέλο	62
Εικόνα 6.16: Μενού επιλογής Find Thin Bodies στο Inventor	63
Εικόνα 6.17: Πλέγμα στο υπό εξέταση μοντέλο στο Inventor.....	64
Εικόνα 6.18: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 10°	65
Εικόνα 6.19: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 40°	66
Εικόνα Π1.1: Γενική διάταξη πλοίου	77
Εικόνα Π1.2: Μέση τομή πλοίου (Cargo No.2)	78
Εικόνα Π1.3: Μέση τομή πλοίου (Cargo No.3)	79
Εικόνα Π1.4: Μέση τομή πλοίου (Cargo No.4)	80
Εικόνα Π1.5: Προφίλ και καταστρώματα	81
Εικόνα Π1.6: Σχέδια Transverse και Cross Deck (1)	82
Εικόνα Π1.7: Σχέδια Transverse και Cross Deck (2)	83
Εικόνα Π1.8: Σχέδια Transverse και Cross Deck (3)	84
Εικόνα Π2.1: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 10°	87
Εικόνα Π2.2: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 10°	87
Εικόνα Π2.3: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 20°	88
Εικόνα Π2.4: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 20°	88
Εικόνα Π2.5: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 30°	89
Εικόνα Π2.6: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 30°	89
Εικόνα Π2.7: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 40°	90
Εικόνα Π2.8: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 40°	90
Εικόνα Π2.9: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 50°	91
Εικόνα Π2.10: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 50°	91
Εικόνα Π2.11: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 60°	92
Εικόνα Π2.12: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 60°	92
Εικόνα Π2.13: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 70°	93
Εικόνα Π2.14: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 70°	93
Εικόνα Π2.15: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 80°	94
Εικόνα Π2.16: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 80°	94

Σχήματα

Σχήμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της Μεταπτυχιακής Εργασίας	11
Σχήμα 5.1: Διάφορες πλευσείς ιστιοπλοΐας και η επίδραση των Lift και Drag	43

Σχήμα 5.2: Φαινόμενος άνεμος και πρόωση.....	44
--	----

Πίνακες

Πίνακας 4.1: Κύριες κατηγορίες μεγεθών Bulk Carriers	35
Πίνακας 5.1: Δυνάμεις Lift και Drag για AWS 15 m/s.....	46
Πίνακας 6.1: Μέγιστες δυνάμεις και μετατοπίσεις ανά γωνιά πρόσπτωσης ανέμου ..	65

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1.1: Ανώτατα επιτρεπτά όρια οξειδίων του θείου	7
Διάγραμμα 1.2: Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου – συνθήκες Tier	7
Διάγραμμα 1.3: Απεικόνιση των 3 φάσεων του δείκτη EEDI	8

Συντομογραφίες

AWS: Apparent Wind Speed (Φαινόμενος Άνεμος)

CAD: Computer Aided Design

DWT: Deadweight Tonnage

ECA: Emission Control Area

EEDI: Energy Efficiency Design Index

FEA: Finite Element Analysis

IMO: International Marine Organization

LOA: Length Overall

MARPOL: The International Convention for Prevention of Marine Pollution For Ships

OBO: Ore – Bulk – Oil

O/O: Ore – Oil

SECA: Sulphur Emission Control Area

ULBC: Ultra Large Bulk Carrier

ULCC: Ultra Large Crude Carrier

ULOC: Ultra Large Ore Carrier

VLBC: Very Large Bulk Carrier

VLCC: Very Large Crude Carrier

VLOC: Very Large Ore Carrier

Λέξεις

Drag: Οπισθέλκουσα Δύναμη

Lift: Δύναμη Άνωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

Εισαγωγή

1.1 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΑΝΙΩΝ

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα ιστία είναι μια από τις αρχαιότερες ανακαλύψεις του ανθρώπου και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Η πρόωση με ιστία αποτέλεσε το βασικότερο μέσο πρόωσης για μια σημαντική περίοδο της ναυτικής ιστορίας. Η ιστορία του ξεκίνησε στα μέσα της τέταρτης χιλιετίας π.Χ. αλλά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα μ.Χ., εμφανίστηκε άξιος αντικαταστάτης του, ο ατμός. Χρειάστηκαν αρκετά χρόνια, πάνω από 100, για να φανεί η υπεροχή των μηχανών και να κερδίσουν από το πανί, την κυρίαρχη θέση στα μέσα πρόωσης των πλοίων. Παρά την κυριαρχία των μηχανών, η τέχνη της ιστιοπλοΐας δεν εξαφανίστηκε, αλλά αντίθετα εξελίχτηκε. Σήμερα, τα ιστία συνεχίζουν να κυριαρχούν σε ένα τομέα σκαφών τα ιστιοπλοϊκά σκάφη.¹

Η τέχνη της ιστιοπλοΐας είναι εμφανής σχεδόν από την αρχή της γραπτής ιστορίας. Ήδη το 3300 π.Χ. υπάρχουν απεικονίσεις πλωτών με ιστία σε βράχους στην κοιλάδα του Νείλου. Πληρώματα από δυνατούς κωπηλάτες ήταν η σύγχρονη για την εποχή κινητήριος δύναμη και το σκάφος διευθυνόταν με ένα ή περισσότερα μεγάλα κουπιά, στην πρύμνη του σκάφους.

Έτσι το 2000 π.Χ. κάνει την εμφάνιση του το μονό κατάρτι, στη μορφή που το ξέρουμε μέχρι και σήμερα καθώς βελτιώνεται το σύστημα πηδαλιουχίας. Αν και τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφή του πλοίου παραμένουν σταθερά, η εξέλιξη των ιστιοφόρων είναι συνεχής καθώς αναπτύσσεται παράλληλα και η τέχνη της ναυτιλίας.

Με την πάροδο του χρόνου, τα ιστιοφόρα συνεχώς εξελίσσονται τόσο σε μέγεθος όσο και σε επιχειρησιακές ικανότητες. Γίνεται και ένας μεγάλος διαχωρισμός σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα εμπορικά και τα πολεμικά. Παρά όλες όμως τις θεαματικές βελτιώσεις, είναι πάντα εξοπλισμένα και με κουπιά.

¹ Γ.Γρηγορόπουλος, Σ.Περισσάκης, Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Μικρών Σκαφών Ι», («Παιδεία Μπροστά», 2ο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης)

Την κατοχή του μεγαλύτερου μέρους των τότε γνωστών θαλασσών είχαν αρχικά οι Φοίνικες μετά οι Έλληνες και αργότερα οι Ρωμαίοι αναπτύσσοντας τόσο τα πολεμικά όσο και τα εμπορικά ιστιοφόρα. Η πρόωση με κουπιά περιορίζεται σημαντικά, χωρίς όμως να εγκαταλειφθεί πλήρως. Η πρόωση με κουπιά για την περίπτωση που δεν υπήρχε ικανοποιητικός για την πρόωση των πλοίων, ήταν ένα σύνηθες φαινόμενο.



Εικόνα 1.1: Αντίγραφο της αρχαίας Αθηναϊκής τριήρους.²

Ο Μεσαιώνας ήταν μια περίοδος που παρουσιάστηκαν αρκετές εξελίξεις κυρίως στα πολεμικά πλοία, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και την αντοχή τους, χωρίς όμως να αλλάξει κάτι σημαντικό. Η πιο χαρακτηριστική βελτίωση που αποτέλεσε ορόσημο ήταν η εμφάνιση του πηδαλιού της πρύμνης, η οποία μάλιστα δεν εμφανίστηκε πρώτα στο Βορρά.³

Κατά τον 15^ο αιώνα, έγινε η εξάπλωση των τρικάταρτων ιστιοφόρων από την περιοχή της Μεσογείου σε όλο τον κόσμο. Η κλασική πλέον μορφή των ιστιοφόρων της εποχής είχε ένα κεντρικό μεγάλο κατάρτι και δύο μικρότερα εκατέρωθεν αυτού. Μέχρι και τον 17^ο αιώνα, η ανάπτυξη και η εξέλιξη ήταν αδιάκοπη. Η εξέλιξη του ανθρώπου στις

² <https://hellasjournal.com/2019/05/sta-nera-toy-saronikoy-i-triiris-olympias-me-kopilates-polites-gia-4o-syneches-kalokairi/>

³ Γ.Γρηγορόπουλος, Σ.Περισσάκης, Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Μικρών Σκαφών Ι», («Παιδεία Μπροστά», 2ο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης)

επιστήμες τον κάνει να εκμεταλλευτεί τον πλάγιο άνεμο και σιγά σιγά εγκαταλείπουν τα κουπιά.

Τον 17^ο και 18^ο αιώνα, οι εμπορικές χώρες όπως Πορτογαλία, Γαλλία, Ολλανδία, Αγγλία, Δανία και Σουηδία, ανταγωνίζονται μεταξύ τους, για την ανάπτυξη εμπορικών σχέσεων με την Ινδία, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί η κατασκευή νέων και καλύτερων πλοίων τόσο εμπορικών όσο και πολεμικών

Η καθιέρωση της χρήσης του φλόκου, ενός τριγωνικού πανιού, τόσο σε μικρά όσο και σε μεγάλα σκάφη, έπαιξε σημαντικό ρόλο ώστε να μεγαλώσει η ιστιοφορία στα σκάφη, και να εκμεταλλευτούν ακόμα περισσότερο τον άνεμο. Τέλος καθιερώθηκε και η αυξομείωση της επιφάνειας των πανιών, ανάλογα με την ένταση του ανέμου με την τεχνική του μουδαρίσματος.



Εικόνα 1.2: Βρετανικό πολεμικό πλοίο, γαλέρα, του 18^{ου} αιώνα.⁴

Το 1775, το πρώτο επιτυχημένο ταξίδι ενός σκάφους που κινήθηκε με ατμό, σημάδεψε την αρχή του τέλους της εποχής του πανιού.⁵

⁴ https://www.mozaweb.com/el/Extra-Montela_3D-Aggliko_polemiko_ploio_18os_aiwnas-109437

⁵ Γ.Γρηγορόπουλος, Σ.Περισσάκης, Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Μικρών Σκαφών Ι», («Παιδεία Μπροστά», 2ο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης)

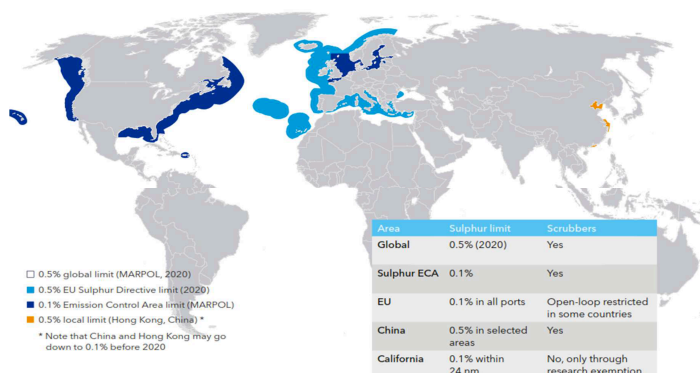
1.1.2 Ορισμός Ιστιοφόρων και Ιστιοπλοϊκών σκαφών

Ιστιοφόρο σκάφος ορίζεται το σκάφος το οποίο φέρει πανιά με σκοπό την παραγωγή δύναμης κατάλληλης για πρόωση.⁶

Μια μεγάλη κατηγορία ιστιοφόρων, είναι τα ιστιοπλοϊκά σκάφη. Ετυμολογικά η διαφορά τους από το γενικότερο ορισμό των ιστιοφόρων είναι δυσδιάκριτη: τα μεν «φέρουν πανιά», τα δε «πλέουν με πανιά». Όμως έχει επικρατήσει να θεωρούνται ιστιοπλοϊκά τα ιστιοφόρα σκάφη που χρησιμοποιούνται για αγώνες ή αναψυχή, τα οποία χρησιμοποιούν τον άνεμο ως κύριο μέσο πρόωσης και με κατάλληλο εξοπλισμό, μπορούν να πλέουν με γωνία μικρότερη των 90 μοιρών αντίθετα στη διεύθυνση του ανέμου. Ιστιοφόρα όχι ιστιοπλοϊκά, θεωρούνται τα σκάφη που είναι σχεδιασμένα να έχουν τα πανιά ως βοηθητικό σύστημα πρόωσης.

1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ

Σύμφωνα με την MARPOL, έχουν ληφθεί συγκεκριμένα μέτρα σχετικά με την πρόληψη της μόλυνσης, τον έλεγχο μόλυνσης από επιβλαβείς υγρές ουσίες όπως επίσης και την πρόληψη μόλυνσης από ρύπους πλοίων. Για το συγκεκριμένο σκοπό έχουν οριοθετηθεί ορισμένες ειδικές περιοχές ελέγχου εκπομπών ρύπων, στις οποίες έχουν υιοθετηθεί ειδικές μέθοδοι πρόληψης της μόλυνσης.⁷



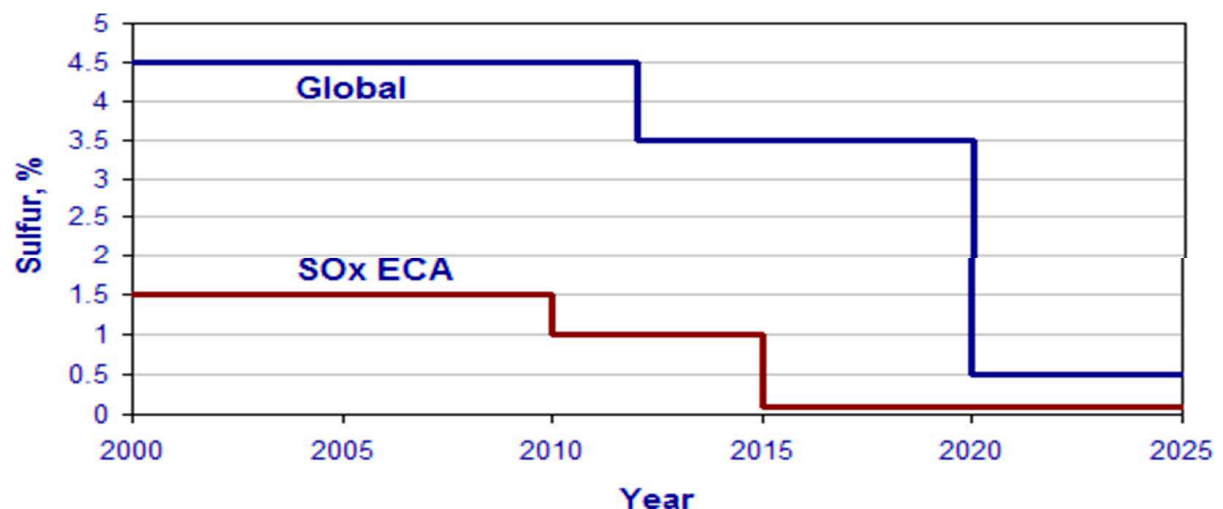
Εικόνα 1.3: Ειδικές περιοχές σύμφωνα με την MARPOL.⁸

⁶ Γ.Γρηγορόπουλος, Σ.Περισσάκης, Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Μικρών Σκαφών Ι», (‘‘Παιδεία Μπροστά’’, 2ο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης)

⁷ <https://www.marpol-annex-vi.com/emissions/co2-emissions/>

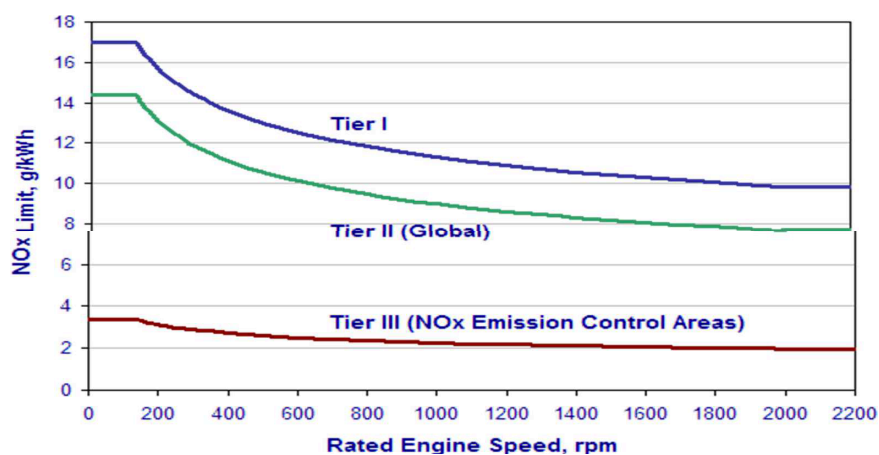
⁸ <https://seos-project.eu/marinepollution/marinepollution-c01-s01-p02.gr.html>

Ο IMO μέσω της MARPOL, ορίζει το ανώτατο επιτρεπτό επίπεδο οξειδίων του θείου, το οποίο εκπέμπεται από τα πλοία. Ο στόχος μακροπρόθεσμα, είναι ο περιορισμός των εκπομπών οξειδίων του θείου.⁹



Διάγραμμα 1.1: Ανώτατα επιτρεπτά όρια οξειδίων του θείου.⁹

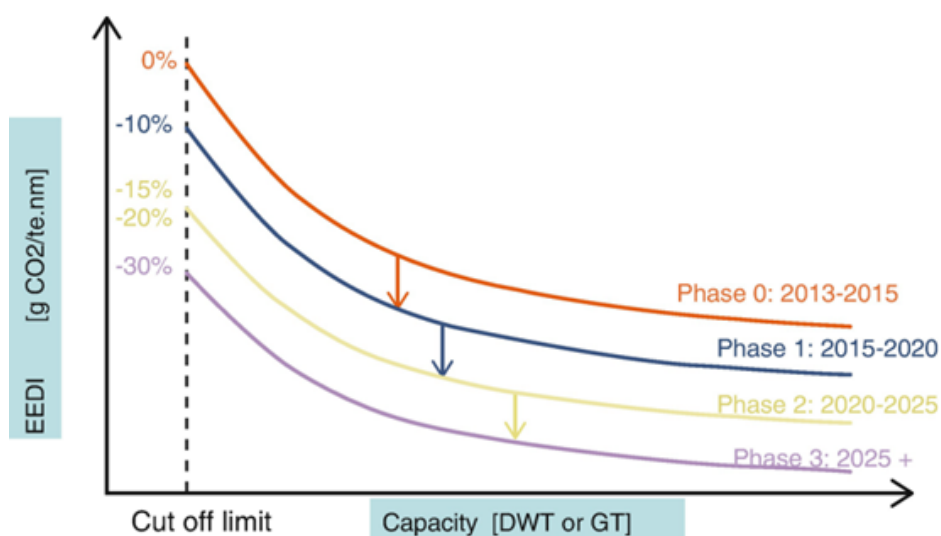
Εκτός από τα οξείδια του θείου, υπάρχουν και τα οξείδια του αζώτου, τα οποία επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα. Τα όρια εκπομπών εξαρτώνται από την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα diesel του πλοίου και καθορίζονται από τις συνθήκες Tier I και II. Η συνθήκη Tier III αναφέρεται συγκεκριμένα στις εκπομπές αζώτου, στις ελεγχόμενες περιοχές. Με την αύξηση του ρυθμού λειτουργίας των μηχανών ενός πλοίου, τα όρια μειώνονται με μικρό ρυθμό.



Διάγραμμα 1.2: Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου – συνθήκες Tier.⁹

⁹ <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/03-1-March-carriage-ban-.aspx>

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός συμφώνησε το 2011 σε ένα πρότυπο σχεδιασμού, γνωστό ως Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI), το οποίο θα εφαρμόζεται σε πλοία που κατασκευάστηκαν από το 2013 και έπειτα.¹⁰ Το πρότυπο έχει μια γραμμή βάσης η οποία έχει προκύψει από τη μέση απόδοση των πλοίων που κατασκευάστηκαν μεταξύ του 1999 – 2009 και καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα εκπεμπόμενου CO₂ ανά τύπο και μέγεθος πλοίου προκειμένου να εκτελέσει μια μονάδα μεταφορικού έργου (π.χ. gCO₂/τόνο – μίλι). Για να δοθεί κίνητρο στη μελλοντική αποδοτικότητα του σχεδιασμού νέων πλοίων, ο κανονισμός του IMO θέτει τρεις στόχους, γνωστούς ως φάσεις, καθένας από τους οποίους απαιτεί σταδιακά να καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια (και επομένως CO₂) για την εκτέλεση του ίδιου μεταφορικού έργου. Οι στόχοι λοιπόν, του EEDI για τα νέα πλοία είναι ότι αυτά που κατασκευάστηκαν μεταξύ 2013 – 2015 πρέπει να έχουν σχεδιαστική απόδοση τουλάχιστον ίση με τη γραμμή βάσης. Κατά τη διάρκεια της φάσης 1 – τα πλοία που κατασκευάστηκαν μεταξύ 2015 – 2020 πρέπει να έχουν σχεδιαστική απόδοση, τουλάχιστον 10% κάτω από τη γραμμή αναφοράς. Στη φάση 2 τα πλοία που θα κατασκευαστούν μεταξύ 2021 – 2025 πρέπει να έχουν απόδοση σχεδιασμού, τουλάχιστον 20% κάτω από τη γραμμή αναφοράς και τέλος στη φάση 3, τα πλοία που θα κατασκευαστούν μετά το 2025 απαιτείται να έχουν σχεδιαστική απόδοση, τουλάχιστον 30% κάτω από την γραμμή αναφοράς.



Διάγραμμα 1.3: Απεικόνιση των 3 φάσεων του δείκτη EEDI.¹⁰

¹⁰ <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>

1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι, η διερεύνηση της δυνατότητας εκμετάλλευσης του ανέμου για υποβοήθηση της πρόωσης σύγχρονων εμπορικών πλοίων, με την εφαρμογή σύγχρονων ιστίων σε υπάρχον εμπορικό πλοίο (Bulk Carrier) με έμφαση στην απαιτούμενη ενίσχυση του καταστρώματος στην περιοχή έδρασης των ιστών.

Η διερεύνηση για την μελέτη των απαιτούμενων ενισχυτικών, εφόσον χρειάζονται, στην έδραση των ιστών θα πραγματοποιηθεί με το υπολογιστικό πρόγραμμα Inventor Professional 2022. Το Inventor υπολογίζει και παρέχει μια τρισδιάστατη απεικόνιση των παραμορφώσεων του πλοίου λόγω των δυνάμεων φόρτισης. Το τρισδιάστατο πρότυπο ελέγχου είναι ο καταλληλότερος τρόπος προκειμένου να καλυφθεί οποιαδήποτε πιθανότητα λάθους κατά την διάρκεια του σχεδιασμού.

1.4 ΣΤΑΔΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εκπόνηση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας πραγματοποιήθηκε μέσω μιας σειράς βημάτων για την ολοκληρωμένη προσέγγιση του στόχου. Τα βήματα αυτά αναλύονται στη συνέχεια.

Αρχικά οριστικοποιήθηκε ο στόχος της έρευνας, δηλαδή η δυνατότητας εκμετάλλευσης του ανέμου, για υποβοήθηση της πρόωσης σύγχρονων εμπορικών πλοίων, με την εφαρμογή σύγχρονων ιστίων σε υπάρχον εμπορικό πλοίο (Bulk Carrier) με έμφαση στην απαιτούμενη ενίσχυση του καταστρώματος στην περιοχή έδρασης των ιστών.

Ακολούθησε η βιβλιογραφική έρευνα, ούτως ώστε να μελετηθούν παραπλήσιες μελέτες.

