



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: « ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
ΕΠΙΒΑΤΗΓΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ »**

ΜΕΤΑΠΤ.ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΠΕΡΙΚΛΗΣ ΝΤΑΟΥΛΑΡΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Κ. ΑΝΥΦΑΝΤΗΣ,
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Ανυφαντή για την ευκαιρία που μου έδωσε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης και την καθοδήγηση έως διεκπεραίωσης της καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κύριο Νικόλα Σιλιώνη για τις συμβουλές του επί της προσέγγισης τεχνικών ζητημάτων. Η παραχώρηση τους για χρήση υπολογιστή ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της ανάλυσης, λόγω της απαίτησης σε υπολογιστική ισχύ. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το ναυπηγικό γραφείο Shipinvestigation για την δημιουργία των σχεδίων του επιβατικού σκάφους και ιδιαίτερα τον κύριο Αντώνη Δεληδημήτρη για την συγκατάθεση χρήσης τους για την επεξεργασία και ανάλυση στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ την κυρία Θεοδώρα Φραγκοπούλου για την συνεχή υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυξανόμενη παρατηρείται η ανάγκη προς την ανάπτυξη της ψηφιακής αναπαράστασης της γάστρας ενός σκάφους, που εξυπηρετεί τον σκοπό της κατασκευής ενός δομικού ψηφιακού διδύμου το οποίο θα συνοδεύει το πλοίο σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Σήμερα δίνεται η επιλογή χρήσης πληθώρας λογισμικών που προσφέρουν αμιγώς σχεδίαση με χρήση υπολογιστή (CAD) ή αυτό ενσωματώνεται σε πλατφόρμα μηχανικής με χρήση υπολογιστή (CAE) που εκτελεί εξελιγμένες αριθμητικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς και απόκρισης των δομικών στοιχείων του πλοίου. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα εύρεσης βελτιστοποιημένων λύσεων κόστους κατασκευής και απόδοσης, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Μία από τις αρετές που παρουσιάζει το δομικό ψηφιακό δίδυμο, είναι η ικανότητά του να παρέχει την κατάσταση καταπόνησης του σκάφους για ένα δεδομένο σύνολο φορτίσεων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει πιο λεπτομερείς και ακριβείς κατανομές τάσεων σε σύνθετες κατασκευές όπως τα πλοία, έναντι των περιγραφικών κανονισμών των νηογνομόνων για τις διαστασιολογικές απαιτήσεις που ενδέχεται να οδηγούν σε συντηρητικά αποτελέσματα. Η παρούσα εργασία αναδεικνύει τις προκλήσεις που συναντήθηκαν κατά την διαδικασία ανάπτυξης ενός τέτοιου απαιτητικού μοντέλου. Η εξεταζόμενη περίπτωση αφορά ένα αλουμινένιο επιβατηγό σκάφος με ολικό μήκος 16.5 m, πλάτος 5.352 m και βάθος 2.5 m. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον αρχικό τρισδιάστατο σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής στο CAD πρόγραμμα Rhinoceros. Τα ενισχυτικά επιλέχθηκε να μοντελοποιηθούν με στοιχεία δοκού και τα ελάσματα με στοιχεία κελύφους κι έτσι η γεωμετρία αποτελείται από γραμμές και περιοχές. Η περαιτέρω προ-επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Ansys Spaceclaim, όπου ορίστηκε το υλικό, το πάχος ελασμάτων και οι διατομές των ενισχυτικών και εφαρμόστηκαν στη γεωμετρία του μοντέλου. Ως υλικό επιλέχθηκε το αλουμίνιο 6082 T6 λόγω του μειωμένου βάρους που παρέχει στην κατασκευή, της υψηλής αντίστασης σε διάβρωση και της υψηλής αντοχής, που οδηγούν σε μείωση του κόστους λειτουργίας και την ευκολία σε διαμόρφωση, συγκόλληση και μηχανουργική κατεργασία άρα σε μείωση του κόστους κατασκευής. Η προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων υψηλής πιστότητας πραγματοποιήθηκε στο Ansys Mechanical, με την εφαρμογή συγκεκριμένων δράσεων (πίεσεων και φορτίων) και συνοριακών συνθηκών. Η στρατηγική μοντελοποίησης και οι σχετικές λεπτομέρειες, όπως η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και ειδικότερα ο ορισμός των κριτηρίων αποδοχής ως προς τα επιτρεπόμενα όρια τάσεων, προκύπτουν

σύμφωνα με τα πρότυπα του νορβηγικού νηογνώμονα DNV (DNV 2021). Η εργασία ήταν απαιτητική δεδομένης της πολυπλοκότητας της δομής του σκάφους. Στον πίνακα παρουσιάζεται ο απαιτούμενος χρόνος ανά διεργασία ως ποσοστό του συνολικού χρόνου.

Πίνακας XIV: Ποσοστό εκτιμώμενου χρόνου ανά διεργασία

Διεργασία	Εκτιμώμενο Ποσοστό χρόνου (%)
Μοντελοποίηση	27
Ανάπτυξη πλέγματος ΠΣ / Προ-επεξεργασία	49
Επίλυση	24

Λέξεις κλειδιά:

Ψηφιακό Δίδυμο, Επιβατικό Πλοίο, Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση, Σχεδίαση με χρήση Υπολογιστή (CAD) , Μηχανική με χρήση Υπολογιστή (CAE), Προσομοίωση Πεπερασμένων Στοιχείων Υψηλής Πιστότητας, Κανονισμοί Νηογνομώνων, Στατική Ανάλυση.

ABSTRACT

A large impulse is shown towards the development of a digital representation of the hull that will serve the purpose of constructing a structural digital twin and will eventually accompany the vessel through its lifetime. Nowadays, there does exist a variety of software that offer standalone computer aided design (CAD) or embedded within software that perform sophisticated numerical simulations of the behavior and response of the hull structure, termed as computer aided engineering (CAE). It is thus possible to achieve optimized solutions of construction cost and performance, ensuring reliability and safety. One of the virtues exhibited by the structural digital twin, is its ability to provide the hull's stress state for a given set of actions. The finite element method provides more detailed and more accurate stress distributions over complex ship structures, compared to the prescriptive class rules used for scantling purposes, which may lead at rather conservative results. This work showcases the challenges encountered during the development of such a demanding model. The selected case study refers to an aluminum passenger vessel with particulars of 16.5 m length overall, 5.3 m breadth and 2.5 m depth. The process involves the initial 3D design of the metallic structure in the Rhinoceros CAD program. The stiffeners are decided to be modeled with beam elements and the platings with shell elements and as such the geometry consisted of lines and areas. Further pre-processing was performed in the ANSYS Spaceclaim module, where material, plate thickness and beam sections were applied to the geometry of the model. Regarding the material, aluminum 6082 T6 was selected, due to the reduced weight applied to the construction, the high corrosion resistance and strength resulting in reduced operational costs and ease of forming, welding and machining, implying reduced construction cost. The high-fidelity finite element simulation was carried out in ANSYS Mechanical, under the application of specific actions (pressure and local loads) and boundary conditions. The modeling strategy and related details, e.g. evaluation of the results and in particular the definition of the acceptance criteria with respect to the allowable stress limits, were derived in accordance with the guidelines of the Norwegian classification society DNV (DNV 2021). The task was laborious given the complexity of the hull structure. Table 1 presents the required time per involved process presented as a fraction of the total time.

Table XIV. Time distribution for performing the ship's simulation.

Process	Time proportion (%)
CAD	27
FE Pre-processing	49
Solution	24

Key Words:

Digital Twin, Passenger Ship, 3D Modelling, Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE), High Fidelity Finite Element Simulation, Class Guidelines, Static Structural Analysis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ	2
1.1 Κράματα αλουμινίου	3
1.1.1 Κράματα διαμόρφωσης	5
1.1.2 Κράματα χύτευσης	7
1.2 Κανονισμοί νηογνωμόνων	10
1.2.1 Συντελεστής υλικού k	11
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	13
2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Βασική θεωρία	14
2.2.1 Τάσεις και ισορροπία	14
2.2.2 Συνοριακές συνθήκες	18
2.2.3 Σχέσεις παραμόρφωσης μετατόπισης	19
2.2.4 Σχέσεις τάσης παραμόρφωσης	20
2.2.5 Επίδραση θερμοκρασίας	21
2.2.6 Δυναμική ενέργεια και ισορροπία	21
2.2.7 Μέθοδος Rayleigh – Ritz	22
2.2.8 Μέθοδος Galerkin	23
2.2.9 Αρχή Saint Venant	24
2.3 Μέθοδοι υπολογισμού	24
2.3.1 Σύστημα συντεταγμένων	25
2.3.2 Απομείωση πάχους λόγω διάβρωσης	26
2.3.3 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων	26
2.3.4 Έλεγχος μοντέλου	34
2.3.5 Συνοριακές συνθήκες	34
2.3.6 Στατικά φορτία	37
2.3.7 Κριτήρια ανάλυσης	38

3.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ – CASE STUDY	42
3.1	Βασικά χαρακτηριστικά.....	42
3.2	Επεξεργασία	45
3.2.1	Αρχικός σχεδιασμός στο <i>Rhinoceros</i>	46
3.2.2	Συνέχεια σχεδιασμού στο <i>Ansys Spaceclaim</i>	49
3.2.3	Μετάβαση στο <i>Ansys Workbench</i>	51
3.2.4	Εφαρμογή στατικών φορτίων.....	56
3.3	Αποτελέσματα.....	69
3.3.1	Αξονική τάση	70
3.3.2	Διατμητική τάση.....	76
3.3.3	Τάση von Mises	83
3.3.4	Αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού.....	88
3.3.5	Παραμορφώσεις.....	94
3.4	Συμπεράσματα.....	100
3.5	Προτάσεις για επέκταση εργασίας	103
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας I: Ιδιότητες υλικών.....	2
Πίνακας II: Επίδραση χημικών στοιχείων στα κράματα αλουμινίου	4
Πίνακας III: Κατηγοριοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου.....	5
Πίνακας IV: Κατηγοριοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου.....	8
Πίνακας V: Κράματα αλουμινίου - Συντελεστές για συγκολλημένη κατασκευή.....	12
Πίνακας VI: Κράματα αλουμινίου – Μεταλλουργικός συντελεστής απόδοσης β.....	12
Πίνακας VII: Επιτρεπόμενες τάσεις για την ανάλυση ολικού μοντέλου	38
Πίνακας VIII: Επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης αραιού πλέγματος λ_{yperm}	40
Πίνακας IX: Επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης πυκνού πλέγματος λ_{fperm}	41
Πίνακας X: Βασικά Χαρακτηριστικά	42
Πίνακας XI: Χημική Σύνθεση (%) Αλουμινίου 6082.....	50
Πίνακας XII: Ιδιότητες Αλουμινίου 6082	50
Πίνακας XIII: Συνοπτικά αποτελέσματα ανάλυσης και επιτρεπόμενα όρια	100
Πίνακας XIV: Ποσοστό εκτιμώμενου χρόνου ανά διεργασία	102

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Σώμα 3 διαστάσεων ⁽¹⁰⁾	15
Εικόνα 2: Ισορροπία στοιχειώδους στοιχείου.....	16
Εικόνα 3 (α) τρισδιάστατος φορέας, (β) στοιχειώδες στερεό τάσεων, (γ) ορθή δυνατή παραμόρφωση, (δ) διατμητική δυνατή παραμόρφωση.....	17
Εικόνα 4: Στοιχειώδης όγκος στην επιφάνεια.....	19
Εικόνα 5: Τυπικό ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός κρουαζιερόπλοιου	25
Εικόνα 6: Σύστημα συντεταγμένων	26
Εικόνα 7: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων	28
Εικόνα 8: Δυνάμεις σε στοιχείο δοκού στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.....	29
Εικόνα 9: Στοιχείο πλάκας.....	30
Εικόνα 10: Στοιχείο πλάκας Α) Τάσεις Β) Δυνάμεις και ροπές ⁽¹³⁾	31
Εικόνα 11: Τετράπλευρο στοιχείο τεσσάρων κόμβων ⁽¹⁴⁾	32
Εικόνα 12: Βελτιωμένη καμπτική συμπεριφορά πεπερασμένου στοιχείου.....	33
Εικόνα 13: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών	36
Εικόνα 14: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών ⁽⁹⁾	36
Εικόνα 15: Περίπτωση 3 συνοριακών συνθηκών	37
Εικόνα 16: Γενική διάταξη Ε/Γ – ΔΡ “ALUMINION 16,500 Μ”	43
Εικόνα 17: Πλοίο ίδιου τύπου, φωτογραφίες από την Shipinvestigation	45
Εικόνα 18 Σχεδιασμός επιφάνειας γάστρας στο Rhinoceros	46
Εικόνα 19: Τομές γάστρας στις 3 διευθύνσεις.....	47
Εικόνα 20: Σχεδιασμός διαμερισμάτων και δομικών στοιχείων πλοίου.....	48
Εικόνα 21: Σχεδιασμός στο Ansys Spaceclaim	49
Εικόνα 22: Γεωμετρία μοντέλου στο Ansys Mechanical.....	51
Εικόνα 23: Δημιουργία mesh στο Ansys Mechanical.....	52
Εικόνα 24: Παράλειψη ενισχυτικών κατά την δημιουργία του mesh.....	53
Εικόνα 25: Τοπική πύκνωση mesh.....	53
Εικόνα 26: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με την Περίπτωση 1	54

Εικόνα 27: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με την Περίπτωση 2 για την πρωραία φρακτή σύγκρουσης	55
Εικόνα 28: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με την Περίπτωση 2 για την πρωραία φρακτή μηχανοστασίου	56
Εικόνα 29: Επίδραση βάρους με εφαρμογή της επιτάχυνσης της βαρύτητας	57
Εικόνα 30: Εφαρμογή φορτίου υπερκατασκευής και επιβατών άνω κατάστρωμας.....	58
Εικόνα 31: Εφαρμογή φορτίου μηχανών και φέροντος δικτύου	58
Εικόνα 32: Διάταξη δεξαμενών ημερήσιας κατανάλωσης στο κατάστρωμα άνω των δεξαμενών διπυθμένου	59
Εικόνα 33: Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου λόγω βάρους δεξαμενών ημερήσιας κατανάλωσης.....	60
Εικόνα 34: Εφαρμογή κατανεμημένου φορτίου λόγω βάρους επιβατών στο κυρίως κατάστρωμα..	61
Εικόνα 35: Χώρος επιβατών στο κυρίως κατάστρωμα.....	61
Εικόνα 36: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή καυσίμου Νο1 D.O.T. (C).....	62
Εικόνα 37: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή καυσίμου Νο1 D.O.T. (Po)	63
Εικόνα 38: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή καυσίμου Νο1 D.O.T. (SB).....	63
Εικόνα 39: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο2 W.B.T. D.B.	64
Εικόνα 40: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο1 W.B.T. D.B.	65
Εικόνα 41: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο2 W.B.T.	65
Εικόνα 42: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο1 W.B.T.	66
Εικόνα 43: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης λόγω έρματος στην πρωραία δεξαμενή ζυγοστάθμισης Fore Peak Tank.....	67
Εικόνα 44: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στα ύφαλα της γάστρας λόγω άνωσης	68
Εικόνα 45: Έλεγχος κάθετων διανυσμάτων επιφανειών γάστρας	68
Εικόνα 46: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση.....	71
Εικόνα 47: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση στην συνοριακή συνθήκη C	72
Εικόνα 48: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη κύρια τάση στην συνοριακή συνθήκη A.....	73

Εικόνα 49: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη κύρια τάση στην συνοριακή συνθήκη Β	74
Εικόνα 50: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση.....	75
Εικόνα 51: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση.....	76
Εικόνα 52: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση	77
Εικόνα 53: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση στην συνοριακή συνθήκη C	78
Εικόνα 54: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη διατμητική τάση στην συνοριακή συνθήκη Α.....	79
Εικόνα 55: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη διατμητική τάση στην συνοριακή συνθήκη Β	80
Εικόνα 56: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση	81
Εικόνα 57: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση	82
Εικόνα 58: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises	83
Εικόνα 59: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises στην συνοριακή συνθήκη C	84
Εικόνα 60: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη τάση von Mises στην συνοριακή συνθήκη Α.....	85
Εικόνα 61: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη τάση von Mises στην συνοριακή συνθήκη Β	86
Εικόνα 62: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises	87
Εικόνα 63: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises	88
Εικόνα 64: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών - Αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού	89
Εικόνα 65: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στα στοιχεία δοκού.....	90
Εικόνα 66: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική εφελκυστική τάση στα στοιχεία δοκού.....	91
Εικόνα 67: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών - Αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού.....	92
Εικόνα 68: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στα στοιχεία δοκού.....	93

Εικόνα 69: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική εφελκυστική τάση στα στοιχεία δοκού.....	94
Εικόνα 70: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη ολική παραμόρφωση.....	95
Εικόνα 71: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστες παραμορφώσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα.....	96
Εικόνα 72: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Παραμόρφωση κατά τον κατακόρυφο άξονα, sagging.....	97
Εικόνα 73: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη ολική παραμόρφωση.....	98
Εικόνα 74: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστες παραμορφώσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα.....	98
Εικόνα 75: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Παραμόρφωση κατά τον κατακόρυφο άξονα.....	99
Εικόνα 76: Ποσοστά εκτιμώμενου χρόνου ανά στάδιο επεξεργασίας.....	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με την επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, ως ναυτιλία μικρών αποστάσεων ορίζεται η «Διακίνηση φορτίου και επιβατών μέσω θαλάσσης μεταξύ λιμένων που βρίσκονται στα γεωγραφικά όρια της Ευρώπης ή μεταξύ αυτών των λιμένων και των λιμένων που βρίσκονται σε μη ευρωπαϊκές χώρες με ακτές στις μεσόγειες θάλασσες στα σύνορα της Ευρώπης».⁽¹⁾ Περιλαμβάνουν εσωτερικές και διεθνείς ναυτιλιακές υπηρεσίες, κατά μήκος των ακτών καθώς και από και προς τα νησιά, τους ποταμούς και τις λίμνες. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat, η ναυτιλία μικρών αποστάσεων αποτελεί το 60% του συνόλου των θαλάσσιων μεταφορών. Οι περισσότερες μεταφορές συμβαίνουν στην Μεσόγειο θάλασσα, ακολουθεί η Βόρεια θάλασσα και η Βαλτική. Τα πλοία παρέχουν ευελιξία, περισσότερες επιλογές δρομολόγησης, ελαχιστοποίηση απόστασης, αποσυμφόρηση οδικών αρτηριών. Αξίζει να σημειωθεί πως το 2019 μεταφέρθηκαν στην Ευρώπη 419 εκατομμύρια επιβάτες, με το 38.5% εξ αυτών να αναλογούν σε Ιταλία και Ελλάδα με 86.5 και 73.9 εκατομμύρια αντιστοίχως.⁽²⁾ Η ναυτιλία μικρών αποστάσεων παρέχει την δυνατότητα συνδυασμένης μεταφοράς πολιτών και αγαθών “door to door”. Προσφέρει βελτίωση συνδεσιμότητας και ανάπτυξη απομονωμένων νησιωτικών και περιφερειακών περιοχών.

Για την κάλυψη των άνω αναγκών από το ναυπηγικό κατασκευαστικό τομέα γίνεται η προσπάθεια επίτευξης λύσεων χαμηλότερου κόστους και υψηλότερης βιωσιμότητας. Παράγοντες όπως η απόδοση, οι εκπομπές καυσαερίων, η κατανάλωση καυσίμου και η απαίτηση σε ισχύ ενός πλοίου επηρεάζονται από το βάρος του. Η μείωση του βάρους συνεπάγεται μείωση των λειτουργικών εξόδων και πιθανώς του κόστους κατασκευής. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα μεγαλύτερης μεταφορικής ικανότητας αυξάνοντας την εμπορική εκμετάλλευση. Επίσης η μείωση της αντίστασης της γάστρας οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Τα διαφορετικά υλικά έχουν και αντίστοιχο αντίκτυπο στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους από την παραγωγή, την επεξεργασία, την χρήση και την απόρριψη ή ανακύκλωση τους.

Η δομή της παρούσας εργασίας χωρίζεται σε τρία κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 1 διερευνώνται τα διαθέσιμα κράματα αλουμινίου και οι ιδιότητές τους. Επιλέχθηκε το αλουμίνιο κατά την ανάλυση της κατασκευής λόγω του μειωμένου βάρους που διαθέτει, το οποίο επιφέρει καλύτερες επιδόσεις και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, λόγω της ανθεκτικότητας σε διάβρωση και την υψηλή μηχανική αντοχή, άρα του μειωμένου κόστους συντήρησης και λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται η βασική θεωρία της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και εξετάζεται η χρήση της σύμφωνα με τα πρότυπα του νορβηγικού νηογνώμονα DNV, για την διαμόρφωση του μοντέλου του σκάφους, την επιβολή στατικών φορτίων και συνοριακών συνθηκών και αναφέρονται τα κριτήρια ανάλυσης και αποδοχής.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η διαδικασία εφαρμογής, με την αρχική μοντελοποίηση της μεταλλικής κατασκευής από την γάστρα έως το κυρίως κατάστρωμα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros, και την περεταίρω επεξεργασία στο λογισμικό ανάλυσης Ansys. Ορίζονται οι διατομές και τα πάχη των μελών, εφαρμόζεται ως υλικό το αλουμίνιο 6082 T6, το μοντέλο διακριτοποιείται σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, εφαρμόζονται συνοριακές συνθήκες και τα εκτιμώμενα στατικά φορτία. Παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και ελέγχονται ως προς την αντοχή σύμφωνα με τα επιτρεπόμενα όρια τάσεων.

1. ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ

Παραδοσιακά στις ναυπηγικές κατασκευές χρησιμοποιείται ο χάλυβας, ενώ αυξάνεται η χρήση του αλουμινίου και των σύνθετων υλικών τις τελευταίες δεκαετίες. Τα σύνθετα υλικά έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικά στη μείωση βάρους και την υψηλή αντοχή, όμως έχουν το μειονέκτημα του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά τον κύκλο ζωής τους. Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο κοινό στοιχείο που υπάρχει στον φλοιό της γης και μπορεί να ανακυκλωθεί χωρίς ποιοτική υποβάθμιση. Η ενέργεια που απαιτείται για την ανακύκλωσή του είναι 5% εκείνης που καταναλώνεται στην αρχική του παραγωγή, με το 85% του αλουμινίου που χρησιμοποιείται σε κατασκευές στην Ευρώπη να προέρχεται από ανακύκλωσή του.

Σύμφωνα με τον DNVGL-CG-0127 Sec.1, 1.4⁽³⁾, οι τυπικές ιδιότητες υλικών δίνονται στον Πίνακας I.

Πίνακας I: Ιδιότητες υλικών

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας Young [kN/m ²]	Λόγος Poisson	Μέτρο διάτμησης [kN/m ²]	Πυκνότητα [t/m ³]
Χάλυβας	2,06 * 10 ⁸	0,30	0,792 * 10 ⁸	7,80
Αλουμίνιο	0,70 * 10 ⁸	0,33	0,236 * 10 ⁸	2,75

Παρατηρείται ότι το αλουμίνιο είναι ελαφρύτερο, με πυκνότητα περίπου στο ένα τρίτο του χάλυβα. Παρουσιάζει μέτρο ελαστικότητας περί το ένα τρίτο σε σχέση με τον χάλυβα.

$$E = 70\,000 \frac{N}{mm^2}$$

Έτσι, σύμφωνα με τον νόμο του Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$ εξάγεται το συμπέρασμα πως χρειάζεται η τριπλάσια τάση για την ίδια παραμόρφωση αλουμινίου και χάλυβα.

Το αλουμίνιο λοιπόν εκτός από ελαφρύτερο από άλλα μέταλλα, διαθέτει υψηλή μηχανική αντοχή, είναι ανθεκτικό σε διάβρωση κι απαιτεί χαμηλό κόστος συντήρησης. Οι ιδιότητες του και των κραμάτων του, το καθιστούν ως ένα από τα πιο ευέλικτα, οικονομικά και ελκυστικά μεταλλικά υλικά για ένα φάσμα χρήσεων. Τα κράματα αλουμινίου είναι δεύτερα μετά το χάλυβα σε χρήση ως δομικά υλικά. Αντιστέκεται στο είδος της προοδευτικής οξειδωσης που προκαλεί τη σκουριά του χάλυβα, καθώς σε συνδυασμό με το οξυγόνο σχηματίζει ένα αδρανές φιλμ οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) με αποτέλεσμα φαινόμενα όπως, αποχρωματισμός και ξεφλούδισμα, να μην εμφανίζονται. Με κατάλληλες προσμίξεις και επεξεργασία μπορεί να αντισταθεί στη διάβρωση από νερό, αλάτι, περιβαλλοντικούς, χημικούς και φυσικούς παράγοντες. Το αλουμίνιο συνήθως εμφανίζει εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και οι επιφάνειες του είναι ιδιαίτερα ανακλαστικές σε ακτινοβολία, θερμότητα, ορατό φως και ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Επιπλέον είναι μη σιδηρομαγνητικό, μη πυροφορικό και μη τοξικό.⁽⁴⁾ Ένα χαρακτηριστικό που χρειάζεται προσοχή είναι πως έχει σχετικά υψηλό συντελεστή γραμμικής διαστολής, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό ώστε να αντισταθμιστούν οι διαφορές στην επιμήκυνση.

1.1 Κράματα αλουμινίου

Για την βελτίωση των ιδιοτήτων του αλουμινίου δημιουργούνται κράματα με την προσθήκη στοιχείων όπως ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος. Η επίδραση αυτών παρουσιάζεται συνοπτικά στον κάτωθι πίνακα.^(5,6)

Πίνακας II: Επίδραση χημικών στοιχείων στα κράματα αλουμινίου

Προσθήκη στοιχείου	Επίδραση στις ιδιότητες κράματος αλουμινίου
Χαλκός	Βελτίωση μηχανικής αντοχής, μηχανουργικής κατεργασίας και αγωγιμότητας. Μείωση αντίστασης σε διάβρωση, συγκολλησιμότητας και ολκιμότητας.
Σίδηρος	Βελτίωση αντοχής και σκληρότητας. Μείωση ρηγματώσεων κατά τη χύτευση. Μείωση ολκιμότητας.
Μαγγάνιο	Βελτίωση της ολκιμότητας και σε συνδυασμό με τον σίδηρο τη χυτευσιμότητα. Βελτίωση μηχανικής αντοχής και αντοχής σε διάβρωση.
Μαγνήσιο	Μείωση σημείου τήξεως. Βελτίωση μηχανικής αντοχής και αντοχής σε διάβρωση. Σε περιεκτικότητα άνω του 6% προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
Πυρίτιο	Μείωση σημείου τήξεως. Βελτίωση χυτευσιμότητας και αντοχής σε διάβρωση.
Ψευδάργυρος	Μείωση χυτευσιμότητας, επιρρεπές σε ρωγμές. Βελτίωση μηχανικής αντοχής με θερμή ή ψυχρή σκλήρυνση, σε συνδυασμό με άλλες προσθήκες όπως χαλκός και μαγνήσιο.
Λίθιο	Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων στα κράματα διαμόρφωσης, σε περιεκτικότητα έως 3%. Αντίθετα αποτελέσματα στα χυτά, με την περιεκτικότητά του να περιορίζεται στο 0.003%
Νικέλιο	Βελτίωση αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες. Τα κράματα διαμόρφωσης (wrought alloys) και τα κράματα χύτευσης (casting alloys). Μια περαιτέρω διαφοροποίηση για κάθε κατηγορία βασίζεται στο αν επιδέχονται θερμική κατεργασία.

1.1.1 Κράματα διαμόρφωσης

Το σύστημα προσδιορισμού των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιλαμβάνει 4 ψηφία.⁽⁴⁾ Ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις του κράματος, με το 0 να δηλώνει το αρχικό κράμα, ενώ οι δύο τελευταίοι αριθμοί για τη σειρά 1XXX δίνουν τα δεκαδικά ψηφία του ποσοστού περιεκτικότητας αλουμινίου άνω του 99% και στις άλλες σειρές είναι αυθαίρετοι αριθμοί που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένα κράματα της σειράς. Τα κράματα διαμόρφωσης που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες ανήκουν στις σειρές 2XXX, 6XXX και 7XXX. Ενώ οι σειρές 1XXX, 3XXX και 5XXX δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.⁽⁷⁾ Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά, με χαμηλά ποσοστά ενδομεταλλικών ενώσεων. Η αύξηση της αντοχής των κραμάτων αυτών επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμών σκλήρυνσης, όπως η ενδοτράχυνση (work hardening), η σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος και η σκλήρυνση διασποράς (dispersoid precipitates).⁽⁸⁾

Πίνακας III: Κατηγοριοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου

Κωδικός	Προσθήκη
1xxx	Καθαρό αλουμίνιο (Al >99,00%)
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn
8xxx	Al με άλλα στοιχεία
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Η σειρά 1XXX αντιπροσωπεύει το καθαρό αλουμίνιο. Οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς αυτής δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99%.⁽⁷⁾ Λόγω της καθαρότητας, της χαμηλής αντοχής και της καλής θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η χρήση τους περιορίζεται στην ηλεκτρική και χημική βιομηχανία.⁽⁴⁾

Η σειρά 2XXX περιλαμβάνει κράματα στα οποία κύριο στοιχείο προσθήκης είναι ο χαλκός (Cu), σε περιεκτικότητα 2,6-6,3% και άλλα στοιχεία όπως το μαγνήσιο (Mg) που κυμαίνεται μεταξύ 0,5-1,5%.^(4,7) Έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλώνται δύσκολα. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική λόγω υψηλής αντοχής και χαμηλού βάρους, με όριο αντοχής έως και 455 MPa.

Η σειρά 3XXX περιλαμβάνει κράματα στα οποία κύριο στοιχείο προσθήκης είναι το μαγγάνιο (Mn) έως 1.5% και άλλα στοιχεία όπως το μαγνήσιο (Mg), ο σίδηρος (Fe) και το πυρίτιο (Si). Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται και συγκολλώνται εύκολα. Έχουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση^(4,7) και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές.⁽⁴⁾

Η σειρά 4XXX περιλαμβάνει κράματα στα οποία κύριο στοιχείο προσθήκης είναι το πυρίτιο (Si) έως 12%, το οποίο μειώνει το σημείο τήξης και βελτιώνει την ολκιμότητα για σφυρήλατα προϊόντα. Χρησιμοποιείται κυρίως ως σύρμα συγκόλλησης (κράμα 4043).

Η σειρά 5XXX περιλαμβάνει κράματα στα οποία κύριο στοιχείο προσθήκης είναι το μαγνήσιο (Mg).^(4,7) Τα κράματα Al-Mg της σειράς αυτής σκληραίνονται με ψυχρηλασία, παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε διάβρωση στην ατμόσφαιρα και στο θαλασσινό νερό, συγκολλώνται εύκολα κι έχουν καλή κατεργασιμότητα.⁽⁷⁾ Ωστόσο, υπάρχει ο περιορισμός χρήσης σε περιεκτικότητα μαγνησίου άνω του 3.5% για θερμοκρασίες έκθεσης άνω των 65°C εξαιτίας της ανάπτυξης ρωγμών από διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Χρησιμοποιούνται κυρίως στη ναυπηγική βιομηχανία.

Η σειρά 6XXX περιλαμβάνει κράματα στα οποία κύριο στοιχείο προσθήκης είναι το μαγνήσιο (Mg) και το πυρίτιο (Si), σε ποσοστά ανάλογα αυτών που απαιτούνται για τον σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si . Αν και δεν διαθέτουν τόσο υψηλή αντοχή όσο τα περισσότερα κράματα των σειρών 2xxx και 7xxx, η σειρά 6xxx παρέχει ευκολία στην διαμόρφωση, την συγκόλληση, την μηχανουργική κατεργασία, υψηλή αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ολκιμότητα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αρχιτεκτονικούς και κατασκευαστικούς τομείς λόγω της μοναδικής τους ικανότητας για διέλαση.^(4,7) Η κατηγορία αυτή υπόκειται σε θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, με κωδικό

T4 που αφορά θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση,

T5 για βαφή σε θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, ή

T6 για θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και τεχνητή γήρανση (precipitation).^(4,5)

Η σειρά 7XXX περιλαμβάνει κράματα στα οποία κύριο στοιχείο προσθήκης είναι ο ψευδάργυρος σε ποσοστά έως 8% και χαμηλότερα ποσοστά μαγνησίου έως 3% και χαλκού έως 2%.^(4,7) Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στην κατακρήμνιση της ένωσης MgZn₂. Τα κράματα αυτά επιδέχονται εύκολα θερμική κατεργασία, διότι έχουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών για την ομογενοποίηση τους και σχετικά χαμηλή θερμοκρασία γήρανσης. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλληση τους, παρόλα αυτά η συγκολλησιμότητα τους παραμένει χαμηλή και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια. Το κύριο μειονέκτημα της σειράς αυτής είναι η μειωμένη αντοχή τους σε κατεργασίες εν θερμώ. Είναι τα ισχυρότερα κράματα αλουμινίου, με όριο διαρροής που μπορεί να υπερβαίνει τα 500 MPa. Χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική βιομηχανία λόγω της υψηλής ακαμψίας και σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή αντοχή. Η σειρά 8XXX περιλαμβάνει στοιχεία όπως ο κασσίτερος, το λίθιο, ο σίδηρος και το νικέλιο. Η προσθήκη λιθίου οδηγεί σε χαμηλή πυκνότητα και υψηλή δυσκαμψία όπως στο 8090, το οποίο υπόκειται σε σκλήρυνση τεχνητής γήρανσης, ως εκ τούτου έχει αντικαταστήσει κράματα των σειρών 2xxx και 7xxx σε εφαρμογές αεροναυπηγικής. Η σειρά 9XXX περιλαμβάνει κράματα που δεν έχουν κάποια εφαρμογή και φυλάσσονται για μελλοντική χρήση.⁽⁴⁾

1.1.2 Κράματα χύτευσης

Η κύρια διαφορά με τα κράματα διαμόρφωσης είναι πως τα κράματα χύτευσης περιέχουν προσθήκη πυριτίου σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες, με περιεκτικότητα 4-12%, και λαμβάνουν την τελική τους μορφή χωρίς να υφίστανται πλέον πλαστικές παραμορφώσεις. Παρέχει έτσι τη δυνατότητα μείωσης απώλειας υλικού (scrap), την παραγωγή κατασκευών πολύπλοκης σχεδίασης με επιθυμητές διακυμάνσεις στο πάχος και την διατομή καθώς και υψηλή ποιότητα επιφανειών και εσωτερικής δομής, εξαρτώμενα βεβαίως από τις ορθές μεθόδους χύτευσης.

Το σύστημα προσδιορισμού των κραμάτων χύτευσης περιλαμβάνει 3 ψηφία και μία δεκαδική τιμή. Ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης σύμφωνα με τον Πίνακα IV. Ο δεύτερος και ο τρίτος την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο δεκαδικός αριθμός αφορά στη μορφολογία του προϊόντος χύτευσης.^(4,7) Με μηδέν 0 υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, με την τελική του μορφολογία από κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με 1 υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Τα κράματα χύτευσης που υφίστανται θερμικές κατεργασίες ανήκουν

στις σειρές 2XX.X, 3XX.X και 7XX.X. Ενώ οι σειρές 1XX.X, 4XX.X και 5XX.X δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.

Πίνακας IV: Κατηγοριοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου

Κωδικός	Προσθήκη
1xx.x	Καθαρό αλουμίνιο (Al >99%)
2xx.x	Al-Cu
3xx.x	Al-Si+Cu και/ή Mg
4xx.x	Al-Si
5xx.x	Al-Mg
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7xx.x	Al-Zn
8xx.x	Al-Sn με άλλα στοιχεία
9xx.x	Al με άλλα στοιχεία

Η σειρά 2XX.X περιλαμβάνει κράματα αλουμινίου στα οποία το κύριο στοιχείο προσθήκης είναι ο χαλκός έως 6%. Έχει την υψηλότερη αντοχή και σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (έως 300 °C) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κράματα χύτευσης. Κάποια από αυτά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη, κάνοντας τα κατάλληλα για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού και στην κατασκευή αεροσκαφών. Η αντοχή των κραμάτων της σειράς αυτής στη διάβρωση είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με άλλες και απαιτείται επιφανειακή επίστρωση προστασίας.

Η σειρά 3XX.X αποτελεί μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σειρές. Στη σειρά αυτή εκτός από πυρίτιο σε ποσοστά 5-22%, περιέχεται χαλκός έως 4.5%, μαγνήσιο έως 1% και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, συμπληρωματικές προσθήκες νικελίου ή βηρυλλίου. Έχουν εξαιρετική χυτευσιμότητα και υψηλή αντοχή μετά από θερμική κατεργασία, ενώ κάποια παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής μειώνεται αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε πυρίτιο και νικέλιο, και αυξάνεται η αντίσταση σε φθορά, κάνοντας το κατάλληλο για εφαρμογές σε μηχανές εσωτερικής καύσης όπως πιστόνια.

Τα κράματα της ομάδας 4XX.X βασίζονται στο δυαδικό σύστημα αλουμινίου- πυριτίου με περιεκτικότητα από 5 έως 12%. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με συνδυασμό μέτριας αντοχής, υψηλής ολκιμότητας και αντίστασης σε κρούση.

Τα κράματα της σειράς 5XX.X είναι μονοφασικά δυαδικά κράματα αλουμινίου- μαγνησίου με μέτρια έως υψηλή αντοχή και ιδιότητες σκλήρυνσης. Η υψηλή αντοχή στη διάβρωση, ειδικά στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι το πλεονέκτημα των κραμάτων της σειράς αυτής, σε χαμηλά ποσοστά ακαθαρσιών. Είναι κατάλληλα για συγκολλημένες κατασκευές για την κάλυψη αρχιτεκτονικών, διακοσμητικών και κτιριακών αναγκών, καθώς είναι εύκολα σε μηχανουργική κατεργασία και έχουν ελκυστική εμφάνιση.

Η σειρά 7XX.X περιλαμβάνει κράματα αλουμινίου στα οποία το κύριο στοιχείο προσθήκης είναι ο ψευδάργυρος και δευτερευόντως το μαγνήσιο. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και ικανότητα ανάπτυξης υψηλής αντοχής μέσω φυσικής γήρανσης χωρίς θερμική επεξεργασία.

Η σειρά 8XX.X περιλαμβάνει έως 6% κασσίτερο και μικρές ποσότητες χαλκού και νικελίου για ενίσχυση της σκληρότητας. Αυτά τα κράματα αναπτύχθηκαν για εφαρμογές σε έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) καθώς ο κασσίτερος προσδίδει λίπανση.⁽⁴⁾

Οι άνωθεν κωδικοποιήσεις τόσο για τα κράματα διαμόρφωσης όσο και χύτευσης συνοδεύονται από ένα ακόμα γράμμα όπου δηλώνει την κατεργασία τους και από ένα νούμερο για το βαθμό της κατεργασίας, έτσι:

- F: Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς κάποια θερμική ή μηχανική κατεργασία.
- O: Ανόπτηση, θερμική κατεργασία με αργή απόψυξη για αποκατάσταση τάσεων, αύξηση ολκιμότητας και δυσθραυστότητας.
- H: Ενδοτράχυνση, μόνο για κράματα διαμόρφωσης, αύξηση αντοχής και σκληρότητας με ψυχρή κατεργασία πλαστικής παραμόρφωσης.
- T: Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, περιλαμβάνει θέρμανση ομογενοποίησης, βαφή με απότομη ψύξη και γήρανση.
- W: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, μόνο για κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

1.2 Κανονισμοί νηογνωμόνων

Οι νηογνώμονες είναι ιδιωτικοί μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί, οι οποίοι επιθεωρούν, κατατάσσουν και πιστοποιούν τα πλοία σε κλάσεις, ανάλογα με τον βαθμό κατασκευαστικής και μηχανολογικής επάρκειας, ασφάλειας και αξιόπλοου. Αποστολή των νηογνωμόνων είναι:

- Θέσπιση κανονισμών και προδιαγραφών για την κατασκευή του σκάφους και του μηχανολογικού εξοπλισμού, των υλικών που χρησιμοποιούνται τόσο στη ναυπήγηση όσο και σε επισκευές/μετασκευές, τα οποία επιθεωρεί και επιβλέπει για συμμόρφωση και διατήρηση της κλάσης.
- Επεξεργασία και έγκριση των σχεδίων του σκάφους και του μηχανολογικού εξοπλισμού.
- Έκδοση πιστοποιητικών κλάσης, αξιόπλοου και χαρακτηρισμού του πλοίου και του εξοπλισμού, κατόπιν επιθεώρησης, ή/και την έκδοση πιστοποιητικών ασφαλείας.
- Εκτέλεση τεχνικών μελετών και ερευνών.
- Προετοιμασία και έκδοση στατιστικών πληροφοριών.

