

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΤΑΧΥΠΛΟΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΓΚΕΡΤΣΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Διπλωματική Εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής ως
μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στις
Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία

Αθήνα, Δεκέμβριος 2020

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE



MASTER PROGRAM IN
ADVANCED TECHNOLOGIES IN NAVAL ARCHITECTURE
AND MARINE ENGINEERING

STRUCTURAL DESIGN OF ALUMINUM HIGH SPEED CRAFT
ACCORDING TO CLASSIFICATION SOCIETY RULES AND
FINITE ELEMENT ANALYSIS

GKERTSOS NIKOLAOS

Master Thesis submitted to the Department of Naval Architecture of the University of West Attica in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Advanced Technologies in Naval Architecture and Marine Engineering

Athens, Greece, December 2020



Σελίδα Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή που ορίστηκε από τη ΓΣΕΣ του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, της σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής σύμφωνα με τον κανονισμό λειτουργίας του προγράμματος Μεταπτυχιακών σπουδών «Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία»

Τα μέλη της επιτροπής ήταν:

- Θεοδουλίδης Αλέξανδρος (Επιβλέπων)

- Πολίτης Κωνσταντίνος

- Δημητρέλλου Σωτηρία

Ημερομηνία εξέτασης: 25.01.2021

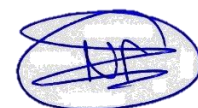
Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γκέρτσος Νικόλαος του Σωτηράκη, με αριθμό μητρώου 1805 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία» του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Ο δηλών



Γκέρτσος Νικόλαος



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου που βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας και ειδικότερα τον κ. Παναγιώτη Αλούρδα για την πολύτιμη συνεισφορά του.

Ξεχωριστές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αλέξανδρο Θεοδουλίδη για την άμεση και ουσιαστική καθοδήγηση του σε όλες τις φάσεις της συγγραφής αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και στην κοπέλα μου για την στήριξη τους όλο αυτό το διάστημα. Χωρίς αυτούς δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΤΑΧΥΠΛΟΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΝΗΟΓΝΩΝΟΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σημαντικοί Όροι: Αντοχή, Νηογνώμονας, DNV, Αλουμίνιο, Ταχύπλοο, Σκάφος, Πεπερασμένα στοιχεία, ANSYS

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής ενός αλουμινένιου ταχύπλοου σκάφους πλαναρίσματος με χρήση των κανονισμών των νηογνώμωνων (DNV GL) καθώς και με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Η ιδιαιτερότητα υπολογισμού της αντοχής στα ταχύπλοα σκάφη εμφανίζεται στην γεωμετρία της γάστρας. Η μορφή της γάστρας θέτει όλους τους περιορισμούς κατά τις διάφορες φάσεις της σχεδίασης. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτό καταλαβαίνουμε πως είναι δύσκολο να υπάρξει μια συγκεκριμένη γενική μεθοδολογία που να καλύπτει ακριβώς τις απαιτήσεις του κάθε σκάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις οι κανονισμοί των νηογνώμωνων να οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση των κύριων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του σκάφους. Η σημασία της έρευνας αυτής είναι η περαιτέρω μελέτη της αντοχής τέτοιου είδους σκαφών με νέες μεθόδους. Ως γνωστών η επιλογή των δομικών στοιχείων ενός σκάφους γίνεται με επαναληπτική διαδικασία, για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού μορφής-πάχους. Με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων θέτουμε έναν νέο στόχο στην εύρεση του κατάλληλου δομικού στοιχείου έχοντας ένα συγκεκριμένο μοντέλο που αφορά μόνο το υπό εξέταση σκάφος. Ο σκοπός της μελέτης αυτής είναι η καταγραφή των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων, η ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς γίνονται διάφορες υποθέσεις στο κομμάτι της προετοιμασίας του μοντέλου, και τέλος η δυνατότητα βελτίωσης της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



STRUCTURAL DESIGN OF ALUMINUM HIGH SPEED CRAFT WITH RULES OF CLASSIFICATION SOCIETY AND FINITE ELEMENT ANALYSIS

Keywords: Structural design, Classification Society, DNV, Aluminum, High-Speed, Craft, Finite Element Analysis, Inertia Relief, ANSYS

Abstract

This thesis discusses the structural design of an aluminum high-speed planning craft with rules of classification society and with Finite element analysis.

Aluminum is widely used as a construction material because of its intrinsic properties of lightness and corrosion resistance. Pure aluminum is low-strength metal but thanks to the addition of alloying elements it changes its physical and mechanical properties to meet requirements of a large number of applications.

The hull shape sets all the constraints during the design stages and makes this kind of crafts unique as far as structural calculation is concerned. Having that in mind, it is difficult to have one general methodology which meets the specific requirements of every craft and as a result, the rules of classification societies oversize main structural members of the crafts. For this reason, the use of finite element analysis will be used to check the hull construction in further detail. A breakdown of the finite element analysis and its steps through the post-processing can be found on section 2 with a special reference to the inertia relief BC. Next, the basic concept for the structural design-limit pressures will be mentioned and subsequently the general concept which will be followed during the calculations for the classification society. All the structural calculations will be performed using DNVGL High Speed Light Craft rules. The selection of a structural member of a craft is done with an iterative process, to find the optimal shape-thickness combination. After that, the whole craft will be modeled in Rhinoceros and the surface model will then be imported in ANSYS.

The main purpose of this study is to record the results of the two methods and analyze the possibility of improving the construction. The outcome of this thesis is a fairly good optimization of the construction as we can reduce the thickness of 2 main shell plates (bottom, side). The main girder system of the bottom hull has low stresses and as a result it could be downscaled and gain more clear height inside the craft. The bottom secondary longitudinal stiffeners stresses are acceptable even though the brackets have not been modeled. Having a construction with no brackets keeps the heat affected zone from welding in low levels and also minimizing labor cost. In conclusion, FEA reveals local stress concentration areas contrary to the calculations performed by the rules.

Summing up all the above the final weight of the craft will be significantly less than that calculated by the rules. This gives a great advantage in this type of crafts which could be a bigger payload capability or a higher top speed.

Περιεχόμενα

Σελίδα Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής	iii
Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Εργασίας	iv
Ευχαριστίες	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
1. Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου	2
1.1 Ευθραυστότητα λόγω υδρογόνου.....	3
1.2 Κράματα αλουμινίου	4
1.2.1 Χρόμιο (Cr):	4
1.2.2 Χαλκός (Cu):	4
1.2.3 Μαγνήσιο (Mg):	4
1.2.4 Χαλκός και μαγνήσιο (Cu-Mg):.....	4
1.2.5 Μαγγάνιο (Mn):	4
1.2.6 Σκάνδιο (Sc):	5
1.2.7 Πυρίτιο (Si):	5
1.2.8 Ασήμι (Ag):	5
1.2.9 Κασσίτερος (Sn):	5
1.2.10 Τιτάνιο (Ti):	5
1.2.11 Ψευδάργυρος (Zn):	6
1.2.12 Ζιρκόνιο (Zr):	6
1.3 Σύστημα προσδιορισμού επεξεργασμένων κραμάτων.....	8
2. Θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Εισαγωγή στους πίνακες	12
2.3 Γενική διαδικασία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	14
2.3.1 Διακριτοποίηση και επιλογή τύπου στοιχείων	15
2.3.2 Επιλογή συνάρτησης μετατόπισης (displacement function).....	17
2.3.3 Ορισμός σχέσης παραμορφώσεων-μετατοπίσεων και τάσεων-παραμορφώσεων ..	17
2.3.4 Δημιουργία μητρώων ακαμψίας (element stiffness matrix) και των εξισώσεων	17
2.3.5 Συγκέντρωση των εξισώσεων των στοιχείων για την απόκτηση της συνολικής εξίσωσης, και εισαγωγή στις οριακές συνθήκες	18
2.3.6 Λύση για τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας (ή γενικευμένες μετατοπίσεις).....	19
2.3.7 Λύση για τις τάσεις και παραμορφώσεις των στοιχείων.....	19
2.3.8 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	19

2.3.9 Inertia Relief.....	19
3. Μέθοδος των Allen & Jones.....	20
4. Μέθοδος σχεδίασης των νηογνώμωνων	24
5. Υπολογισμοί βάσει νηογνώμονα	25
5.1 Γενικοί Συμβολισμοί	25
5.2 Κύρια χαρακτηριστικά	26
5.3 Συντελεστής κυματισμού	27
5.4 Υπολογισμός επιταχύνσεων	28
5.5 Υπολογισμός πιέσεων πυθμένα.....	34
5.6 Υπολογισμός πιέσεων πλευράς	37
5.7 Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης.....	39
5.8 Υπολογισμός φορτίσεων των girders	41
5.8.1 Crest landing	41
5.8.2 Hollow landing.....	42
5.8.3 Ροπή κάμψης για hogging και sagging	43
5.8.4 Διατμητικές δυνάμεις λόγω διαμήκου κάμψης.....	45
5.9 Υπολογισμός πάχους ελασμάτων	46
5.9.1 Συμβολισμοί.....	47
5.9.2 Ελάχιστα πάχη ελασμάτων.....	47
5.10 Υπολογισμός ενισχυτικών	51
5.11 Υπολογισμός κυρίων ενισχυτικών	54
5.11.1 Συμβολισμοί.....	54
5.11.2 Ελάχιστα πάχη κυρίων ενισχυτικών.....	54
5.11.3 Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος.....	56
5.11.4 Απαιτήσεις αντοχής	57
5.11.5 Υπολογισμός αντοχής των Web Frames.....	58
5.11.6 Υπολογισμός αντοχής Girder System	61
5.12 Υπολογισμός αντοχής των pillars	63
5.12.1 Συμβολισμοί.....	63
6. Μοντελοποίηση κατασκευής.....	66
7. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	71
7.1 Εισαγωγή.....	71
7.2 Ορισμός υλικού κατασκευής.....	72
7.3 Ορισμός πάχους ελασμάτων κατασκευής	74
7.4 Ορισμός πιέσεων μεταλλικής κατασκευής.....	79
7.5 Ορισμός οριακών συνθηκών κατασκευής.....	84



7.6 Διακριτοποίηση	85
7.7 Λύση προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων	88
7.8 Ανάλυση αποτελεσμάτων	95
8. Συμπεράσματα.....	105
9. Προτάσεις.....	106
10. Βιβλιογραφία.....	107

Πίνακες

Πίνακας 1: Καθαρότητα αλουμινίου [1]	2
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά στοιχεία κραμάτων [1]	7
Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες κοινών κραμάτων αλουμινίου [1].....	9
Πίνακας 4: Γενικές ιδιότητες κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου [1].....	9
Πίνακας 5: Χαρακτηρισμός κραμάτων αλουμινίου [1]	10
Πίνακας 6: Κύρια χαρακτηριστικά.....	26
Πίνακας 7: Τύπος σκάφους [5].....	26
Πίνακας 8: Μείωση συντελεστή κυματισμού [5]	27
Πίνακας 9: Ελάχιστα σημαντικά ύψη κύματος Hs [5].....	28
Πίνακας 10: Συντελεστής τύπου γάστρας [5]	28
Πίνακας 11: Συντελεστής C [5].....	29
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας επιταχύνσεων	31
Πίνακας 13: Πιέσεις σφυρόκρουσης πυθμένα	35
Πίνακας 14: Συνολικές πιέσεις slamming στον πυθμένα.....	36
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας πίεσης πλευράς.....	38
Πίνακας 16: Συντελεστής έντασης φορτίου [5]	39
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας υδροστατικής πίεσης κατά μήκος του σκάφους.....	40
Πίνακας 18: Ελάχιστες τιμές υδροστατικών πιέσεων ανά περιοχή [5].....	40
Πίνακας 19: Διαμήκης ροπή κάμψης (sagging)	42
Πίνακας 20: Διαμήκης κατανομή καμπτικής ροπής.....	44
Πίνακας 21: Κατακόρυφη διατμητική τάση (hogging + sagging)	45
Πίνακας 22: Μηχανικές ιδιότητες υλικού	46
Πίνακας 23: Επιτρεπόμενες τάσεις κάμψης [5]	46
Πίνακας 24: Τιμές t_0 και k [5]	47
Πίνακας 25: Χαρακτηριστικά υλικού, aspect ratio ελασμάτων	48
Πίνακας 26: Ελάχιστα πάχη ελασμάτων	49
Πίνακας 27: Ελάχιστα πάχη ελασμάτων λόγω κάμψης	49
Πίνακας 28: Ελάχιστα πάχη ελασμάτων με ενίσχυση λόγω slamming	50
Πίνακας 29: Τελικά πάχη ελασμάτων	50
Πίνακας 30: Τιμές συντελεστή m [5]	51

Πίνακας 31: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης + περιοχή διάτμησης ενισχυτικών πυθμένα	52
Πίνακας 32: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικών πλευράς	52
Πίνακας 33: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικών καταστρώματος	52
Πίνακας 34: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικών φρακτής	52
Πίνακας 35: Ροπή αντίστασης + επιφάνεια διάτμησης ενισχυτικών πυθμένα	53
Πίνακας 36: Ροπή αντίστασης ενισχυτικών πλευράς	53
Πίνακας 37: Ροπή αντίστασης ενισχυτικών καταστρώματος	53
Πίνακας 38: Ροπή αντίστασης ενισχυτικών φρακτής	53
Πίνακας 39: Χαρακτηριστικά υλικού, aspect ratio ελασμάτων	54
Πίνακας 40: Τιμές $t_{0,k}$ [5]	55
Πίνακας 41: Ελάχιστα πάχη κύριων ενισχυτικών	55
Πίνακας 42: Επιτρεπόμενες καμπτικές και διατμητικές τάσεις [5]	55
Πίνακας 43: Συντελεστής C [5]	56
Πίνακας 44: Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος b_e	56
Πίνακας 45: Τιμές m και k_s [5]	57
Πίνακας 46: Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος	58
Πίνακας 47: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης	58
Πίνακας 48: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης συνεργαζόμενης επιφάνειας w_{eb}	58
Πίνακας 49: Υπολογισμός ροπής αντίστασης διατομής	59
Πίνακας 50: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για Fr 1	60
Πίνακας 51: Συγκεντρωτικός πίνακας κύριων ενισχυτικών πυθμένα	60
Πίνακας 52: Συγκεντρωτικός πίνακας κύριων ενισχυτικών πλευράς	60
Πίνακας 53: Συγκεντρωτικός πίνακας κύριων ενισχυτικών καταστρώματος	60
Πίνακας 54: Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος	61
Πίνακας 55: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης	61
Πίνακας 56: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης συνεργαζόμενης επιφάνειας w_{eb}	62
Πίνακας 57: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για CL girder	62
Πίνακας 58: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για girders πυθμένα	62
Πίνακας 59: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για girders καταστρώματος	63
Πίνακας 60: Κύρια χαρακτηριστικά των pillars	64
Πίνακας 61: Συγκεντρωτικός πίνακας στήριξης καταστρώματος με pillars	65



Πίνακας 62: Υπολογισμός αντοχής pillar 65

Εικόνες

Εικόνα 1: Απλό γραμμικό στοιχείο 2 κόμβων και υψηλότερης τάξης γραμμικό στοιχείο [2].	15
Εικόνα 2: Απλά δισδιάστατα στοιχεία με κόμβους στις ακμές και υψηλότερης τάξης δισδιάστατα στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους κατά μήκος των πλευρών [2].....	16
Εικόνα 3: Απλά τρισδιάστατα στοιχεία και υψηλότερης τάξης τρισδιάστατα στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους κατά μήκος των πλευρών [2].....	16
Εικόνα 4: Απλό αξυμμετρικά τριγωνικό και τετράπλευρα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αξυμμετρικά προβλήματα [2].....	16
Εικόνα 5: Τυπικές ισουψείς κατανομές πίεσης τη στιγμή της κρούσης (Allen & Jones - 1978) [3]	20
Εικόνα 6: Ποσοστό μέγιστου φορτίου ή πίεσης – επιφάνεια σχεδίασης/επιφάνεια αναφοράς [3]	21
Εικόνα 7: Σχηματική μεγέθυνση της στιγμιαίας κατανομής της πίεσης [15]	21
Εικόνα 8: Συντελεστής μείωσης πίεσης/λόγος επιφανειών σχεδίασης-αναφοράς [3].....	23
Εικόνα 9: Συντελεστής κυματισμού / μήκος πλοίου [5]	27
Εικόνα 10: Συντελεστής διαμήκους κατανομής για την κατακόρυφη επιτάχυνση [5]	30
Εικόνα 11: Διαμήκης κατανομή κατακόρυφης επιτάχυνσης.....	30
Εικόνα 12: Καμπύλη χρήσης (ταχύτητα(speed)-σημαντικό ύψος κύματος(HSi)).....	32
Εικόνα 13: Καμπύλη ταχύτητας-Σημαντικό ύψος κύματος για σκάφη με σχετικά υψηλό λόγο μήκους/πλάτους [4]	33
Εικόνα 14: Καμπύλη ταχύτητας-Σημαντικό ύψος κύματος για σκάφη με σχετικά χαμηλό λόγο μήκους/πλάτους [4]	33
Εικόνα 15: Συντελεστής διαμήκους κατανομής πιέσεων K_1 [5]	34
Εικόνα 16: Γωνία ανύψωσης πυθμένα β_{cg} [5].....	35
Εικόνα 17: Γράφημα συνολικών πιέσεων slamming στον πυθμένα	36
Εικόνα 18: Γωνία a flare [5].....	38
Εικόνα 19: Γωνία ισάλου γ [5].....	38
Εικόνα 20: Συντελεστής κατανομής πίεσης[5]	40
Εικόνα 21: Επιφάνεια αναφοράς A_R (hogging) [5]	41
Εικόνα 22: Πλάτος επιφάνειας αναφοράς A_R [5].....	41
Εικόνα 23: Επιφάνεια αναφοράς A_R (sagging) [5].....	42
Εικόνα 24: Συντελεστής διαμήκους κατανομής των καμπτικών ροπών [5]	43

Εικόνα 25: Γράφημα διαμήκους κατανομής καμπτικής ροπής (hogging+sagging)	44
Εικόνα 26: Συντελεστής κατανομής διατμητικών δυνάμεων k_q [5].....	45
Εικόνα 27: Κατανομή των διατμητικών δυνάμεων.....	45
Εικόνα 28: Διατομή υπολογισμού	59
Εικόνα 29: Αρχικό επιφανειακό μοντέλο	66
Εικόνα 30: Κατασκευή frame 1.....	67
Εικόνα 31: Κατασκευή όλων των frames του σκάφους.....	67
Εικόνα 32: Κατασκευή διαμήκους ενισχυτικού και girder	68
Εικόνα 33: Μοντέλο με διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά	68
Εικόνα 34: Κατασκευή ενισχυτικών φρακτής.....	69
Εικόνα 35: Κατασκευή pillars	69
Εικόνα 36: Ολοκληρωμένο επιφανειακό μοντέλο σκάφους	70
Εικόνα 37: Χαρακτηριστικά αλουμινίου σειράς 5083-H321	72
Εικόνα 38: Χαρακτηριστικά κράματος αλουμινίου σειράς 6082-T6.....	72
Εικόνα 39: Εξωτερικά ελάσματα + φρακτές aluminum 5083-H321	73
Εικόνα 40: Εσωτερικά ενισχυτικά aluminum 6082-T6.....	73
Εικόνα 41: Ορισμός πάχους 3.65mm	74
Εικόνα 42: Ορισμός πάχους 4mm	75
Εικόνα 43: Ορισμός πάχους 4.02mm	75
Εικόνα 44: Ορισμός πάχους 5mm	75
Εικόνα 45: Ορισμός πάχους 6mm	76
Εικόνα 46: Ορισμός πάχους 6.4mm	76
Εικόνα 47: Ορισμός πάχους 7mm	76
Εικόνα 48: Ορισμός πάχους 8mm	77
Εικόνα 49: Ορισμός πάχους 10mm	77
Εικόνα 50: Ορισμός πάχους 15mm	77
Εικόνα 51: Ορισμός πάχους 20mm	78
Εικόνα 52: Ορισμένα πάχη σκάφους	78
Εικόνα 53: Ορισμός πίεσης τυθμένα στον νομέα 1	79
Εικόνα 54: Ορισμός πίεσης τυθμένα στον νομέα 2 και 3	79
Εικόνα 55: Ορισμός πίεσης τυθμένα στον νομέα 4 και 5	80
Εικόνα 56: Ορισμός πίεσης τυθμένα στον νομέα 6	80

Εικόνα 57: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 7 και 8.....	80
Εικόνα 58: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 9.....	81
Εικόνα 59: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 10 και 11.....	81
Εικόνα 60: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 12 και 13.....	81
Εικόνα 61: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 14 και 15.....	82
Εικόνα 62: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 16.....	82
Εικόνα 63: Ορισμός επιτάχυνσης της βαρύτητας.....	82
Εικόνα 64: Ορισμός πίεσης κυρίων μηχανών.....	83
Εικόνα 65: Συνολικές φορτίσεις σκάφους.....	83
Εικόνα 66: Οριακή συνθήκη (Inertia relief).....	84
Εικόνα 67: Συνθήκη αδυναμίας μετακίνησης (x:ελεύθερο, y:0, z:ελεύθερο).....	84
Εικόνα 68: Βασικές ρυθμίσεις.....	85
Εικόνα 69: Μέγεθος στοιχείων (Mesh sizing).....	85
Εικόνα 70: Ποιότητα στοιχείων (Mesh quality).....	85
Εικόνα 71: Λόγος πλευρών στοιχείων (Aspect ratio).....	86
Εικόνα 72: Λοξότητα στοιχείων (Element skewness).....	86
Εικόνα 73: Διακριτοποίηση μοντέλου.....	86
Εικόνα 74: Περιοχή πύκνωσης πλέγματος.....	87
Εικόνα 75: Ρυθμίσεις πύκνωσης πλέγματος.....	87
Εικόνα 76: Περιοχές πυκνού πλέγματος (Refinement areas).....	87
Εικόνα 77: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 1.....	88
Εικόνα 78: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 2.....	88
Εικόνα 79: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 3.....	88
Εικόνα 80: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 4.....	89
Εικόνα 81: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 5.....	89
Εικόνα 82: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 6.....	89
Εικόνα 83: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 7.....	90
Εικόνα 84: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 8.....	90
Εικόνα 85: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 9.....	90
Εικόνα 86: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 10.....	91
Εικόνα 87: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 11.....	91
Εικόνα 88: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 12.....	91

Εικόνα 89: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 13.....	92
Εικόνα 90: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 14.....	92
Εικόνα 91: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 15.....	92
Εικόνα 92: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 16.....	93
Εικόνα 93: Τάσεις κατά von-Mises στα Bottom Girders	93
Εικόνα 94: Τάσεις κατά von-Mises στα scantlings	93
Εικόνα 95: Τάσεις κατά von-Mises στο shell.....	94
Εικόνα 96: Συνολικές παραμορφώσεις σκάφους	94
Εικόνα 97: Λεπτομέρεια στον Fr 2.....	96
Εικόνα 98: Λεπτομέρεια στον Fr 4.....	96
Εικόνα 99: Λεπτομέρεια στον Fr 7(κανονικό πλέγμα).....	97
Εικόνα 100: Λεπτομέρεια στον Fr 7(πυκνό πλέγμα)	97
Εικόνα 101: Λεπτομέρεια στον Fr 8(κανονικό πλέγμα).....	98
Εικόνα 102: Λεπτομέρεια στον Fr 8(πυκνό πλέγμα)	98
Εικόνα 103: Λεπτομέρεια στον Fr 8(κανονικό πλέγμα) με όριο τάσεων τα 132MPa	99
Εικόνα 104: Λεπτομέρεια στον Fr 8(πυκνό πλέγμα) με όριο τάσεων τα 132MPa	99
Εικόνα 105: Λεπτομέρεια περιοχής στην πλώρη	100
Εικόνα 106: Τάσεις διαμήκους ενισχυτικού(δευτερεύον).....	100
Εικόνα 107: Λεπτομέρεια μεταξύ φρακτών 13-15.....	101
Εικόνα 108: Τάσεις διαμηκών ενισχυτικών μεταξύ φρακτών 13-15	101
Εικόνα 109: Δευτερεύον ενισχυτικό.....	101
Εικόνα 110: Κάτοψη σκάφους με τάσεις von-Mises στα ελάσματα.....	102
Εικόνα 111: Λεπτομέρεια μέγιστης τάσης ελασμάτων	102
Εικόνα 112: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα.....	103
Εικόνα 113: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα (πρυμναίο τμήμα).....	103
Εικόνα 114: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα (μέσο τμήμα).....	103
Εικόνα 115: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα (πλωραίο τμήμα)	104



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

1. Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι το πιο άφθονο μέταλλο στον φλοιό της γης. Το καθαρό αλουμίνιο ωστόσο δεν έχει σημαντική αντοχή, για αυτό τον λόγο αναμιγνύεται με άλλα στοιχεία. Η αναλογία με την οποία αναμιγνύονται τα στοιχεία έχουν σαν αποτέλεσμα ένα τεράστιο εύρος κραμάτων αλουμινίου με διάφορες ιδιότητες που καλύπτουν τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Δεν έχει υιοθετηθεί συγκεκριμένη ορολογία για τον ορισμό της καθαρότητας του αλουμινίου αλλά η πιο σύνηθες φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Αλουμίνιο %	Ονομασία
99.50 - 99.79	Commercial purity
99.80 - 99.949	High purity
99.950 - 99.9959	Super purity
99.996 - 99.9990	Extreme purity
>99.9990	Ultra purity

Πίνακας 1: Καθαρότητα αλουμινίου [1]

Η ταξινόμηση χωρίζεται στο πρωτογενές και δευτερογενές αλουμίνιο. Το πρωτογενές αλουμίνιο αφορά την αρχική σύνθεση του αλουμινίου ενώ το δευτερογενές αλουμίνιο ορίζεται ως το ανακυκλωμένο αλουμίνιο.

Ένας από τους λόγους όπου το αλουμίνιο είναι τόσο γνωστό μέταλλο στην βιομηχανία είναι το εύρος των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν με τις προσμίξεις. Το αλουμίνιο είναι μαλακό, ανθεκτικό, ελαφρύ, και όλκιμο. Η πυκνότητα του είναι περίπου το 1/3 σε σχέση με αυτή του χάλυβα. Ωστόσο, το αλουμίνιο έχει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από ότι ο χάλυβας. Φορτίζοντας δηλαδή και τα δύο υλικά με ίδιο φορτίο παρατηρούμε πως το αλουμίνιο παραμορφώνεται περισσότερο από τον χάλυβα. Το αλουμίνιο από μόνο του είναι ανθεκτικό στην οξείδωση λόγω μιας λεπτής στρώσης οξειδίου του αλουμινίου που δημιουργείται όταν το μέταλλο έρθει σε επαφή με τον αέρα, που ουσιαστικά αποτρέπει την περαιτέρω οξείδωση. [1]

1.1 Ευθραυστότητα λόγω υδρογόνου

Η πιο καταστροφική επίδραση του υδρογόνου στα υλικά είναι ευθραυστότητα. Η ευθραυστότητα είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα μέταλλα αποκτούν ρωγμές από την έκθεση τους στο υδρογόνο. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται από τυχόν λάθη κατά τη διάρκεια επεξεργασίας του μετάλλου (μορφοποίηση, φινίρισμα κ.α.). Τα υλικά που έχουν υποστεί ζημιά λόγω υδρογόνου εμφανίζουν σημαντική μείωση στην απορρόφηση ενέργειας προ θραύσης. Η ευθραυστότητα ενισχύεται με την κόπωση και τις χαμηλές θερμοκρασίες. Μηχανισμοί οι οποίοι μπορούν να ενσωματώσουν εξωτερικό υδρογόνο στο υλικό είναι η καθοδική προστασία, το φωσφορικό άλας, οι συγκολλήσεις τόξου, η γαλβανική οξειδωση και χημικές αντιδράσεις μετάλλων με οξύ.

Το υδρογόνο διαλύεται σε όλα τα μέταλλα. Η πολύ μικρή του ατομική μάζα το καθιστά εύκολο να εισχωρήσει μέσα στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου και κατά συνέπεια να διαχέεται γρηγορότερα από ότι μεγαλύτερα άτομα. Έχει την τάση να συγκεντρώνεται σε περιοχές μεγάλων τάσεων όπου το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται και οδηγεί στην δημιουργία ρωγμών στο μέταλλο. Επίσης καθιστά ευκολότερη τη συνέχιση μιας ρωγμής (μέχρι και 1mm/s σε ακραίες περιπτώσεις) και βοηθά στην ανάπτυξη τοπικών μόνιμων παραμορφώσεων. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την ευθραυστότητα του υλικού.

Το αλουμίνιο είναι επιρρεπές στην ευθραυστότητα λόγω του υδρογόνου, παρόλα αυτά η μικροδομή του έχει ως αποτέλεσμα η μεταφορά του υδρογόνου να είναι πιο αργή σε σχέση με τον χάλυβα υψηλής αντοχής. Έτσι ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσεται μια ρωγμή στο αλουμίνιο είναι τελικά πιο αργός. Οι ρωγμές στα αλουμίνια θεωρούνται πως συμβαίνουν σε λογικά επίπεδα. Από την άλλη πλευρά, όπως συμβαίνει και με τον χάλυβα, τα κράματα αλουμινίου είναι πιο επιρρεπείς όσο η αντοχή τους αυξάνεται. Βέβαια υπάρχει μια μεγάλη επίδραση θερμοκρασιακής κατεργασίας στη μικροδομή η οποία οδηγεί σε αρκετά υψηλή αντοχή με καλά χαρακτηριστικά έναντι των ρωγμών λόγω διάβρωσης. Οποιοδήποτε περιβάλλον που διαθέτει υδρογόνο (υγρασία, θαλασσίνο νερό) μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές λόγω διάβρωσης. [1]

1.2 Κράματα αλουμινίου

Το καθαρό αλουμίνιο όπως είδαμε και προηγουμένως δεν έχει μεγάλη αντοχή (όριο διαρροής 28 MPa). Για αυτόν τον λόγο γίνονται διάφορες προσμίξεις με διάφορα άλλα στοιχεία. Παρακάτω θα αναλύσουμε τα πιο κοινά στοιχεία για την δημιουργία των κραμάτων αλουμινίου.

1.2.1 Χρώμιο (Cr): το χρώμιο εμφανίζεται σε πολύ μικρά ποσοστά. 5 - 50 ppm (parts per million) στο καθαρό αλουμίνιο και έχει μεγάλη επίδραση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυξάνοντας λοιπόν την περιεκτικότητα στο χρώμιο μειώνεται η αγωγιμότητα του υλικού. Το χρώμιο είναι μια συνήθη προσθήκη σε πολλά κράματα αλουμινίου-μαγνησίου (Al-Mg), αλουμινίου-μαγνησίου-πυριτίου (Al-Mg-Si), και αλουμινίου-μαγνησίου-ψευδαργύρου (Al-Mg-Zn) στα οποία προστίθεται σε ποσοστό συνήθως όχι μεγαλύτερο από 0.35%. Το χρώμιο βοηθάει στην αντοχή κατά της διάβρωσης καθώς βελτιώνει και την σκληρότητα.

1.2.2 Χαλκός (Cu): τα κράματα αλουμινίου-χαλκού περιέχουν χαλκό σε ποσοστό 2-10% και σε συνδυασμό με άλλες προσμίξεις καθιερώνουν μια σημαντική ομάδα κραμάτων. Χυτά και επεξεργασμένα κράματα αλουμινίου-χαλκού κατά την θερμική κατεργασία και την γήρανση παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά με αυξημένη αντοχή και σκληρότητα καθώς και μείωση της επιμήκυνσης. Η αντοχή μεγιστοποιείται όταν η περιεκτικότητα χαλκού κυμαίνεται από 4-6% καθώς και από την επίδραση των υπόλοιπων προσμίξεων. Ποσότητες μεγαλύτερες από 0.1% μπορεί να προκαλέσουν pitting όταν το υλικό είναι βυθισμένο στο νερό. Ένα καλό παράδειγμα είναι η σειρά 6061 η οποία περιέχει ποσοστό 0.15 - 0.40% χαλκό σε αντίθεση με την σειρά 6082 η οποία περιέχει μέγιστο 0.10% χαλκό.

1.2.3 Μαγνήσιο (Mg): το μαγνήσιο είναι το πιο σημαντικό στοιχείο της σειράς 5XXX. Η μέγιστη διαλυτότητα στο αλουμίνιο φτάνει το 17.4% αλλά η περιεκτικότητα στο επεξεργασμένο αλουμίνιο δεν ξεπερνά το 5.5%. Η ύπαρξη μαγνησίου αυξάνει την ευαισθησία στις ρωγμές καθώς και στις τάσεις λόγω της διάβρωσης, για αυτό τον λόγο τα ποσοστά του μαγνησίου κυμαίνονται κάτω του 5.5%. Στα επεξεργασμένα αλουμίνια που περιέχουν μαγνήσιο έως 5% εάν κατεργαστούν σωστά παρουσιάζουν σταθερότητα κάτω από ιδανικές συνθήκες χρήσης. Η προσθήκη μαγνησίου αυξάνει αισθητά την αντοχή του αλουμινίου χωρίς να μειώνει την ολκιμότητα του υλικού. Η αντοχή στην διάβρωση και η συγκολλησιμότητα είναι καλή.

1.2.4 Χαλκός και μαγνήσιο (Cu-Mg): Το κύριο πλεονέκτημα του συνδυασμού χαλκού και μαγνησίου είναι η αυξημένη αντοχή που δίνει στο κράμα αλουμινίου ειδικά μετά την εφαρμογή ανόπτησης. Στα πρωτογενή υλικά η αύξηση της αντοχής συνοδεύεται με την υψηλή ολκιμότητα εμφανίζεται με την φυσική γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου. Εφαρμόζοντας τεχνητή γήρανση μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω αύξηση της αντοχής ειδικά στο όριο διαρροής του υλικού αλλά θυσιάζοντας σημαντικά την επιμήκυνση λόγω εφελκυσμού. Στα χυτά αλλά και στα επεξεργασμένα κράματα αλουμινίου-χαλκού, ποσοστό της τάξης του 0.5% μαγνησίου επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της γήρανσης. Στα επεξεργασμένα προϊόντα η επίδραση του μαγνησίου προσθέτει αντοχή η οποία μεγιστοποιείται όταν η ψυξηλασία λαμβάνει μέρος πριν την φάση της τεχνητής γήρανσης. Στην φυσική γήρανση ωστόσο η αυξημένη αντοχή, λόγω της προσθήκης μαγνησίου, μειώνεται κατά την ψυξηλασία.

1.2.5 Μαγγάνιο (Mn): το μαγγάνιο είναι κοινή ακαθαρσία στο πρωτογενές αλουμίνιο, σε συγκεντρώσεις με εύρος περί τα 5 έως 50 ppm. Η προσθήκη του μαγγανίου μειώνει την αντίσταση του κράματος και αυξάνει την αντοχή του. Δεν έχει αρνητική επίδραση όσον αφορά

την διάβρωση. Η επίδραση του μαγγανίου αυξάνει την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και βοηθάει στην δημιουργία ινώδους δομής μετά από θερμή κατεργασία. Ως ίζημα είναι αποτελεσματικό στην επιβράδυνση και πρόληψη της ανάπτυξης των κόκκων καθώς αυξάνει την ευαισθησία απόσβεσης των θερμικά κατεργαζόμενων κραμάτων.

1.2.6 Σκάνδιο (Sc): το σκάνδιο ως στοιχείο κράματος στο αλουμίνιο έχει αυξημένο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Αυξάνει την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό, ομαλοποιεί το μέγεθος των κόκκων και βοηθάει στην μείωση/εξάλειψη των ρωγμών κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης. Το σκάνδιο έχει πολλά οφέλη αλλά λόγω της σπανιότητάς του, τα κράματα που περιέχουν σκάνδιο είναι δυσεύρετα και αρκετά ακριβότερα.

1.2.7 Πυρίτιο (Si): το πυρίτιο, μετά το σίδηρο, εμφανίζεται ως το υψηλότερο επίπεδο ακαθαρσίας στο εμπορικό αλουμίνιο περιέχοντας ηλεκτρολύτες σε ποσοστό 0.01% - 0.15%. Στα επεξεργασμένα κράματα το πυρίτιο χρησιμοποιείται μαζί με το μαγνήσιο (Mg) σε ποσοστά έως 1.5% για την παραγωγή Mg_2Si στην σειρά 6XXX των θερμικά επεξεργαζόμενων κραμάτων. Υψηλής καθαρότητας κράματα αλουμινίου-πυριτίου έως 3% ποσοστό πυριτίου (θεωρώντας κρίσιμη περιοχή αυτή μεταξύ 0.17% – 0.8% σε πυρίτιο) είναι εύθραυστα στις υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο η προσθήκη πυριτίου σε ποσοστά 0.5% - 4.0% μειώνει την εμφάνιση ρωγμών στα κράματα αλουμινίου-χαλκού-μαγνησίου. Η προσθήκη μικρού ποσοστού μαγνησίου σε οποιοδήποτε κράμα που περιέχει πυρίτιο το καθιστά άμεσα θερμικά επεξεργάσιμο αλλά δεν ισχύει το αντίθετο καθώς η υπέρβαση του ορίου μαγνησίου για την δημιουργία Mg_2Si μειώνει την στερεή διαλυτότητα αυτής της ένωσης.

1.2.8 Ασήμι (Ag): το ασήμι έχει εξαιρετικά υψηλή στερεά διαλυτότητα στο αλουμίνιο έως 55.0%. Η χρήση του κράματος από αλουμίνιο-ασήμι δεν είναι τόσο διαδεδομένη λόγω του κόστους. Μικρά ποσοστά της τάξης από 0.1% - 0.6% βελτιώνουν την αντοχή καθώς και την αντίσταση στη διάβρωση του κράματος αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου.

1.2.9 Κασσίτερος (Sn): η προσθήκη κασσίτερου ως στοιχείο χρησιμοποιείται για τα χυτά καθώς και τα επεξεργασμένα κράματα. Στα επεξεργασμένα κράματα η συγκέντρωση του ξεκινά από 0.03% έως αρκετά υψηλότερα και στα χυτά κράματα έως 25.0%. Ποσοστά της τάξης του 0.05% αυξάνει σημαντικά την απόκριση των κραμάτων αλουμινίου χαλκού κατά την τεχνητή γήρανση. Αυξάνει την αντοχή και βελτιώνει την αντίσταση κατά της διάβρωσης αλλά υψηλές περιεκτικότητες κασσίτερου προκαλούν ρωγμές κατά τις θερμές εργασίες. Κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου με μικρή προσθήκη κασσίτερου χρησιμοποιούνται ως θυσιαζόμενα ανόδια. Κράματα αλουμινίου-κασσίτερου με προσθήκη άλλων μετάλλων όπως ο χαλκός, το νικέλιο και το πυρίτιο χρησιμοποιούνται στα έδρανα όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε δυνάμεις λόγω των υψηλών ταχυτήτων καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο χαλκός, το νικέλιο και το πυρίτιο βελτιώνουν την ικανότητα μεταφοράς φορτίου και την αντοχή στην φθορά.