Έπειτα, καθορίστηκε ο μηχανισμός λειτουργίας των ιστίων και μελετήθηκαν φαινόμενα που βοηθούν στην πρόωση του πλοίου, όπως το φαινόμενο Magnus.¹¹

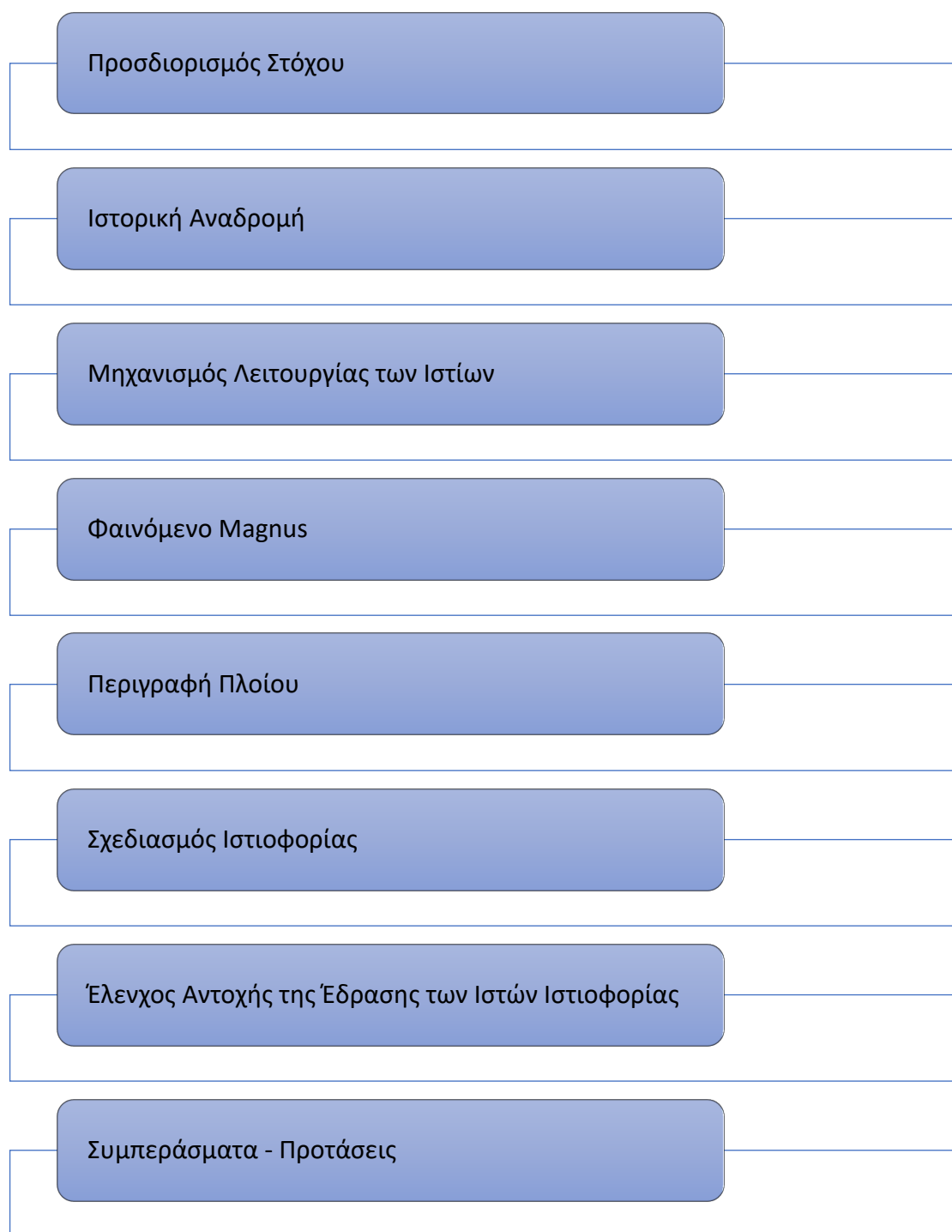
¹¹ https://el.wikipedia.org/wiki/Φαινόμενο_Μάγκνους

Στο επόμενο στάδιο, έγινε λεπτομερής περιγραφή του φορτηγού πλοίου και ο σχεδιασμός της ιστοφορίας.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η μελέτη αντοχής της έδρασης των ιστών με τη βοήθεια του Inventor Professional 2022 αφού πρώτα προσδιορίστηκαν οι σταθερές και μεταβλητές παράμετροι στο λογισμικό, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα και ελέγχθηκε η ορθότητα της κατασκευής.

Τα βασικά στάδια της Μεταπτυχιακής Εργασίας παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα υπό τη μορφή διαγράμματος ροής στο Σχήμα 1.1.

ΣΤΑΔΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ



Σχήμα 1.1 : Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

1.5 ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία αναπτύσσεται σε επτά κεφάλαια, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της Μεταπτυχιακή Εργασίας και παρουσιάζει το γενικότερο αντικείμενο που διερευνήθηκε. Αρχικά, γίνεται η ιστορική αναδρομή. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο επιθυμητός στόχος της έρευνας, καθώς και τα στάδια που ακολουθήθηκαν. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρούσα αναφορά στη δομή της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο μηχανισμός λειτουργίας των ιστίων και πιο συγκεκριμένα, ποιοι νόμοι της φυσικής διέπουν το φαινόμενο. Επιπλέον, αξιολογούνται τα αποτελέσματα συναφών ερευνών, καταλήγοντας στη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του φαινομένου Magnus. Αρχικά, παρουσιάζεται ο ολοκληρωμένος τρόπος υπολογισμού του φαινομένου και το θεωρητικό του υπόβαθρο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των γενικών χαρακτηριστικών ενός εμπορικού πλοίου (Bulk Carrier), το οποίο επιλέχθηκε να παραμένει αμετάβλητο στις διαφορετικές δοκιμές φορτίσεων.

Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει το σχεδιασμό της ιστιοφορίας και τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή των δυνάμεων στην έδραση, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών σε αναλυτικούς πίνακες και εικόνες.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ο έλεγχος αντοχής της έδρασης των ιστών ιστιοφορίας και η διερεύνηση τοποθέτησης επιπλέον ενισχυτικών για την αποφυγή αστοχίας της κατασκευής.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας και παρατίθενται τα συνολικά συμπεράσματα που

προέκυψαν, καθώς και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Ο Μηχανισμός Λειτουργίας των Ιστίων

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

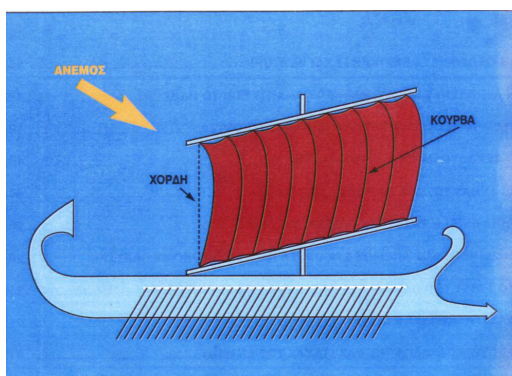
Είναι γνωστό από διάφορα συγγράμματα, ότι οι αρχαίοι Έλληνες έκαναν θυσίες για να φυσήξουν ούριοι άνεμοι, αυτό συνέβαινε γιατί τα ιστία τους ήταν τετράγωνα πανιά με αρκετά μεγάλο πλάτος. Έτσι ο μόνος τρόπος για να «φουσκώσουν», ήταν με αέρα που ερχόταν από την πρύμη του σκάφους κάνοντας μια καμπύλη της οποίας η χορδή ήταν κάθετη ως προς τον αέρα. Άρα η μόνη πλευση με την οποία μπορούσαν να ταξιδέψουν, ήταν τα πρύμα, στην οποία ο αέρας έσπρωχνε ουσιαστικά το πανί και κατ' επέκταση το σκάφος.¹²

Αυτό το οποίο δεν ήταν γνωστό και δεν είχε μελετηθεί εκείνη την εποχή ήταν η υποπίεση, και με ποιο τρόπο θα έπρεπε να είναι προσανατολισμένο το ιστίο για να τη δημιουργήσει.

Αντίθετα τα σημερινά σύγχρονα σκάφη διαθέτουν ιστία που αν προσανατολιστούν κατάλληλα σε σχέση με τον άνεμο, δημιουργούν αεροδυναμικό σχήμα, όταν «τριμάρονται» σωστά από το χειριστή τους.

Η υποπίεση είναι η δύναμη που αναπτύσσεται στην υπήνεμη μεριά (πίσω πλευρά του πανιού) ενός σύγχρονου ιστίου και είναι η κύρια αιτία που τα σημερινά ιστιοπλοϊκά σκάφη ταξιδεύουν σε μικρές γωνίες σχετικά με τον άνεμο.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των ιστίων και των αρχών ιστιοπλοΐας, κρίνεται απαραίτητο να αναλυθούν κάποιες χρήσιμες έννοιες σχετικά με την αεροδυναμική.



Εικόνα 2.1: Αρχαίας Αθηναϊκής τριήρης.¹²

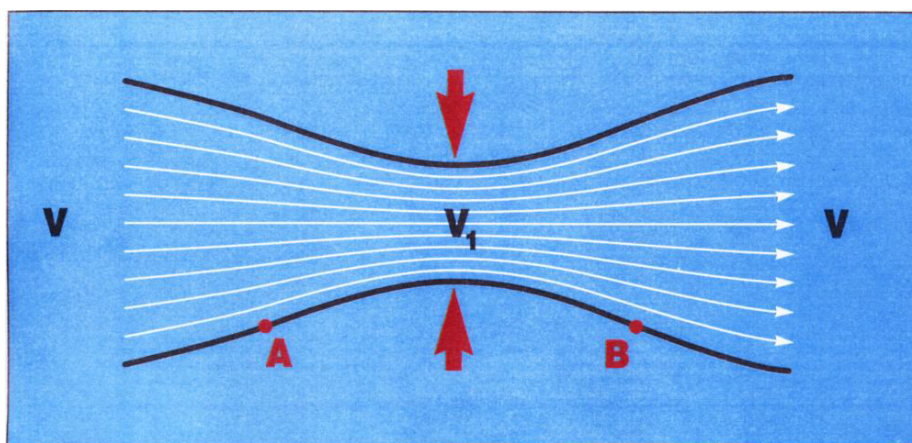
¹² Παναγιώτη Γ. Στρούτζα , ΙΣΤΙΟΠΛΟΙΑ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΚΗ ΤΕΧΝΗ , Πανελλήνιος Όμιλος Ιστιοπλοΐας Ανοιχτής Θαλάσσης (2010)

2.2 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ BERNOULLI

Ένας από τους σημαντικότερους νόμους στην Υδροδυναμική είναι Νόμος της συνέχειας της. Η εξίσωση της συνέχειας της ροής αναφέρει, ότι η παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος μίας φλέβας (ενός σωλήνα) που διαρρέεται από ιδανικό ρευστό. Η εξίσωση αυτή είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης της ύλης και εκφράζεται μαθηματικά:

$$S_A U_A = S_B U_B = \text{σταθερή} \quad (1)$$

Όπου S η διατομή του σωλήνα και U η ταχύτητα του ρευστού



Εικόνα 2.2: Ροή ιδανικού ρευστού σε σωλήνα.

Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα κινούμενο ρευστό, στο δικό μας παράδειγμα ο αέρας, συναντήσει μικρότερη διατομή κινούμενο μέσα σε ένα αγωγό τότε αναγκάζεται να επιταχύνει την ροή του. Έτσι, παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα 2.2 ενώ ο αέρας εισέρχεται αρχικά με μια ταχύτητα V , στην περιοχή από το A έως το B θα αναπτύξει μεγαλύτερες ταχύτητες ($V_1 > V$).

Μια άλλη σημαντική εξίσωση διατυπώθηκε από τον Ελβετό φυσικό Daniel Bernoulli και είναι αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης της ενέργειας σε κινούμενο υγρό.¹³

¹³ https://el.wikipedia.org/wiki/Νόμος_του_Μπερνούλι

Σύμφωνα με αυτή, σε μία ροϊκή γραμμή, το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου, της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου και της πίεσης παραμένουν σταθερά σε οποιοδήποτε σημείο της ροϊκής γραμμής. δηλαδή ισχύει:

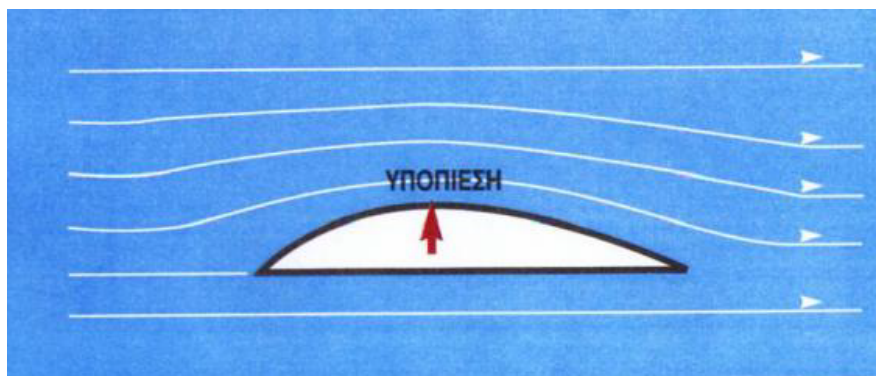
$$P + \frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gh = \text{σταθ} \quad (2)$$

Στον μαθηματικό αυτό τύπο, το P παριστάνει την υπό των εξωτερικών δυνάμεων δημιουργούμενη πίεση που αποτελεί ακριβώς το μέτρο της ενέργειας θέσεως. Η παράσταση $(\rho u^2/2)$ εκφράζει την δυναμική πίεση και αποτελεί το μέτρο της κινητικής ενέργειας του υγρού. Τέλος, η παράσταση (ρgh) είναι αυτή που εκφράζει την υδροστατική πίεση που είναι και το μέτρο της δυναμικής ενέργειας όπως προαναφέρθηκε. Το δε άθροισμα αυτών είναι σταθερό.

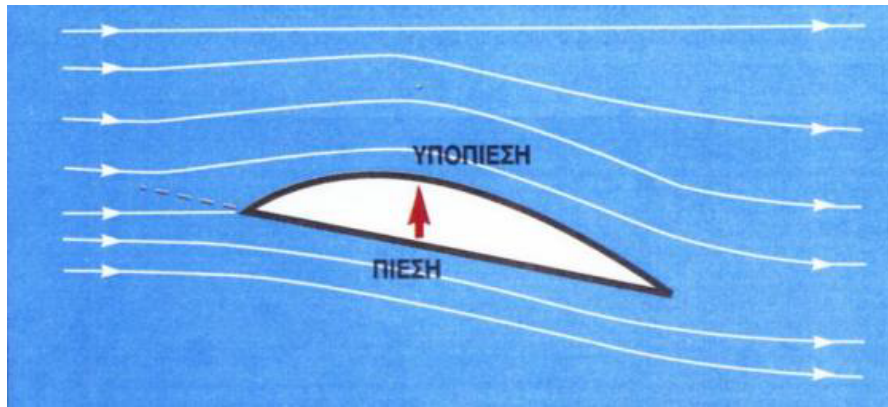
Αρά όταν ένα ιδανικό ρευστό ρέει μέσα σε ένα πεδίο ροής, η ταχύτητα του είναι αντιστρόφως ανάλογη της πίεσώς του.

2.3 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΙΣΤΙΑ

Όταν ένα αεροδυναμικό σχήμα προσανατολιστεί κατάλληλα σε ελεύθερη ροή, τότε η ταχύτητα του αέρα μεγαλώνει στην κυρτή μεριά. Σύμφωνα με το νόμο του Bernoulli, το αποτέλεσμα είναι να μειωθεί η πίεση και να δημιουργηθεί υποπίεση όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 2.3. Εάν το αεροδυναμικό σχήμα τοποθετηθεί με κάποια κλίση ορισμένων μοιρών ως προς τη ροή του αέρα, Εικόνα 2.4, θα έχουμε τα εξής: Στο κάτω τμήμα θα ασκηθεί πίεση από το ρευστό και ουσιαστικά θα το σπρώχνει ενώ στο άνω τμήμα ο αέρας λόγω της υποπίεσης θα το έλκει.



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση υποπίεσης σε Naca σε πεδίο ροής.



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση πίεσης και υποπίεσης σε Naca σε πεδίο ροής με κατάλληλη γωνία προσβολής.

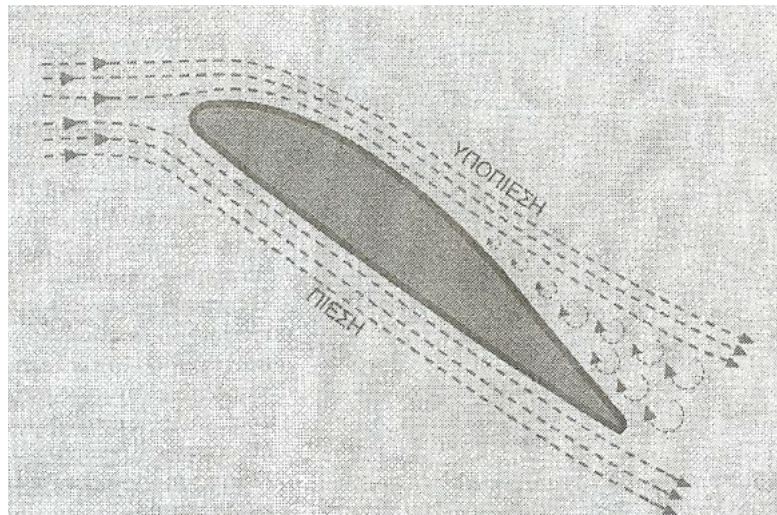
Το πανί έχει ένα αεροδυναμικό σχήμα και μοιάζει σαν ένα πτερόγιο αεροπλάνου. Έτσι όταν τοποθετηθεί σε κάποια γωνία, ως προς τον άνεμο, στην υπήνεμη μεριά του δημιουργείται υποπίεση, ενώ στην προσήνεμη μεριά του πίεση. Σημαντικό ρόλο για τη δημιουργία υποπίεσης είναι να υπάρχει ομαλή ροή χωρίς ο αέρας να αποκολλάται από το αεροδυναμικό σχήμα.

2.3.1 Αποκόλληση της ροής

Όταν η διεύθυνση ροής του αέρα σε σχέση με την κλίση της αεροτομής είναι σχετικά μεγάλη, τότε ο αέρας δεν μπορεί να ακολουθήσει το σχήμα της αεροτομής και έτσι εμφανίζεται αποκόλληση ροής με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στρόβιλοι στο πάνω μέρος της αεροτομής.

Αρχικά εμφανίζεται αποκόλληση ροής του αέρα με τη δημιουργία μικρών δινών κοντά στην έξοδο της αεροτομής. Όσο αυξάνεται η κλίση της αεροτομής τόσο μεγαλώνει και η αποκόλληση της ροής, με τη δημιουργία έντονων δινών, οι οποίες μετακινούνται προς το μπροστινό κομμάτι της αεροτομής.

Το «στολάρισμα» όπως συνηθίζεται να αποκαλείται, η έντονη αποκόλληση ροής είναι ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο γιατί μειώνει σημαντικά την υποπίεση στο επάνω μέρος της αεροτομής με αποτέλεσμα η αεροτομή δεν αποδίδει το μέγιστο αναμενόμενο.



Εικόνα 2.5: Απεικόνιση αποκόλλησης της ροής σε *naca* σε πεδίο ροής.

2.4 ΣΥΝΟΨΗ

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα βασικά θεωρήματα που διέπουν την αρχή λειτουργίας των ιστίων καθώς και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά.

Φαινόμενο Magnus

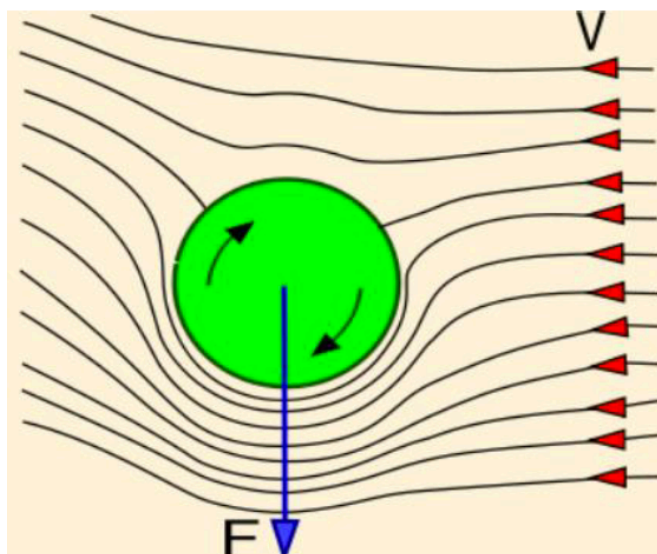
3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MAGNUS

Ένα πολύ εύκολο παράδειγμα που μπορούμε να δώσουμε για να περιγράψουμε το φαινόμενο Magnus είναι με τη χρήση μιας μπάλας. Για κάθε περιστρεφόμενο αντικείμενο στο παράδειγμα μας, η μπάλα δημιουργεί λόγω του αέρα που περιστρέφεται γύρω της, ένα είδος δίνης.

Στη μια πλευρά του αντικειμένου όπου η δίνη κινείται μαζί με την κατεύθυνση περιστροφής του αντικειμένου, τότε η ταχύτητα της θα αυξηθεί. Από την άλλη δε πλευρά, η κίνηση της δίνης είναι στην αντίθετη κατεύθυνση του ρεύματος οπότε συνεπάγεται ότι η ταχύτητα της θα μειωθεί.

Όμως η πίεση, σύμφωνα με το θεώρημα του Bernoulli, θα είναι πιο χαμηλή στην μια πλευρά σε σχέση με την άλλη αφού και οι ταχύτητες είναι διαφορετικές, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια ασύμμετρη δύναμη κάθετη στον αέρα.

Με άλλα λόγια όταν ιδιοπεριστρέφεται η μπάλα καθώς κινείται δημιουργεί χαμηλή πίεση (αυξημένη ταχύτητα αέρα) εκεί που η περιστροφή έχει την ίδια κατεύθυνση με το ρεύμα του αέρα και υψηλή πίεση (χαμηλή ταχύτητα αέρα) στην άλλη πλευρά της μπάλας.



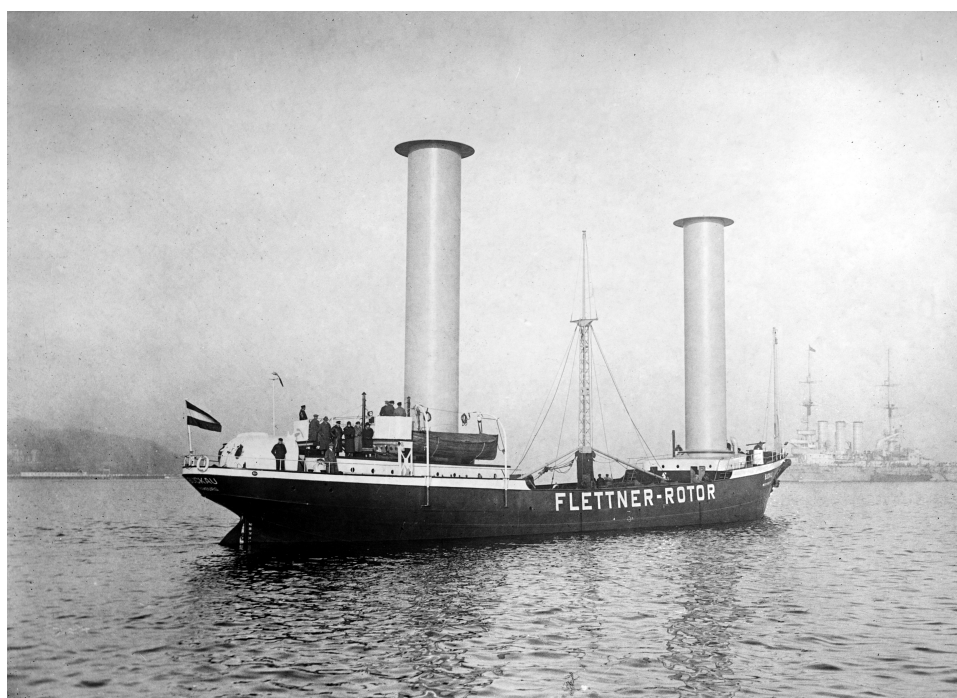
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση φαινομένου Magnus σε μπάλα.¹⁴

¹⁴ http://www.physics4u.gr/articles/2006/magnus_effect.html

3.2 FLETTNER ROTORS

3.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι Flettner Rotors ονομάστηκαν έτσι από τον δημιουργό του, τον Anton Flettner. Στο φαινόμενο Magnus βασίζεται η αρχή λειτουργίας των rotors. Ο Heinrich Magnus ήταν ο πρώτος ο οποίος το περιέγραψε για πρώτη φορά το 1852. Αλλά πρέπει να σημειώσουμε, ότι η πρώτη φορά που είχε κάποιος παρατηρήσει το Magnus Effect και μάλιστα σωστά ήταν ο Isaac Newton το 1672. Κανένας δεν είχε σκεφτεί τότε την ύπαρξη των rotors σε ένα πλοίο, αν και η τεχνολογία που υπήρχε στην ναυτιλιακή βιομηχανία δεν μπορούσε να το υποστηρίξει.¹⁵



Εικόνα 3.2: Το *Buckau* ήταν το πρώτο πλοίο που χρησιμοποίησε Flettner Rotors.¹⁶

3.2.2 Φαινόμενο Magnus και σχεδιασμός Rotors

Το φαινόμενο Magnus παρατηρείται όταν ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο τοποθετείται σε ροή νερού ή αέρα. Η Εικόνα 3.3 δείχνει την ανάλυση των δυνάμεων που χωρίζονται στην άνωση και την οπισθέλκουσα δύναμη. Η κατεύθυνση άνωσης

¹⁵ <https://glomeep.imo.org/technology/flettner-rotors/>

¹⁶ <https://gcaptain.com/tankers-outfitted-giant-spinning-cylinders-see-huge-efficiency-gains-sea/>

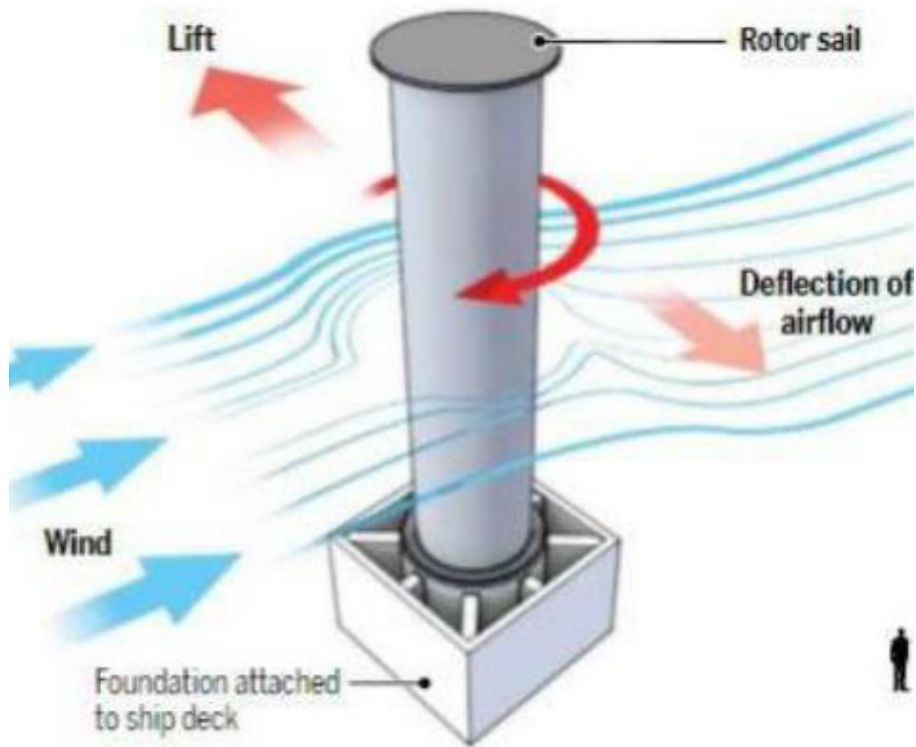
εξαρτάται από την κατεύθυνση περιστροφής του κυλίνδρου και είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ροής.