Ορισμένοι από τους περιορισμούς των νηογνωμόνων για τη χρήση αλουμινίου αναφέρονται κάτωθι, ενώ στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι οδηγίες για την εκτέλεση της ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Σύμφωνα με τον κανονισμό DNV Part3 Chapter 3 Sec. 1, 4.1 ⁽⁹⁾, τα κράματα αλουμινίου θαλάσσιας χρήσης εφαρμόζονται σε διάφορα αντικείμενα όπως υπερκατασκευές (superstructures), υπερστεγάσματα (deckhouses), καλύμματα κυτών (hatch covers), ενισχυτικά ανοιγμάτων και άλλα, δεδομένου ότι η αντοχή της κατασκευής αλουμινίου είναι ισοδύναμη με αυτή που απαιτείται για μία χαλύβδινη κατασκευή. Για ένα κράμα αλουμινίου που υπόκειται σε διαμήκεις καταπονήσεις, οι προσμίξεις και η διαστασιολόγηση επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη το σχετικό επίπεδο τάσεων.

Κατάλληλα αναλώσιμα συγκόλλησης πρέπει να επιλέγονται, ώστε οι μηχανικές ιδιότητες του εναποθέτος υλικού συγκόλλησης να μην υπολείπεται από την προδιαγραφή για την ζώνη συγκόλλησης του αρχικού υλικού.

Τα τυποποιημένα ελάσματα και οι μορφοδοκοί που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά είναι προϊόντα διέλασης. Η εφαρμογή των φύλλων ελασμάτων περιορίζεται σε καταστρώματα, φρακτές, υπερκατασκευές και υπερστεγάσματα. Άλλες χρήσεις μπορεί να γίνονται αποδεκτές από την

Κλάση κατά περίπτωση. Τα ελάσματα πρέπει να είναι προσανατολισμένα έτσι ώστε τα ενισχυτικά να είναι παράλληλα με τη διεύθυνση των κύριων τάσεων. Στις συνδέσεις μεταξύ των ελασμάτων και των κύριων ενισχυτικών πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή.

Σε συγκολλούμενες ζώνες προϊόντων έλασης και εξώθησης (ζώνες που επηρεάζονται από τη θερμότητα) οι μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις διαστασιολογικές απαιτήσεις λογίζονται ως εξής. Με την εισροή της θερμότητας κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης μειώνεται τοπικά η μηχανική αντοχή των κραμάτων αλουμινίου, που έχουν υποστεί κατεργασία σκλήρυνσης με τη μέθοδο της ενδοτράχυνσης (σειρά 5000 εκτός της περίπτωσης 0 – ανόπτηση, ή H111- ενδοτράχυνση σε χαμηλό ποσοστό) ή με θερμική κατεργασία (σειρά 6000). Οι ιδιότητες συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 είναι γενικά αυτές της κατάστασης 0 ή H111. Μπορούν να ληφθούν υπόψη υψηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά, αν τεκμηριώνεται επαρκώς. Για κράματα της σειράς 6000 χρησιμοποιούνται οι πιο δυσμενείς ιδιότητες της περίπτωσης T4, που αναφέρεται σε θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφής και φυσικής γήρανσης.

1.2.1 Συντελεστής υλικού k

Ο συντελεστής υλικού k για τα κράματα αλουμινίου λαμβάνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$k = \frac{235}{R'_{lim}}$$

όπου,

R'_{lim} = ελάχιστη εγγυημένη τάση διαρροής του μητρικού μετάλλου σε συγκολλημένη κατάσταση $R'_{p0.2}$, σε N/mm^2 , αλλά όχι μεγαλύτερη από το 70% της ελάχιστης εγγυημένης αντοχής σε εφελκυσμό του μητρικού μετάλλου σε συγκολλημένη κατάσταση R'_m , σε N/mm^2 .

$R'_{p0.2}$ = ελάχιστη εγγυημένη τάση διαρροής, σε N/mm^2 , του μετάλλου σε συγκολλημένη κατάσταση

$$R'_{p0.2} = \eta_1 R_{p0.2}$$

R'_m = ελάχιστη εγγυημένη τάση εφελκυσμού, σε N/mm^2 , του μετάλλου σε συγκολλημένη κατάσταση

$$R'_m = \eta_2 R_m$$

$R_{p0.2}$ = ελάχιστη εγγυημένη τάση διαρροής, σε N/mm^2 , του μητρικού μετάλλου σε κατάσταση παράδοσης

R_m = ελάχιστη εγγυημένη αντοχή εφελκυσμού, σε N/mm^2 , του μητρικού μετάλλου σε κατάσταση παράδοσης

η_1, η_2 = καθορίζονται στον Πίνακα V

Πίνακας V: Κράματα αλουμινίου - Συντελεστές για συγκολλημένη κατασκευή

Κράμα αλουμινίου	η_1	η_2
Κράματα χωρίς κατεργασία σκλήρυνσης ενδοτράχυνσης (σειρά 5000 σε κατάσταση O ή H111)	1	1
Κράματα με κατεργασία σκλήρυνσης ενδοτράχυνσης (σειρά 5000 εκτός από κατάσταση O ή H111)	$R'_{p0.2} / R_{p0.2}$	R'_m / R_m
Κράματα με θερμική κατεργασία σκλήρυνσης (σειρά 6000) ⁽¹⁾	$R'_{p0.2} / R_{p0.2}$	0.6
O: ανόπτηση		
H111: ενδοτράχυνση ελάχιστης σκληρότητας		
1) Όταν δεν υπάρχουν πληροφορίες, ο συντελεστής η_1 πρέπει να ληφθεί ως ισοδύναμος με το μεταλλουργικό συντελεστή απόδοσης β		

Πίνακας VI: Κράματα αλουμινίου – Μεταλλουργικός συντελεστής απόδοσης β

Κράμα αλουμινίου	Κατάσταση σκλήρυνσης (Temper condition)	Πάχος όπως κατασκευάστηκε, σε mm	β
6005A (Ανοιχτές διατομές)	T5 ή T6	$t \leq 6$	0.45
		$t > 6$	0.40
6005A (Κλειστές διατομές)	T5 ή T6	Όλα	0.50
6061 (Διατομές)	T6	Όλα	0.53
6082 (Διατομές)	T6	Όλα	0.45
T5: Βαφή σε θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.			
T6: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.			

Στην περίπτωση συγκόλλησης δύο διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου, ο συντελεστής υλικού k πρέπει να λαμβάνεται για τη διαστασιολόγηση ως ο μεγαλύτερος συντελεστής υλικού εκ των κραμάτων που συνδέονται.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια υπολογιστική μέθοδος προσέγγισης της αριθμητικής επίλυσης των θεμελιωδών εξισώσεων προβλημάτων συνεχούς μέσου, όπως είναι τα προβλήματα παραμορφώσιμων στερεών, ανάλυσης κατασκευών και δομικών στοιχείων, μετάδοσης θερμότητας και μηχανικής ρευστών. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την διακριτοποίηση, δηλαδή την αναπαράσταση ενός συνεχούς μέσου όπως μια κατασκευή από πεπερασμένο αριθμό επιμέρους στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Για την επίλυση των εξισώσεων αυτών κατά την μητρική ανάλυση λαμβάνονται υπόψιν οι εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου για τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών.

Για την μελέτη της συμπεριφοράς απόκρισης μιας κατασκευής η μητρική εξίσωση ισορροπίας παίρνει τη μορφή $F=KU$, όπου F είναι το διάνυσμα των εξωτερικών φορτίσεων, K είναι το μητρώο δυσκαμψίας και U είναι το διάνυσμα των μετατοπίσεων.

Κατά τον σχεδιασμό ενός πλοίου πραγματοποιείται η ανάλυση της δομικής κατάστασης του, που μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ως εργαλείο για την αξιολόγηση της διαστασιολόγησης των δομικών στοιχείων (όπως οι διατομές, τα πάχη, οι αποστάσεις) ώστε να συμμορφώνονται με τα κριτήρια αποδοχής και να καθορίζονται τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων, σύμφωνα με τις υποθέσεις εφαρμοζόμενων φορτίων και συνοριακών συνθηκών κατά την ανάλυση.

Η διαδικασία της μεθόδου αποτελείται από τα στάδια της προ-επεξεργασίας, της επίλυσης και της μετ-επεξεργασίας.

1) Το στάδιο της προ-επεξεργασίας περιλαμβάνει:

- Μοντελοποίηση κατασκευής με επιλογή διαστασιολογικών στοιχείων, χωρική αναπαράσταση μοντέλου.

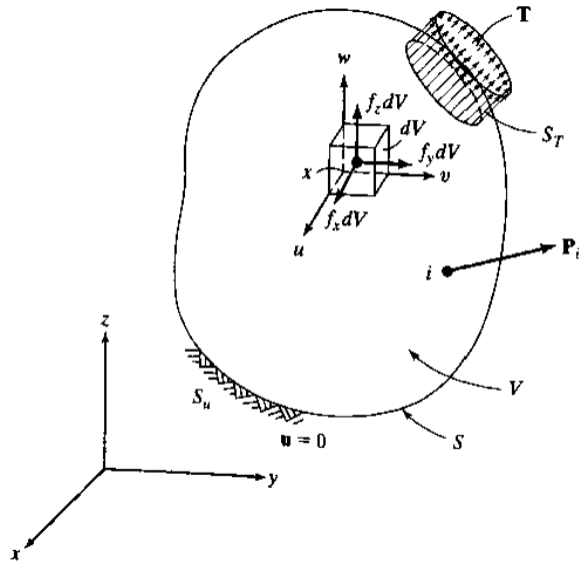
- Εφαρμογή ιδιοτήτων υλικού, σχηματισμός μητρώων δυσκαμψίας στοιχείων και συστήματος.
 - Διακριτοποίηση μοντέλου σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, ορισμός βαθμών ελευθερίας και συνέχειας κόμβων.
 - Επιλογή συνοριακών συνθηκών, δέσμευση βαθμών ελευθερίας.
 - Εφαρμογή εξωτερικών φορτίσεων.
- 2) Το στάδιο της επίλυσης για τον καθορισμό των ζητούμενων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο πρόγραμμα ανάλυσης.
 - 3) Το στάδιο της μετ-επεξεργασίας με αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. εφαρμογή κριτηρίων αποδοχής, προσδιορισμό βέλτιστης λύσης.

Συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους αναλυτικής και πειραματικής ανάλυσης, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο ακριβής σε πολύπλοκες κατασκευές, πιο γρήγορη και άρα πιο οικονομική και μπορεί να αποφέρει βελτιστοποιημένες κατασκευές τοπικά και ολικά σε μειωμένο βάρος και υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια.

2.2 Βασική θεωρία

2.2.1 Τάσεις και ισορροπία

Ένα σώμα 3 διαστάσεων καταλαμβάνει όγκο V με επιφάνεια S και τα σημεία του ορίζονται από τις συντεταγμένες x,y,z , όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Σώμα 3 διαστάσεων⁽¹⁰⁾

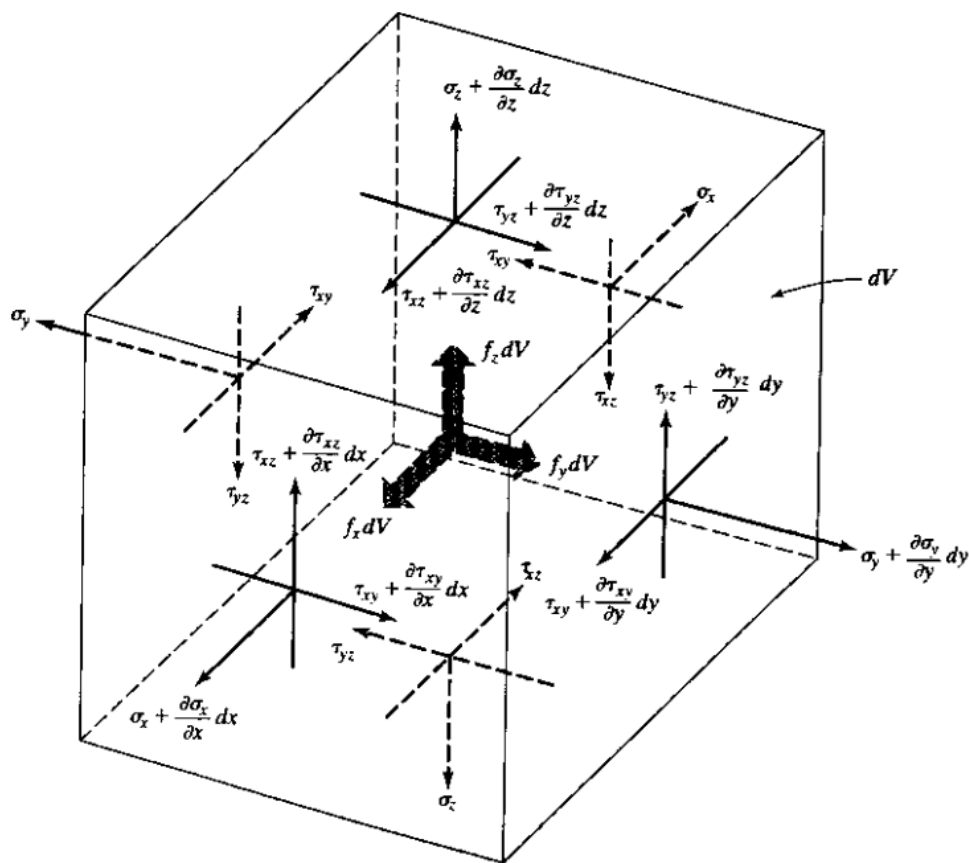
Στο παράδειγμα αυτό, το σώμα περιορίζεται στο σύνορο S_u , έχει δηλαδή δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας, όπου ορίζεται μηδενική μετατόπιση $u=0$, και του ασκείται κατανεμημένη δύναμη ανά μονάδα όγκου f , όπως είναι το βάρος, κατανεμημένη δύναμη ανά μονάδα επιφανείας T και συγκεντρωμένη δύναμη P . Στη γενική περίπτωση τα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία αναλύονται σε 3 συνιστώσες στο χώρο:

$$f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad P_i = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}_i$$

Η παραμόρφωση του σημείου x με συντεταγμένες x, y, z δίνεται με τις 3 συνιστώσες μετατόπισης:

$$u = u(x, y, z) = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix}$$

Οι τάσεις που ενεργούν στο στοιχειώδη όγκο dV παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Ισορροπία στοιχειώδους στοιχείου

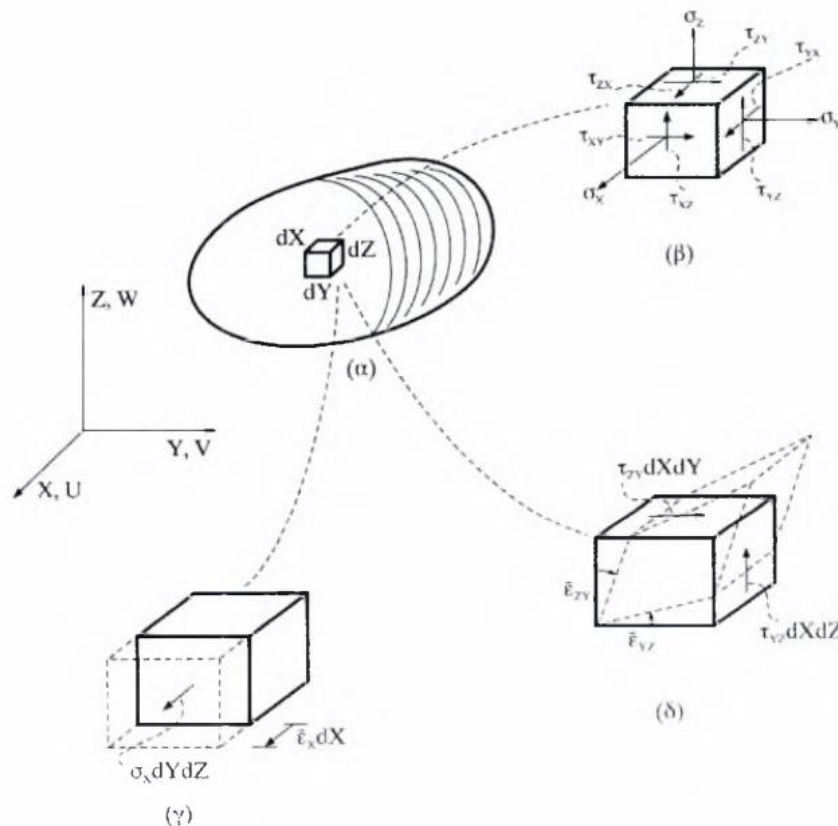
Όταν ο όγκος dV τείνει σε ένα σημείο, ο τανυστής των τάσεων παριστάνεται με τις συνιστώσες του σε ένα μητρώο 3×3 :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία, η τάση παριστάνεται με τις 6 ανεξάρτητες συνιστώσες ως:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T$$

όπου $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ είναι οι κάθετες ορθές τάσεις και $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ οι διατμητικές τάσεις, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 (α) τρισδιάστατος φορέας, (β) στοιχειώδες στερεό τάσεων, (γ) ορθή δυνατή παραμόρφωση, (δ) διατμητική δυνατή παραμόρφωση

Αν θεωρήσουμε ισορροπία του στοιχειώδους όγκου όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 2, υπολογίζοντας τις δυνάμεις στις επιφάνειες πολλαπλασιάζοντας τις τάσεις με τις αντίστοιχες επιφάνειες και λαμβάνοντας $\Sigma F_x=0$, $\Sigma F_y=0$, $\Sigma F_z=0$ και $dV=d_x d_y d_z$, παίρνουμε τις εξισώσεις ισορροπίας:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0$$

2.2.2 Συνοριακές συνθήκες

Στην Εικόνα 1 παρατηρείται ότι υπάρχουν συνοριακές συνθήκες μετατόπισης και συνθήκες επιφανειακής φόρτισης. Η μετατόπιση u περιορίζεται σε τμήμα του συνόρου S_u ώστε

$$u = 0 \text{ στο } S_u$$

Μπορεί να θεωρηθεί συνοριακή συνθήκη $u = a$, όπου a δεδομένη μετατόπιση.

Αν θεωρηθεί ισορροπία ενός στοιχειώδους τετράεδρου ABCD όπως στην Εικόνα 4, όπου DA, DB, DC παράλληλα στους άξονες x, y, z αντίστοιχα και ABC η περιοχή dA στην επιφάνεια. Αν

$n = [n_x, n_y, n_z]^T$ το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα της dA τότε

$$BDC = n_x dA, ADC = n_y dA, ADB = n_z dA$$

Λόγω ισορροπίας έχουμε

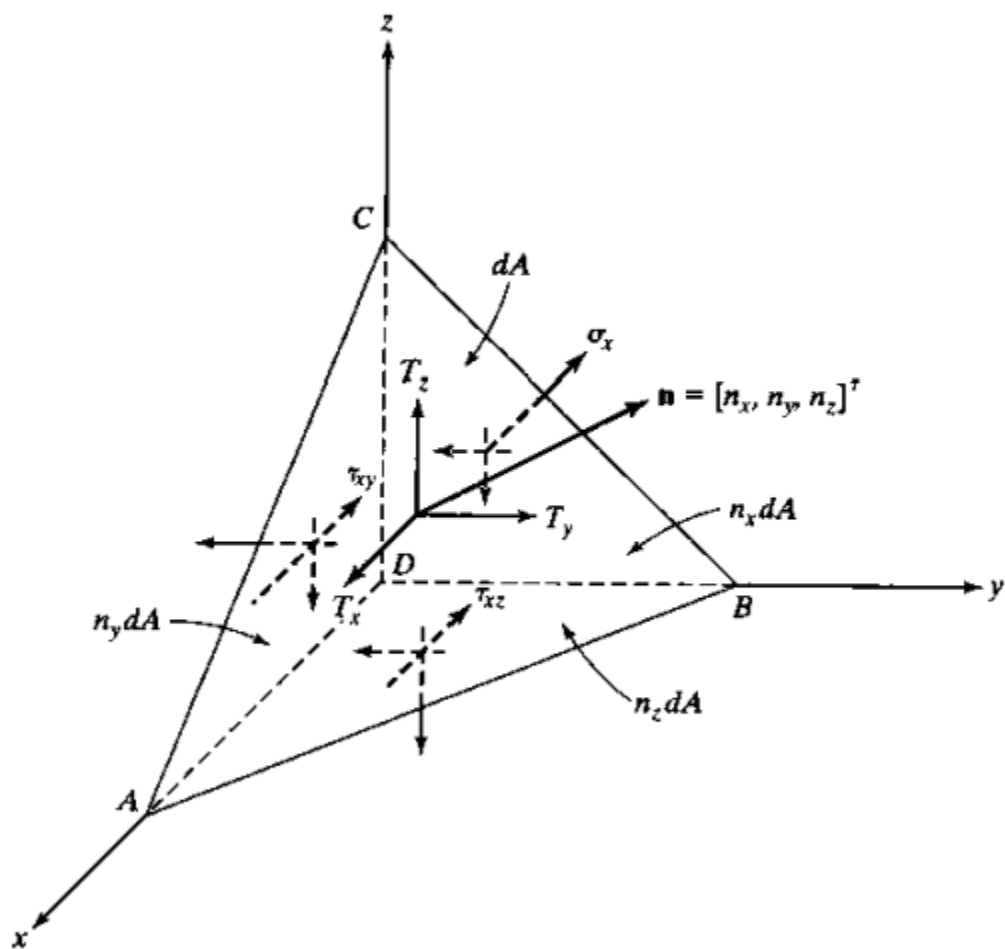
$$\sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z = T_x$$

$$\tau_{xy} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z = T_y$$

$$\tau_{xz} n_x + \tau_{yz} n_y + \sigma_z n_z = T_z$$

Αυτές οι συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται στο σύνορο S_T όπου εφαρμόζεται εφελκυσμός.

Τα σημειακά φορτία πρέπει να διαχειρίζονται ως φορτία κατανεμημένα επί μικρών αλλά πεπερασμένων περιοχών.



Εικόνα 4: Στοιχειώδης όγκος στην επιφάνεια

2.2.3 Σχέσεις παραμόρφωσης μετατόπισης

Για μικρές μετατοπίσεις θεωρούμε ότι ισχύουν οι γραμμικές σχέσεις για τις παραμορφώσεις

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T$$

2.2.4 Σχέσεις τάσης παραμόρφωσης

Για γραμμικά ελαστικά υλικά, οι σχέσεις τάσης παραμόρφωσης προέρχονται από τον γενικευμένο κανόνα του Hooke. Για ισότροπα υλικά οι ιδιότητες δίνονται από το μέτρο ελαστικότητας του Young E και το λόγο ν του Poisson. Θεωρώντας στοιχειώδη κύβο σε ένα σώμα από νόμο του Hooke έχουμε

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E}$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E}$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης ή δυσκαμψίας

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Παρατηρείται ότι

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{(1 - 2\nu)}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας στις άνω σχέσεις έχουμε αντίστροφα

$$\sigma = D\varepsilon$$

όπου D το μητρώο τάσεων παραμορφώσεων, εκφράζει τον καταστατικό νόμο του υλικού, δίνεται ως

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu \end{bmatrix}$$

2.2.5 Επίδραση θερμοκρασίας

Η αλλαγή θερμοκρασίας σε ισότροπα υλικά προκαλεί ομοιόμορφη παραμόρφωση, που εξαρτάται από τον συντελεστή γραμμικής διαστολής α του υλικού, που αντιπροσωπεύει τη μεταβολή μήκους ανά μονάδα αύξησης θερμοκρασίας. Η παραμόρφωση αυτή δεν προκαλεί τάσεις όταν το σώμα είναι ελεύθερο. Η θερμοκρασιακή παραμόρφωση λογίζεται ως αρχική παραμόρφωση

$$\varepsilon_0 = [\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0, 0, 0]^T$$

και η σχέση τάσης παραμόρφωσης είναι

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0)$$

2.2.6 Δυναμική ενέργεια και ισορροπία

Έχοντας τη γεωμετρία της κατασκευής, τον καταστατικό νόμο του υλικού, τις αρχικές φορτίσεις και τις δεσμευμένες κινήσεις στα σημεία στήριξης, ζητούμενο είναι να προσδιοριστούν οι άγνωστες μετατοπίσεις με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις και τάσεις. Για τον υπολογισμό χρειάζεται η επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, με την ακριβή λύση να προϋποθέτει απλή γεωμετρία και συνθήκες φόρτισης. Σε σύνθετα προβλήματα χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι με τεχνικές δυναμικής ενέργειας, που θέτουν συναρτήσεις με λιγότερο περιοριστικές συνθήκες.

Η συνολική δυναμική ενέργεια Π ενός ελαστικού σώματος ορίζεται ως το άθροισμα της ενέργειας παραμόρφωσης και της ικανότητας παραγωγής έργου

$$\Pi = U + WP$$

$$\Pi = \left(\frac{1}{2} \int_V \sigma^T \varepsilon dV \right) + \left(- \int_V u^T f dV - \int_S u^T T dS - \sum_i u_i^T P_i \right)$$

Θεωρούμε συστήματα διατήρησης όπου το έργο του δυναμικού είναι ανεξάρτητο της θεωρούμενης διαδρομής, δηλαδή αν το σύστημα μετατοπίζεται από δεδομένη μορφή και επανέρχεται στην ίδια κατάσταση, οι δυνάμεις παράγουν μηδενικό έργο ανεξάρτητα από τη διαδρομή μετατόπισης. Η αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας ορίζεται ως:

Για τα συστήματα διατήρησης, απ' όλα τα πεδία επιτρεπών μετατοπίσεων, αυτά που αντιστοιχούν σε ισορροπία παρουσιάζουν ακρότατα ολικής δυναμικής ενέργειας. Αν το ακρότατο είναι ελάχιστο, η κατάσταση ισορροπίας είναι σταθερή.

Επιτρεπτές μετατοπίσεις είναι αυτές που ικανοποιούν τη συμβατότητα των μετατοπίσεων και τις συνοριακές συνθήκες.

2.2.7 Μέθοδος Rayleigh – Ritz

Η μέθοδος Rayleigh – Ritz περιλαμβάνει την κατασκευή ενός υποτιθέμενου πεδίου μετατοπίσεων, δηλαδή

$$u = \sum \alpha_i \varphi_i(x, y, z) , \quad i = 1 \text{ έως } l$$

$$v = \sum \alpha_j \varphi_j(x, y, z) , \quad j = l + 1 \text{ έως } m$$

$$w = \sum \alpha_k \varphi_k(x, y, z) , \quad k = m + 1 \text{ έως } n, n > m > l$$

Οι συναρτήσεις φ_i λαμβάνονται ως πολυώνυμα, με τις επιτρεπτές μετατοπίσεις και συνοριακές συνθήκες. Τότε η συνολική δυναμική ενέργεια είναι

$$\Pi = \Pi(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r)$$

όπου r είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων αγνώστων. Τα ακρότατα ως προς α_i δίνουν το σύνολο r εξισώσεων

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \alpha_i} = 0 , \quad i = 1, 2, \dots, r$$

2.2.8 Μέθοδος Galerkin

Η μέθοδος Galerkin συνήθως παρουσιάζεται ως μία απ' τις μεθόδους σταθμικών υπολοίπων, η οποία χρησιμοποιεί το σύνολο των εξισώσεων στην ανάπτυξη ενός τύπου ολοκληρώματος. Έστω η γενική παράσταση της διέπουσας εξίσωσης σε μια περιοχή V :

$$Lu = P$$

Μια προσεγγιστική λύση εισάγει ένα σφάλμα $\varepsilon(x)$, το υπόλοιπο:

$$\varepsilon(x) = Lu - P$$

Οι προσεγγιστικές λύσεις θέτουν το υπόλοιπο με μια σταθμική συνάρτηση W_i ίσο με μηδέν:

$$\int_V W_i (Lu - P) dV = 0, \quad i = 1 \text{ έως } n$$

Η επιλογή της σταθμική συνάρτηση W_i οδηγεί σε διάφορες προσεγγιστικές μεθόδους. Στη μέθοδο Galerkin οι σταθμικές συναρτήσεις W_i επιλέγονται από τις συναρτήσεις βάσεως, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της u :

$$u = \sum_{i=1}^n Q_i G_i$$

όπου G_i , $i=1$ έως n , οι συναρτήσεις βάσεως (πολυώνυμα x,y,z). Επιλέγεται οι σταθμικές συναρτήσεις να είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των συναρτήσεων βάσεως G_i , ώστε η συνάρτηση φ να δίνεται από

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i G_i$$

όπου οι συντελεστές φ_i είναι αυθαίρετοι, με την απαίτηση η φ να ικανοποιεί ομογενείς (μηδενικές) συνοριακές συνθήκες όπου περιγράφεται η u .

Έτσι, επιλέγουμε G_i και προσδιορίζουμε τα Q_i της u ώστε

$$\int_V \varphi (Lu - P) dV = 0, \quad \text{για κάθε } \varphi$$

Θεωρώντας ότι βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή αντικαθιστώντας την $Lu - P$ με τις εξισώσεις ισορροπίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως και χρησιμοποιώντας το θεώρημα Green-Gauss ή θεώρημα της απόκλισης καταλήγουμε στον τύπο μεταβολών του Galerkin

$$\int_V \sigma^T \varepsilon(\varphi) dV - \int_V \varphi^T f dV - \int_S \varphi^T T dS - \sum_i \varphi^T P_i = 0$$

ή, αρχή των δυνατών έργων, που ορίζεται ως

Ένα σώμα είναι σε ισορροπία εάν το εσωτερικό δυνατό έργο ισούται με το εξωτερικό δυνατό έργο για κάθε κινητικά επιτρεπτό πεδίο μετατοπίσεων $(\varphi, \varepsilon(\varphi))$.

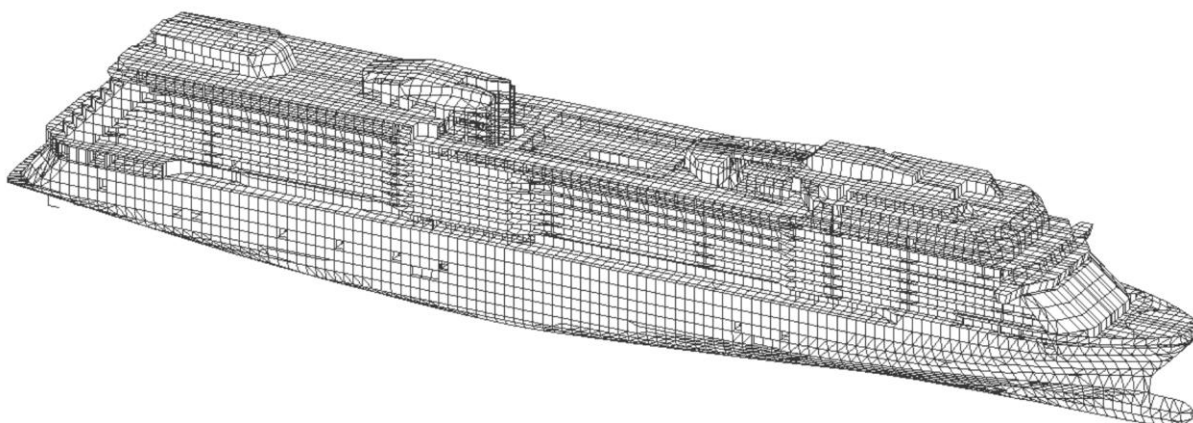
2.2.9 Αρχή Saint Venant

Συχνά για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών πρέπει να κάνουμε προσεγγίσεις για την αναπαράσταση μιας στήριξης. Ο Saint Venant θεώρησε την επίδραση διαφορετικών προσεγγίσεων στη λύση του συνολικού προβλήματος. Η αρχή του Saint Venant ορίζει πως εφόσον οι διάφορες προσεγγίσεις είναι στατικά ισοδύναμες, οι λύσεις θα είναι έγκυρες υπό την προϋπόθεση να εστιάζουμε σε περιοχές αρκετά μακριά από την περιοχή στήριξης, δηλαδή οι λύσεις ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά μόνο εντός περιοχής άμεσης γειτνίασης με την στήριξη.

2.3 Μέθοδοι υπολογισμού

Οι κανονισμοί νηογνομόνων και συγκεκριμένα ο DNVGL-CG-0127 Sec.1, 1.3⁽³⁾ παρέχουν οδηγίες για τρία επίπεδα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων:

- α) Ανάλυση αντοχής του συνόλου του πλοίου για την αξιολόγηση της μεταλλικής κατασκευής.
- β) Ανάλυση αντοχής τμήματος πλοίου για την αξιολόγηση δομικών στοιχείων, κύριων ενισχύσεων και φρακτών.
- γ) Τοπική ανάλυση δομής για την αξιολόγηση λεπτομερειών της κατασκευής.

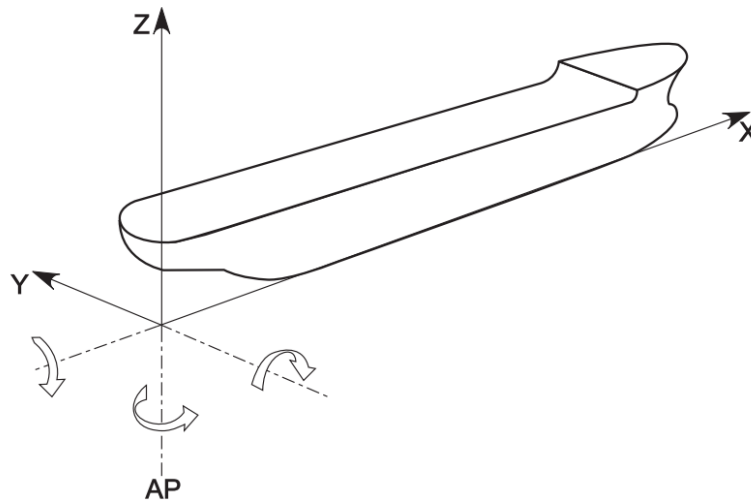


Εικόνα 5: Τυπικό ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός κρουαζιερόπλοιου

2.3.1 Σύστημα συντεταγμένων

Για τον ορισμό του συστήματος συντεταγμένων χρησιμοποιείται ένα σωματοπαγές σύστημα ⁽¹¹⁾ με:

- Άξονα x: τον διαμήκη άξονα που ταυτίζεται με την βασική γραμμή αναφοράς (Base Line), με θετική φορά προς την πλώρη.
- Άξονα y: τον εγκάρσιο άξονα, με θετικά προς τα αριστερά (Port Side).
- Άξονα z: τον κατακόρυφο άξονα με θετική φορά προς τα πάνω.
- Σημείο αναφοράς: το σημείο τομής της πρυμναίας καθέτου (Aft Perpendicular), της βασικής γραμμής αναφοράς και του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας.



Εικόνα 6: Σύστημα συντεταγμένων

2.3.2 Απομείωση πάχους λόγω διάβρωσης

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων βασίζονται σε διαστασιολόγηση με απομείωση πάχους λόγω διάβρωσης σύμφωνα με τους κανονισμούς, RU SHIP Pt.3 Ch.3 Sec.2 Πίνακας 1,⁽⁹⁾ ως εξής

- 50% απομείωση πάχους για πλοία με σήμανση ESP (Enhance survey program), δηλαδή σε πρόγραμμα ενισχυμένων επιθεωρήσεων σε πετρελαιοφόρα δεξαμενόπλοια, χημικά δεξαμενόπλοια και φορτηγά.
- 0% απομείωση πάχους για άλλα πλοία.






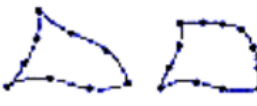

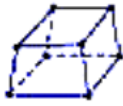
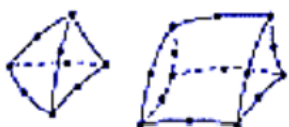

Για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας έναντι λυγισμού η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται με 100% απομείωση του πάχους διάβρωσης.

2.3.3 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων

Οι μέθοδοι υπολογισμού που αναφέρθηκαν από τους κανονισμούς βασίζονται στη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων τρισδιάστατων μοντέλων. Οι γενικοί τύποι είναι:

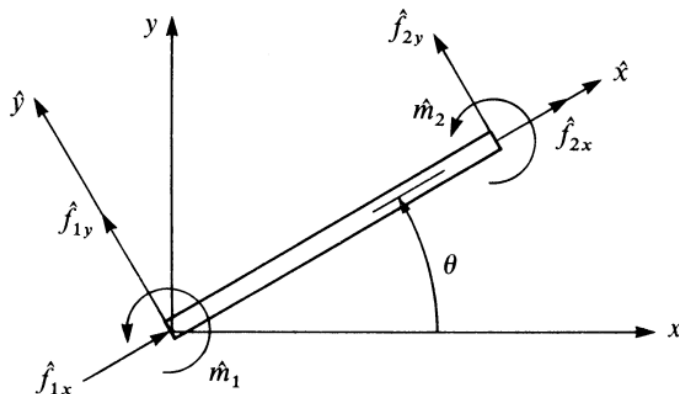
- Στοιχεία ράβδου ή δικτύωματος (rod/truss element): γραμμικά στοιχεία με αξονική δυσκαμψία μόνο και σταθερή διατομή κατά το μήκος του στοιχείου.

- Στοιχεία δοκού (beam element): γραμμικά στοιχεία με αξονική, στρεπτική και καμπτική δυσκαμψία, διάτμηση σε δύο διευθύνσεις και με σταθερές ιδιότητες κατά το μήκος του στοιχείου.
- Στοιχεία κελύφους ή πλάκας (shell/plate elements): στοιχεία επιφάνειας με εντός επιπέδου δυσκαμψία και εκτός επιπέδου καμπτική δυσκαμψία με σταθερό πάχος. Τα στοιχεία αυτά επιδεικνύουν καμπτική και μεμβρανική συμπεριφορά, με κάθε κόμβο να διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας με 3 μετατοπίσεις και 3 στροφές.
- Στοιχεία μεμβράνης ή τάσης στο επίπεδο (membrane/plane-stress elements): στοιχεία επιφάνειας με διαξονική και εντός επιπέδου δυσκαμψία στοιχείου πλάκας με σταθερό πάχος. Το μεμβρανικό στοιχείο αναπαριστά τη συμπεριφορά ελάσματος στο επίπεδό, δηλαδή εξαιρείται η καμπτική συμπεριφορά με συνέπεια να μην μπορεί να παραλάβει κάθετη (υδροστατική) φόρτιση. Κάθε κόμβος διαθέτει 2 βαθμούς ελευθερίας, κατά τις διευθύνσεις x και y στο επίπεδό του.