1.2.10 Τιτάνιο (Ti): το τιτάνιο μπορεί να βρεθεί στο καθαρό εμπορικό αλουμίνιο σε ποσοστά 10 - 100 ppm. Το τιτάνιο καταστέλλει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου, αλλά η επίδραση του μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη βορίου. Όταν το τιτάνιο χρησιμοποιείται μόνο του μειώνεται η δυνατότητα διατήρησης την λιωμένης κατάστασης του με το χρόνο και

με την επανάτηξη. Η επίδραση της λείανσης των κόκκων ενισχύεται με την εμφάνιση του βορίου στο τήγμα ή εάν προστίθεται ως κύριο κράμα που περιέχει βόριο. Το τιτάνιο είναι μια προσθήκη στο σύρμα συγκόλλησης καθώς βελτιώνει τη δομή της συγκόλλησης και αποτρέπει τη ρωγμή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

1.2.11 Ψευδάργυρος (Zn): τα κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου είναι γνωστά εδώ και αρκετά χρόνια αλλά οι ρωγμές στα χυτά κράματα καθώς και η ευαισθησία στις ρωγμές λόγω των τάσεων διάβρωσης στα επεξεργασμένα κράματα έχουν περιορίσει την χρήση τους. Τα κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσφέρουν τον μεγαλύτερο συνδυασμό επεξεργασμένων κραμάτων αλουμινίου όσον αφορά τις εφελκυστικές τους ιδιότητες. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την καταπολέμηση των παραπάνω προβλημάτων που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα κράματα με επιτυχία και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να βρίσκουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής. Η προσθήκη μαγνησίου στο συγκεκριμένο κράμα εμφανίζει την δυναμική της αντοχής, ειδικά όταν ο ψευδάργυρος κυμαίνεται από 3.0% - 7.5%. Το μαγνήσιο σε συνδυασμό με τον ψευδάργυρο δημιουργούν $MgZn_2$ το οποίο έχει τρομερή απόκριση στην θερμική κατεργασία σε σχέση με το μείγμα αλουμινίου-ψευδαργύρου. Η αντοχή του επεξεργασμένου αλουμινίου-ψευδαργύρου αυξάνεται σημαντικά με την προσθήκη μαγνησίου. Η προσθήκη μαγνησίου σε ποσοστό βάρους 100% - 200% παραπάνω από ότι χρειάζεται για την δημιουργία $MgZn_2$ αυξάνει παραπάνω την εφελκυστική αντοχή. Αυξάνοντας ταυτόχρονα την προσθήκη ψευδαργύρου και μαγνησίου μειώνεται η αντίσταση στη διάβρωση σε βαθμό που χρειάζεται στενή παρακολούθηση. Ανάλογα με το κράμα η τάση διάβρωσης ελέγχεται από τα παρακάτω:

- 1) Υπεργήρανση
- 2) Έλεγχος της ψύξης κατά την απόπτηση
- 3) Διατήρηση μη ανακρυσταλοποιημένης δομής μέσω της προσθήκης ζirkονίου, χαλκού ή χρωμίου
- 4) Ρύθμιση του λόγου ψευδαργύρου-μαγνησίου κοντά στο 3:1

Η προσθήκη χαλκού στο κράμα αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου μαζί με μικρά ποσοστά χρωμίου και μαγανίου έχουν ως αποτέλεσμα ένα κράμα υψηλής αντοχής το οποίο είναι εμπορικά διαθέσιμο. Στο παραπάνω κράμα η επίδραση του ψευδαργύρου και του μαγνησίου ελέγχει τη διαδικασία της γήρανσης. Η επίδραση του χαλκού αυξάνει τον ρυθμό της γήρανσης αυξάνοντας τον βαθμό του υπερκορεσμού ή ακόμα και της πυρηνοποίησης κατά την φάση $CuMgAl_2$. Ο χαλκός επίσης αυξάνει την ευαισθησία στην ψύξη κατά την απόπτηση. Γενικά ο χαλκός μειώνει την αντίσταση κατά της γενικής διάβρωσης των κραμάτων αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου αλλά αυξάνει την αντίσταση στην διάβρωση λόγω τάσεων. Οι προσθήκες σε μικρό ποσοστό στοιχείων όπως το χρώμιο και το ζirkόνιο έχουν σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες και στην αντίσταση διάβρωσης.

1.2.12 Ζirkόνιο (Zr): Η προσθήκη ζirkονίου με εύρος 0.1% - 0.3% χρησιμοποιείται για να σχηματίσει ένα λεπτό ίζημα διμεταλλικών σωματιδίων που αναστέλλουν την ανάκτηση και την ανακρυστάλλωση. Ένας αυξανόμενος αριθμός κραμάτων ιδιαίτερα η οικογένεια αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου χρησιμοποιούν προσθήκες ζirkονίου για να αυξήσουν τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και για να ελέγχουν τη δομή των επεξεργασμένων προϊόντων. Τα παραπάνω κράματα είναι λιγότερο ευαίσθητα στην ψύξη με την προσθήκη ζirkονίου σε αντίθεση με αυτά που έχουν προσθήκη χρωμίου. [1]

Ο παρακάτω πίνακας 2 παρουσιάζει περιληπτικά τα στοιχεία των κραμάτων και την επίδραση που έχουν σε ένα κράμα.

Elements	Added Amount (By Weight)	Effects	Results	Drawbacks
Chromium (Cr)	0.35%	<ul style="list-style-type: none"> Forms finely dispersed phases in wrought products 	<ul style="list-style-type: none"> Prevents grain growth and recrystallization Reduces stress corrosion susceptibility Improves toughness and strength 	<ul style="list-style-type: none"> In heat-treatable alloys, increases the quench sensitivity
Copper (Cu)	2% - 10%		<ul style="list-style-type: none"> Increase strength and hardness 	<ul style="list-style-type: none"> Decreases elongation
Magnesium (Mg)	≤ 5.5%		<ul style="list-style-type: none"> Increase in strength without decreasing the ductility Produces good corrosion resistance and weldability 	<ul style="list-style-type: none"> Causes susceptibility to intergranular cracking and stress corrosion
Manganese (Mn)	0.3% - 1.5%	<ul style="list-style-type: none"> Decreases resistivity of the alloy 	<ul style="list-style-type: none"> Increases strength and controls grain structure No adverse effect on corrosion resistance 	<ul style="list-style-type: none"> Increases the quench sensitivity of heat-treatable alloys
Scandium (Sc)		<ul style="list-style-type: none"> Increases the recrystallization temperature Refines grain size 	<ul style="list-style-type: none"> Increases the tensile strength Helps in the reduction / elimination of hot cracking in welds 	
Silicon (Si)	0.5% - 4%		<ul style="list-style-type: none"> Reduces the cracking tendency of Al-Cu-Mg alloys 	<ul style="list-style-type: none"> Ranges of 0.17%-0.8% cause brittleness at high temperatures
Silver (Ag)	0.1% - 0.6%		<ul style="list-style-type: none"> Increases the strength and stress corrosion resistance of Al-Zn-Mg alloys 	
Tin (Sn)	0.03% - 25%	<ul style="list-style-type: none"> Increases the response of Al-Cu alloys to artificial aging 	<ul style="list-style-type: none"> Increases strength and improves corrosion resistance 	<ul style="list-style-type: none"> Can cause hot cracking
Titanium (Ti)		<ul style="list-style-type: none"> Used primarily as a grain refiner Refines weld structure 	<ul style="list-style-type: none"> Depresses the electrical conductivity of Al Prevents weld cracking 	
Zinc (Zn)	3% - 7.5%		<ul style="list-style-type: none"> Along with other additions, Al-Zn alloys offer the highest combination tensile properties in wrought alloys 	<ul style="list-style-type: none"> Causes hot cracking Susceptibility to stress-corrosion cracking
Zirconium (Zr)	0.1%-0.3%	<ul style="list-style-type: none"> Controls grain structure Forms a fine intermetallic precipitate to inhibit recrystallization 	<ul style="list-style-type: none"> Reduces quench-sensitivity 	

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά στοιχεία κραμάτων [1]

1.3 Σύστημα προσδιορισμού επεξεργασμένων κραμάτων

Το σύστημα προσδιορισμού των κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιεί 4 ψηφία για τον καθορισμό της σύστασης, ακολουθείται από ένα γράμμα και έναν αριθμό ψηφίων για τον καθορισμό των ιδιοτήτων που έχουν αποδοθεί σε αυτό το προϊόν. Τα κράματα είναι διαχωρισμένα σε σειρές οι οποίες καθορίζονται από τον πρώτο αριθμό. Οι σειρές είναι ομάδες κραμάτων που έχουν κοινό κύριο στοιχείο.

1XXX : αντιπροσωπεύει το καθαρό αλουμίνιο ($\geq 99\%$). Τα κράματα 10XX είναι καθαρές συστάσεις με φυσικά όρια προσμίξεων. Τα δύο τελευταία ψηφία καθορίζουν το ελάχιστο ποσοστό αλουμινίου ($XX \rightarrow 99.XX\%$). Για άλλους συνδυασμούς του 2^{ου} ψηφίου, αυτό καθορίζει το ποσοστό των ακαθαρσιών. Η σειρά 1XXX είναι μη θερμικά επεξεργαζόμενο κράμα. Λόγω της καθαρότητας και της χαμηλής αντοχής η χρήση τους περιορίζεται στην ηλεκτρική και χημική βιομηχανία.

Για την σειρά 2XXX – 8XXX το δεύτερο ψηφίο καθορίζει την μετατροπή του κράματος με το 0 να καθορίζει το αρχικό κράμα. Τα δύο τελευταία ψηφία διαχωρίζουν τα διάφορα κράματα.

2XXX : περιλαμβάνει κράματα με κύριο στοιχείο τον χαλκό. Η σειρά αυτή έχει την δυνατότητα να δεχτεί θερμική επεξεργασία, το οποίο αυξάνει και την αντοχή. Η αντίσταση κατά της διάβρωσης είναι χαμηλή. Χρησιμοποιούνται αρκετά στην αεροναυπηγική βιομηχανία.

3XXX : περιλαμβάνει κράματα με κύριο στοιχείο το μαγγάνιο. Η σειρά 3XXX είναι μη θερμικά επεξεργαζόμενο κράμα. Έχουν μέτρια αντοχή αλλά υψηλή ευπλαστικότητα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για αρχιτεκτονικά προϊόντα.

4XXX : περιλαμβάνει κράματα με κύριο στοιχείο το πυρίτιο. Τα κράματα αυτά ποικίλλουν ως προς τη θερμική επεξεργασία. Λόγω του χαμηλού σημείου τήξης, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ράβδων συγκόλλησης.

5XXX : περιλαμβάνει κράματα με κύριο στοιχείο το μαγνήσιο. Χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική βιομηχανία λόγω της καλής αντοχής έναντι της διάβρωσης και λόγω της καλής συγκολλησιμότητας.

6XXX : περιλαμβάνει κράματα με κύριο στοιχείο το μαγνήσιο και το πυρίτιο. Η σειρά αυτή έχει την δυνατότητα να δεχτεί θερμική επεξεργασία. Είναι μέτρια έως και υψηλής αντοχής κράματα με καλή αντοχή έναντι της διάβρωσης.

7XXX : περιλαμβάνει κράματα με κύριο στοιχείο τον ψευδάργυρο. Η σειρά αυτή έχει την δυνατότητα να δεχτεί θερμική επεξεργασία. Χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική βιομηχανία και σε περιπτώσεις που η υψηλή αντοχή είναι απαραίτητη.

8XXX : περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία όπως είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, ο κασσίτερος και/ή το λίθιο. Τα κράματα αυτά ποικίλλουν ως προς τη θερμική επεξεργασία.

9XXX : δεν έχουν κάποια χρήση, και φυλάσσονται για μελλοντική χρήση. [1]

Παρακάτω στον πίνακα θα δούμε κάποιες μηχανικές ιδιότητες της σειράς 5XXX και 6XXX κραμάτων αλουμινίου για τη ναυπηγική βιομηχανία.

Alloy and Temper	Thickness Range		Ultimate Strength ⁴		Yield Strength ⁴ (0.2% Offset)		Elastic Modulus		Density		As-Welded Typical Ultimate Strength		As-Welded Minimum Yield Strength	
	in	mm	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi x10 ³	GPa	lbs/in ³	g/cm ³	ksi	MPa	ksi	MPa
5052-H32 (S&P)	All	All	31.0	215	23.0	160	10.2	70.3	0.097	2.68	28	193	13	90
5052-H34 (S&P)	All	All	34.0	235	26.0	180	10.2	70.3	0.097	2.68				
5059-H111 (E) ¹	0.114-1.968	3.0-50	47.7	329	23.2	160			0.096	2.66				
5059-H116 (S&P) ¹	0.114-0.787	3.0-20	53.5	438	39.1	270			0.096	2.66				
5059-H116 (P) ¹	0.788-1.968	20.1-50	52.1	359	37.6	259								
5059-H321 (P) ¹	0.114-0.787	3.0-20	53.5	369	39.1	270								
5059-H321 (S&P) ¹	0.788-1.968	20.1-50	52.1	359	37.6	259								
5083-H111 (E)	≤5.0	≤130	40.0	275	24.0	165	10.3	71	0.096	2.66				
5083-H116 (S&P)	0.188-1.5	4.0-40	44.0	305	31.0	215	10.3	71	0.096	2.66				
5083-H116 (P)	1.5-3.0	40-80	41.0	286	29.0	200	10.3	71	0.096	2.66	43	296	24	165
5083-H321 (S&P) ¹	0.063-1.5	1.6-38	44.0	303	31.0	214			0.096	2.66				
5083-H321 (P) ¹	1.501-3.0	38.1-76.5	41.0	283	29.0	200			0.096	2.66				
5086-H111 (E)	≤5.0	≤130	36.0	250	21.0	145	10.3	71	0.096	2.66				
5086-H112 (E) ²			45.0	310	27.6	190	10.2	70	0.096	2.66	38	262	17	117
5383-H116 (P) ²	≤0.79	≤20	44.2	305	31.2	215	10.2	70	0.096	2.66				
5454-H111 (E)	≤5.0	≤130	33.0	230	19.0	130	10.3	71	0.097	2.69				
5454-H32 (S&P)	0.02-2.0	0.5-50	36.0	250	26.0	180	10.3	71	0.097	2.69	34	234	16	110
5456-H116 (S&P)	0.188-1.25	4.0-12.5	46.0	315	33.0	230	10.3	71	0.096	2.66				
5456-H116 (P)	1.251-1.5	31.8-38.1	44.0	305	31.0	215	10.3	71	0.096	2.66				
5456-H116 (P)	1.501-3.0	40.01-80	41.0	285	29.0	200	10.3	71	0.096	2.66	46	317	26	179
5456-H321 (S&P) ¹	0.188-0.499		46.0 / 59.0		33.0 / 46.0				0.096	2.66				
6005A-T61 (E) ³			38.0	260	35.0	240	10.0	68.9	0.098	2.70				
6061-T6 (E)	All	All	38.0	260	35.0	240	10.0	68.9	0.098	2.70			18	124
6063-T6 (E)	All	All	30.0	205	25.0	170	10.0	68.9	0.097	2.70			12	83
6082-T6 (E) ³	All	All	45.0	310	38.0	262			0.098	2.70				

Notes: (E) - Extrusions, (S&P) - Sheet and Plate, (P) Plate

1) ABS, Rules for Materials and Welding, 2006

2) ALCAN, 2004

3) Data supplied by Tower Extrusions, Olney, Texas

4) Where two values are given, the first is the minimum allowable, and the second is the maximum allowable

Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες κοινών κραμάτων αλουμινίου [1]

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν οι γενικές ιδιότητες από τις διάφορες σειρές των κραμάτων.

Series	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	8xxx
Primary Alloying Element	No Major additions, "pure"	Copper	Manganese	Silicon	Magnesium	Magnesium & Silicon	Zinc	Varies
Heat Treatable	No	Yes	No	Varies	No	Yes	Yes	Varies
General Corrosion Resistance ¹	A	C-E	A	B-C	A-B	A-C	B-E	A
SCC ²	A	A-D	A	B	A	A-B	B-C	A
Workability (Cold)	A-C	B-D	A-C		A-C	A-D	D	A
Weldability ³	A	A-D	A	B-D	A-C	A-D	B-D	A
Machinability ⁴	D-E	A-D	C-E	B	C-E	B-D	B-D	D
Yield Strength (MPa)	28-165	69-414	40-250	315	41-407	50-379	83-545	95
Ultimate Strength (MPa)	76-186	172-469	110-285	380	124-434	90-400	193-594	160

Notes:

1) Ratings A-E are relative ratings in decreasing order of merit, based on exposure to sodium chloride solution by intermittent spraying or immersion. Alloys with A & B ratings can be used in industrial and seacoast atmospheres without protection. Alloys with C, D, & E ratings generally should be protected at least on faying surfaces.

2) Stress-corrosion cracking ratings are based on service experience and on laboratory tests of specimens exposed to the 3.5% sodium chloride alternate immersion. A=No known failure in service or in laboratory tests. B=No known instance of failure in service; limited failures in laboratory tests of short transverse specimens. C= Service failures with sustained tension stress acting in short transverse direction relative to grain structure; limited failures in laboratory tests of long transverse specimens. D=Limited service failures with sustained longitudinal or long transverse stress.

3) Ratings A-D for weldability and brazeability[†] are relative ratings defined as follows: A=Generally weldable by all commercial procedures and methods. B=Weldable with special techniques or for specific applications: requires preliminary trials or testing to develop welding procedure and weld performance. C=Limited weldability because of crack sensitivity or loss in resistance to corrosion and mechanical properties. D= No commonly used welding methods have been developed.

4) Ratings A-D for workability (cold), and A-E for machinability, are relative ratings in decreasing order of merit.

Πίνακας 4: Γενικές ιδιότητες κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου [1]

Οι ιδιότητες που έχουν αποδοθεί σε κάθε κράμα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Με **F** συμβολίζεται ένα υλικό το οποίο έχει υποστεί κατεργασία, είτε ψυχρή είτε θερμή ή ακόμα και τα χυτά. Με **O** συμβολίζεται ένα υλικό το οποίο έχει υποστεί ανόπτηση. Με **E** συμβολίζεται το υλικό το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση. Το πρώτο ψηφίο υποδεικνύει : απλή σκλήρυνση (1), σκλήρυνση και μερική ανόπτηση (2), σκλήρυνση και σταθεροποίηση (3). Το δεύτερο ψηφίο υποδεικνύει τον τελικό βαθμό σκλήρυνσης με εύρος από 0-8. Το 0 καθορίζει το υλικό που έχει υποστεί ανόπτηση και το 8 το υλικό στο τελευταίο στάδιο σκλήρυνσης. Ο αριθμός 4 που βρίσκεται στην μέση υποδεικνύει ένα υλικό με μέτριο στάδιο σκλήρυνσης. Με **W** συμβολίζεται το υλικό με ασταθές ιδιότητες, στα οποία η αντοχή τους αλλάζει με τον χρόνο σε θερμοκρασία δωματίου μετά από θερμική κατεργασία. Με **T** συμβολίζεται το υλικό το οποίο σταθεροποιείται μετά από μερικές εβδομάδες αφού υποστεί θερμική κατεργασία.

Temper Designation	Description
F	As Fabricated by cold working, hot working or casting process
O	Annealed
H	Strain-Hardened (Wrought Products Only)
H1	Strain-Hardened Only
H11	Applies to alloys which are strain-hardened less than the amount required for a controlled H11 temper
H112	Applies to alloys that acquire some temper from shaping processes which do not have special control over the amount of strain-hardening or thermal treatment, but for which there are mechanical property limits
H116	Applies to 5000-series alloys, Mg content min. 4%
H2	Strain-Hardened and Partially Annealed
H3	Strain Hardened and Stabilized
H32	Strain hardened to be quarter-hard and stabilized
H321	Applies to alloys which are strain-hardened less than the amount required for a controlled H32 temper
H34	Strain hardened to be half-hard and stabilized
W	Solution Heat-Treated ¹
T	Solution Heat-Treated ²
T1	Cooled From an Elevated Temperature Shaping Process and Naturally Aged to a Substantially Stable Condition
T2	Cooled From an Elevated Temperature Shaping Process, Cold-Worked, and Naturally Aged to a Substantially Stable Condition
T3	Solution Heat Treated, Cold Worked, and Naturally Aged to a Substantially Stable Condition
T4	Solution Heat Treated and Naturally Aged to a Substantially Stable Condition
T5	Cooled From an Elevated Temperature Shaping Process and Artificially Aged
T6	Solution Heat Treated and Artificially Aged
T61	Applies to alloys which are solution heat treated, quenched in boiling water, (to minimize residual stresses), and artificially aged
T7	Solution Heat Treated and Overaged or Stabilized
T8	Solution Heat Treated, Cold Worked, and Artificially Aged
T9	Solution Heat Treated, Artificially Aged, and Cold Worked
T10	Cooled From an Elevated Temperature Shaping Process, Cold Worked, and Artificially Aged
Tx51	Stress relieved by stretching; products receive no further straightening after stretching
Tx510	Extruded products receive no further straightening after stretching
Tx511	Extruded products receive minor straightening after stretching to comply with standard tolerances
Tx52	Stress relieved by compressing
Tx54	Stress relieved by combined stretching and compressing, applying to die forgings

Πίνακας 5: Χαρακτηρισμός κραμάτων αλουμινίου [1]

2. Θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων

2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων μηχανικής και μαθηματικών. Μερικά από τα πεδία ενδιαφέροντος είναι η ανάλυση αντοχής κατασκευών, η μεταφορά θερμότητας, η ροή των ρευστών κ.α.. Σε περίπλοκα προβλήματα με δύσκολες γεωμετρίες είναι αδύνατο να βρεθεί μια αναλυτική μαθηματική λύση. Οι αναλυτικές λύσεις δίνονται από μαθηματικές εκφράσεις και έχουν ως σκοπό της εύρεση τιμών για διάφορους αγνώστους σε οποιοδήποτε σημείο του υπό εξέταση σώματος. Γενικά απαιτείται η λύση κανονικών και μερικών διαφορικών εξισώσεων όπου λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας, των δυνάμεων και των ιδιοτήτων του υλικού είναι δύσκολο έως ακατόρθωτο να λυθούν. Για τον λόγο αυτόν βασιζόμαστε σε αριθμητικές μεθόδους όπως την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για εύρεση αποδεκτών λύσεων. Ο σχηματισμός του προβλήματος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από ένα σύστημα παράλληλων αλγεβρικών εξισώσεων για την εύρεση της λύσης και όχι στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Με την αριθμητική μέθοδο γίνονται προσεγγίσεις των άγνωστων τιμών σε έναν αριθμό από συνεχή διακριτά σημεία. Η διαδικασία μοντελοποίησης ενός σώματος ξεκινά με την υποδιαίρεση του σε ένα σύστημα ισοδύναμων μικρότερων σωμάτων ή μονάδων (πεπερασμένα στοιχεία) διασυνδεδεμένα στα κοινά τους σημεία (κόμβοι) με δύο ή περισσότερα στοιχεία. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται διακριτοποίηση. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αντί να λυθεί ένα πρόβλημα για ολόκληρο το σώμα σε μία διαδικασία, δημιουργούνται εξισώσεις για κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά οι οποίες στο τέλος συνδυάζονται και οδηγούν στη λύση για ολόκληρο το σώμα. Εν ολίγοις, για την λύση ενός προβλήματος αντοχής σε μια κατασκευή υπό φόρτιση αυτό που πρέπει να καθοριστεί είναι οι μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο καθώς και οι τάσεις εντός του ορίου των στοιχείων. Σε άλλα προβλήματα για παράδειγμα οι άγνωστοι στους κόμβους μπορεί να είναι θερμοκρασίες ή πίεση ρευστού λόγω θερμότητας ή ροής ρευστού. [2]

2.2 Εισαγωγή στους πίνακες

Οι μέθοδοι των πινάκων είναι ένα απαραίτητο εργαλείο που χρησιμοποιείται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την απλοποίηση των εξισώσεων δυσκαμψίας των στοιχείων, για την αποφυγή μακροσκελούς λύσεων, και το πιο σημαντικό, για την χρήση τους σε μεθόδους προγραμματισμού στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Ο πίνακας είναι μια ορθογώνια διάταξη δεδομένων στοιχισμένα σε στήλες και γραμμές τα οποία χρησιμοποιούνται ως βοήθημα στην έκφραση και επίλυση ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων. Για παράδειγμα, το στοιχείο μιας δύναμης που εφαρμόζεται σε διάφορους κόμβους ή σημεία μιας κατασκευής και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις των κόμβων μπορούν να εκφραστούν με πίνακες :

$$\{F\} = \underline{F} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{2z} \\ \vdots \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{Bmatrix} \quad \{d\} = \underline{d} = \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ d_{2z} \\ \vdots \\ d_{nx} \\ d_{ny} \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Ο δείκτης στο \underline{F} και στο \underline{d} υποδεικνύουν τον κόμβο και την διεύθυνση της δύναμης ή της μετατόπισης αντίστοιχα. Για παράδειγμα, η F_{1x} μας δείχνει την δύναμη στον κόμβο 1 η οποία ασκείται κατά τη διεύθυνση x. Οι πίνακες (1) είναι $n \times 1$ και ονομάζονται πίνακες στήλης. Με $\{\}$ συμβολίζονται οι πίνακες στήλης. Ολόκληρο το σύστημα των δυνάμεων και των μετατοπίσεων συμβολίζονται με $\{F\}, \{d\}$ αντίστοιχα. Σε μια γενικότερη κατάσταση οι πίνακες θα συμβολίζονται με $[\]$. Για παράδειγμα, οι πίνακες των στοιχείων καθώς και τα μητρώα ακαμψίας παρουσιάζονται από ορθογώνιους πίνακες ως εξής :

$$[k] = \underline{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K] = \underline{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

όπου στην θεωρία τα στοιχεία k_{ij} και K_{ij} αναφέρονται συνήθως ως stiffness influence coefficients. Οι συνολικές δυνάμεις στους κόμβους \underline{F} και οι συνολικές μετατοπίσεις των κόμβων \underline{d} συνδέονται με τον πίνακα \underline{K} από τον παρακάτω τύπο:

$$\underline{F} = \underline{K} \underline{d} \quad (4)$$

Η εξίσωση (4) ονομάζεται global stiffness equation και αναπαριστά μια ομάδα παράλληλων εξισώσεων. Για να αποκτήσουμε μια πιο αναλυτική εικόνα των στοιχείων K_{ij} της εξίσωσης (3) χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) έχουμε την ανεπτυγμένη μορφή της εξίσωσης (4) παρακάτω:

$$\begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ \vdots \\ F_{nz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ \vdots \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Ας υποθέσουμε πως εφαρμόζουμε μια δύναμη η οποία σχηματίζει μια μετατόπιση της μορφής $d_{1x} = 1, d_{1y} = d_{1z} = \cdots = d_{nz}$. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (5) έχουμε:

$$F_{1x} = K_{11} \quad F_{1y} = K_{21}, \dots, F_{nz} = K_{n1} \quad (6)$$

Η εξίσωση (6) περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία της πρώτης στήλης του \underline{K} . Επίσης δείχνουν πως τα στοιχεία $K_{11}, K_{21}, K_{31}, \dots, K_{n1}$ είναι οι τιμές των συνολικών δυνάμεων που ασκούνται στους κόμβους για να διατηρηθεί η απαιτούμενη μετατόπιση. Κατά αντιστοιχία, η δεύτερη στήλη του πίνακα \underline{K} αναπαριστά τις τιμές των δυνάμεων που απαιτούνται για να διατηρηθεί η απαιτούμενη μετατόπιση ίση με $d_{1y} = 1$ και όλες οι υπόλοιπες μετατοπίσεις να ισούνται με 0. Κατά αυτόν τον τρόπο καταλαβαίνουμε την σημασία του συντελεστή επιρροής της ακαμψίας (stiffness influence coefficients).

Χρησιμοποιώντας πράξεις πινάκων όλες οι διαδικασίες γίνονται μια ρουτίνα με σωστή εξάσκηση, είναι χρήσιμα εργαλεία ακόμα και για λύσεις μικρών προβλημάτων με το χέρι. Οι πράξεις πινάκων είναι καίριας σημασίας για την χρήση στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και απαραίτητοι για λύσεις σύνθετων προβλημάτων που απαιτούν μεγάλο αριθμό παράλληλων πράξεων. [2]

2.3 Γενική διαδικασία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε τα γενικά βήματα για τη διατύπωση και λύση ενός προβλήματος μηχανικής. Για απλότητα, στα παρακάτω βήματα θα δούμε ένα κατασκευαστικό πρόβλημα μόνο.

Γενικά, σε ένα πρόβλημα αντοχής μιας κατασκευής, οι μηχανικοί αναζητούν να καθορίσουν τις μετατοπίσεις και τις τάσεις σε ολόκληρη την υπό μελέτη κατασκευή, η οποία βρίσκεται σε ισορροπία και δέχεται συγκεκριμένα φορτία. Σε πολλές κατασκευές, είναι δύσκολο να καθοριστεί η κατανομή των παραμορφώσεων με τους συμβατικούς τρόπους, και για αυτό είναι απαραίτητη η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Υπάρχουν 2 γενικές άμεσες προσεγγίσεις που παραδοσιακά σχετίζονται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα αντοχής.

Η πρώτη προσέγγιση, που ονομάζεται force, or flexibility method, χρησιμοποιεί τις εσωτερικές δυνάμεις ως τους αγνώστους του προβλήματος. Για την εύρεση των τελικών εξισώσεων πρέπει πρώτα να λυθούν οι εξισώσεις ισορροπίας του σώματος. Το αποτέλεσμα είναι μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων για τον καθορισμό των υπολειπόμενων ή αγνώστων δυνάμεων.

Η δεύτερη προσέγγιση, που ονομάζεται displacement, or stiffness method θεωρεί τις μετατοπίσεις των κόμβων ως τους αγνώστους του προβλήματος. Για παράδειγμα, οι συνθήκες συμβατότητας απαιτούν από τα στοιχεία να είναι συνδεδεμένα σε ένα κοινό κόμβο, σε μια κοινή ακμή, ή σε μια κοινή επιφάνεια προτού εφαρμοστεί η δύναμη, αλλά επίσης να παραμείνουν συνδεδεμένα και μετά την εφαρμογή της φόρτισης και της μετέπειτα παραμόρφωσης. Έπειτα για την εύρεση των τελικών εξισώσεων, εκφράζονται ως μετατοπίσεις των κόμβων, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ισορροπίας του σώματος σε συνδυασμό με ένα νόμο που συσχετίζει τις δυνάμεις με τις μετατοπίσεις.

Οι δύο αυτές προσεγγίσεις έχουν ως αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης να προκύπτουν διαφορετικοί άγνωστοι (δυνάμεις ή μετατοπίσεις) που σημαίνει πως χρησιμοποιούνται και διαφορετικοί πίνακες (flexibilities or stiffnesses). Έχει αποδειχθεί πως, για υπολογιστικούς λόγους, η μέθοδος των μετατοπίσεων (displacement or stiffness) είναι πιο επιθυμητή γιατί ο σχηματισμός της είναι πιο απλός για τα περισσότερα προβλήματα αντοχής. Επιπροσθέτως, ένας τεράστιος αριθμός προγραμμάτων γενικού τύπου πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιούν την μέθοδο των μετατοπίσεων για την λύση προβλημάτων αντοχής. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση της κατασκευής χρησιμοποιώντας μικρά διασυνδεδεμένα στοιχεία, τα λεγόμενα πεπερασμένα στοιχεία. Μια συνάρτηση μετατόπισης συνδέεται με κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Κάθε στοιχείο είναι ενωμένο, άμεσα ή έμμεσα, με κάθε διπλανό του στοιχείο μέσω κοινών κόμβων, ακμών ή επιφανειών. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες τάσεων/παραμορφώσεων του υλικού που αποτελείται η κατασκευή, προκύπτει η συμπεριφορά των κόμβων σε σχέση με τις υπόλοιπες ιδιότητες των στοιχείων της κατασκευής. Η συνολική ομάδα εξισώσεων που καθορίζει την συμπεριφορά κάθε κόμβου είναι μία σειρά αλγεβρικών εξισώσεων σε μορφή πινάκων.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα γενικά βήματα που χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό και την λύση ενός προβλήματος αντοχής με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

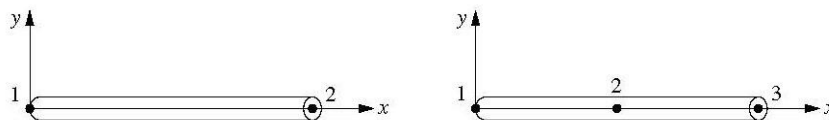
Πρέπει να έχουμε στο μυαλό μας πως ο αναλυτής παίρνει σημαντικές αποφάσεις κατά την φάση της ανάλυσης της κατασκευής όπως την συνέχεια των πεπερασμένων στοιχείων (continuity), τον τύπο των στοιχείων (element type) που θα χρησιμοποιηθούν, την μορφή των δυνάμεων που θα ασκηθούν στο σώμα (force type) καθώς και τις οριακές συνθήκες (boundary conditions). [2]

2.3.1 Διακριτοποίηση και επιλογή τύπου στοιχείων

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την διαίρεση του σώματος σε ένα ισοδύναμο σύστημα πεπερασμένων στοιχείων με συνδεδεμένους κόμβους και την επιλογή του κατάλληλου τύπου στοιχείων για την βέλτιστη αναπαράσταση του σώματος. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων, το μέγεθος τους και ο τύπος τους είναι καίριας σημασίας για την ανάλυση. Τα στοιχεία πρέπει να είναι τόσο μικρά ώστε να προκύψουν χρήσιμα αποτελέσματα και τόσο μεγάλα ώστε να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού του προβλήματος. Στοιχεία μικρού μεγέθους (και πιθανότατα υψηλότερης τάξης στοιχεία) είναι επιθυμητά σε περιοχές που υπάρχουν ραγδαίες αλλαγές, όπως σε περιοχές αλλαγής γεωμετρίας, ενώ τα στοιχεία μεγαλύτερου μεγέθους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου υπάρχει σταθερή γεωμετρία. Η διακριτοποίηση (meshing) δημιουργείται με αντίστοιχα stand alone προγράμματα, ή στην προ επεξεργασία των δεδομένων σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

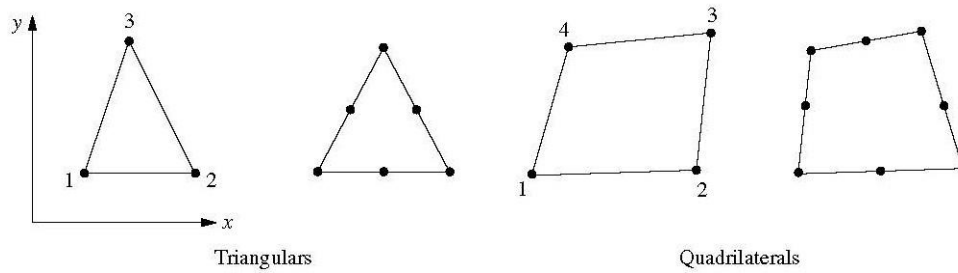
Η επιλογή των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση εξαρτάται από το είδος του προβλήματος και τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα, καθώς και από το πόσο κοντά στην πραγματικότητα θέλει ο αναλυτής να είναι τα αποτελέσματα του. Η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων για κάθε είδος προβλήματος είναι μια σημαντική απόφαση που παίρνει ο σχεδιαστής/αναλυτής. Παρακάτω θα δούμε τα πιο κοινά είδη στοιχείων που χρησιμοποιούνται για διακριτοποίηση.

Τα κύρια γραμμικά στοιχεία (line elements) αποτελούνται από bar(or truss) και από beam elements. Η διατομή των στοιχείων περιγράφεται από τα τμήματα των γραμμών. Γενικά η διατομή δεν είναι απαραίτητο να είναι ίδια κατά το μήκος του στοιχείου αλλά μπορεί να μεταβάλλεται. Τα γραμμικά στοιχεία συνήθως χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση δικτυωμάτων. Η πιο απλή μορφή των γραμμικών στοιχείων (linear elements) αποτελείται από μια ευθεία με 2 κόμβους στα 2 άκρα της ευθείας, αλλά υπάρχουν και τα στοιχεία υψηλότερης τάξης στα οποία βρίσκουμε συνολικά 3 ή και περισσότερους κόμβους στο κάθε στοιχείο (higher order/ quadratic/ cubic etc.. elements).



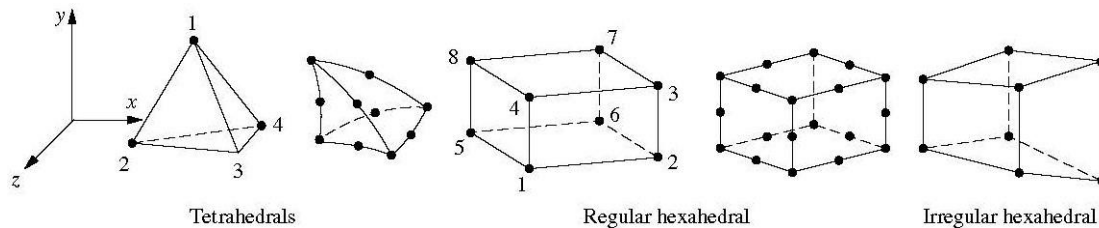
Εικόνα 1: Απλό γραμμικό στοιχείο 2 κόμβων και υψηλότερης τάξης γραμμικό στοιχείο [2]

Τα βασικά δισδιάστατα στοιχεία (plane elements) φορτίζονται από φορτία στην επιφάνεια τους. Είναι τριγωνικής ή ορθογωνικής μορφής στοιχεία (triangular or quadrilateral elements). Η πιο απλή μορφή των δισδιάστατων στοιχείων αποτελείται από κόμβους μόνο στα άκρα και έχουν ευθύγραμμο τμήματα στο περίγραμμά τους (linear elements). Αντίστοιχα και στα δισδιάστατα προβλήματα έχουμε υψηλότερης τάξης στοιχεία στα οποία βρίσκουμε ακόμη έναν κόμβο στο μέσο κάθε γραμμής στο περίγραμμά του στοιχείου το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το ευθύγραμμο τμήμα να γίνεται καμπύλη (quadratic elements). Τα στοιχεία αυτού του τύπου μπορούν να έχουν μεταβλητό πάχος ή σταθερό. Χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση/διακριτοποίηση σε πολλά προβλήματα μηχανικής.



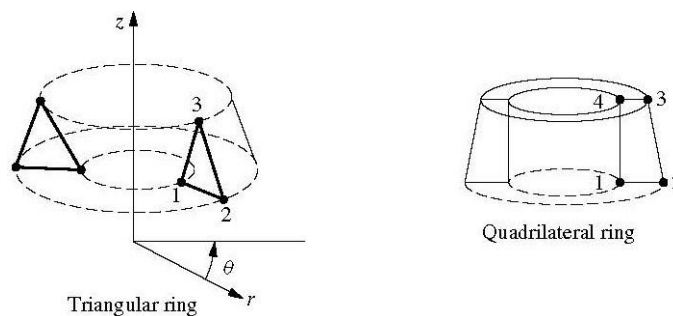
Εικόνα 2: Απλά δισδιάστατα στοιχεία με κόμβους στις ακμές και υψηλότερης τάξης δισδιάστατα στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους κατά μήκος των πλευρών [2]

Τα πιο κοινά τρισδιάστατα στοιχεία είναι τα τετράεδρα (tetrahedral) και τα εξάεδρα (hexahedral), και χρησιμοποιούνται όταν είναι απαραίτητη η ανάλυση προβλημάτων στις 3 διαστάσεις. Αντίστοιχα στα στοιχεία αυτού του τύπου βρίσκουμε ευθύγραμμα τμήματα στις ακμές του στοιχείου που έχουν ως αποτέλεσμα επίπεδη επιφάνεια, καθώς στα υψηλότερης τάξης στοιχεία βρίσκουμε καμπύλες στις ακμές και έχουν ως αποτέλεσμα επιφάνειες με καμπυλότητα.



Εικόνα 3: Απλά τρισδιάστατα στοιχεία και υψηλότερης τάξης τρισδιάστατα στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους κατά μήκος των πλευρών [2]

Τα συμμετρικά στοιχεία (axisymmetric element) είναι στοιχεία που προκύπτουν με την περιστροφή 360° ενός τριγωνικού ή τετράπλευρου στοιχείου γύρω από έναν άξονα περιστροφής και χρησιμοποιούνται όταν η γεωμετρία αλλά και οι φόρτιση είναι συμμετρική.



Εικόνα 4: Απλό αξυμμετρικά τριγωνικό και τετράπλευρα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αξυμμετρικά προβλήματα [2]

2.3.2 Επιλογή συνάρτησης μετατόπισης (displacement function)

Στο δεύτερο βήμα της διαδικασίας γίνεται η επιλογή της συνάρτησης μετατόπισης εντός του κάθε στοιχείου. Η συνάρτηση αυτή καθορίζεται μέσα στο στοιχείο χρησιμοποιώντας τις τιμές των κόμβων. Πολυώνυμα 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού είναι οι πιο συνήθεις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται λόγω της απλότητας ως προς την επίλυση τους στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο τριγωνομετρικές σειρές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Για ένα πρόβλημα 2 διαστάσεων, η συνάρτηση μετατόπισης είναι μια συνάρτηση των συντεταγμένων σε ένα επίπεδο x-y. Οι συναρτήσεις εκφράζονται ως άγνωστοι στους κόμβους. Η ίδια γενική συνάρτηση μετατόπισης επαναλαμβάνεται για κάθε στοιχείο. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μια συνεχής ποσότητα, όπως αυτή των μετατοπίσεων σε όλο το σώμα, προσεγγίζεται από ένα διακριτό μοντέλο που αποτελείται από ένα σύνολο συνεχόμενων συναρτήσεων καθορισμένο σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. [2]

2.3.3 Ορισμός σχέσης παραμορφώσεων-μετατοπίσεων και τάσεων-παραμορφώσεων

Η σχέσεις παραμορφώσεων-μετατοπίσεων και τάσεων-παραμορφώσεων είναι απαραίτητες για να προκύψουν οι εξισώσεις για το κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Στην περίπτωση της παραμόρφωσης σε μονοδιάστατα προβλήματα, πχ στην κατεύθυνση x, έχουμε παραμόρφωση ϵ_x συ σχετιζόμενη με την μετατόπιση u για μικρές παραμορφώσεις από τον παρακάτω τύπο:

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (7)$$

Επίσης, οι τάσεις συνδέονται με τις παραμορφώσεις μέσω του νόμου τάσεων-παραμορφώσεων (constitutive law). Η ικανότητα ακριβούς ορισμού της συμπεριφοράς ενός υλικού είναι το πιο σημαντικό ώστε να ληφθούν αποδεκτά αποτελέσματα. Ο πιο γνωστός νόμος τάσεων παραμορφώσεων είναι ο νόμος του Hooke που χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (8)$$

Όπου σ_x = τάση στην κατεύθυνση x και E = μέτρο ελαστικότητας [2]

2.3.4 Δημιουργία μητρώων ακαμψίας (element stiffness matrix) και των εξισώσεων

Η ανάπτυξη των μητρώων ακαμψίας και των εξισώσεων βασίζονται στη θεωρία των συντελεστών επιρροής της ακαμψίας (stiffness influence coefficients), κάτι που προϋποθέτει κάποιο υπόβαθρο όσον αφορά την ανάλυση των κατασκευών. Παρακάτω θα αναφερθούν εναλλακτικές μέθοδοι οι οποίες δεν προϋποθέτουν εξειδικευμένο υπόβαθρο. [2]

1. Direct Equilibrium Method

Αναφορικά με αυτή τη μέθοδο, τα μητρώα ακαμψίας και οι εξισώσεις που αφορούν τις δυνάμεις στους κόμβους και τις μετατοπίσεις στους κόμβους αποκτώνται εξισώνοντας τις δυνάμεις σε ένα βασικό στοιχείο σε συνδυασμό με σχέσεις δυνάμεων/παραμορφώσεων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε μονοδιάστατα προβλήματα.