Στο πλοίο υπάρχει πρόωση προς τα εμπρός όταν ο rotor είναι στερεωμένος σε αυτό και κινείται ελεύθερα. Η διαφορά πίεσης από την περιστροφή που δημιουργεί στις αντίθετες πλευρές του αντικειμένου, είναι ο λόγος για αυτό το αποτέλεσμα. Οι rotors είναι γρήγορα περιστρεφόμενοι κάθετοι κύλινδροι μεγάλου μήκους και διαμέτρου.

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ιστία ή ακόμη και με τους σύγχρονους χαρταετούς, οι rotors είναι αποτελεσματικοί καθώς είναι πιο εύκολοι στη χρήση τους καθώς δεν χρειάζονται εξειδικευμένες γνώσεις ιστιοπλοΐας.

Οι rotors δεν λειτουργούν τέλεια όταν έχουμε πρυμναίο ή κατά μέτωπο αέρα και μπορούν να θεωρηθούν και ενοχλητικοί. Μια απόκλιση από 10 έως 15 μοίρες από τον κεντρικό άξονα του πλοίου είναι ικανοποιητική για να κάνει έναν rotor να παράγει αισθητή πρόωση. Η απόδοση ως συνάρτηση του αληθινού ανέμου (true wind) φαίνεται στην Εικόνα 3.3.

Πρέπει να επισημάνουμε, ότι σε κανονικές συνθήκες ο rotor βιώνει το φαινόμενο άνεμο (apparent wind) που είναι η συνάρτηση του αληθινού ανέμου και της ταχύτητας των πλοίων. Η μέγιστη ώθηση για την πρόωση του πλοίου πραγματοποιείται όταν ο φαινόμενος άνεμος βρίσκεται σε γωνία περίπου 90 μοίρες από το rotor. Συνεπώς, τα μέγιστα στην Εικόνα 3.3 εμφανίζονται σε τιμές μικρότερες από 90 μοίρες.



Εικόνα 3.3: Απεικόνιση φαινομένου Magnus σε Flettner Rotors.

3.2.3 Υπολογισμός Δυνάμεων Lift και Drag

Η συνολική αεροδυναμική δύναμη που ασκείται στο ρότορα λόγω του φαινομένου Magnus μπορεί να υπολογιστεί από την δύναμη άνωσης και οπισθέλκουσας. Η ανύψωση είναι η δύναμη κάθετη στην εισερχόμενη ροή, που ορίζεται ως:¹⁷

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_A A W S^2 A C_L, \quad (3)$$

όπου:

ρ_A η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3),

AWS φαινόμενος άνεμος (m/s)

A είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια ($=H \cdot D$) του ιστίου (m^2) και

C_L είναι ο συντελεστής ανύψωσης.

¹⁷ Journal of Sailing Technology 2021, volume 6, issue 1, pp. 91 – 117. The Society of Naval Architects and Marine Engineers

Η οπισθέλκουσα είναι η δύναμη παράλληλη προς την εισερχόμενη ροή, που ορίζεται ως:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_A A W S^2 C_D, \quad (4)$$

όπου:

C_D είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας.

Παραβλέποντας τη διασπορά ενέργειας, μια θεωρητική τιμή συντελεστή άνωσης μπορεί να προκύψει αντικαθιστώντας την έκφραση της ανύψωσης για τον αδιάστατο συντελεστή ανύψωσης στο θεώρημα Kutta - Joukowski της εξίσωσης ανύψωσης που ορίζεται ως (Newman, 2017).

$$F_L = \rho_A \Gamma A W S H \quad (5)$$

όπου:

Γ είναι η κυκλοφορία που προκαλείται από τον περιστρεφόμενο κύλινδρο και H είναι το ύψος του κυλίνδρου.

Υποθέτοντας ότι $\Gamma = 2\pi R U$ όπου $U = \omega R$ είναι η ταχύτητα της επιφάνειας του κυλίνδρου, ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου (rad/s) και R είναι η ακτίνα του κυλίνδρου (m), δίνει έναν θεωρητικό ιδανικό συντελεστή άνωσης ρευστού.

$$C_L = 2\pi U/V, \quad \text{όπου} \quad U/V = \frac{\omega R}{A W S} \quad (6)$$

Αυτή η θεωρητική τιμή δε λαμβάνει υπόψη το ιξώδες. Οι εμπειρικοί συντελεστές στα πραγματικά ρευστά είναι πολύ χαμηλότεροι. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας δεν μπορεί να προέλθει από τη θεωρία ιδανικού ρευστού. Μπορεί να διαπιστωθεί μόνο εμπειρικά. Ωστόσο, αυτό που είναι ξεκάθαρο, είναι η εξάρτηση του συντελεστή άνωσης από την αναλογία ταχύτητας του ρότορα.

3.3 ΣΥΝΟΨΗ

Συνοψίζοντας στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν τα ιστιοφόρα Rotor, γνωστά και ως Flettner Rotors, που πήραν το όνομά τους από τον Γερμανό μηχανικό Anton Flettner που ευθύνεται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Είναι κάθετοι κύλινδροι τοποθετημένοι στο κατάστρωμα ενός σκάφους. Περιστρεφόμενοι από τον άνεμο, εφαρμόζουν ένα αεροδυναμικό φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Magnus για να δημιουργήσουν ώθηση προς τα εμπρός για το σκάφος. Η πρόσθετη ώθηση παρέχει εξοικονόμηση καυσίμου, η οποία με τη σειρά της μειώνει τις εκπομπές ρύπων.

Η τεχνολογία αυτή, προσελκύει αυξανόμενο ενδιαφέρον από τη ναυτιλιακή βιομηχανία ως εργαλείο για τη βελτίωση της απόδοσης ενός πλοίου και τη μείωση των εκπομπών.

Bulk Carrier

4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Τα Bulk Carriers κατά την διάρκεια των χρόνων είχαν διάφορους τρόπους με τους οποίους ορίζονταν, όμως από το 1999 η σύμβαση SOLAS ορίζει ως Bulk Carrier ένα πλοίο με ένα κατάστρωμα, δεξαμενές έρματος και αμπάρια για τη μεταφορά φορτίου χύδην. Σήμερα το μεγαλύτερο πλήθος των νηογνομόνων ορίζουν ως Bulk Carrier οποιοδήποτε πλοίο μπορεί να μεταφέρει ξηρό χύδην φορτίο.¹⁸ Τα πλοία πολλαπλών χρήσεων μπορούν να μεταφέρουν χύδην φορτίο, αλλά μπορούν και άλλους τύπους φορτίων που δεν σχεδιάζονται για χύδην μεταφορά. Ο όρος «χύδην ξηρό φορτίο» χρησιμοποιείται για να διαχωρίζεται με τα χύδην υγρά φορτία όπως το πετρέλαιο, το υγροποιημένο φυσικό αέριο και τα χημικά.

Συγκεκριμένες συντομογραφίες που περιγράφουν με ακρίβεια το είδος των Bulk Carriers έχουν οριστεί, όπως το OBO περιγράφει ένα πλοίο το οποίο μεταφέρει σιδηρομετάλλευμα, χύδην φορτίο και πετρέλαιο, ενώ το O/O μεταφέρει σιδηρομετάλλευμα και πετρέλαιο. Οι όροι VLOC, VLBC, ULOC, και ULBC υιοθετήθηκαν από τους αντίστοιχους ορισμούς των δεξαμενόπλοιων VLCC και ULCC.

4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Όταν τα ατμόπλοια άρχισαν να γίνονται δημοφιλή τότε παρουσιάστηκε ανάπτυξη των Bulk Carrier. Το Τζον Μπούους το 1852 είναι το πρώτο ατμόπλοιο που θεωρήθηκε ως Bulk Carrier και εξειδικεύονταν στη μεταφορά άνθρακα. Ήταν κατασκευασμένο από μεταλλικά ύφαλα, μια ατμομηχανή και μια δεξαμενή έρματος που χρησιμοποιούσε νερό αντί για σακιά άμμου με αποτέλεσμα να είναι πιο ανταγωνιστικό στην ανταγωνιστική Βρετανική αγορά. Το πρώτο πλοίο που πρωτοτύπησε με την καινοτομία του να μπορεί να φορτοεκφορτώσει μόνο του, ήταν το Χένεπιν το 1902, χρησιμοποιώντας ιμάντες μεταφοράς. Το 1911 έκαναν την εμφάνιση τους τα πρώτα ντιζελοκίνητα Bulk Carrier.

Η διεθνής ζήτηση για χύδην φορτία περιοριζόταν στους $25 \cdot 10^6$ ton σιδηρομετάλλευμα πριν τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο ενώ η μεγαλύτερη ζήτηση ήταν παράκτια. Το 1929 μεταφέρθηκαν $73 \cdot 10^6$ ton σιδηρομεταλλεύματος κι άλλοι τόσοι τόνοι άνθρακα, ασβεστόλιθου και άλλων προϊόντων.

¹⁸ https://el.wikipedia.org/wiki/Μπαλκ_κάριερ

Δύο διαφορετικά χαρακτηριστικά των bulk carriers είχαν ήδη υιοθετηθεί:

- Το 1890 τα πλοία με διπλό πυθμένα και
- Το 1905 η τριγωνική δομή των δεξαμενών έρματος.

Λίγο μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, αναπτύχθηκε μια διεθνής εμπορική σχέση ανάμεσα στις ανεπτυγμένες χώρες και κυρίως μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών, των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας. Τα Bulk Carriers έγιναν μεγαλύτερα και πιο εξειδικευμένα λόγω του οικονομικού μεγέθους αυτού του είδους του εμπορίου. Παράλληλα, στις Μεγάλες Λίμνες τα πλοία αύξησαν το μέγεθός τους προκειμένου να ανταπεξέλθουν στον όγκο των φορτίων, ενώ τα λιμάνια εκσυγχρονίστηκαν και εφοδιάστηκαν με αυτοφορτωτές. Τα χιλιάδες πλοία που κατασκευάστηκαν στη δεκαετία του 1970 συνέβαλαν στη μεταφορά $214 \cdot 10^6$ ton χύδην φορτίου, το 1979, αριθμός που αποτελεί ρεκόρ.¹⁹

4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

4.3.1 Κατηγορίες μεγέθους

Τα Bulk Carriers χωρίζονται σε έξι μεγάλες κατηγορίες:¹⁸

- Mini bulk carriers: Έχουν χωρητικότητα μικρότερη των 10.000 DWT. Είναι σχεδιασμένα για μεταφορές σε ποτάμια, διαθέτουν ένα αμπάρι και έχουν μεταφορική ικανότητα από 500 μέχρι 2.500 ton. Είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να περνούν κάτω από γέφυρες, ενώ το πλήρωμα αποτελείται από 3-8 άτομα.
- Handysize και Handymax: Τα Handysize και Handymax είναι πλοία γενικών χρήσεων. Αυτές οι δύο κατηγορίες καταλαμβάνουν περίπου το 71% όλων των φορτηγών πλοίων άνω των 10.000 DWT. Τα Handymax έχουν συνήθως μήκος 150-200m και χωρητικότητα 52.000-58.000 DWT με πέντε αμπάρια και τέσσερεις γεραμούς φορτοεκφόρτωσης
- Panamax: Τα Panamax πήραν την ονομασία τους καθώς είναι τα μεγαλύτερα

¹⁹ https://el.wikipedia.org/wiki/Μπαλκ_κάριερ

πλοία που μπορούν να διέλθουν από τη Διώρυγα του Παναμά με μέγιστο βύθισμα 32.31m, ολικό μήκος 294.13m.

- **Capesize:** Τα Capesize λόγω του όγκου τους δεν μπορούν να διέλθουν μέσω της διώρυγας του Παναμά και αναγκάζονται να περάσουν από το Ακρωτήριο Χορν για να ταξιδέψουν μεταξύ του Ειρηνικού και Ατλαντικού ωκεανού. Παλαιότερα και πριν την εκβάθυνση του Σουέζ, τα Capesize έπρεπε να περάσουν από το Ακρωτήριο της Καλής Ελπίδος. Ύστερα από την εκβάθυνση της διώρυγας στα 20m επέτρεψε στα περισσότερα Capesize να διέλθουν από το Σουέζ. Τα Capesize Bulk Carriers θα μπορούσαν να οριστούν και σαν εξειδικευμένα πλοία, καθώς το 93% του φορτίου τους αποτελείται από άνθρακα ή σιδηρομετάλλευμα.
- **Μεγάλα bulk carriers:** Τα μεγάλα Bulk Carriers είναι μια υποκατηγορία των Capesize και έχουν χωρητικότητα μεγαλύτερη των 200.000 DWT. Αυτά τα πλοία συνήθως εξειδικεύονται στη μεταφορά σιδηρομεταλλεύματος.

Πίνακας 4.1: Κύριες κατηγορίες μεγεθών Bulk Carriers.

Όνομα	Μέγεθος σε DWT
Mini bulk carriers	Έως 10.000
Handysize	10.000 - 35.000
Handymax	35.000 - 59.000
Panamax	60.000 - 80.000
Capesize	80.000 και πάνω

4.3.2 Κατηγορίες περιοχής

Στο περιφερειακό εμπόριο παρουσιάζονται κι άλλες κατηγορίες bulk carriers, όπως τα:

- Kamsarmax: Με μέγιστο μήκος 229m, η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε πλοία μεγαλύτερα από Panamax, τα οποία είναι κατάλληλα για το λιμάνι του Καμσάρ στη Γουινέα, όπου η κύρια προβλήτα φόρτωσης βωξίτη δεν μπορεί να εξυπηρετήσει πλοία με μήκος μεγαλύτερο των 229 μέτρων.
- Seawaymax: Μέγιστο μήκος 226m, βύθισμα 7,92m. Αναφέρονται στα πλοία που μπορούν να περάσουν από το κανάλι του Σεντ Λόρενς, στις Μεγάλες Λίμνες του Καναδά.
- Setouchmax: Περίπου 203.000 DWT, τα μεγαλύτερα πλοία που μπορούν να πλεύσουν στην Εσωτερική Θάλασσα της Ιαπωνίας
- Dunkirkmax: Μέγιστο πλάτος 45m, μέγιστο μήκος 289m και μέγιστη χωρητικότητα 175.000 DWT. Αναφέρονται στα πλοία που μπορούν να περάσουν τα κλειδιά του λιμανιού της Δουνκέρκης στη Γαλλία.
- Newcastlemax: Με μέγιστο πλάτος 50m και μήκος μέχρι 300m, αναφέρονται στα πλοία που μπορούν να εισέλθουν στο λιμάνι του Νιούκαστλ στην Αυστραλία, με χωρητικότητα περίπου 185.000 DWT.
- Malaccamax: Μέγιστο μήκος 330m, βύθισμα 20m και μέγιστη χωρητικότητα 300.000 DWT, τα μεγαλύτερα πλοία που μπορούν να διέλθουν το πορθμό της Μαλάκκα.



Εικόνα 4.1: Το Velemax είναι το μεγαλύτερο Bulk carrier για το 2021.²⁰

²⁰ <http://www.vale.com/en/initiatives/innovation/valemax/pages/default.aspx>

4.4 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία η έρευνα θα γίνει σε ένα Panamax με βασικές σχεδιαστικές διαστάσεις :

- Εκτόπισμα: 75197 ton
- DWT: 64000 ton
- Ολικό μήκος (LOA): 199,90 m
- Μέγιστο πλάτος: 32,26 m
- Μέγιστο βάθος: 18,50 m
- Scantling Draft: 13,30 m
- Ταχύτητα πρόωσης: 14,4 kn
- Τύπος μηχανής: MAN – B&W 5S60E-C8.2 (Tier II)

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται τα αναλυτικά σχέδια του εξεταζόμενου πλοίου.

4.5 ΣΥΝΟΨΗ

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια εκτενής αναφορά στα Bulk Carrier. Παρουσιάστηκε η ιστορική εξέλιξη των συγκεκριμένων πλοίων καθώς και η κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με το μέγεθος τους.

Τέλος δόθηκαν τα αναλυτικά χαρακτηριστικά καθώς και τα βασικά σχέδια για το εξεταζόμενο πλοίο.

**Σχεδιασμός Ιστιοφορίας &
Μεθοδολογία Υπολογισμού**

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Προκειμένου να προχωρήσουμε σε μια εποχή μιας κοινωνίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, είναι απαραίτητη η δραστική μείωση των εκπομπών CO₂, από τα μεγάλα εμπορικά πλοία που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ορυκτού πετρελαίου. Έτσι μια αλλαγή ενεργειακής πηγής για την πρόωση του πλοίου είναι απολύτως απαραίτητη για την επόμενη γενιά εμπορικών πλοίων. Οι πιθανές ενεργειακές πηγές μπορεί να είναι ο άνεμος, η πυρηνική ενέργεια, οι μπαταρίες, το βιοκαύσιμο κλπ. Από την άποψη της βιωσιμότητας και του ενεργειακού κόστους, είναι σαφές ότι η ωκεάνια αιολική ενέργεια που είναι ελεύθερη είναι η καλύτερη λύση για τη πρόωση πολύ μεγάλων εμπορικών πλοίων.

Για να κατασκευαστεί ένα ιστιοφόρο εμπορικό πλοίο, θα πρέπει εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας να συνυπολογιστεί και η ακρίβεια των χρονοδιαγραμμάτων των μεταφορών, καθώς είναι πολύ σημαντική απαίτηση για την τρέχουσα παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα.

Το Shin - Aitoku Maru που φαίνεται στην εικόνα 5.1, το οποίο έχει πτερύγια πανιά από μεταλλική καμτώμενη σανίδα, αναπτύχθηκε από την JAMDA (Ιαπωνία) τη δεκαετία του 1970 ως μία από τις μεγάλες προκλήσεις για μια νέα ιδέα ιστιοφόρων πλοίων.



Εικόνα 5.1: Shin - Aitoku Maru.²¹

²¹ <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-66022>

Το Beluga Sky Sail (Εικόνα 5.2), το οποίο είναι ένα είδος χαρταετού, αναπτύχθηκε στη Γερμανία και είναι μια πιο σύγχρονη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 5.2: Beluga Sky Sail.²²

Παρακάτω γίνεται μία ανάλυση της μεθοδολογίας υπολογισμού και σχεδιασμού της ιστοφορίας.

5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΝΩΝ LIFT ΚΑΙ DRAG

Ο μηχανισμός ιστοπλοΐας λειτουργεί όμοια με την αρχή της πτέρυγας του αεροσκάφους που παράγει μια δύναμη που ονομάζεται “Άνωση – Lift” σε μια κατεύθυνση προς την κατεύθυνση του ανέμου. Στην περίπτωση του wing sail, η δύναμη άνωσης είναι ο σημαντικός παράγοντας για την πρόωση του πλοίου. Υπάρχουν διαφορετικές κατευθύνσεις πλεύσης όπως:²³

- Τα Πρύμα: Όταν ο φαινομενικός άνεμος (Apparent Wind) είναι από πίσω σε σχέση με το πλοίο, το πλοίο προωθείται από τη δύναμη Drag (Σχήμα 5.3a). Η οπισθέλκουσα δύναμη μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο:

²² https://vos.noaa.gov/MWL/apr_09/skysails.shtml

²³ Shukla, P. and Ghosh, K. (2009). Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships. International Journal of Physical and Mathematical Sciences

$$D = C_D \cdot (1/2) \cdot (\rho AV^2) \text{ όπου,} \quad (7)$$

C_D είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας,

ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3),

V η ταχύτητα του φαινόμενου ανέμου (m/s) και

A είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια του ιστίου (m^2).

Δεν έχει τόσο μεγάλη σημασία αυτή η πλευση επειδή ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι σχεδόν ίδιος για όλες τις επιφάνειες.

- Πλαγιοδρομία: Όταν ο φαινομενικός άνεμος είναι περίπου κάθετα στο πλοίο (Σχήμα 5.3b). Η δύναμη άνωσης μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο:

$$L = C_L \cdot (1/2) \cdot (\rho AV^2) \text{ όπου,} \quad (8)$$

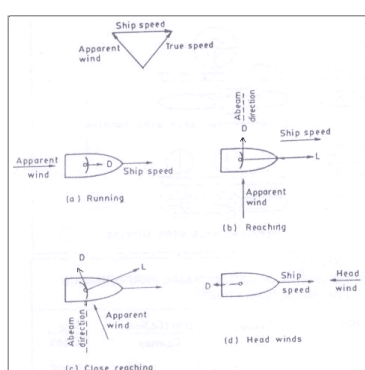
C_L είναι ο συντελεστής άνωσης,

ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3),

V η ταχύτητα του φαινόμενου ανέμου (m/s) και

A είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια του ιστίου (m^2).

- Κλειστή Πλαγιοδρομία: Όταν ο φαινομενικός άνεμος είναι εμπρός, η αντίσταση μειώνει την ώθηση. Σε αυτή την κατάσταση, είναι επιθυμητή η επίτευξη του μέγιστου συντελεστή ανύψωσης (Σχήμα 5.2c). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος L/D για μια σύγχρονη αεροτομή πριν το “στολάρισμα” είναι γύρω στο 100. Το διάνυσμα του Drag στο σχήμα έχει σημειωθεί πολύ μεγαλύτερο από το πραγματικό, έτσι ώστε να γίνει ορατό.
- Κατάορτσα: Όταν ο άνεμος έρχεται απευθείας από το μπροστινό μέρος του πλοίου. Σε αυτή την κατάσταση λειτουργείας, η χρήση των ιστίων είναι ακατάλληλη (Σχήμα 5.2d).

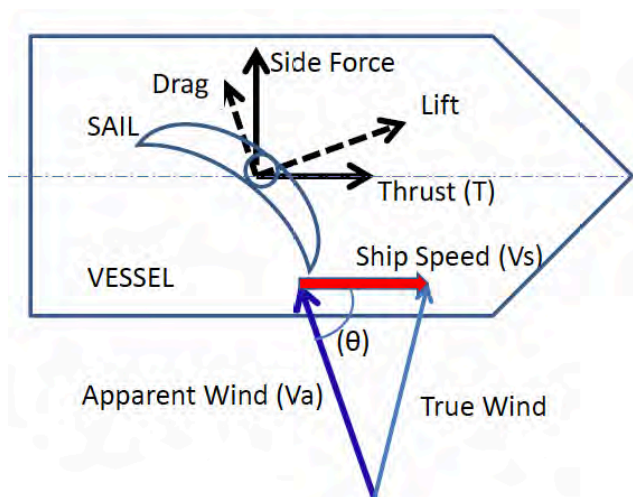


Σχήμα 5.1: Διάφορες πλευσεις ιστιοπλοίας και η επίδραση των Lift και Drag.

5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΩΩΣΗΣ

Τα σύγχρονα γρήγορα ιστιοπλοϊκά κινούνται με τον φαινόμενο άνεμο (Apparent Wind). Είναι ο άνεμος που δημιουργείται από την συνισταμένη του πραγματικού ανέμου (True Wind) και του ανέμου που δημιουργείται εξ' αιτίας αυτής καθ' αυτής της κίνησης του σκάφους (Ship Speed).

Ο άνεμος ρέοντας σε ένα πανί δημιουργεί μεταβλητές δυνάμεις στις δύο πλευρές του. Ο άνεμος ρέει ταχύτερα στη σταβέντο πλευρά δημιουργώντας υποπίεση (Lift) που έλκει το σκάφος πλάγια και μπροστά. Η δύναμη της υποπίεσης εφαρμοσμένη στο κέντρο ιστιοφορίας χωρίζεται σε δύο δυνάμεις. Στην κάθετη στο σκάφος πλάγια αεροδυναμική δύναμη (Side Force) που δημιουργεί το κουπαστάρισμα και μία δύναμη πρόωσης (Thrust) που κινεί το σκάφος προς τα εμπρός. Η πλάγια αεροδυναμική δύναμη εξουδετερώνεται από την καρίνα, το τιμόνι και ανάλογα το σκάφος και αλλά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 5.2: Φαινόμενος άνεμος και πρόωση.

Η δύναμη πρόωσης T (kgf: Kilogram – Force = 9,80665N) που δημιουργείται από το ιστίο που φαίνεται στο σχήμα 5.2 εκφράζεται ως εξής:²⁴

²⁴ N I B Ariffin and M A Hannan, Published under licence by IOP Publishing Ltd, Wingsail technology as a sustainable alternative to fossil fuel (2019)

$$T=0,5 \cdot \rho_a \cdot Va^2 \cdot A \cdot C_T \quad (9)$$

όπου:

Πυκνότητα αέρα: ρ_a (kg/m³)

Φαινομενική ταχύτητα ανέμου: Va (m/s),

Επιφάνεια ιστίου: A (m²)

Συντελεστής πρόωσης: C_T . Είναι μια μεταβλητή παράμετρος σύμφωνα με η φαινομενική γωνία ανέμου θ που φαίνεται στο σχήμα 5.2. Ενδεικτικές τιμές από 0 έως 2.