Dimension	Degree	Element Shape	Element Type
1D (Line)	Linear		Beam, Truss
	Quadratic		Beam
	Cubic		Beam
2D (Area)	Linear		Plane stress Plane strain Plate, Shell
	Quadratic		
	Cubic		
3D (Volume)	Linear		
	Quadratic		

Εικόνα 7: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων

Ένα στοιχείο δοκού αναπαρίσταται από μια γραμμή με 2 κόμβους όπως στην Εικόνα 8,⁽¹²⁾ όπου για 6 βαθμούς ελευθερίας έχουμε στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων



Εικόνα 8: Δυνάμεις σε στοιχείο δοκού στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_{1x} \\ \hat{f}_{1y} \\ \hat{m}_1 \\ \hat{f}_{2x} \\ \hat{f}_{2y} \\ \hat{m}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_{1x} \\ \hat{d}_{1y} \\ \hat{\varphi}_1 \\ \hat{d}_{2x} \\ \hat{d}_{2y} \\ \hat{\varphi}_2 \end{bmatrix}$$

Για την μετάβαση από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο ολικό εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_{1x} \\ \hat{d}_{1y} \\ \hat{\varphi}_1 \\ \hat{d}_{2x} \\ \hat{d}_{2y} \\ \hat{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ \varphi_1 \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ \varphi_2 \end{bmatrix}$$

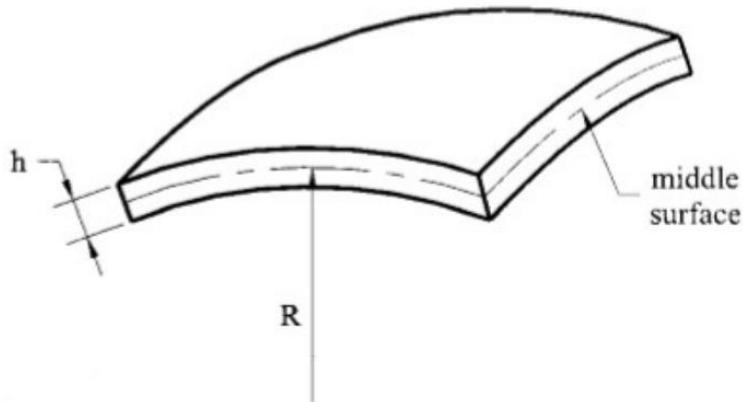
όπου θ η γωνία στροφής του τοπικού συστήματος ως προς το ολικό. ⁽¹²⁾

Για αξονική μετατόπιση ισχύει η σχέση για την παραμόρφωση

$$\varepsilon_x(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{\partial \hat{d}}{\partial \hat{x}}$$

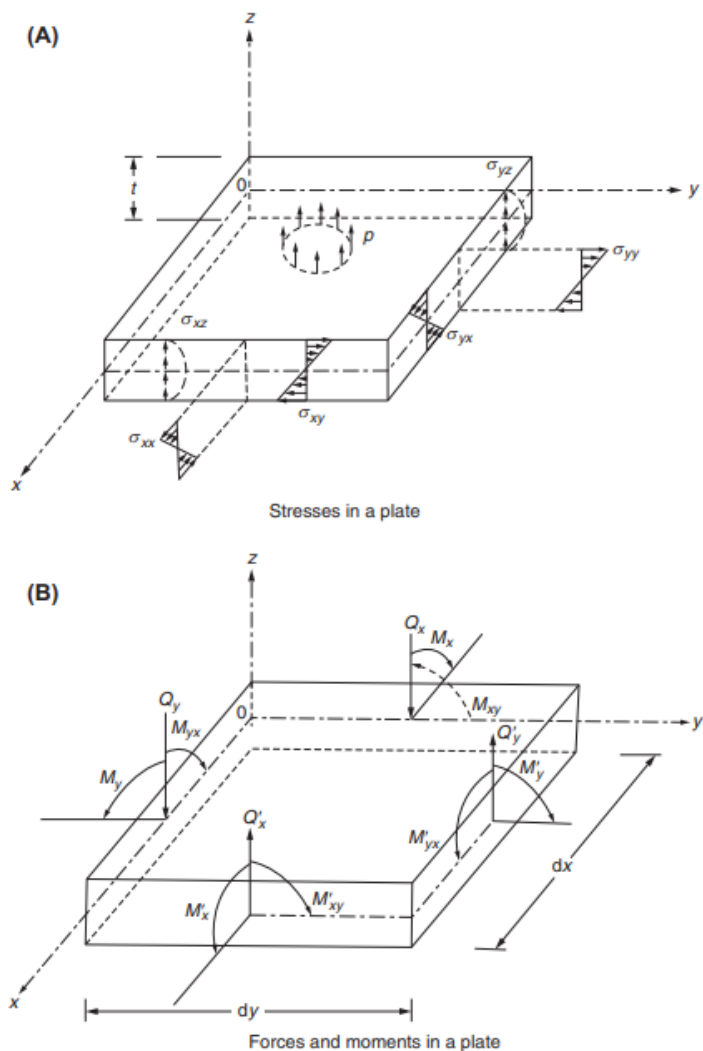
και η τάση $\sigma = E\varepsilon$, σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.2.

Το στοιχείο πλάκας αντιπροσωπεύει συνήθως τη μέση επιφάνεια σταθερού πάχους σε εφαρμογές με τυποποιημένα ελάσματα, όπως στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Στοιχείο πλάκας

Τα στοιχεία αυτά αναπαρίστανται από ισοπαραμετρικά στοιχεία τεσσάρων κόμβων ανώτερης τάξης, συνήθως τετραγωνικής. Οι τάσεις, οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται παρουσιάζονται στην Εικόνα 10.



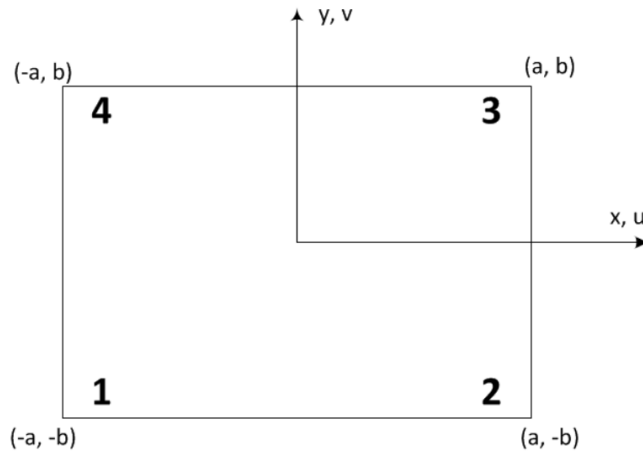
Εικόνα 10: Στοιχείο πλάκας A) Τάσεις B) Δυνάμεις και ροπές ⁽¹³⁾

Για ένα τετράπλευρο στοιχείο τεσσάρων κόμβων με συντεταγμένες x_i, y_i όπως στην Εικόνα 11, εφαρμόζονται οι συναρτήσεις παρεμβολής L σε κάθε κόμβο

$$L_i(x, y) = \frac{(x + x_i a)(y + y_i b)}{4(x_i a)(y_i b)}$$

με

κόμβος	1	2	3	4
x_i	-1	1	1	-1
y_i	-1	-1	1	1



Εικόνα 11: Τετράπλευρο στοιχείο τεσσάρων κόμβων ⁽¹⁴⁾

Ωστε οι μετατοπίσεις u, v να δίνονται από $u=Hd$ ως

$$\begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1(x, y) & 0 & L_2(x, y) & 0 & L_3(x, y) & 0 & L_4(x, y) & 0 \\ 0 & L_1(x, y) & 0 & L_2(x, y) & 0 & L_3(x, y) & 0 & L_4(x, y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

Οι σχέσεις παραμόρφωσης μετατόπισης είναι

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1,2,3,4} \frac{\partial L_i(x, y)}{\partial x} u_i \\ \sum_{i=1,2,3,4} \frac{\partial L_i(x, y)}{\partial y} v_i \\ \sum_{i=1,2,3,4} \frac{\partial L_i(x, y)}{\partial y} u_i + \sum_{i=1,2,3,4} \frac{\partial L_i(x, y)}{\partial x} v_i \end{bmatrix} = Bd$$

Από την καταστατική εξίσωση για επίπεδη εντατική κατάσταση έχουμε $\sigma = D\varepsilon$

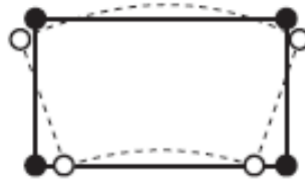
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Από την αρχή των δυνατών έργων προκύπτει το μητρώο ακαμψίας

$$K = \iiint_V B^T DB$$

Γενικά, δίκομβα γραμμικά στοιχεία δοκού και τετράκομβα ή τρίκομβα στοιχεία πλάκας/κελύφους θεωρούνται επαρκή για την αναπαράσταση της δομής του πλοίου από την κλάση. Ωστόσο δύναται να χρησιμοποιηθούν και στοιχεία υψηλότερης τάξης. Στοιχεία πλακών με εσωτερικές γωνίες μικρότερες των 45 μοιρών ή μεγαλύτερες από 135 μοίρες μεταξύ πλευρών θα πρέπει να αποφεύγονται. Ακόμη πρέπει να ελέγχεται ο λόγος πλευρών στοιχείου ώστε να διατηρείται κοντά στο 1, χωρίς όμως να υπερβαίνει το 3 για τετράκομβα στοιχεία και το 5 για οχτάκομβα στοιχεία. Η χρήση τριγωνικών στοιχείων πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο. Αν είναι εφικτό, ο λόγος πλευρών των στοιχείων κελύφους σε περιοχές που αναμένεται υψηλή τάση πρέπει να διατηρείται κοντά στο 1 και να αποφεύγονται τριγωνικά στοιχεία.

Σε περίπτωση χρήσης γραμμικών στοιχείων (4/3κομβά στοιχεία) είναι απαραίτητο οι συναρτήσεις μορφής των επιφανειακών στοιχείων να περιλαμβάνουν “ασύμβατους όρους”, δηλαδή παραβολικούς όρους, που προσφέρουν βελτιωμένη συμπεριφορά σε κάμψη για το μοντελοποιημένο στοιχείο, όπως φαίνεται στην κάτωθι εικόνα. Αυτός ο τύπος στοιχείου χρειάζεται για την μοντελοποίηση των ελασμάτων κύριας ενίσχυσης νομέων ώστε να υπολογιστεί ορθά η κατανομή καμπτικών τάσεων με τη χρήση ενός στοιχείου καθ’ όλο το ύψος ενίσχυσης. Για το μοντέλο ολικής ανάλυσης του πλοίου, η περιγραφή της διακριτοποίησης από τους κανονισμούς του νηογνώμονα βασίζεται στην υπόθεση ότι τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούν τέτοιες “ασύμβατες” συναρτήσεις μορφής.



Εικόνα 12: Βελτιωμένη καμπτική συμπεριφορά πεπερασμένου στοιχείου

Για την ανάλυση αντοχής του συνόλου του πλοίου, την μερική και την τοπική, η αξιολόγηση έναντι των κριτηρίων αποδοχής τάσεων συνήθως βασίζεται σε εντός επιπέδου μεμβρανικές τάσεις των στοιχείων κελύφους/πλακών. Για την αξιολόγηση κόπωσης, ο υπολογισμός του εύρους των δυναμικών τάσεων βασίζεται στις επιφανειακές τάσεις των στοιχείων κελύφους/πλακών.

2.3.4 Έλεγχος μοντέλου

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να ελέγχεται συστηματικά για τα ακόλουθα λάθη:

- σταθεροί κόμβοι
- κόμβοι χωρίς δυσκαμψία
- ενδιάμεσοι κόμβοι σε ακμή στοιχείου που δεν ενώνονται με το στοιχείο
- γραμμικά στοιχεία που διαπερνούν επιφανειακά στοιχεία
- διπλοεγγραφές στοιχείων
- ακραία σχήματα στοιχείων (λόγος πλευρών στοιχείου και στρεβλωμένα στοιχεία)
- λανθασμένες συνοριακές συνθήκες

Επιπρόσθετα, απαιτείται επιβεβαίωση του σωστού υλικού και της γεωμετρικής περιγραφής των στοιχείων, με έλεγχο στις ροπές αδρανείας, τη ροπή αντίστασης και τον ουδέτερο άξονα των διατομών.

Για την εύρεση ατελών συνδέσεων ή διάκενου μεταξύ γειτονικών στοιχείων πρέπει να πραγματοποιηθεί ο εξής έλεγχος. Το μοντέλο πρέπει να φορτιστεί σε όλους τους κόμβους με ένα στοιχειώδες ή βαρυντικό φορτίο σε κάθε διεύθυνση του συστήματος συντεταγμένων, δηλαδή για 3 καταστάσεις φόρτισης, μία για κάθε διεύθυνση. Τα αποτελέσματα πρέπει να αξιολογηθούν ως προς τις μέγιστες μετατοπίσεις σε όλες τις διευθύνσεις και ως προς την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών ώστε να διαπιστωθεί αν κάποιο από τα επιμέρους στοιχεία μπορεί να κινηθεί ελεύθερα χωρίς περιορισμούς από τη δυσκαμψία της γάστρας.

2.3.5 Συνοριακές συνθήκες

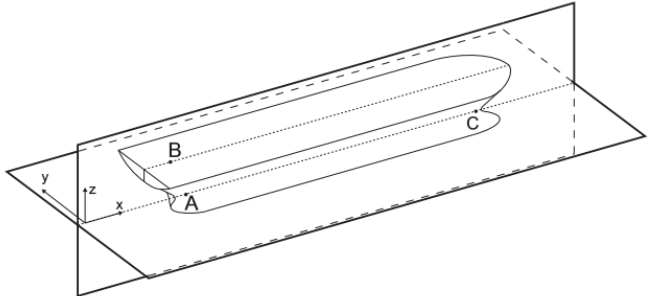
Οι συνοριακές συνθήκες για το μοντέλο ολικής αναπαράστασης του πλοίου αναπαρίστανται ως απλές στηρίξεις ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη ενδογενών τάσεων και οι κινήσεις του ως άκαμπτου σώματος. Οι αντιδράσεις στα σύνορα πρέπει να ελαχιστοποιούνται. Τα σημεία περιορισμού πρέπει να ορίζονται μακριά από τις ζώνες ενδιαφέροντος, καθώς τα εφαρμοζόμενα

φορτία μπορεί να οδηγήσουν σε αζυγοσταθμία του μοντέλου. Τα σημεία έδρασης συχνά εφαρμόζονται στο διάμηκες επίπεδο αναφοράς κοντά στο πρυμναίο και πωραίο άκρο του πλοίου. Γενικά, μπορεί να εφαρμοστεί ένας κανόνας με 3-2-1 περιορισμούς μετατόπισης όπως στην Περίπτωση 1. Για κάθε περίπτωση φόρτισης, το άθροισμα των δράσεων και αντιδράσεων των συνοριακών στοιχείων πρέπει να ελέγχεται. Σύμφωνα με τις οδηγίες της κλάσης DNVGL-CG-0127 (Sec.2, [2.5])⁽³⁾ δίνονται 3 παραδείγματα εφαρμογής συνοριακών συνθηκών που παρουσιάζονται κάτωθι.

2.3.5.1 Περίπτωση 1

Στην Περίπτωση 1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, τα σημεία έδρασης εφαρμόζονται στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας κοντά στην πρυμναία και πωραία κάθετο. Το ολικό μοντέλο στηρίζεται σε 3 σημεία:

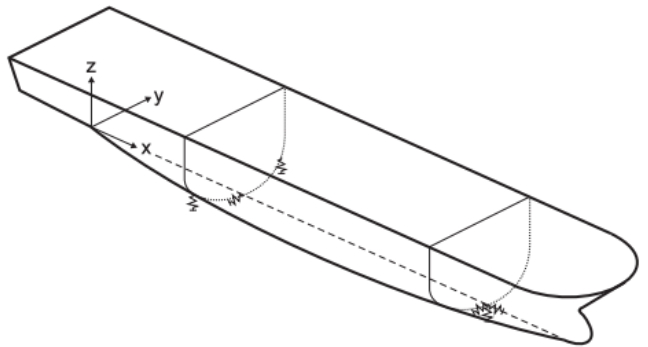
- σημείο A: το σημείο τομής της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας στην πρυμναία εγκάρσια φρακτή, με περιορισμό μετάθεσης και στις 3 διευθύνσεις x, y, z.
- σημείο B: από την προβολή του A στο άνω κατάστρωμα, με περιορισμό μετάθεσης στην εγκάρσια διεύθυνση y.
- σημείο C: το σημείο τομής της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας στην πωραία εγκάρσια φρακτή σύγκρουσης, με περιορισμό μετάθεσης στην εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση y, z.

	Location	Direction of support	
Aft End	WL, CL (point A)	X, Y, Z	
	CL, Upper deck (point B)	Y	
Forward End	WL, CL (point C)	Y, Z	

Εικόνα 13: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών

2.3.5.2 Περίπτωση 2

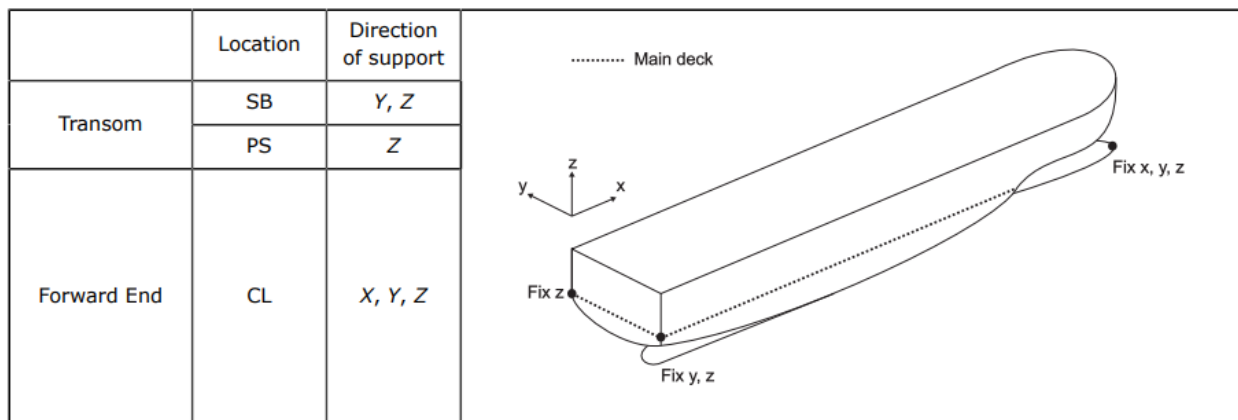
Σε αυτήν την περίπτωση τα σημεία στήριξης είναι 3 στην προραία φρακτή του μηχανοστασίου, με περιορισμό στην εγκάρσια διεύθυνση y στη γραμμή αναφοράς και στην κατακόρυφη διεύθυνση z δεξιά και αριστερά, και σε 1 σημείο στην γραμμή αναφοράς της προραίας εγκάρσιας φρακτής σύγκρουσης με περιορισμό μετάθεσης και στις 3 διευθύνσεις x, y, z .

	Location	Direction of support	
Engine room Front Bulkhead	SB	Z	
	CL	Y	
	PS	Z	
Collision Bulkhead	CL	X	
	CL	Y	
	CL	Z	

Εικόνα 14: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών ⁽⁹⁾

2.3.5.3 Περίπτωση 3

Σε αυτήν την περίπτωση τα σημεία στήριξης εφαρμόζονται στα σημεία τομής του καθρέπτη με το κυρίως κατάστρωμα, όπου αριστερά η έδραση περιορίζει την κατακόρυφη μετατόπιση z , δεξιά περιορίζει την εγκάρσια και κατακόρυφη μετατόπιση y, z και στο προωαίο άκρο και στις 3 διευθύνσεις x, y, z .



Εικόνα 15: Περίπτωση 3 συνοριακών συνθηκών

2.3.6 Στατικά φορτία

Κατά τον κανονισμό DNV-CG-0138 ⁽¹⁵⁾ τα στατικά φορτία ή φορτία στάσιμου νερού (Stillwater loads) που εφαρμόζονται είναι:

- 1) Βάρος άφορτου πλοίου (Light ship weight).

Τα βάρους της κατασκευής συναρτάται από της εφαρμογή της πυκνότητας του υλικού στα στοιχεία που την αποτελούν, ώστε το μοντέλο να ακολουθεί την πραγματική κατανομή βάρους του πλοίου. Συχνά απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία για την ρύθμιση της κατανομής μάζας και της θέσης του κέντρου βάρους, με δυνατότητα χρήσης διαφορετικών πυκνοτήτων υλικών κατά το μήκος.

Λοιπά βάρη άφορτου πλοίου πρέπει να αναπαρίστανται από μια συγκεντρωμένη μάζα στο κέντρο βάρους του κάθε επιμέρους στοιχείου.

Όλες οι μάζες πρέπει να συνδέονται με την περιβάλλουσα δομή.

- 2) Εξοπλισμός (Machinery and outfitting)

Όλα τα εξαρτήματα βαρέως μηχανολογικού εξοπλισμού (όπως είναι η κύρια μηχανή, το πηδάλιο, η κύρια γεννήτρια κλπ.) πρέπει να μοντελοποιούνται ως σημειακές μάζες συνδεδεμένες με την περιβάλλουσα δομή στις σωστές θέσεις. Το βάρος κάποιου εξαρτήματος αν είναι πολύ μεγάλο (για περίπτωση ο κύριος εξοπλισμός) δύναται να επιμεριστεί σε περισσότερες σημειακές μάζες.

3) Νεκρό βάρος και φορτίο επιβατών (Deadweight and passenger loads).

Τα φορτία αυτά δύναται να αναπαρασταθούν από συγκεντρωμένες μάζες στο κέντρο βάρους κάθε στοιχείου ή ως κατανεμημένη πίεση εφαρμοζόμενη στην αντίστοιχη περιοχή καταστρώματος.

4) Φορτία δεξαμενών (Tank loads)

Η μάζα ρευστού των δεξαμενών πρέπει να αναπαρασταθεί ως φορτίο πίεσης ή σημειακή μάζα κατανεμημένα στους κόμβους της βάσης της δεξαμενής ή των πλευρών. Δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί η τοπική κατανομή πίεσης των δεξαμενών στην ολική ανάλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

5) Φορτίο άνωσης (Buoyancy loads).

Φορτίο υδροστατικής πίεσης πρέπει να εφαρμοστεί στα ύφαλα, τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας.

2.3.7 Κριτήρια ανάλυσης

Σύμφωνα με τον κανονισμό DNVGL-RU-SHIP-Pt5Ch4 Sec. 2 5.2⁽¹⁶⁾ για επιβατικά πλοία, οι τάσεις στα ελάσματα όλων των δομικών στοιχείων της γάστρας δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες τιμές που δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα VII.

Πίνακας VII: Επιτρεπόμενες τάσεις για την ανάλυση ολικού μοντέλου

Επιτρεπόμενη αξονική και κύρια τάση	Επιτρεπόμενη διατμητική τάση	Επιτρεπόμενη von Mises τάση
175/k	110/k	220/k

Για τους συντελεστές k που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.2.1.

Το ολικό μοντέλο αποτελείται από ένα στοιχείο μεταξύ κύριων ενισχυτικών καταστρωμάτων και φρακτών. Σύμφωνα με τον κανονισμό DNVGL-CG-0127 ⁽³⁾, η αξιολόγηση της αντοχής έναντι διαρροής για τα άνωθεν επιτρεπόμενα όρια πραγματοποιείται με τα κριτήρια αποδοχής, όπως δίνονται στο RU SHIP Pt.3 Ch.7 Sec.3 ⁽¹⁷⁾. Τα κριτήρια αποδοχής αναφέρονται σε ονομαστικές αξονικές τάσεις, ονομαστικές διατμητικές τάσεις και τάσεις von Mises όπως προκύπτουν από την ανάλυση ολικού μοντέλου. Σε περιοχές με τοπικά σημεία συγκέντρωσης υψηλών τάσεων (high peaked stress) τα κριτήρια αποδοχής ονομαστικών τάσεων δεν είναι εφαρμόσιμα.

Η τάση von Mises σ_{vm} σε N/mm² υπολογίζεται με βάση τις κύριες και διατμητικές τάσεις του στοιχείου κελύφους. Οι τάσεις αξιολογούνται στο κεντροειδές του στοιχείου στο μέσο επίπεδο, όπως φαίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Όπου

$\sigma_x \sigma_y$ = κύριες τάσεις στοιχείου, σε N/mm²

τ_{xy} = διατμητικές τάσεις στοιχείου, σε N/mm²

Όταν το μοντέλο αυτό έχει υψηλότερη ανάλυση τοπικά ή ολικά, όπως στην ανάλυση τμήματος πλοίου, εφαρμόζονται τα κριτήρια ανάλυσης σύμφωνα με τους κανονισμούς RU SHIP Pt.3 Ch.7 Sec.3 ⁽¹⁷⁾ στα ακόλουθα δομικά στοιχεία:

- σε όλα τα διαμήκη δομικά στοιχεία
- σε όλα τα κύρια δομικά στοιχεία στήριξης
- σε στεγανές φρακτές

Σε αυτήν την περίπτωση η διακριτοποίηση του στοιχείου του πλέγματος πρέπει να ακολουθεί το σύστημα διάταξης των ενισχυτικών όσο αυτό είναι πρακτικό και να αντιπροσωπεύει τα πραγματικά ελάσματα μεταξύ των ενισχυτικών, δηλαδή το μέγεθος στοιχείου να είναι $s \times s$, όπου s η απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών.

Τότε, για στοιχεία δοκού και ράβδου, η αξονική τάση, σ_{axial} , σε N/mm² υπολογίζεται με βάση μόνο την αξονική τάση. Η αξονική τάση πρέπει να αξιολογείται στο μέσο του μήκους του στοιχείου.

Τα δομικά στοιχεία πρέπει να πληρούν τα ακόλουθα κριτήρια:

$$\lambda_y \leq \lambda_{yperm}$$

όπου:

λ_y = συντελεστής χρήσης

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y} \quad \text{για στοιχεία κελύφους}$$

$$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y} \quad \text{για στοιχεία δοκού ή ράβδου}$$

σ_{vm} = von Mises τάση, σε N/mm²

σ_{axial} = αξονική τάση σε στοιχεία δοκού ή ράβδου, σε N/mm²

λ_{yperm} = επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης για αραιό πλέγμα, όπως ορίζεται στον παρακάτω πίνακα

α) Τα κριτήρια ελέγχου διαρροής πρέπει να βασίζονται στην αξονική τάση για τα ακόλουθα στοιχεία

- Τις φλάντζες των βασικών στοιχείων στήριξης
- Τις τομές μεταξύ της φλάντζας και του πέλματος των αυλακωτών ελασμάτων (corrugations).

β) Όταν η τάση von Mises των στοιχείων στο τμηματικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ανάλυση του κύτους φορτίου (αμπάρι) στην περιοχή ενδιαφέροντος με πυκνό πλέγμα υπερβαίνει τα κριτήρια διαρροής, τότε η μέση τάση von Mises, υπολογίζεται σε μια περιοχή ισοδύναμη με το μέγεθος στοιχείου του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στο αμπάρι φορτίου πρέπει να ικανοποιεί τα άνωθεν κριτήρια έναντι διαρροής.

γ) Στις εγκοπές ο συντελεστής χρήσης διαρροής λαμβάνεται με διόρθωση της διατμητικής τάσης.

Έτσι, ο συντελεστής χρήσης που προκύπτει από τις τάσεις στοιχείου σε κάθε δομικό μέλος δεν πρέπει να υπερβαίνει τις επιτρεπόμενες τιμές που δίνονται στον Πίνακα VIII.

Πίνακας VIII: Επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης αραιού πλέγματος λ_{yperm}

Δομικό στοιχείο	Κριτήριο αποδοχής	Φορτίο	λ_{yperm}
Ελάσματα όλων των διαμήκων δομικών στοιχείων, κύρια ενισχυτικά και φρακτές. Ράβδοι ενίσχυσης αυλακωτών φρακτών, φλάντζες των κύριων ενισχύσεων που έχουν αναπαρασταθεί με χρήση στοιχείων κελύφους ή ράβδου	AC-I	S	0.80
	AC-II	S+D	1.0
	AC-III ⁽¹⁾	A,T	1.00

Αυλακώσεις αυλακωτών φρακτών υπό πλευρική πίεση από φορτία λόγω ύπαρξης ρευστού, μόνο για στοιχεία κελύφους. Για γωνία αυλάκωσης μεταξύ 45° και 55° εφαρμόζεται η μείωση της λ_{fperm} όπως δίνεται στο Ch.3 Sec.6 5.1.1 ⁽⁹⁾	AC-I	S	0.72
	AC-II	S+D	0.90
	AC-III ⁽¹⁾	A,T	0.90
1) Για στοιχεία της φρακτής σύγκρουσης συνίσταται το AC-I.			

Όπου τα δομικά στοιχεία έχουν υψηλή ανάλυση με μέγεθος στοιχείου πλέγματος όχι μεγαλύτερο από 50 x 50 mm, εφαρμόζονται τα κριτήρια για τοπική ανάλυση δομής για την αξιολόγηση λεπτομερειών της κατασκευής σύμφωνα με τους κανονισμούς RU SHIP Pt.3 Ch.7 Sec.4,⁽¹⁷⁾ όπου ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης πυκνού πλέγματος λ_{fperm} δίνεται από τον Πίνακα IX.

Πίνακας IX: Επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης πυκνού πλέγματος λ_{fperm}

Δομικό στοιχείο	Κριτήριο αποδοχής	Φορτίο	λ_{fperm}
Στοιχεία που δεν εφάπτονται σε συγκόλληση	AC-I	S	1.36 f_f
	AC-II	S+D	1.70 f_f
	AC-III ⁽¹⁾	A,T	2.04
Στοιχεία που εφάπτονται σε συγκόλληση	AC-I	S	1.20 f_f
	AC-II	S+D	1.50 f_f
	AC-III ⁽¹⁾	A,T	1.80
<p>Όπου:</p> <p>f_f = συντελεστής κόπωσης που λαμβάνεται ως:</p> <p>1.0 γενικά</p> <p>1.2 για λεπτομέρειες κατασκευής όπου η αντοχή έναντι κόπωσης επιβεβαιώνεται από την κρίσιμη περιοχή που αναπτύσσονται υψηλές τοπικές τάσεις (hot spot stresses), κατά το Ch.9 Sec.3, 4.</p> <p>1) Για στοιχεία της φρακτής σύγκρουσης συνίσταται το AC-I.</p>			

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ – CASE STUDY

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Το υπό εξέταση πλοίο είναι το Επιβατηγό Δρομολογιακό Ε/Γ – ΔΡ “ALUMINION 16,500 Μ” με βασικά χαρακτηριστικά:

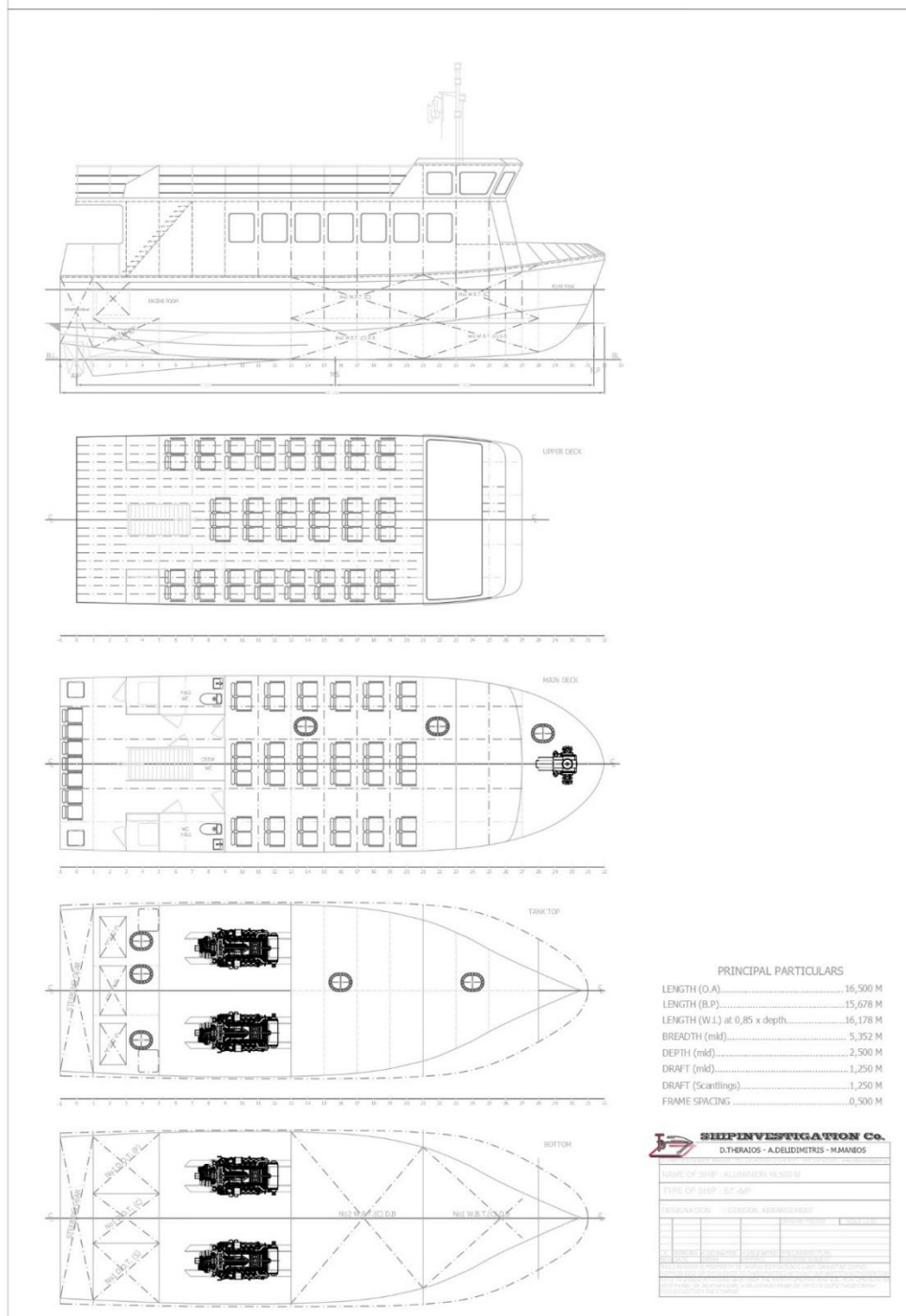
Πίνακας Χ: Βασικά Χαρακτηριστικά

Ολικό μήκος πλοίου	16.500 m
Μήκος μεταξύ καθέτων	15.678 m
Μήκος Ισάλου @ 0.85 x Βύθισμα	16.178 m
Πλάτος	5.352 m
Κοίλο	2.500 m
Βύθισμα	1.250 m
Απόσταση νομέων	0.500 m
Μέγιστη ταχύτητα	18 kn
Ταχύτητα πλεύσης	16 kn

Η μελέτη και ο προκαταρκτικός σχεδιασμός του πραγματοποιήθηκε από το ναυπηγικό γραφείο Shipinvestigation με την γενική διάταξη να παρουσιάζεται κάτωθι. Διακρίνονται οι χώροι των διπυθμένων, των δεξαμενών έρματος και καυσίμου, του μηχανοστασίου, του πηδαλίου καθώς και οι χώροι ενδιαίτησης των επιβατών, σε κλειστό χώρο στο κυρίως κατάστρωμα και ανοιχτού χώρου στο άνω κατάστρωμα.

GENERAL ARRANGEMENT

Ε/Γ-Δ/Ρ " ALUMINION 16,500 M "



Εικόνα 16: Γενική διάταξη Ε/Γ – ΔΡ “ALUMINION 16,500 Μ”

Το ναυπήγημα δύναται να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της ναυτιλίας μικρών αποστάσεων για τη μετάβαση επιβατών σε κοντινούς προορισμούς, διαθέτοντας και προστατευμένο εσωτερικό χώρο με την κλειστή δομή υπερκατασκευής. Δυνατότητα μεταφοράς 99 καθήμενων επιβατών στα δύο καταστρώματα σύμφωνα με το σχέδιο γενικής διάταξης.





Εικόνα 17: Πλοίο ίδιου τύπου, φωτογραφίες από την Shipinvestigation

3.2 Επεξεργασία

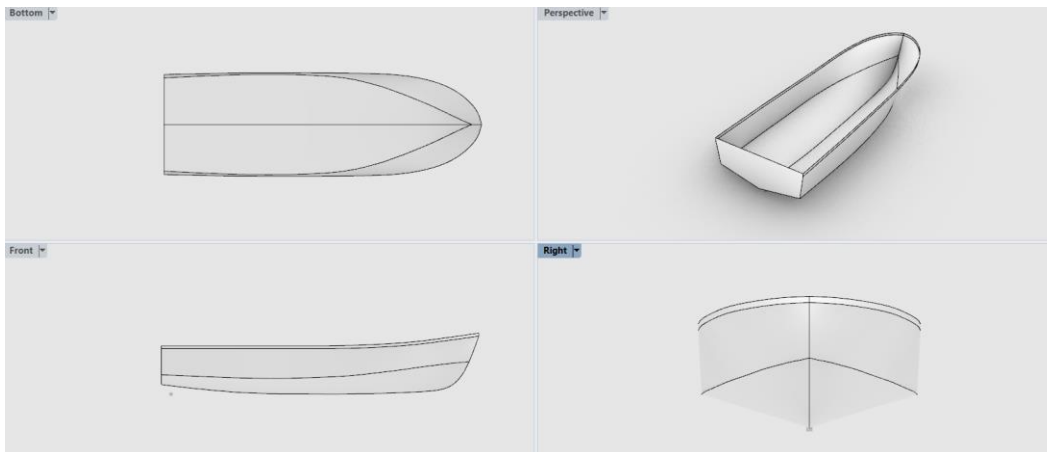
Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η πρώτη μέθοδος υπολογισμού (κεφ. 2.3) σύμφωνα με τους κανόνες των νηογνομόνων, με την αναπαράσταση του συνόλου του σκάφους από την γάστρα έως το κυρίως κατάστρωμα για την ολική ανάλυση αντοχής του.

Η επεξεργασία λοιπόν αφορά την μοντελοποίηση του σκάφους με σχεδιασμό αρχικά στο CAD πρόγραμμα Rhinoceros και την περαιτέρω σχεδίαση και ανάλυση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ansys.

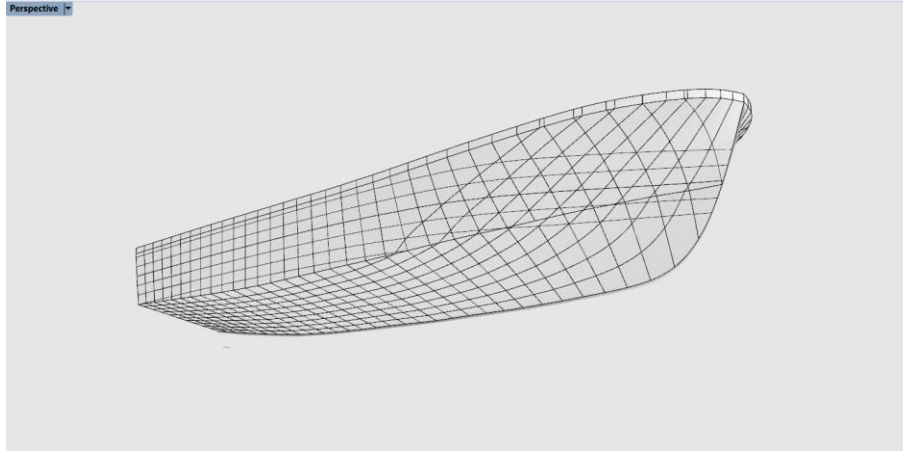
3.2.1 Αρχικός σχεδιασμός στο Rhinoceros

3.2.1.1 Σχεδιασμός γάστρας

Αρχικά ακολουθώντας το 2d σχέδιο ναυπηγικών γραμμών (linesplan), αποδόθηκε η τρισδιάστατη χωρική αναπαράσταση των γραμμών εκ των οποίων δημιουργήθηκαν οι επιφάνειες της γάστρας. Η αρχική μοντελοποίηση του πλοίου πραγματοποιήθηκε με χρήση του σχεδιαστικού λογισμικού Rhinoceros, στο οποίο οι παραγόμενες επιφάνειες εξομαλύνθηκαν ως προς την καμπυλότητα και πολυπλοκότητα, ελέγχοντας τις αποκλίσεις των τομών μοντέλου από το σχέδιο ναυπηγικών γραμμών. Παρουσιάζεται η γάστρα ως σύνολο επιφανειών και στη συνέχεια με τομές παράλληλες στα κύρια επίπεδα, με βήμα 0.5 m κατά το εγκάρσιο και 0.25 m κατά το διάμηκες και καθ' ύψος, που θα χρησιμοποιηθούν ως οδηγοί στα επόμενα στάδια σχεδιασμού και ανάλυσης.



Εικόνα 18 Σχεδιασμός επιφάνειας γάστρας στο Rhinoceros



Εικόνα 19: Τομές γάστρας στις 3 διευθύνσεις

3.2.1.2 Σχεδιασμός διαμερισμάτων και δομικών στοιχείων

Μοντελοποιήθηκαν ακόμη ως επιφάνειες:

- τα καταστρώματα, δηλαδή το κυρίως κατάστρωμα και το κατάστρωμα οροφής δεξαμενών,
- οι φρακτές - μπουλμέδες,
- οι κύριες διαμήκειες ενισχύσεις - διαδοκίδες,
- οι νομείς και οι κύριες εγκάρσιες ενισχύσεις – ζυγά καταστρώματος / έδρες πυθμένα,
- η κεντρική σταθμίδα και η τρόπιδα,
- οι βάσεις των μηχανών και
- τα βασικά μπρακέτα ελασμάτων στήριξης - αγκώνες.