2. Work or Energy Methods

Για την ανάπτυξη των μητρώων ακαμψίας και των εξισώσεων για ένα πρόβλημα 2 ή και 3 διαστάσεων είναι ευκολότερο να χρησιμοποιηθεί η work or energy method. Η αρχή του virtual work (χρησιμοποιώντας εικονικές μετατοπίσεις), η αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy), και το θεώρημα του Castigliano είναι οι συνηθέστεροι μέθοδοι για την παραγωγή εξισώσεων για κάθε στοιχείο. Η αρχή του virtual work έχει εφαρμογή όσον αφορά την συμπεριφορά του υλικού. Οι μέθοδοι minimum potential energy και η θεωρία του Castigliano έχουν εφαρμογή μόνο σε ελαστικά υλικά. Η virtual work μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και όταν δεν υπάρχει κάποια δυναμική συνάρτηση. Ωστόσο και οι 3 αρχές αποδίδουν παρόμοιες εξισώσεις στοιχείων για γραμμικό-ελαστικά υλικά.

3. Methods of Weighted Residuals

Η μέθοδος weighted residuals είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη των εξισώσεων των στοιχείων, με τη δημοφιλέστερη τη μέθοδο του Galerkin. Αυτή η μέθοδος αποδίδει ίδια αποτελέσματα με τις energy methods όποτε αυτές βρίσκουν εφαρμογή. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν η συνάρτηση της δυναμικής ενέργειας δεν είναι άμεσα διαθέσιμη. Οι μέθοδοι weighted residuals επιτρέπει στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων να εφαρμοστεί απευθείας σε οποιαδήποτε διαφορική εξίσωση.

2.3.5 Συγκέντρωση των εξισώσεων των στοιχείων για την απόκτηση της συνολικής εξίσωσης, και εισαγωγή στις οριακές συνθήκες

Σε αυτό το βήμα η κάθε εξίσωση ισορροπίας των κόμβων του στοιχείου συγκεντρώνεται για την απόκτηση της συνολικής εξίσωσης ισορροπίας των κόμβων. Η τελική μορφή του πίνακα έχει την εξής μορφή:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (9)$$

Όπου ο πίνακας $\{F\}$ είναι τα διανύσματα των δυνάμεων στους κόμβους, $[K]$ συνολικό μητρώο ακαμψίας, και $\{d\}$ είναι τα διανύσματα των γνωστών και άγνωστων βαθμών ελευθερίας των κόμβων της κατασκευής ή οι γενικευμένες μετατοπίσεις. Σε αυτό το σημείο, το συνολικό μητρώο ακαμψίας $[K]$ είναι ένας μοναδικός πίνακας (singular matrix) καθώς η ορίζουσα του είναι μηδενική. Για να αφαιρέσουμε το singularity problem, πρέπει να εφαρμόσουμε συγκεκριμένες οριακές συνθήκες έτσι ώστε η κατασκευή να μείνει στο ίδιο σημείο και όχι να μετακινηθεί σαν ένα άκαμπτο σώμα. [2]

2.3.6 Λύση για τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας (ή γενικευμένες μετατοπίσεις)

Ο παραπάνω πίνακας (9) τροποποιημένος ανάλογα με τις οριακές συνθήκες, είναι μια ομάδα από παράλληλες αλγεβρικές εξισώσεις που μπορούν να εκφραστούν στην παρακάτω μορφή πίνακα:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (10)$$

όπου στην περίπτωση αυτή το n δείχνει τον συνολικό αριθμό των άγνωστων βαθμών ελευθερίας των κόμβων. Αυτή η εξίσωση μπορεί να λυθεί για τα d_s χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Gauss ή επαναληπτική μέθοδο όπως τη μέθοδο Gauss-Seidel. Τα d_s ονομάζονται οι κύριοι άγνωστοι γιατί είναι οι πρώτες ποσότητες που καθορίζονται χρησιμοποιώντας την ακαμψία την μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. [2]

2.3.7 Λύση για τις τάσεις και παραμορφώσεις των στοιχείων

Για το πρόβλημα αντοχής μια κατασκευής, σημαντικές δευτερεύουσες ποσότητες τάσεων και παραμορφώσεων μπορούν να αποκτηθούν επειδή μπορούν να εκφραστούν απευθείας σε όρους μετατόπισης όπως και στο προηγούμενο βήμα. [2]

2.3.8 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Ο τελικός στόχος είναι η ερμηνεία και η ανάλυση των αποτελεσμάτων για την χρήση τους στη διαδικασία της σχεδίασης. Η εύρεση των περιοχών με τις μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις είναι σημαντικό βήμα ως προς την λήψη αποφάσεων κατά τη φάση της σχεδίασης. Υπολογιστές βοηθούν στην μετά επεξεργασία των αποτελεσμάτων έτσι ώστε ο χρήστης να έχει μια γραφική μορφή των αποτελεσμάτων. [2]

2.3.9 Inertia Relief

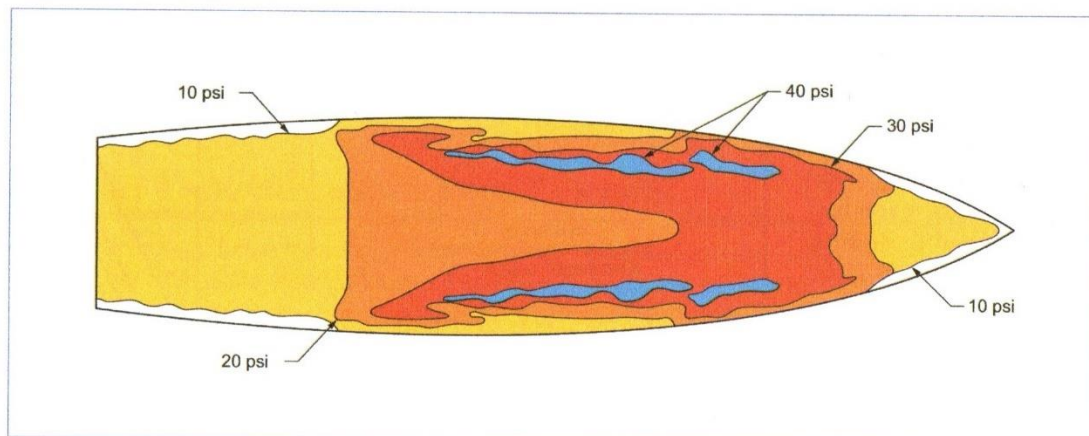
Ένα ισοδύναμο σύστημα ελευθέρου σώματος εκτελείται όταν υπάρχει μια στατική ανάλυση σε συνδυασμό με την τεχνική inertia relief. Στην τεχνική αυτή, οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις και ροπές αντισταθμίζονται από δυνάμεις αδράνειας που προκαλούνται από ένα πεδίο επιταχύνσεων. Εξετάζουμε δηλαδή την εφαρμογή ενός πεδίου επιταχύνσεων (που θα καθοριστεί) που ακυρώνει ακριβώς ή εξισορροπεί τα εφαρμοζόμενα φορτία. Οι περιορισμοί μετατόπισης μιας κατασκευής πρέπει να είναι μόνο όσοι χρειάζονται για να αποτρέψουν την rigid body motion (χρειάζονται 3 περιορισμοί για μια 2D κατασκευή και 6 περιορισμοί για μια 3D κατασκευή). Το άθροισμα των δυνάμεων αντίδρασης στα σημεία που εφαρμόζονται οι περιορισμοί θα είναι 0. Κάποιοι από τους περιορισμούς της τεχνικής αυτής αναφέρονται παρακάτω:

1. Η τεχνική inertia relief εφαρμόζεται μόνο σε γραμμικές αναλύσεις
2. Η μάζα των στοιχείων καθώς και οι πυκνότητες πρέπει να έχουν καθοριστεί στο μοντέλο
3. Συμμετρικά και γενικευμένα στοιχεία παραμορφώσεων δεν επιτρέπονται

3. Μέθοδος των Allen & Jones

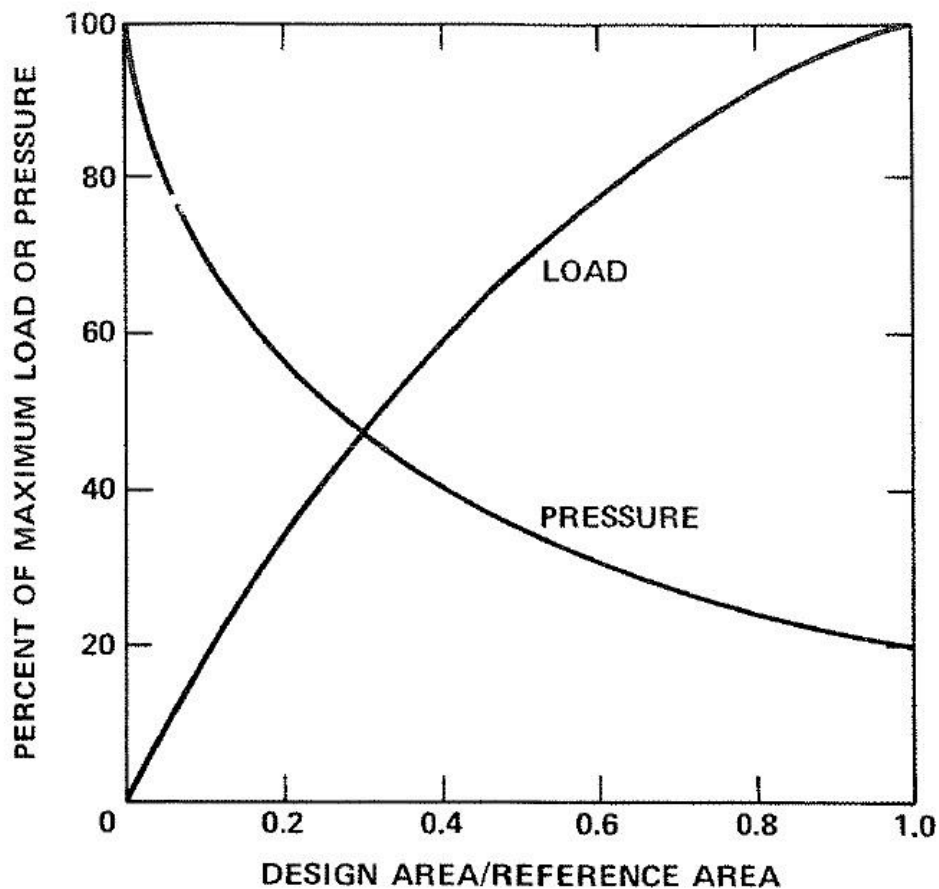
Η δομική σχεδίαση ενός σκάφους υψηλών ταχυτήτων με την βοήθεια των κανονισμών των νηογνομόνων είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Οι κανονισμοί βασίζονται στην μέθοδο των Allen & Jones (1978). Οι Allen & Jones ανέπτυξαν μια μέθοδο όπου η πίεση σχεδίασης (design pressure) για διάφορα στοιχεία του σκάφους (shell, frames) διατυπώνεται συναρτήσει των κυρίων χαρακτηριστικών του σκάφους και από τις κατακόρυφες επιταχύνσεις. Αυτή η τοπική πίεση σχεδίασης, όπου συνήθως αναφέρεται και ως ισοδύναμη πίεση σφυρόκρουσης (slamming equivalent uniform design pressure), ορίζεται ως η πίεση η οποία όταν ασκηθεί σε ένα στοιχείο του πλοίου θα φέρει περίπου τα ίδια αποτελέσματα, όσον αφορά τις παραμορφώσεις και τις μέγιστες τάσεις, σε σχέση με την πραγματική πίεση που ασκείται στο σκάφος. Ο υπολογισμός της πίεσης σφυρόκρουσης κατά τους Allen & Jones βασίζεται στην ιδέα της επιφάνειας αναφοράς (reference area) του σκάφους η οποία θα οριστεί παρακάτω.

Η γάστρα ενός σκάφους θα υποστεί διακυμάνσεις φορτίσεων με διαφορετικές μορφές και εντάσεις. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της κρούσης, οι μέγιστες πιέσεις επιδρούν σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια της γάστρας, αποτελώντας έτσι ένα μικρό μέρος του συνολικού φορτίου της κρούσης. Αντιθέτως, χαμηλές πιέσεις εμφανίζονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια της γάστρας, και αναπαριστούν υψηλότερο ποσοστό της συνολικής πίεσης. Η μείωση της πίεσης είναι αρκετά σημαντική, και κατά τους Allen & Jones, οι μέσες πιέσεις που κατανέμονται ομοιόμορφα συσχετίζονται περισσότερο με τις μετρούμενες αποκρίσεις στα plates, stiffeners & frames σε αντίθεση με τις κορυφές των πιέσεων. Στην παρακάτω εικόνα 5 (Allen & Jones) βλέπουμε μια τυπική κατανομή των πιέσεων κατά τη στιγμή της κρούσης, όπου η πίεση φαίνεται με ισούψείς καμπύλες σταθερών πιέσεων. Η εικόνα αναπαριστά τη κατανομή των πιέσεων σε μια συγκεκριμένη στιγμή.



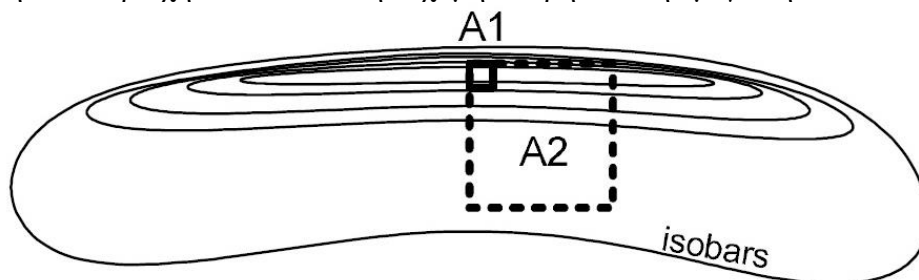
Εικόνα 5: Τυπικές ισούψείς κατανομές πίεσης τη στιγμή της κρούσης (Allen & Jones - 1978)
[3]

Η σχέση πίεσης – επιφάνειας φαίνεται στην εικόνα 6 η οποία είναι και αυτή από τους Allen & Jones.



Εικόνα 6: Ποσοστό μέγιστου φορτίου ή πίεσης – επιφάνεια σχεδίασης/επιφάνεια αναφοράς [3]

Η στιγμιαία κατανομή της πίεσης στην εικόνα 5 εξετάζεται περαιτέρω. Στην εικόνα 7 βλέπουμε μια σχηματική μεγέθυνση της στιγμιαίας κατανομής της πίεσης γύρω από την περιοχή των υψηλών πιέσεων. Έχουν σημειωθεί 2 επιφάνειες, οι A1 και η A2 όπου αναπαριστούν την επιφάνεια ενός στοιχείου που ασκείται η πίεση (bottom panel). Όπως φαίνεται η μικρότερη επιφάνεια A1 είναι πλήρως καλυμμένη από την υψηλή πίεση. Συνεπώς μια ισοδύναμη ομοιόμορφη πίεση για την A1 επιφάνεια στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή θα πρέπει να είναι ίση ή περίπου ίση με την μέγιστη πίεση. Για την μεγαλύτερη περιοχή A2, ένα μικρό κομμάτι βρίσκεται στην περιοχή των υψηλών πιέσεων. Η επικρατούσα φόρτιση είναι στην περιοχή των χαμηλών πιέσεων και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισοδύναμη ομοιόμορφη πίεση για την A2 περιοχή να είναι αισθητά χαμηλότερη από την μέγιστη.



Εικόνα 7: Σχηματική μεγέθυνση της στιγμιαίας κατανομής της πίεσης [15]

Μετά από εκτενείς ημι-εμπειρικές προσομοιώσεις και full scale trials σε διάφορα σκάφη, οι Allen & Jones παρατήρησαν πως παρόλο που υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στην κατανομή/ένταση της πίεσης από κυματισμό σε κυματισμό, ανάμεσα σε διάφορες καταστάσεις του σκάφους όσον αφορά την ταχύτητα του και την θάλασσα, υπάρχει ένας σχετικά σταθερός συσχετισμός ανάμεσα στην ισοδύναμη πίεση προς την επιφάνεια. Χρησιμοποιώντας αδιάστατες τιμές στις υπό εξέταση επιφάνειες σε σχέση με τις επιφάνειες αναφοράς, παρατηρήθηκε πως μπορούν να διατυπωθούν γενικές σχέσεις πίεσης-επιφάνειας για διάφορα σκάφη. Η επιφάνεια αναφοράς θεωρείται πως αναπαριστά κατά προσέγγιση το ποσοστό της επιφάνειας που εμπλέκεται στις μέγιστες κρούσεις των κυματισμών. Η σχέση πίεσης-επιφάνειας μπορεί να συσχετιστεί με τη συνολική κατακόρυφη φόρτιση της γάστρας, η οποία στη συνέχεια μπορεί να εκφραστεί ως μεταβλητή των κατακόρυφων επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του σκάφους σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Newton. Οι Allen & Jones αναφέρονται στην επιφάνεια αναφοράς η οποία εκφράζεται βάση της μάζας εκτοπίσματος και του στατικού βυθίσματος. Η επιφάνεια αναφοράς A_R δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$A_R = \frac{0.7\Delta}{T} \quad (11)$$

σε m^2 όπου Δ =το εκτόπισμα του σκάφους σε metric tonnes, και T =στατικό βύθισμα σε [m]. Οι Allen & Jones απέδειξαν πως, για τυπικές γάστρες πλαναρίσματος, η A_R αντιστοιχεί περίπου στο 36% της waterplane επιφάνειας στη ηρεμία το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως :

$$A_R = 0.3LB \quad (12)$$

Όπου L και B αφορούν τις waterline μήκος και πλάτος αντίστοιχα σε [m].

Βάση του 2^{ου} νόμου του Newton, οι Allen & Jones εκφράζουν την μέση πίεση στην επιφάνεια αναφοράς P_R σε κατάσταση που αντιστοιχεί σε μία μέση κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο βάρους a_{cg} .

$$P_R = \frac{m a_{cg}}{A_R} \quad (13)$$

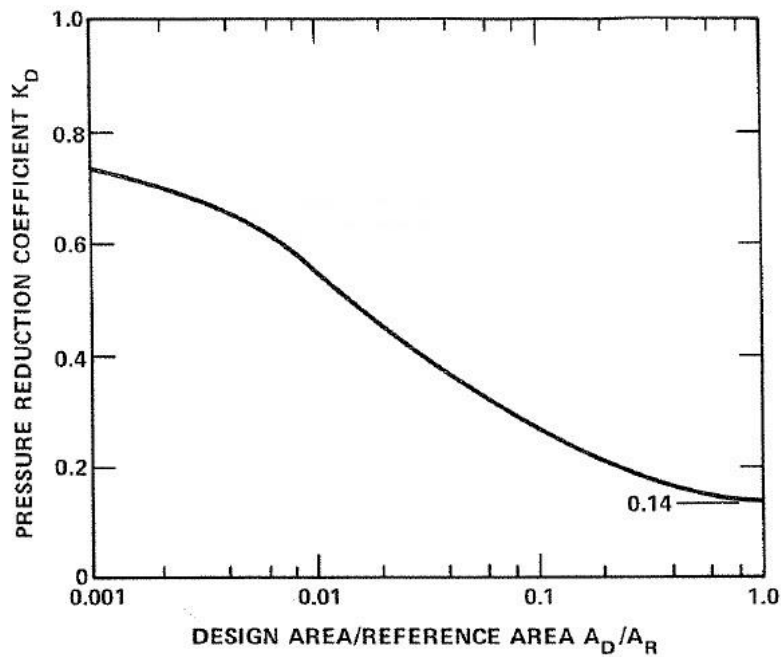
όπου m =μάζα του σκάφους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέση πίεση σε μια απειροελάχιστη επιφάνεια είναι ίση με την μέση πίεση των μεγαλύτερων πιέσεων (peaks) P_p . Μέσω των παρατηρήσεων οι Allen & Jones κατέληξαν ότι η μέση πίεση στην επιφάνεια αναφοράς είναι περίπου 14% της μέσης πίεσης των peaks.

$$P_R = 0.14P_p \quad (14)$$

Για μια επιφάνεια σχεδίασης A_D ανάμεσα στην απειροελάχιστη και την A_R , οι Allen & Jones εκφράζουν την ισοδύναμη πίεση ως :

$$P_D = K_D P_p \quad (15)$$

και δημιούργησαν τη σχέση πίεσης-επιφάνειας K_D σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 8: Συντελεστής μείωσης πίεσης/λόγος επιφανειών σχεδίασης-αναφοράς [3]

Ενοποιώντας τους παραπάνω τύπους, οι Allen & Jones εκφράζουν την ισοδύναμη ομοιόμορφη πίεση για κάθε επιφάνεια σχεδίασης ως :

$$P_D = K_L K_D \frac{\rho \alpha_{cg}}{0.14 A_R} \quad (16)$$

όπου ο συντελεστής K_L αφορά την κατανομή της πίεσης κατά μήκος. [3]

4. Μέθοδος σχεδίασης των νηογνομώνων

Τα πρώτα βήματα για κάθε σχεδιαστή είναι να παρθεί η απόφαση για τον σκοπό που πρέπει να σχεδιαστεί το σκάφος, η έννοια του υλικού σχεδίασης (material concept) και του προφίλ χρήσης (operational profile). Τα πιο συνήθη υλικά σχεδίασης για σκάφη υψηλών ταχυτήτων είναι το αλουμίνιο, ο πολυεστέρας μονού τοιχώματος και πολυεστέρας τύπου σάντουιτς. Ανάλογα με το υλικό σχεδίασης, η διάταξη του πυθμένα όσον αφορά τις ενισχύσεις του διαφέρει αρκετά. Το operational profile υποδεικνύει την απόφαση του σχεδιαστή όσον αφορά τους συνδυασμούς της ταχύτητας πλευσης και των sea states που καλείται να συναντήσει το σκάφος. Το operational profile διαφέρει αρκετά ανάλογα με τον τύπο του σκάφους (patrol, passenger, powerboat). Μια συνήθη ανάγκη για τα σκάφη υψηλών ταχυτήτων είναι να μπορούν να προσπεράσουν μεγάλους κυματισμούς σε υψηλές ταχύτητες. Έχοντας γνωστό το operational profile και τα κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους υπολογίζεται η κατακόρυφη επιτάχυνση μέσω ημι-εμπειρικών τύπων όπως αυτός που αναπτύχθηκε από τους Savitsky & Brown (1976), ή από άλλους μεθόδους που ορίζουν οι κανονισμοί. Με την κατακόρυφη επιτάχυνση και μια διάταξη των ενισχυτικών του πυθμένα μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της πίεσης που δέχεται το κάθε στοιχείο χρησιμοποιώντας μεθόδους που έχουν αναπτύξει οι Allen & Jones (1978). Λόγω της μη ομοιόμορφης φόρτισης κατά τις εγκάρσιες τομές είναι απαραίτητο να εξιδανικεύσουμε την κατασκευή. Εξιδανικεύοντας την κατασκευή οι μη ομοιόμορφες φορτίσεις μπορούν να απλοποιηθούν σε μια ενιαία πίεση σε ένα συγκεκριμένο πλάτος, για παράδειγμα γύρω από ένα ενισχυτικό. Καταλήγουμε στην εξής παρακάτω διαδικασία :

1. Καθορισμός του operational profile και των κύριων χαρακτηριστικών του σκάφους
2. Επιλογή του υλικού κατασκευής
3. Υπολογισμός των επιταχύνσεων σχεδίασης
4. Υπολογισμός ενισχυτικών και κατασκευαστικής διάταξης
5. Εξιδανίκευση της κατασκευής
6. Ανάλυση των αποκρίσεων της κατασκευής
7. Έλεγχος συμμόρφωσης με την κλάση
8. Εάν η κατασκευή δεν συμμορφώνεται με την κλάση, επιστρέφουμε στο βήμα 4 και αλλάζουμε τα ενισχυτικά και/ή την κατασκευαστική διάταξη
9. Εάν η κατασκευή συμμορφώνεται τότε η σχεδίαση τελειώνει

5. Υπολογισμοί βάση νηογνώμονα

5.1 Γενικοί Συμβολισμοί

\underline{L} = length of the craft in m defined as the length on design waterline. Amidships is defined as the middle of L

\underline{FP} = forward perpendicular is the perpendicular at the intersection of the fully loaded waterline (with the craft at rest) with the foreside of the stem

\underline{AP} = after perpendicular is the perpendicular at the intersection of the fully loaded waterline (with the craft at rest) with the after side of sternpost or transom

\underline{B} = greatest moulded breadth in m

\underline{D} = moulded depth is the vertical distance in m from baseline to moulded deckline at the uppermost continuous deck measured amidships

\underline{T} = fully loaded draught in m at $L/2$ with the craft floating at rest in calm water

$\underline{\Delta}$ = fully loaded displacement in tonnes in salt water (density 1.025 t/m³) on draught T

\underline{CB} = block coefficient, given by the formula:

\underline{BWL} = greatest moulded breadth of the hull(s) in m at the fully loaded waterline (with the craft at rest).

For multihull craft BWL is the net sum of the waterline breadths

$\underline{BWL2}$ = greatest moulded breadth of the hull(s) in m at the fully loaded waterline (with the craft at rest)

measured at $L/2$. For multihull craft $BWL2$ is the net sum of the waterline breadths

\underline{V} = maximum speed in knots

$\underline{g0}$ = standard acceleration of gravity.9.81 m/s²

\underline{acg} = design vertical acceleration in m/s² at longitudinal center of gravitation

\underline{LCG} = longitudinal center of gravity

\underline{WL} = water line

\underline{Hs} = significant wave height in m. Significant wave height is the average of the 1/3 highest waves within a wave spectrum.

5.2 Κύρια χαρακτηριστικά

Ξεκινώντας θα παρουσιάσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους. Πρόκειται για ένα ταχύπλοο σκάφος με ολικό μήκος τα 17.6m και μήκος ισάλου 14.7m. Ολικό πλάτος στα 4.2m, βύθισμα 0.95m με 27° γωνία ανύψωσης πυθμένα. Το εκτόπισμα του υπολογίζεται στους 22.5 tonnes. Στον παρακάτω πίνακα 6 βλέπουμε αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς της αντοχής.

<u>VESSEL PARTICULARS</u>		
LWL	14.76	m
BWL	3.55	m
BCHINE	3.37	m
DEPTH	2.20	m
T@LWL/2	0.95	m
BMAX	4.20	m
BWL@L/2	3.29	m
DISPLACEMENT	22.42	Tonnes
V	45.00	Knots
LCG	5.50	m
CB	0.44	
g0	9.81	m/s ²
DEADRISE @CG	27.00	deg(°)

Πίνακας 6: Κύρια χαρακτηριστικά

Με τη βοήθεια του νηογνώμονα θα καθοριστούν οι φορτίσεις που θα δεχτεί η κατασκευή καθώς και τα επιτρεπτά όρια των τάσεων. Η κατασκευή θα πρέπει να έχει επαρκή αντοχή ώστε να αντιμετωπίσει τα στατικά και τα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη χρήση. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο αρχικά θα καθοριστεί το operational profile του σκάφους. Για να καθοριστεί θα χρειαστούν οι παρακάτω πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του σκάφους έτσι ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής κυματισμού.

<u>GENERAL PARTICULARS</u>		
HULL TYPE	MONOHULL	
TYPE	PATROL BOATS	
R2	SEASONAL ZONES	
WINTER	50	N. MILES
SUMMER	100	N. MILES
TROPICAL	200	N. MILES

Πίνακας 7: Τύπος σκάφους [5]

5.3 Συντελεστής κυματισμού

Ο συντελεστής κυματισμού δίνεται από τον παρακάτω τύπο βάσει νηογνώμονα :

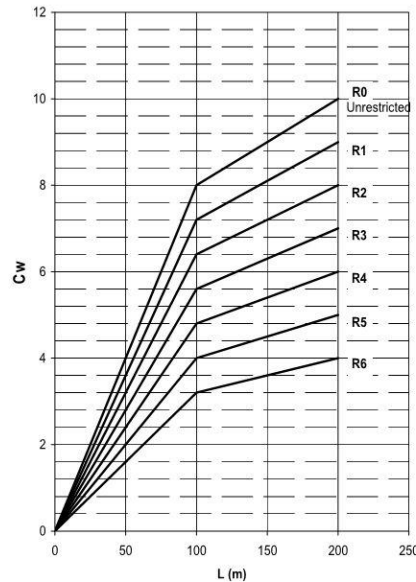
$$\left. \begin{aligned} C_W &= 0.08L * fr \text{ for } L \leq 100m \\ C_W &= (6 + 0.02L) * fr \text{ for } L > 100m \end{aligned} \right\} (17)$$

Όπου fr δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

Reduction of C_W	
Class notation	fr
R0	1
R1	0.9
R2	0.8
R3	0.7
R4	0.6
R5	0.5
R6	0.4

Πίνακας 8: Μείωση συντελεστή κυματισμού [5]

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον συντελεστή κυματισμού C_W σε σχέση με το μήκος του πλοίου.



Εικόνα 9: Συντελεστής κυματισμού / μήκος πλοίου [5]

Έπειτα από την εφαρμογή της εξίσωσης (17) έχουμε :

$$C_W = 0.94$$

5.4 Υπολογισμός επιταχύνσεων

Στη συνέχεια ο σχεδιαστής πρέπει να ορίσει το operating profile βάση διαφόρων ταχυτήτων σε συνδυασμό με τα σημαντικά ύψη κύματος. Τα ελάχιστα σημαντικά ύψη κύματος καθορίζονται από τον παρακάτω πίνακα 9 και ισχύουν για σκάφη όπου ο λόγος $V/\sqrt{L} \geq 3$.

Minimum significant wave height H_s in m at maximum speed fully loaded	
Type and service notation	H_s (m)
Passenger, car ferry, cargo craft, crew boats and small service crafts	0.25
Patrol boats, naval and naval support vessels	$L < 20$ m: 0.5
	$L > 30$ m : 1.5
	Linear interpolation for $20 \text{ m} \leq L \leq 30 \text{ m}$

Πίνακας 9: Ελάχιστα σημαντικά ύψη κύματος H_s [5]

Αφού υπολογιστεί το σημαντικό ύψος κύματος συνεχίζουμε με τον υπολογισμό των κατακόρυφων επιταχύνσεων. Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο του νηογνώμονα υπολογίζουμε την κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο βάρους του σκάφους.

$$a_{cgi} = \frac{8.38g_0k_\tau}{\left(\frac{L}{\Delta^3}\right)^{0.35}} \left(\frac{H_{si}}{B_{WL2}} + 0.084\right) (50 - \beta_{cg}) \ln(F_{Nv}) V_i \sqrt{L} \frac{B_{WL2}^2}{1000\Delta} \quad (m/s^2) \quad (18)$$

Όπου:

$$k_\tau = 1.5 - 0.046 \frac{V_i}{\sqrt{L}} > 0.5 \quad (19)$$

$$F_{Nv} = 0.5144 \frac{V_i}{\sqrt{g_0\Delta^{0.333}}} \quad (20)$$

V_i = Ταχύτητα σε knots

H_{si} = Σημαντικό ύψος κύματος βάση πίνακα 9

β_{cg} = deadrise angle @LCG σε μοίρες (min=10°, max 30°)

k_h = τύπος γάστρας βάση πίνακα 10

Hull type	k_h
Mono-hull, Catamaran	1.0
Wave Piercer	0.9
SES, ACV	0.8
Foil assisted hull	0.7
SWATH	0.7

Πίνακας 10: Συντελεστής τύπου γάστρας [5]

Το ελάχιστον όριο της κατακόρυφης επιτάχυνσης βάση νηογνώμονα δεν πρέπει να είναι μικρότερο από:

$$a_{cg} = 1.0g_0 \text{ for service restriction } R0 - R4 \quad (21)$$

Το μέγιστο όριο της κατακόρυφης επιτάχυνσης βάση νηογνώμονα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από:

$$a_{cg} = 6.0g_0 \quad (22)$$

Η κατακόρυφη επιτάχυνση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$a_{cg} = C_{HSLC} C_{RW} \frac{V_I}{\sqrt{L}} \quad (m/s^2) \quad (23)$$

Όπου C_{RW} = Service range coefficient = 0.75 for restricted area R2
 C_{HSLC} = βάση πίνακα 11

C-factor		
Craft character	Passenger, Car Ferry, Car-go Craft, Yacht, Service	Patrol
CHSLC	0.24	0.36

Πίνακας 11: Συντελεστής C [5]

Έπειτα από εφαρμογή των εξισώσεων (18),(21),(22),(23) επιλέγουμε την μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των εξισώσεων (18) και (23) έχοντας σαν ελάχιστο και μέγιστο όριο τις εξισώσεις (21) και (22) αντίστοιχα :

$$a_{cgi} = 29.72 \text{ m/s}^2 \quad (18)$$

$$\min a_{cg} = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (21)$$

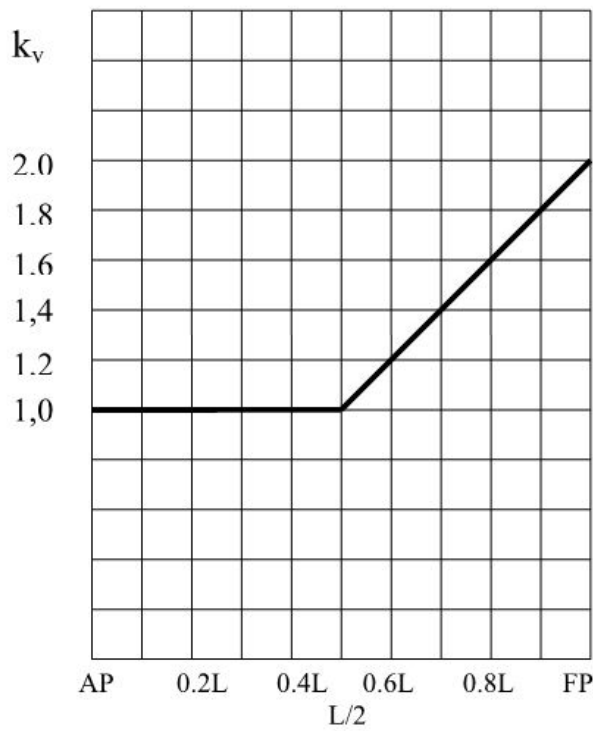
$$\max a_{cg} = 58.86 \text{ m/s}^2 \quad (22)$$

$$a_{cg} = 3.16 \text{ m/s}^2 \quad (23)$$

Στη συνέχεια πολλαπλασιάζουμε με τον συντελεστή διαμήκους κατανομής k_v χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο :

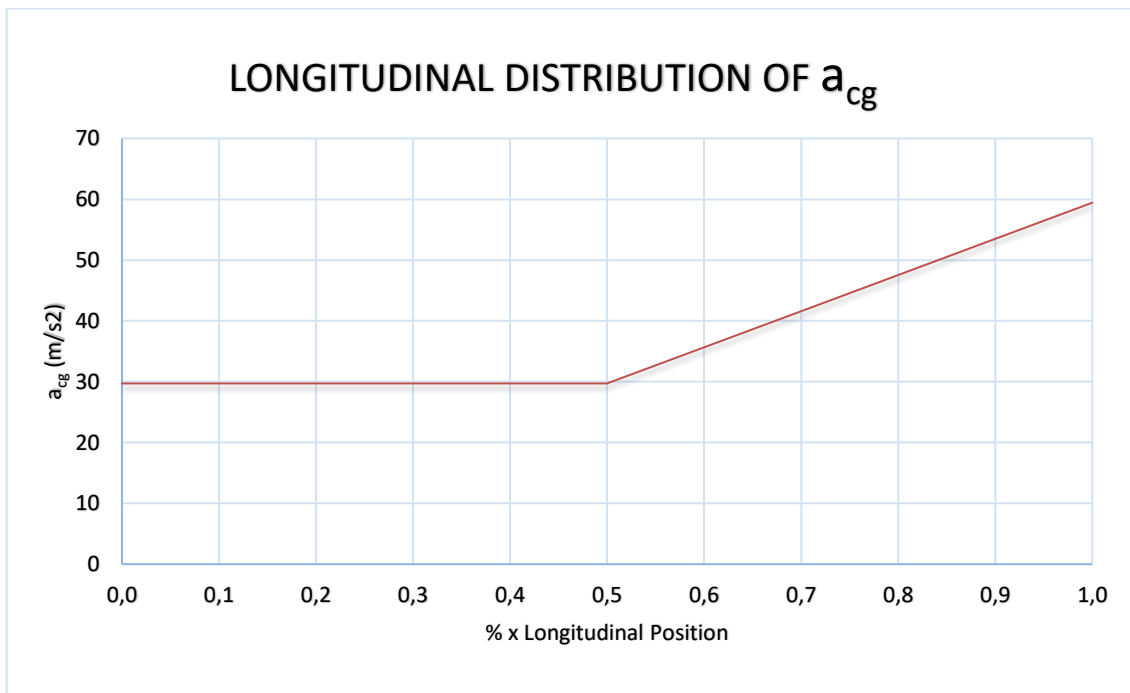
$$a_v = k_v a_{cg} \quad (m/s^2) \quad (24)$$

Όπου k_v δίνεται από την παρακάτω εικόνα 10.



Εικόνα 10: Συντελεστής διαμήκους κατανομής για την κατακόρυφη επιτάχυνση [5]

Τέλος, παρακάτω βλέπουμε την διαμήκη κατανομή των επιταχύνσεων στο σκάφος μας.