5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΙΣΤΙΟΦΟΡΙΑΣ

Η επιφάνεια του ιστίου παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία ώσης. Μια μεγαλύτερη επιφάνεια ιστίου συνήθως παράγει περισσότερη ώθηση. Ωστόσο, η μέγιστη επιφάνεια ιστιοφορίας που μπορεί να σχεδιαστεί εξαρτάται από τον όγκο εκτόπισματος κάθε πλοίου. Ο ακόλουθος τύπος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέγιστης περιοχής ιστιοφορίας που θα εγκατασταθεί στο πλοίο:²⁵

$$K = \frac{A_s}{(\Delta)^{\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

όπου:

K : σταθερά ιστιοφόρου πτέρυγας, ίση με 3,2,

A_s : Επιφάνεια ιστίου σε m² και

Δ : Εκτόπισμα πλοίου σε m³.

5.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΙΣΤΙΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ

Το εξεταζόμενο πλοίο αφορά ένα Panamax με εκτόπισμα 75197 ton. Εφαρμόζοντας το μαθηματικό τύπο της παραγράφου 5.4 για $K=3,2$ και εκτόπισμα $\Delta=75197$ ton. Υπολογίζουμε ότι η συνολική επιφάνεια ιστιοφορίας είναι $A_s=5701$ m².

²⁵ Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa, Akihiro Kanai and Masanobu Katori, "Wind Challenger" the Next Generation Hybrid Sailing Vessel (2013)

Αντικαθιστώντας τους τέσσερις γεραμούς του εξεταζόμενου πλοίου με ιστούς, υπολογίζουμε ότι η επιφάνεια κάθε ιστίου είναι περίπου 1425 m². Συγκεκριμένα θα εργαστούμε για το ιστίο που θα τοποθετηθεί αναμεσα στα αμπάρια 4 – 5.

Το ιστίο που θα μελετήσουμε θα είναι μια Naca 0018²⁶ με μήκος (sail span) 20m και το ύψος για τις ανάγκες της μελέτης θα θεωρηθεί 50 m.

Για δυσμενείς ανέμους αναμένουμε και τις δυσμενέστερες φορτίσεις. Συνεπώς για ένταση φαινομένου ανέμου 15 m/s και με χρήση των μαθηματικών εξισώσεων που διατυπώθηκαν στο κεφάλαιο 5.2 υπολογίστηκαν οι δυνάμεις Lift και Drag για το υπό εξέταση ιστίο.

Οι συντελεστές C_l και C_d για ένταση φαινομένου ανέμου 15 m/s υπολογίστηκαν για γωνίες πρόσπτωσης από 0° έως 80°.²⁷

Πίνακας 5.1: Δυνάμεις Lift και Drag για AWS 15 m/s.

Naca 0018								
Ταχύτητα Φαινομένου Ανέμου (m/s)	15							
Γωνία Πρόσπτωσης Ανέμου	10	20	30	40	50	60	70	80
C_l για AWS 15m/s	0,526	0,648	0,615	0,701	0,434	0,435	0,319	0,259
C_d για AWS 15m/s	0,070	0,209	0,414	0,711	0,729	0,748	0,906	0,925
Πυκνότητα Αέρα (kg · s/m ³)	0,125							
Επιφάνεια Ιστίου m ²	1000							
$L = C_L \cdot (1/2) \cdot (\rho AV^2)$ (kgf)	7396,9	9112,5	8648,4	9857,8	6103,1	6117,2	4485,9	3642,2
$D = C_D \cdot (1/2) \cdot (\rho AV^2)$ (kgf)	984,4	2939,1	5821,9	9998,4	10251,6	10518,8	12740,6	13007,8
L σε Newton	72538,6	89363,1	84812,2	96672,1	59851,2	59989,1	43992,0	35717,7
D σε Newton	9653,4	28822,4	57093,1	98051,2	100533,5	103153,7	124942,9	127563,1
Ροπές L σε N · m	1813464,1	2234077,5	2120305,0	2416802,9	1496280,3	1499727,9	1099800,5	892941,5
Ροπές D σε N · m	241335,5	720558,9	1427327,3	2451279,4	2513337,1	2578842,5	3123571,3	3189076,6

²⁶ NASA (2015). Shape Effects on Drag. Διαθέσιμο στο: <https://www.grc.nasa.gov/www/k12/airplane/shaped.html>

²⁷ Kanai, A., Uzawa, K., Ouchi, K.(2011). 'Performance Prediction of Large Sailing Vessel with Multiple Wing Sails by CFD, Wind Tunnel Test and EPP', Conference Proceedings of Japan Society of Naval Architect and Ocean Engineering

5.6 ΣΥΝΟΨΗ

Συνοψίζοντας στο παρόν κεφάλαιο, έγινε αναφορά της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας για την πρόωση ενός πλοίου. Αναλυτικότερα έγινε ο υπολογισμός των δυνάμεων Lift και Drag για τις διάφορες πλεύσεις που μπορεί να ταξιδέψει ένα πλοίο.

Επιπλέον, αναλύθηκε η πορεία υπολογισμού της συνολικής επιφάνειας ιστιοφορίας που μπορεί να φέρει κάθε πλοίο ανάλογα με το εκτόπισμα του και έγινε ο αντίστοιχος υπολογισμός για το εξεταζόμενο πλοίο.

Τέλος, δόθηκαν οι διαστάσεις του εξεταζόμενου ιστίου και έγινε αναλυτικός υπολογισμός των δυνάμεων για φαινόμενο άνεμο ταχύτητας 15 m/s.

**Έλεγχος Αντοχής της Έδρασης
των Ιστών Ιστιοφορίας**

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πλειοψηφία των αντικείμενων - προϊόντων που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα για την εκτέλεση κάποιας εργασίας, είναι είτε απλά είτε σύνθετα. Η συντριπτική πλειοψηφία αποτελείται από σύνθετα αντικείμενα που απαρτίζονται από ένα πλήθος απλών εξαρτημάτων, κατασκευασμένα από ποικίλα υλικά. Για την κατασκευή του καθενός από τα κομμάτια αυτά, έχουν χρησιμοποιηθεί ένα πλήθος διαδικασιών οι οποίες συνιστούν αυτό που ονομάζουμε (βιομηχανική) παραγωγή.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και συγκεκριμένα στο κομμάτι των υπολογιστών και της ηλεκτρονικής, οδήγησε στη βελτίωση – ανάπτυξη νέων τεχνικών σχεδίασης και παραγωγής προϊόντων. Ο διεθνής ανταγωνισμός σε συνδυασμό με την έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού, οδήγησε τις βιομηχανίες στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών, εξοστρακίζοντας την μέχρι σήμερα προσέγγιση της παραγωγής προϊόντων. Η προσέγγιση αυτή δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη βοήθεια των συστημάτων CAD/CAM (Computer Aided Design), σημαίνει σχεδίαση με την βοήθεια Η/Υ και CAM (Computer Aided Manufacturing), σημαίνει παραγωγή με την βοήθεια Η/Υ.

Η χρήση των συστημάτων CAD/CAM είναι πλέον κυρίαρχες σε όλα τα είδη της βιομηχανικής παραγωγής, οι κατηγορίες εφαρμογής τους μπορούν να διακριθούν στους ακόλουθους τομείς:

- Κατασκευαστικός τομέας: κατασκευές ξύλου, μετάλλου, κατασκευές κτηρίων κ.α.
- Μηχανολογικές εφαρμογές: Αεροπορική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευή μηχανών κ.α.
- Ηλεκτρονικές εφαρμογές: Σχεδίαση πλακετών, ηλεκτρονικά κυκλώματα, ηλεκτρονική σχεδίαση κ.α.
- Σχεδίαση και παραγωγή επενδυμάτων, υποδημάτων κ.α.
- Ιατρικές εφαρμογές όπως οδοντιατρικής, ορθοπεδικής κ.α.

Κάθε νέο προϊόν πραγματοποιείται μέσα από τη διαδικασία της σχεδιομελέτης που περιλαμβάνει τα στάδια σχεδίασης του προϊόντος από τη σύλληψη της ιδέας έως την παραγωγή του. Κατά τη διάρκεια της σχεδιομελέτης, τα συστήματα CAD/CAM κατέχουν πρωταρχικό ρόλο καθώς χρησιμοποιούνται ως εργαλείο βελτίωσης της

ποιότητας του προϊόντος, της επιλογής των κατάλληλων υλικών, της μείωσης του κόστους παραγωγής που θα οδηγήσουν στη μεγιστοποίηση του κέρδους.

Είναι κοινά αποδεκτό ότι σε πολυσύνθετες κατασκευές, όπως αυτή ενός πλοίου, οι οποίες λειτουργούν σε συνθήκες ενός τόσο απρόβλεπτου περιβάλλοντος όπως η θάλασσα, ο προσδιορισμός της μέγιστης αντοχής της κατασκευής εν τω συνόλω της, αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις. Για την καλύτερη απεικόνιση και μελέτη των εκάστοτε προβλημάτων, είναι απαραίτητη η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων με την χρήση λογισμικών CAD (Computer Aided Design, Σχεδιασμός με τη Βοήθεια Υπολογιστή).

6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ AUTODESK INVENTOR

Η πιο σύγχρονη τάση στα συστήματα CAD είναι η παραμετρική μοντελοποίηση. Ένα παραμετρικό στερεό σχήμα, αποτελεί συνάρτηση ενός συνόλου παραμέτρων και περιορισμών. Όλα τα στοιχεία ενός παραμετρικού μοντέλου όπως ένα πρωταρχικό στερεό, μια γραμμή ή ένα τόξο ή ακόμα και μια λειτουργία όπως η λοξοτόμηση μίας ακμής, διαθέτουν παραμέτρους που σχετίζονται με αυτές.

Οι παράμετροι κάθε στοιχείου ελέγχουν τις γεωμετρικές ιδιότητες του στοιχείου αυτού, όπως το μήκος, το πλάτος κ.α. καθώς επίσης και της θέσης μέσα στο μοντέλο. Ο σχεδιαστής τροποποιεί τις παραμέτρους ανάλογα, προκειμένου να μπορεί να δημιουργήσει το επιθυμητό αντικείμενο.

Τα διάφορα προγράμματα έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν και να αποθηκεύουν το ιστορικό του τρόπου με το οποίο κατασκευάστηκε ένα στερεό. Έτσι ο σχεδιαστής μπορεί να ανατρέξει και να αλλάξει τις παραμέτρους του στερεού, και στη συνέχεια το πρόγραμμα θα εφαρμόσει τις αλλαγές επαναλαμβάνοντας όλα τα βήματα από το ιστορικό, χρησιμοποιώντας τις νέες παραμέτρους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου στερεού.

Τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την παραμετρική σχεδίαση είναι τα εξής:

1) Σχεδιασμός κάποιας απλής γραμμής ή σύνθετης καμπύλης ή κάποιας κλειστής επίπεδης περιοχής. Τα σκαριφήματα αυτά αποτελούν μία αρχική προσέγγιση του σχήματος που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Θα πρέπει να αποτελούν μια καλή προσεγγιστική απεικόνιση του μοντέλου που θέλουμε να σχεδιάσουμε, ώστε να ελαχιστοποιείται στο ελάχιστο η ανάγκη δημιουργίας νέων μορφολογικών χαρακτηριστικών, για να έχουμε μια ολοκληρωμένη απεικόνιση του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά, ο σχεδιασμός των μορφολογικών χαρακτηριστικών θα πρέπει να υλοποιείται πάντα με γνώμονα τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους, άρα θα πρέπει να θεωρούνται ως δομικές μονάδες που η σύνθεση τους θα πραγματοποιεί το τελικό σχήμα του αντικειμένου.

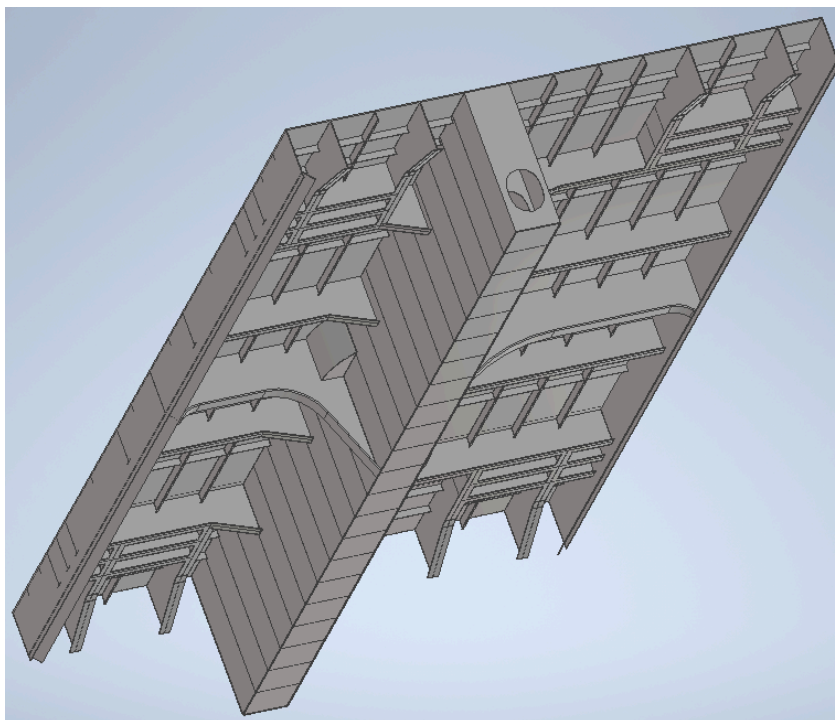
2) Στο δεύτερο βήμα η προσεγγιστική απεικόνιση από το σχεδιαστή θα πρέπει να μετατραπεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Αυτό θα γίνει εφαρμόζοντας περιορισμούς (Constraints) και σχέσεις (Relations) επί των αρχικών σκαριφημάτων συνήθως είναι περιορισμοί διαστάσεων, είτε γεωμετρικοί περιορισμοί. Οι γεωμετρικοί περιορισμοί ορίζουν τη γεωμετρική αλληλεπίδραση μεταξύ των γεωμετρικών σχημάτων. Οι περιορισμοί των διαστάσεων, αφορούν στην περιγραφή του μεγέθους και της θέσης.

3) Αφού πραγματοποιηθούν τα προηγούμενα βήματα, τότε ο παραμετρικός μοντελοποιητής διαθέτει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να προχωρήσει στην κατασκευή του μορφολογικού χαρακτηριστικού.

Το Inventor Professional 2022 (<https://www.autodesk.com/products/inventor>) είναι ένα λογισμικό 3D CAD που αναπτύχθηκε από την Autodesk. Χρησιμοποιείται αυτήν την στιγμή από περίπου 1,3 εκατομμύριο μηχανικούς και σχεδιαστές σε περισσότερες από 130.000 επιχειρήσεις παγκοσμίως. Εκτός από ένα ισχυρό περιβάλλον σχεδίασης, διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό διαθέσιμων εργαλείων μοντελοποίησης στερεών. Επίσης προσφέρονται εργαλεία σχετικά με την επιφάνεια, τη συναρμολόγηση, τη συγκόλληση, τη σχεδίαση και άλλα. Το Inventor έχει ένα καινοτόμο χαρακτηριστικό που επιτρέπει το σχεδιασμό μερών που μοιράζονται την ίδια βασική γεωμετρία αλλά με μερικές διαφορές, αρκετά εύκολα.

Το Inventor είναι ένας σχεδιαστής στερεών που βασίζεται στο λογισμικό Parasolid,²⁸ και χρησιμοποιεί μια προσέγγιση που βασίζεται σε παραμέτρους και χαρακτηριστικά για να δημιουργήσει τα μοντέλα και τις συνδεσμολογίες τους. Οι παράμετροι αναφέρονται στους περιορισμούς, οι τιμές των οποίων καθορίζουν τη μορφή ή τη γεωμετρία του μοντέλου ή του συναρμολογήματος. Οι παράμετροι μπορούν να είναι είτε αριθμητικές, όπως τα μήκη γραμμών, είτε οι διάμετροι κύκλων, είτε γεωμετρικές παράμετροι, όπως η εφαπτομενικότητα, η παραλληλία, η ομοκεντρικότητα, οριζόντιος είτε κάθετος, κ.λπ. Οι αριθμητικές παράμετροι μπορούν να συνδεθούν ή μια με την άλλη μέσω της χρήσης των σχέσεων, οι οποίες τους επιτρέπουν να συλλάβει τις προθέσεις του σχεδιασμού.

Η δημιουργία ενός μοντέλου στο Inventor αρχίζει συνήθως με ένα διδιάστατο σκίτσο. Το σκίτσο αποτελείται από τη γεωμετρία όπως τα σημεία, οι γραμμές, τα τόξα, τα κωνικά (εκτός από την υπερβολή) και τα splines. Οι διαστάσεις προστίθενται στο σκίτσο για να καθορίσουν το μέγεθος και τη θέση της γεωμετρίας. Όλα τα σχεδιαστικά δεδομένα είναι παραμετρικά.



Εικόνα 6.1: Μοντελοποίηση τμήματος του καταστρώματος.

²⁸ <https://en.wikipedia.org/wiki/Parasolid>

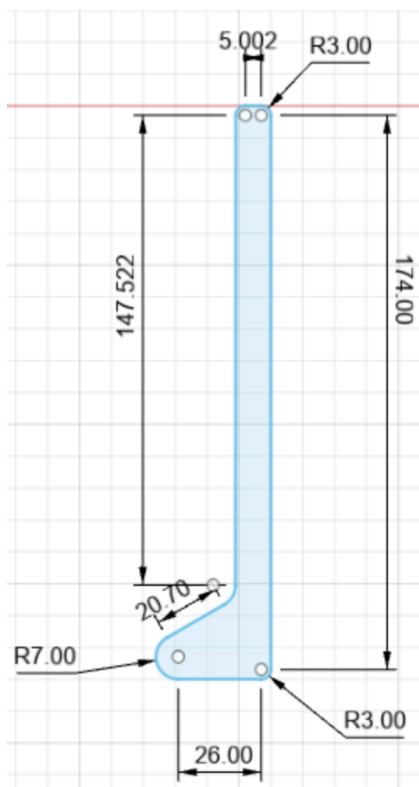
6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΡΟΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Αρχικά στο χώρο σχεδίασης, δημιουργούμε το τμήμα του καταστρώματος που θα μελετηθεί βάσει των σχεδίων του πλοίου. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι πλάτος 18.26 m και τρία διαφορετικά πάχη 15, 17 και 22 mm. Στην συνέχεια με την εντολή Extrude, επιμηκύνουμε καταλλήλως κατά μήκος 9.84 m.



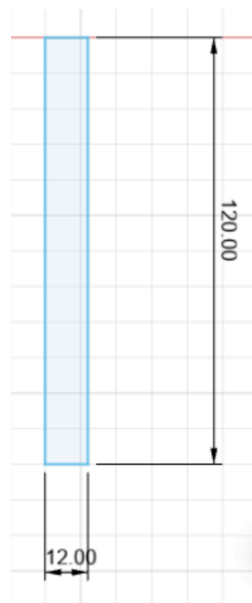
Εικόνα 6.2: Δισδιάστατο σχέδιο καταστρώματος.

Στη συνέχεια έγινε η σχεδίαση των ενισχυτικών HP180x11 και με την εντολή Rectangular Pattern πολλαπλασιάσαμε κατά μήκος σ' εννέα με βάση τα σχέδια του πλοίου. Με την εντολή Extrude προεκτείναμε ανάλογα, με επιλεγμένη τη εντολή Join στο κουτί Operation.



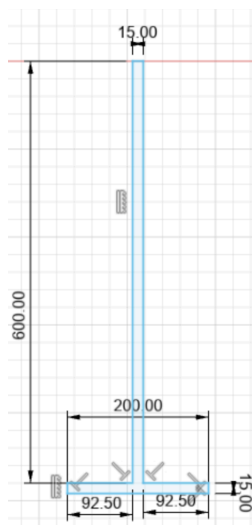
Εικόνα 6.3: Δισδιάστατο σχέδιο βολβολάμας.

Ακολούθησε ο σχεδιασμός των ενισχυτικών FB120x12 και με την εντολή Rectangular Pattern πολλαπλασιάσαμε κατά μήκος της μιας πλευράς σε τέσσερα με βάση τα σχέδια του πλοίου, και με την εντολή Mirror δημιουργήσαμε τον αντικατοπτρισμό τους και για την άλλη πλευρά. Με την εντολή Extrude προεκτείναμε ανάλογα με επιλεγμένη τη εντολή Join στο κουτί Operation.



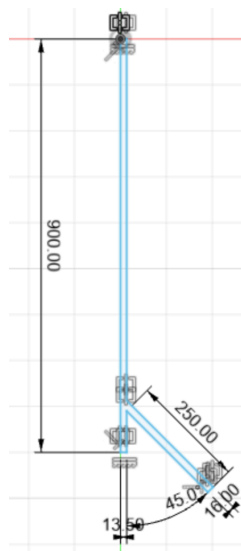
Εικόνα 6.4: Δισδιάστατο σχέδιο Flat Bar.

Στο χώρο της σχεδίασης, δημιουργούμε την τομή των ενισχυτικών 600(15)/200(15) και στην συνέχεια με την εντολή Extrude δημιουργούμε το στερεό.



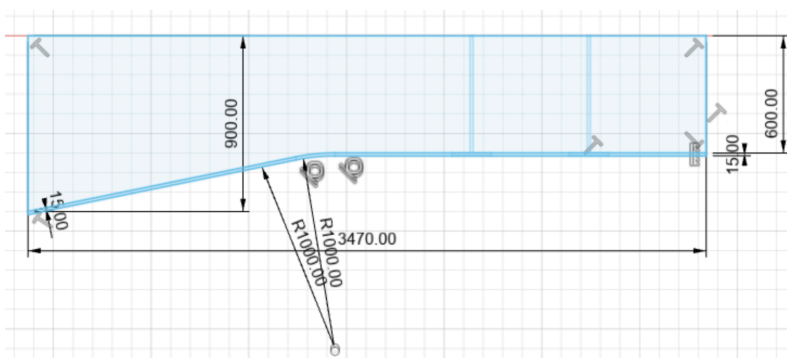
Εικόνα 6.5: Δισδιάστατο σχέδιο (15)600/(15)200.

Το τμήμα του καταστρώματος που μοντελοποιήσαμε περιλαμβάνεται μεταξύ των Frame 69 – 81. Γνωρίζοντας ότι τα σχέδια σε κάθε Frame δεν είναι όμοια, συνεχίσαμε με την σχεδίαση των Frame 69 και 81 που είναι συμμετρικά ως προς τον κεντρικό άξονα του πλοίου.



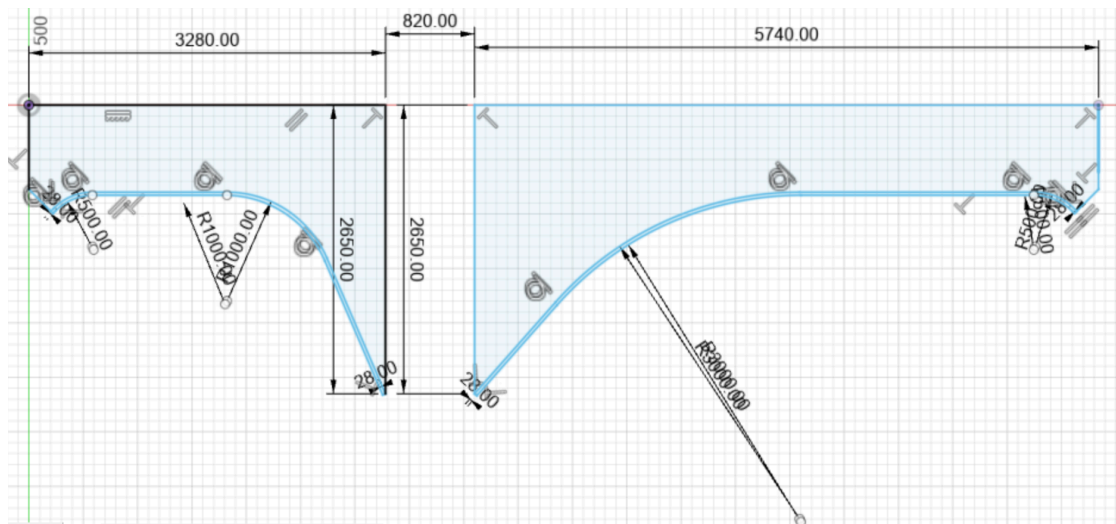
Εικόνα 6.6: Δισδιάστατο σχέδιο (13.5)900/(16)250.

Ακολούθησε η σχεδίαση των Frame 70, 72, 78, 80 στην μια πλευρά του πλοίου και με την εντολή Mirror μεταφέρθηκε το σχέδιο και στην άλλη πλευρά του πλοίου.



