



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής**

**Σχολή Μηχανικών**

**Τμήμα: Ναυπηγών Μηχανικών**

**Τίτλος Εργασίας**

**«Αντοχή πηδαλίου πλοίου με τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων  
Στοιχείων»**

***«Rudder strength calculation by using the Finite Element Method»***

**Συγγραφέας: Κωνσταντίνος Σ. Παπαγεωργίου**

**A.M.: 18393057**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αλέξανδρος Θεοδοουλίδης**

**Αθήνα, 2024**

(Κενή)



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

**Αντοχή πηδαλίου πλοίου με τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων  
Στοιχείων**

**Συγγραφέας**

Κωνσταντίνος Παπαγεωργίου (Α.Μ.: 18393057)

**Επιβλέπων**

Ονοματεπώνυμο,

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

**Ημερομηνία εξέτασης**

25/04/2024

**Εξεταστική Επιτροπή**

Ονοματεπώνυμο,

Δραγοτογιάννης Δημήτριος,  
Εντ. Διδάσκων

Ονοματεπώνυμο,

Θεοδουλίδης Αλέξανδρος,  
Επίκουρος Καθηγητής  
ΠΑ.Δ.Α.

Ονοματεπώνυμο,

Τίγκας Ιωάννης, Επίκουρος  
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παπαγεωργίου Κωνσταντίνος του Σωκράτη, με αριθμό μητρώου 18393057 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Κωνσταντίνος Παπαγεωργίου

(κενή)

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν αρωγοί στην προσπάθεια μου να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, οποίοι με την εμπειρία και την γνώση τους με καθοδήγησαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να αποδώσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Θεοδουλίδη Αλέξανδρο, καθώς με ενέπνευσε να καταπιαστώ με το παρόν θέμα. Χωρίς την πολύτιμη εμπειρία και την καθοδήγηση του δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου οικογένεια, όχι μόνο για την στήριξη που μου πρόσφεραν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αλλά για την ακατάπαυστη στήριξη που μου προσφέραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αντοχή πηδαλίου υπάρχοντος πλοίου, με τη βοήθεια της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Αρχικά, παρουσιάζεται μια εκτενής ιστορική αναδρομή αναφερόμενη στην πηδαλιουχία των πλοίων και πως αυτή εξελίχθηκε με το πέρασμα των χρόνων. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην εξέλιξη της Διεθνούς Ένωσης Νηογνομόνων (*IACS*) και στους κοινούς κανονισμούς που έχει αναπτύξει. Τέλος, παρουσιάζεται συνοπτικά η διαχρονική εξέλιξη της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Ακόμη, γίνεται μια εκτενής εισαγωγή στην υδροδυναμική θεωρία που βασίζονται τα πηδάλια, καθώς επίσης στην βασική ονοματολογία και τα είδη των πηδαλίων. Ακόμη, περιγράφεται συνοπτικά το τεύχος *S10* των κοινών κανονισμών της Διεθνούς Ένωσης Νηογνομόνων, καθώς αποτελεί σημαντικό πυλώνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στα εδάφια υπολογισμού δυνάμεων και ροπών επί του πηδαλίου και διαστασιολόγησης του πηδαλίου.

Στο πρακτικό τμήμα της εργασίας γίνεται κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου, με δεδομένα τα κατασκευαστικά σχέδια. Έπειτα, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται ο υπολογισμός της αντοχής. Τέλος, χρησιμοποιώντας τον κοινό κανονισμό του *IACS*, πραγματοποιείται εκ νέου διαστασιολόγηση και δημιουργία βελτιστοποιημένου ως προς το βάρος μοντέλου, με σκοπό τον υπολογισμό της αντοχής του. Κλείνοντας, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα.

Η δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων γίνεται με την βοήθεια των προγραμμάτων *SolidWorks* και *Rhinoceros*. Η επίλυση του προβλήματος της αντοχής με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται χρήση του προγράμματος *SolidWorks* και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το *SolidWorks Simulation*.

Λέξεις κλειδιά: Πηδάλιο, Αντοχή, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, ΜΠΣ, Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων, Κοινός κανονισμός *IACS*, Τρισδιάστατη Σχεδίαση, Βελτιστοποίηση.

## *Abstract*

*The present diploma thesis investigates the rudder strength of an existing ship by using the Finite Element Method.*

*Firstly, an extensive historical review will be presented, referring to the steering of ships and how it has evolved over the years. In addition, a reference will be made to the development of the International Association of Classification Societies (IACS) and the unified requirements that they have developed. Finally, the historical development of the finite element method is briefly presented.*

*The theoretical background of this thesis includes a comprehensive introduction to the hydrodynamic theory on which rudders are based. The basic nomenclature and types of rudders are also described. The S10 section of the IACS Common Regulations is also briefly described, as it is an important pillar of this thesis. Special attention is given to the sections of force and torque and the dimensioning of the rudder.*

*In the practical part of the study, a 3D model is constructed based on the construction drawings. The strength is then calculated by using the finite element method. Finally, by using the IACS Unified Requirements, a redesign is carried out and a weight-optimised model is created to calculate the strength. Finally, a comparison of the results for each of the two models will be made.*

*The 3D models will be created by using Rhinoceros and SolidWorks. The strength calculation is also performed by using SolidWorks and specifically the Simulation plug-in.*

*Keywords: Rudder, Strength, Finite Element Method, International Association of Classification Societies (IACS), Unified Requirements, 3D design, Optimisation.*