Εικόνα 11: Διαμήκης κατανομή κατακόρυφης επιτάχυνσης

Οι διαμήκεις (surge) και εγκάρσιες (transverse) επιταχύνσεις υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους αντίστοιχα:

$$a_{li} = \frac{a_{cg}}{6} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (25)$$

Όπου $a_{li} > 0.25g_0$

$$a_t = \left(2 \frac{\pi}{T_R}\right)^2 \Theta_r r_r \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (26)$$

Όπου :

$$\Theta_r = \frac{\pi h_w}{2L} \text{ (radians)} \quad (27)$$

$$T_R = \frac{\sqrt{L}}{1.05 + 0.175 \frac{V}{\sqrt{L}}} \text{ (s)} \quad (28)$$

Αφού υπολογίσουμε όλες τις επιταχύνσεις καταλήγουμε στη συνολική επιτάχυνση από τον παρακάτω τύπο :

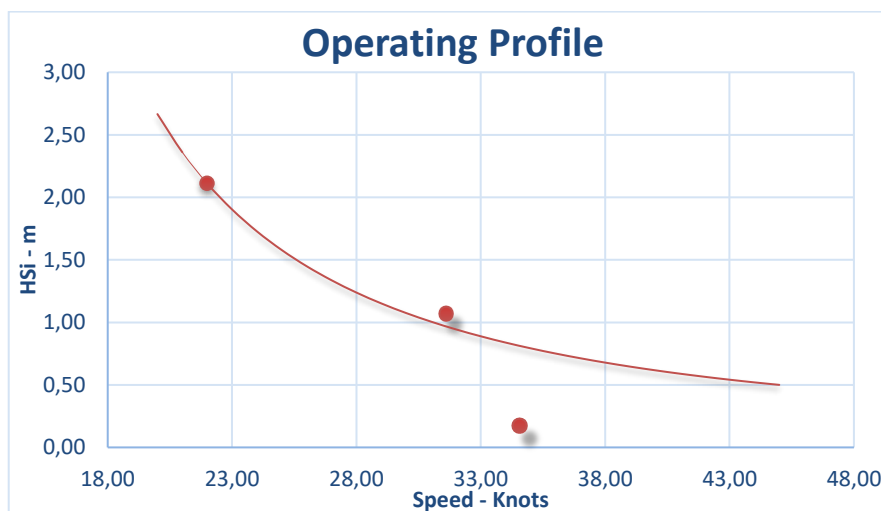
$$a_c = \sqrt{a_v^2 + a_l^2 + a_t^2} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (29)$$

<u>DESIGN OPERATIONAL CONDITIONS</u>					
<u>VERTICAL ACCELERATION</u>			<u>HORIZONTAL ACCELERATION</u>		
Cw	0,94		a _{li}	0,53	m/s ²
MIN Hs	0,50	m	a _{li} not less than	2,45	m/s ²
V/√L	11,71		a _{li}	3,92	
K _T	0,96		<u>TRANSVERSE ACCELERATION</u>		
FN _v	4,40		T _R	2,20	s
a _{cgi}	29,72	m/s ²	h _W	0,57	m
a _{cgi}	0,00	m/s ²	r _r	1,10	
a _{cgi}	0,00	m/s ²	Θ _r	0,06	Radians
a _{cg} not less than	9,81	m/s ²	a _t	0,54	m/s ²
a _{cg} not greater than	58,86	m/s ²	<u>COMBINED ACCELERATION</u>		
C _{RW}	0,75		a _c	29,98	m/s ²
C _{HSLC}	0,36				
a _{cg}	3,16	m/s ²			
a _{cg}	29,72	m/s ²			

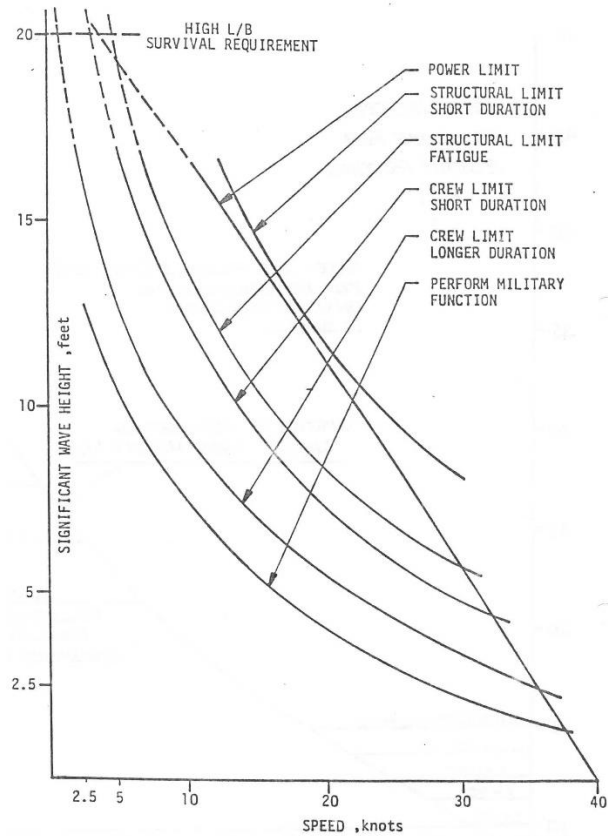
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας επιταχύνσεων

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναδείξουμε την καμπύλη χρήσης του σκάφους. Η συγκεκριμένη καμπύλη μας δείχνει στον κατακόρυφο άξονα το σημαντικό ύψος κύματος H_{Si} και στον οριζόντιο άξονα την ταχύτητα σε Knots. Όπως μπορούμε να καταλάβουμε καθώς η ταχύτητα αυξάνεται το σημαντικό ύψος κύματος στο οποίο μπορεί να πλεύσει το σκάφος μειώνεται. Αξιοσημείωτες είναι οι παρακάτω ιδέες:

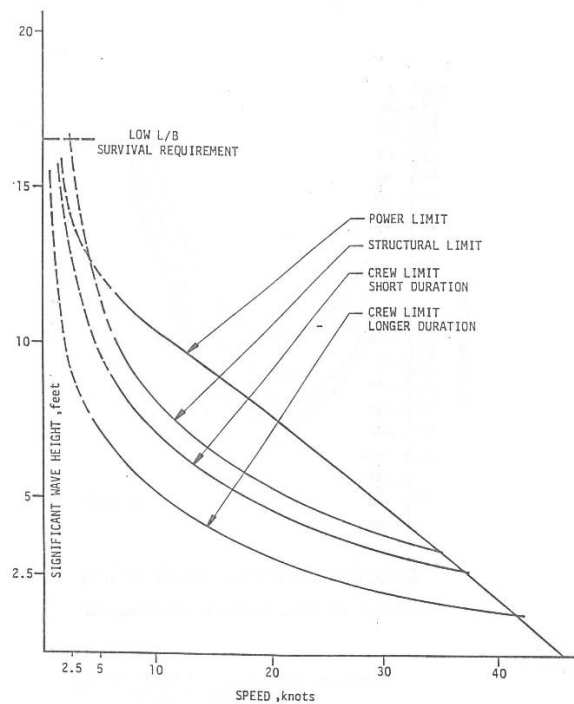
1. Υπάρχει όριο στην ταχύτητα με την οποία μπορεί το πλήρωμα να ταξιδέψει σε συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας ακόμα και αν έχει εγκατεστημένη ισχύ η οποία μπορεί αν οδηγήσει σε μεγαλύτερες ταχύτητες.
2. Για να έχουμε ίδιο χαρακτήρα όσον αφορά τις δυνάμεις που δέχεται το σκάφος και το πλήρωμα, χρησιμοποιείται το 1/10 των μεγαλύτερων δυνάμεων 'g' στο κέντρο βάρους του σκάφους.
3. Δεν υπάρχει κάποιος καλός λόγος στη σχεδίαση μιας κατασκευής, η οποία θα αντέχει επιταχύνσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μπορεί να αντέξει το πλήρωμα συν ένα περιθώριο.
4. Η επιβίωση του πληρώματος και της κατασκευής καθώς και απαιτούμενη ισχύς σε χαμηλές ταχύτητες με μεγάλο σημαντικό ύψος κύματος δεν ποσοτικοποιούνται εύκολα.
5. Για ένα συγκεκριμένο εκτόπισμα και εγκατεστημένη ισχύ, μια αλλαγή στον λόγο L/B δηλαδή κάνοντας το σκάφος μικρότερο σε μήκος και μεγαλύτερο σε πλάτος επηρεάζει την καμπύλη της εικόνας 14 . Οι αλλαγές αυτές είναι:
 - a. Η ταχύτητα σε ήρεμη θάλασσα αυξάνεται λόγω των αναλογιών οι οποίες προσφέρουν καλύτερο πλανάρισμα.
 - b. Η μείωση της ταχύτητας, σε μεγαλύτερες καταστάσεις θάλασσας, είναι μεγαλύτερη λόγω του αυξημένου πλάτους, η πλήρης μορφή έχει αυξημένη αντίσταση στους κυματισμούς
 - c. Ένα συγκεκριμένο επίπεδο 'g' θα προκύψει από χαμηλότερους συνδυασμούς ταχύτητας – κατάστασης θάλασσας
 - d. Η μέγιστη ικανότητα επιβίωσης του σκάφους που επηρεάζει ο λόγος L/B δεν είναι καλά ορισμένος [4]



Εικόνα 12: Καμπύλη χρήσης (ταχύτητα(speed)-σημαντικό ύψος κύματος(H_{Si}))



Εικόνα 13: Καμπύλη ταχύτητας-Σημαντικό ύψος κύματος για σκάφη με σχετικά υψηλό λόγο μήκους/πλάτους [4]



Εικόνα 14: Καμπύλη ταχύτητας-Σημαντικό ύψος κύματος για σκάφη με σχετικά χαμηλό λόγο μήκους/πλάτους [4]

5.5 Υπολογισμός πιέσεων πυθμένα

Για τον υπολογισμό των πιέσεων (design slamming pressures) θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο του νηογνώμονα :

$$p_{sl} = \frac{a_{CG} \cdot \Delta}{0.14 \cdot A_{ref}} \cdot K_{red} \cdot K_l \cdot K_{\beta} \quad (kN/m^2) \quad (30)$$

$$A_{ref} = 0.7 \frac{\Delta}{T} \quad (31)$$

$$K_{red} = 0.445 - 0.35 \left(\frac{u^{0.75} - 1.7}{u^{0.75} + 1.7} \right) \quad (32)$$

$$u = 100 \cdot \frac{n \cdot A}{A_{ref}} \quad (33)$$

$$K_{\beta} = \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{CG}} \quad (34)$$

όπου

n = 1 για monohull

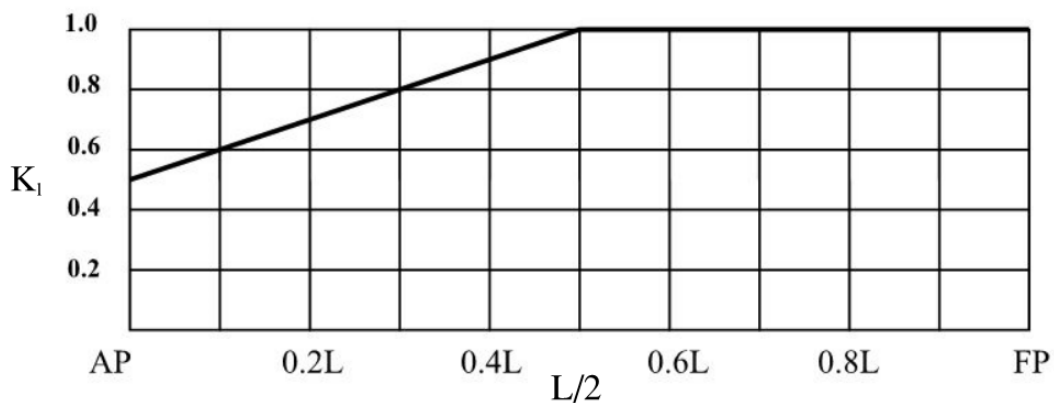
A = επιφάνεια εφαρμογής φόρτισης για κάθε στοιχείο

1. Για ελάσματα, διαμήκη ενισχυτικά, και κύρια ενισχυτικά = spacing x span (sl)

Μέγιστο όριο $A = 2.5s^2$

Ελάχιστο όριο $A = 0.002 \frac{\Delta}{T}$

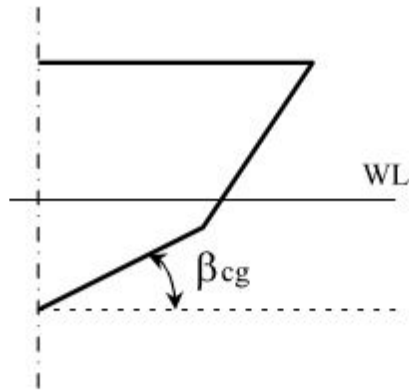
K_l = συντελεστής διαμήκους κατανομής βάσει εικόνας 15



Εικόνα 15: Συντελεστής διαμήκους κατανομής πιέσεων K_l [5]

β_x = γωνία ανύψωσης πυθμένα στην περιοχή αναφοράς (ελάχιστη γωνία 10°, μέγιστη γωνία 30° και όχι μικρότερη από β_{CG})

β_{CG} = γωνία ανύψωσης πυθμένα στο LCG (ελάχιστη γωνία 10°, μέγιστη γωνία 30°)



Εικόνα 16: Γωνία ανύψωσης πυθμένα β_{cg} [5]

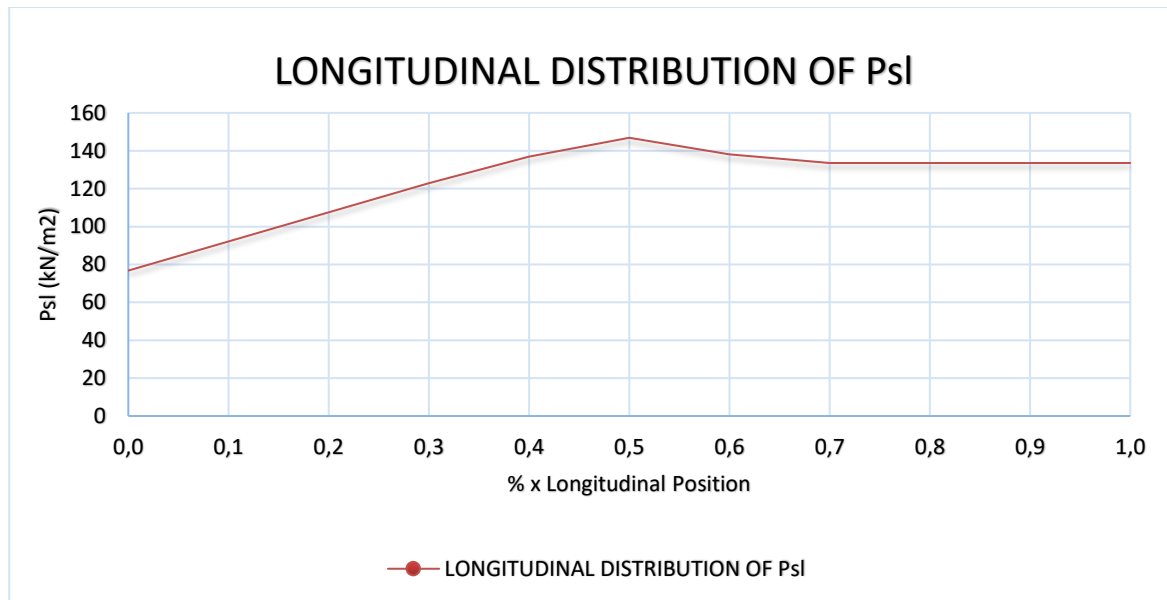
Έπειτα από εφαρμογή της εξίσωσης (30) για τα διάφορα τμήματα του σκάφους κατά το μήκος έχουμε τα εξής αποτελέσματα :

<u>SLAMMING PRESSURE ON BOTTOM</u>		
Spacing (s)	0,26	m
Span (l)	0,90	m
Element Type	Plates	
A_{ref}	16,52	m^2
A not less than	0,05	m^2
A not greater than	0,17	m^2
n	1	
A	0,17	m^2
u	1,02	
K_{red}	0,53	
K_l	1,00	
β_x	28,00	deg($^{\circ}$)
β_{cg}	27,00	deg($^{\circ}$)
K_{β}	0,96	
P_{sl}	146,87	kN/m^2
Long position (m) - (%)	7,38 m fwd of AP	50%

Πίνακας 13: Πιέσεις σφυρόκρουσης πυθμένα

LONG POSITION [%]	PLATES (Psi)
0	76,77
10	92,13
20	107,48
30	122,84
40	136,99
50	146,87
60	138,19
70	133,52
80	133,52
90	133,52
100	133,52

Πίνακας 14: Συνολικές πιέσεις *slamming* στον πυθμένα



Εικόνα 17: Γράφημα συνολικών πιέσεων *slamming* στον πυθμένα

5.6 Υπολογισμός πιέσεων πλευράς

Για τον υπολογισμό των πιέσεων forebody side and bow impact pressure θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο του νηογνώμονα :

$$p_{sl} = \frac{0.7LC_L C_H}{A^{0.3}} \left(0.6 + 0.4 \frac{V}{\sqrt{L}} \sin(\gamma) \cos(90^\circ - a) + \frac{2.1a_0}{C_B} \sin(90^\circ - a) \left(\frac{x}{L} - 0.4 \right) \sqrt{0.4 \frac{V}{\sqrt{L}} + 0.6} \right)^2 \left(\frac{kN}{m^2} \right) \quad (34)$$

όπου

$$\frac{V}{\sqrt{L}} < 3$$

- A = επιφάνεια εφαρμογής φόρτισης για κάθε στοιχείο
1. Για ελάσματα έχουμε μέγιστο όριο $A = 2.5s^2 (m^2)$
 2. Για ενισχυτικά $A > e^2 (m^2)$
 3. Γενικά $A > LB_{wl}/1000 (m^2)$

e = κατακόρυφη επέκταση της επιφάνειας εφαρμογής της πίεσης, μετρούμενο κατά μήκος του ελάσματος και κάθετο ως προς την ίσαλο

x = απόσταση σε m από την AP στο σημείο αναφοράς

C_L = συντελεστής διόρθωσης μήκους του σκάφους

$$C_L = \frac{250L - L^2}{15000} \quad (35)$$

C_H = συντελεστής διόρθωσης για το ύψος από την ίσαλο μέχρι το σημείο αναφοράς

$$C_H = 1 - \frac{0.5}{C_W} h_0 \quad (36)$$

h_0 = κατακόρυφη απόσταση σε m από την ίσαλο στο σημείο αναφοράς

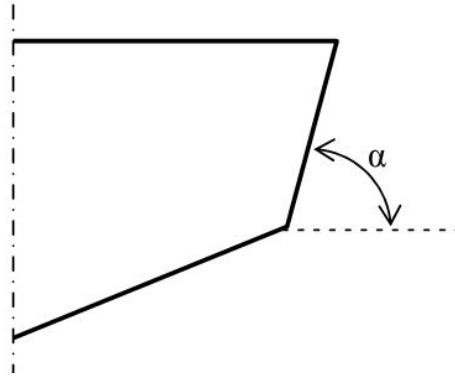
a = γωνία flare βάσης της εικόνας 15

γ = γωνία μεταξύ της ισάλου και της διαμήκου γραμμής μετρούμενο στο σημείο αναφοράς βάσης εικόνας 16

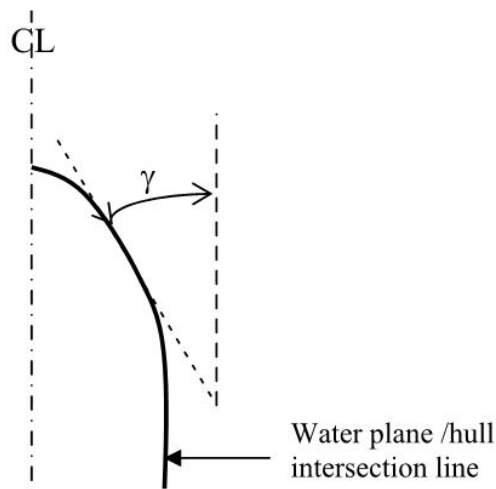
α_0 = παράμετρος επιτάχυνσης :

$$\alpha_0 = 3 \frac{C_W}{L} + C_V \frac{V}{\sqrt{L}} \quad (37)$$

$$C_V = \frac{\sqrt{L}}{50} \quad (\max 0.2) \quad (38)$$



Εικόνα 18: Γωνία α flare [5]



Εικόνα 19: Γωνία ισάλου γ [5]

<u>FOREBODY SIDE AND BOW IMPACT PRES-SURE</u>					
e	2,20	m	CL	0,23	
x	14,76	m	h0	-1,25	m
V/\sqrt{L}	3,00		CH	1,66	
A not greater than	0,17	m ²	a	52,00	deg(°)
A not less than	0,00	m ²	γ	23,00	deg(°)
A not smaller than	0,05	m ²	CV	0,08	
Afp	0,17	m ²	a0	0,42	
Afs,g	0,00	m ²	Psl	26,26	kN/m ²
A	0,17	m ²			

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας πίεσης πλευράς

5.7 Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης

Η υδροστατική πίεση ασκείται στον πυθμένα, στο πλευρό και στο κύριο κατάστρωμα του σκάφους και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο βάση του νηογνώμονα.

Για σημείο αναφοράς μέχρι την ίσαλο :

$$p = a \left(10h_0 + \left(k_s - 1.5 \frac{h_0}{T} \right) C_W \right) (kN/m^2) \quad (39)$$

Για σημείο αναφοράς πάνω από την ίσαλο :

$$p = ak_s(C_W - 0.67h_0) (kN/m^2) \quad (40)$$

h_0 = κατακόρυφη απόσταση σε m από την ίσαλο μέχρι το σημείο αναφοράς. Πάντα θετικός αριθμός

k_s = 7.5 aft of amidships
= $5/C_B$ fwd of FP (βάση εικόνας 17)

για ενδιάμεσες χρησιμοποιούμε γραμμική παρεμβολή

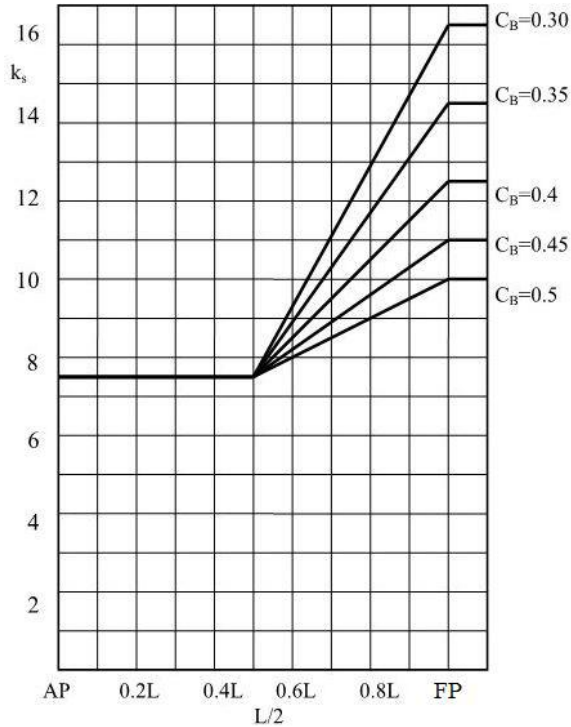
a = συντελεστής έντασης φορτίου βάση πίνακα 16

C_W = συντελεστής κυματισμού βάση εξίσωσης (17)

Location		General (all types of crafts)
Bottom, side and transom		1.0
Deck	Weather deck	1.0
	Weather deck higher than 0.1 L above WL	0.8
Deckhouse side		0.8
Front bulkhead	1st tier	2.0
	Other fronts	0.8
End bulkhead		0.8

Πίνακας 16: Συντελεστής έντασης φορτίου [5]

Το σημείο που θα εξετάσουμε την υδροστατική πίεση θα είναι το δυσμενέστερο και αυτό που θα χρησιμοποιήσουμε σε όλες τις περιοχές του σκάφους. Το σημείο βρίσκεται στον πυθμένα, δηλαδή το κατώτατο μέρος του σκάφους. Παρακάτω θα δούμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα με τις υδροστατικές πιέσεις κατά το μήκος του σκάφους καθώς και τις ελάχιστες πιέσεις σε διάφορες περιοχές.



Εικόνα 20: Συντελεστής κατανομής πίεσης[5]

LONG POSITION [%]	SEA PRESSURE (kN/m ²)
0	15,17
10	15,17
20	15,17
30	15,17
40	15,17
50	15,17
60	15,90
70	16,63
80	17,36
90	18,09
100	18,82

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας υδροστατικής πίεσης κατά μήκος του σκάφους

Location		Service restriction notation		
		Unrestricted - R0	R1 - R3	R4 - R6
Bottom, side and transom		6.5	5.0	3.0
Deck	Weather deck	5.0	4.0	3.0
	Weather deck higher than 0.1 L above WL	3.0	3.0	3.0
Deckhouse side		5.0	4.0	3.0
Front bulkhead	1st tier	$5+(5+0.05L)\sin \alpha$		5.0
	Other fronts	$5+0.025L \sin \alpha$		5.0
End bulkhead		5.0	4.0	3.0

Πίνακας 18: Ελάχιστες τιμές υδροστατικών πιέσεων ανά περιοχή [5]

Έχοντας υπολογίσει όλες τις πιέσεις του σκάφους θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό πάχους των ελασμάτων καθώς και των ενισχυτικών. Συγκεκριμένα για τους υπολογισμούς του πυθμένα έχει χρησιμοποιηθεί η μέγιστη πίεση $p_{sl} +$ την υδροστατική σε κάθε τμήμα του σκάφους θεωρώντας αυτή ως δυσμενέστερη πίεση υπολογισμού του σκάφους.

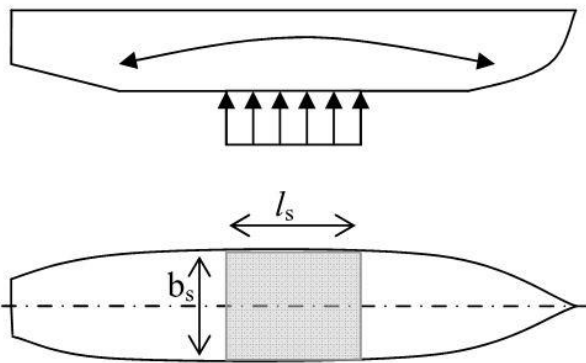
5.8 Υπολογισμός φορτίσεων των girders

Οι φορτίσεις των girders κατά το μήκος το σκάφους υπολογίζονται για τις περιπτώσεις όπου ο πυθμένας δέχεται κρούσεις σε ταχύτητες οι οποίες ξεπερνάνε τα $3/\sqrt{L}$ και καταστάσεις εκτοπίσματος που προκύπτουν από την κίνηση του σκάφους στην εκάστοτε κατάσταση θάλασσας. Οι περιπτώσεις που υπολογίζονται είναι η crest landing και hollow landing οι οποίες εκφράζουν την κρούση του σκάφους σε κυματισμό με 1) το μεσαίο τμήμα και 2) με το προωαίο και πρυμναίο τμήμα αντίστοιχα.

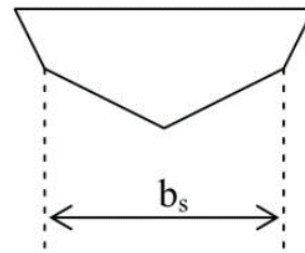
5.8.1 Crest landing: για σκάφη με $\frac{V}{\sqrt{L}} > 3$ η πίεση slamming εφαρμόζεται σε μια επιφάνεια ίση με την επιφάνεια αναφοράς A_R η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$A_R = 0.7\Delta \frac{\left(1 + 0.2 \frac{a_{cg}}{g_0}\right)}{T} \quad (m^2) \quad (41)$$

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τη συνδυαστική φόρτιση η οποία αναλύεται με τη πραγματική κατανομή του βάρους κατά το πλάτος του σκάφους.



Εικόνα 21: Επιφάνεια αναφοράς A_R (hogging) [5]



Εικόνα 22: Πλάτος επιφάνειας αναφοράς A_R [5]

Η διαμήκης ροπή κάμψης της μέσης τομής δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$M_B = \frac{\Delta}{2} (g_0 + a_{cg}) \left(e_W - \frac{l_s}{4} \right) \quad (kNm) \quad (42)$$

όπου

e_W = η μισή απόσταση από το LCG του προωαίου μισού τμήματος μέχρι το LCG το πρυμναίου μισού τμήματος του σκάφους σε (m), ή 0.25 εάν δεν είναι γνωστό

l_s = διαμήκη προέκταση της επιφάνειας αναφοράς του slamming

$$l_s = \frac{A_R}{b_s} \quad (43)$$

όπου b_s το πλάτος της επιφάνειας αναφοράς του slamming βάση εικόνας 22

και $e_W - \frac{l_s}{4} > 0.04L$

5.8.2 Hollow landing: παρόμοια με την crest landing με διαφορά στην επιφάνεια αναφοράς A_R η οποία χωρίζεται σε 2 τμήματα, μία περιοχή στην πρύμνη και μια περιοχή στην πλώρη, και δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$A_R = 0.6\Delta \frac{(1+0.2\frac{a_{cg}}{g_0})}{T} (m^2) \quad (44)$$

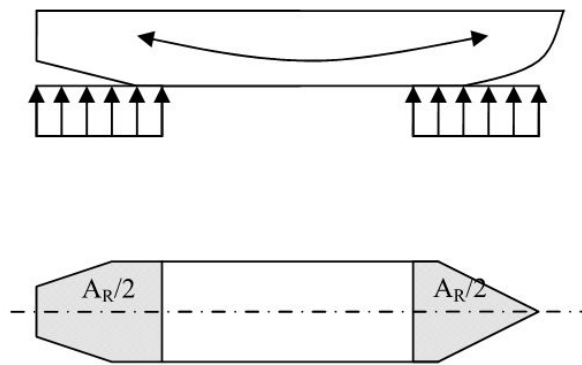
Η διαμήκης ροπή κάμψης της μέσης τομής είναι ίση με :

$$M_B = \frac{\Delta}{2} (g_0 + a_{cg})(e_r - e_w) (kNm) \quad (45)$$

όπου

e_r = μέση απόσταση από το κέντρο των $A_R/2$ επιφανειών μέχρι το LCG του πλοίου

e_w = η μισή απόσταση από το LCG του προωραίου μισού τμήματος μέχρι το LCG του πρυμναίου μισού τμήματος του σκάφους σε (m), ή 0.25 εάν δεν είναι γνωστό



Εικόνα 23: Επιφάνεια αναφοράς A_R (sagging) [5]

<u>HOLLOW LANDING</u> <u>(SAGGING)</u>		
A_R	22,74	m^2
e_r	5,20	m
e_w	3,13	m
$e_r - e_w$	2,07	m
min ($e_r - e_w$)	0,59	m
M_B	917,29	kNm

Πίνακας 19: Διαμήκης ροπή κάμψης (sagging)

<u>CREST LANDING</u> <u>(HOGGING)</u>		
V/\sqrt{L}	11,71	OK
A_R	26,53	m^2
e_w	3,13	
l_s	7,87	m
$e_w - (l_s/4)$	1,16	m
min $e_w - (l_s/4)$	0,59	
M_B	514,89	kNm

Πίνακας 20: Διαμήκης ροπή κάμψης (hogging)

5.8.3 Ροπή κάμψης για hogging και sagging

Οι καμπτικές ροπές του σκάφους (still water +wave) δεν πρέπει να είναι μικρότερες από :

$$M_{tot} = M_{SW} + M_W \quad (kNm) \quad (46)$$

όπου :

M_{SW} = ροπή still water στην χειρότερη κατάσταση φόρτωσης σε (kNm)

M_W = ροπή wave στο μέσο του σκάφους σε (kNm)

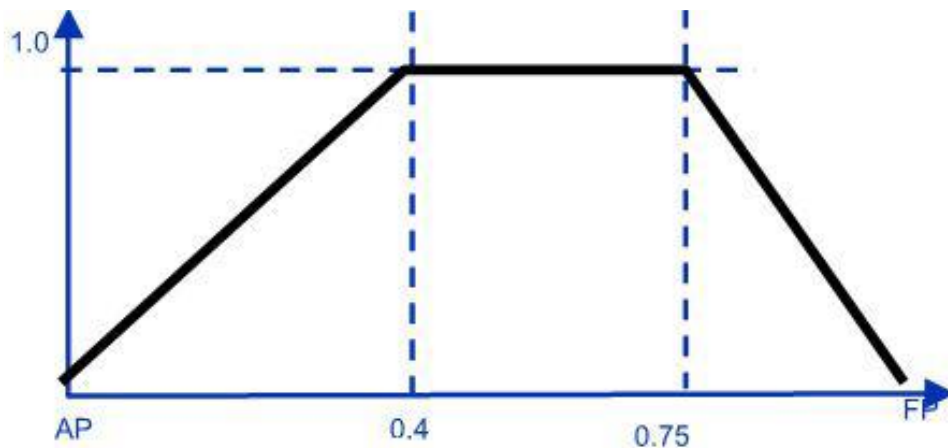
$$\begin{aligned} M_{SW} &= 0.11 C_W L^2 B C_B \quad (kNm) \text{ in hogging if not known} \quad (47) \\ &= 0 \text{ in sagging if not known} \end{aligned}$$

$$M_W = 0.19 C_W L^2 B C_B \quad (kNm) \text{ in hogging} \quad (48)$$

$$= 0.14 C_W L^2 B (C_B + 0.7) \quad (kNm) \text{ in sagging} \quad (49)$$

Για τον υπολογισμό της ροπής κάμψης σε τυχαίο σημείο κατά μήκος του σκάφους χρησιμοποιείται ο παρακάτω συντελεστής k_m βάση της εικόνας 24 και δεν πρέπει να είναι μικρότερο από :

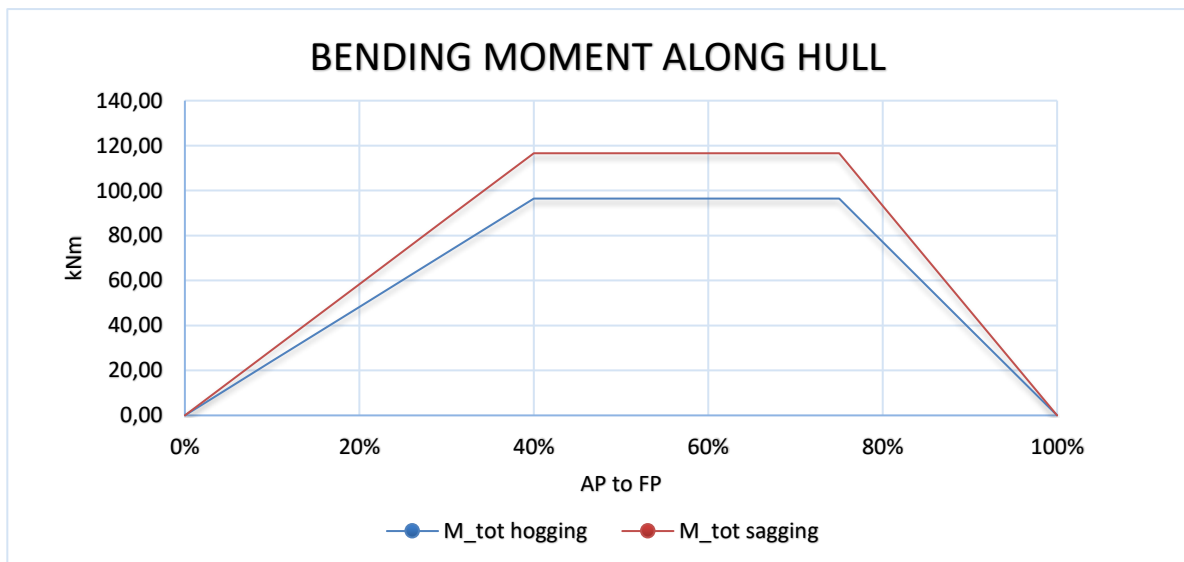
$$M = k_m M_{tot} \quad (kNm) \quad (50)$$



Εικόνα 24: Συντελεστής διαμήκους κατανομής των καμπτικών ροπών [5]

<u>HOGGING & SAGGING BENDING MOMENTS</u>		
MSW	35,36	kNm
	0,00	kNm
MW	61,08	kNm
	116,60	kNm
MTOT_HOG	96,44	kNm
MTOT_SAG	116,60	kNm
%	min MTOT_HOG	min MTOT_SAG
0%	0,00	0,00
10%	24,11	29,15
20%	48,22	58,30
30%	72,33	87,45
40%	96,44	116,60
50%	96,44	116,60
60%	96,44	116,60
70%	96,44	116,60
75%	96,44	116,60
80%	77,15	93,28
90%	38,57	46,64
100%	0,00	0,00

Πίνακας 20: Διαμήκης κατανομή καμπτικής ροπής



Εικόνα 25: Γράφημα διαμήκους κατανομής καμπτικής ροπής (hogging+sagging)

5.8.4 Διατμητικές δυνάμεις λόγω διαμήκου κάμψης

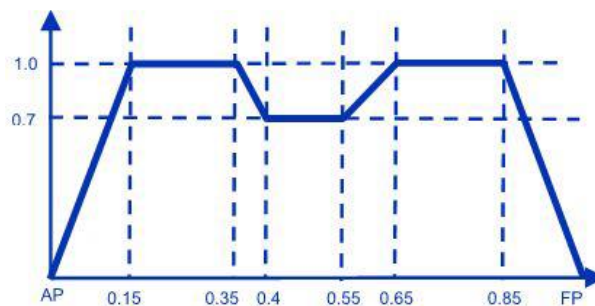
Η κατακόρυφη διατμητική τάση στα girders υπολογίζεται βάσει των καμπτικών ροπών και δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$Q_b = \frac{M_b}{0.25L} \text{ (kN)} \quad (51)$$

όπου M_b η καμπτική ροπή και η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων κατά το μήκος του girder δεν πρέπει να είναι μικρότερη από:

$$Q_x = k_q Q_b \text{ (kN)} \quad (52)$$

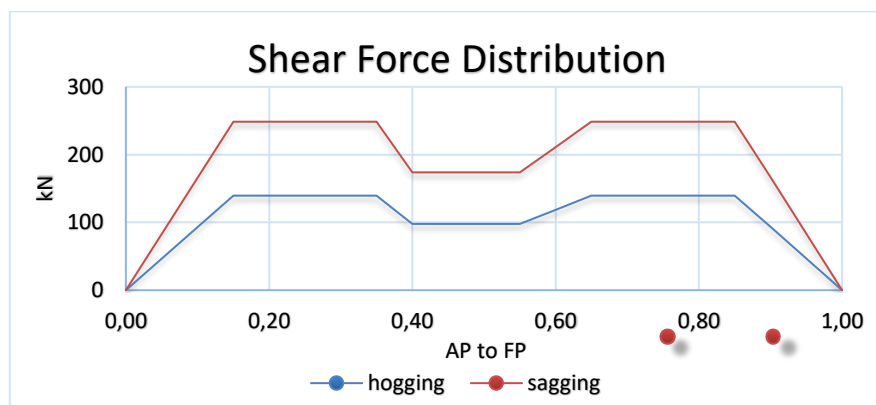
όπου k_q βάση εικόνας 23



Εικόνα 26: Συντελεστής κατανομής διατμητικών δυνάμεων k_q [5]

<i>SHEAR FORCES from LONGITUDINAL BENDING</i>		
Qb_HOG	139,54	kN
Qb_SAG	248,59	kN

Πίνακας 21: Κατακόρυφη διατμητική τάση (hogging + sagging)



Εικόνα 27: Κατανομή των διατμητικών δυνάμεων

5.9 Υπολογισμός πάχους ελασμάτων

Για τον υπολογισμό του πάχους των ελασμάτων θα πρέπει αρχικά να προσδιορίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε. Παρακάτω θα δούμε το κράμα του αλουμινίου, την ποιότητα του καθώς και τον συντελεστή f_1 ο οποίος αφορά την αντοχή του υλικού στην welded κατάσταση.

<u>ALUMINUM ALLOY MECHANICAL PROPERTIES</u>		
	ROLLED	EXTRUDED PROFILE
	VL 5083 H321	VL 6082 T6
YIELD STRENGTH [Mpa]	215,00	260,00
TENSILE STRENGTH [Mpa]	305,00	310,00
	WELDED	WELDED
f_1	0,60	0,48

Πίνακας 22: Μηχανικές ιδιότητες υλικού

Στον παρακάτω πίνακα θα δούμε τις επιτρεπόμενες τάσεις ανά περιοχή του σκάφους όσον αφορά τα ελάσματα αλλά και τα ενισχυτικά.