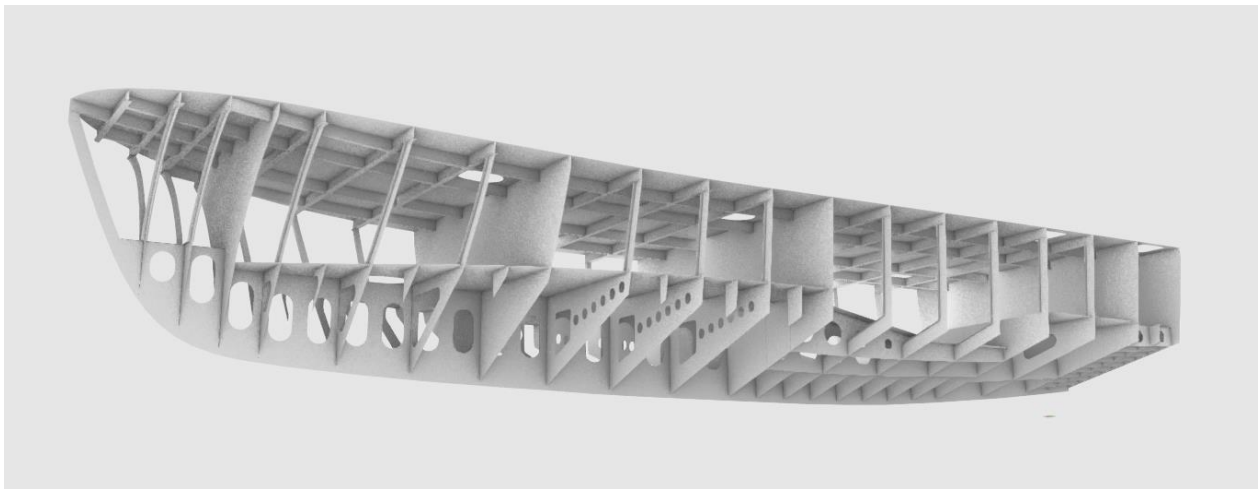
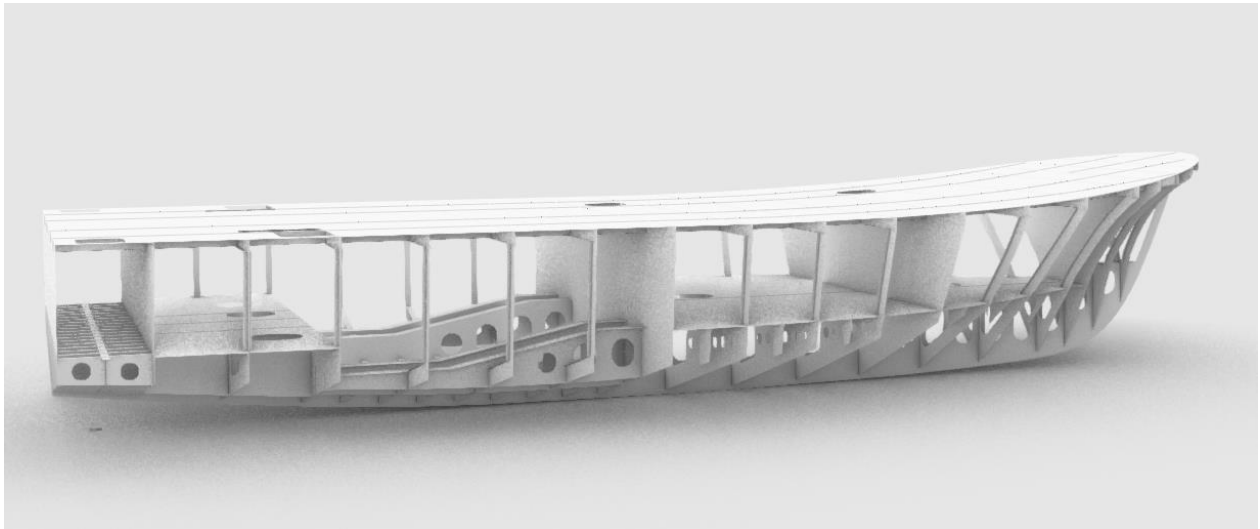
Δημιουργήθηκαν έτσι τα βασικά διαμερίσματα του πλοίου, προστέθηκαν οι φλάντζες των ενισχυτικών και τέλος διανοίχτησαν οι οπές για τις ανθρωποθυρίδες και τα μη στεγανά ελάσματα.

Το σύνολο των επιφανειών αυτών παρουσιάζεται κάτωθι, όπου βρίσκονται:

- Χώρος πηδαλίου μεταξύ Νομέων -1, 1
- Δεξαμενές καυσίμου στα διπύθμενα μεταξύ Νομέων 1, 5
- Χώρος μηχανοστασίου μεταξύ Νομέων 1, 13
- Νο.2 Δεξαμενές έρματος μεταξύ Νομέων 13, 21
- Νο.1 Δεξαμενές έρματος μεταξύ Νομέων 21, 28
- Πλωριά δεξαμενή ζυγοστάθμισης μεταξύ Νομέων 28, 32

Ακόμη δημιουργήθηκαν ως γραμμές - ίχνη επί των επιφανειών:

- οι διαμήκεις διαδοκίδες καταστρωμάτων, οι σταθμίδες πυθμένα, οι πλευρικοί λούροι,
- οι κατακόρυφες ενισχύσεις



Εικόνα 20: Σχεδιασμός διαμερισμάτων και δομικών στοιχείων πλοίου

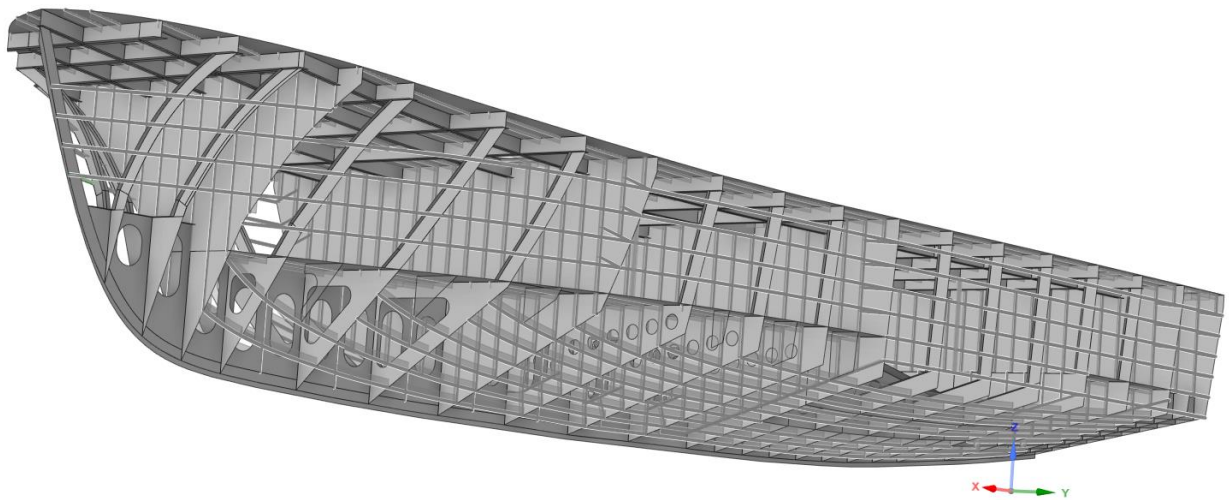
Αμελήθηκαν ελάσσονα ενισχυτικά μπρακέτα και διαμορφώσεις εγκοπών (scallops). Ακόμη, δεν μοντελοποιήθηκαν οι βοηθητικές δεξαμενές ημερήσιας κατανάλωσης καυσίμου, φρέσκου νερού και λυμάτων μεταξύ των Νομέων 1, 3 άνω του καταστρώματος οροφής διπυθμένων καθώς δεν αποτελούν μέρος της φέρουσας κατασκευής.

3.2.2 Συνέχεια σχεδιασμού στο Ansys Spaceclaim

3.2.2.1 Δημιουργία ελασμάτων και ενισχυτικών

Το σχεδιαστικό πακέτο του Ansys ονομάζεται Spaceclaim και χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των ελασμάτων αποδίδοντας το αντίστοιχο πάχος στις επιφάνειες που εισήχθησαν από το Rhinoceros. Τα πάχη που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια είναι 4, 5, 6 mm για τα ελάσματα εν γένει, 8 mm για τις φλάντζες ενισχυτικών, για τις βάσεις μηχανών 16 και 25 mm για τις φλάντζες έδρασης και για την τρόπιδα 20 mm.

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι γραμμές ως τα ίχνη των ενισχυτικών επί των ελασμάτων και τους ανατέθηκε η αντίστοιχη διατομή από τη βιβλιοθήκη του ευρωκώδικα που διαθέτει το λογισμικό. Επιλέχθηκαν λάμες (flat bar) με διατομές 40x4 mm, 60x6 mm και 80x8 mm. Ακόμη δημιουργήθηκαν 6 κολώνες από σωλήνα 2" sch 80, δηλαδή με εξωτερική διάμετρο 60.3 mm και πάχος 5.54 mm.



Εικόνα 21: Σχεδιασμός στο Ansys Spaceclaim

3.2.2.2 Ορισμός υλικού

Ως υλικό επιλέχθηκε το Aluminum 6082, με χημική σύσταση:

Πίνακας XI: Χημική Σύνθεση (%) Αλουμινίου 6082

Αλουμίνιο Al	Πυρίτιο Si	Μαγνήσιο Mg	Μαγγάνιο Mn	Σίδηρος Fe	Χρόμιο Cr	Ψευδάργυρος Zn	Χαλκός Cu	Τιτάνιο Ti	Λοιπές ουσίες
95.2 ~ 98.3	0.7~1.3	0.6~1.2	0.4~1.0	≤ 0.5	≤ 0.25	≤ 0.2	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.15

Όπως αναφέρθηκε στο 1.1.1 τα κράματα διαμόρφωσης της σειράς αυτής, παρέχουν ευκολία στην διαμόρφωση λόγω ολκιμότητας, την συγκόλληση, την μηχανουργική κατεργασία και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Λόγω της ικανότητας για διέλαση χρησιμοποιούνται τυποποιημένα ελάσματα και προφίλ ως ενισχυτικά. Το αλουμίνιο της σειράς αυτής μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία σκλήρυνσης βελτιώνοντας την μηχανική του αντοχή. Επιλέγεται θερμική κατεργασία T6 που περιλαμβάνει ομογενοποίηση, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.

Οι ιδιότητες του σύμφωνα με την βιβλιοθήκη υλικών του Ansys:

Πίνακας XII: Ιδιότητες Αλουμινίου 6082

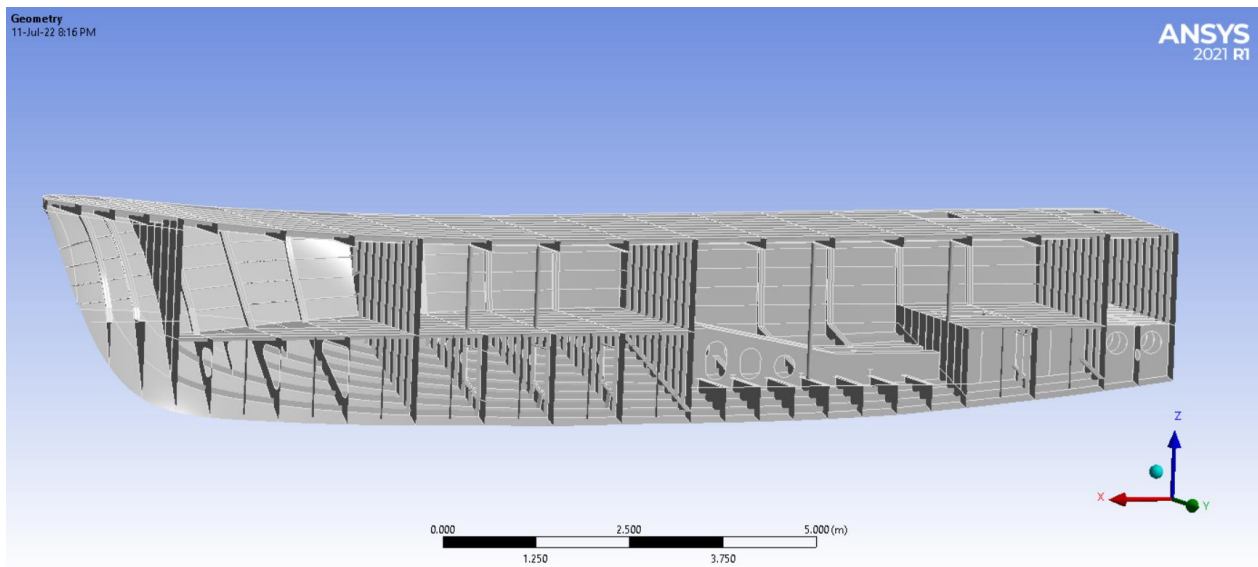
Πυκνότητα	2700 kg/m ³
Όριο διαρροής	259.2 MPa
Όριο θραύσης	318.6 MPa
Μέτρο ελαστικότητας	71.97 GPa
Μέτρο διάτμησης	27.056 GPa
Λόγος Poisson	0.33

3.2.3 Μετάβαση στο Ansys Workbench

Δημιουργήθηκε αρχείο στο πρόγραμμα προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων Ansys Workbench στο οποίο εισήχθη η γεωμετρία του μοντέλου από το Spaceclaim και στην καρτέλα δεδομένων (engineering data) επιλέχθηκε το υλικό που ορίστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα.

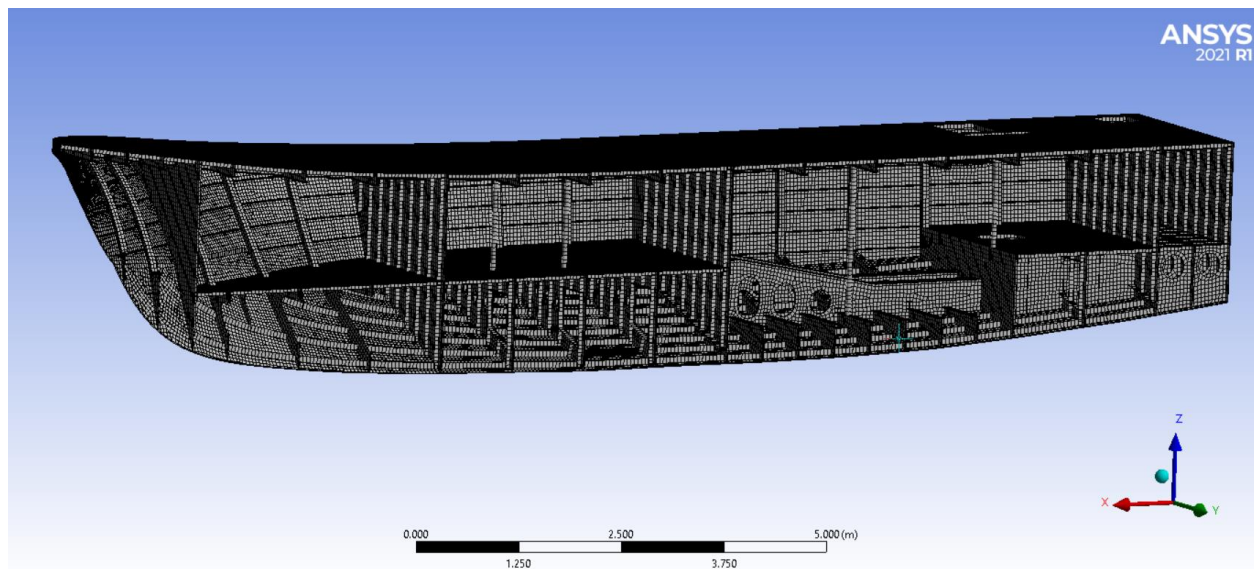
3.2.3.1 Δημιουργία mesh στο Ansys Mechanical

Στο μηχανολογικό πακέτο του Ansys παρουσιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου.



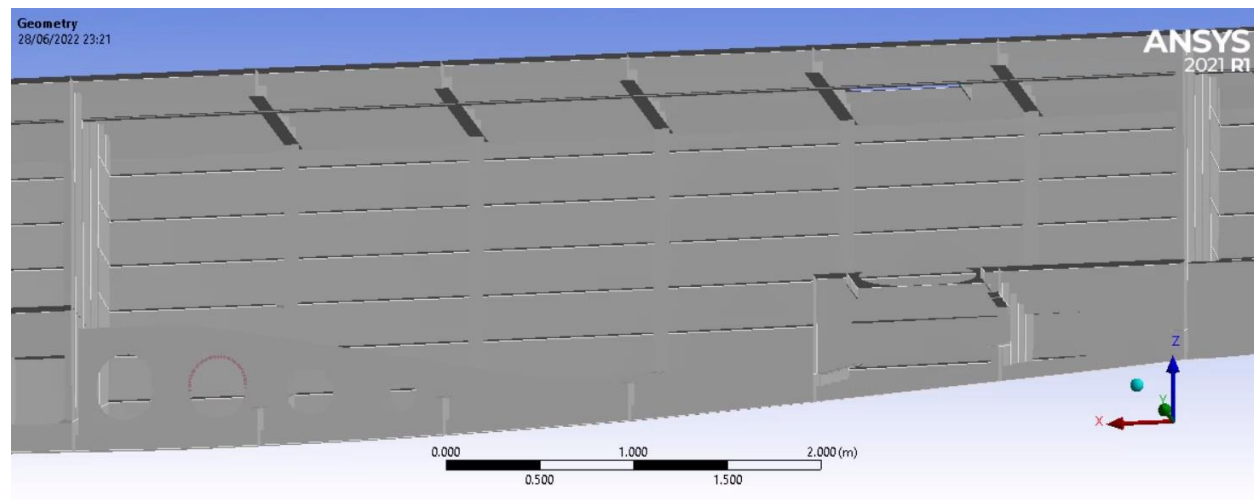
Εικόνα 22: Γεωμετρία μοντέλου στο Ansys Mechanical

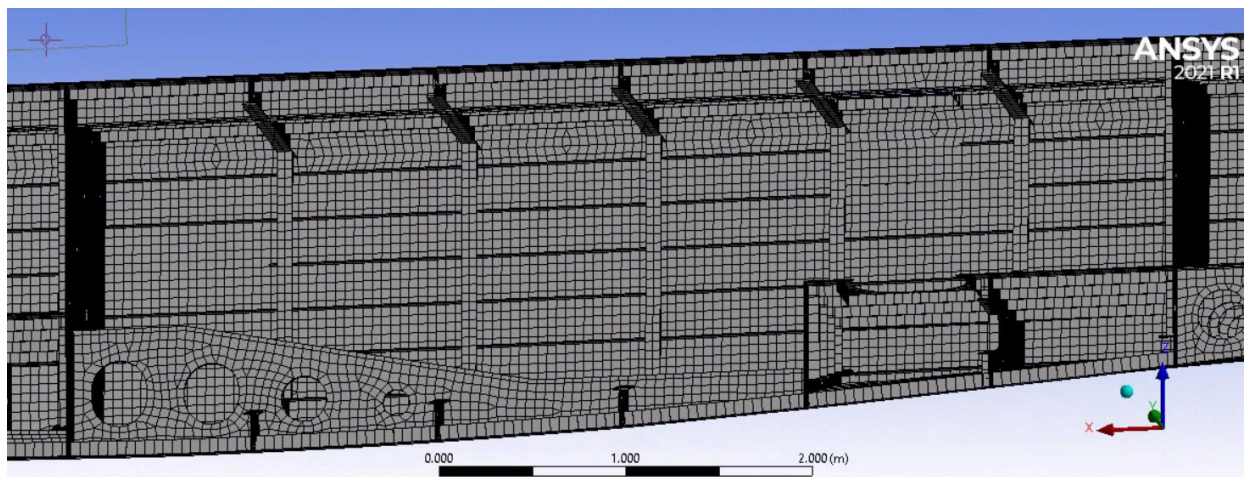
Ορίστηκε η διακριτοποίηση της γεωμετρίας με μέγεθος στοιχείου 5 cm, ως φαίνεται κάτωθι.



Εικόνα 23: Δημιουργία mesh στο Ansys Mechanical

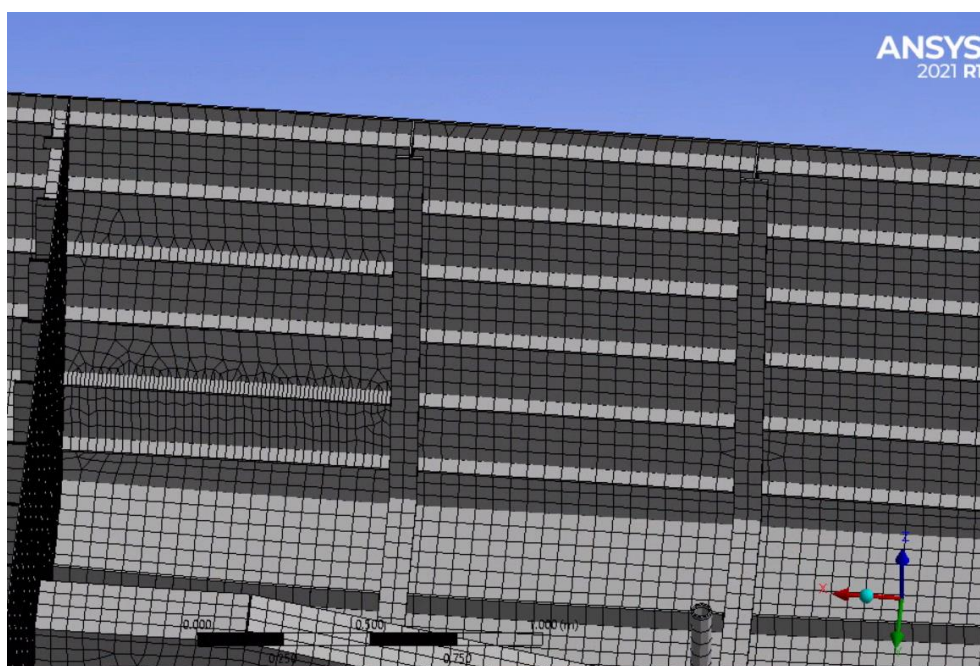
Παρατηρήθηκαν περιοχές του mesh οι οποίες εμφάνιζαν αποκλίσεις από την δοθείσα γεωμετρία μοντέλου, με στρεβλωμένα ή παραλειπόμενα ενισχυτικά.





Εικόνα 24: Παράλειψη ενισχυτικών κατά την δημιουργία του mesh

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε τοπική πύκνωση του mesh για υψηλότερη ανάλυση στις ζώνες αυτές, με επαναληπτική διαδικασία με μειούμενο μέγεθος στοιχείου στην ακμή εφαρμογής της ενίσχυσης, έως ότου αναπαρασταθεί επαρκώς το αρχικά παραλειπόμενο τμήμα.



Εικόνα 25: Τοπική πύκνωση mesh

Προκύπτουν έτσι 199842 κόμβοι και 213466 στοιχεία.

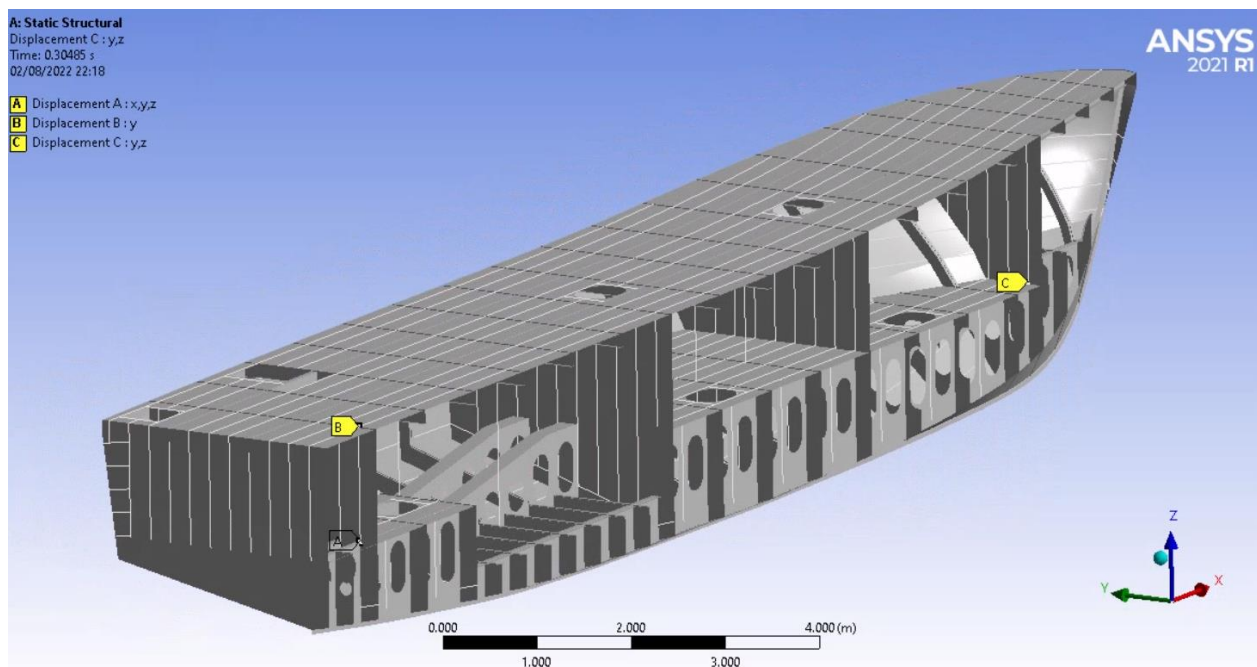
3.2.3.2 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών

Κατά τον κανονισμό DNV-CG-0127 εφαρμόστηκαν οι συνοριακές συνθήκες ως εξής:

3.2.3.2.1 Σύμφωνα με την Περίπτωση 1

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.3.5.1 Περίπτωση 1 και την Εικόνα 13, εφαρμόστηκαν περιορισμοί μετατόπισης σε κόμβους ως κάτωθι:

- σημείο A: ακλόνητο στις διευθύνσεις x, y, z.
- σημείο B: ακλόνητο στην εγκάρσια διεύθυνση y.
- σημείο C: ακλόνητο στην εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση y, z.



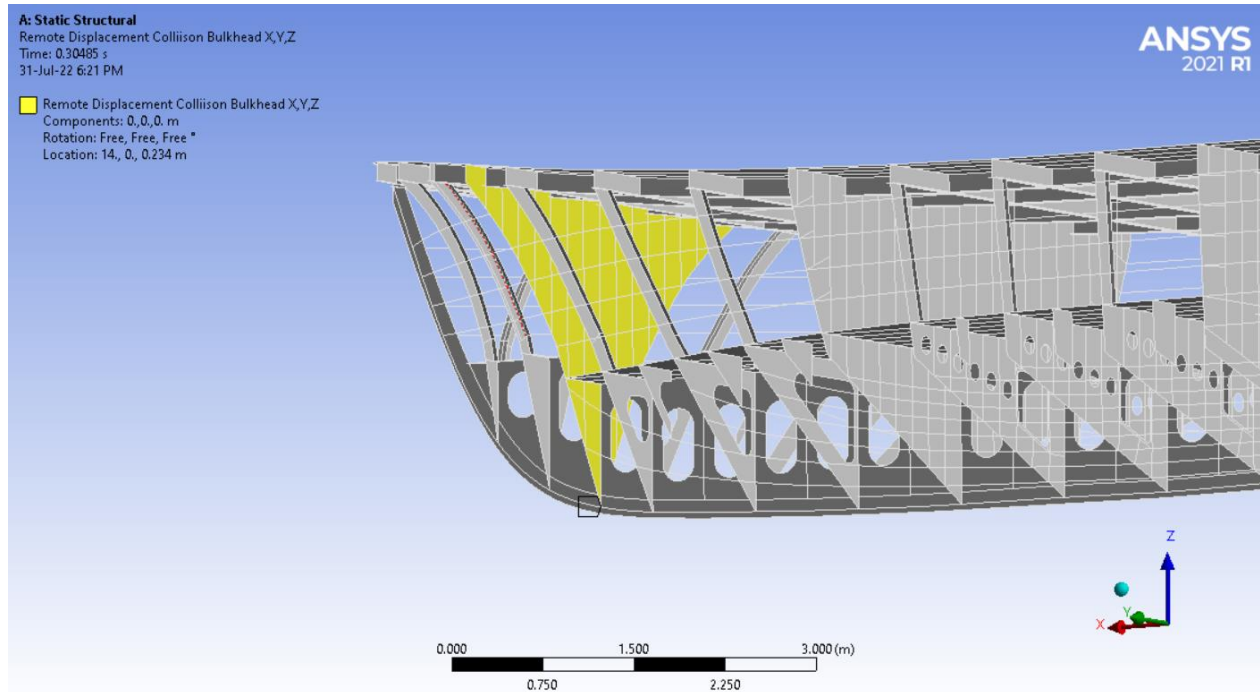
Εικόνα 26: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με την Περίπτωση 1

Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η Περίπτωση 2.

3.2.3.2.2 Σύμφωνα με την Περίπτωση 2

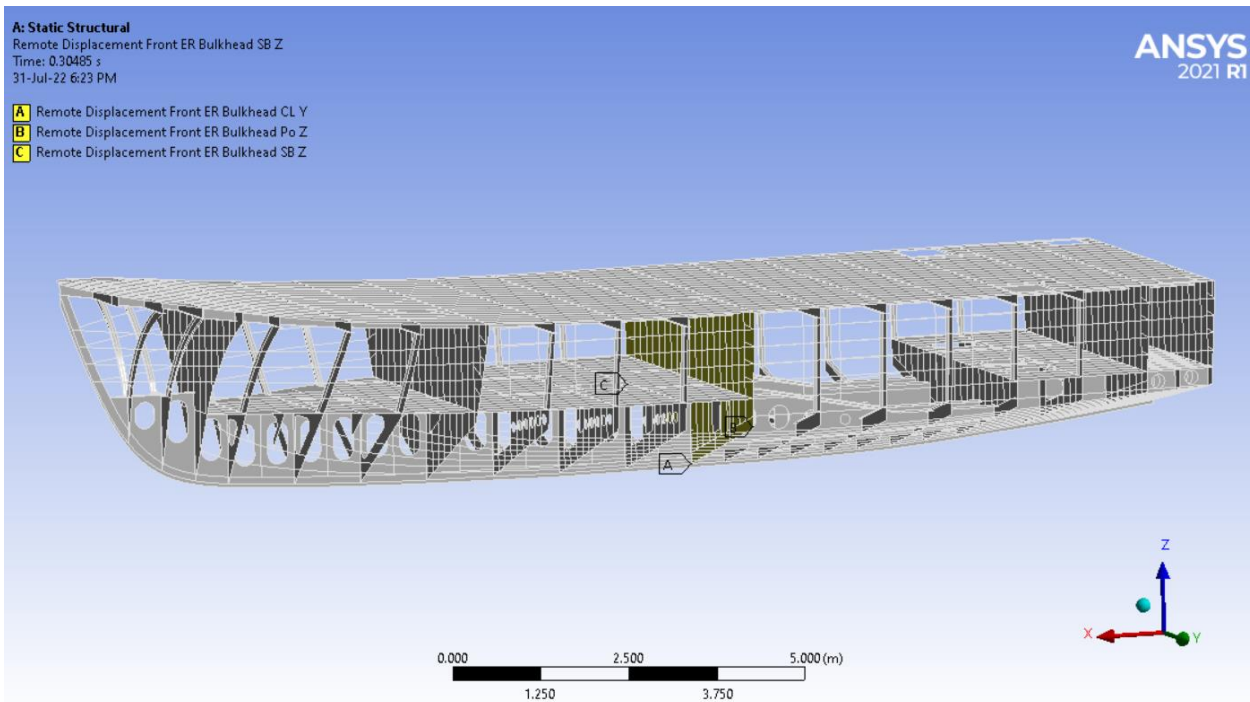
Σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.3.5.2 Περίπτωση 2 και την Εικόνα 14, εφαρμόστηκαν απομακρυσμένοι περιορισμοί μετατόπισης με εφαρμογή στα επιφανειακά στοιχεία φρακτών, ως κάτωθι:

- στην προωαία εγκάρσια φρακτή σύγκρουσης, το σημείο της γραμμής αναφοράς: ακλόνητο στις διευθύνσεις x , y , z .



Εικόνα 27: Εφαρμογή συντοριακών συνθηκών σύμφωνα με την Περίπτωση 2 για την προωαία φρακτή σύγκρουσης

- στην προωαία φρακτή του μηχανοστασίου, το σημείο της γραμμής αναφοράς: ακλόνητο στην εγκάρσια διεύθυνση y και τα συμμετρικά σημεία δεξιά και αριστερά στην κατακόρυφη διεύθυνση z .

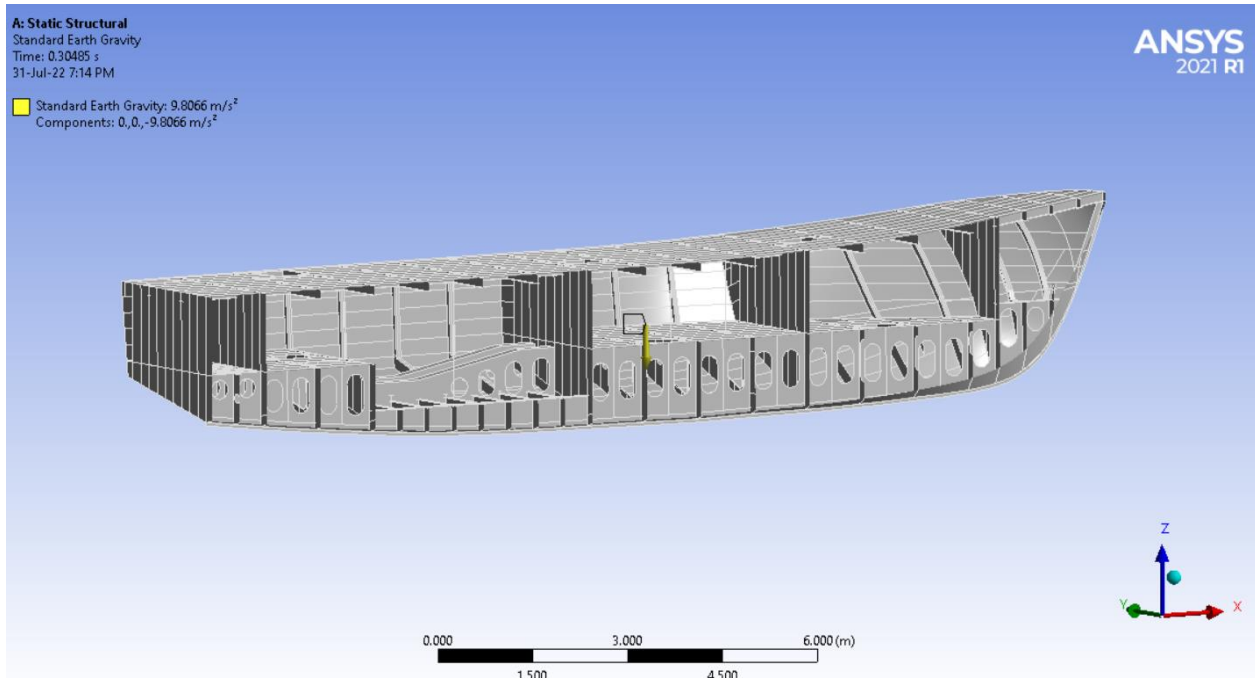


Εικόνα 28: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με την Περίπτωση 2 για την προραία φρακτή μηχανοστασίου

3.2.4 Εφαρμογή στατικών φορτίων

Κατά τον κανονισμό DNV-CG-0138, και το κεφάλαιο 2.3.6 εφαρμόστηκαν τα στατικά φορτία ή φορτία στάσιμου νερού (Stillwater loads) ως εξής:

- 1) Βάρος άφορτου πλοίου (Light ship weight)
 - A) με την επίδραση της επιτάχυνσης της βαρύτητας στο σύνολο των στοιχείων του μοντέλου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με φορά προς τα κάτω και μέγεθος 9.8066 m/s^2 .



Εικόνα 29: Επίδραση βάρους με εφαρμογή της επιτάχυνσης της βαρύτητας

Β) Για το βάρος της υπερκατασκευής, συμπεριλαμβανομένου και του βάρους των επιβατών στο άνω κατάστρωμα:

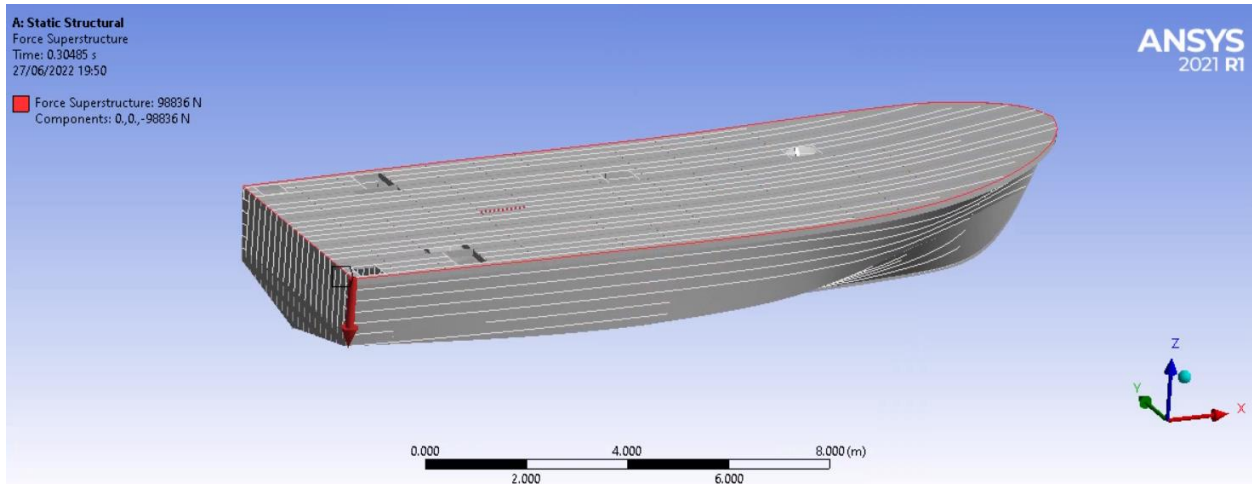
- Υπερκατασκευή: εκτιμώμενο βάρος 2,75 ton.
- Βάρος επιβατών άνω καταστρώματος: 50 επιβάτες x 85 kg έκαστος = 4,25 ton
- Βάρος αποσκευών και λοιπών φορτίων: 750 kg

Συνολικό βάρος: 7,75 ton.