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	5
Περίληψη .....	6
<i>Abstract</i> .....	7
Ευρετήριο εικόνων.....	10
1. Εισαγωγή .....	14
2. Ιστορική αναδρομή .....	15
2.1. Διαχρονική εξέλιξη των πηδαλίων.....	15
2.2. Σύγχρονα πηδάλια .....	16
3. Αρχές λειτουργίας του πηδαλίου .....	19
3.1. Βασική ονοματολογία στοιχείων πηδαλίου .....	19
3.2. Δυνάμεις πηδαλίου και υδροδυναμικοί συντελεστές.....	20
3.3. Τύποι πηδαλίων και θέση τοποθέτησης.....	22
4. Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων ( <i>IACS</i> ) και <i>Unified Requirements (UR)</i> .....	26
5. Το πρότυπο <i>UR S 10 (Rudders, Sole pieces and Rudder horns)</i> .....	27
5.1. Δύναμη πηδαλίου .....	27
5.2. Ροπή πηδαλίου .....	28
5.3. Διαστασιολόγηση πηδαλίου.....	29
6. Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων .....	32
7. Περιγραφή του υπό μελέτη πηδαλίου.....	35
7.1. Χαρακτηριστικά πατρικού πλοίου .....	35
7.2. Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πηδαλίου .....	35
8. Επίλυση με την μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων .....	41
8.1. Γεωμετρική μοντελοποίηση .....	41
8.2. Υπολογισμός φορτίσεων πηδαλίου κατά το πρότυπο <i>UR S10</i> .....	51
8.3. Υπολογισμός αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	53
8.4. Αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων .....	58
9. Βελτιστοποίηση κατασκευής ως προς το βάρος.....	70
9.1. Διαστασιολόγηση πηδαλίου με βάση το πρότυπο <i>UR S10</i> .....	70
9.2. Κατασκευή βελτιστοποιημένου μοντέλου .....	71
9.3. Υπολογισμός βάρους αρχικού και βελτιστοποιημένου πηδαλίου .....	72
9.4. Υπολογισμός αντοχής βελτιστοποιημένου πηδαλίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων .....	73
9.5. Αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για το βελτιστοποιημένο μοντέλο.....	75

10. Έλεγχος αντοχής του πρωτοτύπου μοντέλου υποβαλλόμενο αποκλειστικά σε υδροστατική πίεση.....	87
11. Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	90
12. Συμπεράσματα.....	91
13. Προτάσεις.....	92
14. Παράρτημα.....	93
15. Βιβλιογραφικές αναφορές.....	97

## Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Φοινικικό πολεμικό πλοίο με μέσο πρόωσης και επίτευξης ελιγμών τα κουπιά. (πηγή: <a href="https://courses.lumenlearning.com/suny-hccc-worldhistory/chapter/the-phoenicians/">https://courses.lumenlearning.com/suny-hccc-worldhistory/chapter/the-phoenicians/</a> ) .....	15
Εικόνα 2: Πρώιμη μορφή πηδαλίου τοποθετημένο στην πρύμνη ενός Αιγυπτιακού πλοίου. (πηγή: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Steering_oar">https://en.wikipedia.org/wiki/Steering_oar</a> ) .....	15
Εικόνα 3: Πλοίο τύπου cog. (πηγή: <a href="https://about-history.com/the-medieval-cog-ship-and-its-use-in-history/">https://about-history.com/the-medieval-cog-ship-and-its-use-in-history/</a> ).....	16
Εικόνα 4: Ενδεικτικές υδροτομές NACA 00. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	17
Εικόνα 5: Ενδεικτικές υδροτομές της σειράς HSVA. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	17
Εικόνα 6: Ενδεικτικές υδροτομές της σειράς IFS. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	18
Εικόνα 7: Fishtail and wedge-tail profiles. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	18
Εικόνα 8: Περιγραφή διαστάσεων πηδαλίου. (πηγή: <a href="https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up">https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up</a> ) .....	19
Εικόνα 9: Βασική ονοματολογία χαρακτηριστικών οριζόντιας διαμήκους τομής υδροτομής. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2016.1178205">https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2016.1178205</a> ).....	20
Εικόνα 10: Ονοματολογία δυνάμεων επί της υδροτομής. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2016.1178205">https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2016.1178205</a> ) .....	20
Εικόνα 11: Επίδραση ροής από την έλικα στην ροή επί του πηδαλίου. (πηγή: <a href="https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up">https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up</a> ) .....	21
Εικόνα 12: Πειραματικά αποτελέσματα για τον $C_L$ της γωνίας πρόσπτωσης (NACA 0020 και $Re=2.9e5$ ). (πηγή: <a href="https://www.researchgate.net/publication/305044784_The_airfoil_thickness_effects_on_wavy_leading_edge_phenomena_at_low_Reynolds_number_regime">https://www.researchgate.net/publication/305044784_The_airfoil_thickness_effects_on_wavy_leading_edge_phenomena_at_low_Reynolds_number_regime</a> ) .....	22
Εικόνα 13: Επίδραση του βυθίσματος μέσου προφίλ στη δύναμη του πηδαλίου κατά <i>Shiba</i> . (πηγή: <a href="https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up">https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up</a> ) .....	23
Εικόνα 14: Επίδραση του λόγου επιμήκους στον συντελεστή άνωσης. (πηγή: <a href="https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up">https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up</a> ) .....	24
Εικόνα 15: Μη ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	24
Εικόνα 16: Μερικώς ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	24
Εικόνα 17: Μερικώς ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο. (πηγή: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true">https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true</a> ) .....	25