<u>ALLOWABLE BENDING STRESSES [N/mm²]</u>		
	PLATE	STIFFENER
BOTTOM,SLAMMING LOAD	200 f_1	180 f_1
BOTTOM,SEA LOAD	180 f_1	160 f_1
SIDE	180 f_1	160 f_1
DECK	180 f_1	160 f_1
FLAT CROSS STRUCTURE,SLAMMING LOAD	200 f_1	180 f_1
FLAT CROSS STRUCTURE,SEA LOAD	180 f_1	160 f_1
BULKHEAD,COLLISION	180 f_1	160 f_1
SUPERSTRUCTURE/DECKHOUSE FRONT	160 f_1	140 f_1
SUPERSTRUCTURE/DECKHOUSE SIDE/DECK	180 f_1	160 f_1
BULKHEAD,WATERTIGHT	220 f_1	200 f_1
TANK BULKHEAD	180 f_1	160 f_1

Πίνακας 23: Επιτρεπόμενες τάσεις κάμψης [5]

5.9.1 Συμβολισμοί

t = rule thickness of plating in mm

Z = rule section modulus of stiffener in cm³

s = stiffener spacing in m, measured along the plating

L = stiffener span in m, measured along the top flange of the member. The depth of stiffener on crossing

panel may be deducted when deciding the span. For curved stiffeners l may be taken as the chord length

p = design pressure in kN/m²

σ = nominal allowable bending stress in N/mm² due to lateral pressure

f_l = material factor for welded or un-welded condition

τ = nominal allowable shear stress in N/mm²

5.9.2 Ελάχιστα πάχη ελασμάτων

Ο γενικός τύπος για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής του πάχους δίνεται παρακάτω :

$$t = \frac{t_0 + kL}{\sqrt{f}} \frac{s}{s_R} \quad (mm) \quad (53)$$

όπου

f = $\sigma_f / 240$

σ_f = όχι μεγαλύτερο από το 70% του ultimate tensile strength

s = actual stiffener spacing [m]

s_R = basic stiffener spacing [m] , $2(100 + L)/1000$

$\frac{s}{s_R}$ = όχι μικρότερο από 0.5, όχι μεγαλύτερο από 1

t_0 = βάση πίνακα 25

	t_0	k
BOTTOM, BILGE AND SIDE TO LOADED WATERLINE	4,00	0,03
SIDE ABOVE LOADED WATERLINE	3,50	0,02
STRENGTH DECK WEATHER PART FWD OF AMIDSHIPS	3,00	0,03
STRENGTH DECK WEATHER PART AFT OF AMIDSHIPS	2,50	0,02
COLLISION BULKHEAD	3,00	0,03
OTHER WATERTIGHT BULKHEADS	3,00	0,02

Πίνακας 24: Τιμές t_0 και k [5]

Ο γενικός τύπος για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής του πάχους για αντοχή σε κάμψη με λόγο $\frac{s}{l} \leq 0.5$ και πάκτωση σε κάθε πλευρά δίνεται παρακάτω :

$$t = \frac{22.4s\sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} \quad (mm) \quad (54)$$

Ο γενικός τύπος για την ενίσχυση του πυθμένα λόγω slamming δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$t = \frac{22.4k_r k_a s \sqrt{p_{sl}}}{\sqrt{\sigma_{sl}}} \quad (mm) \quad (55)$$

όπου :

- k_a = διορθωτικός συντελεστής για aspect ratio του ελάσματος
 $= (1.1 - 0.25 s/l)^2$
 $= \max = 1$ για $s/l = 0.4$
 $= \min = 0.72$ για $s/l = 1.0$
- k_r = διορθωτικός συντελεστής για ελάσματα με καμπυλότητα
 $= (1 - 0.5 s/r)$
- r = radius of curvature [m]
- p_{sl} = slamming pressure
- σ_{sl} = $200 f_1$ (N/mm²)

Συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων και έχουμε :

<u>INPUTS</u>		
UTS	305,00	MPa
YIELD	215,00	Mpa
σf not greater than	213,50	Mpa
f	0,89	Mpa
s	0,26	m
sR	0,23	m
min s/sR	0,50	
max s/sR	1,00	
s/sR	1,00	

Πίνακας 25: Χαρακτηριστικά υλικού, aspect ratio ελασμάτων

- Βάση εξίσωσης (53) παρακάτω βλέπουμε τα ελάχιστα πάχη ελασμάτων

<u><i>SHELL PLATING MINIMUM THICKNESS</i></u>		
BOTTOM	4,71	mm
SIDE	4,02	mm
DECK FWD OF AMID	3,65	mm
DECK AFT OF AMID	2,96	mm
COLLISION BHD	3,65	mm
WATERTIGHT BHD	3,49	mm

Πίνακας 26: Ελάχιστα πάχη ελασμάτων

- Βάση εξίσωσης (54) παρακάτω βλέπουμε τα ελάχιστα πάχη ελασμάτων λόγω κάμψης

BOTTOM PLATING		
%	min thickness	
0	5,09	mm
10	5,50	mm
20	5,88	mm
30	6,23	mm
40	6,55	mm
50	6,76	mm
60	6,59	mm
70	6,50	mm
80	6,52	mm
90	6,53	mm
100	6,55	mm
SIDE PLATING		
	min thickness	
	2,87	mm
DECK PLATING		
	min thickness	
	1,12	mm

Πίνακας 27: Ελάχιστα πάχη ελασμάτων λόγω κάμψης

- Βάση εξίσωσης (55) παρακάτω βλέπουμε τα ελάχιστα πάχη ελασμάτων με ενίσχυση λόγω slamming

BOTTOM PLATING				
%	min thickness		radius of curvature [m]	kr
0	4,54	mm	5,20	0,98
10	4,98	mm	5,20	0,98
20	5,37	mm	5,20	0,98
30	5,74	mm	5,10	0,97
40	6,06	mm	5,00	0,97
50	6,27	mm	4,90	0,97
60	6,08	mm	4,70	0,97
70	5,96	mm	4,40	0,97
80	5,93	mm	3,80	0,97
90	5,86	mm	2,80	0,95
100	4,55	mm	0,50	0,74

Πίνακας 28: Ελάχιστα πάχη ελασμάτων με ενίσχυση λόγω slamming

Καταλήγουμε στα παρακάτω πάχη ελασμάτων που θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση μας

<u>FINAL PLATING THICKNESS</u>		
BOTTOM	6,27	mm
SIDE	4,02	mm
DECK	3,65	mm
BHDs	3,65	mm

Πίνακας 29: Τελικά πάχη ελασμάτων

5.10 Υπολογισμός ενισχυτικών

Η ελάχιστη ροπή αντίστασης των ενισχυτικών δεν πρέπει να είναι μικρότερη από :

$$Z = \frac{ml^2 sp}{\sigma} \quad (cm^3) \quad (56)$$

όπου : m συντελεστής καμπτικής ροπής βάση πίνακα 31

Values of m	
Item	m-value
Continuous long members	85
Non-continuous long members	100
Transverse members	100
Vertical members,ends fixed	100
Vertical members, simply supported	135
Bottom long members	85
Bottom transverse members	100
Side long members	85
Side vertical members	100
Deck long members	85
Deck transverse members	100
Watertight bhd stiffeners, fixed ends	65
Watertight bhd stiffeners, fixed one end(lower)	85
Watertight bhd stiffeners, simply supported ends	125
Watertight bhd horizontal stiffeners, fixed ends	85
Watertight bhd stiffeners, fixed one end(upper)	75
Watertight bhd horizontal stiffeners, simply supported	125
Tank cargo bhd, fixed ends	100
Tank cargo bhd, simply supported	135
Deckhouse stiffeners	100
Casing stiffeners	100

Πίνακας 30: Τιμές συντελεστή m [5]

Η ελάχιστη ροπή αντίστασης των ενισχυτικών του πυθμένα δεν πρέπει να είναι μικρότερη από:

$$Z = \frac{ml^2 sp_{sl}}{\sigma_{sl}} \quad (cm^3) \quad (57)$$

Η περιοχή διάτμησης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από :

$$A_s = \frac{6.7(l-s)sp_{sl}}{\tau_{sl}} \quad (cm^2) \quad (58)$$

όπου $\tau_{sl} = 90 f1 \quad (N/mm^2)$

Συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων και έχουμε την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης από τους παρακάτω πίνακες :

- Για τα ενισχυτικά του πυθμένα

	min Section Modulus			min shear area	
	%	Z		A _s	
Bottom stiffeners l=0.72m , s=0.26m	0	11,41	cm ³	1,60	cm ²
	10	13,29	cm ³	1,86	cm ²
	20	15,17	cm ³	2,12	cm ²
	30	17,04	cm ³	2,38	cm ²
	40	18,78	cm ³	2,63	cm ²
	50	19,99	cm ³	2,80	cm ²
	60	19,02	cm ³	2,66	cm ²
	70	18,55	cm ³	2,59	cm ²
	80	18,64	cm ³	2,61	cm ²
	90	18,74	cm ³	2,62	cm ²
	100	18,84	cm ³	2,63	cm ²

Πίνακας 31: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης + περιοχή διάτμησης ενισχυτικών πυθμένα

- Για τα ενισχυτικά της πλευράς

min Section Modulus (side stiffeners) l=0.9m , s=0.26m	
Z	
6,12	cm ³

Πίνακας 32: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικών πλευράς

- Για τα ενισχυτικά του καταστρώματος

min Section Modulus (deck stiffeners) l=0.9m , s=0.35m	
Z	
1,26	cm ³

Πίνακας 33: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικών καταστρώματος

- Για τα ενισχυτικά των φρακτών

min Section Modulus (bulkhead stiffeners) l=1.26m , s=0.35	
Z	
2,03	cm ³

Πίνακας 34: Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικών φρακτής

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη ροπή αντίστασης βάση των ενισχυτικών που έχουμε επιλέξει και έχουμε τους εξής πίνακες :

Measured Section Modulus(bottom stiff.)				
<i>T-PROFILE 60x60x6 + PL 6.27</i>			<i>Shear area</i>	
0	25,26	cm ³	3.6	cm ²
10	25,26	cm ³	3.6	cm ²
20	25,23	cm ³	3.6	cm ²
30	25,15	cm ³	3.6	cm ²
40	25,13	cm ³	3.6	cm ²
50	25,13	cm ³	3.6	cm ²
60	25,11	cm ³	3.6	cm ²
70	25,10	cm ³	3.6	cm ²
80	25,09	cm ³	3.6	cm ²
90	25,10	cm ³	3.6	cm ²
100	25,10	cm ³	3.6	cm ²

Πίνακας 35: Ροπή αντίστασης + επιφάνεια διάτμησης ενισχυτικών πυθμένα

Measured Section Modulus(side stiff.)		
<i>T-PROFILE 50x50x4 + PL 4.02</i>		
	Z	
	11,97	cm ³

Πίνακας 36: Ροπή αντίστασης ενισχυτικών πλευράς

Measured Section Modulus(deck stiff.)		
<i>L-PROFILE 40x40x4 + PL 3.65</i>		
	Z	
	27,37	cm ³

Πίνακας 37: Ροπή αντίστασης ενισχυτικών καταστρώματος

Measured Section Modulus(bhd stiff.)		
<i>T-PROFILE 60x60x6 + PL 3.65</i>		
	Z	
	24,24	cm ³

Πίνακας 38: Ροπή αντίστασης ενισχυτικών φρακτής

5.11 Υπολογισμός κυρίων ενισχυτικών

5.11.1 Συμβολισμοί

\underline{S} = girder span in m

\underline{b} = breadth of load area in m (plate flange)

\underline{p} = design pressure in kN/m²

\underline{P} = design axial force in kN

$\underline{\sigma}$ = nominal allowable bending stress in N/mm² due to lateral pressure

$\underline{\tau}$ = nominal allowable shear stress in N/mm²

$\underline{\sigma}_c$ = critical buckling stress in N/mm²

$\underline{\sigma}_{el}$ = ideal elastic buckling stress in N/mm²

\underline{Z} = rule section modulus in cm³

\underline{A}_w = rule web area in cm²

\underline{A} = rule cross-sectional area in cm²

\underline{t}_w = web thickness in mm

\underline{h}_w = web height in mm

\underline{b}_f = flange breadth in mm.

5.11.2 Ελάχιστη πάχη κυρίων ενισχυτικών

<u>INPUTS</u>		
UTS	305,00	MPa
YIELD	215,00	Mpa
σf not greater than	213,50	Mpa
f	0,89	Mpa
s	0,26	m
sR	0,23	m
min s/sR	0,50	
max s/sR	1,00	
s/sR	1,00	

Πίνακας 39: Χαρακτηριστικά υλικού, aspect ratio ελασμάτων

Τα ελάχιστα πάχη των ενισχυτικών δεν πρέπει να είναι μικρότερα από :

$$t = \frac{t_0 + kL}{\sqrt{f}} \frac{s}{s_R} \quad (mm) \quad (59)$$

όπου

$$f = \sigma_f / 240$$

σ_f = όχι μεγαλύτερο από το 70% του ultimate tensile strength

s = actual stiffener spacing σε m

s_R = basic stiffener spacing [m] , $2(100 + L)/1000$

$\frac{s}{s_R}$ = όχι μικρότερο από 0.5, όχι μεγαλύτερο από 1

t_0, k = βάση πίνακα 41

	t0	k
BOTTOM CENTER GIRDER	3,00	0,05
BOTTOM SIDE GIRDERS,FLOORS,BRACKETS AND STIF.	3,00	0,03
STRENGTH DECK WEATHER PART FWD OF AMIDSHIPS	3,00	0,03
STRENGTH DECK WEATHER PART AFT OF AMIDSHIPS	2,50	0,02
COLLISION BULKHEAD	3,00	0,03
OTHER WATERTIGHT BULKHEADS	3,00	0,02

Πίνακας 40: Τιμές t_0, k [5]

Βάση της εξίσωσης 59 έχουμε τα ελάχιστα πάχη παρακάτω :

<u>MINIMUM THICKNESS</u>		
CL GIRDER	3,96	mm
BOTTOM SIDE and DECK GIRDER	3,65	mm

Πίνακας 41: Ελάχιστα πάχη κυρίων ενισχυτικών

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες καμπτικές και διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά δίνονται από τον παρακάτω πίνακα 43 :

<u>ALLOWABLE STRESSES</u>		
STRESSES (N/mm ²)	LOADS	
	DYNAMIC	SEA / STATIC
BENDING	108,00	96,00
SHEAR	54,00	54,00
EQUIVALENT	120,00	108,00

Πίνακας 42: Επιτρεπόμενες καμπτικές και διατμητικές τάσεις [5]

5.11.3 Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος

Ο τύπος που καθορίζει το συνεργαζόμενο έλασμα δίνεται παρακάτω :

$$b_e = C \cdot b \quad (60)$$

όπου

C = βάση πίνακα 44 για διάφορους αριθμούς από ομοιόμορφα κατανεμημένα σημειακά φορτία (r) κατά το span.

a/b	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7plus
c(r>=6)	0,00	0,38	0,67	0,84	0,93	0,97	0,99	1,00
c(r=5)	0,00	0,33	0,58	0,73	0,84	0,89	0,92	0,93
c(r=4)	0,00	0,27	0,49	0,63	0,74	0,81	0,85	0,87
c(r<=3)	0,00	0,22	0,40	0,52	0,65	0,73	0,78	0,80

Πίνακας 43: Συντελεστής C [5]

- a = απόσταση μεταξύ σημείων με μηδενική καμπτική ροπή
- = S για απλή στήριξη των girders (simply supported)
- = 0.6 S για πάκτωση των girders (fixed at both ends)

Βάση της εξίσωσης (60) έχουμε για κάθε νομέα τον εξής πίνακα, με input τα κίτρινα κελιά, για τον υπολογισμό του συνεργαζόμενου ελάσματος :

<u>EFFECTIVE FLANGE WIDTH FOR FR</u>		
Span		m
a		
b		m
a/b		
r		
C-Value		Βάση πίνακα 43
be		m

Πίνακας 44: Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος b_e

5.11.4 Απαιτήσεις αντοχής

Η ροπή αντίστασης της διατομής για τα girders δεν πρέπει να είναι μικρότερη από :

$$Z = \frac{mS^2bp}{\sigma} \text{ (cm}^3\text{)} \quad (61)$$

όπου

σ = 160f1 (*maximum*)

m = συντελεστής κάμψης βάση πίνακα 46

Η συνεργαζόμενη επιφάνεια του web δεν πρέπει να είναι μικρότερη από :

$$A_W = \frac{10(k_s S b p - a r)}{\tau} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (62)$$

όπου

k_s = συντελεστής διατμητικής δύναμης, βάση πίνακα 46

a = αριθμός ενισχυτικών μεταξύ υπό εξέταση διατομής και κοντινότερης στήριξης

r = μέσο σημειακό φορτίο σε kN από τα ενισχυτικά ανάμεσα στην υπό εξέταση διατομή και στην κοντινότερη στήριξη

τ = 90f1 (*maximum*)

Οι τιμές a δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι μεγαλύτερο από $(n + 1)/4$

n = αριθμός των υποστηριζόμενων ενισχυτικών κατά το girder span. Η επιφάνεια του web στο μέσο του span δεν πρέπει να είναι μικρότερη από $0.5A_W$

<u>VALUES OF m and k_s</u>		
	m	ks
BOTTOM WEB FRAMES	100,00	0,63
BOTTOM FLOORS	100,00	0,63
BOTTOM LONG GIRDERS	100,00	0,63
SIDE LONG GIRDERS	100,00	0,54
SIDE WEB FRAMES, UPPER END	100,00	0,54
SIDE WEB FRAMES, LOWER END	100,00	0,72
SIDE DECK GIRDERS	100,00	0,63
BULKHEAD HORIZONTAL GIRDERS	100,00	0,54
BULKHEAD VERTICAL GIRDERS, UPPER END	100,00	0,54
BULKHEAD VERTICAL GIRDERS, LOWER END	100,00	0,72

Πίνακας 45: Τιμές m και k_s [5]

5.11.5 Υπολογισμός αντοχής των Web Frames

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε στους παρακάτω πίνακες με τους υπολογισμούς για τα bottom frames.

<i>EFFECTIVE FLANGE WIDTH FOR FR1</i>		
Span	1,39	m
a	0,83	Fixed @ Both Ends
b	0,90	m
a/b	0,93	
r	5,00	
C-Value	0,33	Βάση πίνακα 44
b _e	0,30	m

Πίνακας 46: Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος

<i>MINIMUM SM FOR FR1</i>		
m	100,00	
S	0,83	m
b _e	0,30	m
σ	96,00	
%	Z _{min}	
10,00	13,86	cm ³

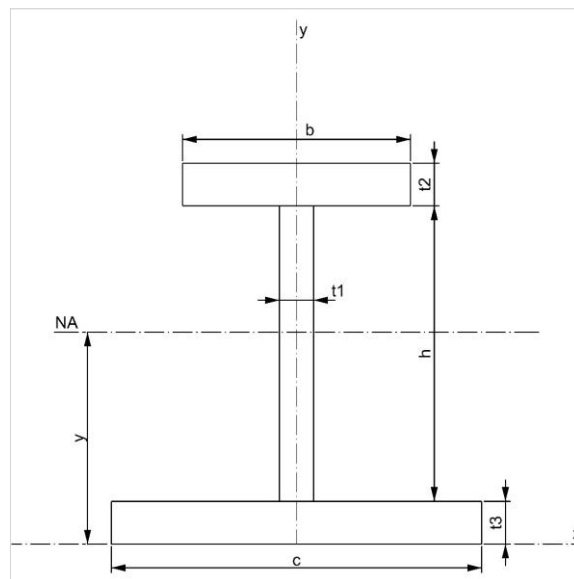
Πίνακας 47: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης

<i>MIN EFFECTIVE WEB AREA FOR FR1</i>		
k _s	0,63	
S	0,83	
b	0,30	
a	0,00	
r	0,00	
τ	54,00	
n	5,00	
min web area(mid)	0,93	
%	A _w	
10,00	1,86	cm ²

Πίνακας 48: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης συνεργαζόμενης επιφάνειας web

<u>Select Profile</u>		
T-PROFILE		
<u>Shape Inputs</u>		
h =	135	mm
t1 =	6	mm
b =	80	mm
t2 =	8	mm
c =	300	mm
t3 =	6,27	mm
<u>Area of Profile</u>		
A =	33,31	cm ²
<u>Neutral Axis</u>		
Y =	47,62	mm
<u>Min Moment of Inertia</u>		
I _{xx} =	1161,87	cm ⁴
<u>Section Modulus (X'-X' axis)</u>		
Max SM _{xx} =	243,99	cm ³
Min SM _{xx} =	114,30	

Πίνακας 49: Υπολογισμός ροπής αντίστασης διατομής



Εικόνα 28: Διατομή υπολογισμού

Και καταγράφουμε τις τιμές για το κάθε frame όπως φαίνεται παρακάτω :

Measured Section Modulus		
135x6+80x8 + 300xPL 6,27		
Min SM	114,30	cm ³
Web Area	8,10	cm ²

Πίνακας 50: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για Fr 1

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία έχουμε τα εξής αποτελέσματα για τα bottom frames και κατά αντιστοιχία για side και deck frames τα οποία φαίνονται παρακάτω

Bottom Web Frames	
Fr1	135x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr2	100x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr3	100x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr4	135x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr6	150x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr7	150x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr8	150x6+80x8 + 300xPL 6,27
Fr9	150x6+100x10 + 300xPL 6,27
Fr10	150x6+100x10 + 300xPL 6,27
Fr11	150x6+100x10 + 300xPL 6,27
Fr12	150x6+100x10 + 300xPL 6,27
Fr14	170x6+100x10 + 300xPL 6,27
Fr16	170x6+100x10 + 300xPL 6,27

Πίνακας 51: Συγκεντρωτικός πίνακας κύριων ενισχυτικών πυθμένα

Side Web Frames	
Fr1	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr2	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr3	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr4	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr6	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr7	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr8	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr9	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr10	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr11	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr12	100x6+60x8 + 300xPL 4,02
Fr14	170x6+100x10 + 300xPL 4,02
Fr16	100x6+80x8 + 300xPL 4,02

Πίνακας 52: Συγκεντρωτικός πίνακας κύριων ενισχυτικών πλευράς

Deck Web Frames	
100x6+60x8 + 630xPL 3.65	

Πίνακας 53: Συγκεντρωτικός πίνακας κύριων ενισχυτικών καταστρώματος

5.11.6 Υπολογισμός αντοχής Girder System

Για τον υπολογισμό του συστήματος των κυρίων διαμηκών ενισχυτικών (Longitudinal Girders) του πυθμένα αλλά και του καταστρώματος θα ακολουθήσουμε την παρακάτω διαδικασία. Τα girders του πυθμένα βρίσκονται στην CL, 350mm off CL, 950mm off και 1150mm off CL, στο κατάστρωμα βρίσκονται στην CL και 1400mm off CL. Ενδεικτικά θα δείξουμε την διαδικασία για τον υπολογισμό του Bottom CL girder από το Fr0 – Fr5. Υπολογίζουμε το συνεργαζόμενο έλασμα βάση της εξίσωσης (60) και έχουμε :

<u>EFFECTIVE FLANGE WIDTH</u> <u>CL GIRDER (FR0-5)</u>		
Span	4,50	m
a	2,70	Fixed @ Both Ends
b	0,37	m
a/b	7,30	
r	8,00	
C-Value	1,00	C-Value=1
be	0,37	m

Πίνακας 54: Υπολογισμός συνεργαζόμενου ελάσματος

<u>MINIMUM SM</u>		
m	100,00	
S	2,70	m
be	0,37	m
σ	96,00	
%	Zmin	
0,00	158,60	cm ³
10,00	181,79	cm ³
20,00	204,99	cm ³
30,00	228,18	cm ³

Πίνακας 55: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης

Από τις εξισώσεις (61),(62) έχουμε :

<u>MIN EFFECTIVE WEB AREA</u>		
ks	0,63	
S	2,70	
b	0,37	
a	0,00	
r	0,00	
τ	54,00	
n	8,00	
min web area(mid)	Aw/2	
%	Aw	
0,00	6,58	cm ²
10,00	7,54	cm ²
20,00	8,50	cm ²
30,00	9,47	cm ²

Πίνακας 56: Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης συνεργαζόμενης επιφάνειας web

Measured Section Modulus		
420x8+80x8 + 370xPL6,27		
Min SM	596,85	cm ³
Web Area	33,60	cm ²

Πίνακας 57: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για CL girder

Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζουμε και τα υπόλοιπα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα αλλά και του καταστρώματος, τα οποία φαίνονται συγκεντρωμένα στους παρακάτω πίνακες.

BOTTOM GIRDER SYSTEM	
CL GIRDER (FR0-5)	420x8 + 80x8 + PL6,27x370
GIRDER_350 (FR0-5)	630x8 + 100x15 + PL6,27x600
GIRDER_1150 (FR0-5)	240x8 + 100x15 + PL6,27x510
CL GIRDER (FR5-13)	395x8 + 100x10 + PL6,27x380
GIRDER_350 (FR5-8)	615x8 + 80x8 + PL6,27x370
GIRDER_950 (FR5-8)	320x8 + 80x8 + PL6,27x430
GIRDER_350 (FR8-10)	440x8 + 100x10 + PL6,27x400
GIRDER_350 (FR10-13)	350x8 + 100x10 + PL6,27x530

Πίνακας 58: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για girders πυθμένα

DECK GIRDER SYSTEM	
CL GIRDER (FR0-5)	100x8+80x8 + 420xPL 8
GIRDER_1400 (FR0-5)	100x6+60x8 + 420xPL 8
GIRDER_1400 (FR5-13)	100x6+80x8 + 380xPL 4
CL GIRDER (FR13-15)	100x8+80x8 + 330xPL 4

Πίνακας 59: Αποτελέσματα επιλεγμένης διατομής για girders καταστρώματος

5.12 Υπολογισμός αντοχής των pillars

5.12.1 Συμβολισμοί

t = thickness of plating in mm

s = stiffener spacing in m, measured along plate

l = length of pillars, cross ties, bulkhead stiffeners etc. between effective supports normal to their axis in

m

I = smallest moment of inertia in cm⁴, including 40 x plate thickness as flange for bulkhead stiffener

A = cross-sectional area in cm², including 40 x plate thickness for bulkhead stiffener

p = design pressure

Το radius of gyration του στοιχείου δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$i = \sqrt{\frac{I_a}{A_a}} \text{ (cm)} \quad (63)$$

όπου

I_a = ροπή αδράνειας σε cm⁴ κάθετα στον άξονα όπου αναμένετε να παρουσιαστεί buckling

A_a = διατομή σε cm²

Η διατομή του στοιχείου που υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο δεν πρέπει να είναι μικρότερη από :

$$A = \frac{10P}{\eta\sigma_c} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (64)$$

όπου

$$\eta = \frac{k}{\left(1 + \frac{l}{i}\right)} \text{ minimum } 0.3$$

P = αξονικό φορτίο σε kN

l = μήκος στοιχείου σε m

i = radius of gyration σε cm

k = 0.7 γενικά, 0.6 σε δυναμικά φορτία

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_E \text{ when } \sigma_E < \frac{\sigma_F}{2} \\ &= \sigma_F \left(1 - \frac{\sigma_F}{4\sigma_E}\right) \text{ when } \sigma_E > \frac{\sigma_F}{2} \\ \sigma_E &= p^2 E \left(\frac{i}{100l}\right)^2 \text{ (N/mm}^2\text{)} \\ \sigma_F &= \text{ελάχιστο άνω όριο διαρροής υλικού σε N/mm}^2 \\ E &= \text{μέτρο ελαστικότητας αλουμινίου 69000 N/mm}^2 \end{aligned}$$

Η εξίσωση για σ_E βασίζεται σε αρθρώσεις στα άκρα του στοιχείου και αξονικό φορτίο μόνο. Σε ειδικές περιπτώσεις όπου το ένα άκρο είναι πακτωμένο η τιμή σ_E μπορεί να πολλαπλασιαστεί με το 2.

Στις περιπτώσεις όπου και τα δύο άκρα είναι πακτωμένα το σ_E μπορεί να πολλαπλασιαστεί με το 4.

Η αξονική φόρτιση των pillars δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$P = n \cdot F \quad (65)$$

όπου

- n = αριθμός καταστροφών πάνω από το pillar
- F = $p \cdot A_D$ (kN)
- p = πίεση σχεδίασης
- A_D = περιοχή καταστώματος που στηρίζει το pillar

Ξεκινάμε υπολογίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά για τα υπό εξέταση pillars και βλέπουμε τα αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα.

PILLARS			
CROSS SECTION PARTICULARS			
PIL 70x5	Moment of Inertia (Ia)	54,24	cm ⁴
	Cross Sectional Area (Aa)	10,21	cm ²
	Radius of Gyration (i)	2,30	cm
PIL 50x5	Moment of Inertia (Ia)	18,11	cm ⁴
	Cross Sectional Area (Aa)	7,07	cm ²
	Radius of Gyration (i)	1,60	cm

Πίνακας 60: Κύρια χαρακτηριστικά των pillars

Παρακάτω βλέπουμε τις περιοχές που υποστηρίζουν τα pillars, τις επιφάνειες του καταστώματος καθώς και τα μήκη τους τα οποία θα τα χρησιμοποιήσουμε για να ελέγξουμε την αντοχή τους.

REFERENCE TABLE WITH PILLARS				
Fr	POSITION	TYPE	Deck Area(m ²)	Length (m)
2	CL	70x5	2,59	1,70
2	1400 OFF CL	50x5	1,92	1,32
4	CL	70x5	1,89	1,70
4	1400 OFF CL	50x5	1,39	1,29
8	SIDE DECK GRD	50x5	3,86	1,15
10	SIDE DECK GRD	70x5	1,06	1,10
10	350 OFF CL	70x5	1,14	2,60
11	SIDE DECK GRD	50x5	1,37	1,04
12	SIDE DECK GRD	50x5	1,26	0,95

Πίνακας 61: Συγκεντρωτικός πίνακας στήριξης καταστρώματος με pillars

Παρακάτω θα δούμε τον υπολογισμό για ένα συγκεκριμένο pillar σε μια συγκεκριμένη θέση και με αντίστοιχη διαδικασία θα υπολογίσουμε την κάθε θέση του πλοίου.

PILLAR TO CHECK:	<i>PIL 50x5</i>	
Length	1,15	m
k	0,60	DYNAMIC LOADS
i	1,60	cm
Aa	7,07	cm ²
η	0,35	min = 0,3
A _D	3,86	m ²
F	15,44	kN
P	15,44	kN
σ _{F yield}	215,00	MPa
Modulus Of Elasticity E	69000,00	N/mm ²
σ _E	213,91	N/mm ²
σ _F	160,98	N/mm ²
σ _C	160,98	N/mm ²
A _{min}	2,75	cm ²

Πίνακας 62: Υπολογισμός αντοχής pillar

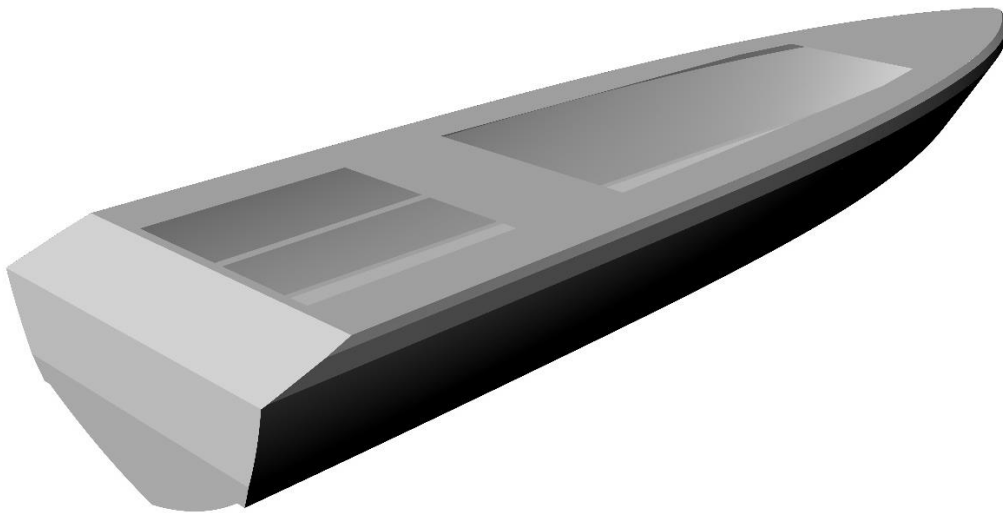
Υπολογίζοντας τα 50x5 και 70x5 pillars βλέπουμε πως έχουν επαρκή αντοχή για τις συγκεκριμένες περιοχές του σκάφους.

6. Μοντελοποίηση κατασκευής

Για την μοντελοποίηση θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Rhinoceros. Η διαδικασία μοντελοποίησης θα είναι η εξής :

1. Εισαγωγή επιφανειακού μοντέλου γάστρας (hull surfaces)
2. Μοντελοποίηση νομέων (frames) με βάση τους υπολογισμούς του νηογνώμονα
3. Μοντελοποίηση κύριων ενισχυτικών πυθμένα και καταστρώματος (girders)
4. Μοντελοποίηση δευτερευόντων ενισχυτικών πυθμένα, πλευράς, καταστρώματος (stiffeners)
5. Οργάνωση κατασκευής σε layers ανάλογα με τα πάχη

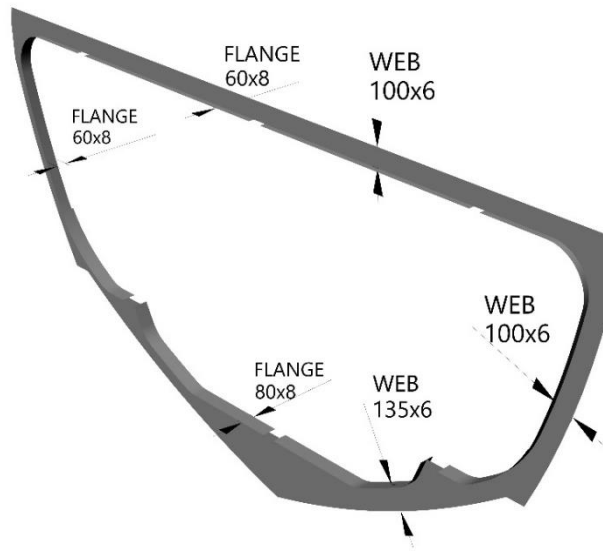
Η αρχική επιφάνεια φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



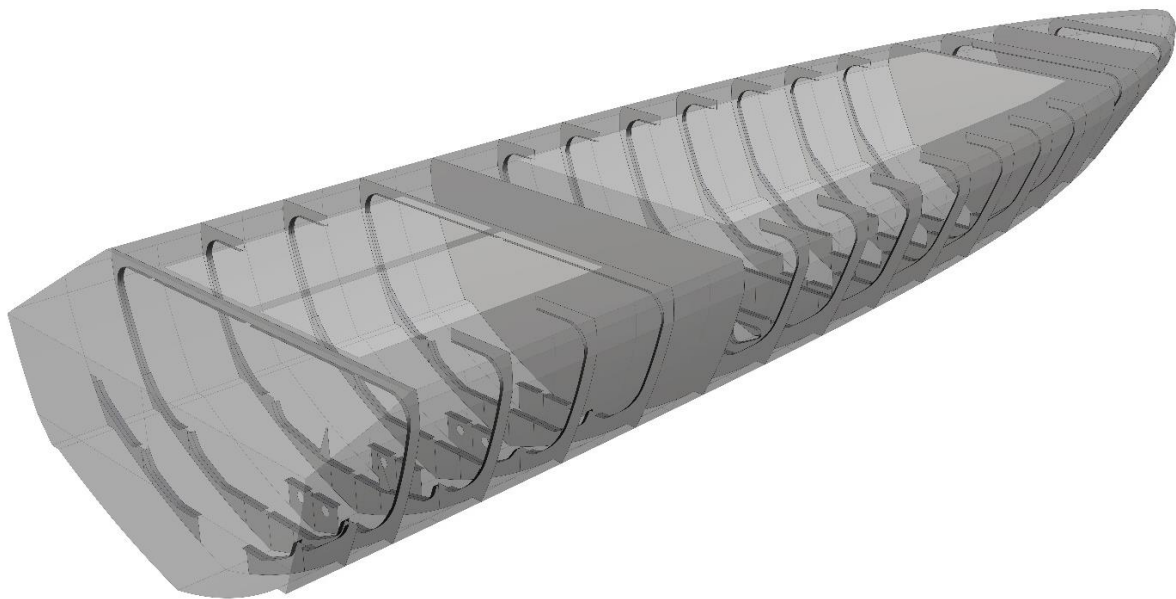
Εικόνα 29: Αρχικό επιφανειακό μοντέλο

Για την δημιουργία των frames πρέπει αρχικά να εμφανίσουμε το lines plan. Από το lines plan δίνουμε τα αντίστοιχα offsets σε κάθε νομέα βάση του υπολογισμού του νηογνώμονα. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις για την μοντελοποίηση του frame 1. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθούμε για την μοντελοποίηση και των υπόλοιπων frames. Όπως θα παρατηρήσουμε στη εικόνα του frame 1, σε κάποιες περιοχές (CL, bottom side) υπάρχει ειδική διαμόρφωση όπου το πλάτος είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχει σύνδεση του frame με το girder. Με αυτόν τον τρόπο ικανοποιούμε την κατασκευαστική συνέχεια των εγκάρσιων και διαμηκών ενισχυτικών. Αυτό θα φανεί πιο καθαρά στην εικόνα 30.

FRAME 1

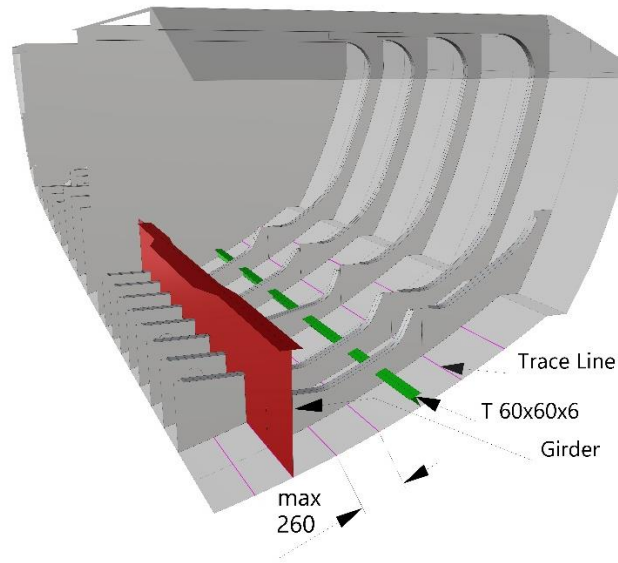


Εικόνα 30: Κατασκευή frame 1

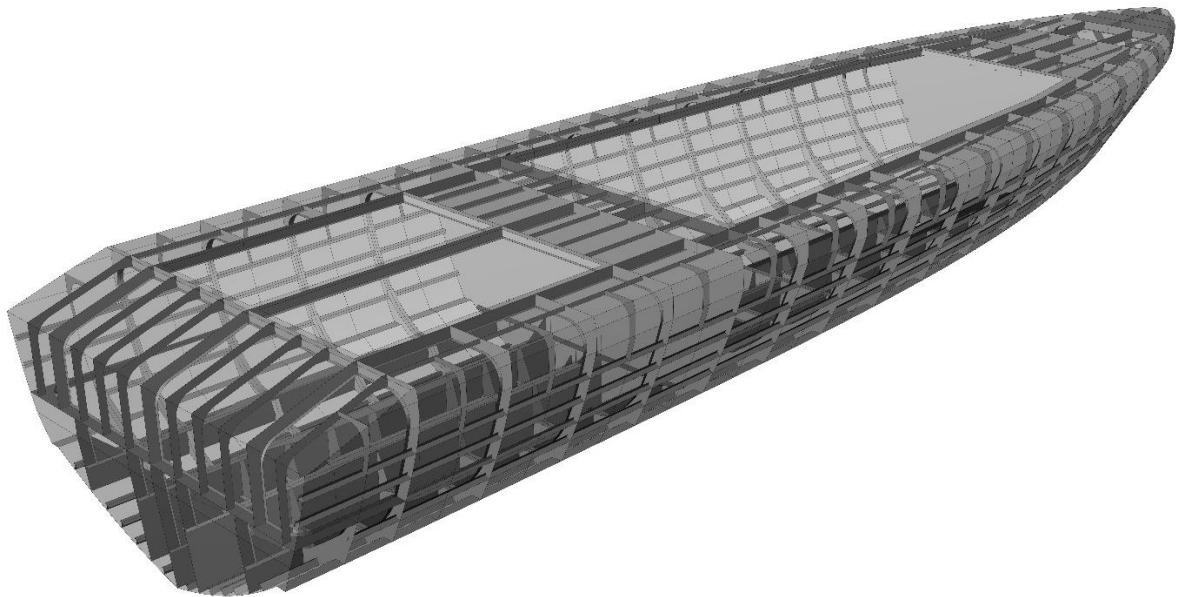


Εικόνα 31: Κατασκευή όλων των frames του σκάφους

Συνεχίζοντας θα δημιουργήσουμε τα διαμήκη κύρια και δευτερεύοντα ενισχυτικά του σκάφους. Ο περιορισμός μας, βάση του νηογνώμονα είναι να μην ξεπεράσουμε το spacing των 260 mm. Παρακάτω θα δούμε ένα δευτερεύον ενισχυτικό καθώς και τις γραμμές όλων των διαμηκών ενισχυτικών που θα υπάρχουν στον πυθμένα του σκάφους. Χρησιμοποιώντας τις καμπύλες ως rails και τα profiles που έχουν επιλεγεί στην εικόνα 33 θα δούμε όλα τα διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους.