Με την εφαρμογή της επιτάχυνσης της βαρύτητας 9.81 m/s^2 και με συντελεστή ασφαλείας 1.3 το φορτίο που εφαρμόζεται είναι:

$$7,75 \times 1000 \times 9,81 \times 1,3 = 98836 \text{ N.}$$

Η εφαρμογή του άνωθεν φορτίου πραγματοποιείται στην ακμή του κυρίως καταστρώματος μέσω των πλευρικών ελασμάτων, όπως φαίνεται κάτωθι



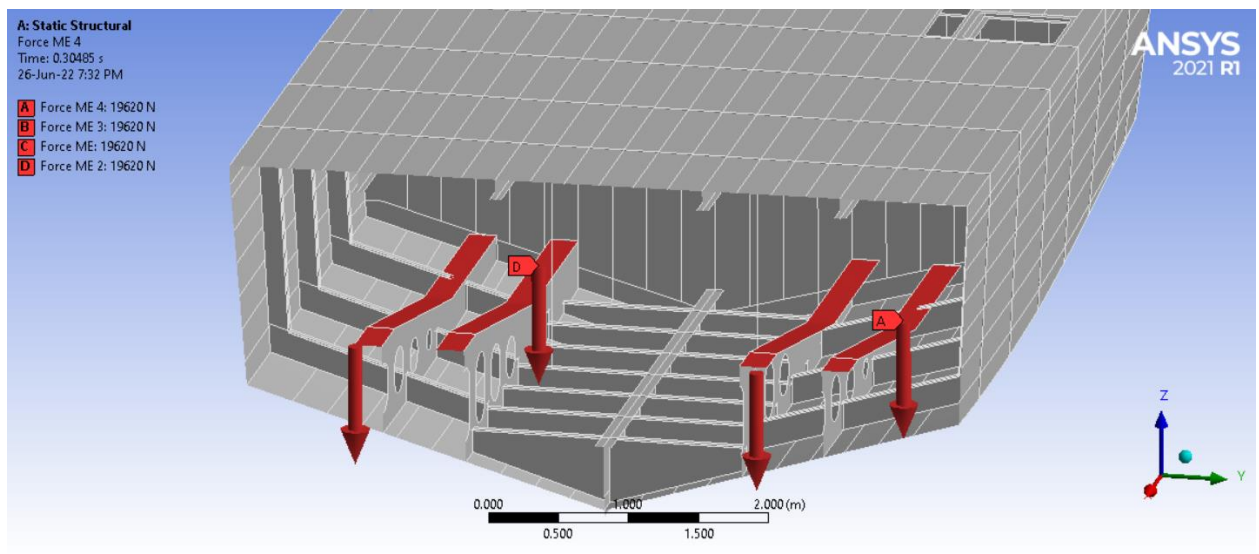
Εικόνα 30: Εφαρμογή φορτίου υπερκατασκευής και επιβατών άνω καταστρώματος

2) Εξοπλισμός (Machinery and outfitting)

Για τις 2 κύριες μηχανές με τους μειωτήρες τους εφαρμόζεται φορτίο 2 ton, δηλαδή

$$2 \text{ ton} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 19620 \text{ N}$$

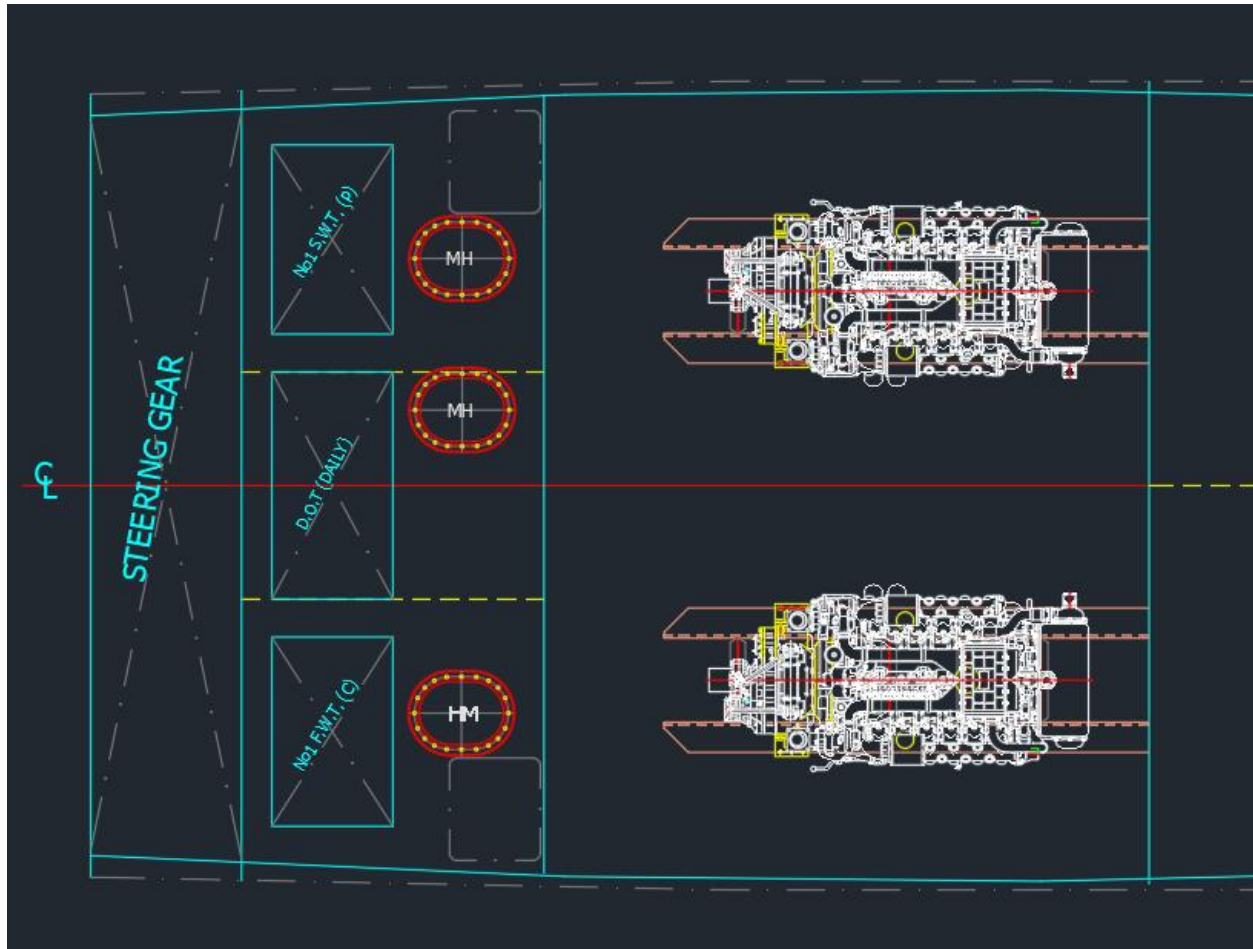
σε κάθε μία εκ των 2 φλαντζών της βάσης της κάθε μηχανής, ως φαίνεται κάτωθι



Εικόνα 31: Εφαρμογή φορτίου μηχανών και φέροντος δικτύου

3) Νεκρό βάρος και φορτίο επιβατών (Deadweight and passenger loads).

A) Το βάρος των 3 δεξαμενών ημερήσιας κατανάλωσης

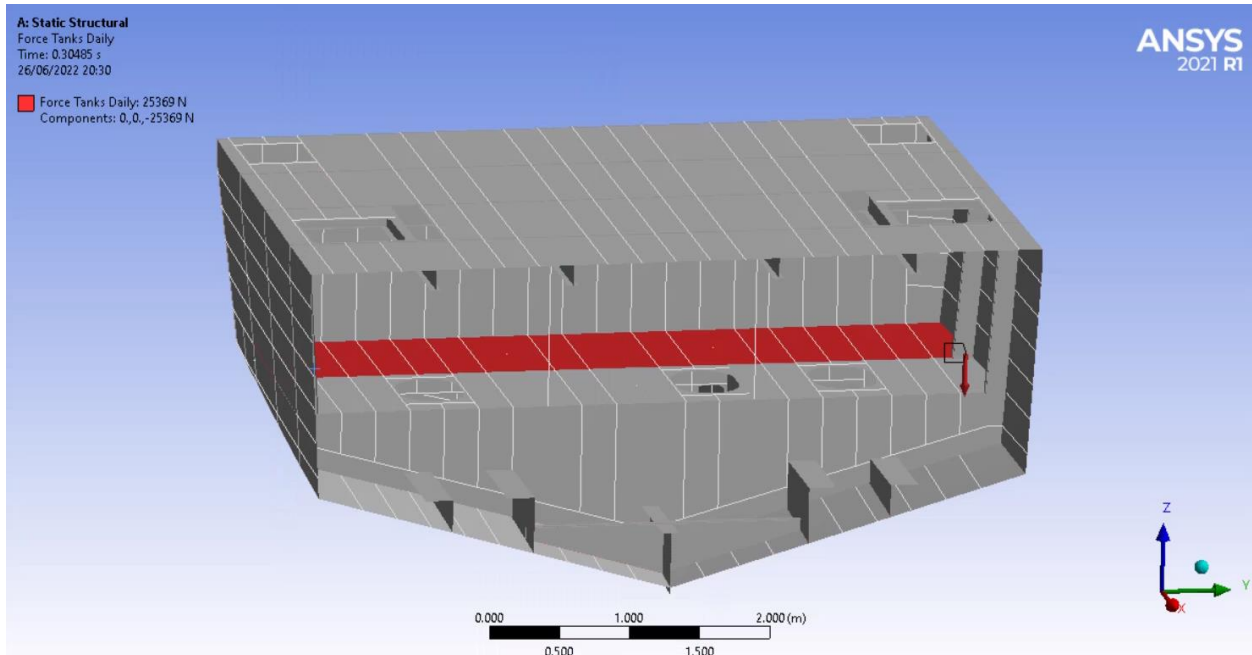


Εικόνα 32: Διάταξη δεξαμενών ημερήσιας κατανάλωσης στο κατάστρωμα άνω των δεξαμενών διπυθμένου

- Δεξαμενή αποβλήτων No1. S.W.T (P) : 820 kg (πυκνότητα 1025 kg /m³)
- Δεξαμενή καυσίμου D.O.T. (DAILY) : 826 kg (πυκνότητα 860 kg/m³)
- Δεξαμενή φρέσκου νερού No1. F.W.T (C) : 820 kg (πυκνότητα 1000 kg/m³)
- Βάρος μεταλλικής κατασκευής δεξαμενών : 140 kg

Συνολικό φορτίο $2586 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 25369 \text{ N}$

εφαρμόζεται στο κατάστρωμα άνω μέρους δεξαμενών όπως φαίνεται κάτωθι



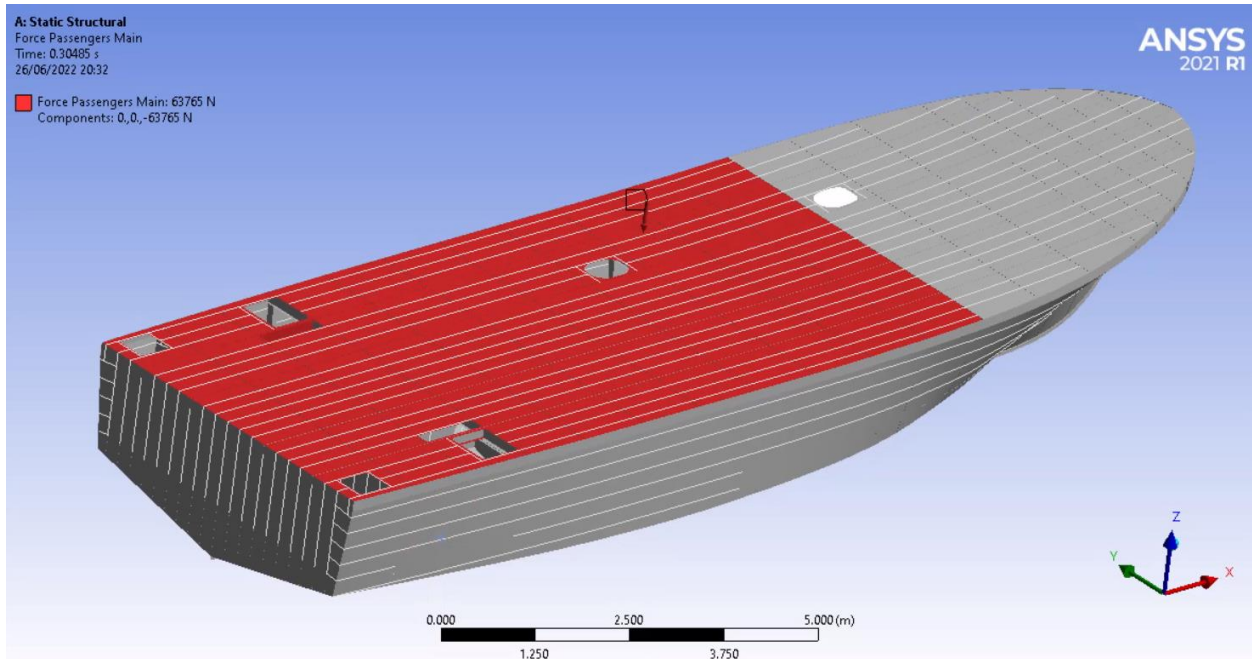
Εικόνα 33: Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου λόγω βάρους δεξαμενών ημερήσιας κατανάλωσης

B) Το φορτίο των επιβατών στο κυρίως κατάστρωμα

- 50 επιβάτες x 85 kg έκαστος = 4,25 ton
- 750 kg αποσκευές και λοιπά φορτία

Σύνολο 5 ton x 9.81 m/s² x συντελεστή ασφαλείας 1.3 = 63765 N.

Εφαρμόζεται ως κάτωθι



Εικόνα 34: Εφαρμογή κατανεμημένου φορτίου λόγω βάρους επιβατών στο κυρίως κατάστρωμα

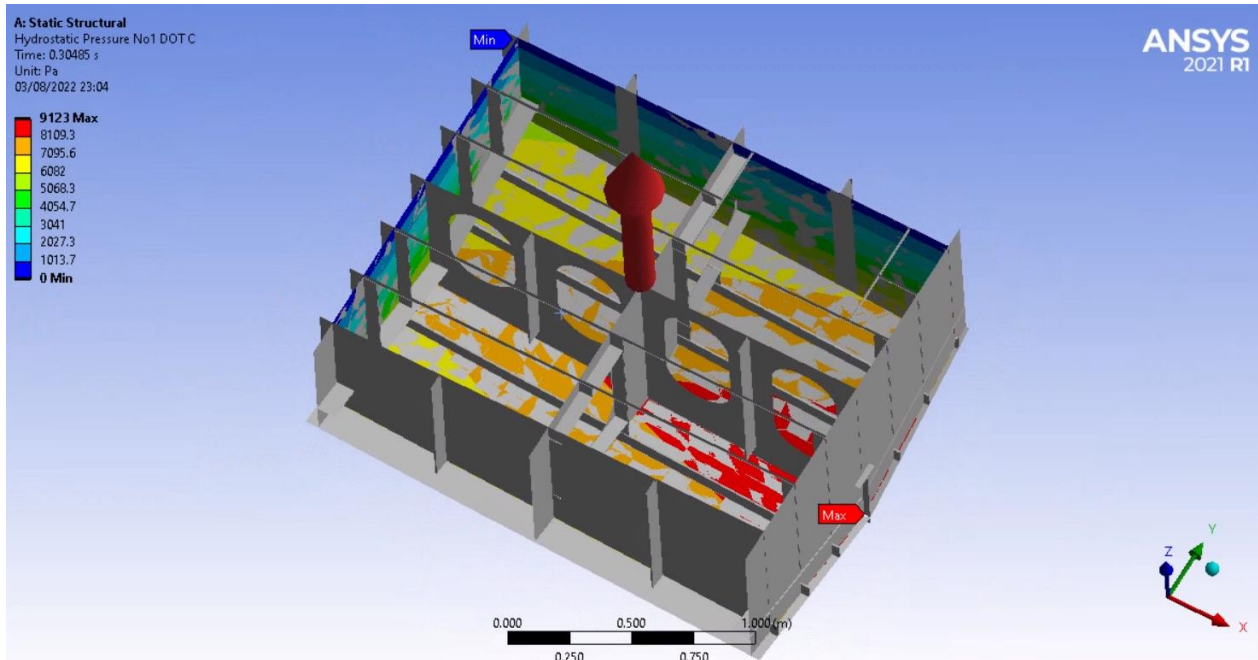


Εικόνα 35: Χώρος επιβατών στο κυρίως κατάστρωμα

4) Φορτία δεξαμενών (Tank loads)

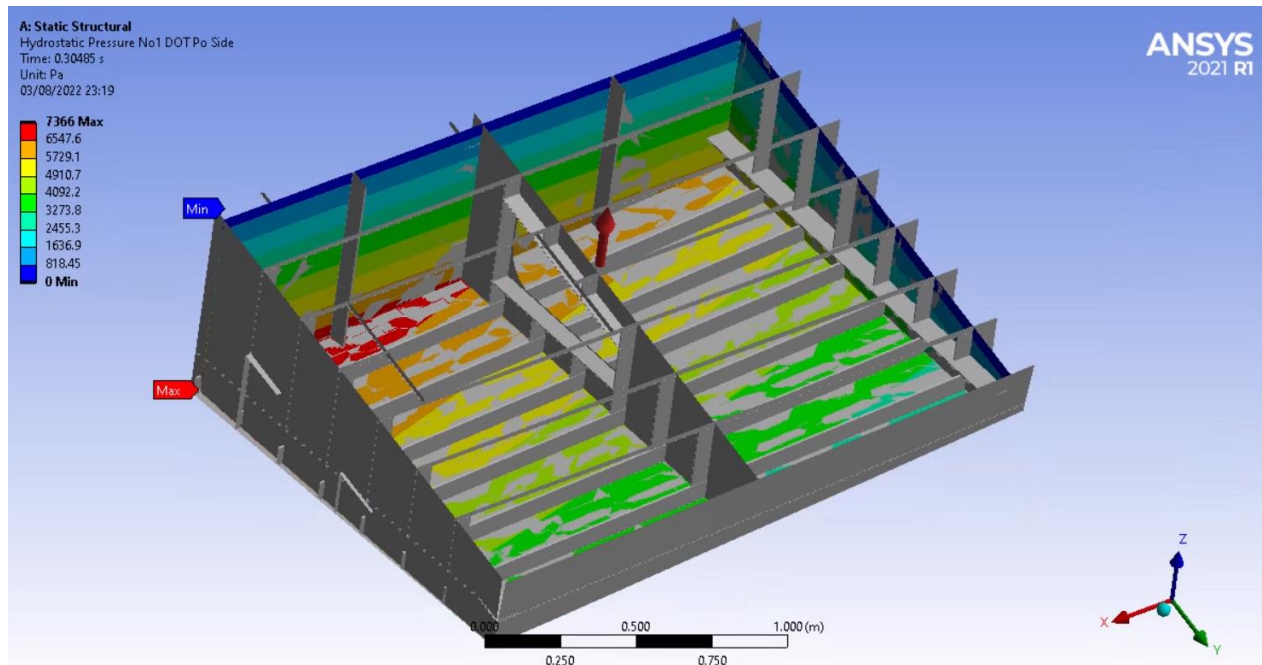
Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στα τοιχώματα των δεξαμενών έρματος, με πυκνότητα 1025 kg/m^3 και καυσίμου, με πυκνότητα 860 kg/m^3 .

- i. Φορτίο δεξαμενής καυσίμου No1 D.O.T. (C) με μέγιστη υδροστατική πίεση 9123 Pa.



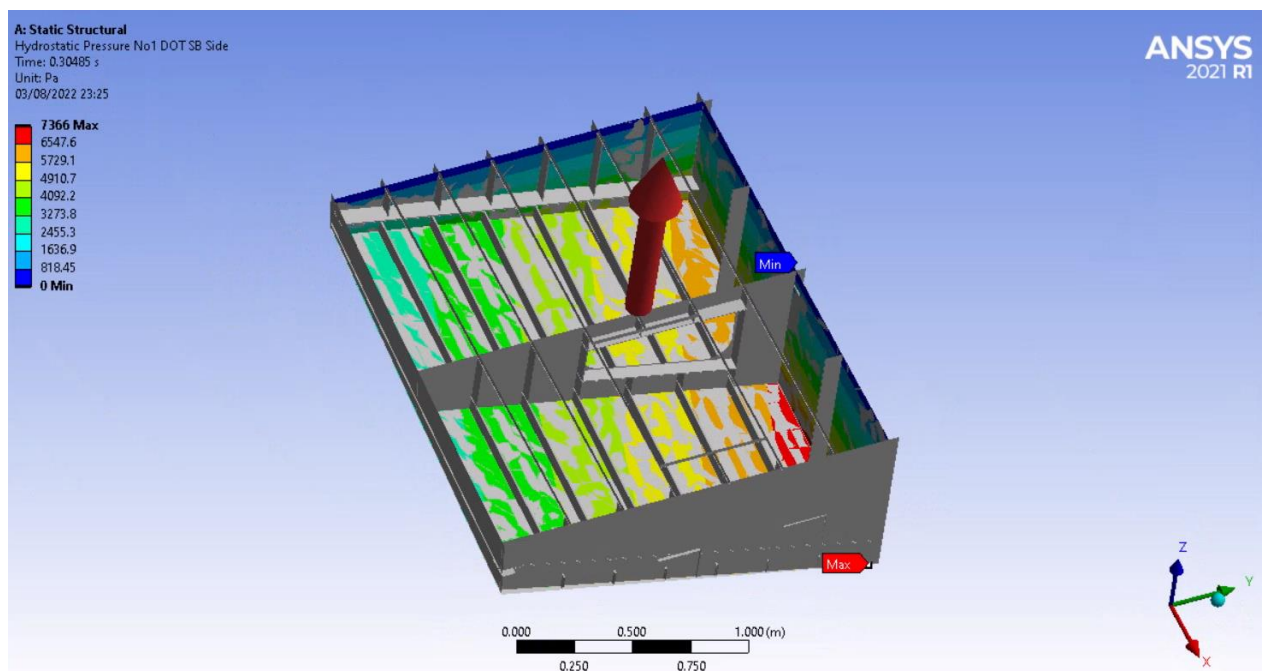
Εικόνα 36: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή καυσίμου No1 D.O.T. (C)

- ii. Φορτίο δεξαμενής καυσίμου No1 D.O.T. (Po) με μέγιστη υδροστατική πίεση 7366 Pa.



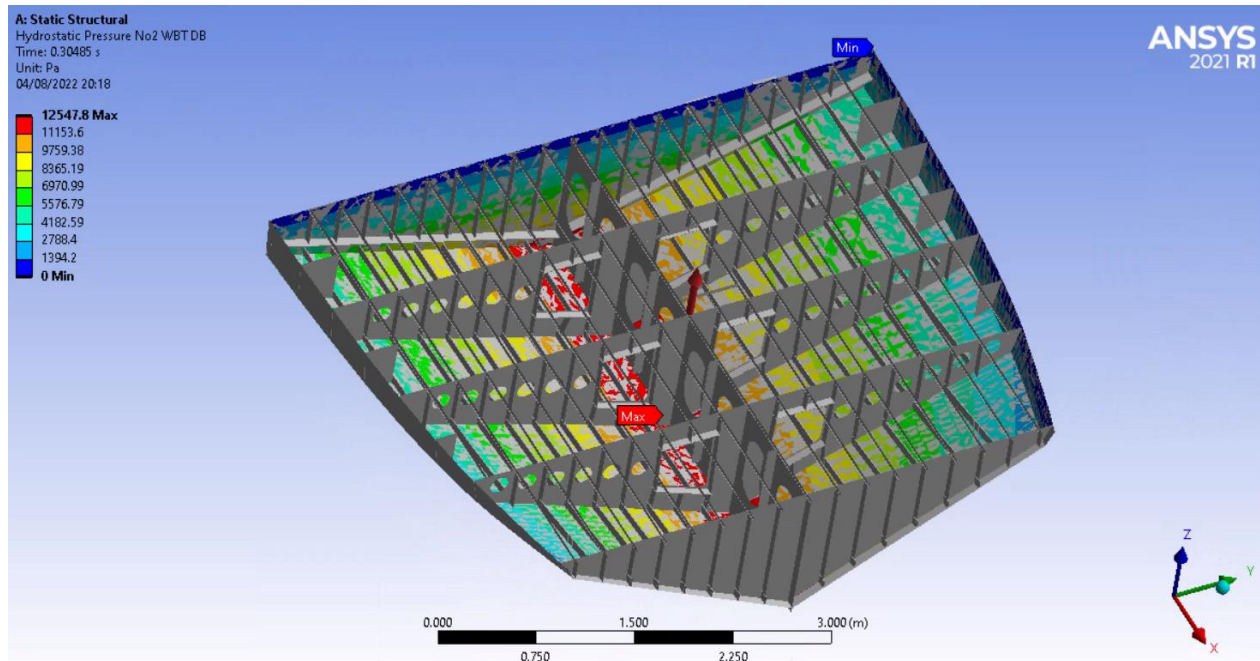
Εικόνα 37: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή καυσίμου No1 D.O.T. (Po)

iii. Φορτίο δεξαμενής καυσίμου No1 D.O.T. (SB) με μέγιστη υδροστατική πίεση 7366 Pa.



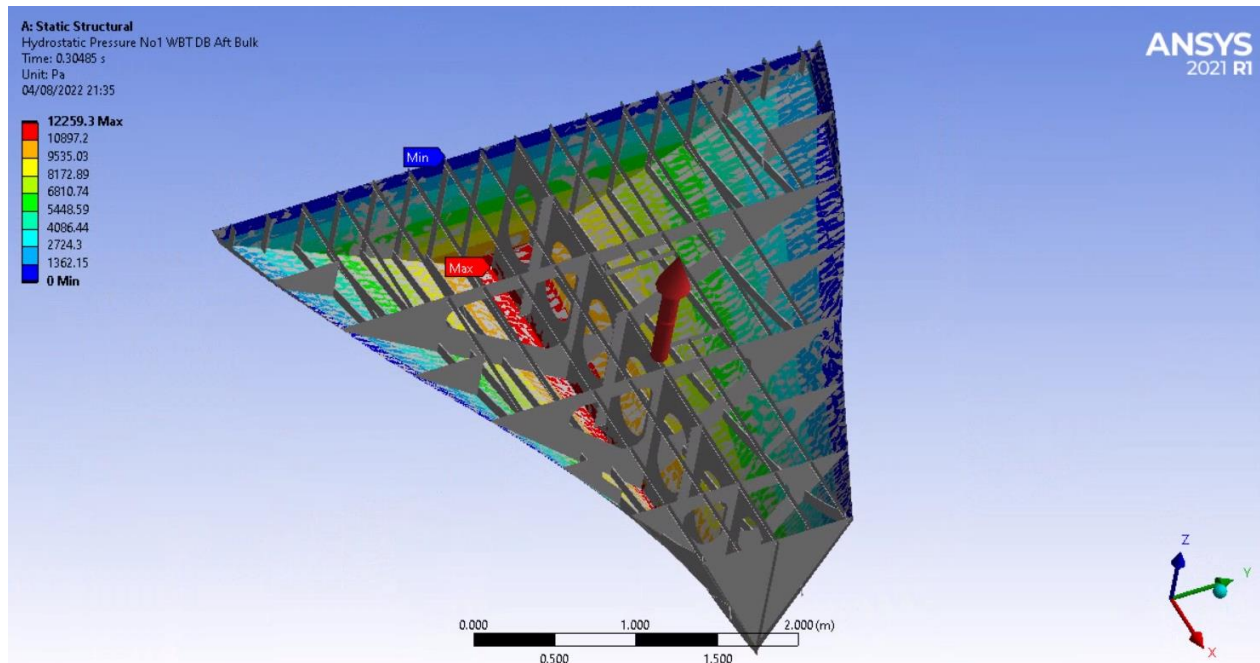
Εικόνα 38: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή καυσίμου No1 D.O.T. (SB)

- iv. Φορτίο δεξαμενής έρματος Νο2 W.B.T. D.B. με μέγιστη υδροστατική πίεση 12.5478 ΚΡα.



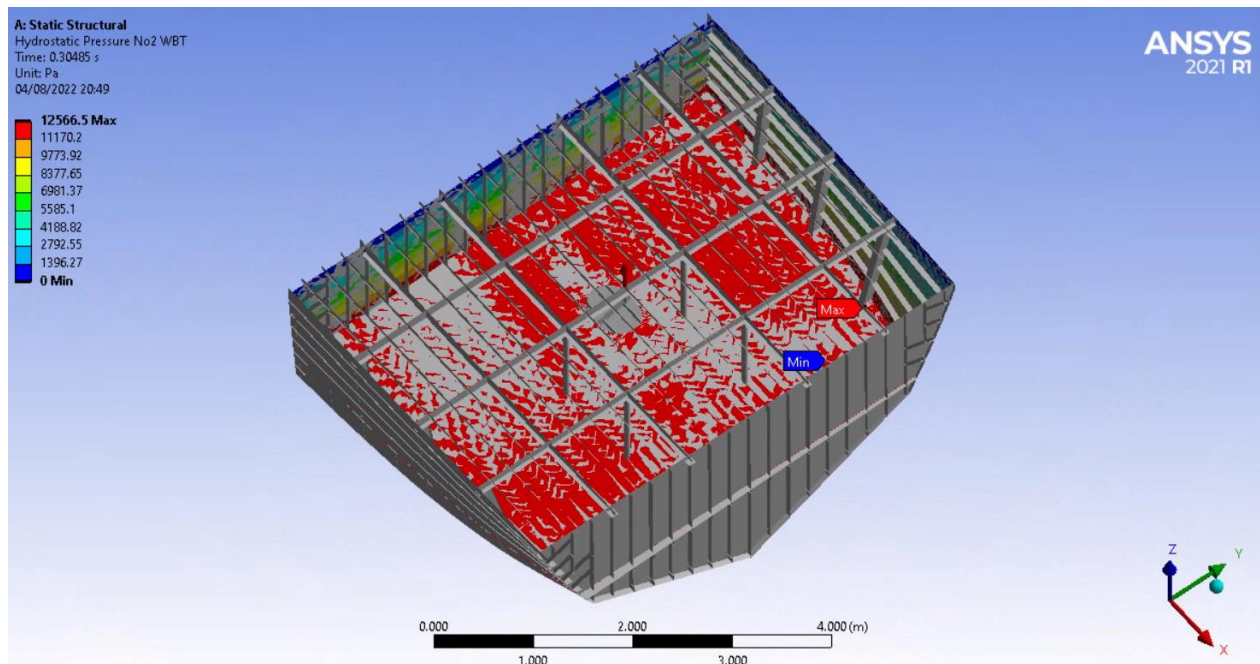
Εικόνα 39: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο2 W.B.T. D.B.

- v. Φορτίο δεξαμενής έρματος Νο1 W.B.T. D.B. με μέγιστη υδροστατική πίεση 12.2593 ΚΡα.



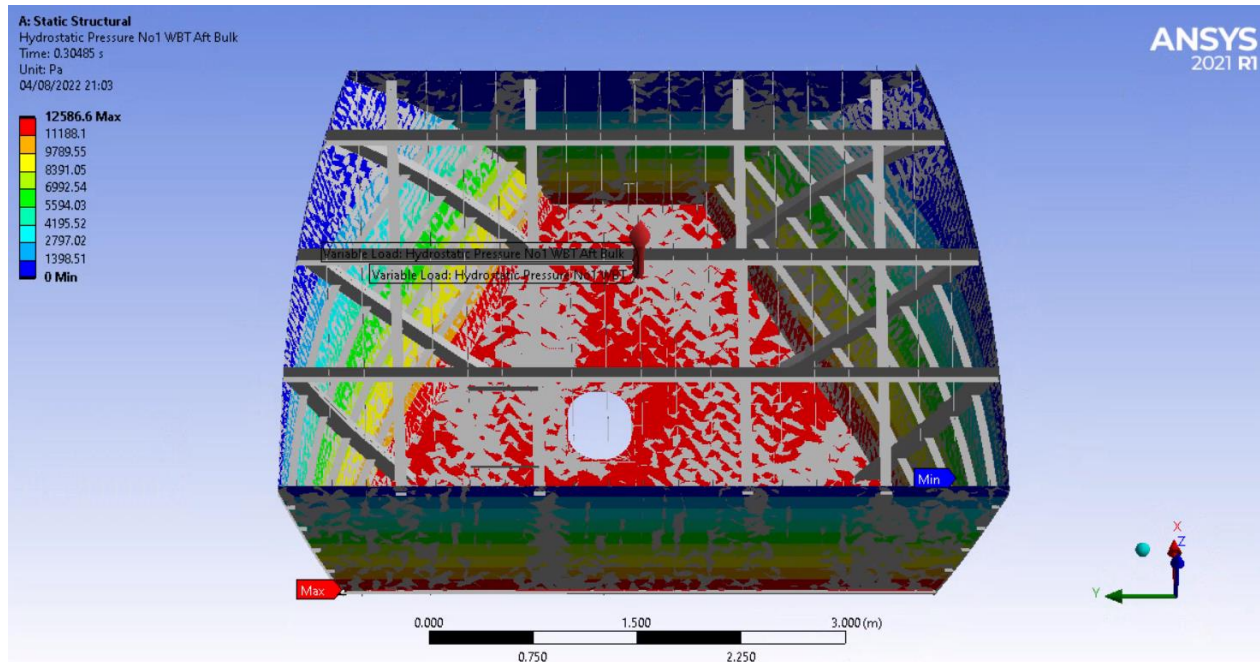
Εικόνα 40: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο1 W.B.T. D.B.

vi. Φορτίο δεξαμενής έρματος Νο2 W.B.T. με μέγιστη υδροστατική πίεση 12.5665 KPa.



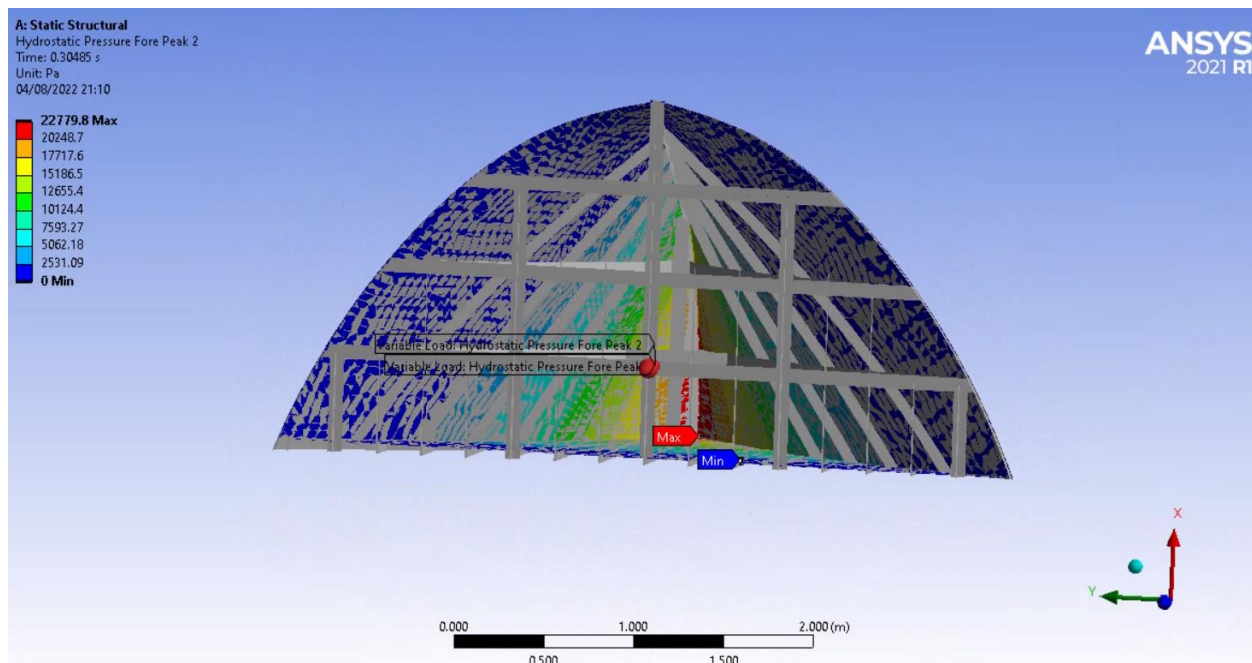
Εικόνα 41: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο2 W.B.T.

vii. Φορτίο δεξαμενής έρματος Νο1 W.B.T. με μέγιστη υδροστατική πίεση 12.5866 KPa.



Εικόνα 42: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στην δεξαμενή έρματος Νο1 W.B.T.

viii. Φορτίο λόγω έρματος στην προραία δεξαμενή ζυγοστάθμισης Fore Peak Tank με μέγιστη υδροστατική πίεση 22.7798 KPa.

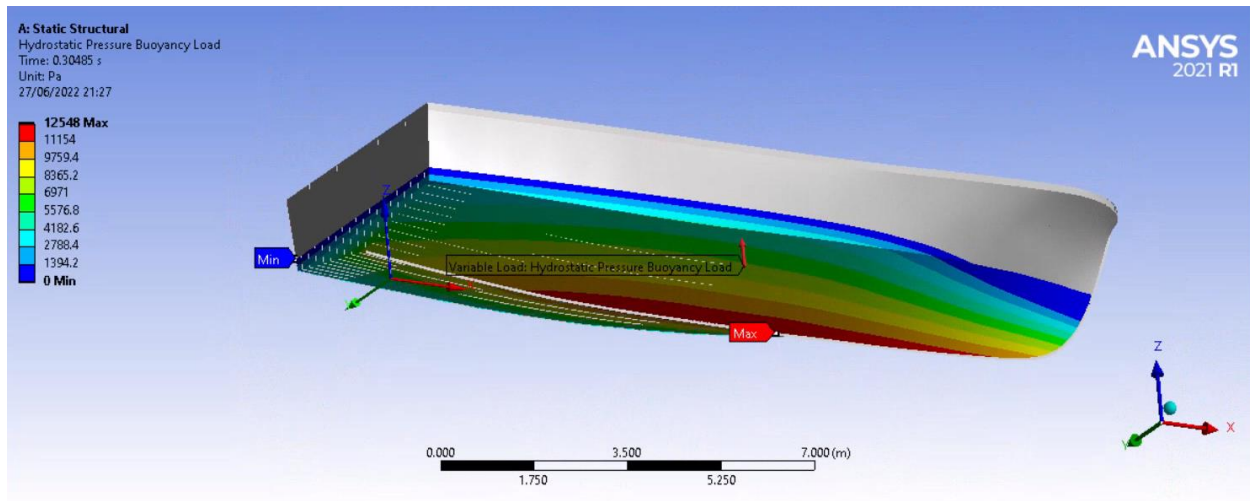


Εικόνα 43: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης λόγω έρματος στην προωραία δεξαμενή ζυγοστάθμισης Fore Peak Tank

Να σημειωθεί εδώ πως το πρόγραμμα εφαρμόζει την πίεση στις επιφάνειες που ασκείται καθολικά σε μία πλευρά, άνω ή κάτω. Έτσι, ανάλογα με την κάθετη διεύθυνση των διανυσμάτων των επιφανειών (normal vector) σε κάθε πλευρά της εκάστοτε δεξαμενής, για την ορθή αναπαράσταση των πιέσεων αυτών, χρειάστηκε να προστεθούν υδροστατικές πιέσεις σε ορισμένες από τις φρακτές των δεξαμενών ώστε να τους ασκηθεί πίεση προς την ορθή κατεύθυνση.

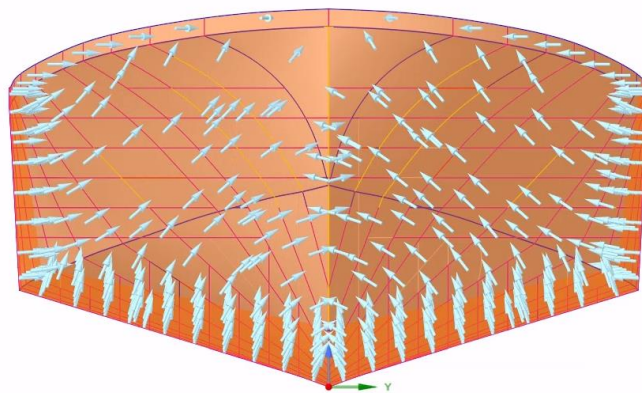
5) Φορτίο άνωσης (Buoyancy loads).

Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στα ύφαλα, τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας, με μέγιστη τιμή 12.548 KPa.



Εικόνα 44: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στα ύφαλα της γάστρας λόγω άνωσης

Κι εδώ πραγματοποιήθηκε έλεγχος των προσανατολισμών των κάθετων διανυσμάτων (normal vectors) των επιφανειών της γάστρας ώστε να είναι προς την ίδια κατεύθυνση (έσω), όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα από το Spaceclaim.



Εικόνα 45: Έλεγχος κάθετων διανυσμάτων επιφανειών γάστρας

3.3 Αποτελέσματα

Για το επιλεγθέν υλικό, αλουμίνιο 6082, ο συντελεστής $\eta_1 = \beta = 0.45$ (σύμφωνα με τον Πίνακα VI) και η ελάχιστη εγγυημένη τάση διαρροής $R_{p0.2}$ είναι 260 MPa (σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM B221) τότε

$$R'_{p0.2} = \eta_1 R_{p0.2} = 0.45 * 260 \text{ MPa} = 117 \text{ MPa}$$

ο συντελεστής $\eta_2 = 0.6$ και η ελάχιστη εγγυημένη αντοχή σε εφελκυσμό R_m είναι 310 MPa (ASTM B221) τότε

$$R'_m = \eta_2 R_m = 0.6 * 310 \text{ MPa} = 186 \text{ MPa}$$

$$R'_{lim} = \{R'_{p0.2} \leq 70\% * R'_m\} = \{117 \leq 130.2\} = 117 \text{ MPa}$$

Ο συντελεστής υλικού, k είναι

$$k = \frac{235}{R'_{lim}} = \frac{235}{117} \approx 2$$

Τότε, οι επιτρεπόμενες τάσεις κατά την ανάλυση του ολικού μοντέλου για τα ελάσματα:

για την αξονική τάση είναι $175 / k = 87.5 \text{ MPa}$

για την διατμητική τάση είναι $110 / k = 55 \text{ MPa}$

για την τάση von Mises είναι $220 / k = 110 \text{ MPa}$

Οι επιτρεπόμενες τάσεις κατά την ανάλυση του μοντέλου τμήματος πλοίου με αραιό πλέγμα παρουσιάζονται κάτωθι.