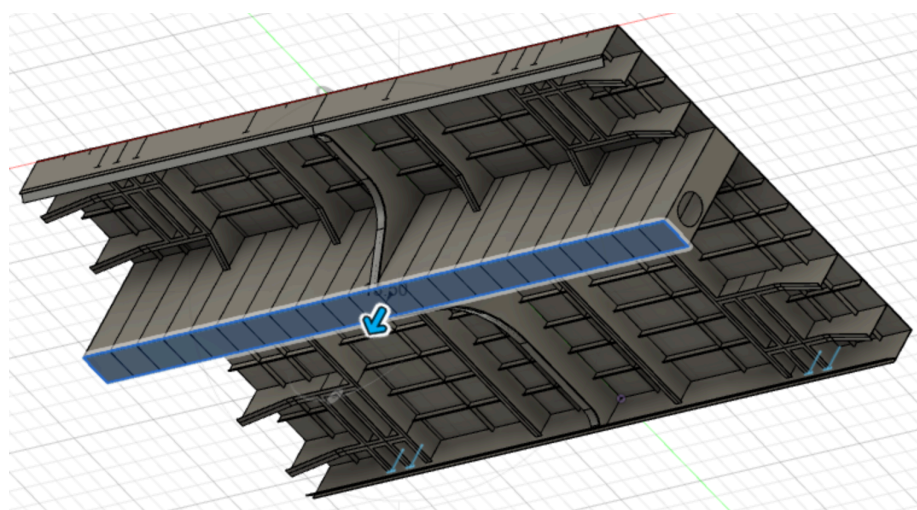
Εικόνα 6.7: Δισδιάστατο σχέδιο (13.5)/(15)200.

Επιπλέον στον κεντρικό άξονα του πλοίου σχεδιάσαμε το κύριο ενισχυτικό.



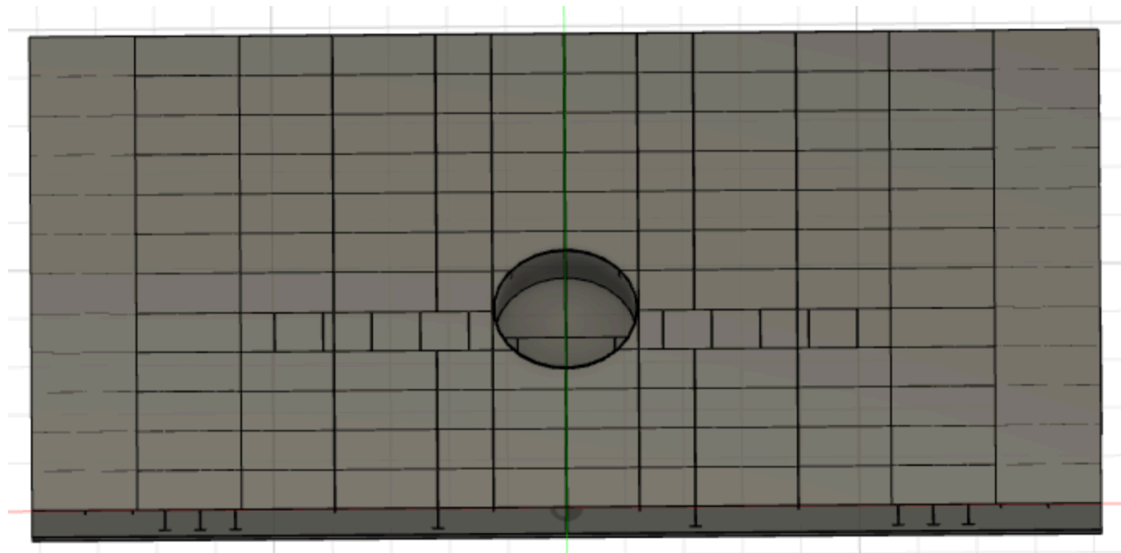
Εικόνα 6.8: Δισδιάστατο σχέδιο (20)/(28)250.

Για απλοποίηση του σχεδίου κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού της φράχτης σχεδιάστηκε μόνο το κομμάτι που αφορά το upper stool βάση των σχεδίων του πλοίου.



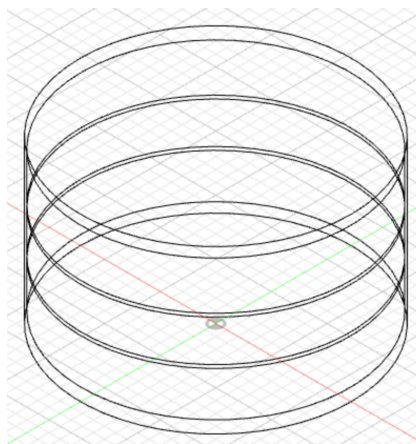
Εικόνα 6.9: Μοντελοποίηση φράχτης.

Για το σχεδιασμό της βάσης του ιστίου σε δισδιάστατο σχέδιο, δημιουργήσαμε δύο κύκλους Φ2460 και Φ2434. Εν συνέχεια με την εντολή Extrude, δημιουργήσαμε το εξωτερικό περίβλημα της βάσης. Στην συνέχεια κατασκευάσαμε σε δισδιάστατο σχέδιο κύκλους Φ2434 όπου με τον ίδιο τρόπο και την εντολή Cut, δημιουργήσαμε το εσωτερικό μέρος του στερεού.



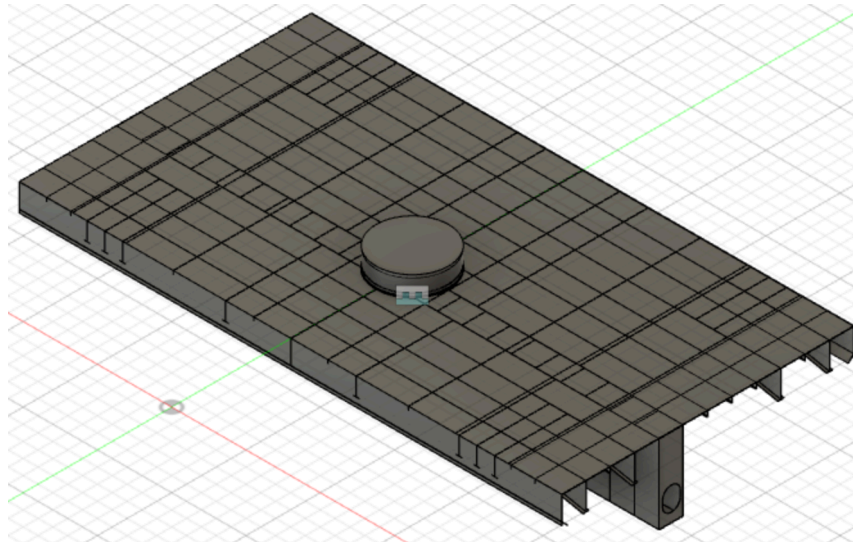
Εικόνα 6.10: Μοντελοποίηση βάσης.

Για την εφαρμογή των δυνάμεων κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, έγινε ο σχεδιασμός της βάσης του ιστού.



Εικόνα 6.11: Μοντελοποίηση βάσης ιστού.

Κατά την τελική συναρμολόγηση το καταστρώματος με τη βάση του ιστού η ένωση έγινε ως εξής: Σύραμε τα επιμέρους στερεά σε ένα παράθυρο και με την εντολή Assemble – Joint διαλέγαμε τα κοινά σημεία των στερεών που θα ενώνονταν και τη σχέση που θα είχαν μεταξύ τους (Rigid).



Εικόνα 6.12: Εξεταζόμενο μοντέλο καταστρώματος.

6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ INVENTOR

Το Inventor μπορεί να πραγματοποιεί ένα πλήθος υπολογισμών όπως:

- γραμμικών εντατικών καταστάσεων στατικής φόρτισης (linear static stress analysis),
- ανάλυσης συχνοτήτων και ιδιοσυχνοτήτων (frequency & modal analysis),
- βελτιστοποίησης και πλευρικής παραμόρφωσης (optimization and buckling),
- δυναμικής εντατικής κατάστασης (dynamic stress),
- μετάδοσης θερμότητας (transient thermal),
- υπολογισμούς μεγάλων παραμορφώσεων σε συμπαγή και κελυφωτά μοντέλα (large deformation analysis of solid & shell models).

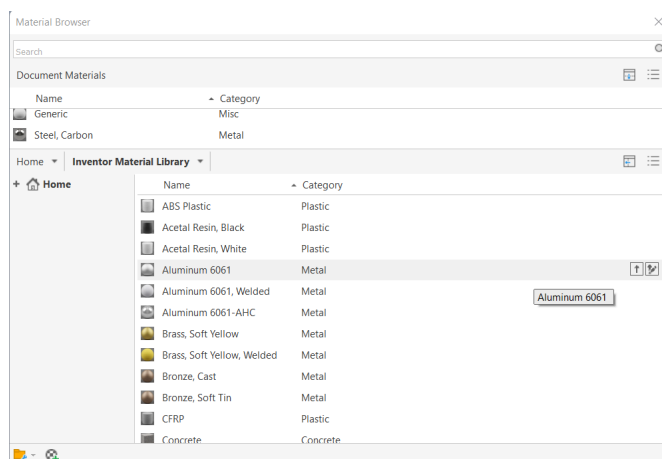
Για να ξεκινήσει προετοιμασία και η ανάλυση του μοντέλου, πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί το εξάρτημα στο περιβάλλον σχεδίασης του Inventor και να ακολουθήσει η συναρμολόγηση του (Assembly), εάν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Στην παρούσα εργασία το κομμάτι που μελετάται είναι ένα τμήμα του καταστρώματος ενός Bulk Carrier.

Αφού ανοιχθεί το αρχείο εξαρτήματος (.ipt) το οποίο θέλουμε να μελετήσουμε επιλέγουμε από το μενού εντολών Applications → Stress Analysis.

Το πρώτο βήμα στην ανάλυση αντοχών είναι ο καθορισμός του υλικού του εξαρτήματος. Προσδιορίζοντας ένα από τα προκαθορισμένα υλικά κατά την εισαγωγή στο περιβάλλον των Finite Element Analysis (FEA) υπολογισμών, το πρόγραμμα θα το αναθέσει στο κομμάτι. Στη παρούσα εργασία το υλικό της κατασκευής είναι σίδηρος ποιότητας AH36 και από τις υπάρχουσες επιλογές του προγράμματος επιλέξαμε το ακόλουθο.

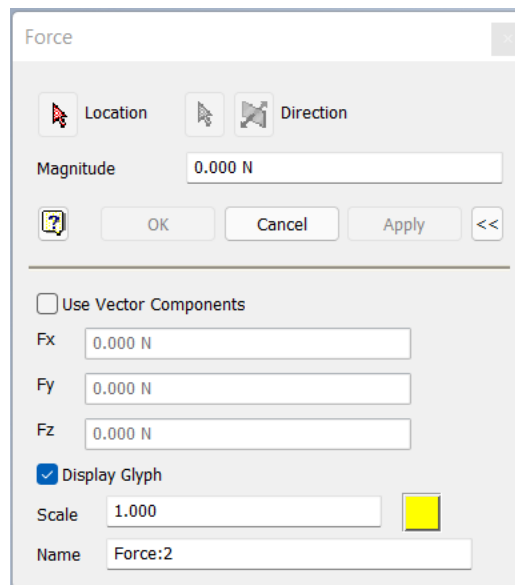
Name	Steel, Carbon	
General	Mass Density	7.85 g/cm ³
	Yield Strength	350 MPa
	Ultimate Tensile Strength	420 MPa
Stress	Young's Modulus	200 GPa
	Poisson's Ratio	0.29 ul
	Shear Modulus	77.5194 GPa
Part Name(s)	Part4.ipt Deck_Final v14.ipt	

Η σωστή επιλογή υλικού είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την ορθή εξέλιξη της διαδικασίας. Το πρόγραμμα χρειάζεται να γνωρίζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού: την πυκνότητα (Density), το E του υλικού δηλαδή το Μέτρο του Young (Young's Modulus), το όριο διαρροής (Yield Strength), το άνω όριο θραύσης (Ultimate Tensile Strength), κλπ.. Είναι πιθανό το υλικό που θέλουμε να επιλέξουμε να μην παρέχεται στις βιβλιοθήκες του προγράμματος, συνεπώς σε αυτή την περίπτωση μπορεί να δημιουργηθεί από τον σχεδιαστή.



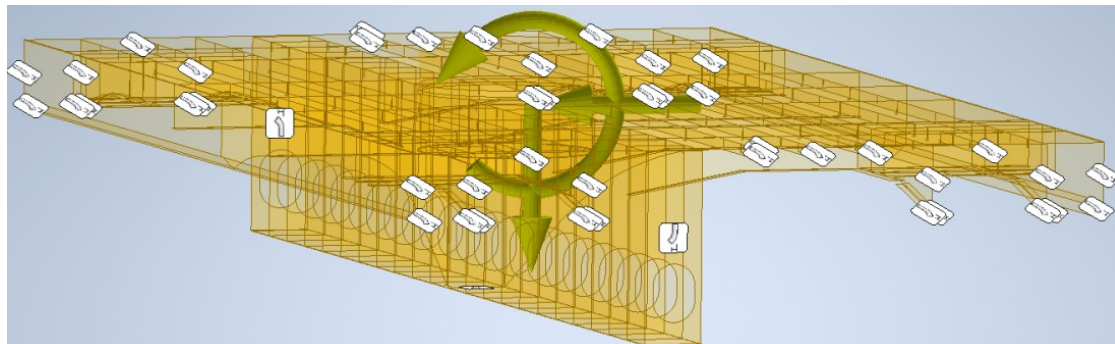
Εικόνα 6.13: Μενού επιλογής υλικού στο Inventor.

Αφού καθοριστεί το υλικό του εξαρτήματος, το επόμενο βήμα είναι η μετάβαση στο περιβάλλον εργασίας Stress Analysis, όπου θα οριστούν οι συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions). Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει το είδος των φορτίσεων και τον τρόπο έδρασης του εξαρτήματος. Γενικά, η φόρτιση του εξαρτήματος μπορεί να δημιουργείται από εξωτερικά φορτία ή από φορτία λόγω της μάζας του, που είναι ορισμένα ως προς το μέτρο, την κατεύθυνση και τα σημεία / ακμές / επιφάνειες εφαρμογής τους.



Εικόνα 6.14: Μενού επιλογής συγκεντρωμένων φορτίων στο Inventor.

Η εντατική κατάσταση του εξαρτήματος μπορεί να επηρεαστεί λόγω κάποιας ιδιόμορφης έδρασής του. Ο τρόπος έδρασης που θα διατηρήσει τα επιλεγμένα σημεία / ακμές / επιφάνειες σε συγκεκριμένες θέσεις, επιλέγεται σε αυτό το σημείο.



Εικόνα 6.15: Έδραση με πακτώσεις και εφαρμογή συγκεντρωμένων φορτίων στο μοντέλο.

Το επόμενο βήμα είναι να ανοιχθεί το πλαίσιο διαλόγου Stress Analysis Settings για να ορισθούν οι ρυθμίσεις, βάση των οποίων θα πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί. Η επιλογή αυτών των ρυθμίσεων δεν επηρεάζονται από τους ορισμούς της φόρτισης και έδρασης του εξαρτήματος, κατά συνέπεια μπορούν να πραγματοποιηθούν και πριν από αυτούς. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, θα ασχοληθούμε μόνο με τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης, οπότε στο αντίστοιχο παράθυρο διαλόγου πρέπει να είναι επιλεγμένη η Stress Analysis.

Στον πίνακα Προετοιμασία για να απλοποιηθεί το μοντέλο επειδή περιέχει πολλά λεπτά σώματα, επιλέχθηκε η επιλογή Find Thin Bodies. Συγκεκριμένα όταν η αναλογία $L/D = \text{Μήκος} / \text{Πάχος}$, όπου:

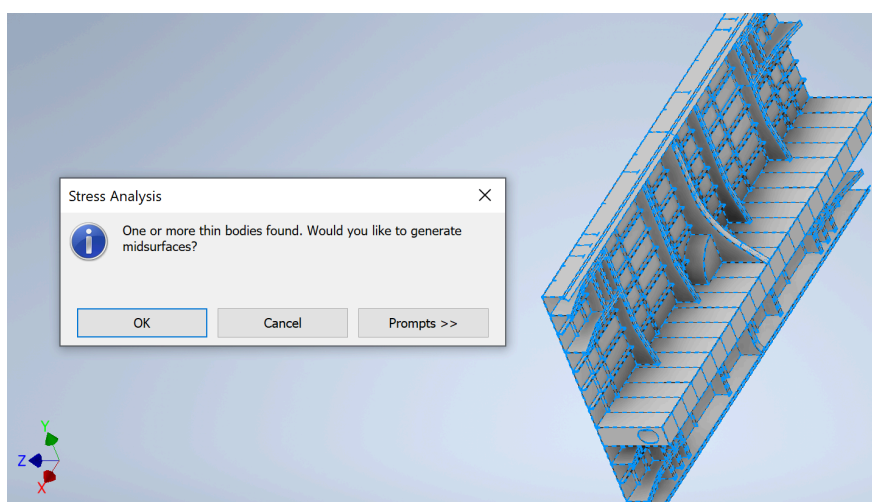
Μήκος: το συνολικό μήκος του σώματος

Πάχος: το πάχος του σώματος

είναι κάτω από 100, το σώμα θεωρείται παχύ (ή συμπαγές) και συνιστάται να αναλυθεί ως συμπαγές, για να εκτελεσθεί ακριβής ανάλυση χρησιμοποιώντας συμπαγή στοιχεία.

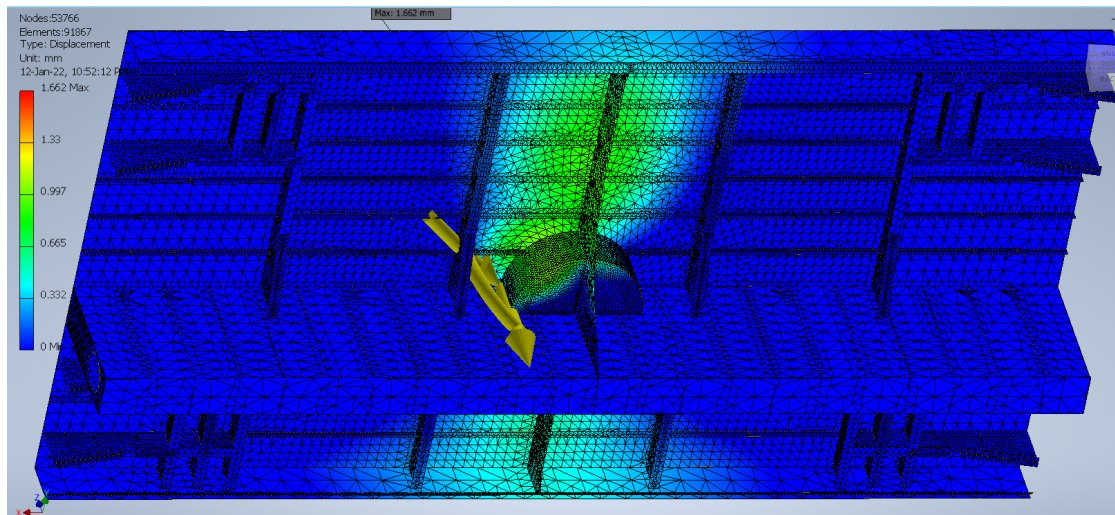
Εάν η αναλογία L/D του σώματος εισόδου είναι πάνω από 100, τότε το σώμα θεωρείται ως λεπτό στοιχείο και επισημαίνεται ως τέτοιο.

Η επιλογή Midsurface επιθεωρεί επιλεγμένα σώματα και εάν πληρούν τα κριτήρια χαρακτηριστικών του, τα μετατρέπει σε χαρακτηριστικά τμήματα που ορίζονται από το midsurface.



Εικόνα 6.16: Μενού επιλογής Find Thin Bodies στο Inventor.

Το τελευταίο βήμα που πρέπει να πραγματοποιηθεί πριν την προσομοίωση (run simulation), είναι ο υπολογισμός του πλέγματος (meshing). Το πρόγραμμα το κάνει αυτόματα, παρ' όλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα για χειροκίνητη επιλογή του μεγέθους του πλέγματος, καθώς και για τοπικές πυκνώσεις για ορθότερο υπολογισμό των φορτίσεων στα κρίσιμα σημεία.



Εικόνα 6.17: Πλέγμα στο υπό εξέταση μοντέλο στο Inventor.

6.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια διερεύνησης της δυνατότητας αντικατάστασης των υφιστάμενων γερανών σε ένα Bulk Carrie με ιστία. Με τη χρήση του Inventor υπολογίστηκαν οι φορτίσεις και οι μετατοπίσεις από τις δυνάμεις Lift και Drag για γωνίες από 10° έως 80° που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.5.

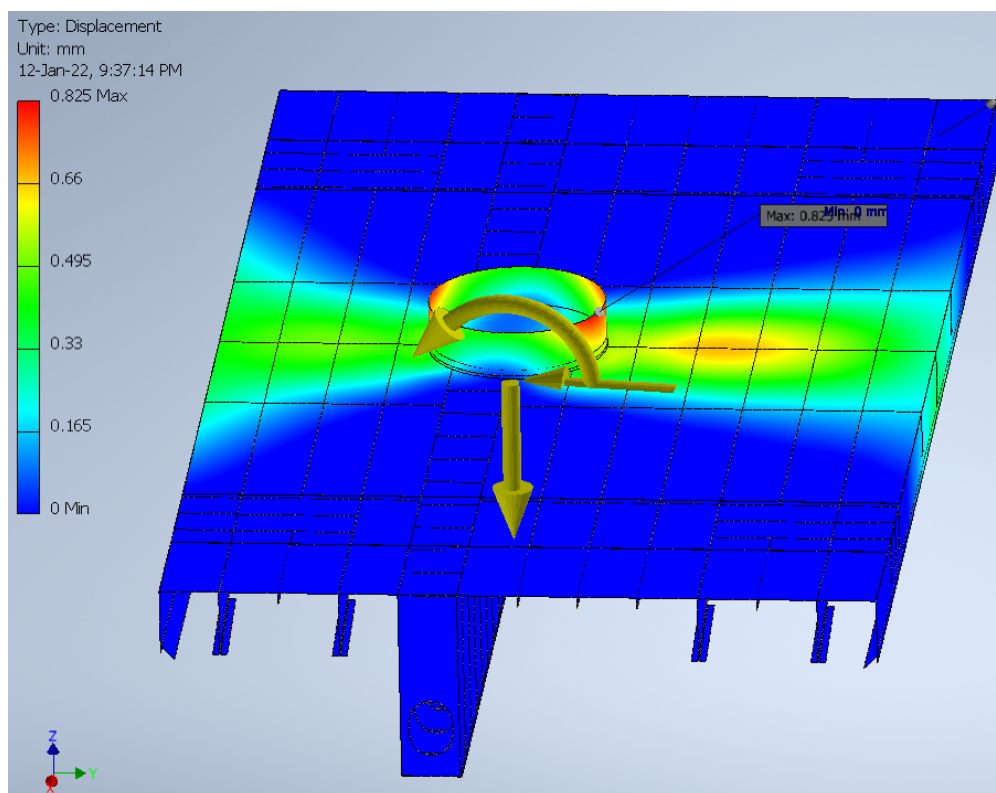
Το βάρος της κατασκευής εκτιμήθηκε, βάση της μελέτης των Kazuyuki Ouchi et. Al (2013), στους 100ton δηλαδή περίπου 980665 N.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες τάσεις Von Mises και οι μετατοπίσεις που παρουσιάστηκαν στην κατασκευή για γωνίες πρόσπτωσης ανέμου από 10° έως 80°.

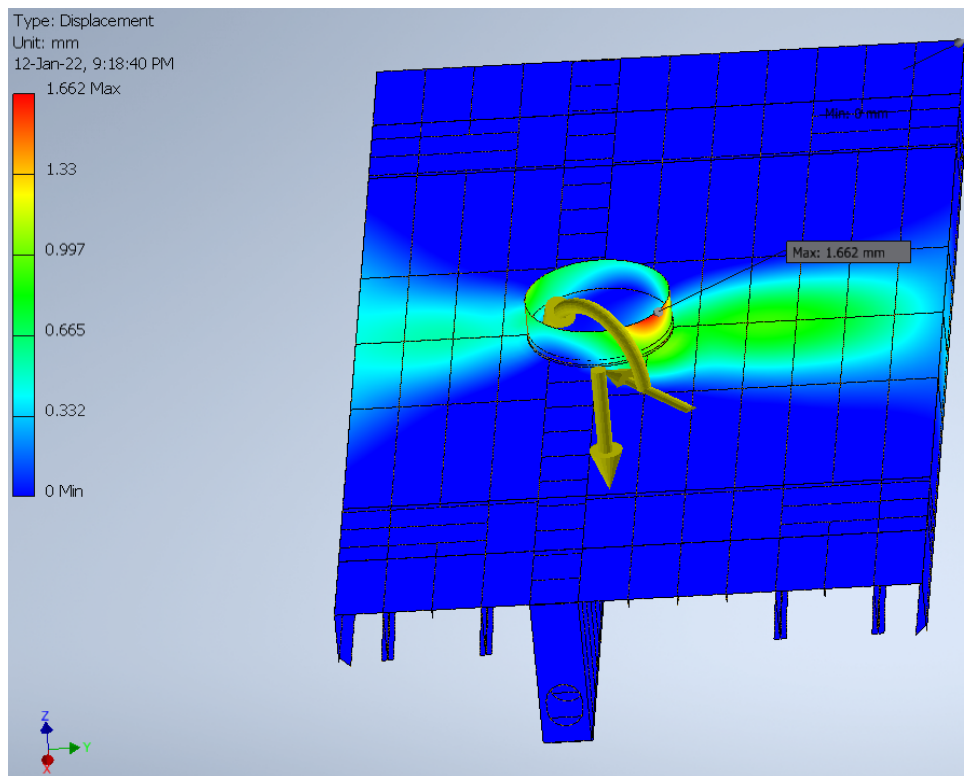
Πίνακας 6.1: Μέγιστες δυνάμεις και μετατοπίσεις ανά γωνιά πρόσπτωσης ανέμου.