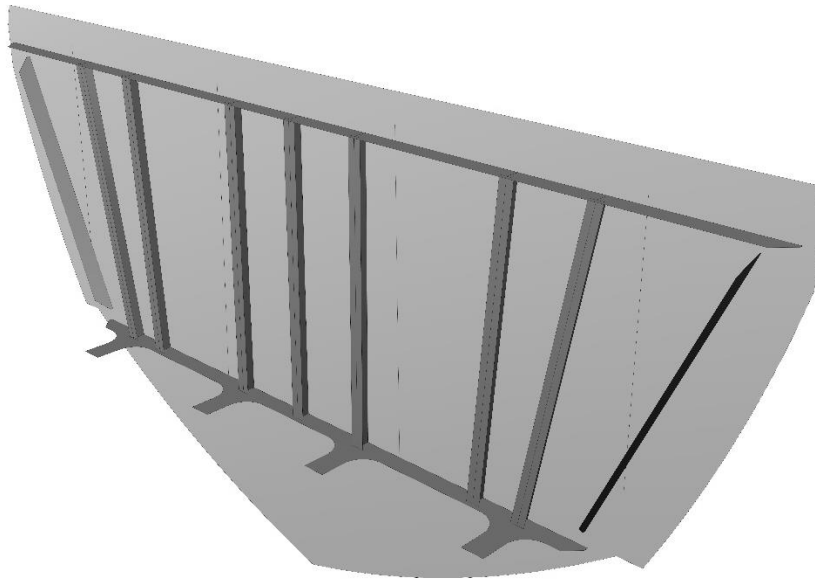


Εικόνα 32: Κατασκευή διαμήκους ενισχυτικού και girder



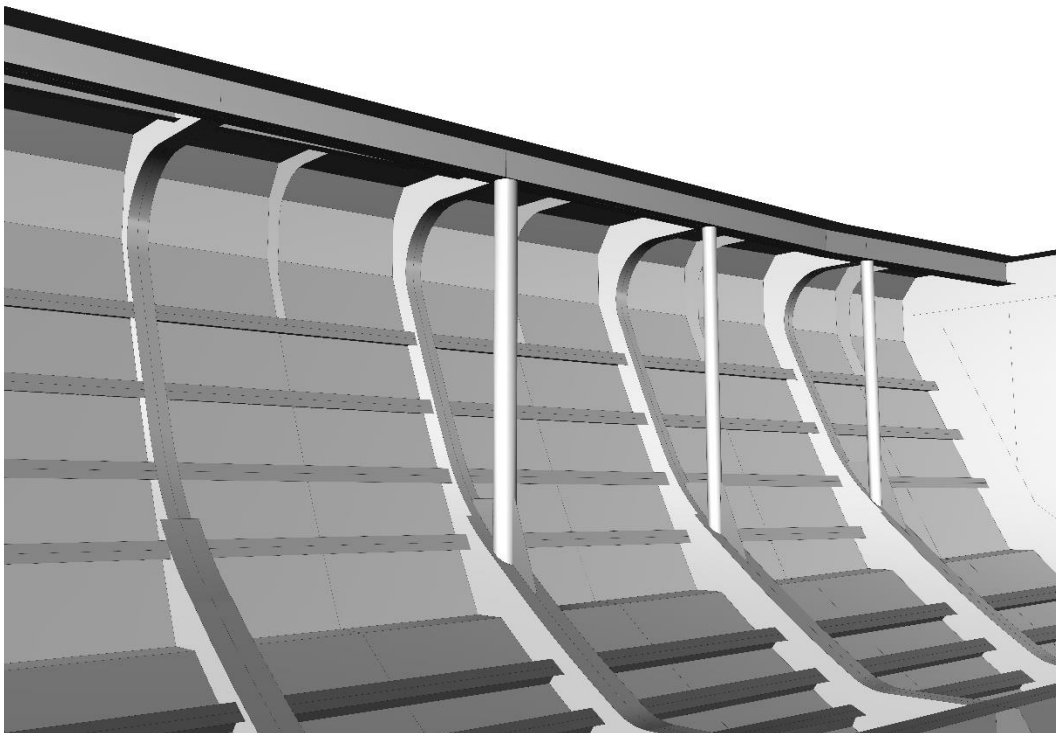
Εικόνα 33: Μοντέλο με διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά

Σε αυτό το σημείο θα σχεδιαστούν τα ενισχυτικά των φρακτών. Θα δείξουμε μια τυπική διάταξη στην πρυμναία φρακτή, και με τον ίδιο τρόπο θα κατασκευαστούν και οι υπόλοιπες.



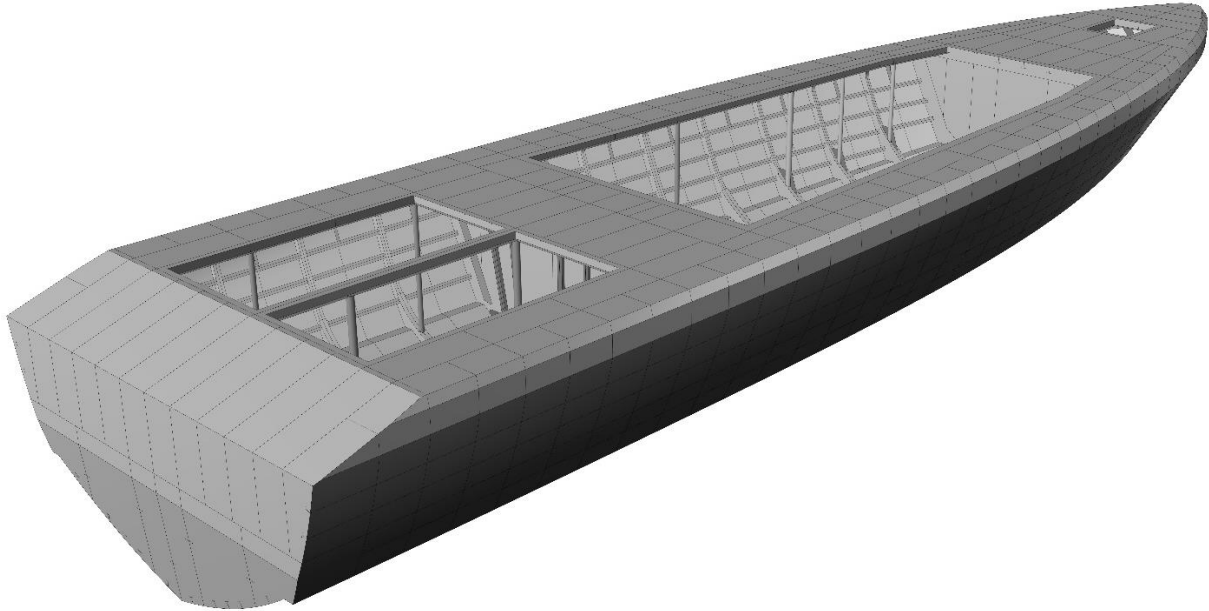
Εικόνα 34: Κατασκευή ενισχυτικών φρακτής

Τέλος θα προσθέσουμε τα pillars στις θέσεις που υπολογίσαμε.



Εικόνα 35: Κατασκευή pillars

Παρακάτω θα δούμε την εικόνα με το ολοκληρωμένο επιφανειακό μοντέλο. Το μοντέλο είναι πλέον έτοιμο για εισαγωγή στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων ANSYS όπου θα ακολουθήσει η διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου (meshing, boundary conditions, loads).



Εικόνα 36: Ολοκληρωμένο επιφανειακό μοντέλο σκάφους

7. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

7.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία υπολογισμού της αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θα γίνει με το πρόγραμμα ANSYS. Ο τύπος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιήσουμε είναι γραμμική στατική ανάλυση της κατασκευής. Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε στο ANSYS φαίνεται παρακάτω:

1. Αρχικά, εισάγουμε το επιφανειακό μοντέλο από το rhinoceros και ελέγχουμε εάν υπάρχουν τυχόν αλλαγές στο μοντέλο.
2. Εφόσον έχουμε επιβεβαιώσει πως έχει γίνει σωστή εισαγωγή ορίζουμε το υλικό της κατασκευής. Για αυτό το βήμα, έχει γίνει προεργασία στο πρόγραμμα rhinoceros, όπου έχουμε χωρίσει σε διαφορετικά layers τα εξωτερικά ελάσματα και τις φρακτές του σκάφους όπου είναι aluminum 5083-H321, και σε άλλα layers όλα τα εσωτερικά ενισχυτικά του σκάφους όπου είναι aluminum 6082-T6.
3. Αντίστοιχη διαδικασία θα ακολουθήσουμε σε αυτό το βήμα όπου θα ορίσουμε τα πάχη των ελασμάτων και των ενισχυτικών. Ο διαχωρισμός έχει δημιουργηθεί με την βοήθεια των layers στο πρόγραμμα rhinoceros, οπότε είναι ομαδοποιημένα τα ελάσματα και τα ενισχυτικά βάση πάχους και έτσι είναι εύκολο να τα ορίσουμε και στο ANSYS.
4. Στη συνέχεια, θα ορίσουμε τις εξωτερικές και εσωτερικές πιέσεις της κατασκευής. Βάση των αποτελεσμάτων του νηογνώμονα και σε συγκεκριμένες περιοχές του κάθε νομέα ασκούμε την αντίστοιχη μέγιστη πίεση.
5. Έπειτα θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες έτσι ώστε να αποτρέψουμε τη κίνηση στερεού σώματος στο χώρο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε πως για τις οριακές συνθήκες θα χρησιμοποιήσουμε το inertia relief στο οποίο έχει γίνει αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο.
6. Ακολουθεί η διακριτοποίηση του μοντέλου.
7. Λύση προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων
8. Ανάλυση αποτελεσμάτων

7.2 Ορισμός υλικού κατασκευής

Στο σκάφος θα χρησιμοποιηθούν 2 διαφορετικά κράματα αλουμινίου των οποίων τα χαρακτηριστικά θα δούμε στις παρακάτω εικόνες.

Έχουμε την σειρά 5083-H321 η οποία ορίζεται σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες του σκάφους.

aluminum 5083-H321

Density	2.7e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	68000 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Bulk Modulus	66667 MPa
Shear Modulus	25564 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1/°C
Tensile Ultimate Strength	330 MPa
Tensile Yield Strength	MPa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0.12 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	9e+05 mJ/kg·°C

Εικόνα 37: Χαρακτηριστικά αλουμινίου σειράς 5083-H321

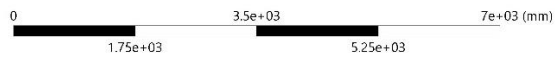
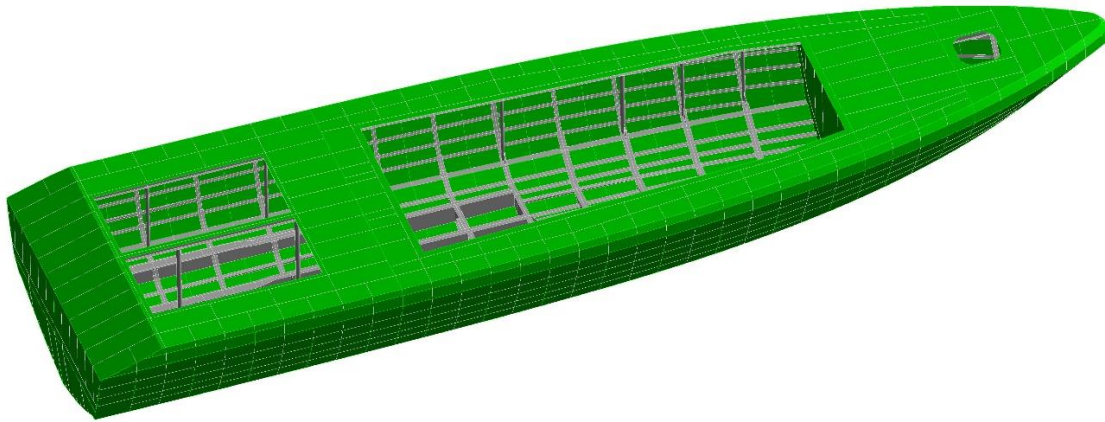
Έχουμε την σειρά 6082-T6 η οποία ορίζεται σε όλες τις εσωτερικές επιφάνειες του σκάφους (ενισχυτικά)

aluminum 6082-T6

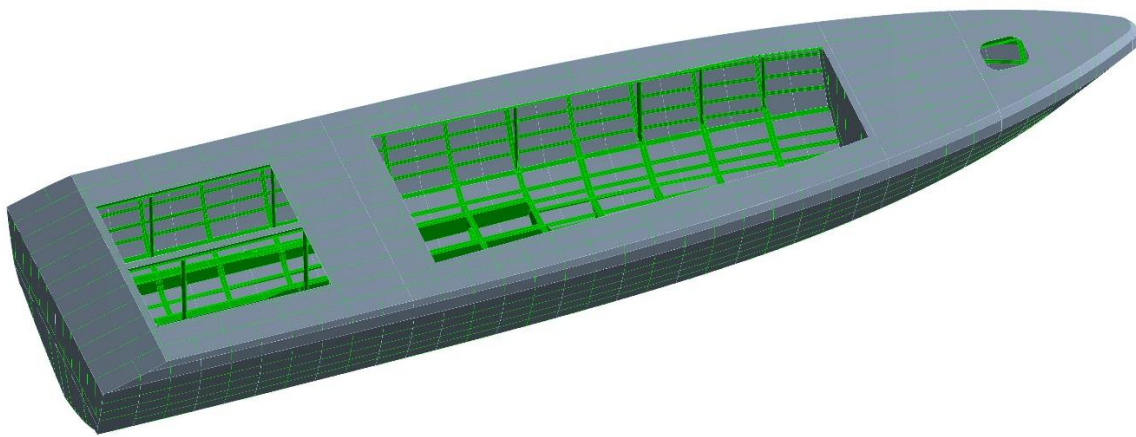
Density	2.7e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	69000 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Bulk Modulus	67647 MPa
Shear Modulus	25940 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1/°C
Tensile Ultimate Strength	310 MPa
Tensile Yield Strength	MPa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0.16 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	9e+05 mJ/kg·°C

Εικόνα 38: Χαρακτηριστικά κράματος αλουμινίου σειράς 6082-T6

Παρακάτω θα δούμε τις επιφάνειες που έχουν οριστεί τα υλικά με πράσινο χρώμα.



Εικόνα 39: Εξωτερικά ελάσματα + φρακτές aluminum 5083-H321



Εικόνα 40: Εσωτερικά ενισχυτικά aluminum 6082-T6

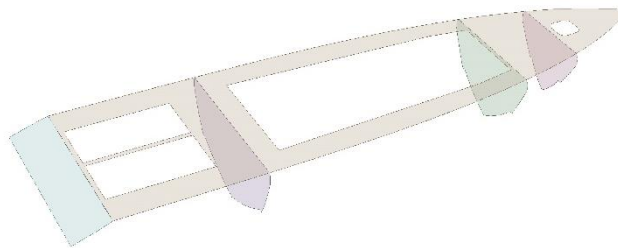
7.3 Ορισμός πάχους ελασμάτων κατασκευής

Χρησιμοποιώντας τα Layers που έχουν φτιαχτεί στο rhinoceros έχουμε τα παρακάτω πάχη τα οποία θα ορίσουμε στα items.

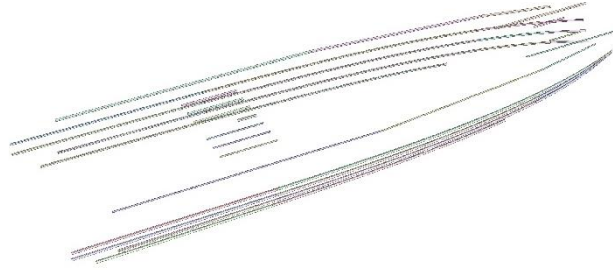
Ξεκινώντας με αύξουσα σειρά έχουμε:

- 3.65mm : κατάστρωμα + φρακτές
- 4.00mm : διαμήκη ενισχυτικά πλευράς (T) + διαμήκη ενισχυτικά καταστρώματος (L)
- 4.02mm : ελάσματα πλευράς
- 5mm : pillars
- 6mm : νομείς + διαμήκη ενισχυτικά (T) + ενισχυτικά φρακτής (T)
- 6.4mm : ελάσματα πυθμένα
- 7mm : transom upper+ sheer strake
- 8mm : διαμήκη κύρια ενισχυτικά + φλάντζες νομέων
- 10mm : chine + φλάντζες νομέων-διαμηκών ενισχυτικών
- 15mm : φλάντζες διαμηκών ενισχυτικών μηχανής
- 20mm : transom

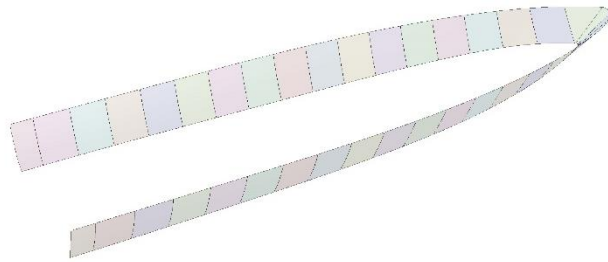
Στις παρακάτω εικόνες θα δούμε αναλυτικά την κάθε επιλογή επιφάνειας για κάθε πάχος ξεχωριστά.



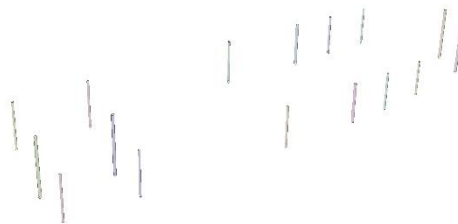
Εικόνα 41: Ορισμός πάχους 3.65mm



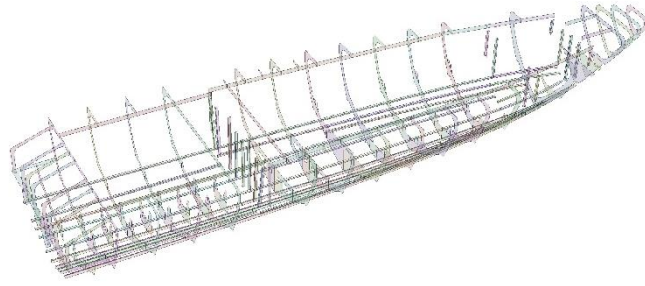
Εικόνα 42: Ορισμός πάχους 4mm



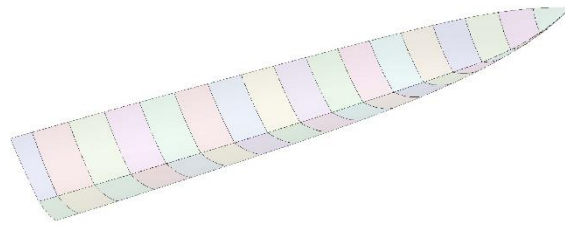
Εικόνα 43: Ορισμός πάχους 4.02mm



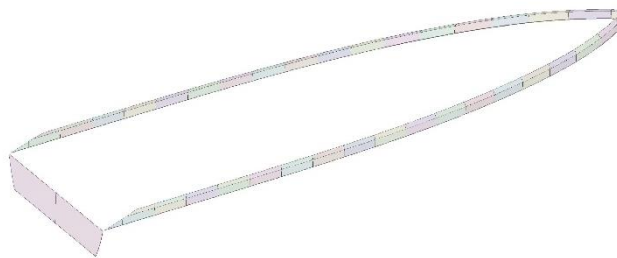
Εικόνα 44: Ορισμός πάχους 5mm



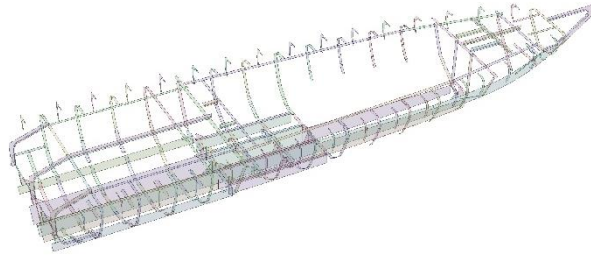
Εικόνα 45: Ορισμός πάχους 6mm



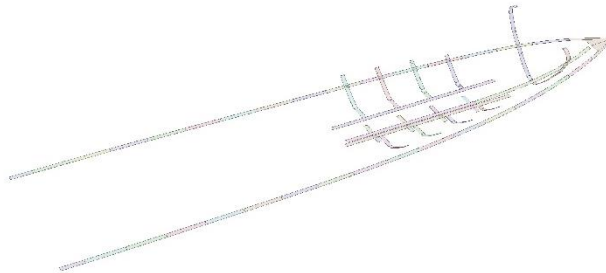
Εικόνα 46: Ορισμός πάχους 6.4mm



Εικόνα 47: Ορισμός πάχους 7mm



Εικόνα 48: Ορισμός πάχους 8mm



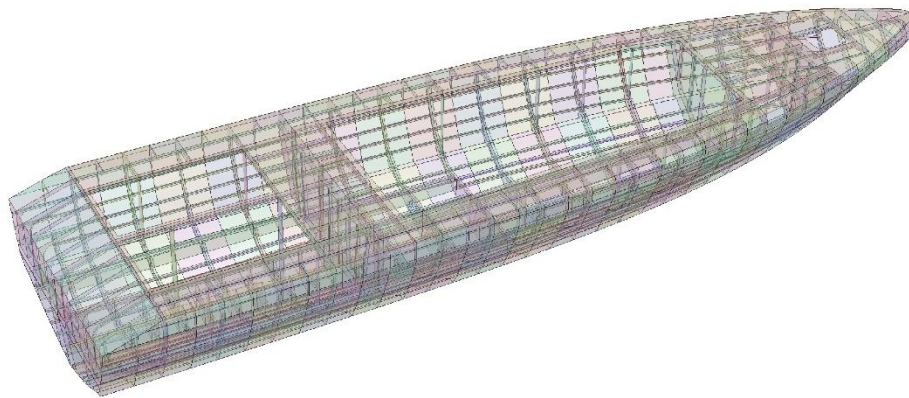
Εικόνα 49: Ορισμός πάχους 10mm



Εικόνα 50: Ορισμός πάχους 15mm



Εικόνα 51: Ορισμός πάχους 20mm

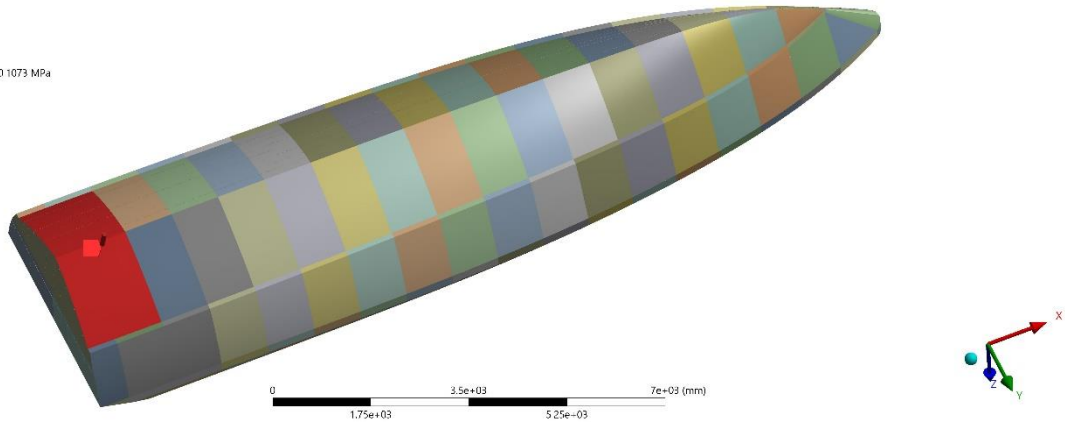


Εικόνα 52: Ορισμένα πάχη σκάφους

7.4 Ορισμός πιέσεων μεταλλικής κατασκευής

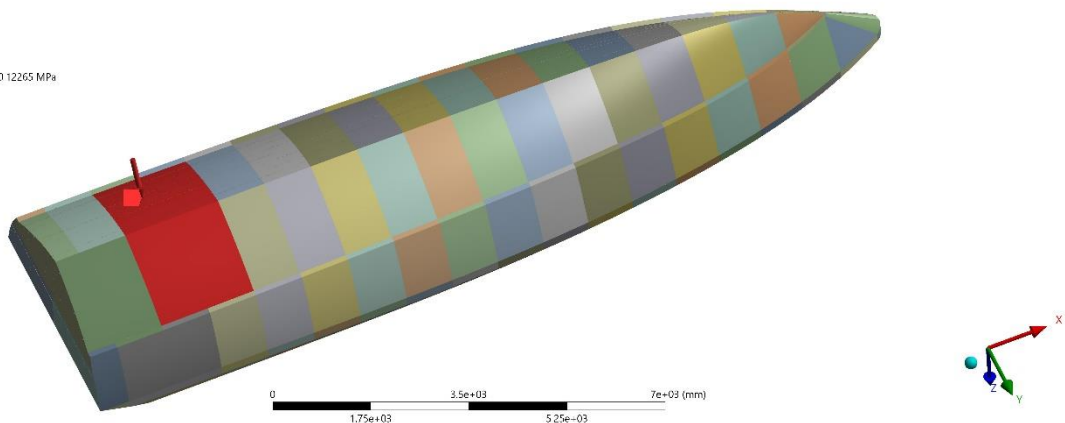
Ο ορισμός των πιέσεων θα γίνει βάση των υπολογισμών του νηογνώμονα. Με τους κανονισμούς έχουν υπολογιστεί οι πιέσεις του bottom, side και deck. Οι πιέσεις που θα οριστούν στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων θα είναι αυτές του πυθμένα κυρίως καθώς οι υπόλοιπες είναι πολύ χαμηλές και έχουν ελάχιστη επίδραση στα αποτελέσματα. Θα εξετάσουμε λοιπόν τον κάθε νομέα με την αντίστοιχη μέγιστη πίεση. Αυτό σημαίνει πως η πίεση αυτή θα ασκείται σε μια περιοχή με μήκος s (frame spacing) πλώρα και πρύμα του κάθε νομέα. Όπως θα δούμε στις παρακάτω εικόνες, έχει γίνει η απαραίτητη διαδικασία έτσι ώστε να μπορέσουμε να επιλέξουμε τις κατάλληλες επιφάνειες σε κάθε περίπτωση ορισμού πίεσης.

A: Static Structural
Fr 0.1 : 107.30 kN/m²
Time: 1 s
12/1/2020 10:32 PM
Fr 0.1 : 107.30 kN/m²; 0.1073 MPa



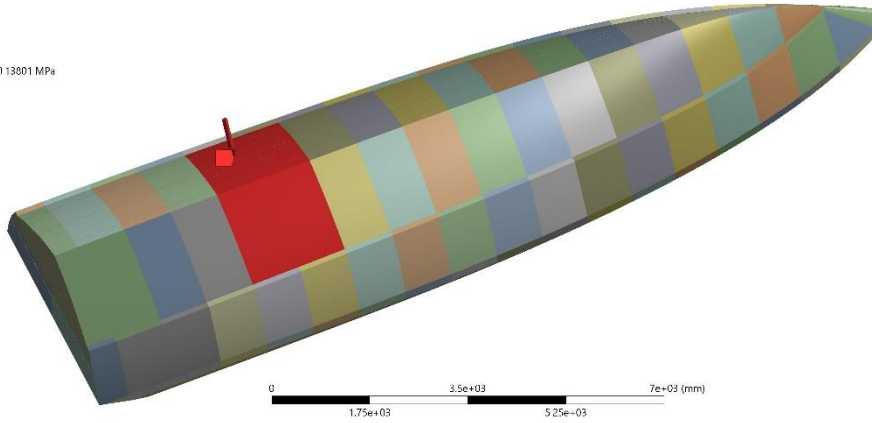
Εικόνα 53: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 1

A: Static Structural
Fr 2.3 : 122.65 kN/m²
Time: 1 s
12/1/2020 10:32 PM
Fr 2.3 : 122.65 kN/m²; 0.12265 MPa



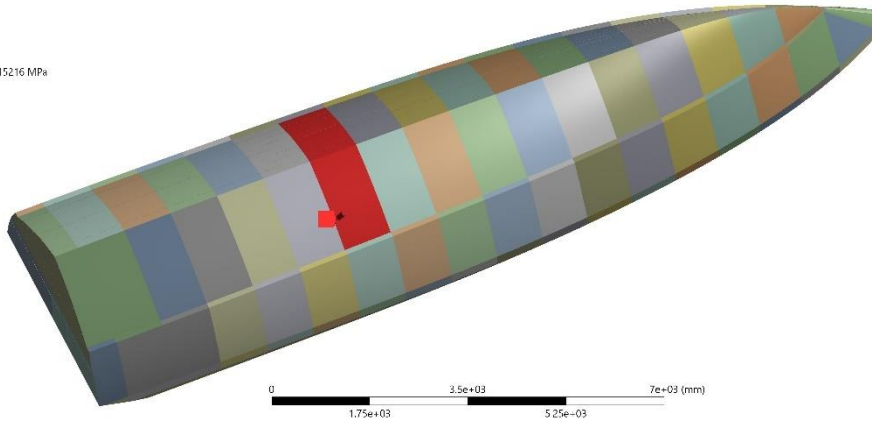
Εικόνα 54: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 2 και 3

A: Static Structural
Fr 4.5 : 138.01 kN/m²
Time 1. s
12/1/2020 10:32 PM
Fr 4.5 : 138.01 kN/m² 0.13801 MPa



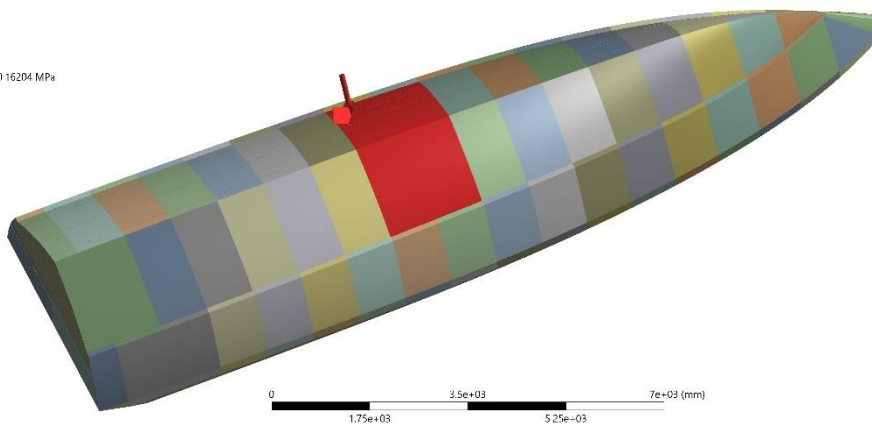
Εικόνα 55: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 4 και 5

A: Static Structural
Fr 6 : 152.16 kN/m²
Time 1. s
12/1/2020 10:33 PM
Fr 6 : 152.16 kN/m² 0.15216 MPa



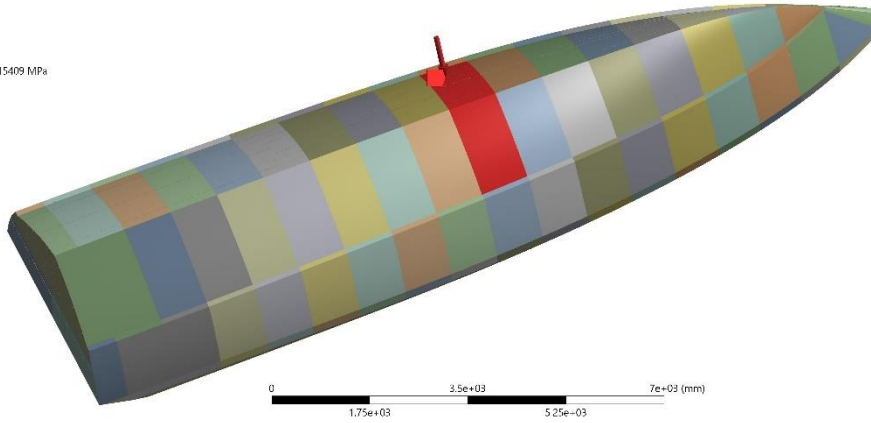
Εικόνα 56: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 6

A: Static Structural
Fr 7.8 : 162.04 kN/m²
Time 1. s
12/1/2020 10:33 PM
Fr 7.8 : 162.04 kN/m² 0.16204 MPa



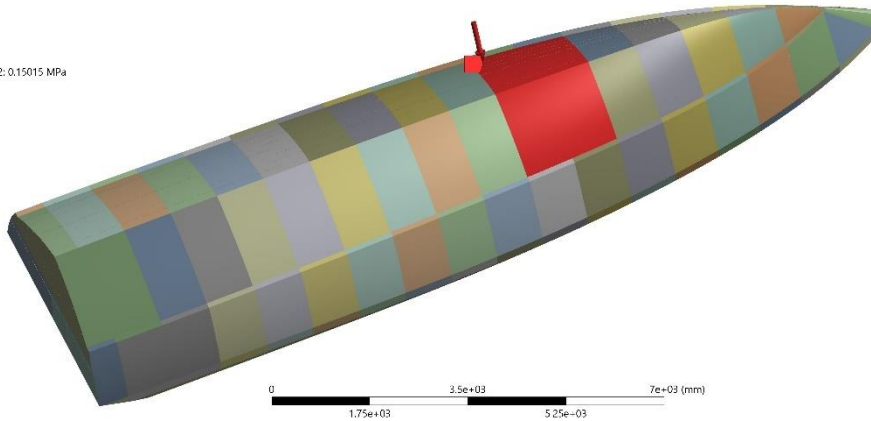
Εικόνα 57: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 7 και 8

A: Static Structural
Fr 9 : 154.09 kN/m2
Time 1. s
12/1/2020 10:33 PM
Fr 9 : 154.09 kN/m2; 0.15409 MPa



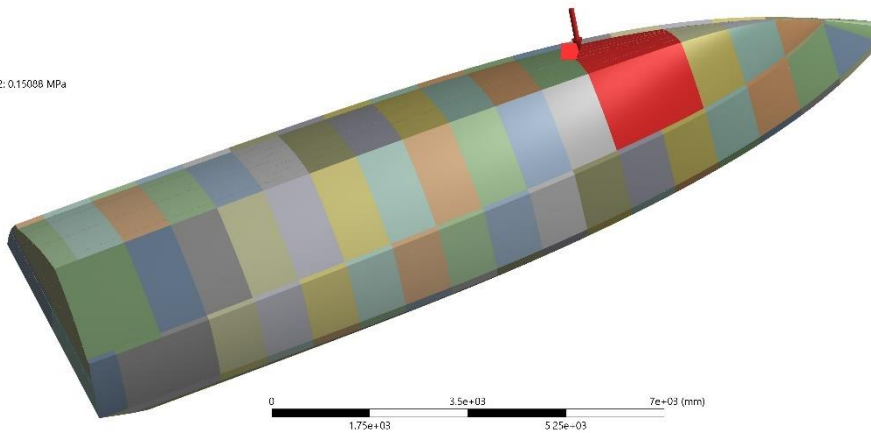
Εικόνα 58: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 9

A: Static Structural
Fr 10.11 : 150.15 kN/m2
Time 1. s
12/1/2020 10:33 PM
Fr 10.11 : 150.15 kN/m2; 0.15015 MPa



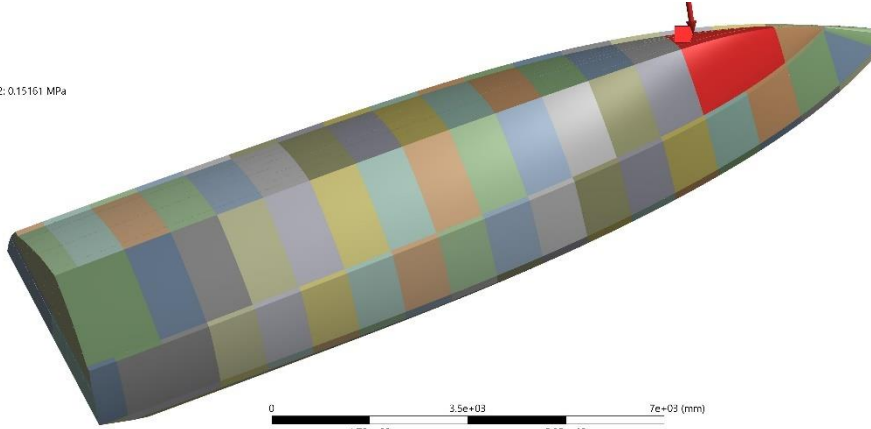
Εικόνα 59: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 10 και 11

A: Static Structural
Fr 12.13 : 150.88 kN/m2
Time 1. s
12/1/2020 10:34 PM
Fr 12.13 : 150.88 kN/m2; 0.15088 MPa



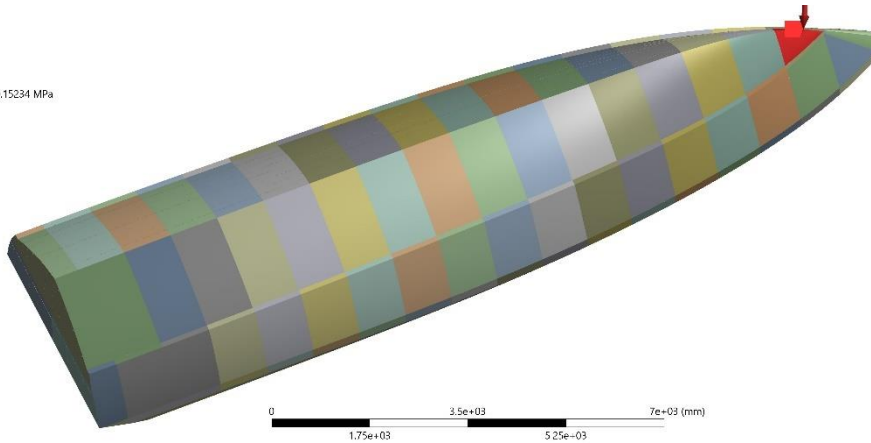
Εικόνα 60: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 12 και 13

A: Static Structural
Fr 14.15: 151.61 kN/m²
Time: 1. s
12/1/2020 10:34 PM
■ Fr 14.15: 151.61 kN/m²; 0.15161 MPa



Εικόνα 61: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 14 και 15

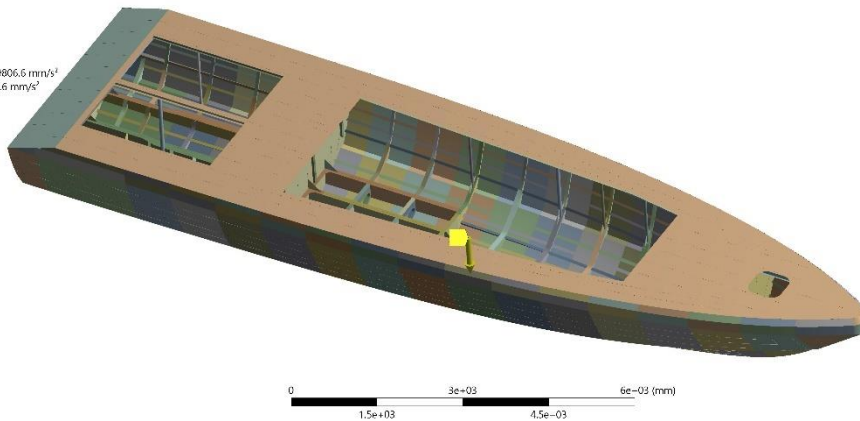
A: Static Structural
Fr 16: 152.34 kN/m²
Time: 1. s
12/1/2020 10:34 PM
■ Fr 16: 152.34 kN/m²; 0.15234 MPa



Εικόνα 62: Ορισμός πίεσης πυθμένα στον νομέα 16

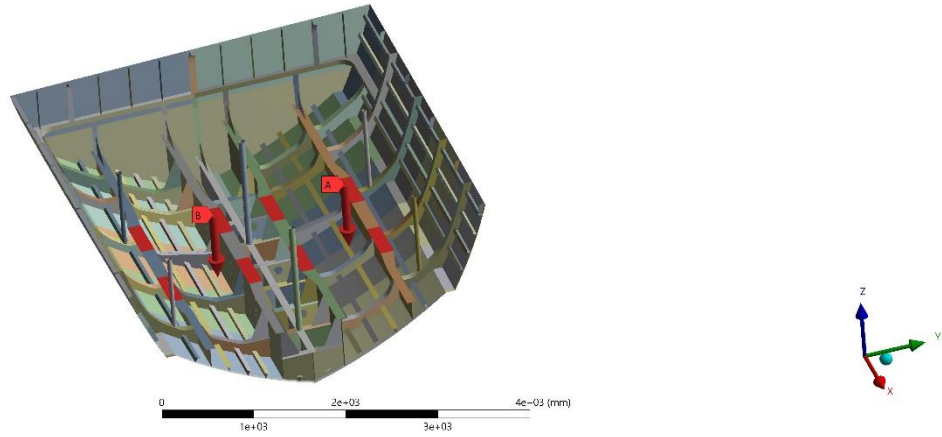
Στη συνέχεια θα ορίσουμε την επιτάχυνση της βαρύτητας g.