Από τον σχετικό Πίνακα VIII η τιμή του επιτρεπόμενου συντελεστή χρήσης είναι $\lambda_{yperm} = 0.8$.

Το ονομαστικό όριο διαρροής σύμφωνα με το DNVGL-RU-SHIP-Pt.3 Ch.1 Sec.4 Table 1

$$R_y = \frac{235}{k} = \frac{235}{2} = 117 \text{ MPa}$$

Για τα δομικά στοιχεία πρέπει να ισχύει $\lambda_y \leq \lambda_{yperm}$

όπου συντελεστής χρήσης είναι

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y} \text{ γενικά για στοιχεία κελύφους, άρα } \sigma_{vm} \leq 0.8 * 117 = 93.6 \text{ MPa}$$

$$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y} \text{ γενικά για στοιχεία ράβδου, άρα } \sigma_{|\sigma_{axial}|} \leq 93.6 \text{ MPa}$$

Οι επιτρεπόμενες τάσεις κατά την ανάλυση των λεπτομερειών του μοντέλου πλοίου με πυκνό πλέγμα παρουσιάζονται κάτωθι.

Επειδή το υπό εξέταση πλέγμα επιλέχθηκε αρκετά πυκνό ώστε να έχει υψηλή ανάλυση, με μέγεθος στοιχείου 5 cm, μπορούμε να λάβουμε την τιμή του επιτρεπόμενου συντελεστή χρήσης από τον σχετικό Πίνακα IX ως

$\lambda_{fperm} = 1.2$, γενικά για στοιχεία που εφάπτονται σε συγκόλληση ως την πιο δυσμενή περίπτωση.

Το ονομαστικό όριο διαρροής σύμφωνα με το DNVGL-RU-SHIP-Pt.3 Ch.1 Sec.4 Table 1

$$R_y = \frac{235}{k} = \frac{235}{2} = 117 \text{ MPa}$$

Για τα δομικά στοιχεία πρέπει να ισχύει $\lambda_f \leq \lambda_{fperm}$

όπου συντελεστής χρήσης είναι

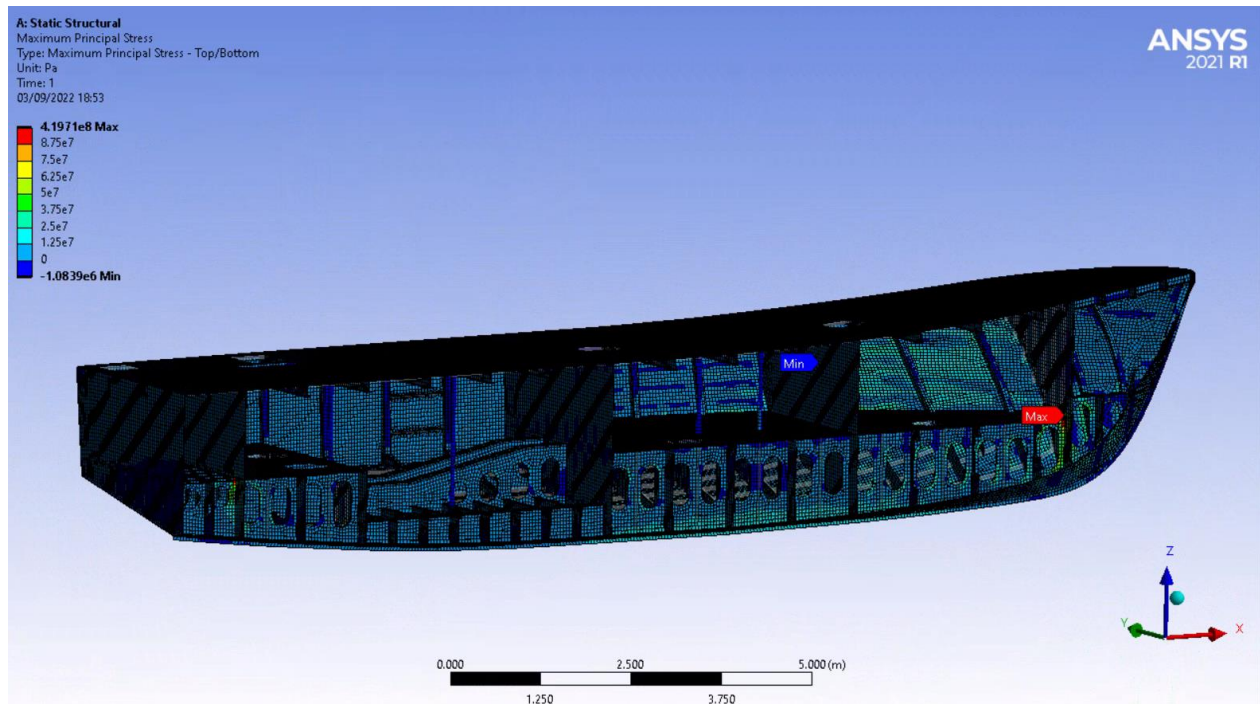
$$\lambda_f = \frac{\sigma_{vm}}{R_y} \text{ γενικά για στοιχεία κελύφους, άρα } \sigma_{vm} \leq 1.2 * 117 = 140.4 \text{ MPa}$$

$$\lambda_f = \frac{\sigma_{axial}}{R_y} \text{ γενικά για στοιχεία ράβδου, άρα } \sigma_{|\sigma_{axial}|} \leq 140.4 \text{ MPa}$$

3.3.1 Αξονική τάση

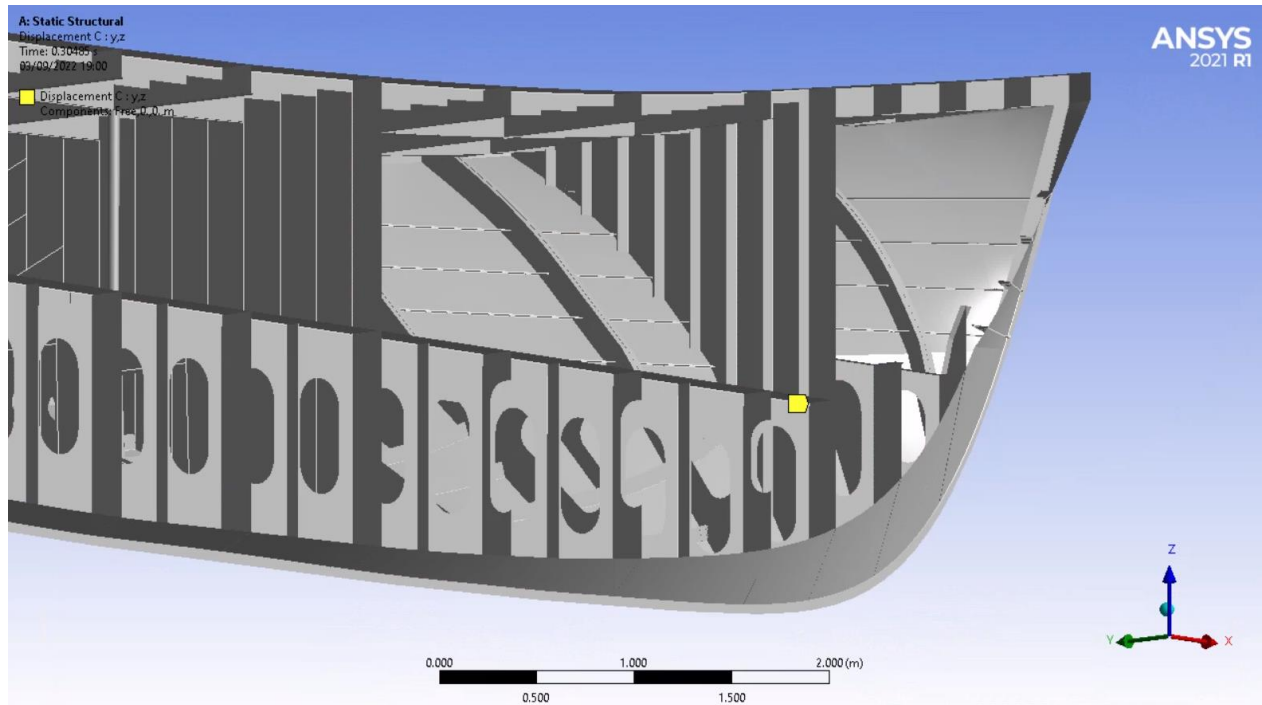
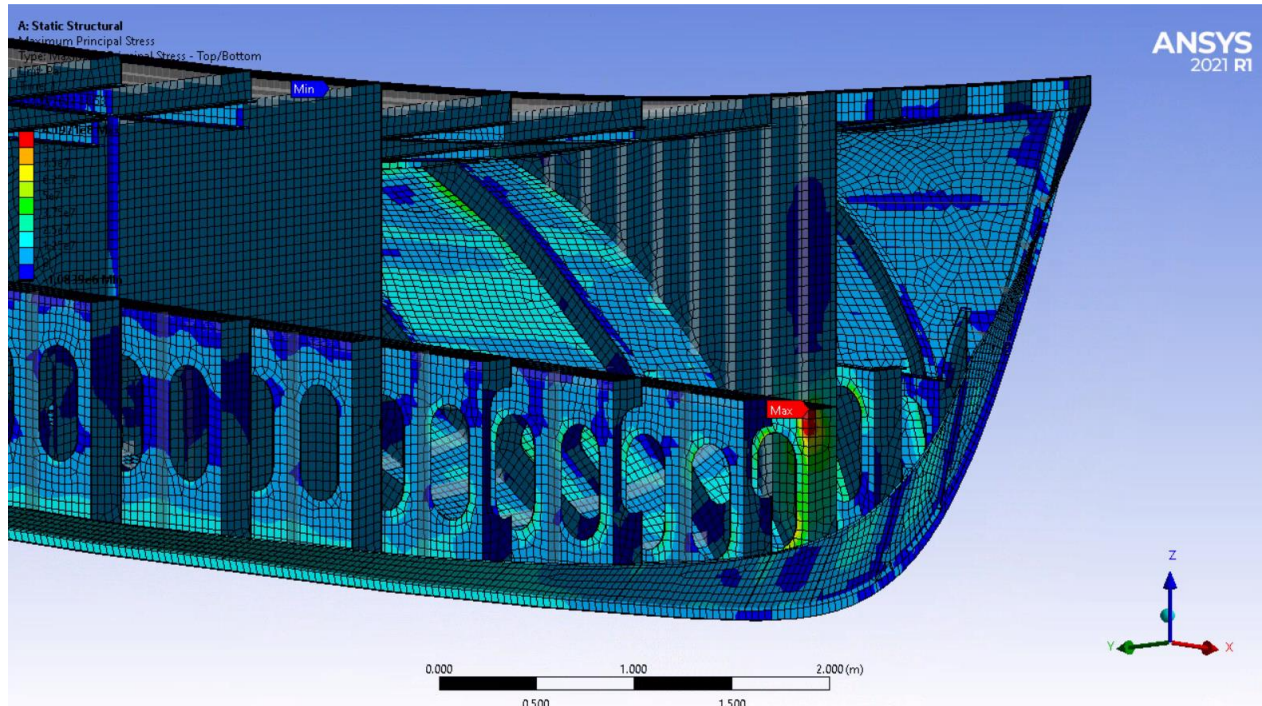
3.3.1.1 Σύμφωνα με την Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών

Για τις συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την Περίπτωση 1, παρατηρείται μέγιστη κύρια τάση άνω του επιτρεπόμενου ορίου με τιμή 419.71 MPa > 87.5 MPa και μέση τιμή μέγιστων κύριων τάσεων 4.355 MPa.



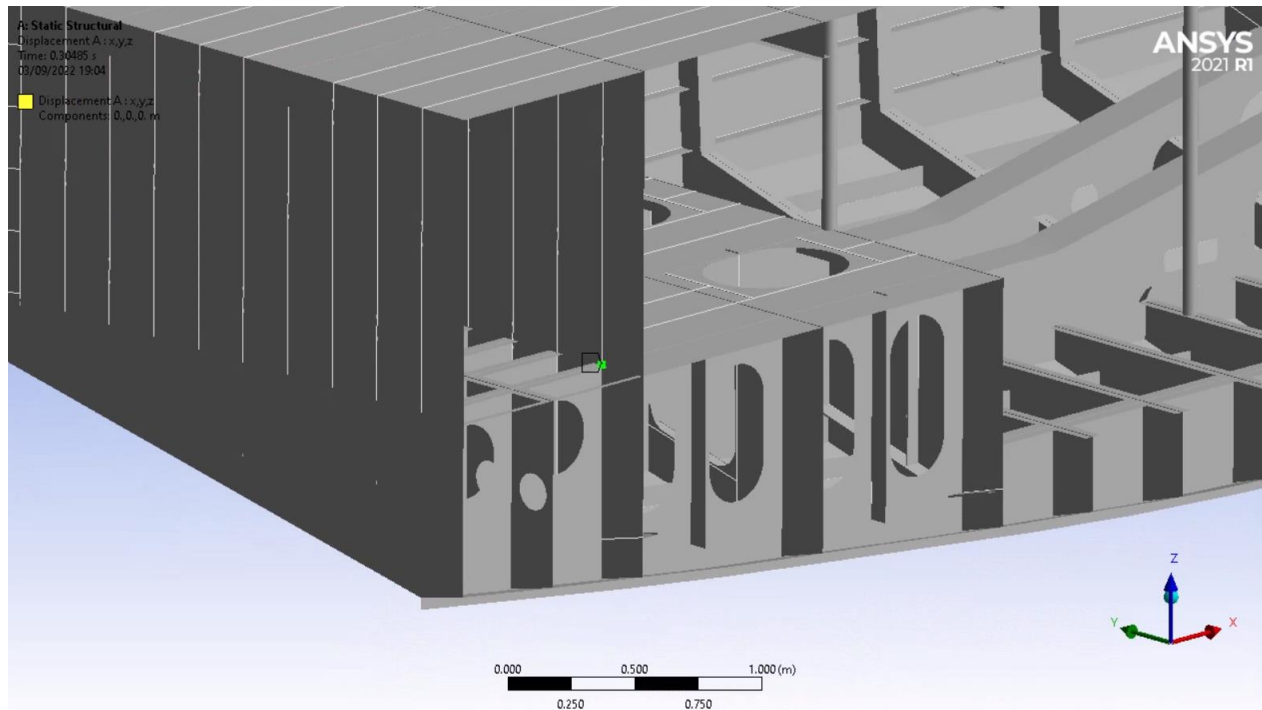
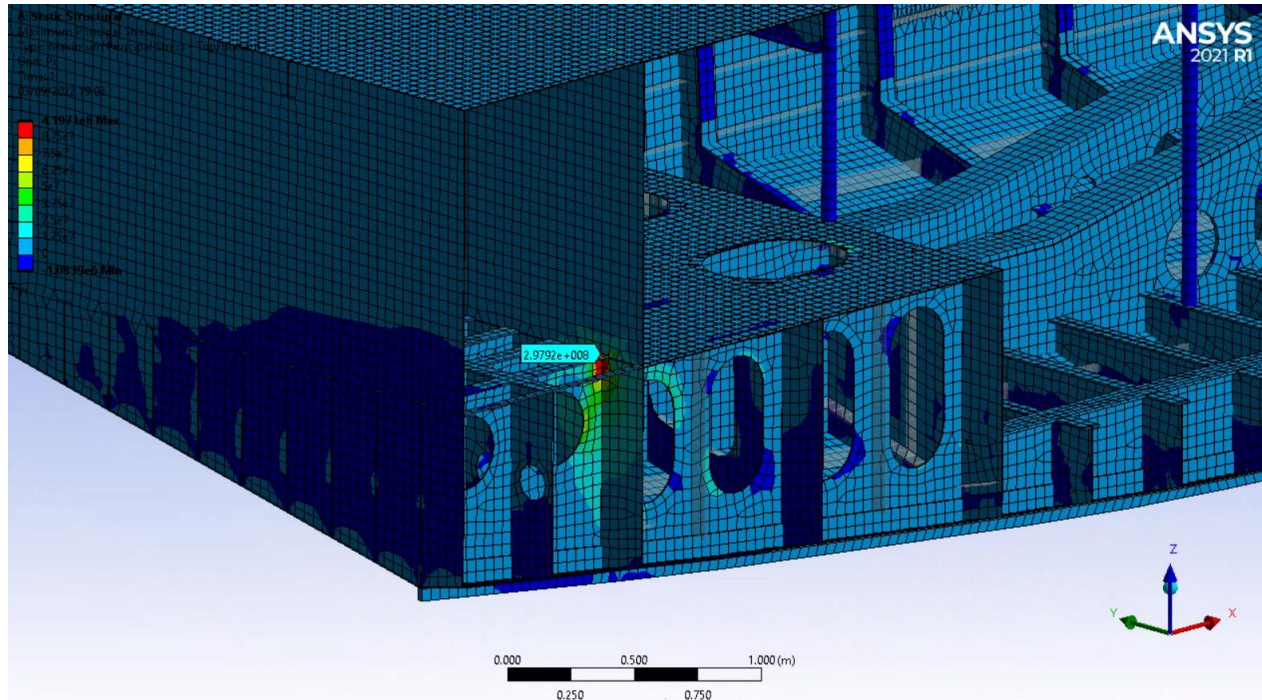
Εικόνα 46: Περίπτωση 1 συνριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση

Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στον κόμβο C όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην στεγανή φρακτή σύγκρουσης.



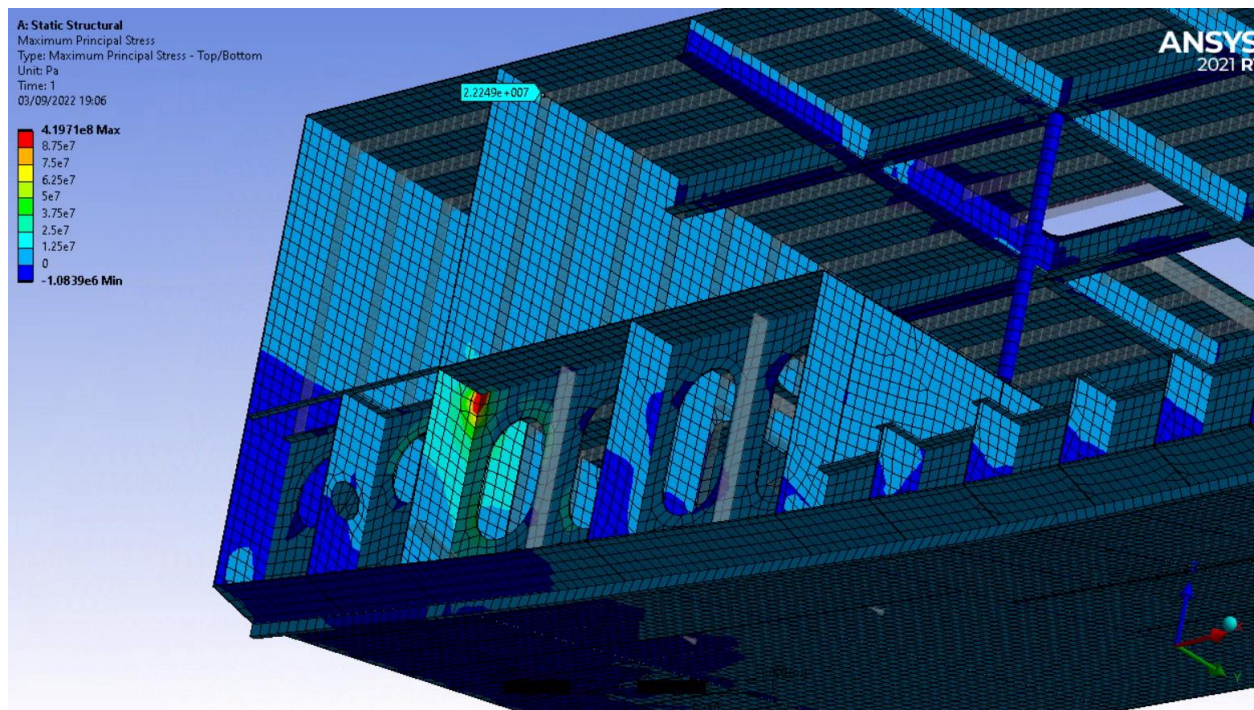
Εικόνα 47: Περίπτωση 1 συντοριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση στην συντοριακή συνθήκη C

Τοπική μέγιστη τιμή $297.92 \text{ MPa} > 87.5 \text{ MPa}$ εμφανίζεται στον κόμβο A όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή.



Εικόνα 48: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη κύρια τάση στην συνοριακή συνθήκη A

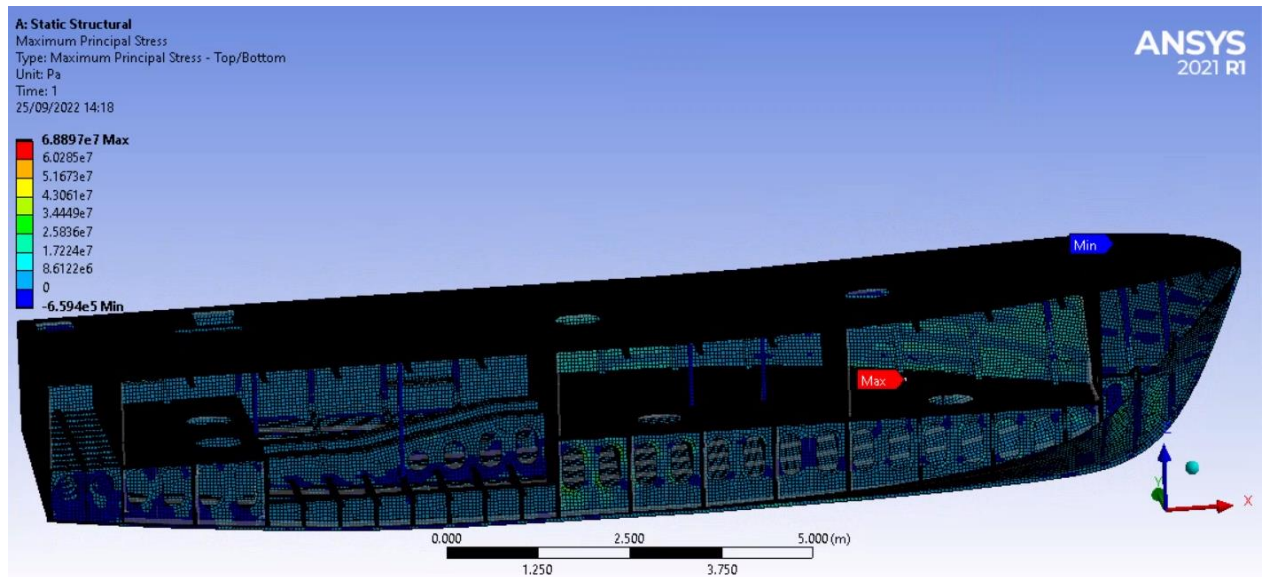
Στον κόμβο B εφαρμογής περιορισμού μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή η τιμή της μέγιστης κύριας τάσης είναι $22.249 \text{ MPa} < 87.5 \text{ MPa}$.



Εικόνα 49: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη κύρια τάση στην συνοριακή συνθήκη B

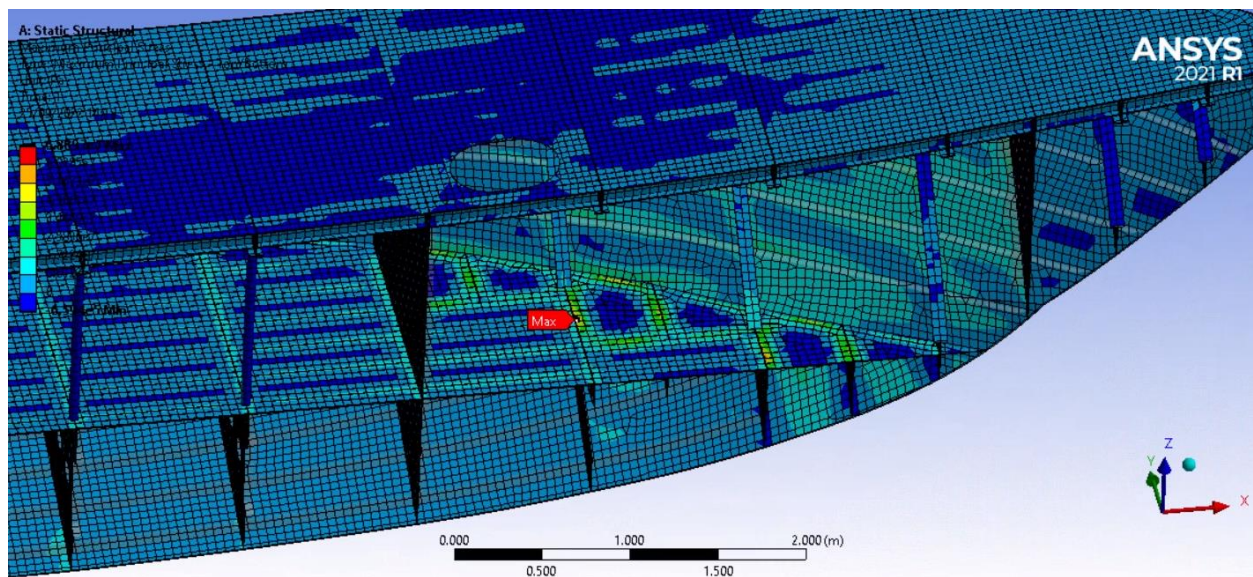
3.3.1.2 Σύμφωνα με την Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών

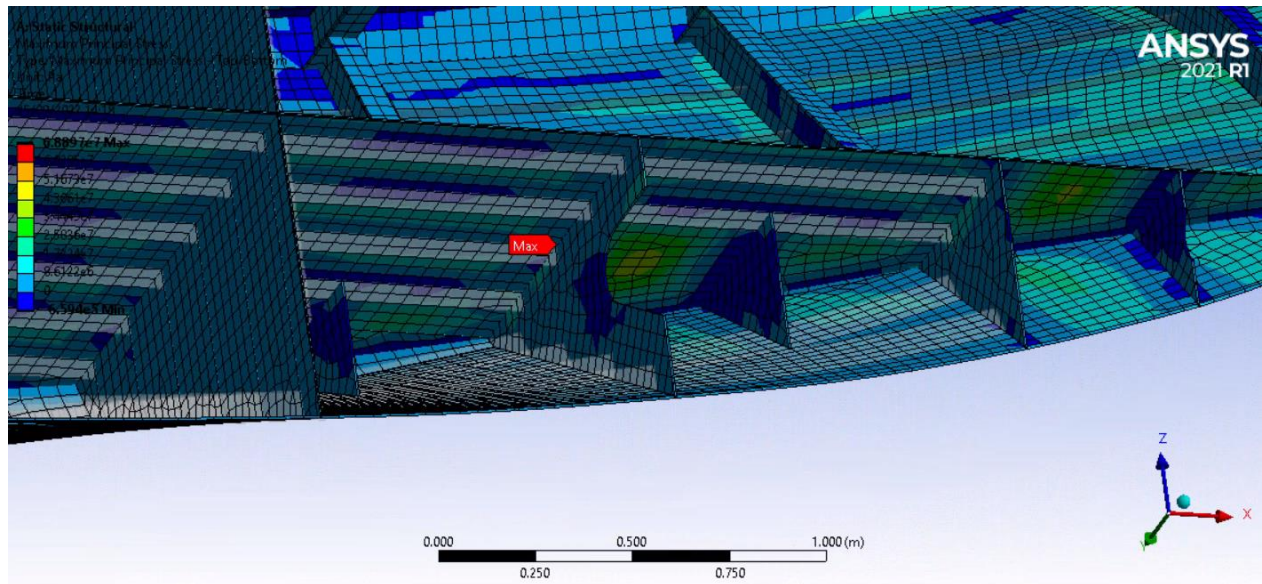
Για τις συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την Περίπτωση 2, παρατηρείται μέγιστη κύρια τάση κάτω του επιτρεπόμενου ορίου με τιμή $68.897 \text{ MPa} < 87.5 \text{ MPa}$ και μέση τιμή μέγιστων κύριων τάσεων 2.058 MPa .



Εικόνα 50: Περίπτωση 2 συνριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση

Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο κατάστρωμα άνω των δεξαμενών διπυθμένων, στο σημείο όπου η διαμήκης ενίσχυση δεν συνεχίζει πέραν της έδρας του νομέα 23 όπως φαίνεται κάτωθι.



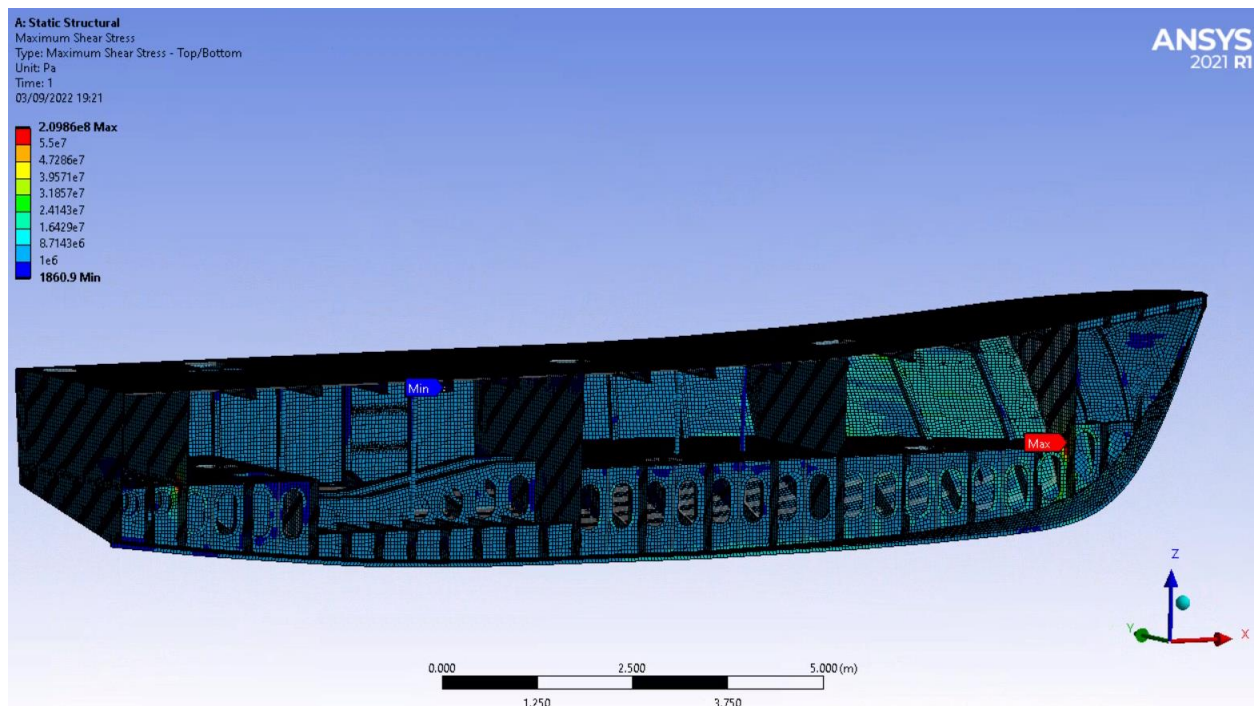


Εικόνα 51: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη κύρια τάση

3.3.2 Διατμητική τάση

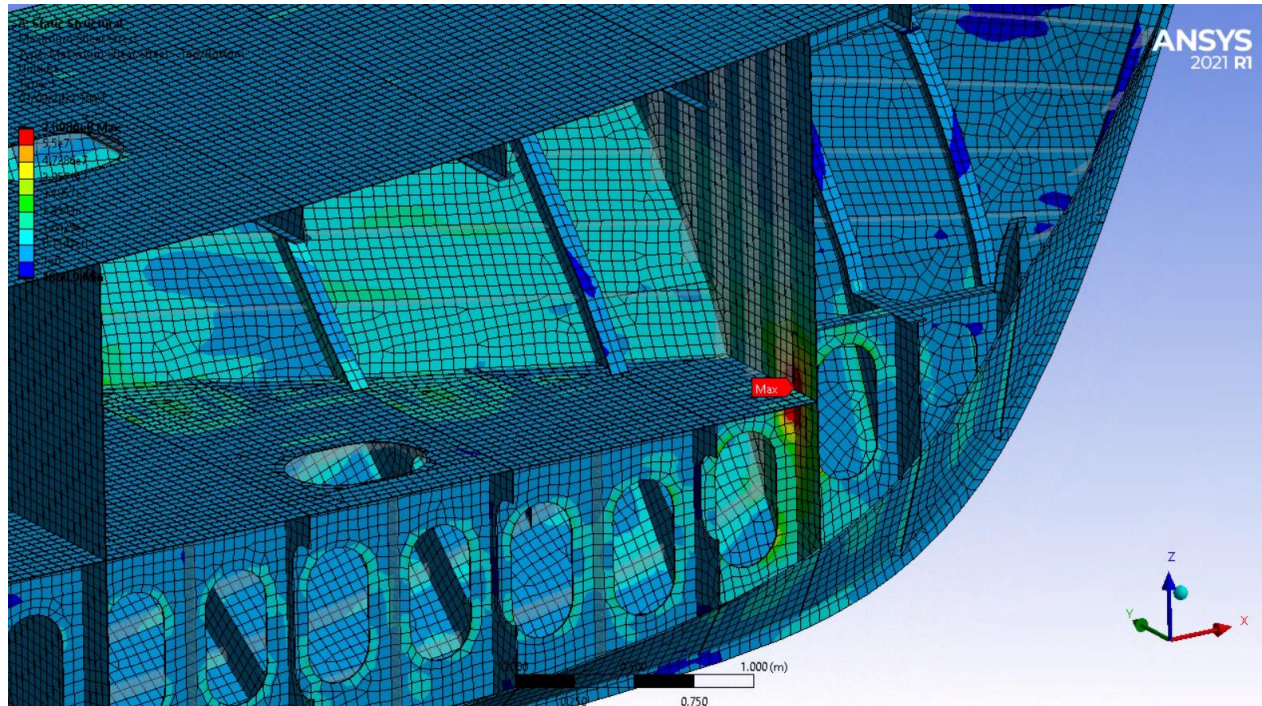
3.3.2.1 Σύμφωνα με την Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών

Για τις συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την Περίπτωση 1, παρατηρείται μέγιστη διατμητική τάση άνω του επιτρεπόμενου ορίου με τιμή 209.85 MPa > 55 MPa και μέση τιμή μέγιστων διατμητικών τάσεων 4.6511 MPa.



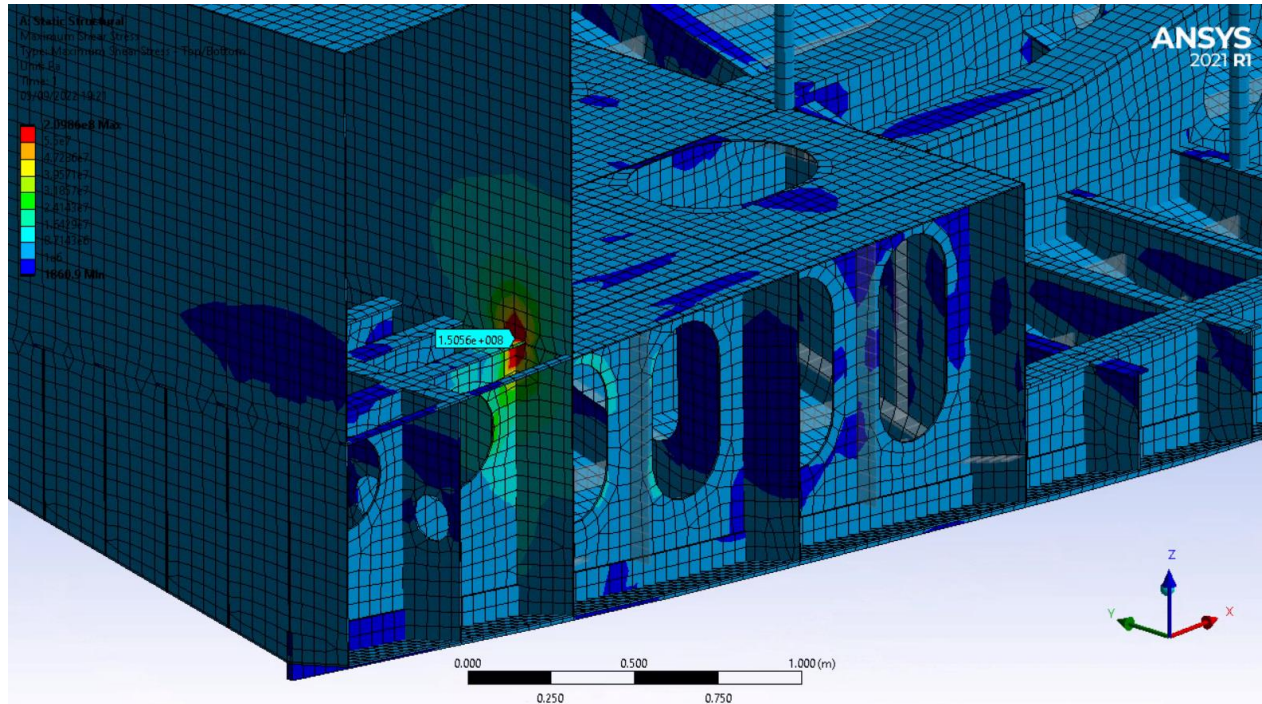
Εικόνα 52: Περίπτωση 1 συντοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση

Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στον κόμβο C όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην στεγανή φρακτή σύγκρουσης.



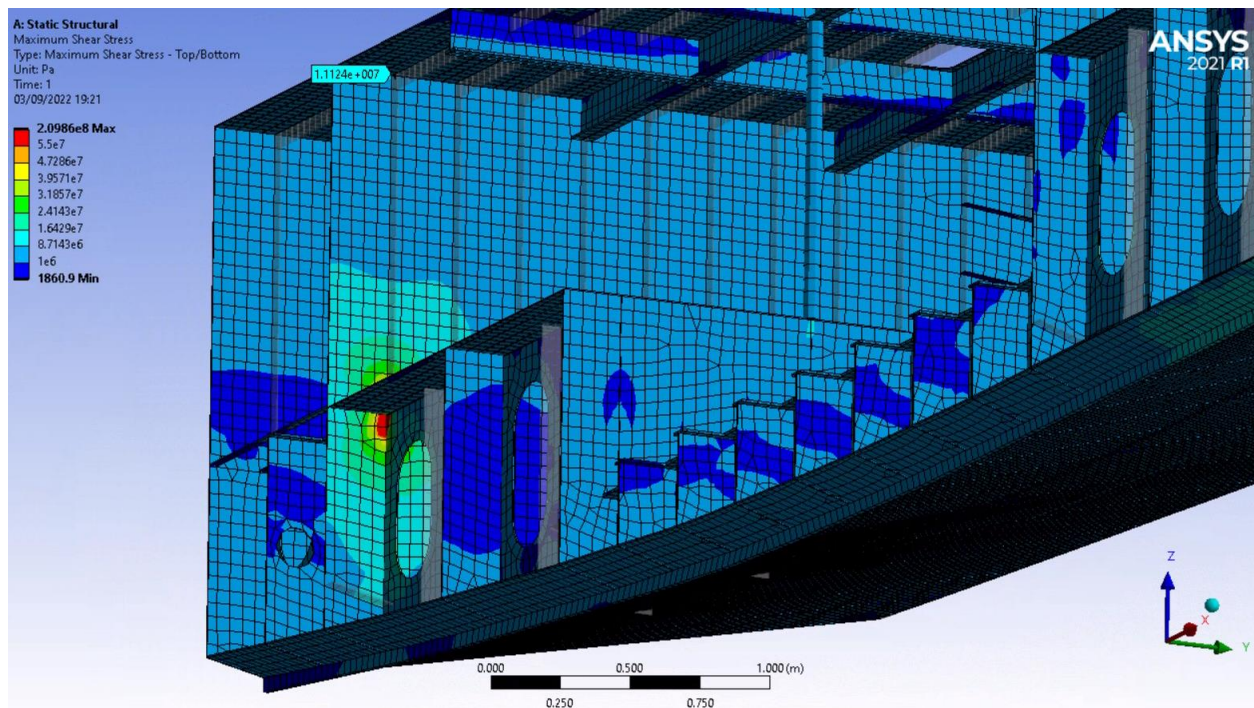
Εικόνα 53: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση στην συνοριακή συνθήκη C

Τοπική μέγιστη τιμή $150.56 \text{ MPa} > 55 \text{ MPa}$ εμφανίζεται στον κόμβο A όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή.