Γωνιά Πρόσπτωσης Ανέμου	Max Von Mises Stress (Mpa)	Displacement (mm)
10	129,3	0,825
20	158,0	1,182
30	174,2	1,246
40	239,8	1,662
50	178,3	1,126
60	179,2	1,145
70	186,8	1,081
80	162,0	1,001

Είναι εμφανές ότι για γωνιά πρόσπτωσης 40° παρουσιάζονται οι μέγιστες δυνάμεις και μετατοπίσεις ενώ για γωνιά 10° οι ελάχιστες.



Εικόνα 6.18: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 10°.



Εικόνα 6.19: Μετατοπίσεις για γωνιά προστώσης 40°.

Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι απεικονίσεις των δυνάμεων και των μετατοπίσεων.

Βάση των αποτελεσμάτων, κρίνεται δυνατή η αντικατάσταση των υφιστάμενων γερανών με ιστία χωρίς την αλλαγή των υφιστάμενων ενισχυτικών.

6.6 ΣΥΝΟΨΗ

Το Autodesk Inventor Professional 2022 είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο παραμετρικού λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης που μπορεί να παράγει έγκυρα μοντέλα με την εξαγωγή των κατασκευαστικών σχεδίων αλλά κυρίως παρέχει μέσω της ανάλυσης, κατάλληλο προσδιορισμό υλικών και αντοχών.

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια σύντομη παρουσίαση της σχεδίασης των διάφορων εξαρτημάτων του μοντέλου, καθώς και η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να γίνει μια ορθή προσομοίωση με τη χρήση του Inventor.

Τέλος, έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων με χρήση πινάκων και εικόνων.

Συμπεράσματα

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα Εργασία, παρουσιάστηκε μια προσπάθεια διερεύνησης της αντικατάστασης των γερανών σε ένα Bulk Carrier με την εφαρμογή ιστίων και καταλληλόλητας των υπάρχων ενισχυτικών. Προκειμένου να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με δυσμενείς φορτίσεις που να καλύπτει την πλειοψηφία των καταστάσεων στην καθημερινότητα.

Για τη συγκεκριμένη έρευνα, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο πρότυπο απεικόνισης του καταστρώματος. Ο τρισδιάστατος αυτός έλεγχος επιλέχθηκε για να διερευνήσει αν προσφέρεται επαρκές ενίσχυση στη βάση του γερανού και του καταστρώματος ώστε να αντέξουν τα φορτία των ιστίων. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Inventor, ενώ καθορίστηκε συγκεκριμένη διατομή καταστρώματος από ένα Bulk Carrier.

Είναι σαφές ότι για εφαρμογή ιστού μήκους 50 m και συνολικής ιστιοφορίας 1000 m² και για ανέμους έντασης 15 m/s, οι δυνάμεις και οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται είναι σε τέτοιο βαθμό, ώστε να επιτρέπεται η αντικατάσταση.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, είναι βέβαιο ότι προτείνεται το τρισδιάστατο πρότυπο στη διερεύνηση της επάρκειας αντοχής της κατασκευής.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία πραγματοποιήθηκε μια πρώτη προσέγγιση του ζητήματος, εφαρμόζοντας έναν συνδυασμό φορτίσεων με βάση τη γωνιά πρόσπτωσης του ανέμου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι οι κρίσιμη γωνιά είναι αυτή των 40°.

Επίσης, η διατομή που επιλέχθηκε είναι συγκεκριμένη για τμήμα καταστρώματος από Bulk Carrier μεταξύ των αμπαριών 4 – 5. Επομένως, προτείνεται η περαιτέρω έρευνα για διαφορετικές διατομές καθώς και για ισχυρότερες εντάσεις ανέμου. Επιπροσθέτως, η κατάσταση της θάλασσας είναι ένα χαρακτηριστικό που δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα έρευνα.

Τέλος, ο εμπλουτισμός της συγκεκριμένης εργασίας μπορεί να γίνει διερευνώντας ένα μεγαλύτερο εύρος γωνίας πρόσπτωσης ανέμου, προκειμένου να εξασφαλίζεται μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση του εξεταζόμενου καταστρώματος, καθώς και εφαρμογή ιστίων μεγαλύτερης επιφάνειας κοντά στη μέγιστη οριακή.

Ειδική μνεία πρέπει να γίνει στην τήρηση των κανόνων κατά τη σχεδίαση ενός εξαρτήματος του πλοίου. Στην παρούσα εργασία δεν εξασφαλίζεται η ορατότητα, δύο μηκών σκάφους, για την ασφαλή πλεύση του πλοίου. Μια λύση είναι η εγκατάσταση δυο πρόσθετων θέσεων πηδαλιουχίας εκατέρωθεν της κεντρικής, ώστε να εξασφαλιστεί από τον κανονισμό η απαιτούμενη ορατότητα.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

Shukla, P. and Ghosh, K. (2009). Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships. International Journal of Physical and Mathematical Sciences

Pravesh Chandra Shukla and Kunal Ghosh, Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships (2009)

N I B Ariffin and M A Hannan, Published under licence by IOP Publishing Ltd, Wingsail technology as a sustainable alternative to fossil fuel (2019)

Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa, Akihiro Kanai and Masanobu Katori, “Wind Challenger” the Next Generation Hybrid Sailing Vessel (2013)

Kanai, A., Uzawa, K., Ouchi, K.(2011). ‘Performance Prediction of Large Sailing Vessel with Multiple Wing Sails by CFD, Wind Tunnel Test and EPP’, Conference Proceedings of Japan Society of Naval Architect and Ocean Engineering

Yong Ma, Huaxiong Bi, Runze Gan, Xiang Li, Xinping Yan, New insights into airfoil sail selection for sail-assisted vessel with computational fluid dynamics simulation, Advances in Mechanical Engineering 2018, Vol. 10(4) 1–12

R.W.Bilger ,Sail Force Coefficients and Optimum Appendages for a sailboat , Twelfth Australian Fluid Mechanics Conference , Australia (1995)

NASA (2015). Shape Effects on Drag, Διαθέσιμο στο:
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/shaped.html> (Πρόσβαση: 01 Δεκεμβρίου 2021).

Newman, J. N. (2017). Marine Hydrodynamics; 40th Anniversary Edition. The MIT Press, Cambridge, USA.

Journal of Sailing Technology 2021, volume 6, issue 1, pp. 91 – 117. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

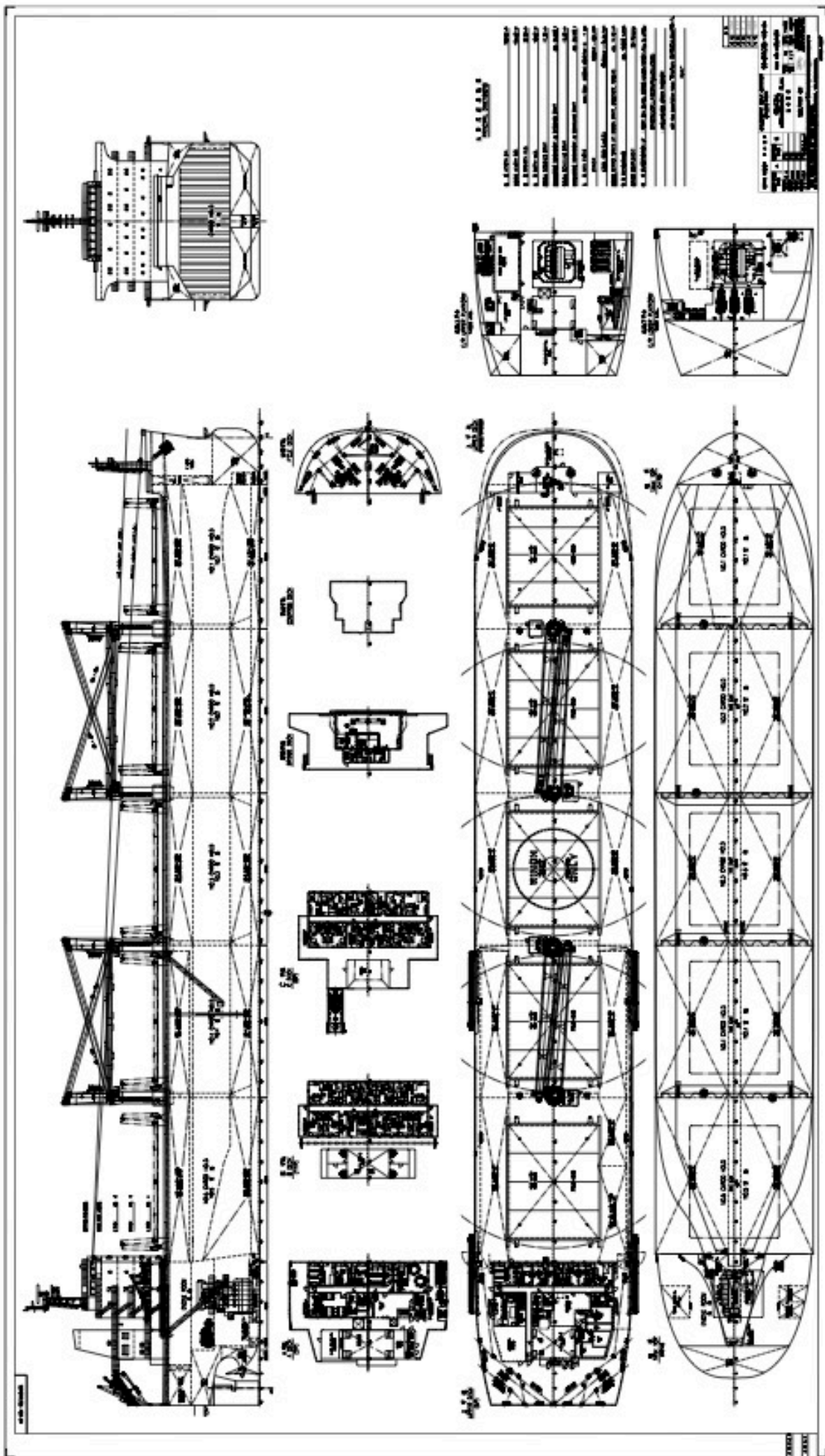
Παναγιώτη Γ. Στρούτζα , ΙΣΤΙΟΠΛΟΙΑ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΚΗ ΤΕΧΝΗ , Πανελλήνιος
Όμιλος Ιστιοπλοΐας Ανοιχτής Θαλάσσης (2010)

Γ.Γρηγορόπουλος, Σ.Περισσάκης, Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Μικρών
Σκαφών Ι», (“Παιδεία Μπροστά”, 2ο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και
Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης).

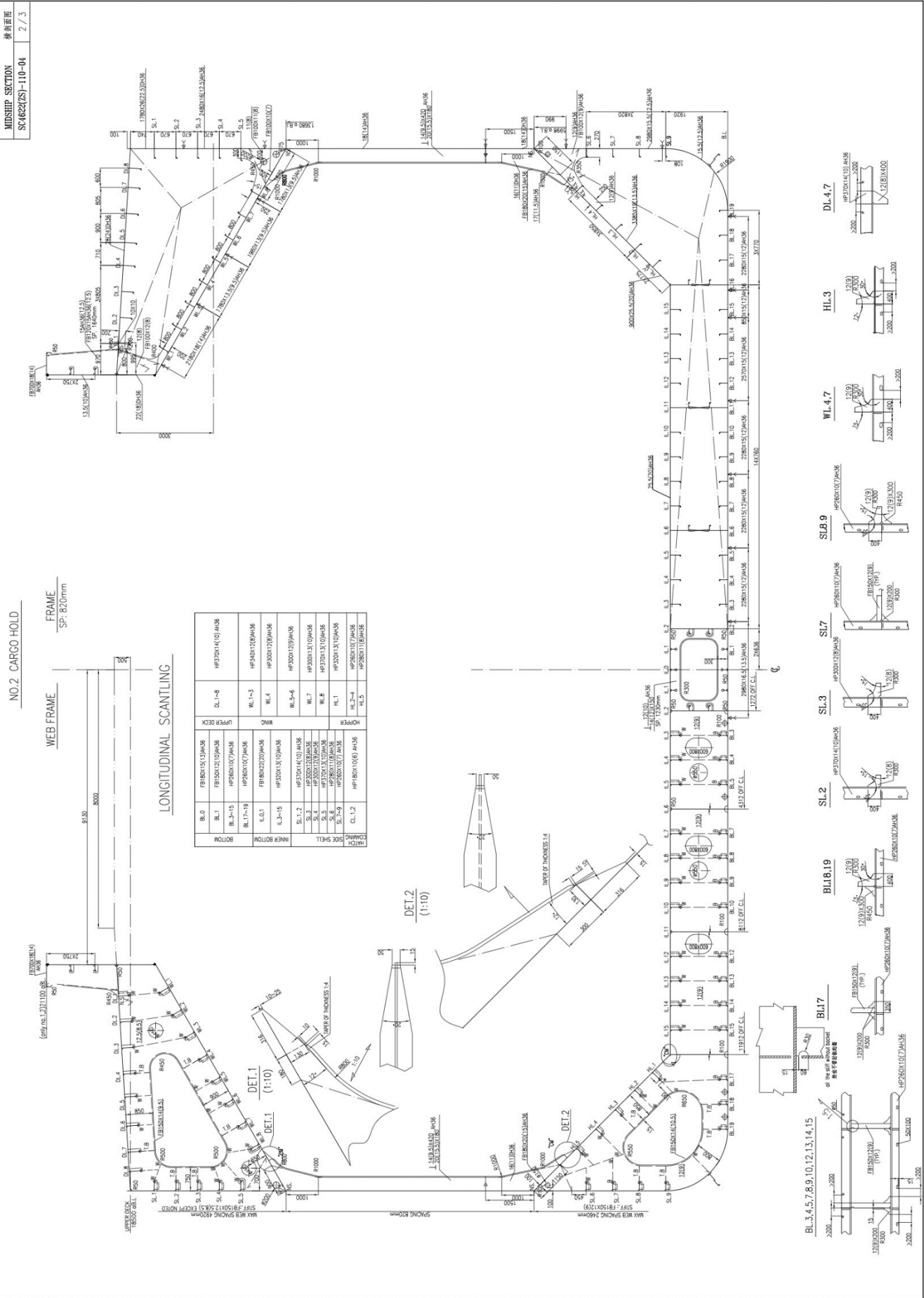
Wikipedia, Διαθέσιμο στο: <https://el.wikipedia.org>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

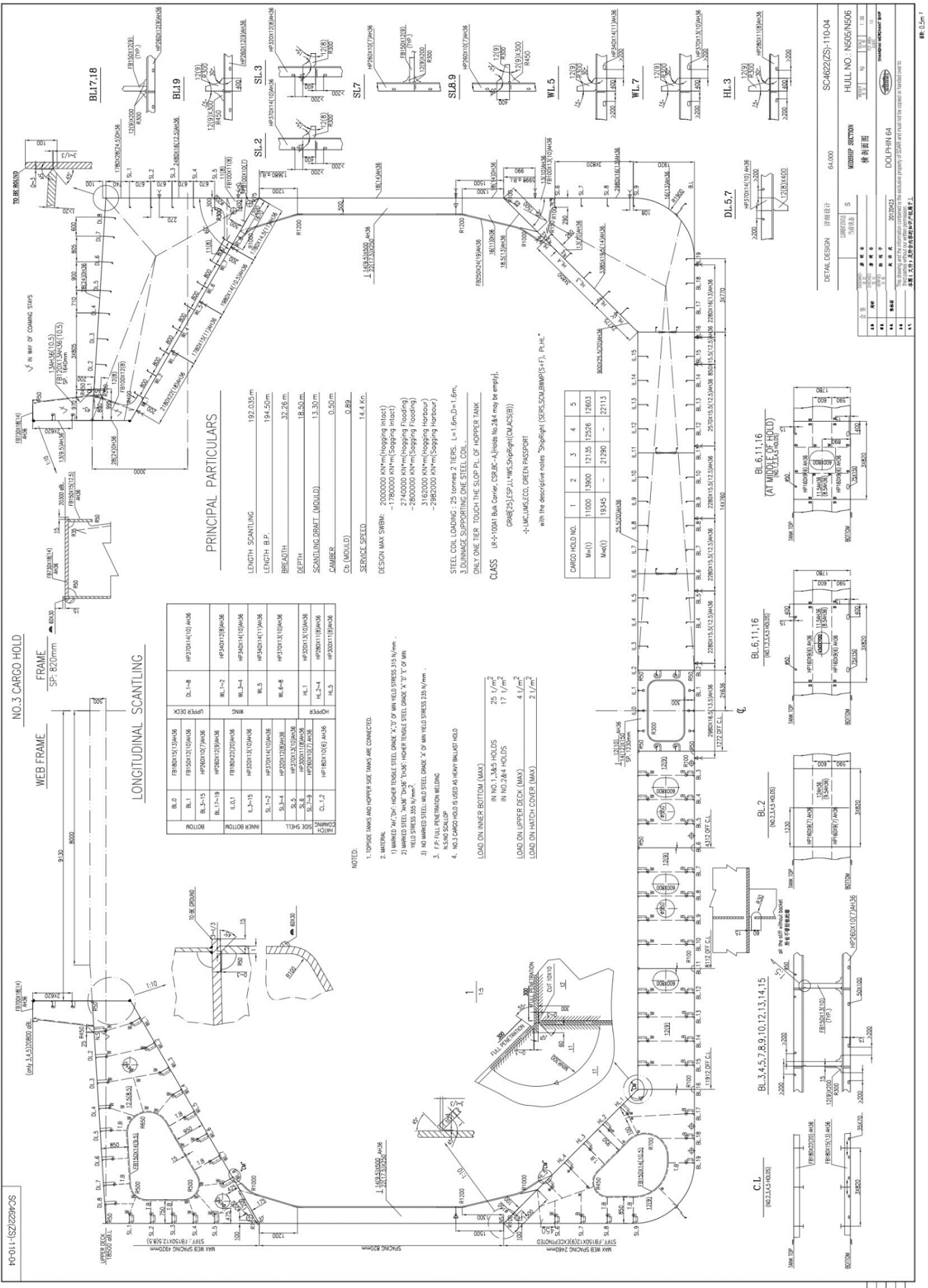
Αναλυτικά Σχέδια Πλοίου



Εικόνα III.1: Γενική διάταξη πλοίου.

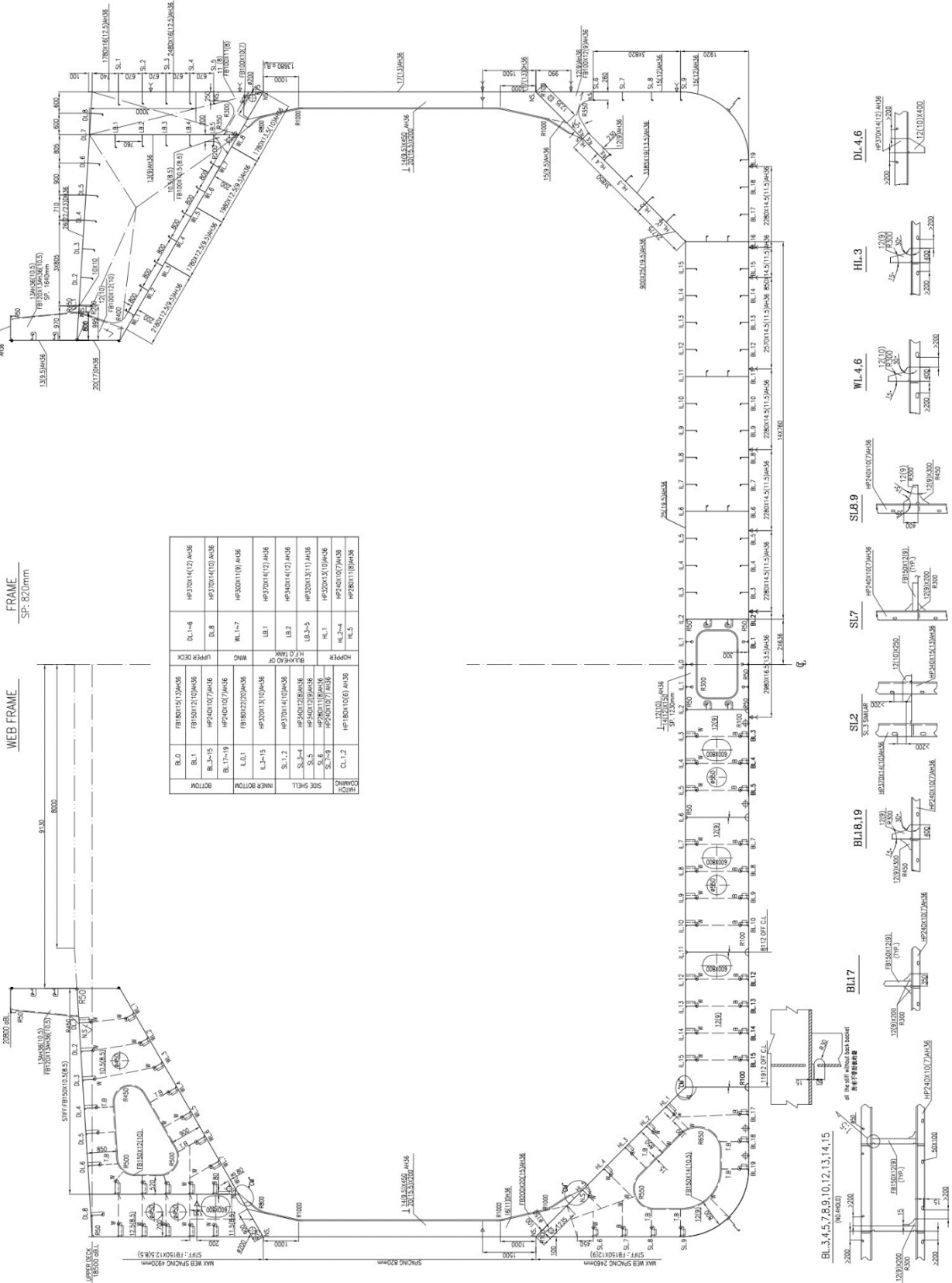


Εικόνα ΠΙ.2: Μέση τομή πλοίου (Cargo No.2).

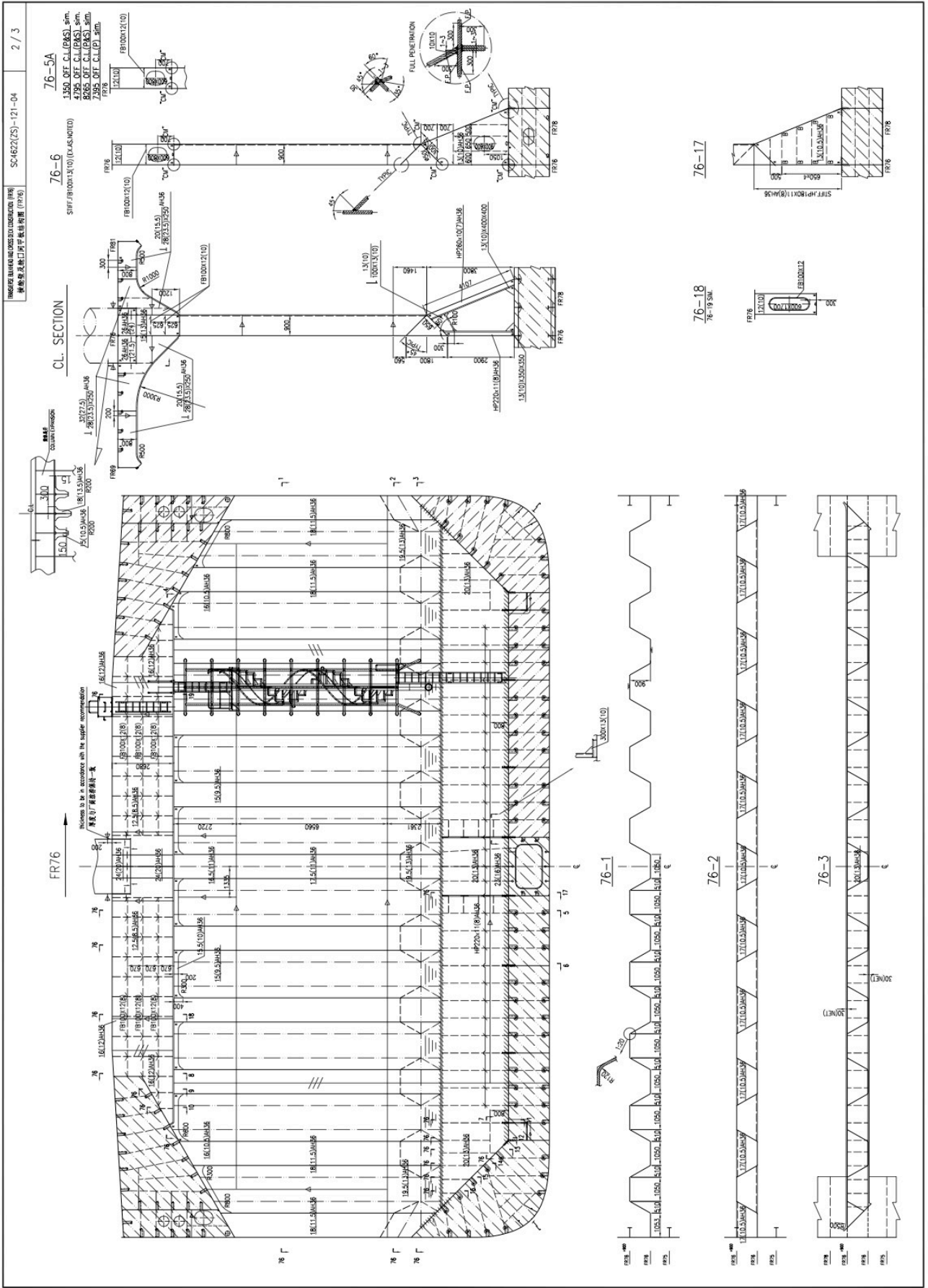


Εικόνα ΠΙ.3: Μέση τομή πλοίου (Cargo No.3).