Εικόνα 18: Σύγκριση μεγέθους παγκοσμίου στόλου σε σχέση με τον στόλο του IACS. (πηγή: <a href="https://iacs.org.uk/about-us/annual-review">https://iacs.org.uk/about-us/annual-review</a> ).....	26
Εικόνα 19: Διαστασιολόγηση πηδαλίου για εφαρμογή κανονισμού <i>UR S 10</i> . (πηγή: <a href="https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf">https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf</a> ).....	27
Εικόνα 20: Πίνακας επιλογής συντελεστή $K_2$ . (πηγή: <a href="https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf">https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf</a> ).....	28
Εικόνα 21: Επιλογή του συντελεστή $K_3$ . (πηγή: <a href="https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf">https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf</a> ).....	28
Εικόνα 22: Πηδάλιο semi-spade. (πηγή: <a href="https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf">https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf</a> ).....	29
Εικόνα 23: Προσδιορισμός παχών ενισχυτικών που συνδέονται στα χυτά και πλευρικού ελάσματος που τα περιβάλλει. (πηγή: <a href="https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf">https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf</a> ).....	31
Εικόνα 24: Γεωμετρία ενισχυμένης πλάκας (πάνω), δημιουργία πλέγματος (μέση), εύρεση τασικού πεδίου(κάτω).....	32
Εικόνα 25: Στοιχείο ράβδου. (πηγή: <a href="https://books.google.gr/books?id=YocoaH8lnx8C">https://books.google.gr/books?id=YocoaH8lnx8C</a> ).....	33
Εικόνα 26: Διακριτοποίηση γεωμετρίας. (πηγή: <a href="https://books.google.gr/books?id=YocoaH8lnx8C">https://books.google.gr/books?id=YocoaH8lnx8C</a> ).....	33
Εικόνα 27: <i>Center elevation</i> πηδαλίου.....	35
Εικόνα 28: Προφίλ υδροτομής πηδαλίου από το πέδιλο και κάτω.....	36
Εικόνα 29: Προφίλ υδροτομής πηδαλίου από το πέδιλο και άνω.....	36
Εικόνα 30: Διάφορες υδροτομές <i>NACA</i> της σειράς 00. (πηγή: <a href="https://www.researchgate.net/publication/316866136_Self-start_performance_evaluation_in_Darrieus-type_vertical_axis_wind_turbines_Methodology_and_computational_tool_applied_to_symmetrical_airfoils">https://www.researchgate.net/publication/316866136_Self-start_performance_evaluation_in_Darrieus-type_vertical_axis_wind_turbines_Methodology_and_computational_tool_applied_to_symmetrical_airfoils</a> ).....	36
Εικόνα 31: Προφίλ πηδαλίου <i>STB'D SIDE</i> .....	37
Εικόνα 32: Προφίλ πηδαλίου <i>PORT SIDE</i> .....	37
Εικόνα 33: Οριζόντιες διαμήκεις τομές πηδαλίου ( <i>Top plan-“E”plan</i> ).....	38
Εικόνα 34: : Οριζόντιες διαμήκεις τομές πηδαλίου ( <i>“F” plan-Bottom plan</i> ).....	38
Εικόνα 35: Κατακόρυφες εγκάρσιες τομές πηδαλίου.....	39
Εικόνα 36: Σχέδιο του <i>upper casting</i> .....	39
Εικόνα 37: Σχέδιο του <i>lower casting</i> .....	40
Εικόνα 38: Επιμέρους τμήματα πηδαλίου.....	41
Εικόνα 39: Ενισχυτικό “A”.....	42
Εικόνα 40: Ενισχυτικό “B”.....	42
Εικόνα 41: Ενισχυτικό “C”.....	43
Εικόνα 42: Ενισχυτικό “D”.....	43
Εικόνα 43: Ενισχυτικό “E”.....	44
Εικόνα 44: Ενισχυτικό “F”.....	44
Εικόνα 45: Ενισχυτικό “G”.....	45
Εικόνα 46: Ενισχυτικό “H”.....	45
Εικόνα 47: Ενισχυτικό “I”.....	46
Εικόνα 48: Ενισχυτικό “J”.....	46
Εικόνα 49: Μοντέλο <i>lower casting</i> (τριδιάστατη απεικόνιση).....	47

Εικόνα 50: Μοντέλο <i>lower casting</i> (πλάγια όψη) .....	47
Εικόνα 51: Μοντέλο <i>upper casting</i> (τρισδιάστατη απεικόνιση) .....	48
Εικόνα 52: Μοντέλο <i>upper casting</i> (πλάγια όψη) .....	48
Εικόνα 53: Τομή μοντέλου κελύφους- οριζοντίων διαφραγμάτων ως προς κεντρικό διάμηκες επίπεδο .....	49
Εικόνα 54: Μοντέλο πηδαλίου μαζί με τα χυτά τμήματα.....	49
Εικόνα 55: Μοντέλο πηδαλίου με εγκάρσια ενισχυτικά .....	50
Εικόνα 56: Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο πηδαλίου .....	50
Εικόνα 57: Πλάγια όψη μοντέλου (αριστερά) και τρισδιάστατη αναπαράσταση μοντέλου (δεξιά) .....	51
Εικόνα 58: Προβεβλημένη επιφάνεια πηδαλίου (αριστερά), προβεβλημένη επιφάνεια πηδαλίου και ποδοστήματος (μέση), χωρισμός επιφανειών κατά τον κανονισμό του <i>IACS (UR S 10)</i> δεξιά.....	52
Εικόνα 59: Δυνάμεις και ροπές πηδαλίου .....	53
Εικόνα 60: Πλέγμα μοντέλου (1).....	54
Εικόνα 61: Πλέγμα μοντέλου (2).....	54
Εικόνα 62: Πλέγμα μοντέλου (3).....	55
Εικόνα 63: Πλέγμα μοντέλου, τομή (4).....	55
Εικόνα 64: Επιλογή υλικών στο SolidWorks .....	56
Εικόνα 65: Συνθήκες στήριξης μοντέλου .....	56
Εικόνα 66: Δυνάμεις και ροπές πηδαλίου .....	57
Εικόνα 67: Ορισμός δύναμης πηδαλίου στο SolidWorks.....	57
Εικόνα 68: Ορθές τάσεις $\sigma_x$ .....	58
Εικόνα 69: Ορθές τάσεις $\sigma_y$ .....	59
Εικόνα 70: Ορθές τάσεις $\sigma_z$ .....	60
Εικόνα 71: Διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$ .....	61
Εικόνα 72: Διατμητικές τάσεις $\tau_{xz}$ .....	62
Εικόνα 73: Διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ .....	63
Εικόνα 74: Κύριες τάσεις $\sigma_1$ .....	64
Εικόνα 75: κύριες τάσεις $\sigma_2$ .....	65
Εικόνα 76: Κύριες τάσεις $\sigma_3$ .....	66
Εικόνα 77: Τάσεις <i>Von Mises</i> (1) .....	67
Εικόνα 78: Τάσεις <i>Von Mises</i> , τομή (2) .....	67
Εικόνα 79: Πεδίο μετατοπίσεων .....	68
Εικόνα 80: Συντελεστής ασφαλείας κατασκευής .....	69
Εικόνα 81: Σύγκριση παχών, με μπλε φόντο τα πάχη που διαφέρουν .....	71
Εικόνα 82: Νέο βελτιστοποιημένο μοντέλο .....	71
Εικόνα 83: Υπολογισμός βάρους αρχικής και βελτιστοποιημένης κατασκευής.....	72
Εικόνα 84: Υπολογισμός όγκου αρχικού μοντέλου στο <i>Rhinoceros</i> .....	72
Εικόνα 85: Υπολογισμός όγκου βελτιστοποιημένου μοντέλου στο <i>Rhinoceros</i> .....	73
Εικόνα 86: Πλέγμα βελτιστοποιημένου μοντέλου .....	74
Εικόνα 87: Συνθήκες στήριξης και εξωτερική φόρτιση βελτιστοποιημένου μοντέλου .....	75
Εικόνα 88: Ορθές τάσεις $\sigma_x$ βελτιστοποιημένου μοντέλου.....	76
Εικόνα 89: Ορθές τάσεις $\sigma_y$ βελτιστοποιημένου μοντέλου (1).....	77
Εικόνα 90: Ορθές τάσεις $\sigma_y$ βελτιστοποιημένου μοντέλου (2).....	77
Εικόνα 91: Ορθές τάσεις $\sigma_z$ βελτιστοποιημένου μοντέλου (2).....	78