A: Static Structural
Standard Earth Gravity
Time: 1. s
12/1/2020 10:38 PM
■ Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²
Components: 0.0, -9806.6 mm/s²



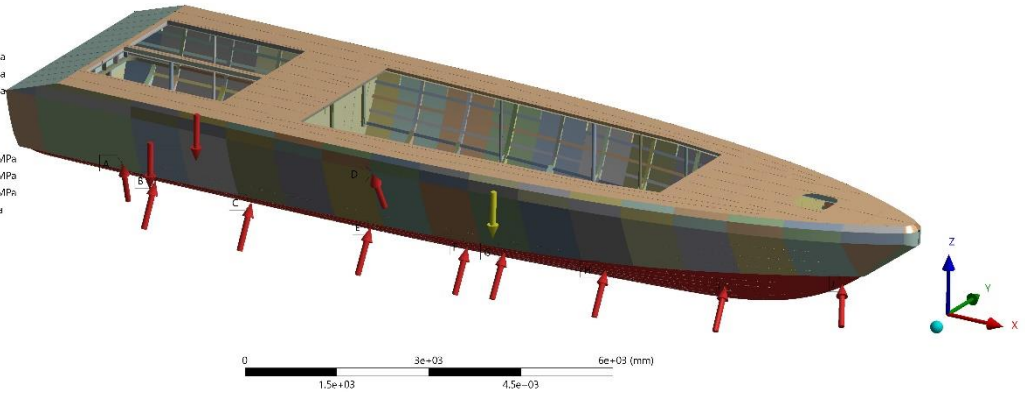
Εικόνα 63: Ορισμός επιτάχυνσης της βαρύτητας

A: Static Structural
P_ENGINE (1900Kg)
Time 1.s
12/1/2020 10:36 PM
A P_ENGINE (1900Kg): 19000 N
B SB_ENGINE (1900Kg): 19000 N



Εικόνα 64: Ορισμός πίεσης κορίων μηχανών

A: Static Structural
Static Structural
Time 1.s
Items: 10 of 14 indicated
12/1/2020 10:12 PM
A Fr 0,1 : 111.03 MPa: 0.11103 MPa
B Fr 2,3 : 127.01 MPa: 0.12701 MPa
C Fr 4,5 : 142.99 MPa: 0.14299 MPa
D Fr 6 : 157.72 MPa: 0.15772 MPa
E Fr 7,8 : 168 MPa: 0.168 MPa
F Fr 9 : 159.70 MPa: 0.1597 MPa
G Fr 10,11 : 155.56 MPa: 0.15556 MPa
H Fr 12,13 : 156.29 MPa: 0.15629 MPa
I Fr 14,15 : 157.02 MPa: 0.15702 MPa
J Fr 16 : 157.75 MPa: 0.15775 MPa



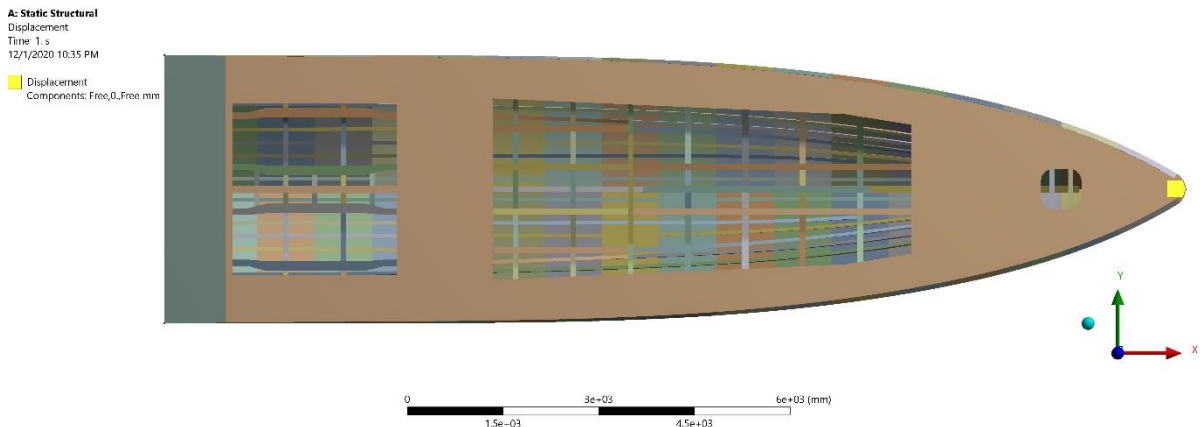
Εικόνα 65: Συνολικές φορτίσεις σκάφους

7.5 Ορισμός οριακών συνθηκών κατασκευής

Η μόνη οριακή συνθήκη που θα ορίσουμε στην κατασκευή είναι η ενεργοποίηση του inertia relief από τις ρυθμίσεις του solver όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα 66. Για λόγους συμμετρίας θα προσθέσουμε μια επιπλέον συνθήκη η οποία φαίνεται στην εικόνα 67 κατά την οποία έχουμε επιλέξει 1 σημείο στην πλώρη και ακόμα 2 σημεία δεξιά και αριστερά στην πρύμνη του σκάφους τα οποία θα είναι ελεύθερα κίνησης κατά x, z αλλά όχι κατά y. Έτσι τα αποτελέσματα μας θα έχουν κάμψη και παραμορφώσεις κατά το επίπεδο x,z. Αυτό το βήμα το εφαρμόζουμε διότι θα υπάρχουν μικροδιαφορές κατά διακριτοποίηση του μοντέλου στο δεξί και στο αριστερό κομμάτι του σκάφους.

Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	On

Εικόνα 66: Οριακή συνθήκη (Inertia relief)



Εικόνα 67: Συνθήκη αδυναμίας μετακίνησης (x:ελεύθερο, y:0, z:ελεύθερο)

7.6 Διακριτοποίηση

Για την διακριτοποίηση θα χρησιμοποιήσουμε επιφανειακά τετράπλευρα στοιχεία κατά κύριο λόγο τα οποία οδηγούν σε ακριβέστερα αποτελέσματα. Σε ορισμένες περιοχές του σκάφους όπου περιμένουμε αυξημένες τάσεις έχει δημιουργηθεί πιο πυκνό πλέγμα για καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικά την ποιότητα που έχουμε πετύχει στον μοντέλο με εικόνες από το πρόγραμμα ANSYS.

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	50.0 mm

Εικόνα 68: Βασικές ρυθμίσεις

Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0.25 mm)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (0.5 mm)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (30.0°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	16693 mm
Average Surface Area	2.3279e+005 mm ²
Minimum Edge Length	0.50886 mm

Εικόνα 69: Μέγεθος στοιχείων (Mesh sizing)

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	1.3618e-002
<input type="checkbox"/> Max	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.94884
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8.4019e-002

Εικόνα 70: Ποιότητα στοιχείων (Mesh quality)

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 70 η μέση (average) ποιότητα των στοιχείων είναι πολύ ικανοποιητική. Θεωρώντας το τέλειο πλέγμα στο 1 έχουμε φτάσει στο 0.95 περίπου.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1.
<input type="checkbox"/> Max	145.88
<input type="checkbox"/> Average	1.0871
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.72377

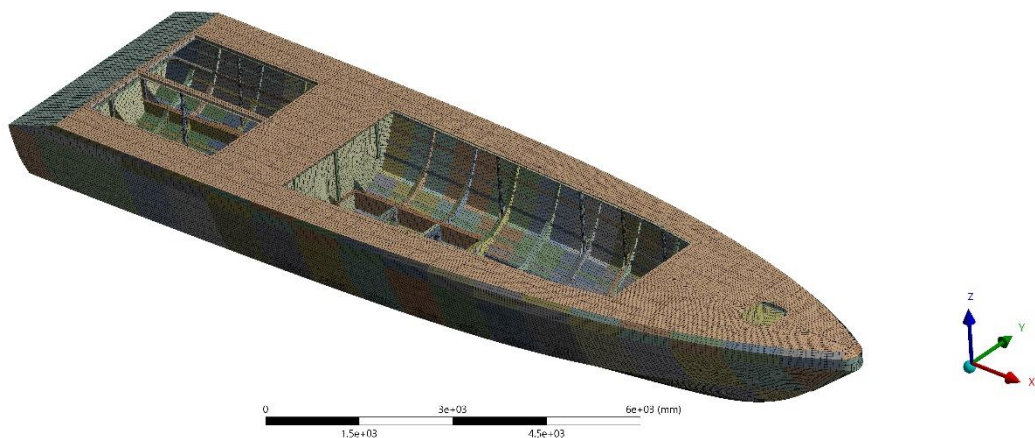
Εικόνα 71: Λόγος πλευρών στοιχείων (Aspect ratio)

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 71 ο μέσος λόγος των πλευρών των στοιχείων είναι σε αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο. Με ιδανικό λόγο πλευρών το 1 έχουμε φτάσει στο 1.09 περίπου.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1.3057e-010
<input type="checkbox"/> Max	0.9918
<input type="checkbox"/> Average	5.2412e-002
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8.7493e-002

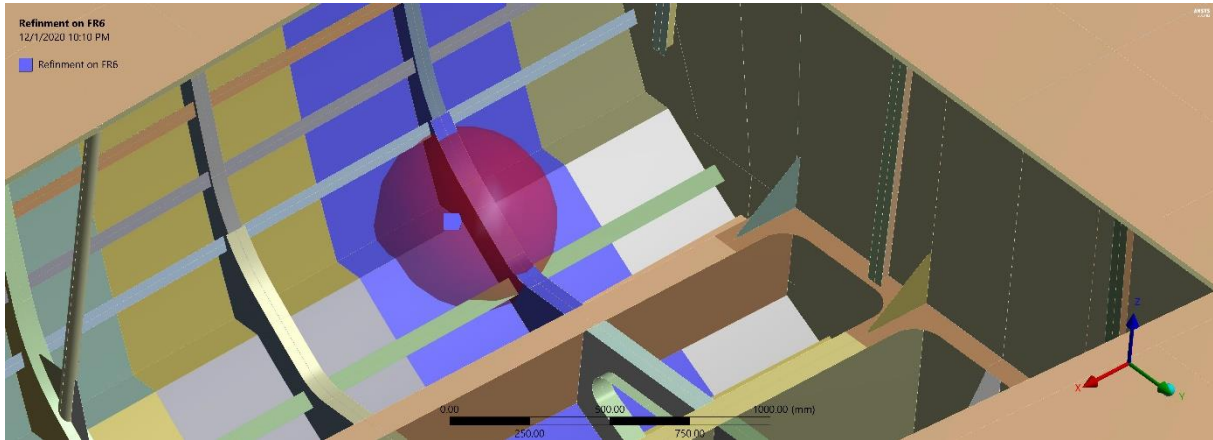
Εικόνα 72: Λοξότητα στοιχείων (Element skewness)

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 72 έχουμε πετύχει τον στόχο στην λοξότητα των στοιχείων. Με 0.05 στόχο έχουμε φτάσει στο 0.0525.



Εικόνα 73: Διακριτοποίηση μοντέλου

Όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου σε κάποιες περιοχές θα πυκνώσουμε το πλέγμα. Αυτό φαίνεται παρακάτω με τις αντίστοιχες ρυθμίσεις.

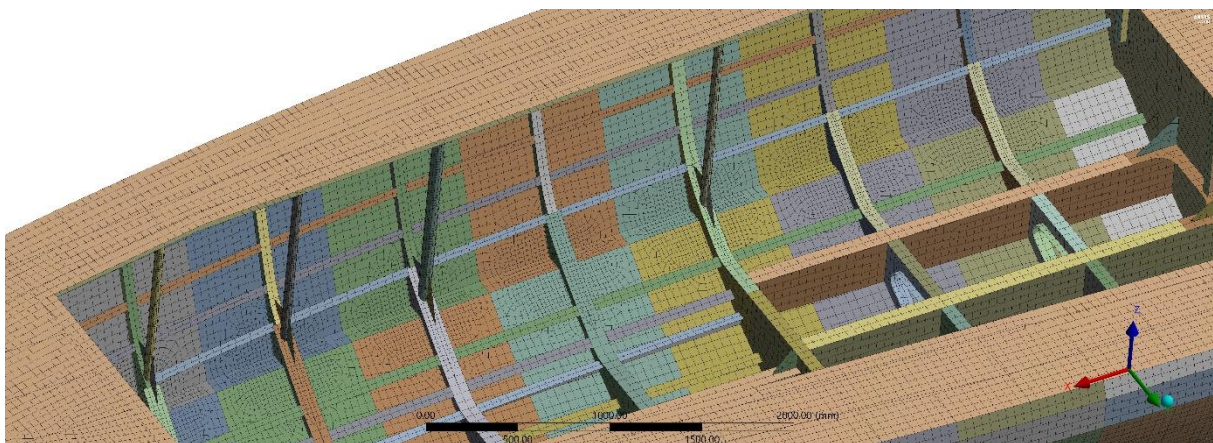


Εικόνα 74: Περιοχή πυκνώσης πλέγματος

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	5 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Sphere of Influence
Sphere Center	6
<input type="checkbox"/> Sphere Radius	300.0 mm
<input type="checkbox"/> Element Size	25.0 mm

Εικόνα 75: Ρυθμίσεις πυκνώσης πλέγματος

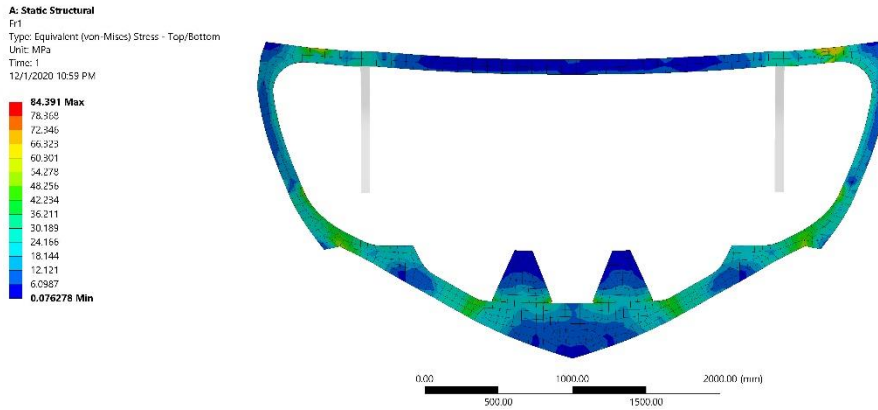
Η παραπάνω διαδικασία θα εφαρμοστεί στους νομείς 6-12 στη συγκεκριμένη περιοχή γύρω από το chine.



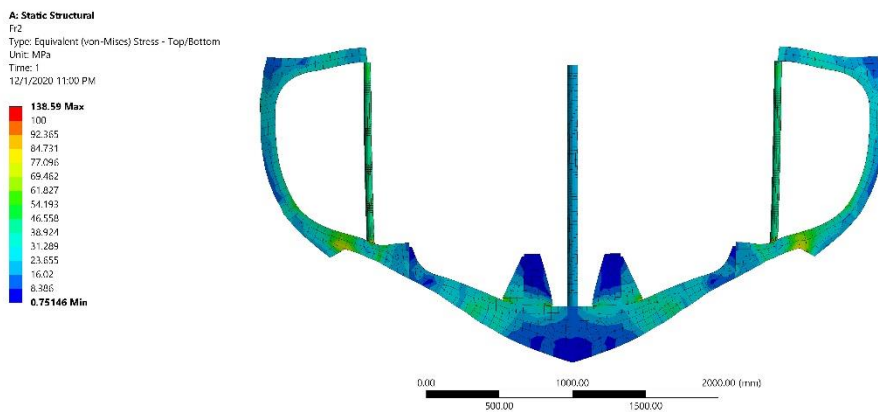
Εικόνα 76: Περιοχές πυκνού πλέγματος (Refinement areas)

7.7 Λύση προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων

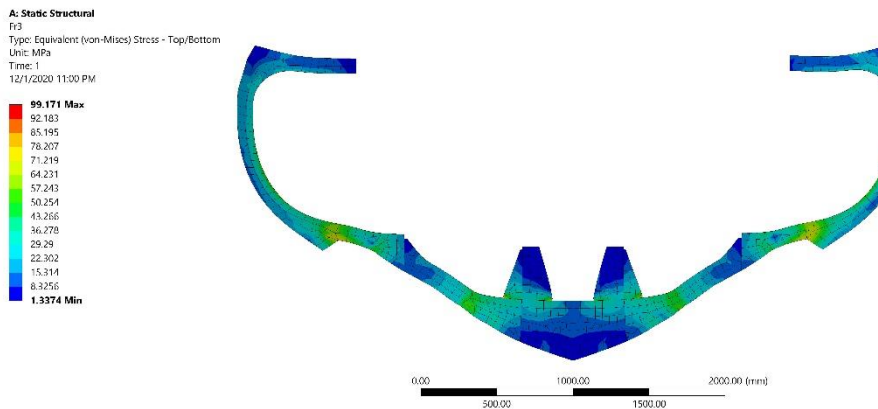
Παρακάτω έχουμε καταγράψει τους νομείς με τις τάσεις κατά Von-Mises.



Εικόνα 77: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 1

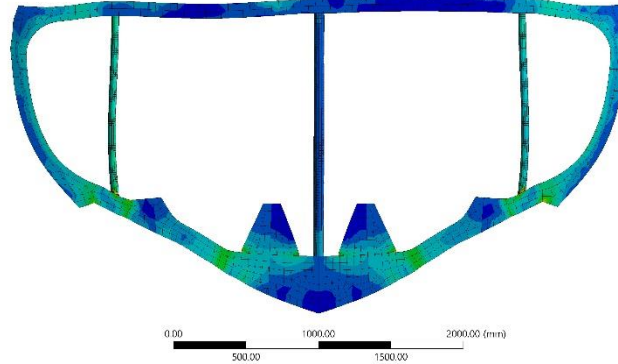
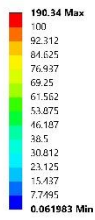


Εικόνα 78: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 2



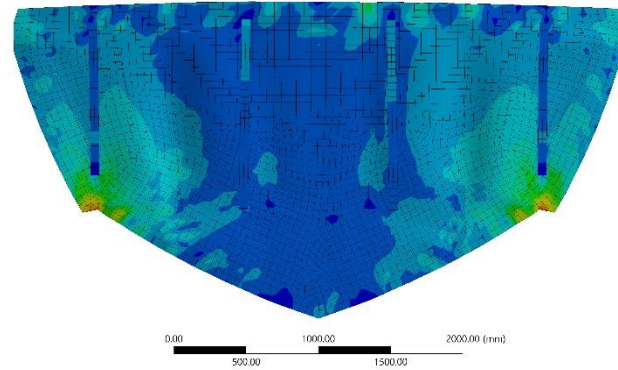
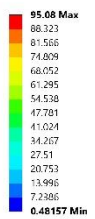
Εικόνα 79: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 3

A: Static Structural
Fr4
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:01 PM



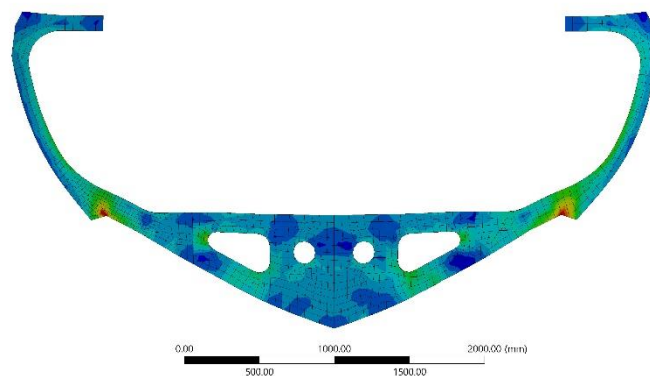
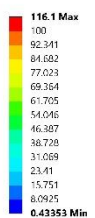
Εικόνα 80: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 4

A: Static Structural
Btu5
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:01 PM



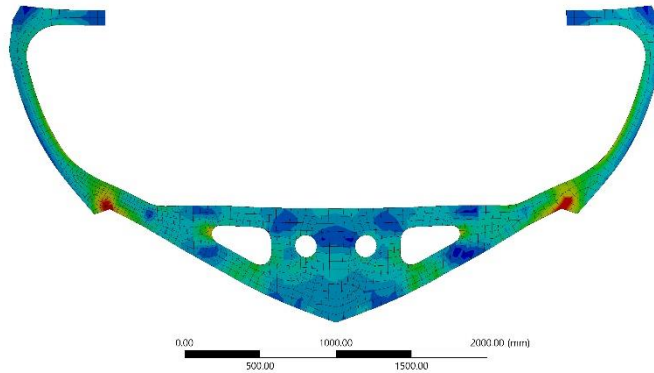
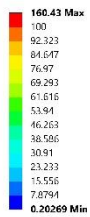
Εικόνα 81: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 5

A: Static Structural
Fr6
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:02 PM



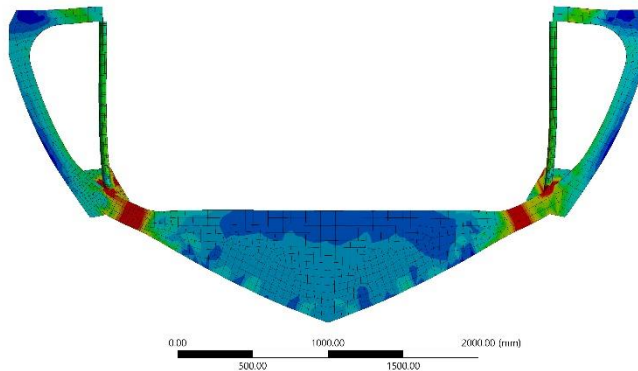
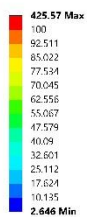
Εικόνα 82: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 6

A: Static Structural
F77
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:02 PM



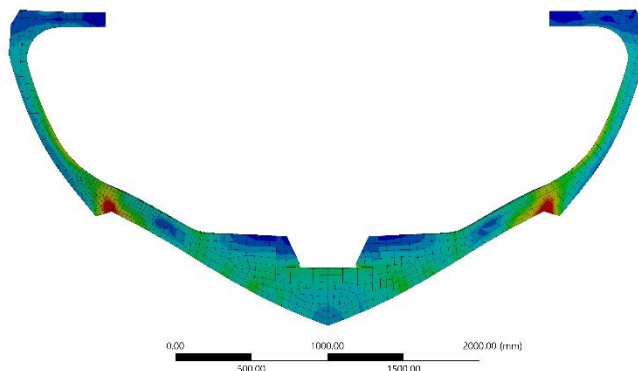
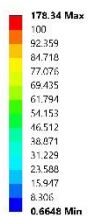
Εικόνα 83: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 7

A: Static Structural
F78
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:02 PM



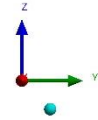
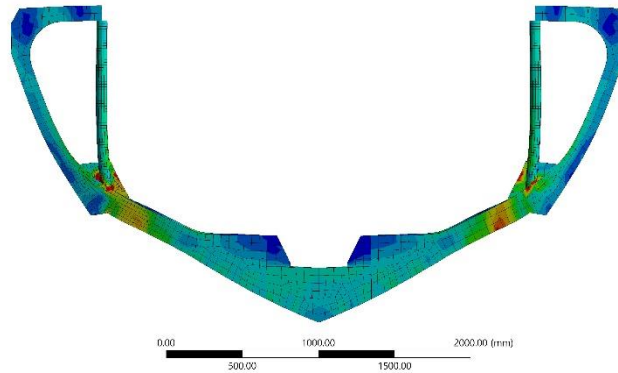
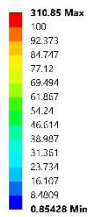
Εικόνα 84: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 8

A: Static Structural
F79
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:03 PM



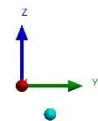
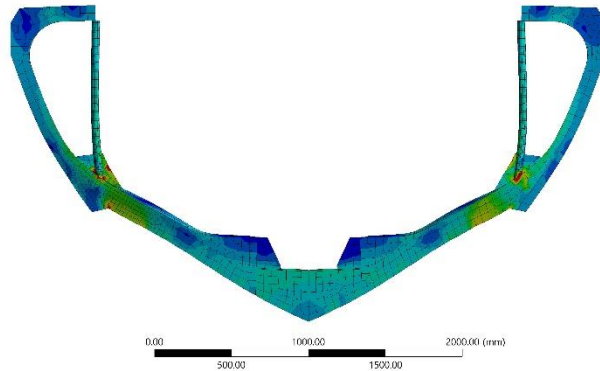
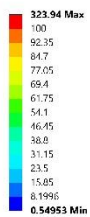
Εικόνα 85: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 9

A: Static Structural
Fr10
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:03 PM



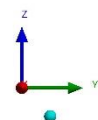
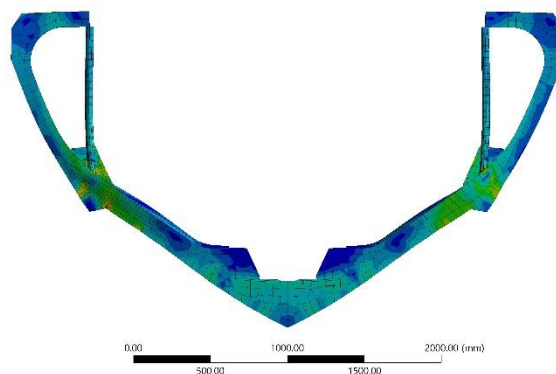
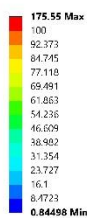
Εικόνα 86: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 10

A: Static Structural
Fr11
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:04 PM



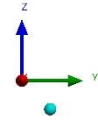
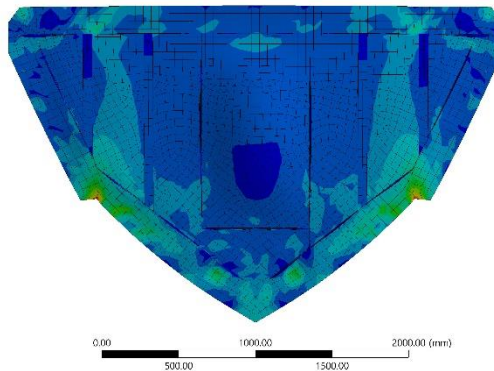
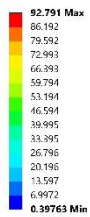
Εικόνα 87: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 11

A: Static Structural
Fr12
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:04 PM



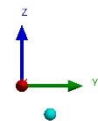
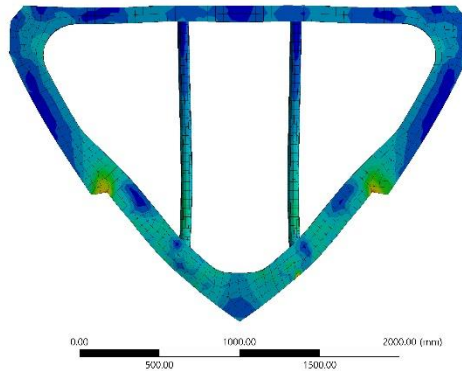
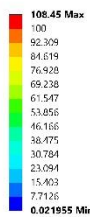
Εικόνα 88: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 12

A: Static Structural
Bhd13
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:04 PM



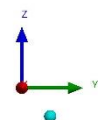
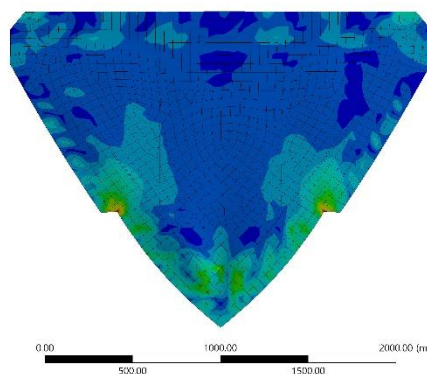
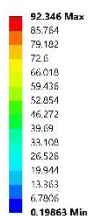
Εικόνα 89: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 13

A: Static Structural
F14
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:05 PM

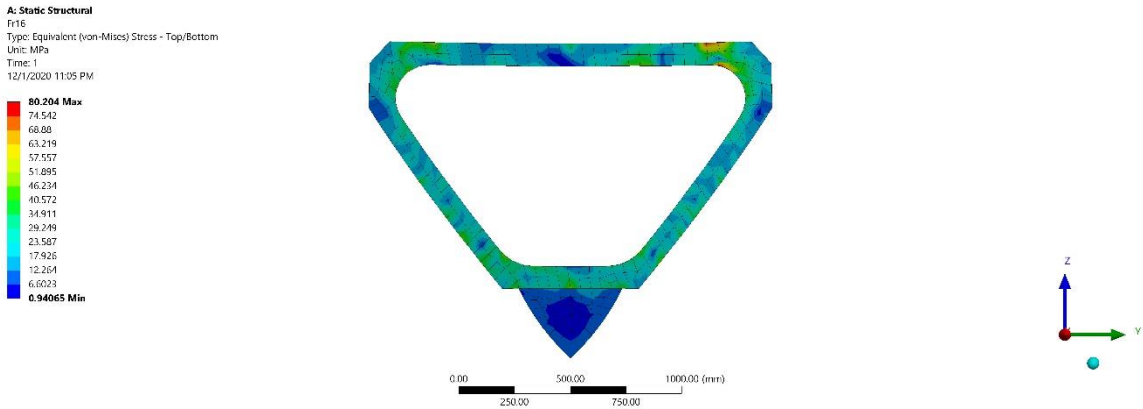


Εικόνα 90: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 14

A: Static Structural
Bhd15
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/1/2020 11:05 PM

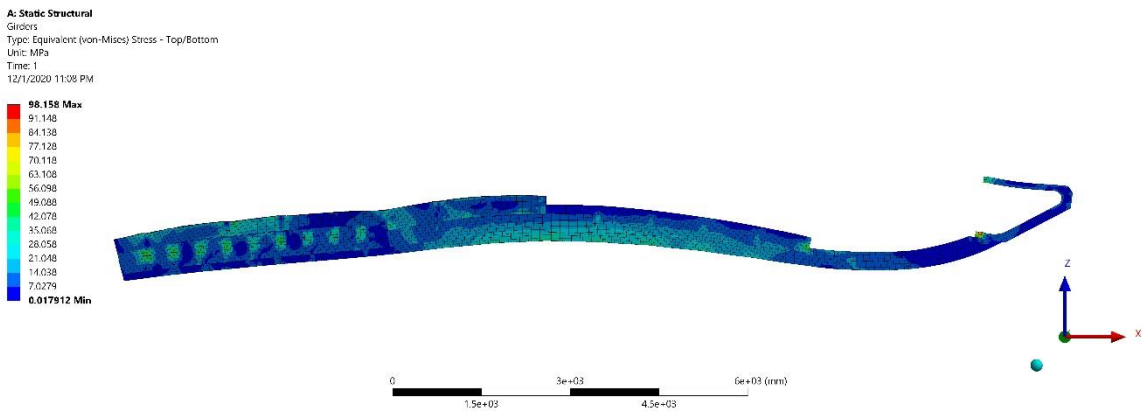


Εικόνα 91: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 15

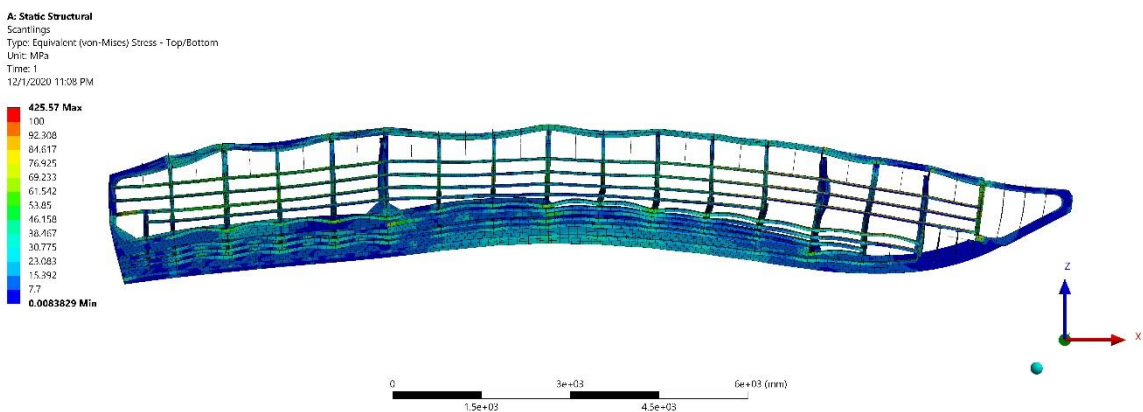


Εικόνα 92: Τάσεις κατά von-Mises στον νομέα 16

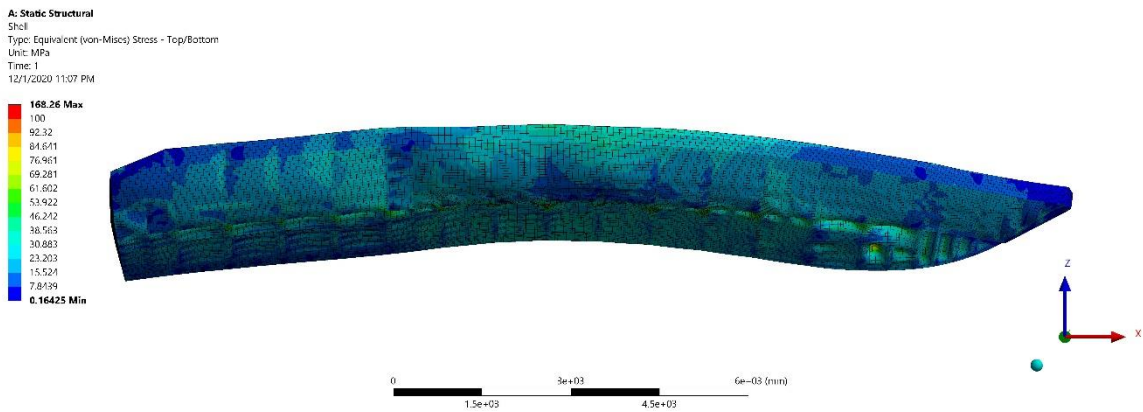
Παρακάτω έχουν καταγραφεί οι τάσεις κατά Von-Mises των βασικών δομικών στοιχείων, των διαμηκών ενισχυτικών καθώς και μόνο των ελασμάτων του σκάφους.



Εικόνα 93: Τάσεις κατά von-Mises στα Bottom Girders

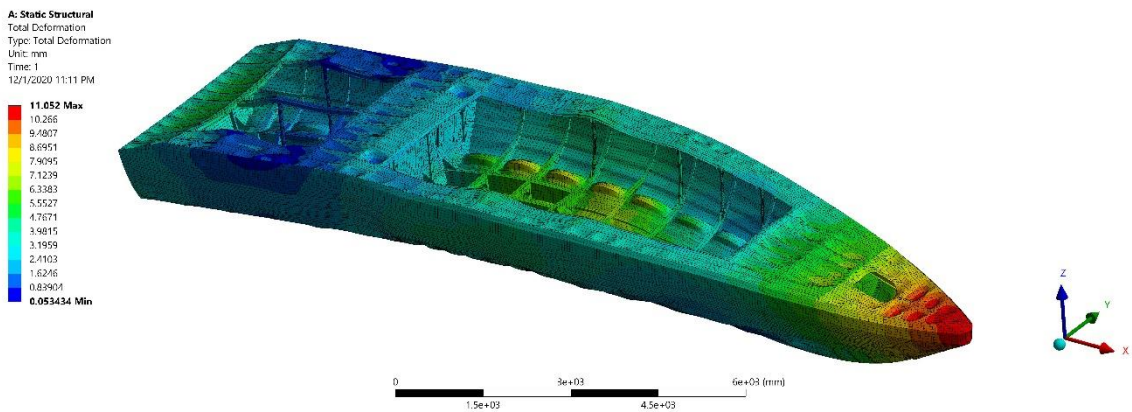


Εικόνα 94: Τάσεις κατά von-Mises στα scantlings



Εικόνα 95: Τάσεις κατά von-Mises στο shell

Κατά αντιστοιχία παρακάτω έχουν καταγραφεί και οι παραμορφώσεις ολόκληρου τους σκάφους.



Εικόνα 96: Συνολικές παραμορφώσεις σκάφους

7.8 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Αρχικά να αναφέρουμε ότι βάση του νηογνώμονα οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις είναι:

- Combined local bending stress or girder stress or longitudinal stress

$$\sigma = 220f1 \rightarrow 132 \frac{N}{mm^2} \text{ (plates)}$$

$$\sigma = 220f1 \rightarrow 105.6 \frac{N}{mm^2} \text{ (profiles)}$$

- Nominal shear stress

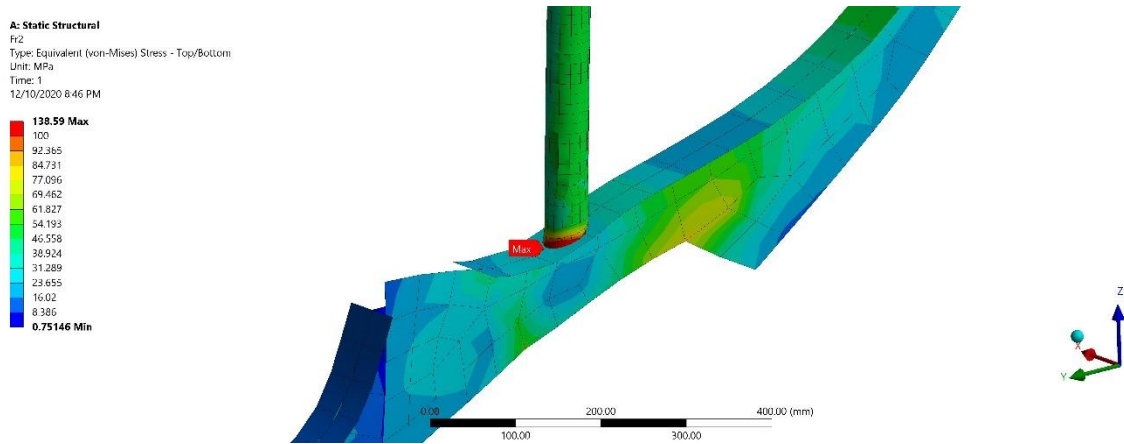
$$\tau = 90f1 \rightarrow 54 \frac{N}{mm^2} \text{ (plates)}$$

$$\tau = 90f1 \rightarrow 43.2 \frac{N}{mm^2} \text{ (profiles)}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παραπάνω τιμές θα αναλύσουμε τις φορτίσεις των νομέων. Σε όλες τις εικόνες των νομέων βλέπουμε μια κλίμακα η οποία περιέχει την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή. Έχουμε βάλει όριο τα 100 MPa, το οποίο μας δείχνει με κόκκινο όσες περιοχές υπερβαίνουν αυτό το όριο. Αυτό έχει γίνει για να έχουμε καλύτερη εικόνα της κατανομής των τάσεων σε ολόκληρο τον νομέα. Αναλύοντας τους νομείς από πρύμα προς τα πλώρα έχουμε:

- Fr 1 = ~84 MPa
- Fr 2 = ~138 MPa
- Fr 3 = ~99 MPa
- Fr 4 = ~190 MPa
- Fr 5 = ~95 MPa
- Fr 6 = ~116 MPa
- Fr 7 = ~160 MPa
- Fr 8 = ~425 MPa
- Fr 9 = ~178 MPa
- Fr 10 = ~310 MPa
- Fr 11 = ~323 MPa
- Fr 12 = ~175 MPa
- Fr 13 = ~92 MPa
- Fr 14 = ~108 MPa
- Fr 15 = ~92 MPa
- Fr 16 = ~80 MPa

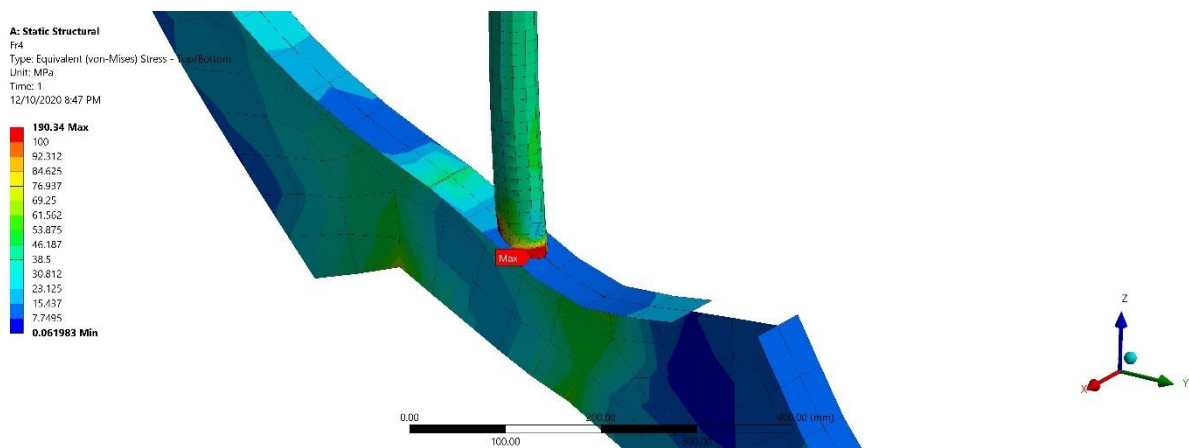
Βλέπουμε πως μερικοί από τους νομείς υπερβαίνουν την επιτρεπόμενη τιμή που δίνει ο νηογνώμονας, άρα πρέπει να γίνει λεπτομερής τοπικός έλεγχος. Θα ξεκινήσουμε με τον νομέα 2 (Fr 2) όπου βλέπουμε την μέγιστη τάση στα 138 MPa. Παρακάτω βλέπουμε μια τρισδιάστατη εικόνα από την συγκεκριμένη περιοχή.