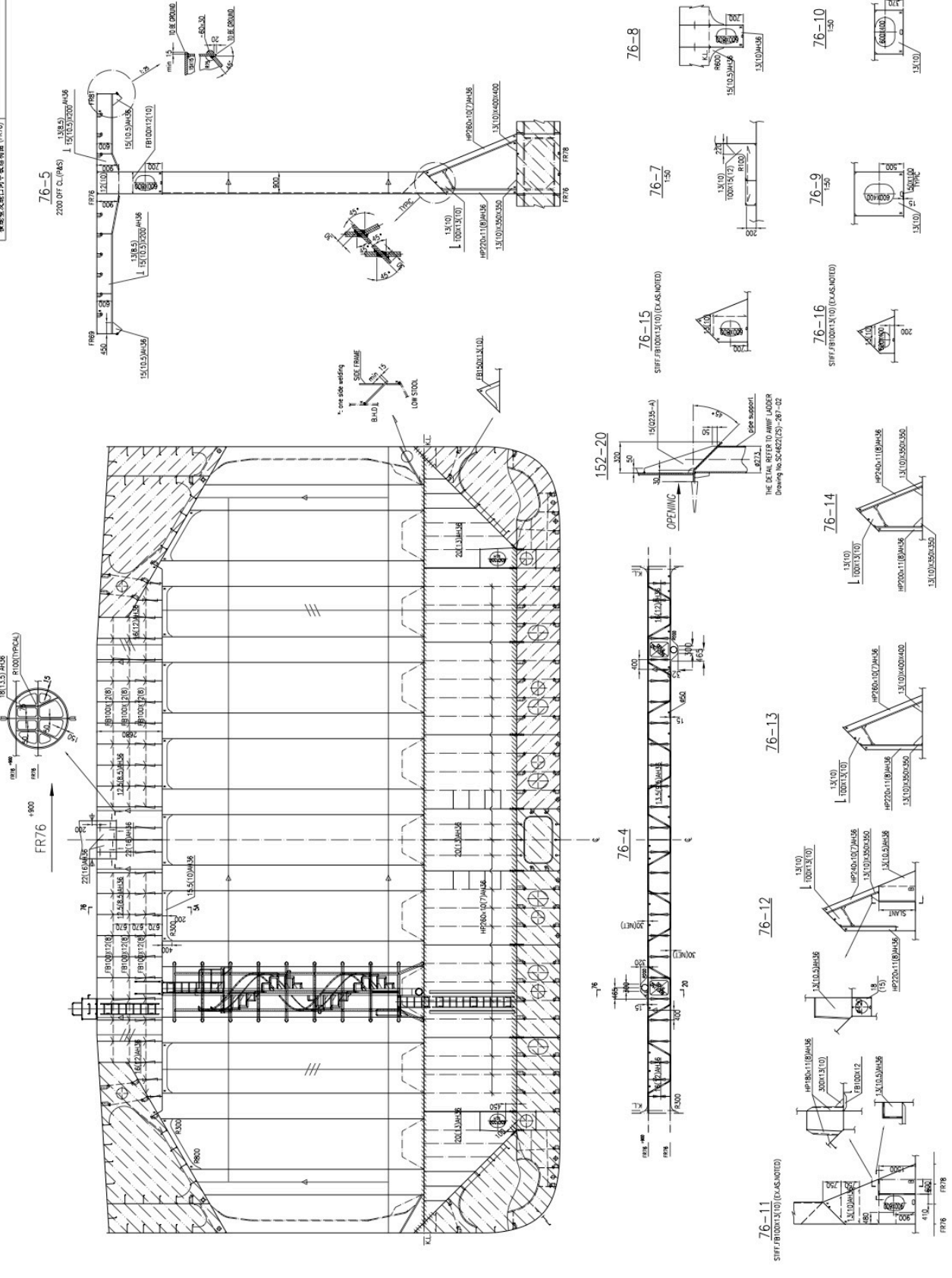
NO. 4 CARGO HOLD



Εικόνα III.4: Μέση τομή πλοίου (Cargo No.4).



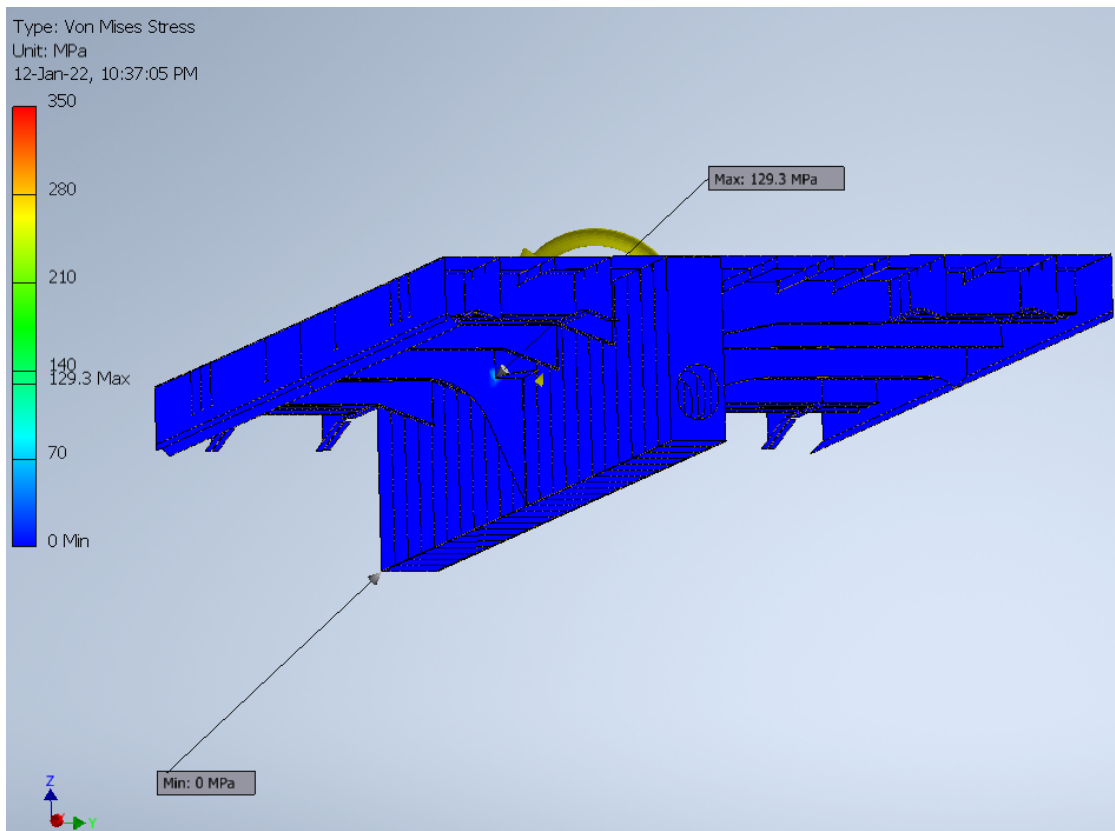
Εικόνα III.7: Σχέδια Transverse και Cross Deck (2).



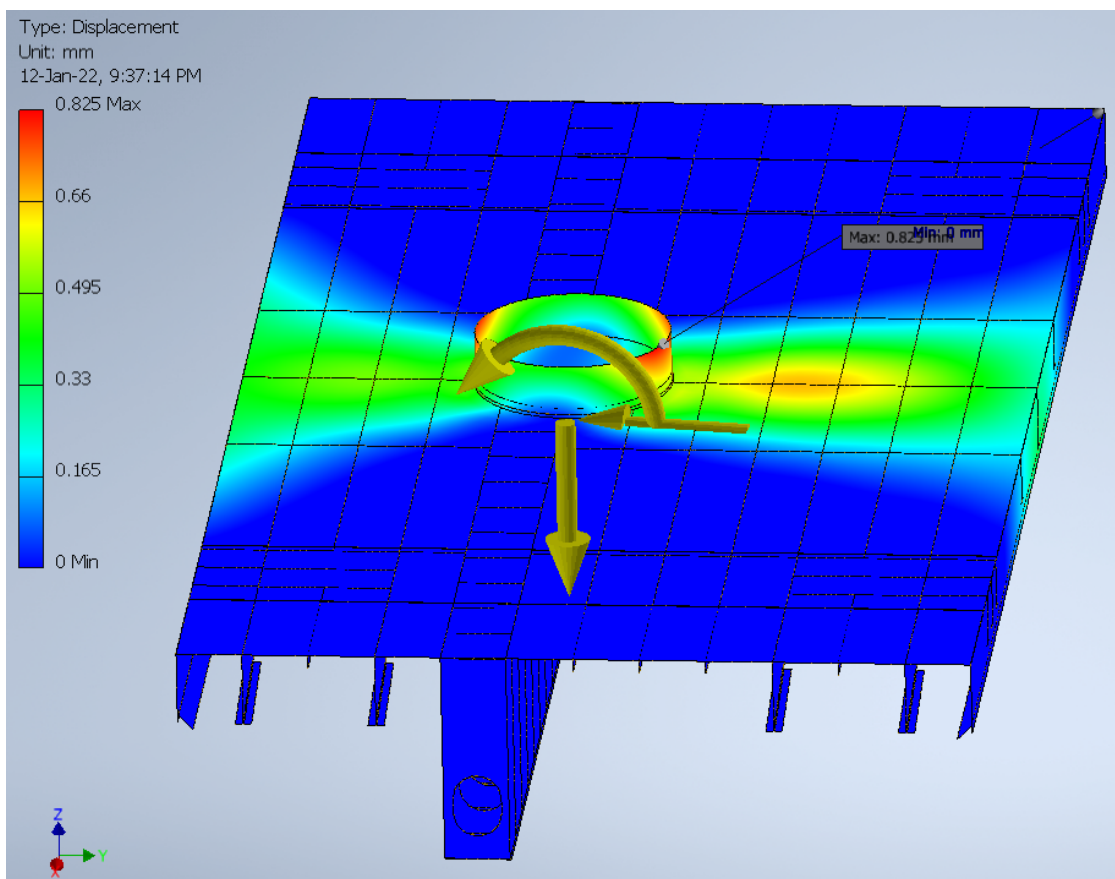
Εικόνα III.8: Σχέδια Transverse και Cross Deck (3).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

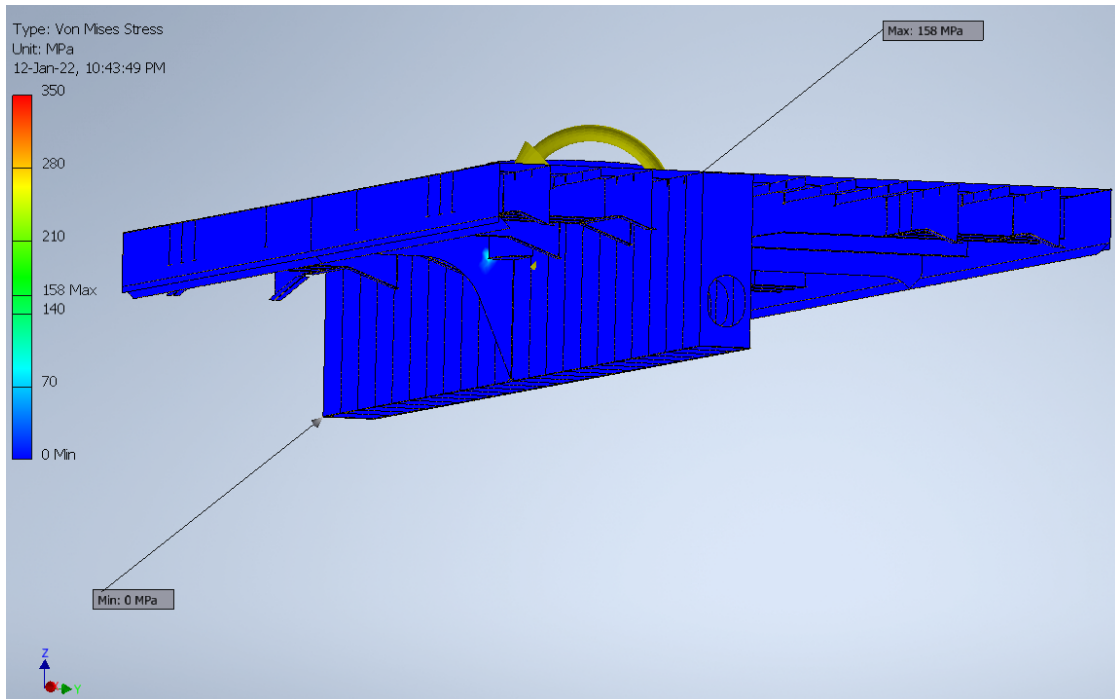
Απεικονίσεις Τάσεων Von Mises και Μετατοπίσεων



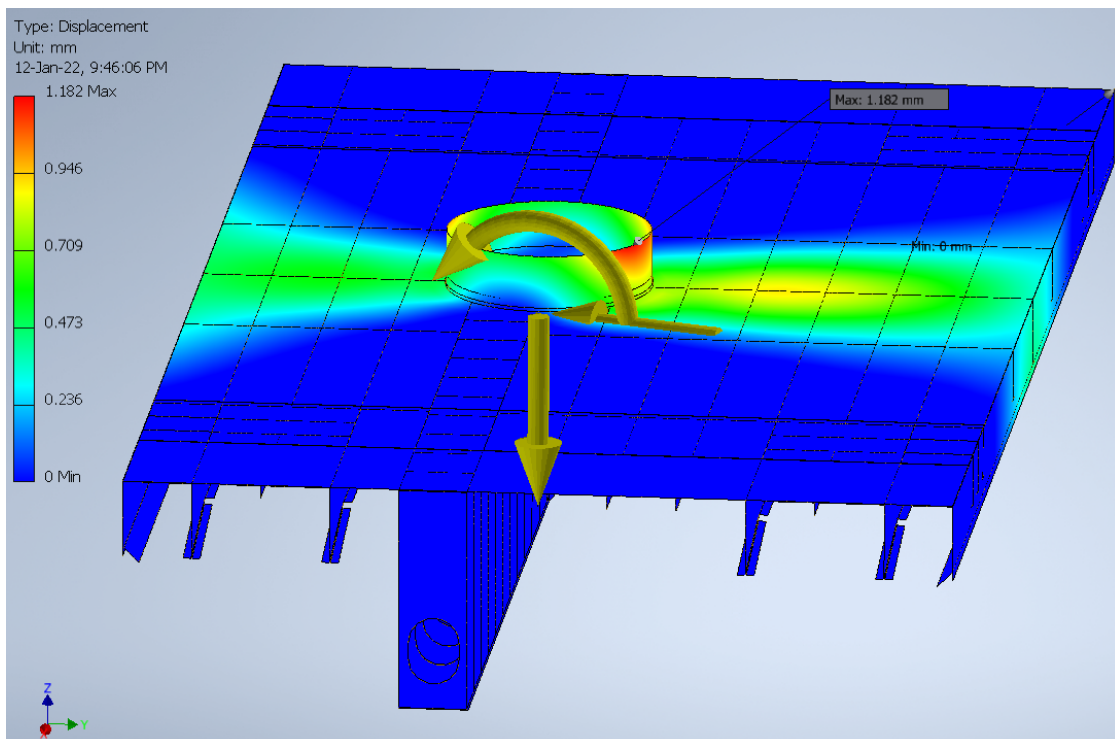
Εικόνα Π2.1: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 10° .



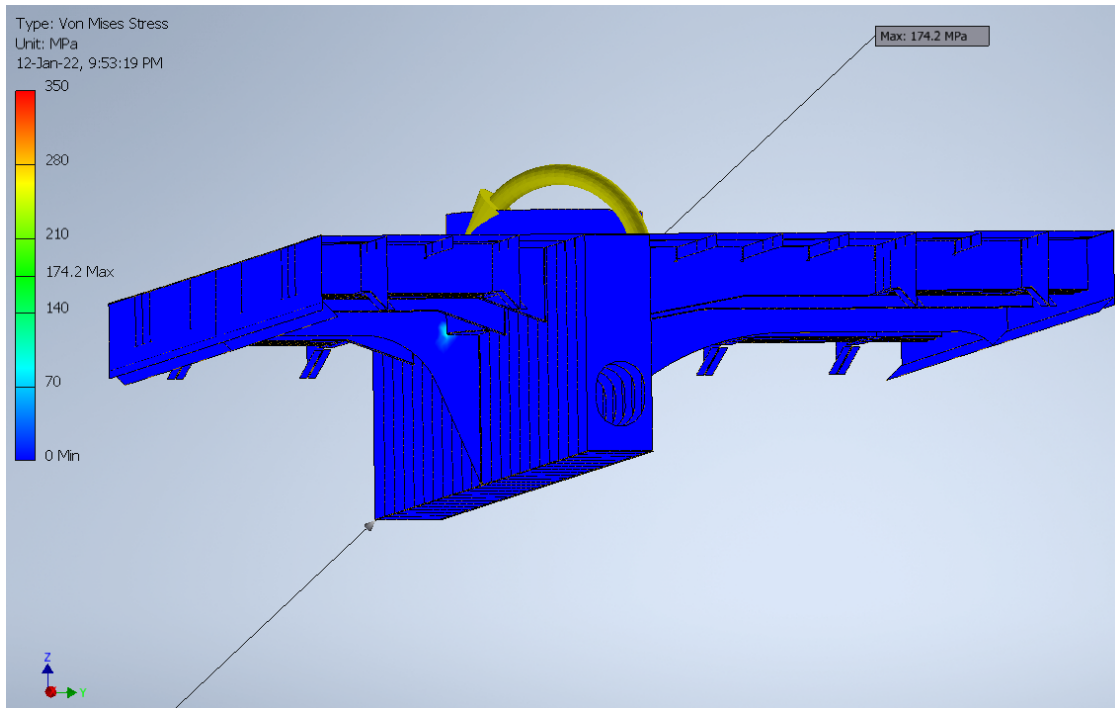
Εικόνα Π2.2: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 10° .



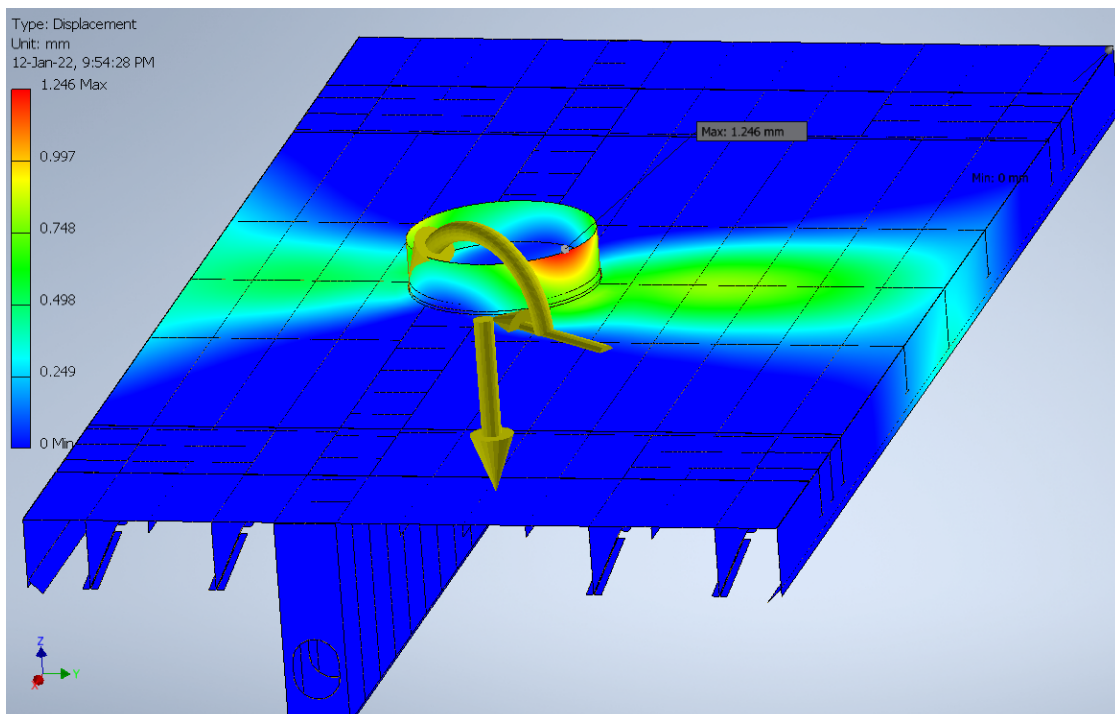
Εικόνα Π2.3: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 20°.



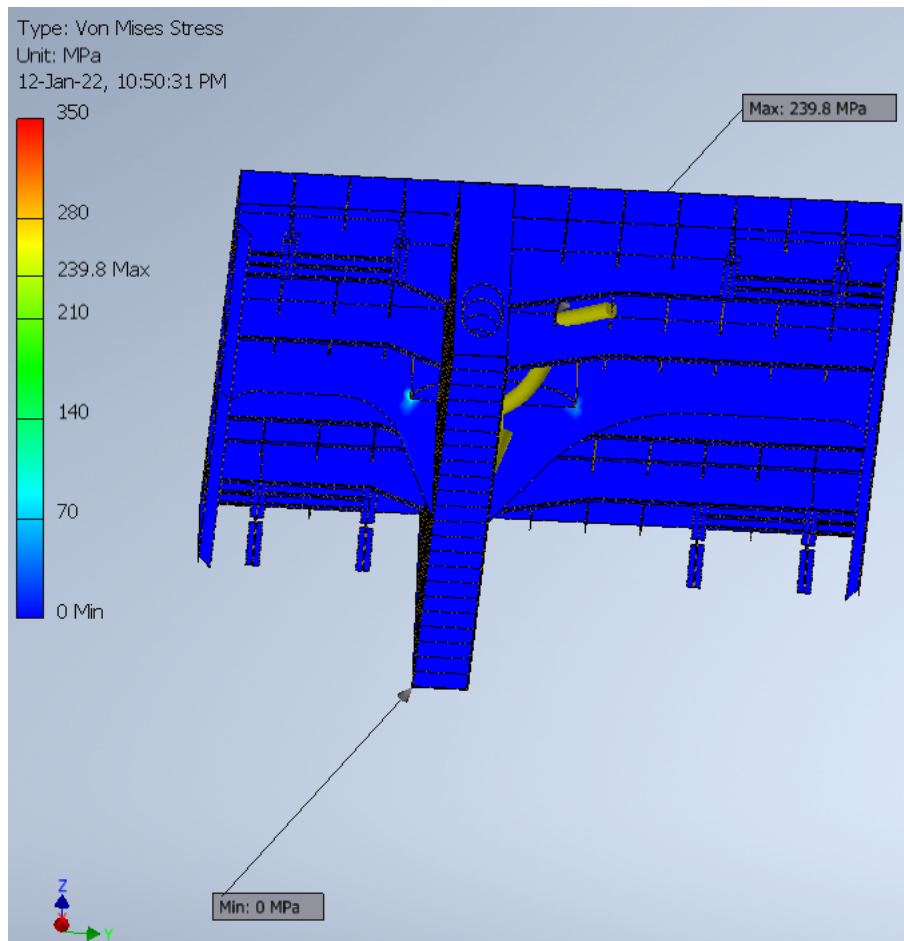
Εικόνα Π2.4: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 20°.



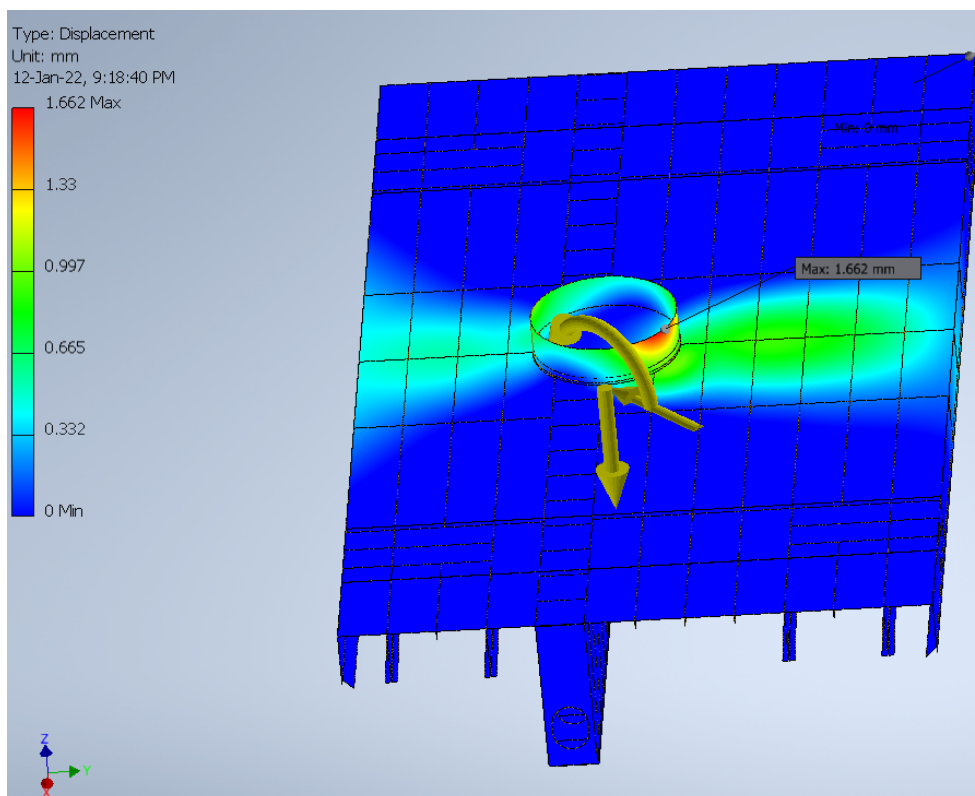
Εικόνα Π2.5: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 30°.