Εικόνα 92: Διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$ βελτιστοποιημένου μοντέλου.....	79
Εικόνα 93: Διατμητικές τάσεις $\tau_{xz}$ βελτιστοποιημένου μοντέλου.....	80
Εικόνα 94: Διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ βελτιστοποιημένου μοντέλου.....	81
Εικόνα 95: Κύριες τάσεις $\sigma_1$ βελτιστοποιημένης κατασκευής.....	82
Εικόνα 96: Κύριες τάσεις $\sigma_2$ βελτιστοποιημένης κατασκευής.....	83
Εικόνα 97: Κύριες τάσεις $\sigma_3$ βελτιστοποιημένης κατασκευής.....	84
Εικόνα 98: Τασικό πεδίο von-Mises βελτιστοποιημένου μοντέλου (1).....	85
Εικόνα 99: Τασικό πεδίο von-Mises βελτιστοποιημένου μοντέλου (2).....	85
Εικόνα 100: Πεδίο μετατοπίσεων βελτιστοποιημένου μοντέλου.....	86
Εικόνα 104: Τάσεις von-Mises (αρχικού πάνω, βελτιστοποιημένου κάτω).....	90

## 1. Εισαγωγή

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός της αντοχής πηδαλίου πλοίου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά, παρουσιάζεται συνοπτικά η διαχρονική εξέλιξη των πηδαλίων και αναφέρονται οι τύποι πηδαλίων στους οποίους δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στις μέρες μας. Ακόμη, γίνεται μια εκτενής περιγραφή των αρχών λειτουργίας των πηδαλίων, δυνάμεις που δρουν σε αυτά, λειτουργία ανάλογα τον τύπο πηδαλίου κ. α..

Επιπλέον, δίνονται ορισμένες πληροφορίες για την Διεθνή Ένωση Νηογνομόνων (IACS). Πώς έγινε η σύσταση της, με τι σκοπό αλλά και πώς έχει εξελιχθεί οργανισμός σήμερα στον κλάδο της παγκόσμιας ναυτιλίας. Παράλληλα, γίνεται αναφορά στους κοινούς κανονισμούς που θεσπίζει η ένωση (*Unified Requirements*), και στους σκοπούς που αυτοί έχουν. Δεδομένου του θέματος της παρούσας μελέτης, γίνεται αναφορά συγκεκριμένα στο πρότυπο *UR S10*, των κοινών κανονισμών, το οποίο αφορά τα πηδάλια.

Έπειτα, γίνεται αναφορά στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στο πως αυτή εξελίχθηκε και ποια είναι τα βασικά στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με τη μέθοδο. Τέλος, αναφέρονται λίγα πράγματα για το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου.

Στο πρακτικό τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται αρχικά τα κατασκευαστικά σχέδια του υπό μελέτη πηδαλίου, με σκοπό τον τρισδιάστατο σχεδιασμό της κατασκευής. Έχοντας δημιουργήσει το μοντέλο, γίνεται υπολογισμός των φορτίσεων που δέχεται η κατασκευή σύμφωνα με το πρότυπο *S10*. Με τις δεδομένες φορτίσεις γίνεται επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό τον υπολογισμό της αντοχής της κατασκευής.

Χρησιμοποιώντας τις διατάξεις του κανονισμού που αφορούν την διαστασιολόγηση του πηδαλίου, υπολογίζονται τα ελάχιστα πάχη που ορίζονται για τα κατασκευαστικά στοιχεία του πηδαλίου. Εφόσον, έγινε η σύγκριση με τα υπάρχοντα πάχη και προέκυψαν σε μερικά στοιχεία ορισμένες διαφορές, έγινε εκ νέου μοντελοποίηση του πηδαλίου με πάχη τα ελάχιστα που ορίζει ο κανονισμός. Το βελτιστοποιημένο ως προς το βάρος μοντέλο μελετήθηκε ομοίως σε αντοχή, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κλείνοντας, γίνεται απευθείας σύγκριση των δύο μοντέλων, και λαμβάνονται τα τελικά συμπεράσματα.

## 2. Ιστορική αναδρομή

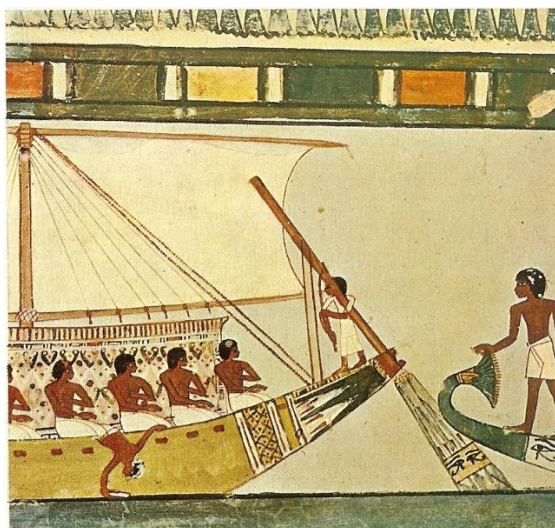
### 2.1. Διαχρονική εξέλιξη των πηδαλίων