Εικόνα 97: Λεπτομέρεια στον Fr 2

Όπως βλέπουμε η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην περιοχή του pillar και συγκεκριμένα στο κάτω μέρος όπου και συνδέετε με τον νομέα. Σε αυτή την περιοχή περιμένουμε να έχουμε αυξημένες τάσεις λόγω κυρίως της αλλαγής της γεωμετρίας. Η μέγιστη τάση περιορίζεται στην περιοχή 1 στοιχείου (element) οπότε και δεν μας ανησυχεί.

Συνεχίζουμε με τον νομέα 4 (Fr 4) όπου βλέπουμε μια μεγαλύτερη τάση. Ακολουθώντας τη ίδια διαδικασία παρακάτω βλέπουμε μια τρισδιάστατη εικόνα της περιοχής.

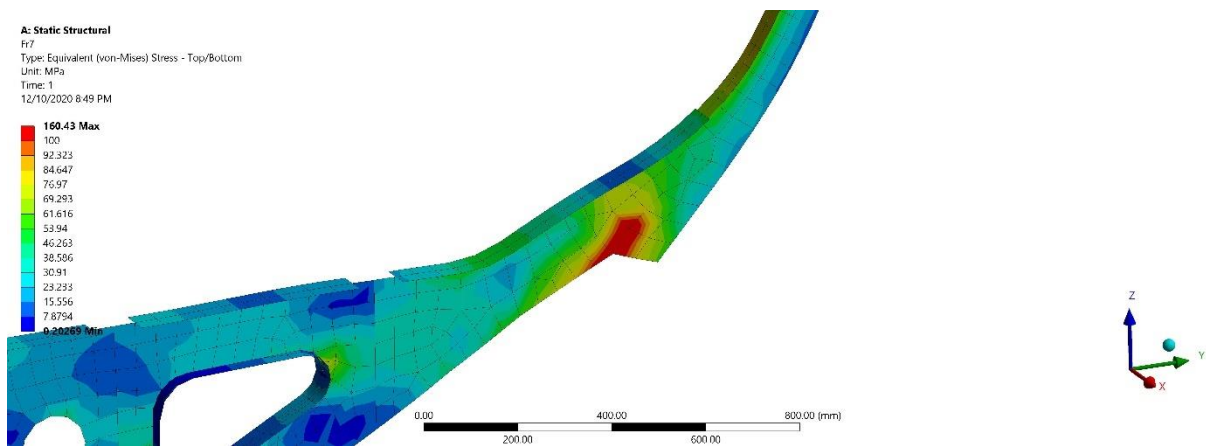


Εικόνα 98: Λεπτομέρεια στον Fr 4

Βλέπουμε ακριβώς την ίδια περίπτωση και σε αυτόν τον νομέα. Να υπενθυμίσουμε πως σε αυτούς τους 2 νομείς βλέπουμε αυξημένες τάσεις διότι έχουμε ορίσει και το βάρος των

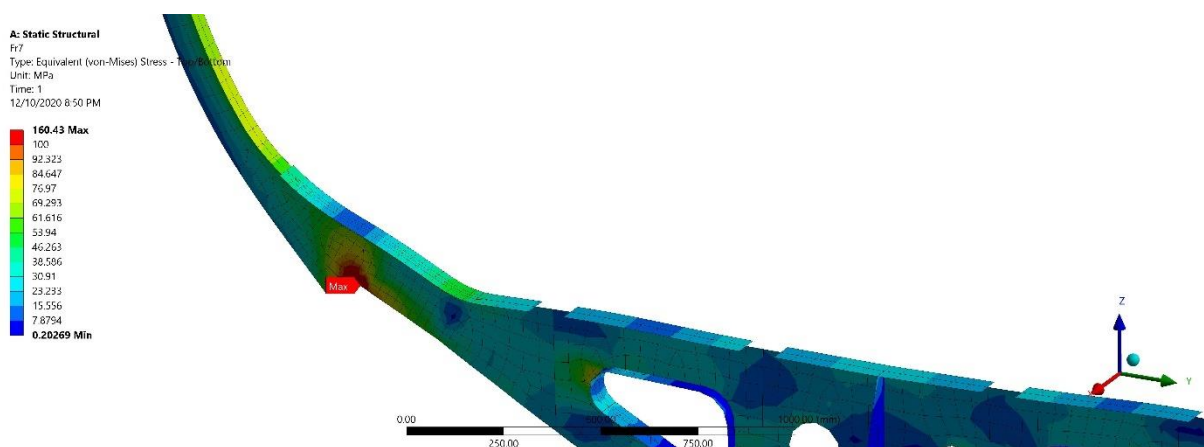
κυρίων μηχανών. Οι κύριες μηχανές πατάνε πολύ κοντά στους Fr 2 και Fr 4 όποτε είναι λογικό να έχουμε αυξημένες τάσεις κοντά σε αυτές τις περιοχές.

Συνεχίζουμε εξετάζοντας τον νομέα 7 (Fr 7) όπου έχουμε μέγιστη τάση της τάξης του 160 MPa. Από τον νομέα 6 – 12 έχουμε κάνει πυκνότερο πλέγμα στις περιοχές υψηλών τάσεων. Παρακάτω βλέπουμε την περιοχή με το coarse mesh όπου φαίνεται η κόκκινη περιοχή με τάσεις πάνω από 100 MPa. Η περιοχή αυτή φαίνεται να έχει μια κατεύθυνση κατακόρυφη ξεκινώντας από την εσωτερική ακμή του chine.



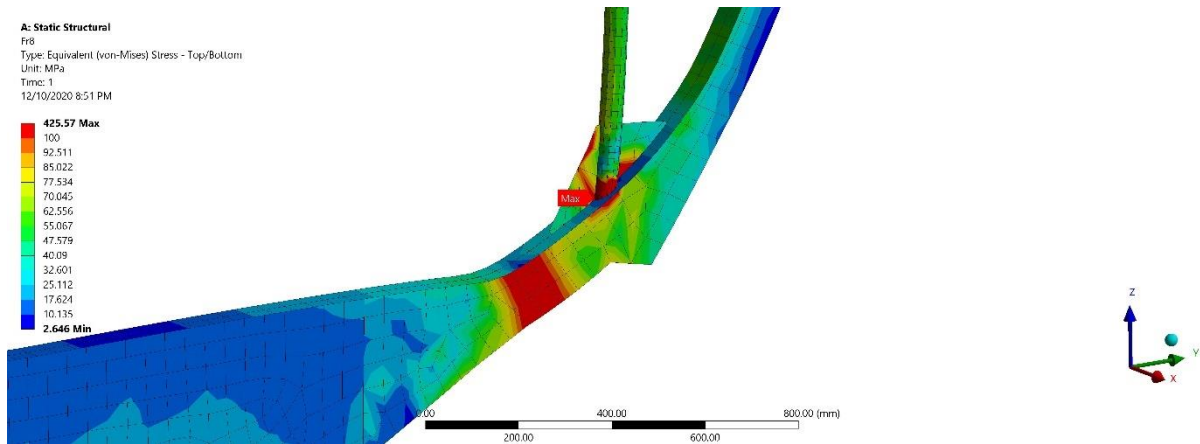
Εικόνα 99: Λεπτομέρεια στον Fr 7(κανονικό πλέγμα)

Κοιτάζοντας κάποιος αυτή την περιοχή μοιάζει μεγάλη σε σχέση με το πλάτος του νομέα. Η πραγματική όμως περιοχή των αυξημένων τάσεων φαίνεται πιο καθαρά στην παρακάτω εικόνα. Κάνοντας πυκνότερο πλέγμα βλέπουμε πως η περιοχή των υψηλών τάσεων περιορίζεται στην εσωτερική ακμή του chine και αποκτά μια κυκλική μορφή γύρω από την συγκεκριμένη ακμή. Επίσης παρατηρούμε πως η έκταση της περιοχής είναι ξανά στο επίπεδο ενός στοιχείου όποτε μπορούμε να το παραλείψουμε.

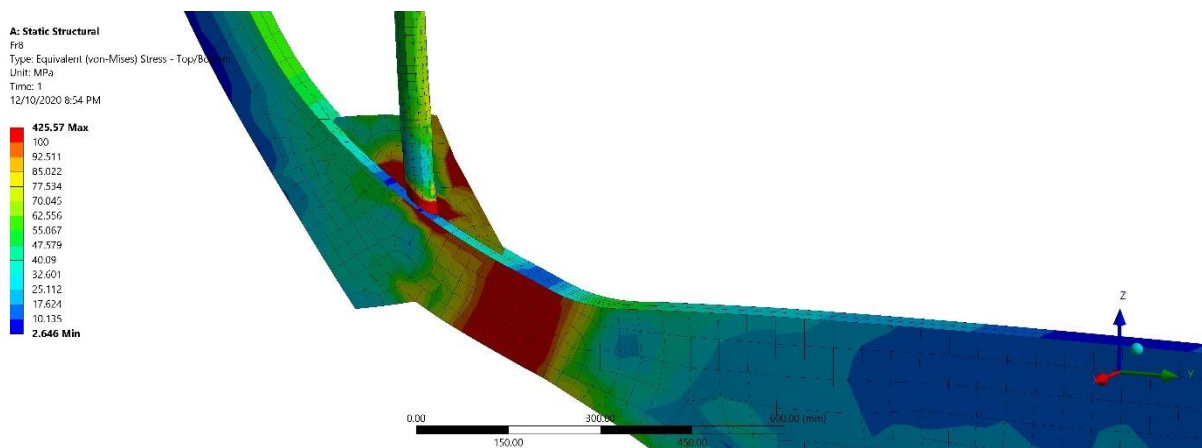


Εικόνα 100: Λεπτομέρεια στον Fr 7(πυκνό πλέγμα)

Στον νομέα 8 (Fr 8) βλέπουμε τη δυσμενέστερη κατάσταση του σκάφους. Έχουμε περιοχή υψηλών τάσεων σε αρκετά μεγάλη περιοχή. Εξετάζουμε λεπτομερώς την περιοχή και έχουμε αρχικά την κατάσταση σε μεγέθυνση.

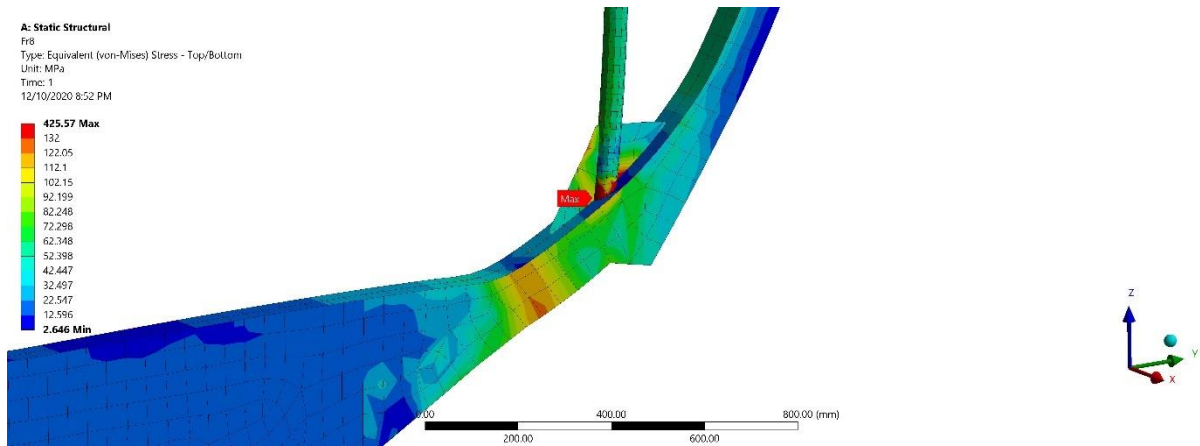


Εικόνα 101: Λεπτομέρεια στον Fr 8(κανονικό πλέγμα)

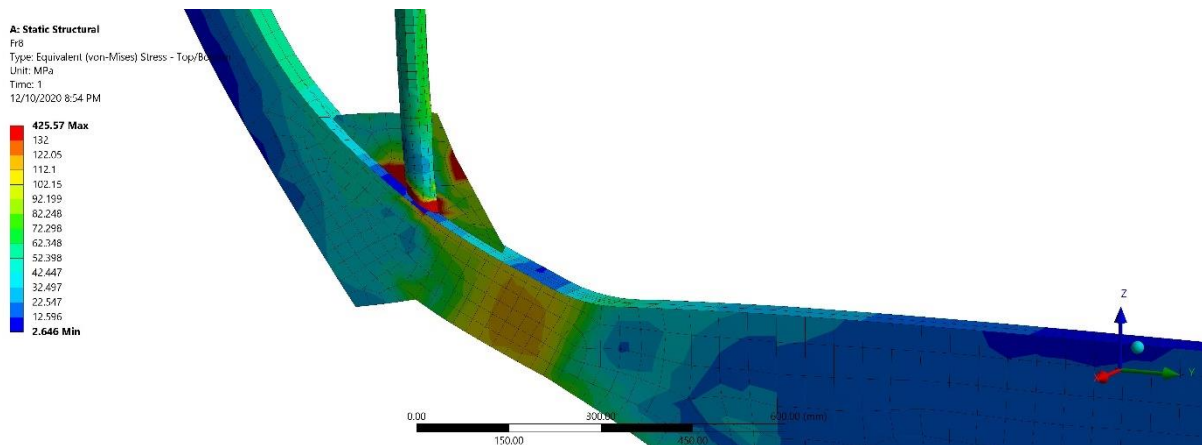


Εικόνα 102: Λεπτομέρεια στον Fr 8(πυκνό πλέγμα)

Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε πως όσο το πλέγμα γίνεται πιο πυκνό η περιοχή παραμένει με αυξημένες τάσεις. Αυτό δείχνει πως εκεί έχουμε μια πραγματική περιοχή υψηλών τάσεων. Στη συνέχεια βάζουμε το πραγματικό επιτρεπόμενο όριο που έχουμε υπολογίσει από τον νηογνώμονα και έχουμε τις παρακάτω καταστάσεις.



Εικόνα 103: Λεπτομέρεια στον Fr 8(κανονικό πλέγμα) με όριο τάσεων τα 132MPa



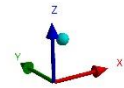
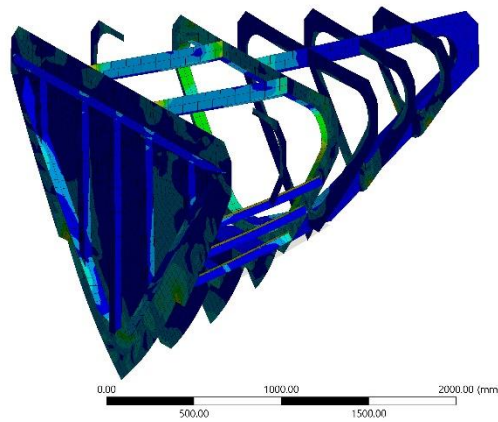
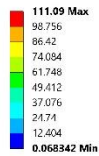
Εικόνα 104: Λεπτομέρεια στον Fr 8(πυκνό πλέγμα) με όριο τάσεων τα 132MPa

Ορίζοντας το πραγματικό όριο των τάσεων βλέπουμε τις κόκκινες περιοχές να συγκεντρώνονται στις ακμές των μπρακέτων. Η περιοχή λοιπόν του νομέα είναι εντός ορίων οπότε δεν μας ανησυχεί. Όσον αφορά τις τάσεις στα μπρακέτα βλέπουμε πως η έκταση είναι στο επίπεδο ενός στοιχείου (element) άρα μπορούμε να τις παραλείψουμε.

Κατά αντίστοιχη μεθοδολογία οι νομείς 9,10,11,12 θεωρούνται εντός ορίων. Παρατηρώντας τους νομείς βλέπουμε πως οι τάσεις είναι αρκετά χαμηλές συνολικά σε κάθε νομέα. Λύνοντας το κομμάτι των αυξημένων τάσεων στην περιοχή του chine με μια τροποποίηση στην μορφή των νομέων και εφαρμόζοντας μια επαναληπτική διαδικασία εντός του ANSYS μπορούμε να μειώσουμε ακόμα και το πάχος των νομέων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να καταλήξουμε σε χαμηλότερες τιμές πάχους από αυτές που έχουμε υπολογίσει με τον νηογνώμονα, πράγμα το οποίο θα μειώσει αρκετά το συνολικό βάρος του σκάφους. Το βάρος είναι από τα σημαντικότερα θέματα που αντιμετωπίζει κάποιος στη σχεδίαση μικρών σκαφών.

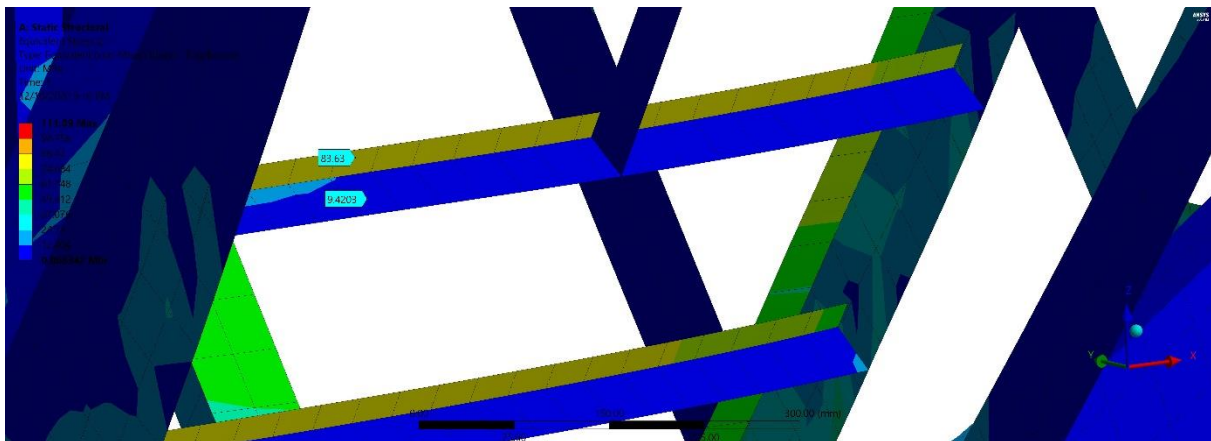
Παρακάτω θα εξετάσουμε μια περιοχή της πλώρης.

A: Static Structural
Equivalent Stress Z
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
12/10/2020 9:15 PM



Εικόνα 105: Λεπτομέρεια περιοχής στην πλώρη

Επιλέξαμε την παραπάνω εικόνα για να εξετάσουμε ένα διάμηκες δευτερεύον ενισχυτικό πλευράς στην περιοχή όπου περιμένουμε υψηλές τάσεις λόγω της σφυρόκρουσης. Όπως θα δούμε στην παρακάτω εικόνα το T εμφανίζει στον κορμό του πολύ χαμηλή τάση ενώ στη φλάντζα βλέπουμε αρκετά υψηλότερη. Αντίστοιχη διαδικασία θα κάνουμε και για τα διαμήκη ενισχυτικά του πυθμένα στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 106: Τάσεις διαμήκους ενισχυτικού(δευτερεύον)

A: Static Structural

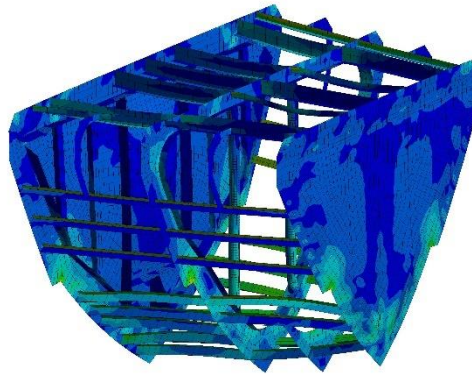
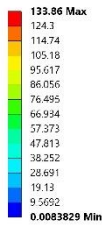
Fr 13-15

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

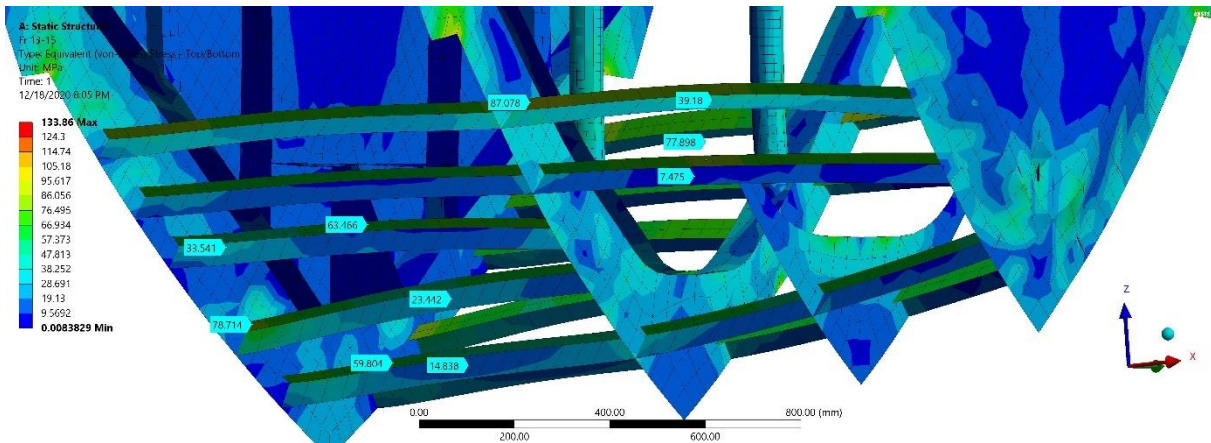
Unit: MPa

Time: 1

12/19/2020 8:03 PM

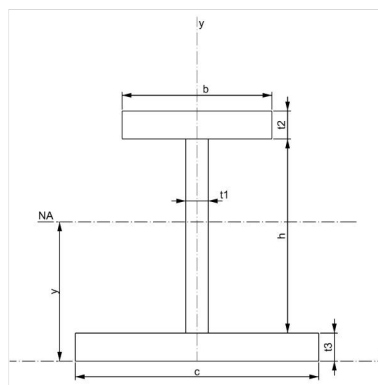


Εικόνα 107: Λεπτομέρεια μεταξύ φρακτών 13-15



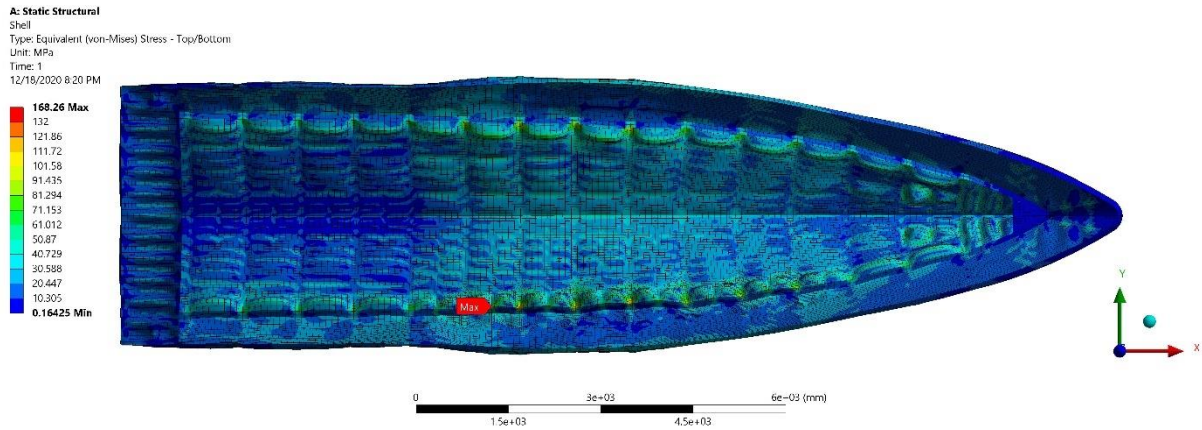
Εικόνα 108: Τάσεις διαμήκων ενισχυτικών μεταξύ φρακτών 13-15

Η φλάντζα βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα, οπότε και περιμένουμε τις μεγαλύτερες τιμές σε αυτή τη περιοχή του ενισχυτικού. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε ένα διάμηκες ενισχυτικό όπου έχουμε $c * t3 = \text{συνεργαζόμενο έλασμα}$ (έλασμα πυθμένα ή πλευράς στις παραπάνω περιπτώσεις), $t1 * h = \text{κορμός ενισχυτικού}$ και $b * t2 = \text{φλάντζα ενισχυτικού}$. Αναφέρουμε πως είμαστε και σε αυτή την περιοχή εντός ορίων του νηογνώμονα δηλαδή κάτω από 105.6 MPa για τα profiles.



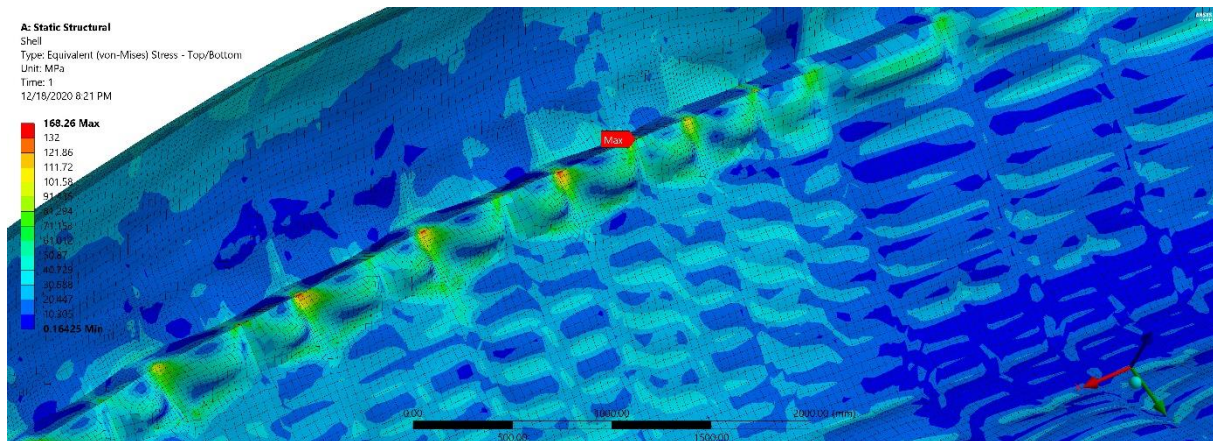
Εικόνα 109: Δευτερεύον ενισχυτικό

Όσον αφορά τις τάσεις στα ελάσματα το σκάφους παρατηρούμε πως έχουμε στην κλίμακα τιμή άνω του ορίου του νηογνώμονα. Για αυτό τον λόγο θα εξετάσουμε τις συγκεκριμένες περιοχές. Από ότι βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα οι αυξημένες τάσεις εμφανίζονται στην περιοχή του chine στην πλευρά που έχουμε πυκνότερο πλέγμα.



Εικόνα 110: Κάτοψη σκάφους με τάσεις von-Mises στα ελάσματα

Αυτό συμβαίνει διότι όπου έχουμε πυκνότερο πλέγμα βλέπουμε την περιοχή των τάσεων να μικραίνει αλλά οι μέγιστες τάσεις αυξάνονται. Αυτό καθώς το πλέγμα γίνεται πυκνότερο τείνει να απειρίζεται σε ένα σημείο. Όπως θα δούμε και στην παρακάτω εικόνα η μέγιστη τάση εμψανίζεται στον κόμβο ενός στοιχείου.



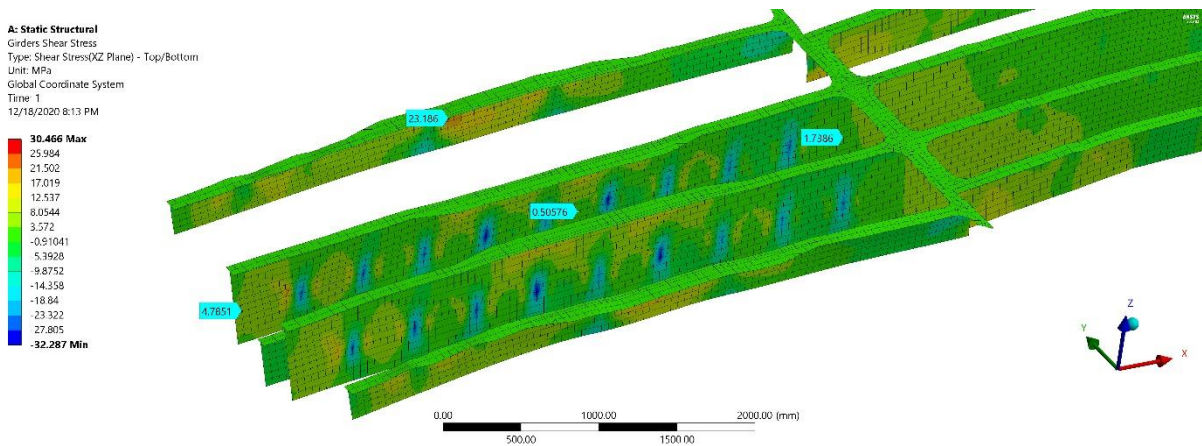
Εικόνα 111: Λεπτομέρεια μέγιστης τάσης ελασμάτων

Περιοχές τέτοιου τύπου θεωρούνται σημεία συγκέντρωσης τάσεων και εφόσον είναι μικρές περιοχές (έκταση τάσεις μικρότερο ενός στοιχείου) μπορούμε να τα αμελήσουμε. Σε περίπτωση όπου οι τάσεις εκτείνονται σε μεγαλύτερη περιοχή μπορούμε να βρούμε τον μέσο όρο σε ακτίνα 2-3 στοιχείων γύρω από το σημείο συγκέντρωσης των μέγιστων τάσεων.

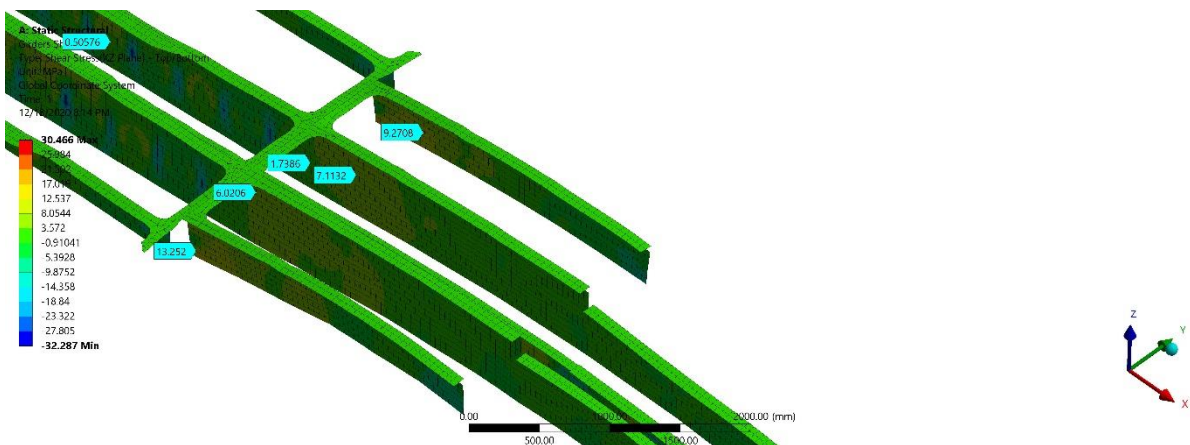
Τέλος θα κάνουμε μια αναφορά στις διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται στα κύρια διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους. Οι τιμές είναι πολύ μικρές καθ' όλο το μήκος του σκάφους. Παρακάτω θα δούμε μια γενική εικόνα των κύριων ενισχυτικών και στη συνέχεια τις aft, mid και fore περιοχές αναλυτικότερα με κάποιες τυχαίες τιμές σε διάφορα σημεία.



Εικόνα 112: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα



Εικόνα 113: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα (πρυμναίο τμήμα)



Εικόνα 114: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα (μέσο τμήμα)



Εικόνα 115: Διατμητικές τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του πυθμένα (πλωραίο τμήμα)

Οι διατμητικές τάσεις δεν χρήζουν περαιτέρω εξέτασης.

8. Συμπεράσματα

Όπως βλέπουμε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων η κατάσταση που βρίσκεται το σκάφος μετά την εφαρμογή των πιέσεων είναι αρκετά καλή. Παρακάτω θα αναφέρουμε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μετά από την μελέτη.

Ειδικά συμπεράσματα για το συγκεκριμένο σκάφος.

1. Έχοντας υπολογίσει βάση νηογνώμονα πάχη ελασμάτων με τιμές πυθμένα=6,27mm και πλευράς=4.02mm πρέπει τα πραγματικά πάχη να στρογγυλοποιηθούν στα 7mm και 5mm αντιστοίχως. Από την μελέτη των πεπερασμένων στοιχείων βλέπουμε πως οι τάσεις στα ελάσματα της πλευράς και του πυθμένα παρόλο που έχουν τις θεωρητικές τιμές, είναι αρκετά χαμηλές. Το πάχος των ελασμάτων συγκεκριμένα σε αυτές τις 2 περιοχές θα μπορούσε να στρογγυλοποιηθεί προς τα κάτω με μεγάλο όφελος στο τελικό βάρος του σκάφους. Το βάρος είναι ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη τα οποία πρέπει να καταγράφονται από την αρχή μέχρι το τέλος της σχεδίασης.
2. Οι τάσεις στα κύρια ενισχυτικά του σκάφους είναι εντός ορίων του νηογνώμονα με μέγιστη τιμή τα 98MPa στο μεσαίο τμήμα του σκάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούμε να μειώσουμε τα κύρια ενισχυτικά όσον αφορά το section modulus. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους συνδυασμούς μορφής-πάχους. Στα συγκεκριμένα είδη σκαφών, τα οποία είναι μικρά και έχουν περιορισμένους εσωτερικούς χώρους, αξίζει να βρεθεί ένα ενισχυτικό το οποίο θα αφήνει την περισσότερη ελευθερία όσον αφορά την εσωτερική διάταξη του σκάφους (καθαρά ύψη κλπ).
3. Οι τάσεις στα δευτερεύοντα ενισχυτικά του σκάφους είναι εντός των ορίων του νηογνώμονα. Ειδικότερα στα ενισχυτικά του πυθμένα οι υπολογισμοί του νηογνώμονα έχουν γίνει θεωρώντας πως σε κάθε ενισχυτικό υπάρχει και μπρακέτο πλώρα πρύμα του κάθε νομέα καθ' όλο το μήκος του σκάφους. Στο τρισδιάστατο μοντέλο λόγω της δυσκολίας μοντελοποίησης των μπρακέτων, έχουν παραληφθεί. Παρόλο που δεν υπάρχουν τα μπρακέτα οι τάσεις είναι αρκετά χαμηλές όποτε θεωρητικά όλα τα μπρακέτα θα μπορούσαν να λείπουν από την κατασκευή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν αρκετά οι συγκολλήσεις στο κομμάτι του πυθμένα κρατώντας στο ελάχιστο δυνατό τις θερμικές κατεργασίες. Η αφαίρεση των μπρακέτων από την κατασκευή μειώνει επίσης κατά πολύ το εργατικό κόστος κατά την διαδικασία της κατασκευής.
4. Οι φρακτές του σκάφους εμφανίζουν σε γενικό επίπεδο χαμηλές τάσεις. Σε αρκετές από τις φρακτές όπου οι τάσεις δεν αγγίζουν το όριο του νηογνώμονα θα μπορούσαν τα πάχη από 6mm να μειωθούν σε 5mm.

Γενικά συμπεράσματα για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μελέτη των πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει την δυνατότητα να βελτιστοποιήσουμε την κατασκευή μας ειδικά εάν εφαρμόσουμε κάποια επαναληπτική διαδικασία. Σε αντίθεση με τους υπολογισμούς του νηογνώμονα μπορούμε να βρούμε τοπικές περιοχές όπου έχουμε αυξημένες τάσεις. Στην περίπτωση μας, μια τέτοια περιοχή είναι ξεκάθαρα η περιοχή του chine όπου έχουμε έντονη αλλαγή της γεωμετρίας. Γενικά η διαδικασία της μελέτης με FEA απαιτεί αρκετό χρόνο διότι προαπαιτεί ότι θα έχουν ήδη γίνει οι υπολογισμοί με βάση τον νηογνώμονα και στη συνέχεια θα γίνει η μοντελοποίηση και η απαραίτητη προετοιμασία των προγραμμάτων για την ανάλυση της κατασκευής.

9. Προτάσεις

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα τα οποία καταλήξαμε, οι προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση της διπλωματικής εργασίας καταγράφονται παρακάτω.

1. Από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίστηκαν σημεία του σκάφους στα οποία υπάρχει συγκέντρωση των τάσεων. Η περιοχές αυτές βρίσκονται στο chine. Σε συνδυασμό με τις χαμηλές τάσεις που αναπτύσσονται στα frames μια τροποποίηση που θα μπορούσε να γίνει είναι η αύξηση της μάζας του frame και η μείωση του πάχους των frames.
2. Τα ελάσματα του πυθμένα και της πλευράς εμφανίζουν αρκετά χαμηλές τάσεις. Η μείωση του πάχους και η καταγραφή των αποτελεσμάτων θα ήταν κάτι αρκετά ενδιαφέρον να αναλυθεί καθώς με αυτόν τον τρόπο μπορεί η κατασκευή να αντέχει τις πιέσεις με διαφορετικά πάχη από αυτά που έχουν υπολογιστεί από τον νηογνώμονα. Επίσης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό πάχος σε συγκεκριμένες περιοχές του πυθμένα (πχ μείωση του πάχους στην περιοχή του μηχανοστασίου).
3. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης η απώλεια των μπρακέτων στα διαμήκη δευτερεύοντα ενισχυτικά του πυθμένα δεν θεωρούνται απαραίτητα. Αυτό μπορεί να διασταυρωθεί εάν μοντελοποιηθούν τα μπρακέτα και αναλύοντας τα αποτελέσματα των τάσεων στην περιοχή των ενισχυτικών. Εάν ισχύει κάτι τέτοιο, τότε είναι άλλη μια πιθανή διαφοροποίηση σε σχέση με τους υπολογισμούς του νηογνώμονα.

10. Βιβλιογραφία

- [1] *HIGH SPEED ALUMINUM VESSELS DESIGN GUIDE*. (2012). SHIP STRUCTURE COMMITTEE
- [2] LOGAN, D.L. (2007). *A FIRST COURSE IN THE FINITE ELEMENT METHOD: FOURTH EDITION*. TORONTO, THOMSON
- [3] R.G. ALLEN AND R.R. JONES. (1978). *A SIMPLIFIED METHOD FOR DETERMINING STRUCTURAL DESIGN-LIMIT PRESSURES ON HIGH PERFORMANCE MARINE VEHICLES*. BETHESDA, MD, DAVID W. TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER
- [4] DANIEL SAVITSKY AND JOSEPH G KOELBEL. (1993). *SEAKEEPING OF HARD CHINE PLANING HULLS*. N.J. SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS
- [5] DNVGL. (2018). RULES FOR CLASSIFICATION, HIGH SPEED AND LIGHT CRAFT, PART 3.
- [6] DNVGL. (2019). RULES FOR CLASSIFICATION, SHIPS, PART 2.
- [7] RAZOLA M. , ROSEN A. , GARME K. (2014). *ALLEN AND JONES REVISITED*. STOCKHOLM, OCEAN ENGINEERING
- [8] RAYMOND G. ALLEN AND ROBERT R. JONES. (1977). *CONSIDERATIONS ON THE STRUCTURAL DESIGN OF HIGH PERFORMANCE MARINE VEHICLES*. NEW YORK, SNAME
- [9] JOSEPH G. KOELBEL. (1995). *COMMENTS ON THE STRUCTURAL DESIGN OF HIGH SPEED CRAFT*. MARINE TECHNOLOGY
- [10] NANDAR HLAING. (2019). *COMPARATIVE STUDY OF REQUIREMENTS FOR HIGH SPEED CRAFTS*. UNIVERSITY OF ROSTOCK
- [11] LAWRENCE J. DOCTORS. (1985). *HYDRODYNAMICS OF HIGH-SPEED SMALL CRAFT*. THE UNIVERSITY OF MICHIGAN
- [12] WAGNER HERBERT. (1948). *PLANING OF WATERCRAFT*. WASHINGTON, NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS
- [13] ΛΟΥΚΑΚΗΣ Θ.Α. , ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ Γ.Ι. (1994). *ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΣΚΑΦΩΝ*. ΑΘΗΝΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
- [14] FERRANDO M. (2011). *MOTOR YACHT DESIGN*. GENOVA, UNIVERSITY OF GENOVA



- [15] ROSEN A. (2004). *LOADS AND RESPONSES FOR PLANING CRAFT IN WAVES*. STOCKHOLM, AERONAUTICAL AND VEHICLE ENGINEERING, DIVISION OF NAVAL SYSTEMS

- [16] GUSTAVSSON A. , FRITHIOF N. (2014). *EVALUATION OF CLASSIFICATION RULES FOR DESIGN LOADS AND STRUCTURE RESPONSES IN HIGH-SPEED CRAFTS*. STOCKHOLM, ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (KTH)

- [17] ANTONATOS A. (2012). *PARAMETRIC FE-MODELING OF HIGH-SPEED CRAFT STRUCTURES*. STOCKHOLM, ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (KTH)