Εικόνα 54: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη διατμητική τάση στην συνοριακή συνθήκη A

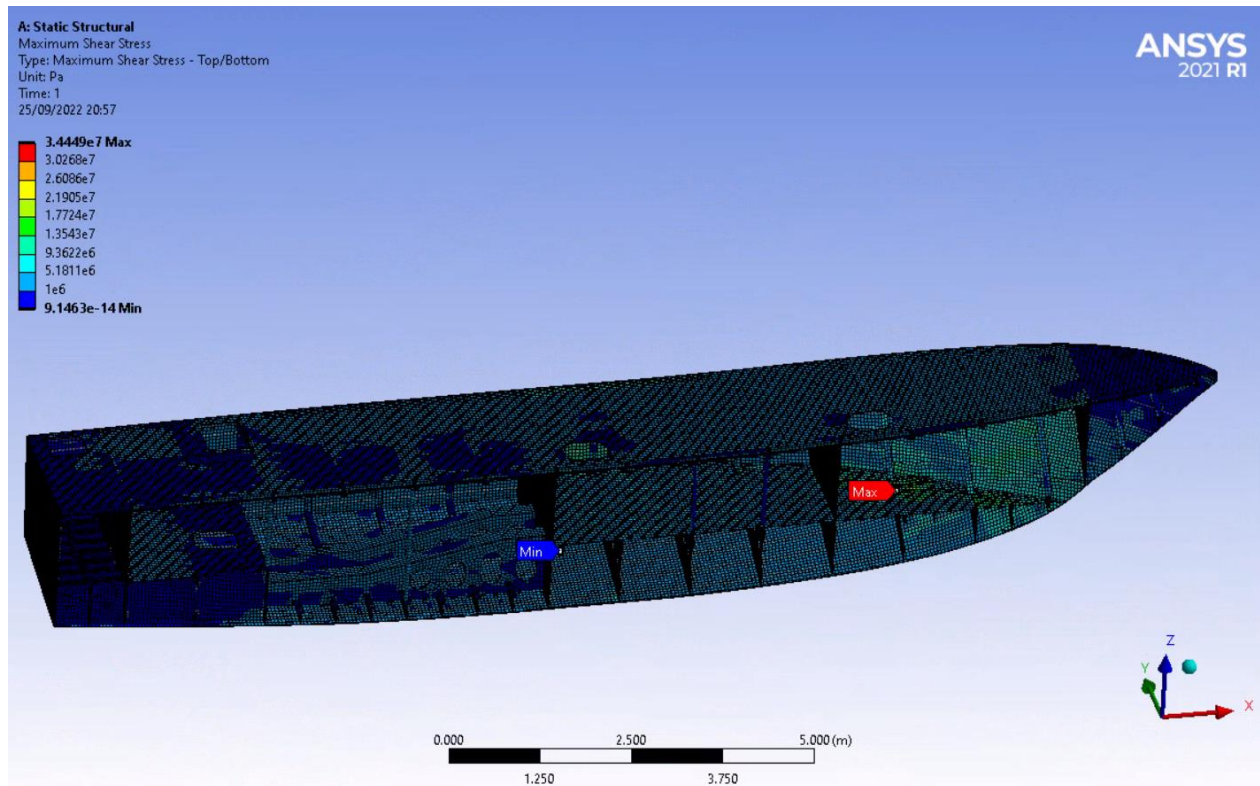
Στον κόμβο B εφαρμογής περιορισμού μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή η τιμή της μέγιστης διατμητικής τάσης είναι $11.124 \text{ MPa} < 55 \text{ MPa}$.



Εικόνα 55: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη διατμητική τάση στην συνοριακή συνθήκη B

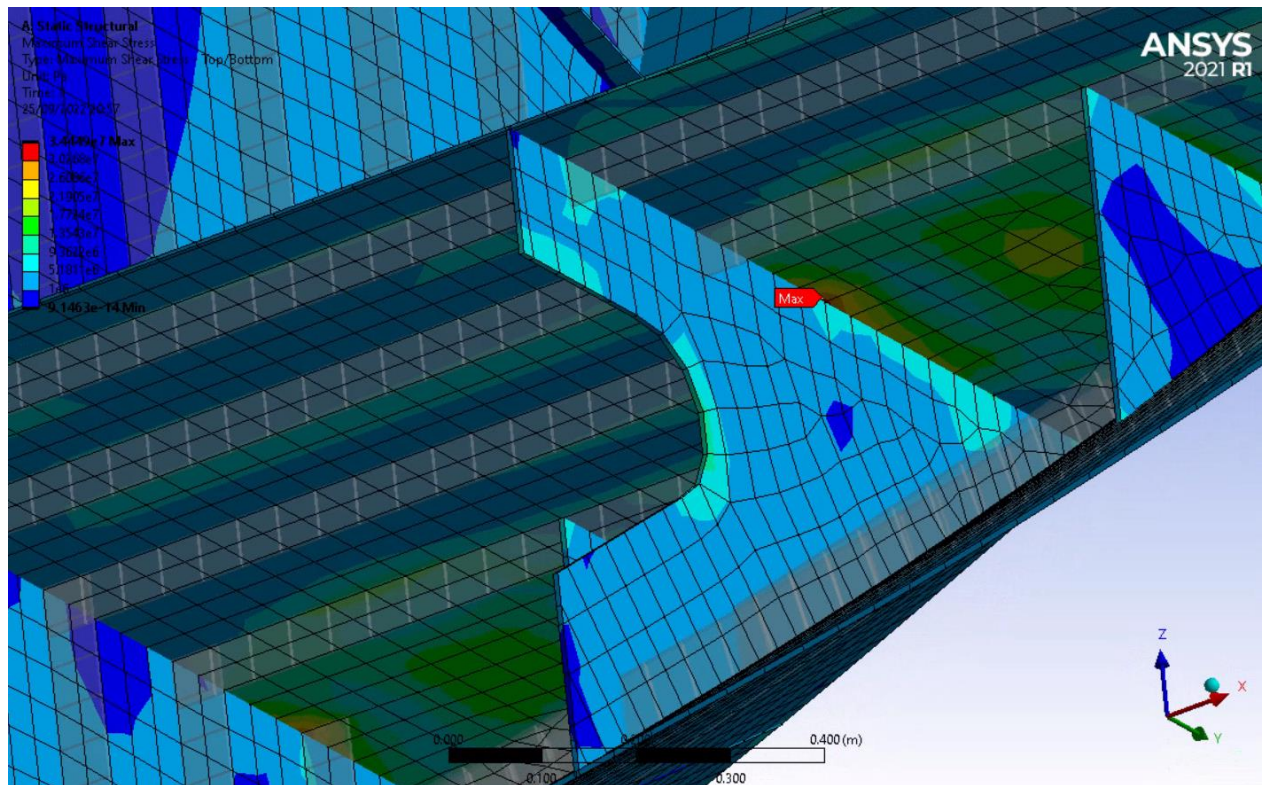
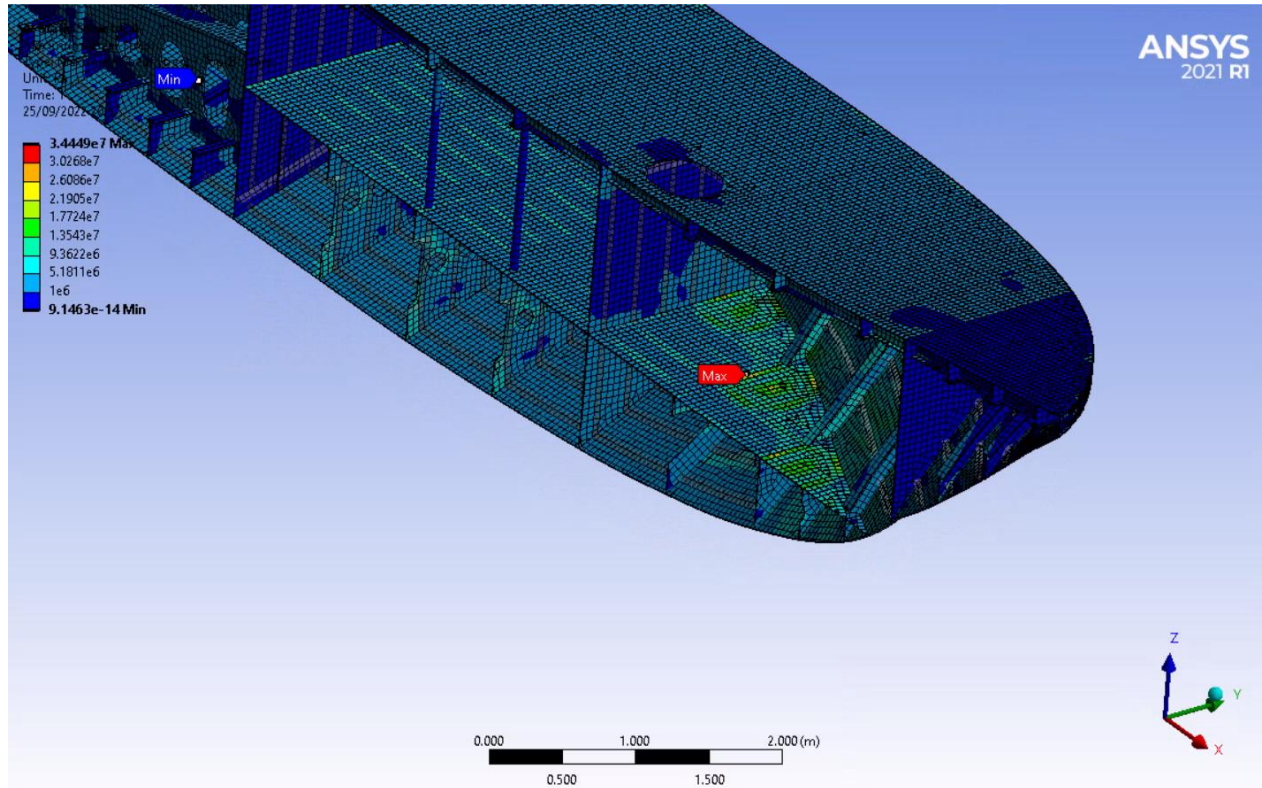
3.3.2.2 Σύμφωνα με την Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών

Για τις συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την Περίπτωση 2, παρατηρείται μέγιστη διατμητική τάση κάτω του επιτρεπόμενου ορίου με τιμή $34.449 \text{ MPa} < 55 \text{ MPa}$ και μέση τιμή μέγιστων διατμητικών τάσεων 2.0221 MPa .



Εικόνα 56: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση

Η μέγιστη τιμή διατμητικής τάσης εμφανίζεται στο κατάστρωμα άνω των δεξαμενών διπυθμένων, στο σημείο όπου η διαμήκης ενίσχυση δεν συνεχίζει πέραν της έδρας του νομέα 23.

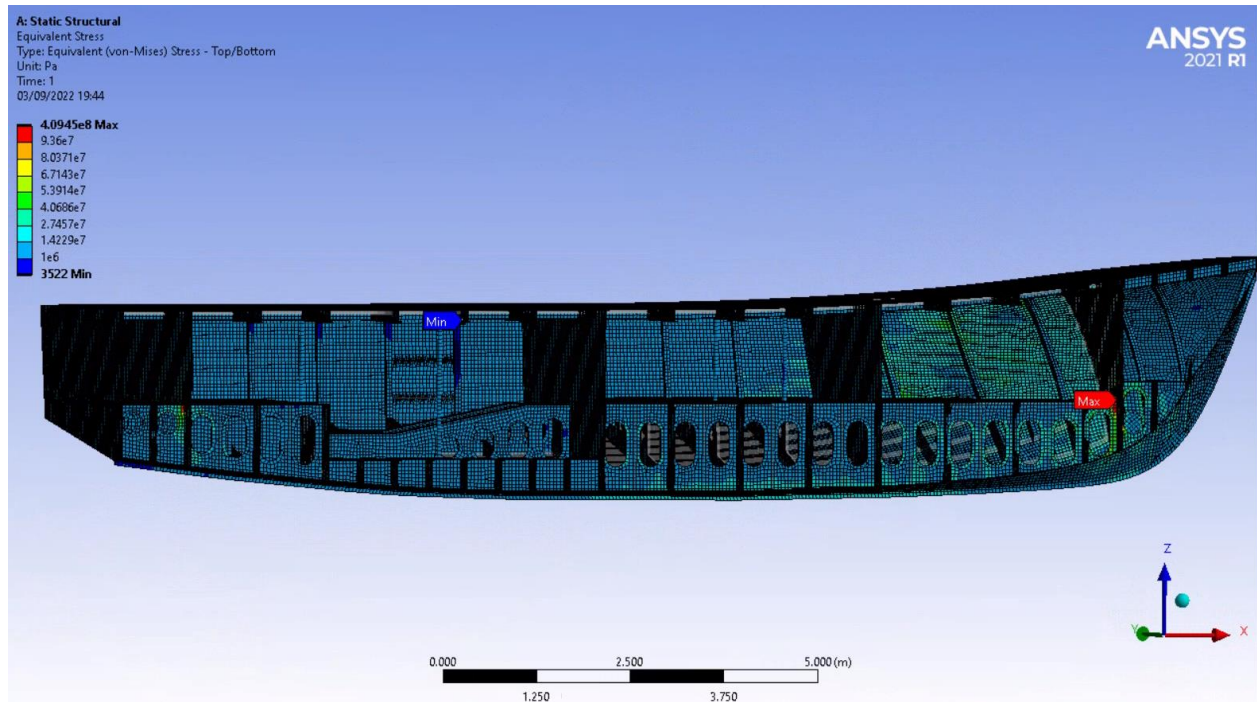


Εικόνα 57: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη διατμητική τάση

3.3.3 Τάση von Mises

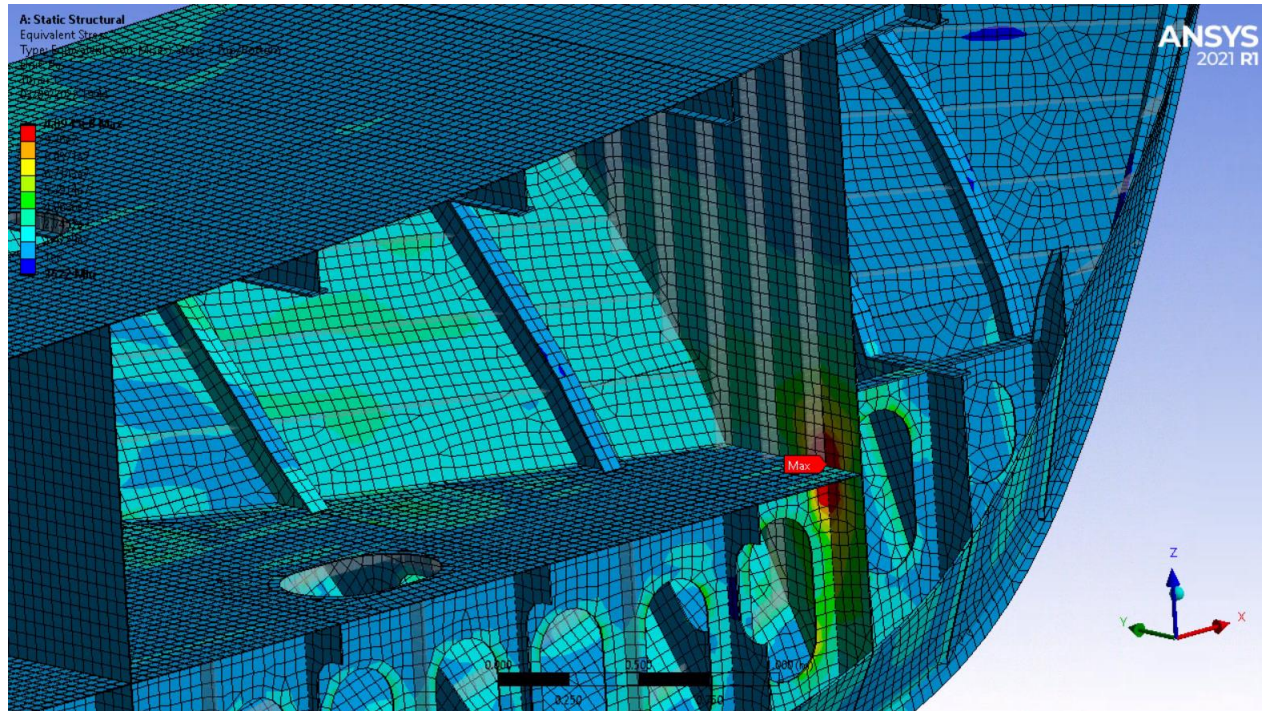
3.3.3.1 Σύμφωνα με την Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών

Για τις συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την Περίπτωση 1, παρατηρείται μέγιστη τάση von Mises άνω του επιτρεπόμενου ορίου με τιμή $409.46 \text{ MPa} > 93.6 \text{ MPa}$ (δυσμενέστερο όριο) και μέση τιμή μέγιστων τάσεων von Mises 8.4933 MPa .



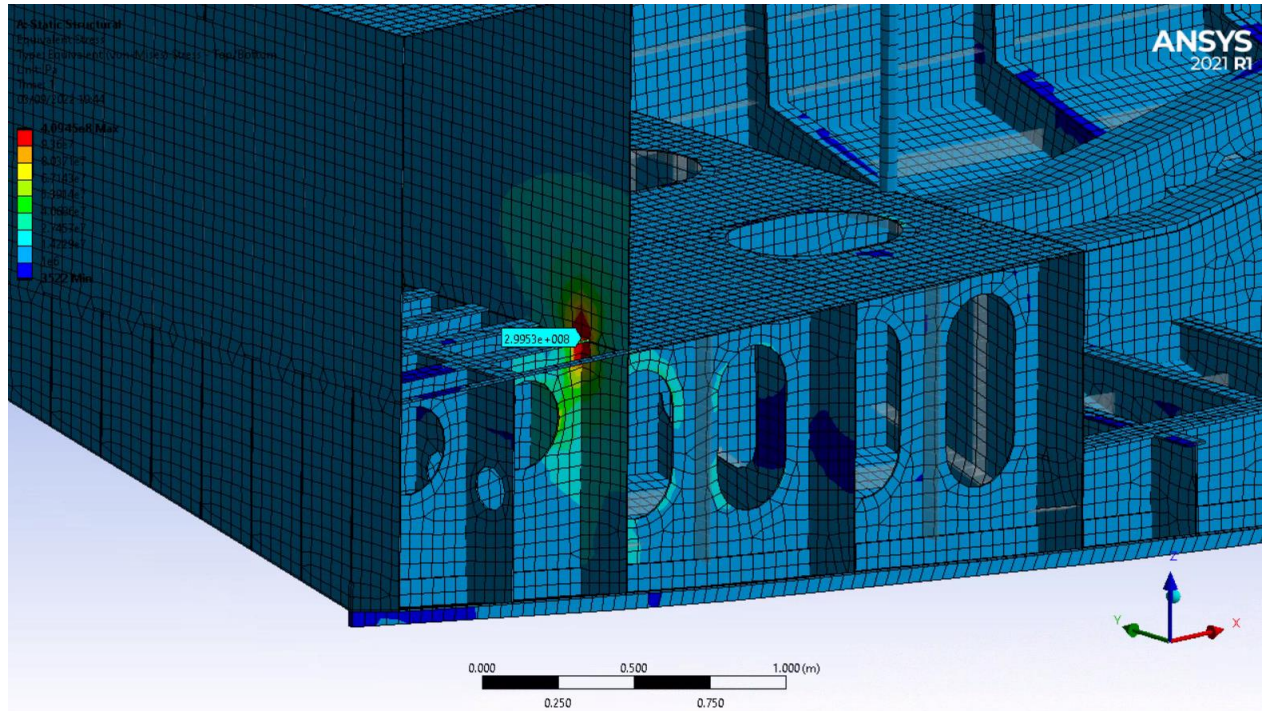
Εικόνα 58: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises

Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στον κόμβο C όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην στεγανή φρακτή σύγκρουσης.



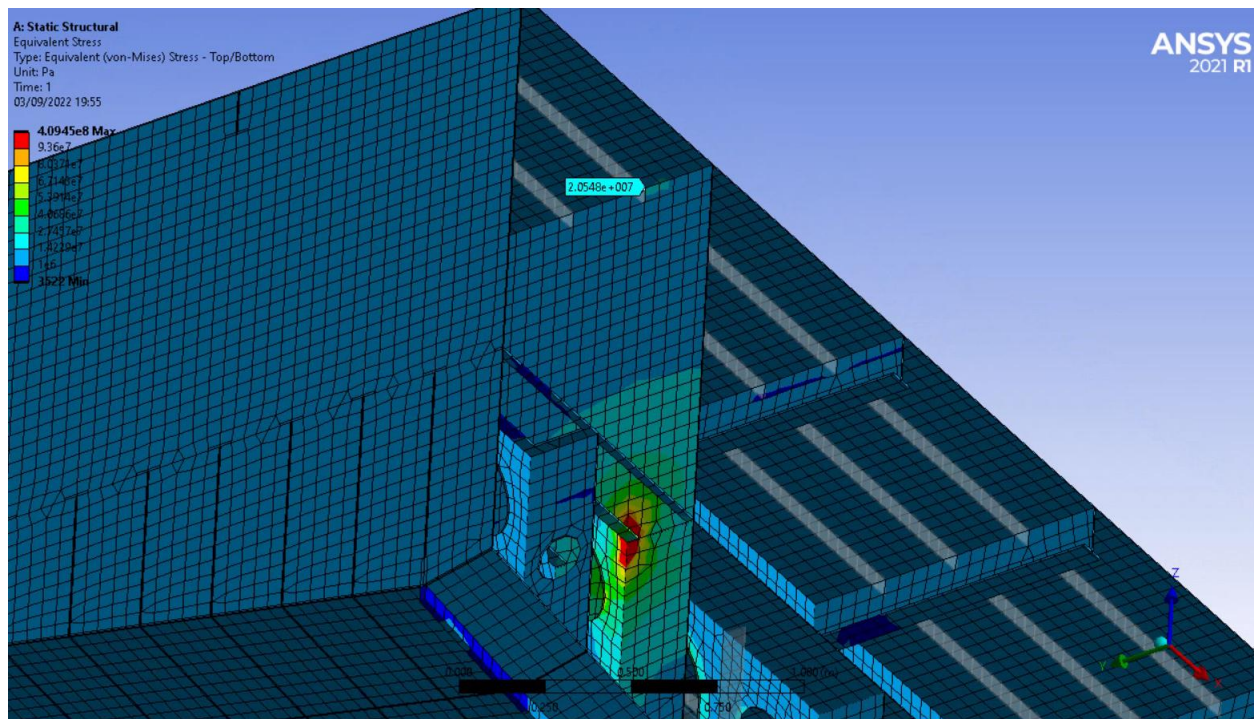
Εικόνα 59: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises στην συνοριακή συνθήκη C

Τοπική μέγιστη τιμή $299.53 \text{ MPa} > 93.6 \text{ MPa}$ εμφανίζεται στον κόμβο A όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή.



Εικόνα 60: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη τάση von Mises στην συνοριακή συνθήκη A

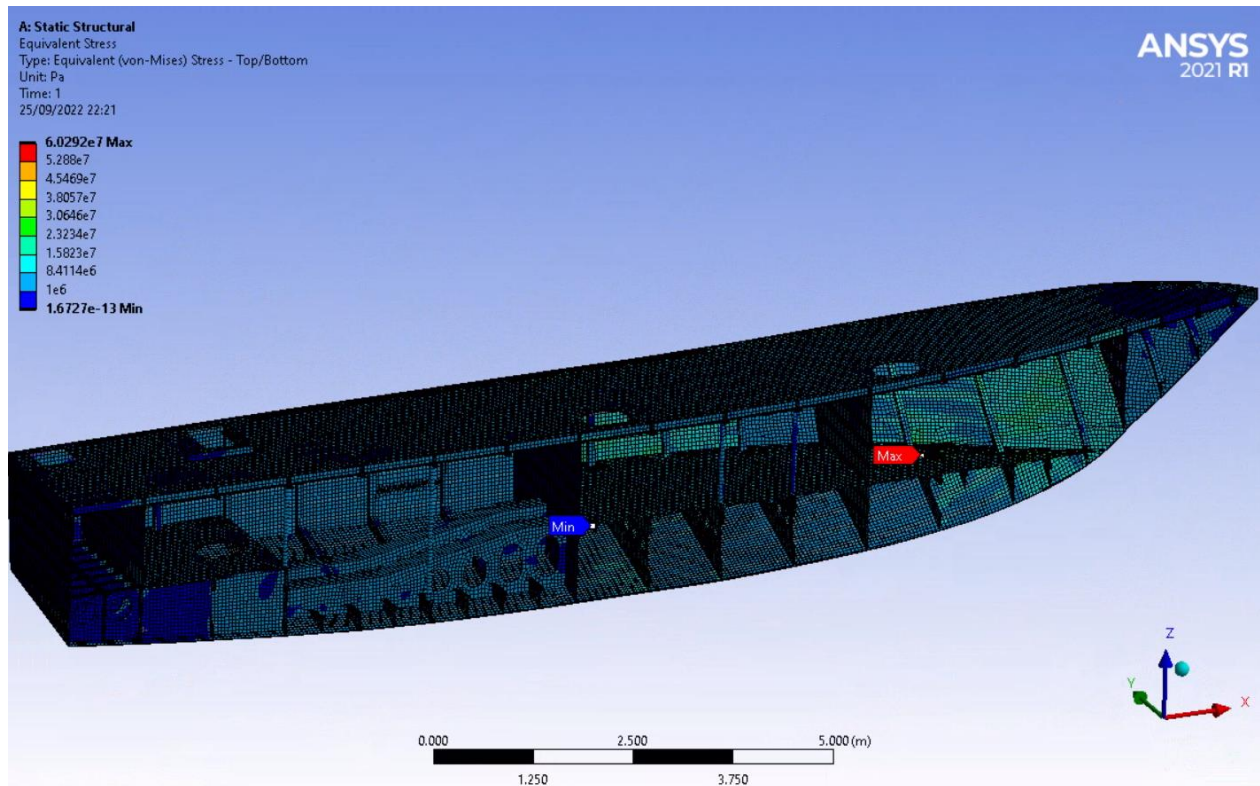
Στον κόμβο B εφαρμογής περιορισμού μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή η τιμή της μέγιστης τάσης von Mises είναι $20.548 \text{ MPa} < 93.4 \text{ MPa}$.



Εικόνα 61: Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών – Τοπική μέγιστη τάση von Mises στη συνοριακή συνθήκη Β

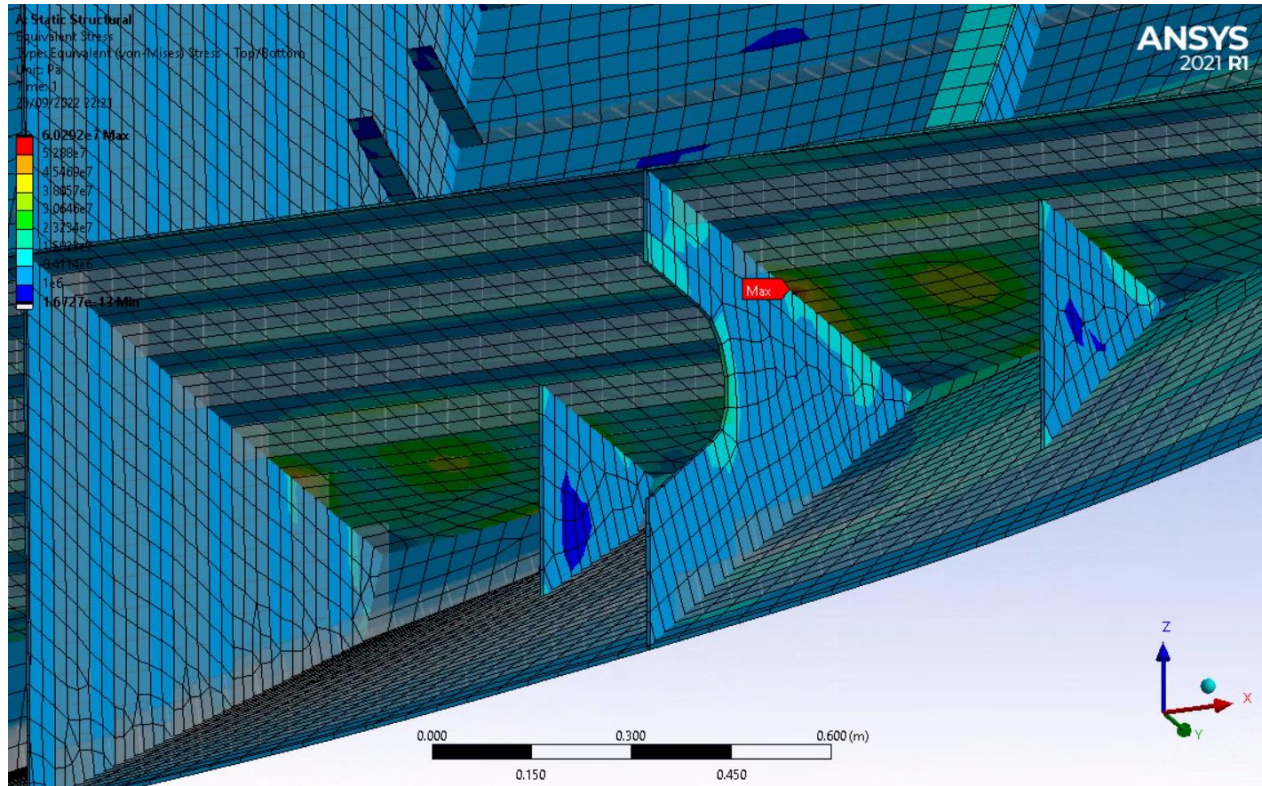
3.3.3.2 Σύμφωνα με το Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών

Για τις συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την Περίπτωση 2, παρατηρείται μέγιστη τάση von Mises κάτω του επιτρεπόμενου ορίου με τιμή $60.292 \text{ MPa} < 93.4 \text{ MPa}$ και μέση τιμή μέγιστων τάσεων von Mises 3.6744 MPa .



Εικόνα 62: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises

Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο κατάστρωμα άνω των δεξαμενών διπυθμένων, στο σημείο όπου η διαμήκης ενίσχυση δεν συνεχίζει πέραν της έδρας του νομέα 23.

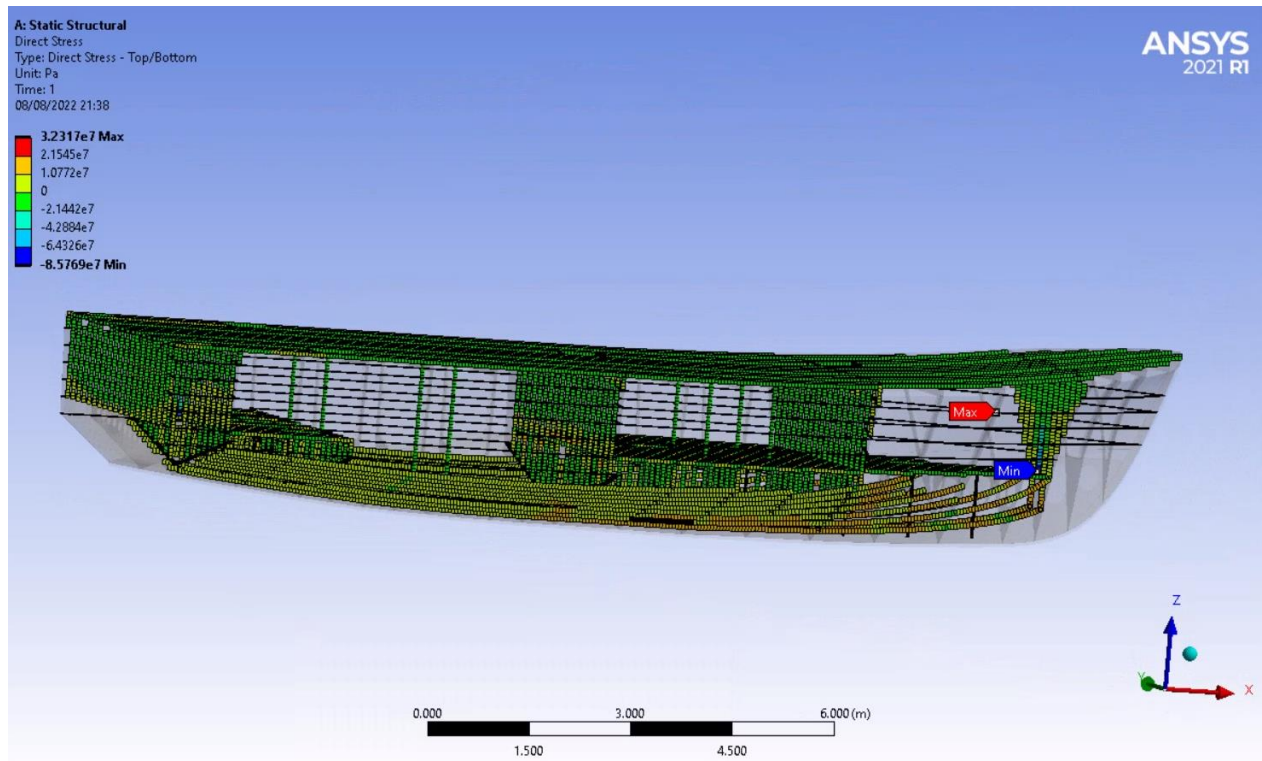


Εικόνα 63: Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών - Μέγιστη τάση von Mises

3.3.4 Αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού

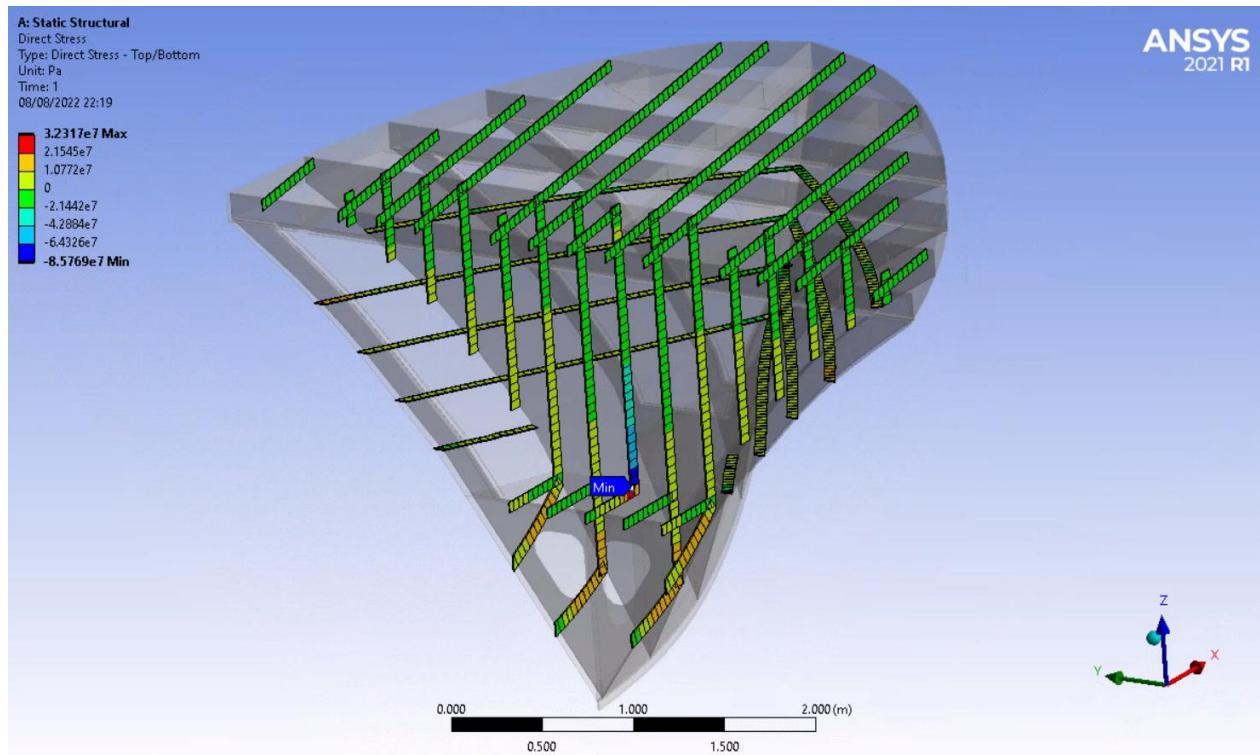
3.3.4.1 Σύμφωνα με την Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών

Οι αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού είναι εντός του επιτρεπόμενου ορίου των 93.4 MPa, με μέγιστη εφελκυστική τάση 32.317 MPa, μέγιστη θλιπτική 85.769 MPa και μέση τιμή 1.1312 MPa θλιπτική.



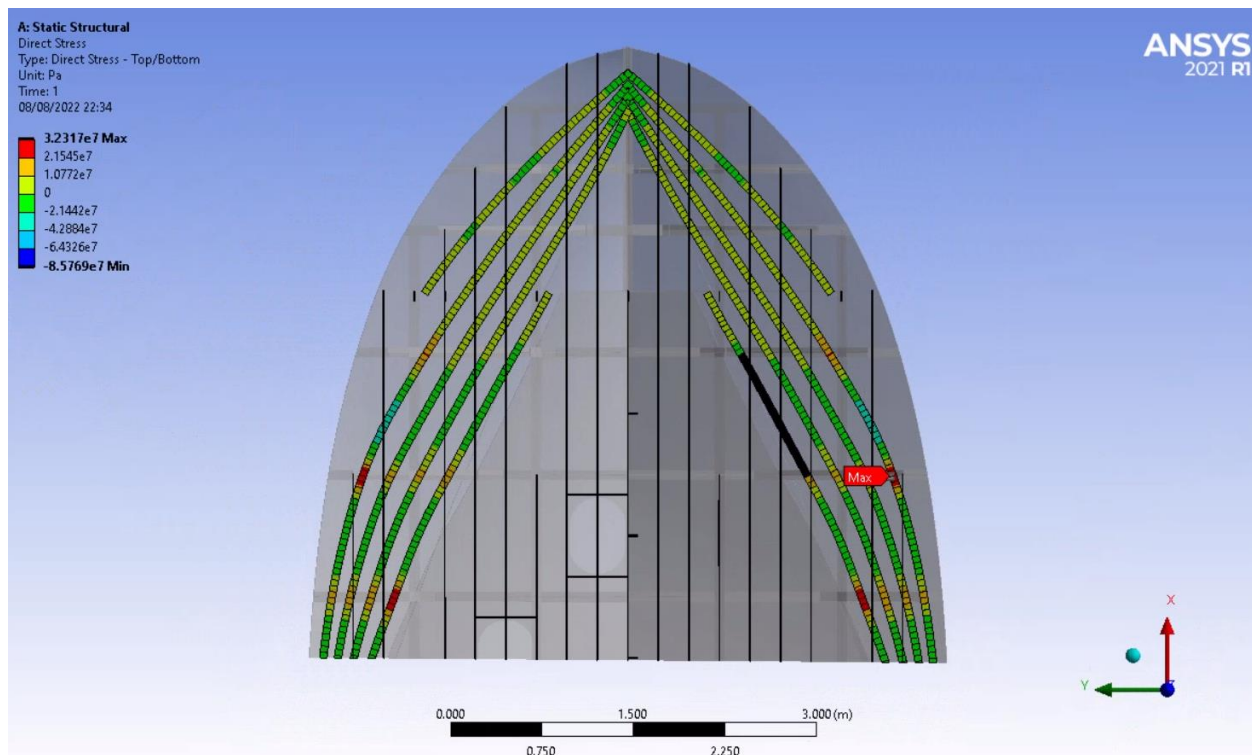
Εικόνα 64: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών - Αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού

Η μέγιστη θλιπτική αξονική τάση εμφανίζεται σε κατακόρυφη ενίσχυση της φρακτής σύγκρουσης, στο σημείο C εφαρμογής συνοριακής συνθήκης.