Όπως είναι γνωστό, τα πλοία χρησιμοποιούνται χιλιάδες χρόνια για να εξυπηρετούν τους σκοπούς των ανθρώπων, ενώ αρχή του νήματος της κατασκευής τους είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί. Παρόλα αυτά, τα πηδάλια όπως τα γνωρίζουμε σήμερα δεν χρονολογούνται το ίδιο πίσω. Αρχικά, το μέσο που χρησιμοποιούνταν για την πραγματοποίηση ελιγμών ήταν τα κουπιά. Με την κατάλληλη συνεργασία των δύο πλευρών του πλοίου επιτυγχανόταν η στροφή του πλοίου. Ωστόσο, η πραγματοποίηση κινήσεων ακριβείας ήταν χρονοβόρα και πρακτικά αδύνατη. (πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Oar>)



Εικόνα 1: Φοινικικό πολεμικό πλοίο με μέσο πρόωσης και επίτευξης ελιγμών τα κουπιά. (πηγή: <https://courses.lumenlearning.com/suny-hccc-worldhistory/chapter/the-phoenicians/>)

Όπως ήδη αναφέρθηκε η ευελιξία του πλοίου με την αποκλειστική χρήση των κουπιών είναι περιορισμένη, έτσι, αναπτύχθηκε μια πρώιμη μορφή πηδαλίου στη μορφή ενός ή και δύο κουπιών εδρασμένα στην πρύμνη του πλοίου.



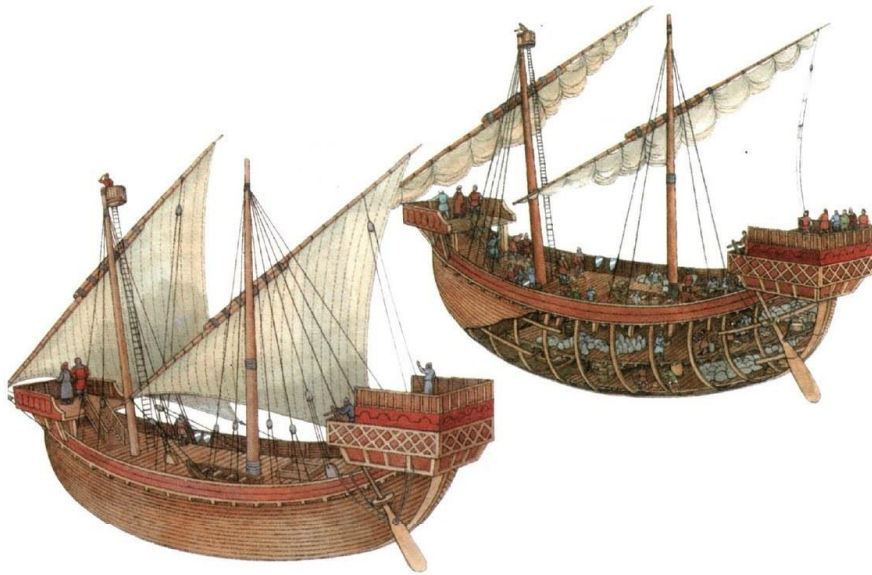
Εικόνα 2: Πρώιμη μορφή πηδαλίου τοποθετημένο στην πρύμνη ενός Αιγυπτιακού πλοίου. (πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Steering\\_oar](https://en.wikipedia.org/wiki/Steering_oar))



Ο χειριστής έστρεφε το σώμα του κουπιού με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνει η επιθυμητή κίνηση. Με αυτόν τον τρόπο τα πλοία ήταν σε θέση να πραγματοποιούν ευκολότερα κινήσεις εν πλω αλλά και πιο απαιτητικούς ελιγμούς. Τα κουπιά αυτά είχαν πολύ μεγαλύτερο μήκος από τα κοινά κουπιά και προφανώς αρκετά μεγαλύτερη προβεβλημένη επιφάνεια.

Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων τα πλοία γινόντουσαν ολοένα και μεγαλύτερα, ενώ ταυτόχρονα μεγάλωνε και το ύψος εξάλων τους. Έτσι, η πηδαλιουχία με τα έως τότε γνωστά μέσα έγινε μια αρκετά δύσκολη πρακτική.

Σταδιακά, αρχίσαν να εμφανίζονται μορφές πηδαλίων αρκετά κοντά στα σημερινά δεδομένα. Κατά την μεσαιωνική εποχή τα πηδάλια των πλοίων υπέστησαν σημαντικές βελτιώσεις. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε πηδάλιο στηριζόμενο σε αρθρώσεις (μεντεσέδες). Το γεγονός αυτό, έκανε την απόκριση των πλοίων πιο σύντομη και πιο αποτελεσματική, ενώ βοήθησε στην μόνιμη στήριξη πηδαλίων σε όλο το μήκος του πρυμναίου ποδοστήματος. Η καινοτομία αυτή χρονολογείται στο 1180 μ.Χ., καθώς έχει αποτυπωθεί σε εκκλησιαστικά γλυπτά στο Βέλγιο. Στην Ευρώπη, εφευρέτης του πηδαλίου θεωρείται ο *Somerled* το 1156 μ.Χ.. Παρόλα αυτά η ιδέα του για το πηδάλιο στην πραγματικότητα αποτελούσε μια μίξη των έως τότε κοινών πρακτικών (πρυμναίο πηδάλιο, αρθρώσεις, άξονας πηδαλίου). Παράλληλα, στην μεσαιωνική Ευρώπη χρησιμοποιούνταν και άλλοι τύποι πηδαλίων όπως αυτός των πλοίων τύπου *cog*. Ορισμένα πλοία τύπου *cog* είχαν τοποθετημένο το πηδάλιο στην αριστερή πλευρά του πλοίου και προς την πρύμνη (εικόνα 3). (πηγή: [https://www.liquisearch.com/rudder/history\\_of\\_the\\_rudder/medieval\\_europe](https://www.liquisearch.com/rudder/history_of_the_rudder/medieval_europe))