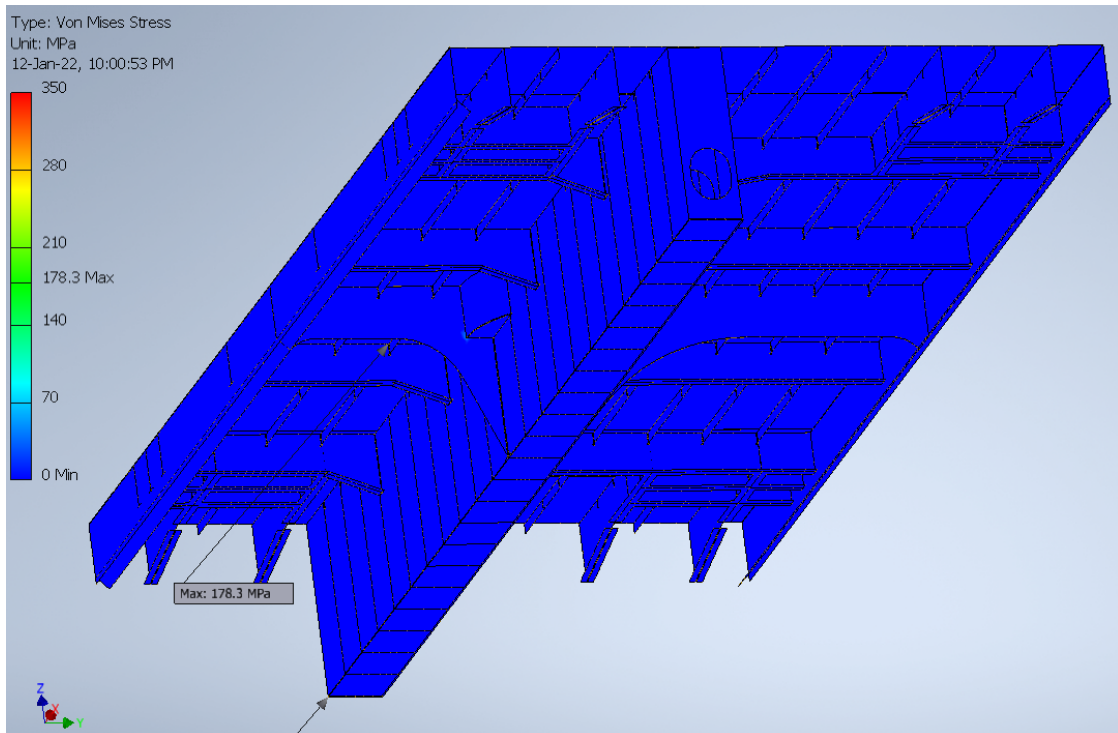
Εικόνα Π2.6: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 30°.



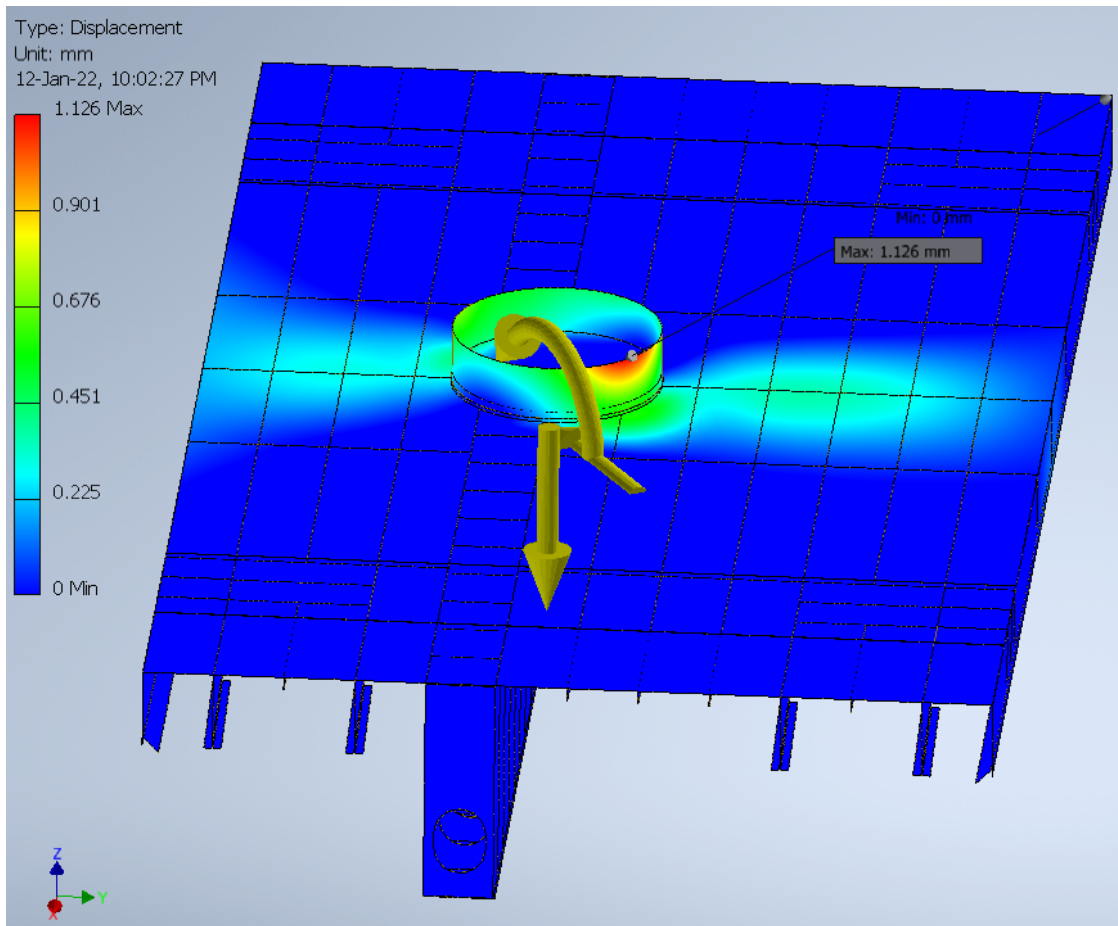
Εικόνα Π2.7: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 40°.



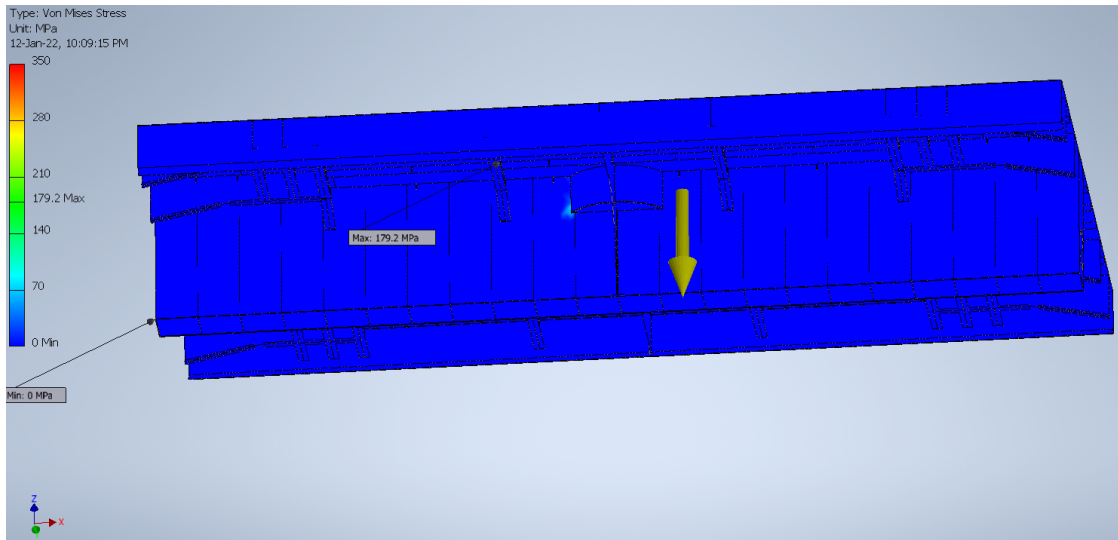
Εικόνα Π2.8: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 40°.



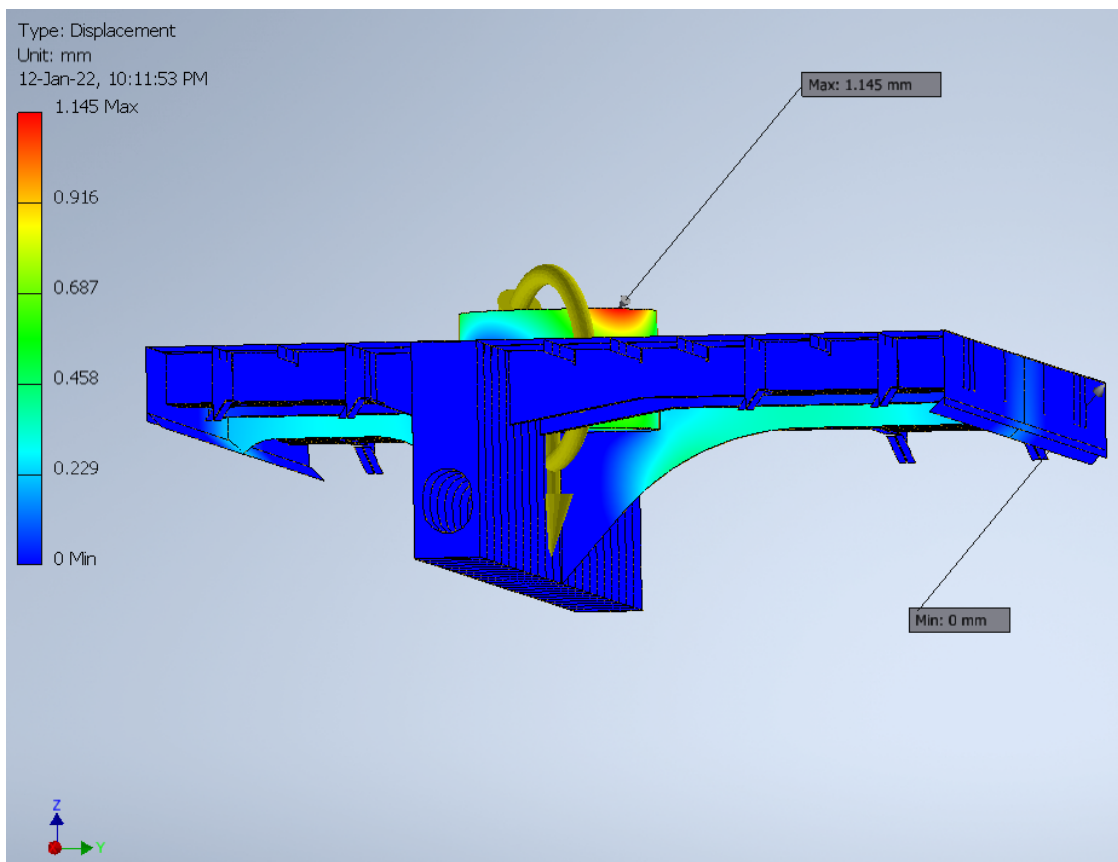
Εικόνα Π2.9: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 50°.



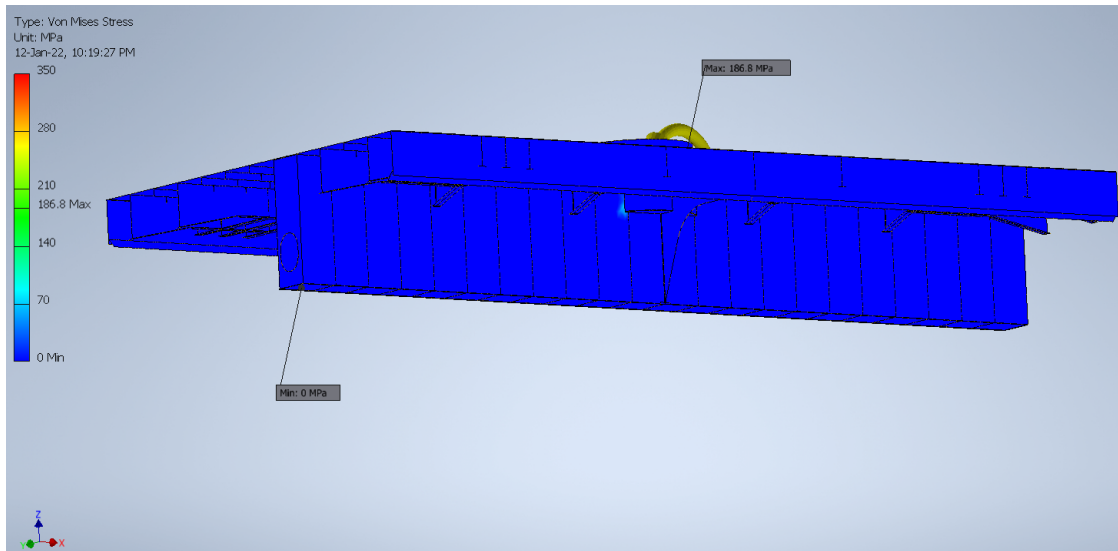
Εικόνα Π2.10: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 50°.



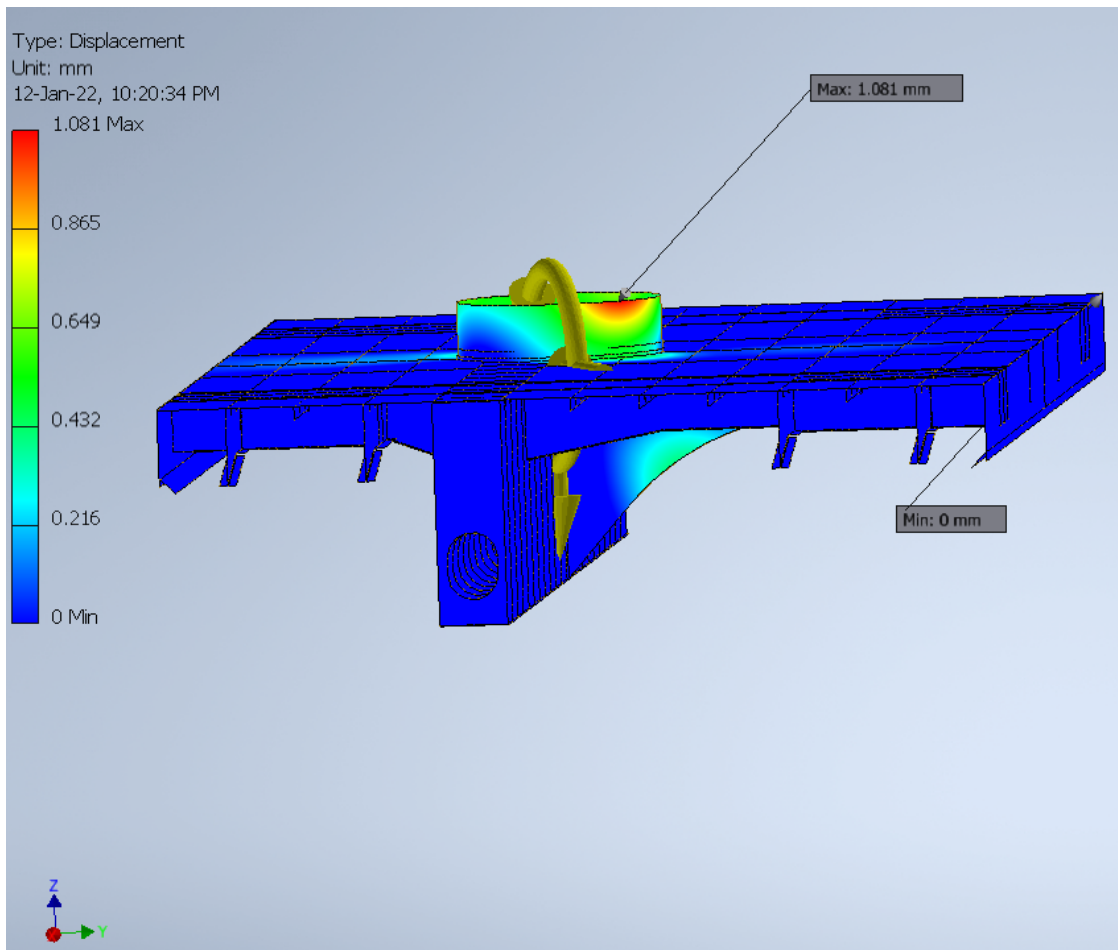
Εικόνα Π2.11: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 60°.



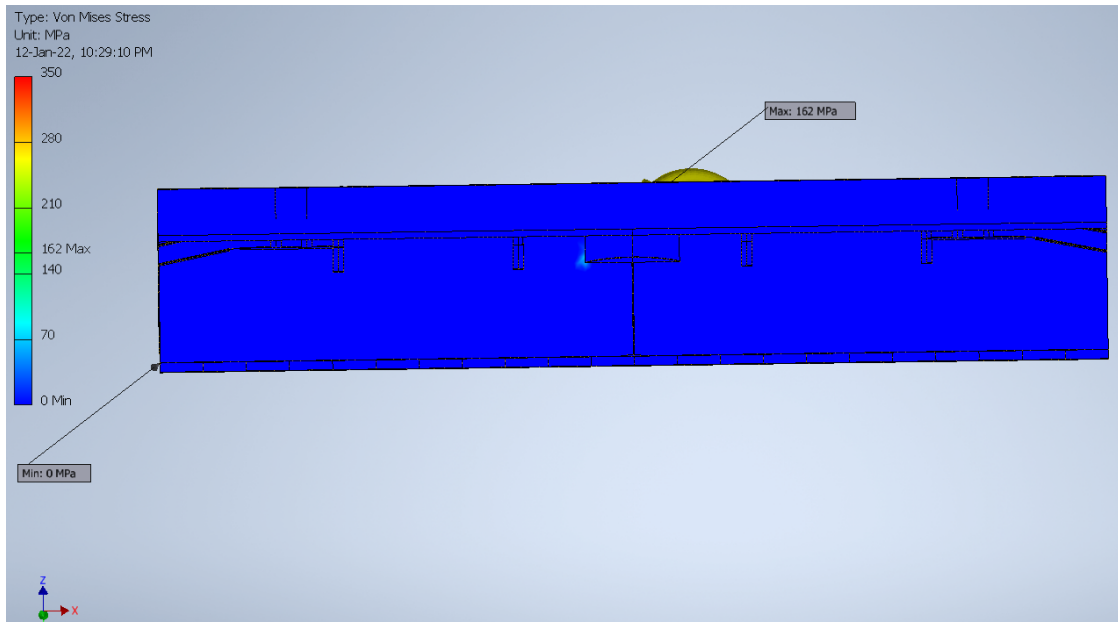
Εικόνα Π2.12: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 60°.



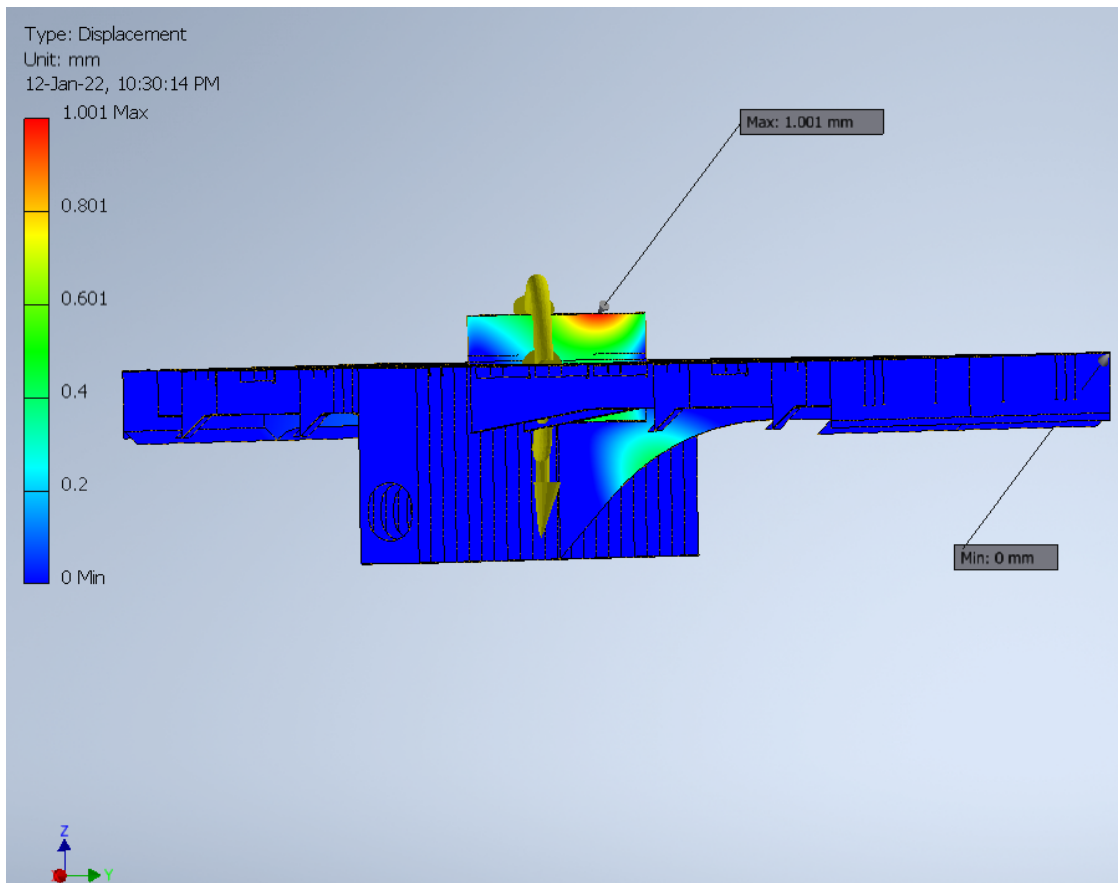
Εικόνα Π2.13: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 70°.



Εικόνα Π2.14: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 70°.



Εικόνα Π2.15: Τάσεις Von Mises για γωνιά πρόσπτωσης 80°.



Εικόνα Π2.16: Μετατοπίσεις για γωνιά πρόσπτωσης 80°.

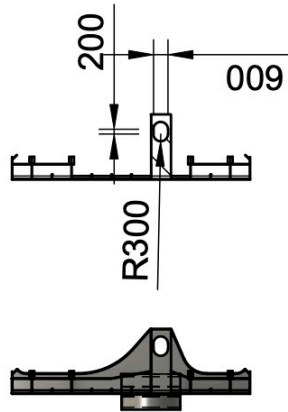
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Σχέδια μοντέλου

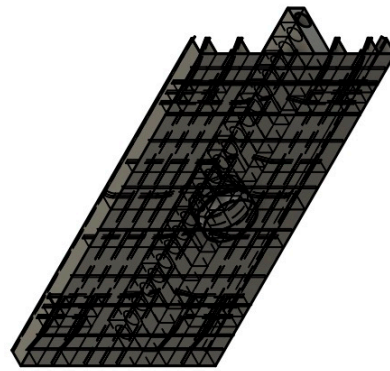
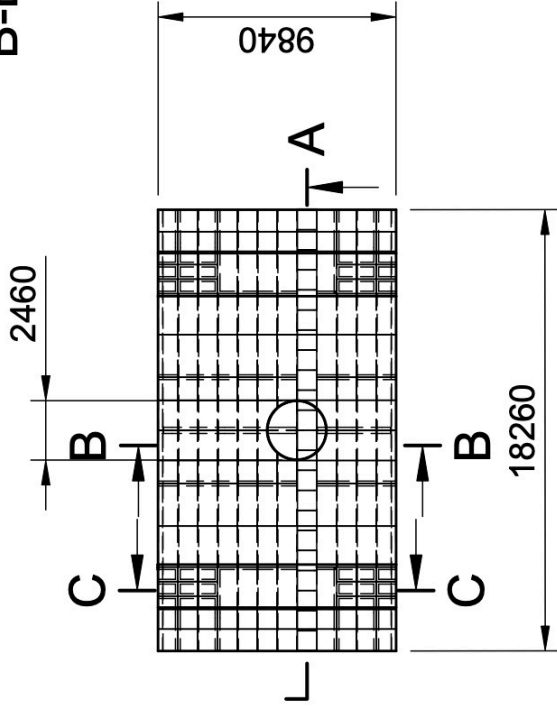
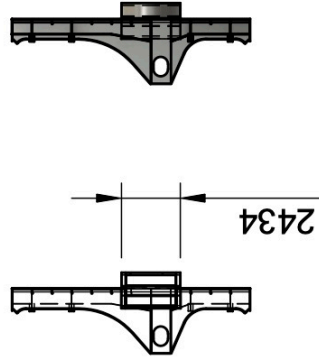
A-A (0.003402)



C-C (0.003402)



B-B (0.003402)



Dept.	Technical reference	Created by IOANNIS MITAKIS 14/1/22	Approved by
		Document type	Document status
		Title Deck with mast step	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet 1/1