Εικόνα 65: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στα στοιχεία δοκού

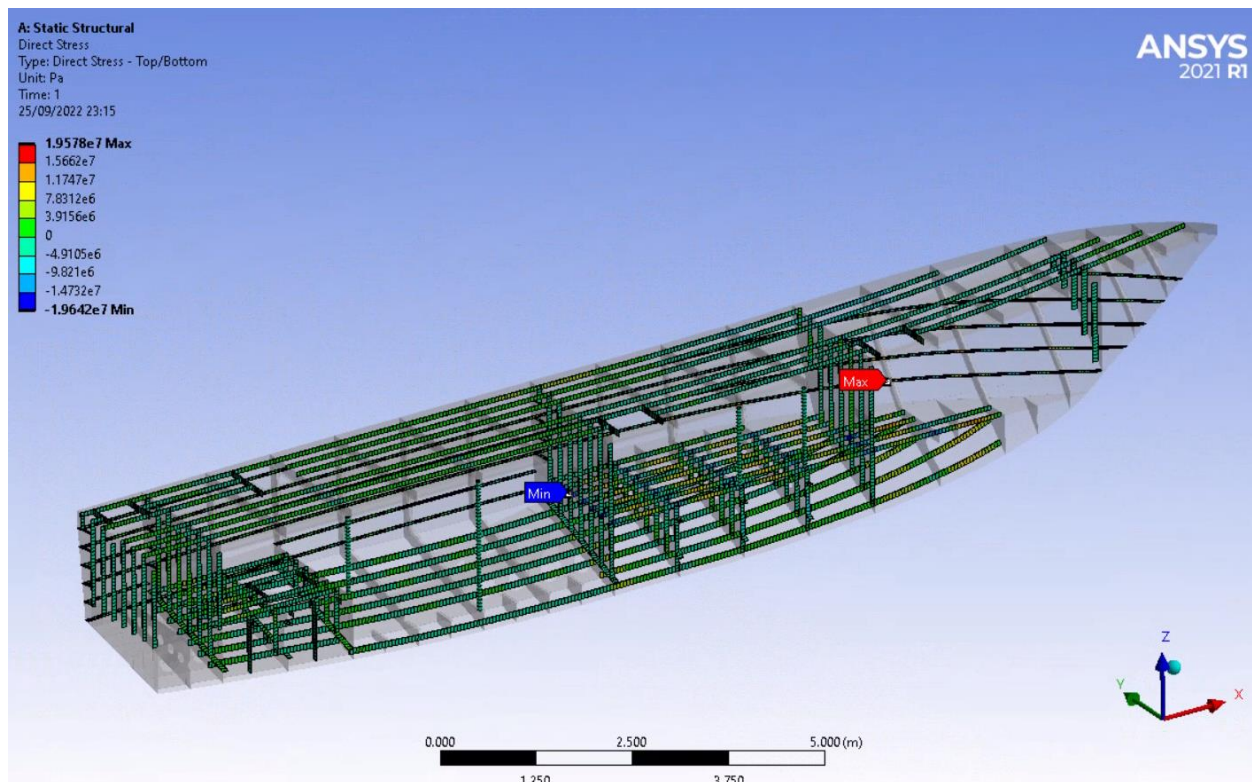
Η μέγιστη εφελκυστική εμφανίζεται σε διάμηκες πλευρικό ενισχυτικό.



Εικόνα 66: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική εφελκυστική τάση στα στοιχεία δοκού

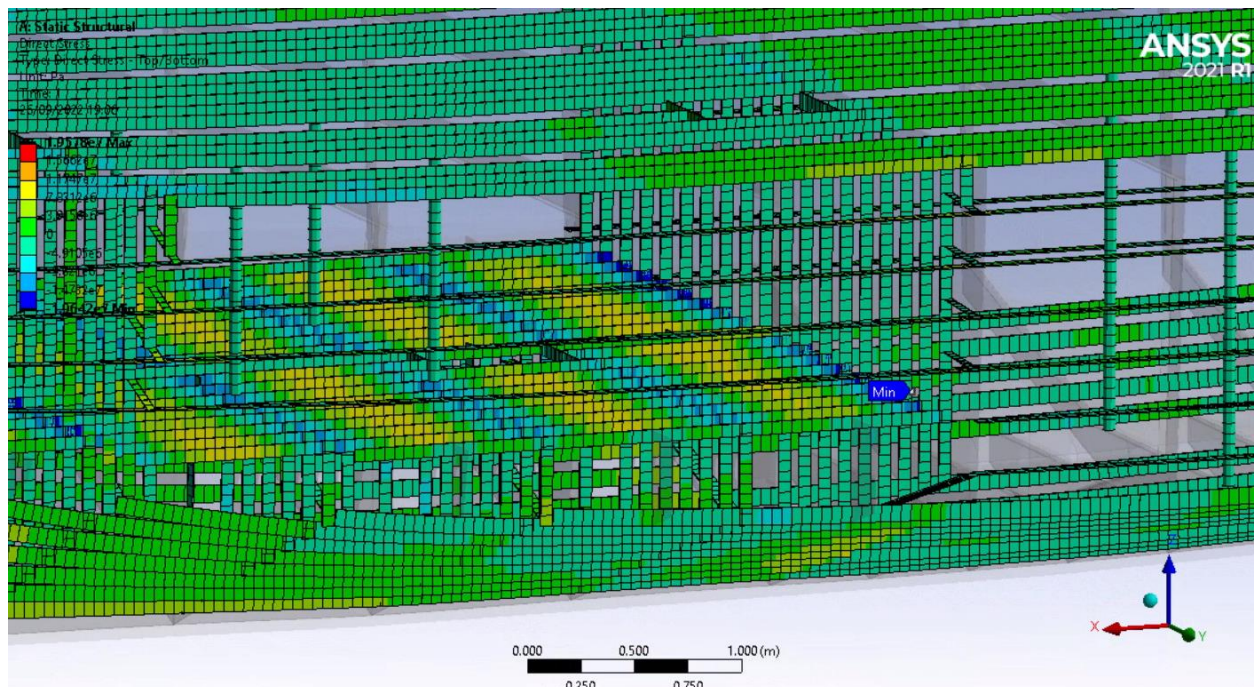
3.3.4.2 Σύμφωνα με την Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών

Οι αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού είναι εντός του επιτρεπόμενου ορίου των 93.4 MPa, με μέγιστη θλιπτική τάση 19.642 MPa, μέγιστη εφελκυστική 19.578 MPa, και μέση τιμή -0.59988 MPa, θλιπτική.



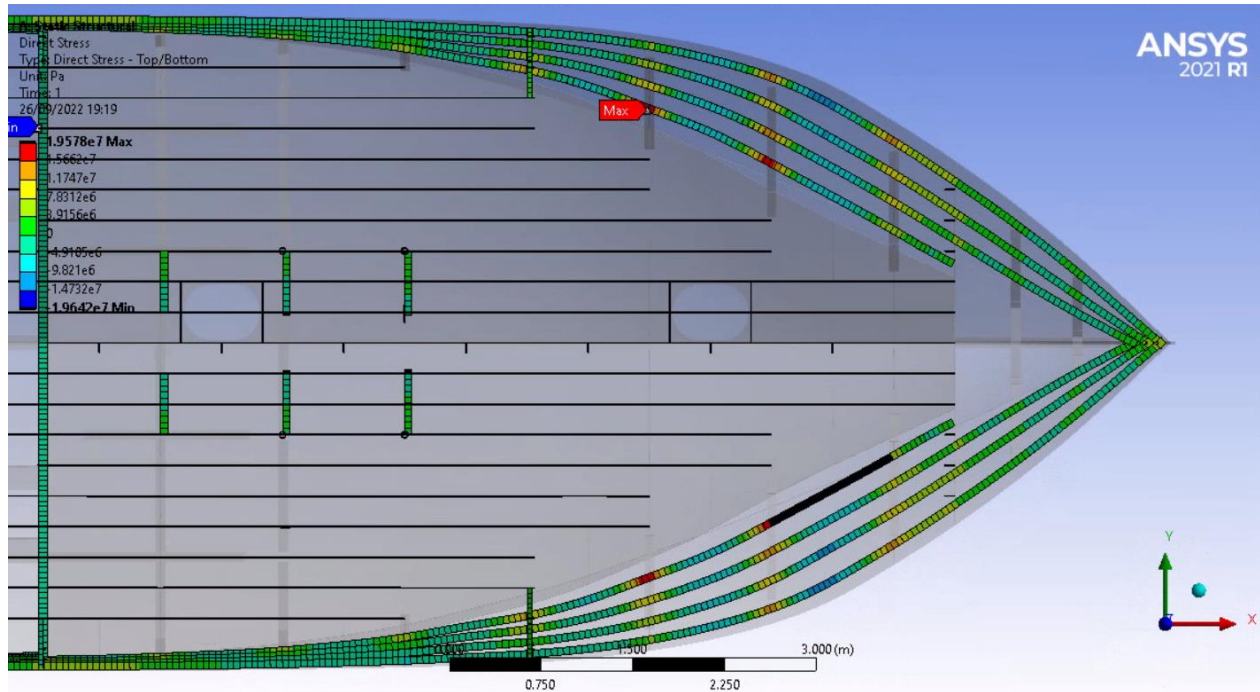
Εικόνα 67: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών - Αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού

Η μέγιστη θλιπτική τάση εμφανίζεται στα διαμήκη ενισχυτικά του καταστρώματος άνω των δεξαμενών διπυθμένων στην προραία φρακτή του μηχανοστασίου.



Εικόνα 68: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στα στοιχεία δοκού

Η μέγιστη τιμή εφελκυστικής τάσης εμφανίζεται στα διαμήκη πλευρικά ενισχυτικά.

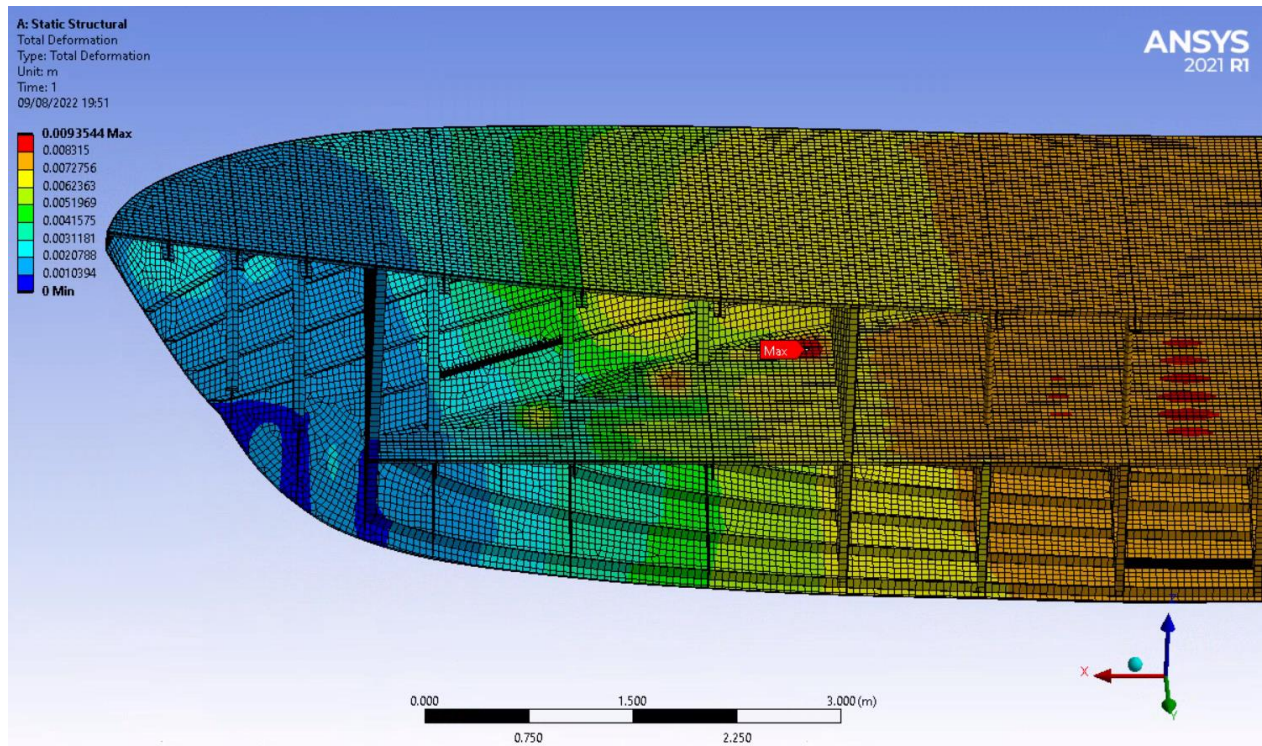


Εικόνα 69: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη αξονική εφελκυστική τάση στα στοιχεία δοκού

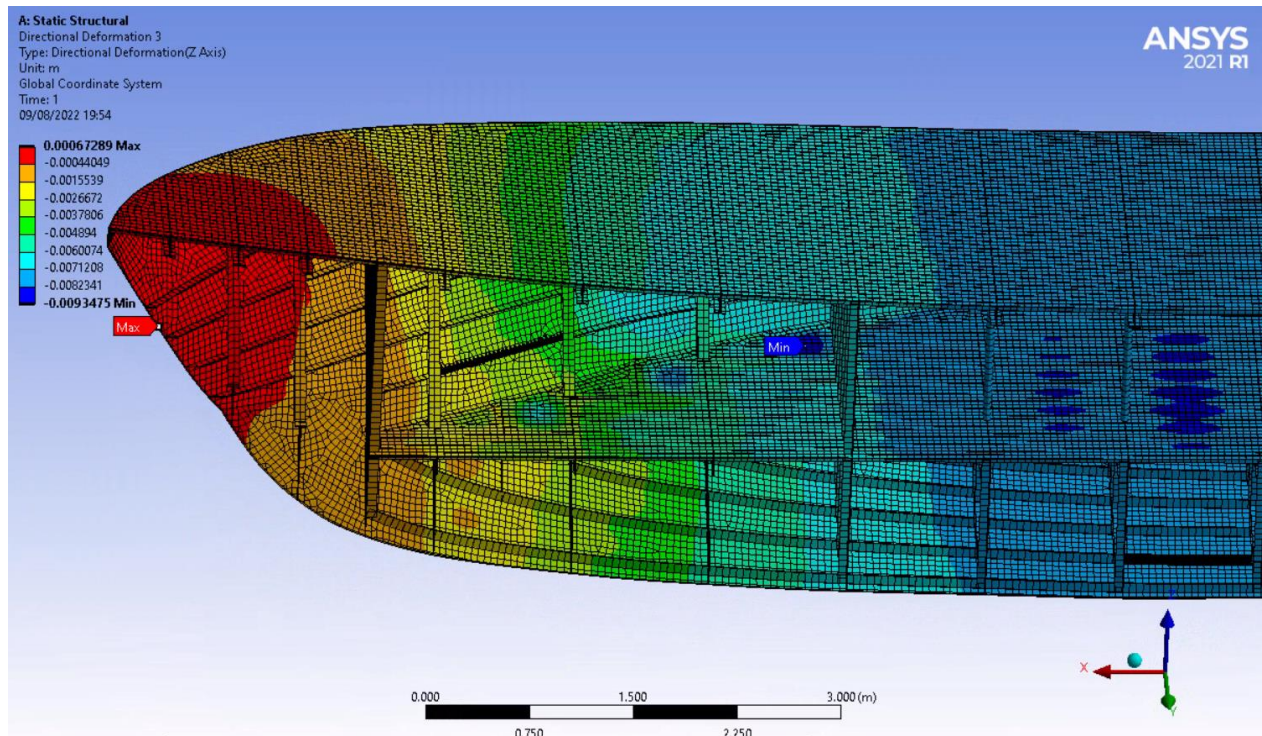
3.3.5 Παραμορφώσεις

3.3.5.1 Σύμφωνα με την Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών

Η μέγιστη ολική παραμόρφωση είναι 9.354 mm, η οποία οφείλεται σε παραμόρφωση στην κατακόρυφη διεύθυνση Z.

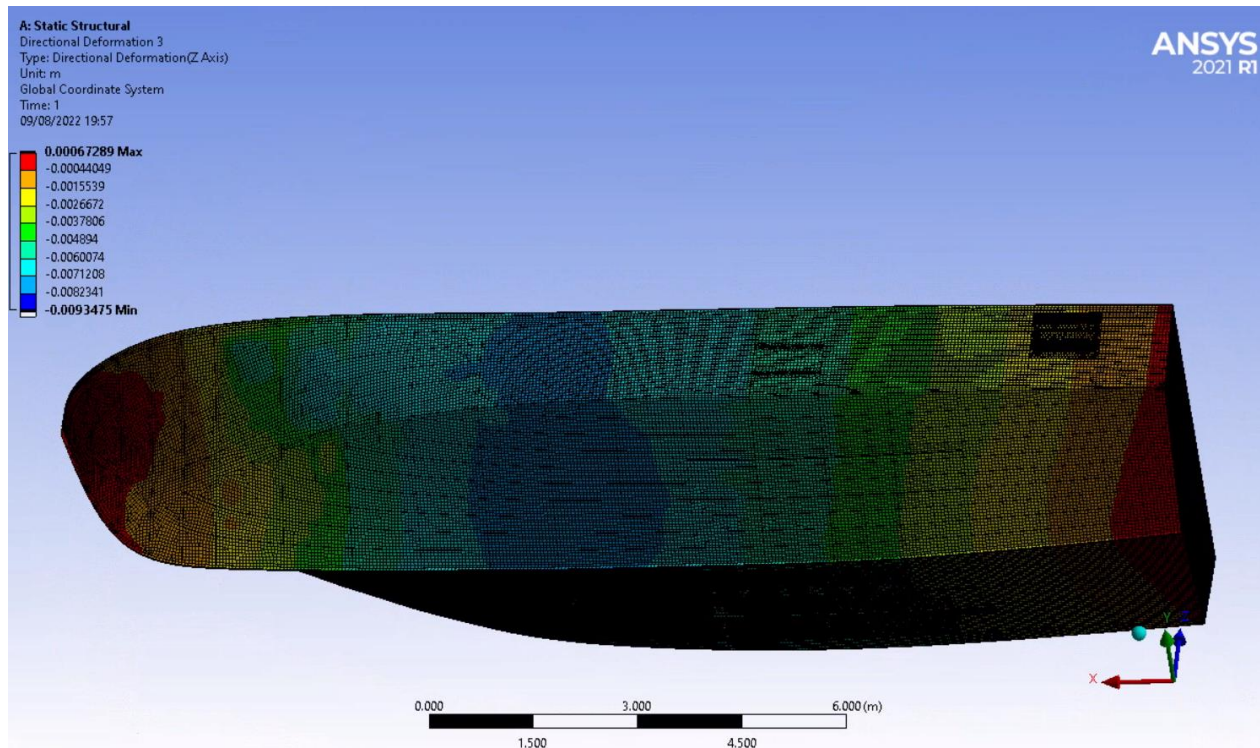


Εικόνα 70: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη ολική παραμόρφωση



Εικόνα 71: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστες παραμορφώσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα.

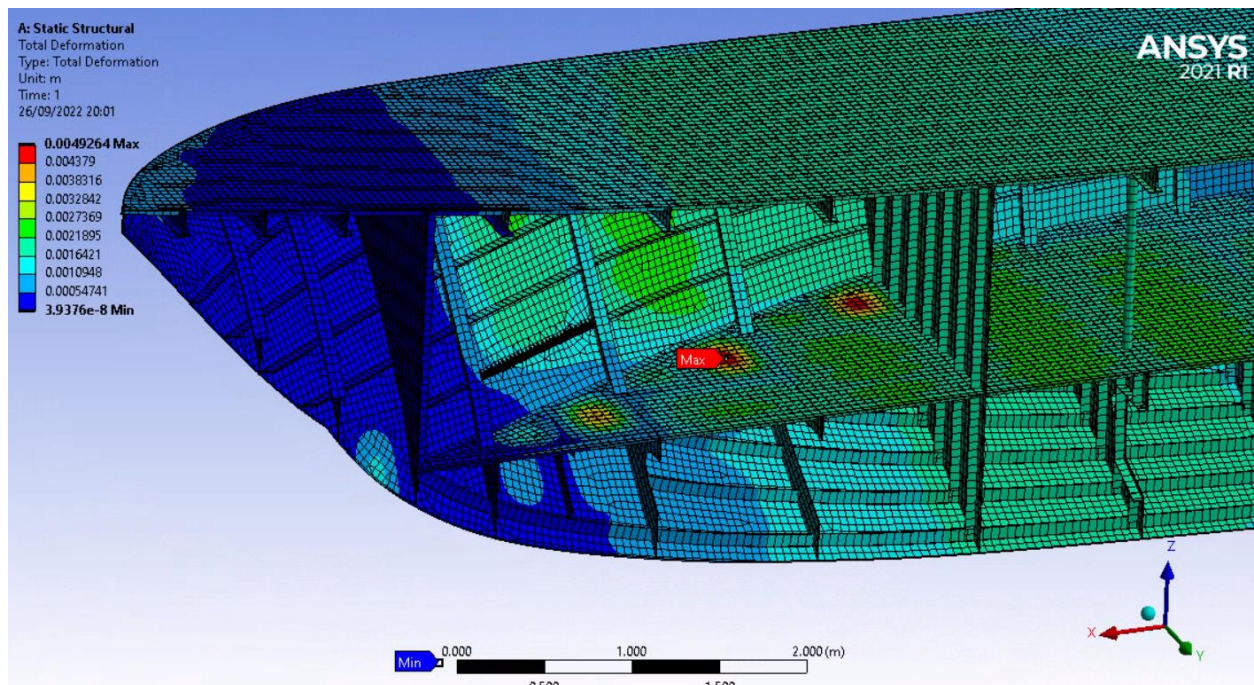
Από την παραμόρφωση του μοντέλου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση παρατηρείται sagging με βύθιση στο μέσο του πλοίου και σταθερό το πρωραίο και πρυμναίο άκρο (boundary conditions).



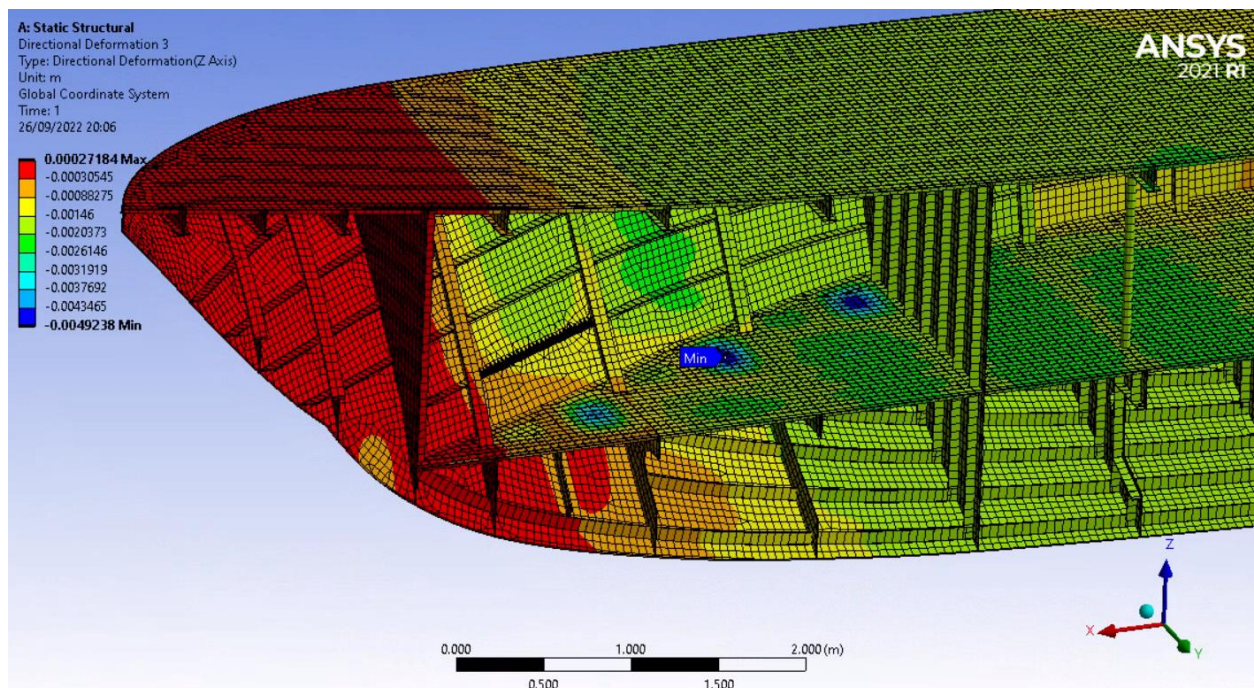
Εικόνα 72: Περίπτωση 1 των συνοριακών συνθηκών – Παραμόρφωση κατά τον κατακόρυφο άξονα, sagging.

3.3.5.2 Σύμφωνα με την Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών

Η μέγιστη ολική παραμόρφωση είναι 4.9264 mm, η οποία οφείλεται σε παραμόρφωση στην κατακόρυφη διεύθυνση Z.

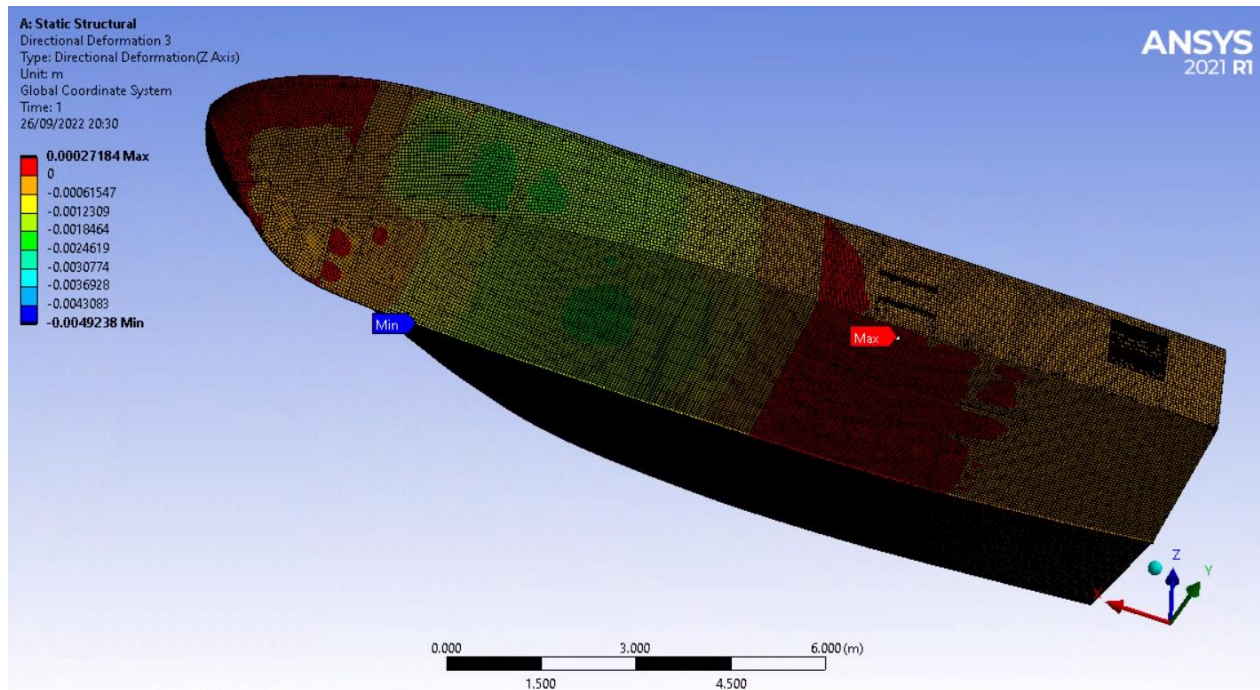


Εικόνα 73: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστη ολική παραμόρφωση



Εικόνα 74: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Μέγιστες παραμορφώσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Εδώ δεν παρατηρείται sagging στο σύνολο του σκάφους, παρά μια βύθιση μεταξύ των περιοχών εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών, με περιορισμό μετατόπισης στην προραία εγκάρσια φρακτή του μηχανοστασίου και την εγκάρσια φρακτή σύγκρουσης.



Εικόνα 75: Περίπτωση 2 των συνοριακών συνθηκών – Παραμόρφωση κατά τον κατακόρυφο άξονα.

3.4 Συμπεράσματα

Παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας XIII: Συνοπτικά αποτελέσματα ανάλυσης και επιτρεπόμενα όρια

	Αξονική τάση (Mpa)		Διατμητική τάση (Mpa)	Τάση von Mises (Mpa)
	Στοιχεία κελύφους	Στοιχεία δοκού	Στοιχεία κελύφους	Στοιχεία κελύφους
Μέγιστη τιμή για την Περίπτωση 1 συνοριακών συνθηκών	419.71	85.77 (θλιπτική)	209.85	409.46
Μέγιστη τιμή για την Περίπτωση 2 συνοριακών συνθηκών	68.90	19.64 (θλιπτική)	34.45	60.29
Επιτρεπόμενη τιμή ανάλυσης ολικού μοντέλου του πλοίου	87.5		55	110
Επιτρεπόμενη τιμή ανάλυσης μοντέλου τμήματος πλοίου		93.6		93.6
Επιτρεπόμενη τιμή τοπικής ανάλυσης λεπτομερειών		140.4		140.4

Παρατηρήσεις:

- Η επιλογή πυκνού πλέγματος, (μέγεθος στοιχείου 5 cm) οδηγεί σε λεπτομερείς κατανομές τάσεων και παραμορφώσεων ώστε να αναγνωριστούν τα σημεία συγκέντρωσης και να αξιολογηθούν, να αναδειχθούν τα σημεία που αδυνατεί η κατασκευή και χρίζει ενσωμάτωσης τοπικών ενισχύσεων.
- Για την Περίπτωση 1 οι μέγιστες τιμές τάσεων στα στοιχεία κελύφους παρατηρούνται στον κόμβο C, σημείο εφαρμογής περιορισμού μετατόπισης στην στεγανή φρακτή σύγκρουσης. Το δεύτερο τοπικό μέγιστο εμφανίζεται στον κόμβο A, όπου εφαρμόζεται περιορισμός μετατόπισης στην πρυμναία εγκάρσια στεγανή φρακτή. Εκτός των δύο αυτών σημείων συγκέντρωσης τάσεων τα λοιπά αποτελέσματα είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Η μέγιστη θλιπτική αξονική τάση στα στοιχεία δοκού εμφανίζεται σε κατακόρυφη ενίσχυση της

φρακτής σύγκρουσης, στο σημείο C εφαρμογής συνοριακής συνθήκης με συντελεστή αξιοποίησης τοπικά στο 91.6 %.

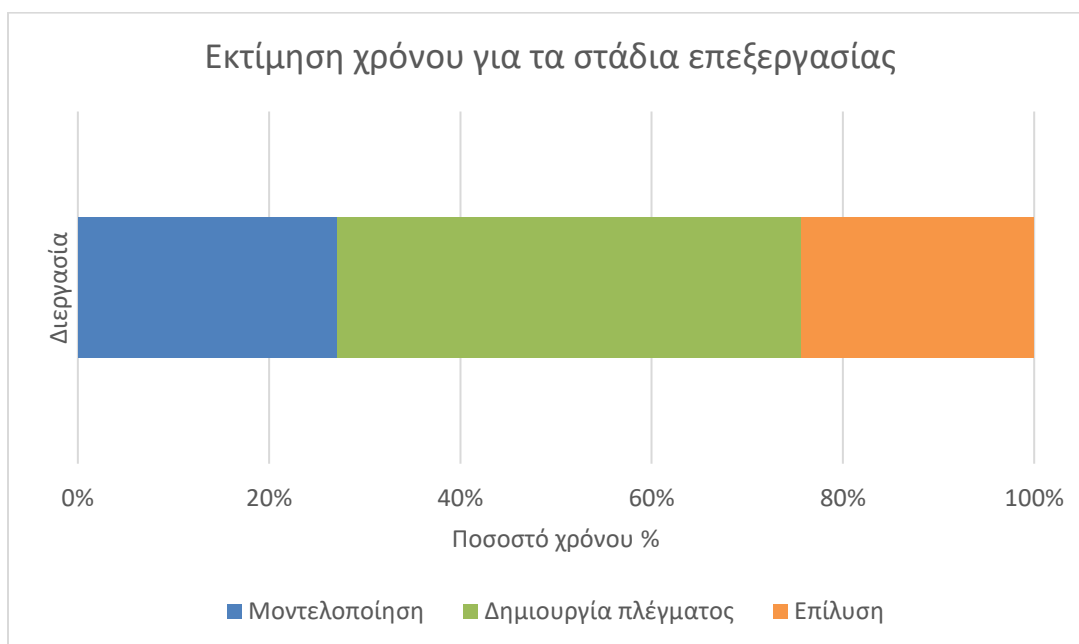
- Για την Περίπτωση 2 η μέγιστη τιμή τάσης στα στοιχεία κελύφους εμφανίζεται στο κατάστρωμα άνω των δεξαμενών διπυθμένων, στο σημείο όπου η διαμήκης ενίσχυση δεν συνεχίζει πέραν της έδρας του νομέα 23. Στην πραγματικότητα η τιμή αυτή είναι μικρότερη λόγω της ύπαρξης μπρακέτου ενίσχυσης που παραλήφθηκε στην σχεδίαση και διαμόρφωσης στο άκρο της υπάρχουσας λάμας με snipped end. Οι μέγιστες αξονικές τάσεις στα στοιχεία δοκού διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα με συντελεστή αξιοποίησης περί το 21%.
- Είναι φανερό πως η επιλογή των συνοριακών συνθηκών στήριξης της κατασκευής επηρεάζουν τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων, οδηγώντας σε αποκλεισμό των αποτελεσμάτων της περίπτωσης 1 στις ζώνες εφαρμογής τους ως μη εφαρμόσιμα. Για τα λοιπά σημεία τα αποτελέσματα τάσεων των δύο περιπτώσεων στις ίδιες ζώνες είναι στην ίδια τάξη μεγέθους. Ομοίως τα τοπικά μέγιστα των παραμορφώσεων είναι στις ίδιες ζώνες, με τις τιμές όμως της περίπτωσης 2 να είναι μικρότερες λόγω της εφαρμογής στήριξης στην εμπρόσθια φρακτή του μηχανοστασίου, περί το μέσο του σκάφους, περιορίζοντας την βύθιση (sagging) της περίπτωσης 1.
- Σύμφωνα με τα παραπάνω, για το επιλεγθέν υλικό και τις εκτιμώμενες καταστάσεις φόρτισης, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς από τον DNV, φαίνεται να ικανοποιούνται τα δυσμενέστερα κριτήρια επιτρεπόμενων ορίων αποδοχής για την στατική ανάλυση του συνολικού μοντέλου με υψηλή ανάλυση διακριτοποίησης πλέγματος.
- Το αλουμίνιο 6082 T6 κρίνεται ικανοποιητικό για χρήση στην εφαρμογή του επιβατηγού σκάφους, προσφέροντας χαμηλό βάρος κατασκευής, άρα και αντίσταση γάστρας, κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές καυσαερίων. Σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή σε διάβρωση παρέχει χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Οι εκτιμώμενοι χρόνοι επεξεργασίας παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακας XIV.

Πίνακας XIV: Ποσοστό εκτιμώμενου χρόνου ανά διεργασία

Διεργασία	Εκτιμώμενο Ποσοστό χρόνου (%)
Μοντελοποίηση	27
Ανάπτυξη πλέγματος ΠΣ / Προ-επεξεργασία	49
Επίλυση / Μετ-επεξεργασία	24

Και σε γράφημα



Εικόνα 76: Ποσοστά εκτιμώμενου χρόνου ανά στάδιο επεξεργασίας

Παρατηρείται πως σχεδόν ο μισός χρόνος επεξεργασίας χρειάστηκε για την δημιουργία πλέγματος με τις συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις, ακολουθεί ο χρόνος τρισδιάστατης αναπαράστασης του μοντέλου περί το $\frac{1}{4}$ και στο υπόλοιπο αντιστοιχεί ο χρόνος ανάλυσης και μετ-επεξεργασίας ώστε να προσδιοριστεί η ζητούμενη λύση.

3.5 Προτάσεις για επέκταση εργασίας

Το εξεταζόμενο μοντέλο αναπαράστασης του επιβατικού σκάφους στα πλαίσια της παρούσας εργασίας περιορίζεται στα δομικά του στοιχεία έως το κυρίως κατάστρωμα, ενώ η πλήρης μοντελοποίηση της υπερκατασκευής, με τους χώρους ενδιαίτησης επιβατών και πιλοτηρίου, καθώς και τον βασικό εξοπλισμό, θα απέδιδε την απόκριση συμπεριφοράς του συνόλου του πλοίου, ώστε να εκτιμηθούν τοπικές ενισχυτικές διατάξεις.

Η ανάλυση θα μπορούσε να επεκταθεί σε έλεγχο λυγισμού στα δομικά στοιχεία του πλοίου και σε έλεγχο ικανοποίησης απαιτήσεων ελάχιστης διαστασιολόγησης διατομών, παχών αποστάσεων των μελών (minimum net scantling requirements). Επίσης, μπορεί να εξεταστεί η επίδραση δυναμικών φορτίσεων, όπως οι υδροδυναμικές πιέσεις λόγω κυματισμών και ανέμου για τις προδιαγραφόμενες καταστάσεις θάλασσας, καθώς και φορτίων λειτουργίας εξοπλισμού όπως οι ταλαντώσεις της κύριας μηχανής και του αξονικού συστήματος.

Τέλος, επιδέχεται διερεύνηση η δυνατότητα υιοθέτησης αμιγώς ηλεκτρικής προωστήριας εγκατάστασης και η μελέτη εγκατάστασης συστήματος παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στο λιμάνι αναφοράς και διασύνδεσης χρήσης του επιβατικού, προς την κατεύθυνση της μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος για πιο πράσινη ναυτιλία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Η ανάπτυξη των θαλάσσιων μεταφορών μικρών αποστάσεων στην Ευρώπη: Μια δυναμική εναλλακτική λύση στην αλυσίδα των βιώσιμων μεταφορών. Δεύτερη διετής έκθεση προόδου, 1999.
2. Eurostat, Maritime transport statistics 2019
3. DNV, Class guideline - DNVGL-CG-0127, Finite element analysis, 2020.
4. Davis J, Aluminum and Aluminum Alloys, Alloying: Understanding the Basics. ASM International 2001, 351-366.
5. Kaufman G, Introduction to Aluminum Alloys and Tempers. ASM International. 2000, 1st edition
6. Φαράντος Χ, Μελέτη ψαθυροποίησης υδρογόνου ανομοιογενών συγκολλημένων ελασμάτων AA6082-AA5083 μέσω της τεχνικής δια τριβής με ανάδευση. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2018.
7. Σπετσιέρης Α, Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση λεπτών ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου AA5083-H111 και AA7075-T651. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2022, 14-17.
8. Εξάρχου Σ, Αξιολόγηση της επιδεκτικότητας κοίλανσης αλουμινίου AA3003 με μικροδομή προερχόμενη από συνεχή-χύτευση-σε-έλασμα (Twin Roll Casting) ή κατόπιν χύτευσης σε πλίνθωμα (Direct Casting) και θερμής έλασης. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2018, 11-12.
9. DNV, Rules for classification – Ships, Part 3 Hull, Chapter 3 Structural design principles, 2021.
10. Chandrupatla T, Belegundu A, Introduction to Finite Elements in Engineering. Prentice Hall 2002, 3rd edition, 2-17.
11. DNV, Rules for classification - Ships, Part 3 Hull Chapter 1 General principles, 2020.
12. Logan D, A First Course in the Finite Element Method. Thomson 2007, 4th edition.
13. Rao S, Analysis of Plates. The Finite Element Method in Engineering 2018.

14. Σαμουηλίδης Μ, Ανυφαντής Κ, Η Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων στη Στατική & Δυναμική Ανάλυση Κατασκευών. Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020.
15. DNV, Class guideline- DNV-CG-0138, Direct strength analysis of hull structures in passenger ships, 2021.
16. DNV, Rules for classification - Ships, Part 5 Ship types Chapter 4 Passenger ships, 2021.
17. DNV, Rules for classification - Ships, Part 3 Hull Chapter 7 Finite element analysis, 2020.