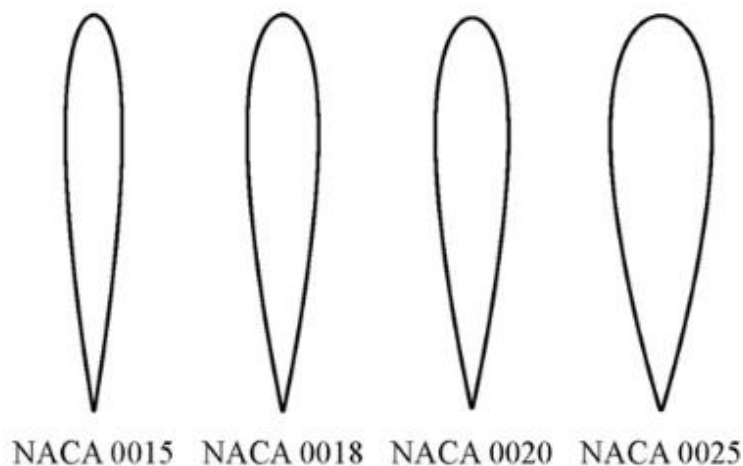


Εικόνα 3: Πλοίο τύπου cog. (πηγή: <https://about-history.com/the-medieval-cog-ship-and-its-use-in-history/>)

## 2.2. Σύγχρονα πηδάλια

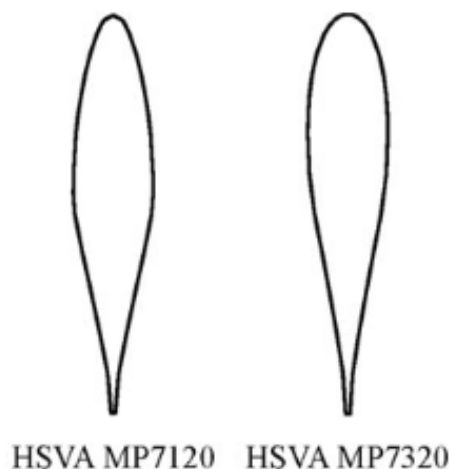
Με την εξέλιξη της μηχανικής, τα έως τότε μηχανικά πηδάλια, αντικαταστάθηκαν σταδιακά από αμοκίνητα πηδάλια και έπειτα από συστήματα ηλεκτρικά και ηλεκτρο-υδραυλικά, όπως τα γνωρίζουμε και σήμερα. Εκτός από τον τρόπο έδρασης και στρέψης του πηδαλίου, αποδείχτηκε ότι το σχήμα της τομής του (*rudder profile*) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του. Έτσι, σταδιακά άρχισε μια έρευνα γύρω από αυτό το θέμα η οποία εξελίσσεται

μέχρι και σήμερα. Η πιο απλή και οικονομική επιλογή είναι εκείνη της απλής πλάκας (*flat plate*). Ενώ πρόκειται για μια αρκετά απλή πρακτική, στις μικρές γωνίες λειτουργίας (έως  $5^\circ$ ) είναι αρκετά αποδοτική. Προφανώς, η επιλογή απλής πλάκας δεν μπορεί να εφαρμοστεί πλέον σε ποντοπόρα πλοία, παρά μόνο σε μικρά πλοία. Τη δεκαετία του 20' η αμερικανική εθνική συμβουλευτική επιτροπή για την προώθηση της αεροναυτικής (*NACA: National Advisory Committee for Aeronautics*), η μετέπειτα *NASA*, ανέπτυξε μια σειρά αεροτομών (*NACA airfoils*). Εισάγοντας μια σειρά επιθυμητών παραμέτρων σε κλειστούς τύπους, υπολογίζεται η καμπύλη που περιγράφει το προφίλ της αεροτομής. Σκοπός των αεροτομών *NACA* αρχικά ήταν να εξυπηρετήσει προβλήματα που αφορούν την αεροναυτική, ωστόσο η χρήση των σειρών υιοθετήθηκε άμεσα στην ναυπηγική. Στις μέρες μας, οι υδροτομές των σειρών *NACA*, αποτελούν το πιο διαδεδομένο προφίλ πηδαλίου και ο λόγος είναι η εκτενής έρευνα που έχει γίνει για την ρευστοδυναμική απόδοσή τους.



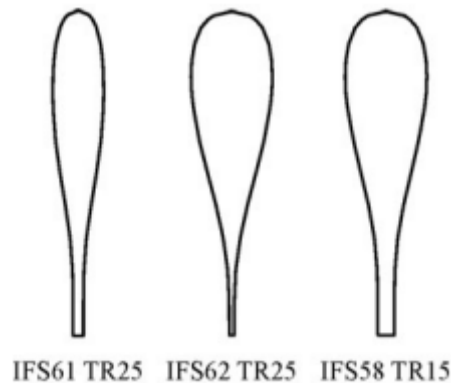
Εικόνα 4: Ενδεικτικές υδροτομές NACA 00. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)

Μια επίσης γνωστή σειρά που αναπτύχθηκε αποκλειστικά για πηδάλια είναι η *HSVA* η οποία αναπτύχθηκε από την *HSVA: The Hamburg Ship Model Basin*. Βασικό χαρακτηριστικό των υδροτομών της σειράς είναι ότι παρέχουν μια σχετικά καλή κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια του πηδαλίου αποτρέποντας κατά το δυνατόν φαινόμενα σπηλαιώσης.



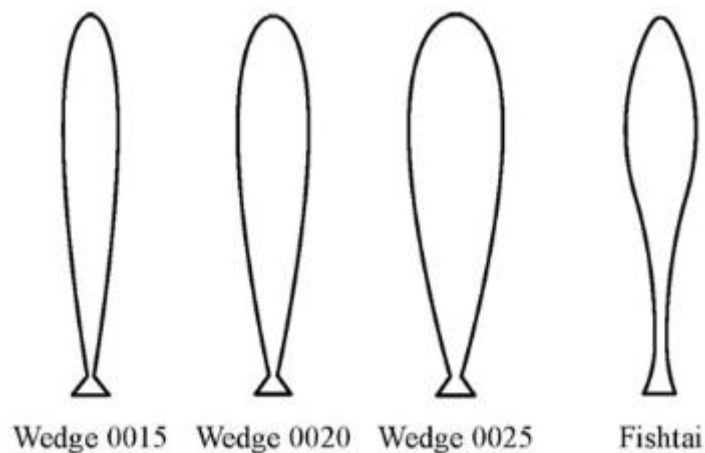
Εικόνα 5: Ενδεικτικές υδροτομές της σειράς *HSVA*. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)

Σημαντική σειρά που αναπτύχθηκε για εφαρμογή στα πηδάλια είναι η σειρά *IFS*. Συγκριτικά, με τις υδροτομές της σειράς *HSVA*, παράγουν περισσότερη δυναμική άνοση (αλλά και αντίσταση), ενώ παρουσιάζουν σε ακόμη χαμηλότερο βαθμό φαινόμενα σπηλαιώσης.



Εικόνα 6: Ενδεικτικές υδροτομές της σειράς *IFS*. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)

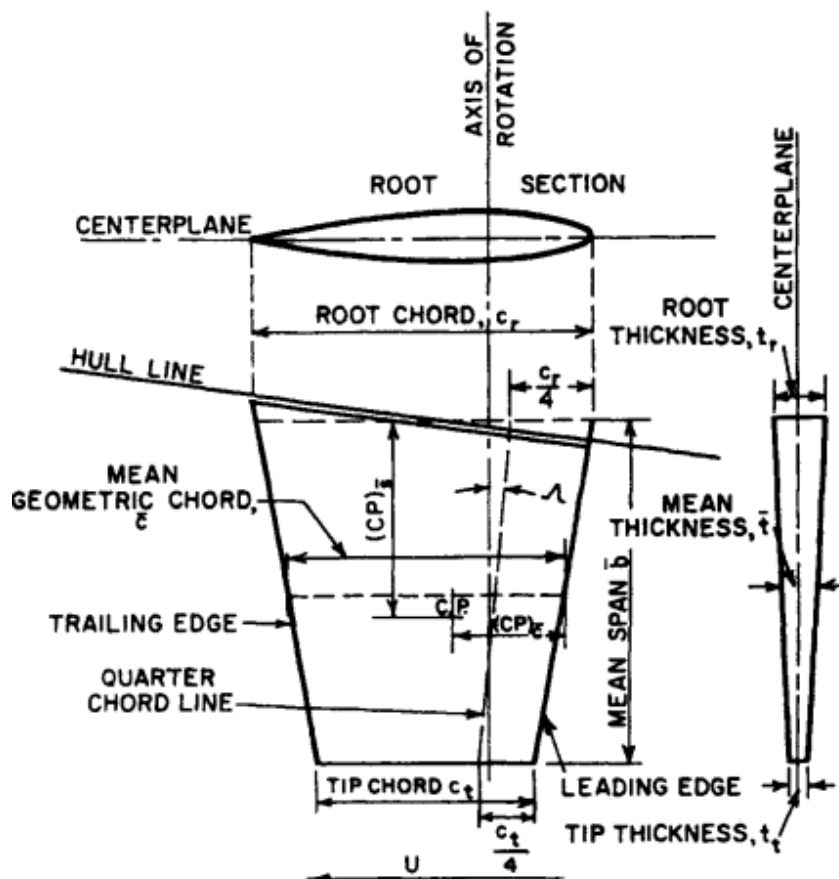
Τα τελευταία κυρίως χρόνια, υπάρχει η μια τάση αναζήτησης της βέλτιστης επιλογής παρατηρώντας τον τρόπο με τον οποίο η φύση λύνει τέτοια προβλήματα (*bio-inspired designs*). Έτσι, με έμπνευση τον τρόπο που κινούνται ορισμένα είδη της θάλασσας (ψάρια, δελφίνια κ. α.), δημιουργήθηκαν κάποιες σειρές υδροτομών προσπαθώντας να μιμηθούν την γεωμετρία των πτερυγίων αυτών των ειδών. Τέτοια είδη υδροτομών είναι τα *Fishtail profiles* και τα *Wedge-tail profiles*.



Εικόνα 7: Fishtail and wedge-tail profiles. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)

### 3. Αρχές λειτουργίας του πηδαλίου

#### 3.1. Βασική ονοματολογία στοιχείων πηδαλίου

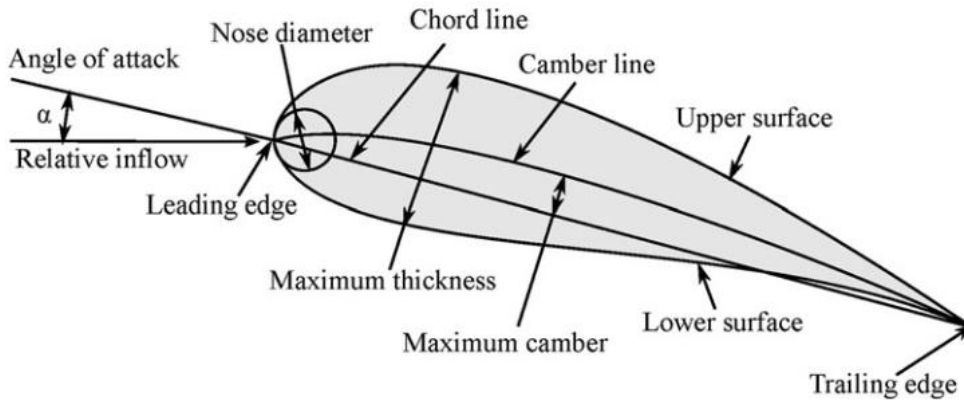


Εικόνα 8: Περιγραφή διαστάσεων πηδαλίου. (πηγή: <https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up>)

- **Leading edge** (χειλος πρόσπτωσης): Η κατακόρυφη ακμή της υδροτομής που έρχεται πρώτη σε επαφή με τη ροή.
- **Trailing edge** (χειλος εκφυγής): Η κατακόρυφη ακμή στο πίσω μέρος της υδροτομής
- **Root**: ονομάζεται πρώτη οριζόντια διαμήκης τομή (από επάνω προς τα κάτω), ενώ **root chord** ( $c_r$ ) είναι το μήκος της αντίστοιχης χορδής.
- **Tip**: Ονομάζεται η τελευταία οριζόντια διαμήκης τομή (από πάνω προς τα κάτω) και **tip chord** ονομάζεται το μήκος της αντίστοιχης χορδής.
- $c_{(mean)}$ : Ο μέσος όρος των μηκών των δύο παραπάνω χορδών (**root** και **tip chord**).
- $b_{(mean)}$ : Το μέσο span (υπολογίζεται από τον μέσο όρο των υψών του **leading** και **trailing edge**).
- $t_{(mean)}$ : το μέσο πάχος της υδροτομής (υπολογίζεται από τον μέσο όρο των παχών του **root** και του **tip**)
- **Aspect ratio**: Ο λόγος επιμήκους ορίζεται ως το πηλίκο  $b_{(mean)}/c_{(mean)}$ .
- **Tapper ratio**: Ο λόγος σύγκλισης ορίζεται ως το πηλίκο  $t_{(mean)}/c_{(mean)}$ .
- **Άξονας περιστροφής**: Ο κατακόρυφος άξονας περί τον οποίο περιστρέφεται το πηδάλιο.

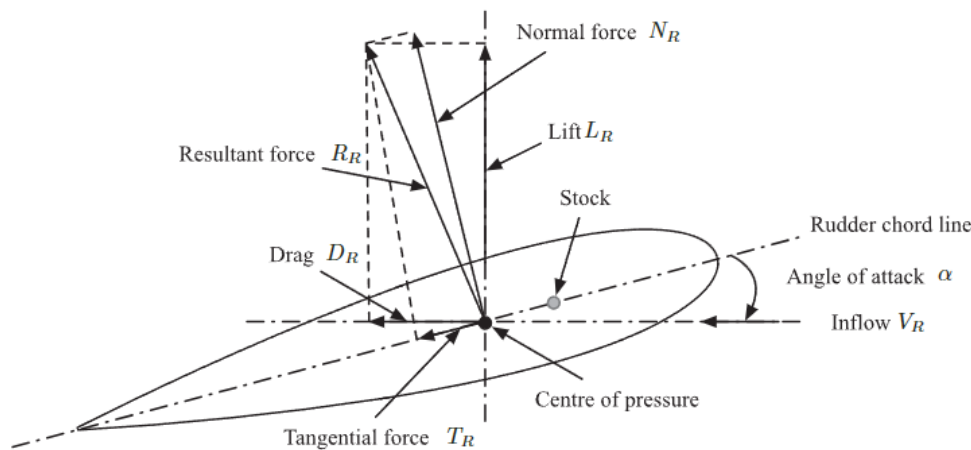
### 3.2. Δυνάμεις πηδαλίου και υδροδυναμικοί συντελεστές

Τα πηδάλια των πλοίων χρησιμοποιούνται για την διατήρηση μιας σταθερής πορείας, αλλά και για την επίτευξη ελιγμών. Επομένως, είναι υδροδυναμικά σώματα - υδροτομές που παράγουν δυναμική άνοση (*Lift*), επαγόμενη αντίσταση (*Drag*), άρα και κάποια ροπή ικανή να στρέψει το πλοίο.



Εικόνα 9: Βασική ονοματολογία χαρακτηριστικών οριζόντιας διαμήκους τομής υδροτομής. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2016.1178205>)

Η κάθετη δύναμη παράγεται από την διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ των δύο επιφανειών της υδροτομής (*upper and lower surfaces*), καθώς η ροή προσπίπτει με μια γωνία  $\alpha$  (*angle of attack*).



Εικόνα 10: Ονοματολογία δυνάμεων επί της υδροτομής. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2016.1178205>)

Η δύναμη *Lift* αποτελεί συνιστώσα της δύναμης  $R_R$  (εικόνα 10) και δρα κάθετα στην διεύθυνση της ροής. Η οπισθέλκουσα δύναμη (*drag*), είναι η συνιστώσα της δύναμης του πηδαλίου που δρα παράλληλα στη διεύθυνση της ροής. Η συνολική δύναμη του πηδαλίου είναι η συνισταμένη των παραπάνω δυνάμεων, δηλαδή ισχύει ότι:

$$R_R = \sqrt{N_R^2 + T_R^2} = \sqrt{L_R^2 + D_R^2}, [\text{N}]$$

Προκειμένου να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφόρων σεναρίων σχεδίασης χρησιμοποιούνται ορισμένοι αδιάστατοι υδροδυναμικοί συντελεστές για την έμμεση έκφραση των δυνάμεων *Lift* και *Drag*. Οι σχέσεις που προέκυψαν μετά από διαστατική ανάλυση για τους συντελεστές είναι οι παρακάτω:

$$\text{Συντελεστής άνωσης: } C_L = \frac{L_R}{\frac{1}{2} \rho \cdot V_R^2 \cdot A_R}, [-]$$

$$\text{Συντελεστής οπισθέλκουσας: } C_D = \frac{D_R}{\frac{1}{2} \rho \cdot V_R^2 \cdot A_R}, [-]$$

Όπου:

- $\rho$ , η πυκνότητα του νερού [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $V_R$ , η ταχύτητα της προσπίπτουσας ροής [ $\text{m/s}$ ]
- $A_R$ , το εμβαδόν της προβεβλημένης επιφάνειας του πηδαλίου [ $\text{m}^2$ ]

Έχοντας υπολογίσει πειραματικά τους συντελεστές *Lift* και *Drag*, υπολογίζεται η τιμή των δυνάμεων  $L_R$  και  $D_R$  άρα και της συνολικής δύναμης επί του πηδαλίου. Στον υπολογισμό των παραπάνω δυνάμεων, η ταχύτητα της προσπίπτουσας ροής δεν συμπίπτει με την ταχύτητα του πλοίου, καθώς είναι ελαφρώς αυξημένη λαμβάνοντας υπόψιν την ροή λόγω της έλικας. Το γεγονός αυτό έχει σημαντική επίπτωση στη δύναμη του πηδαλίου καθώς η δύναμη εξαρτάται ανάλογα από την ταχύτητα της ροής. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας της προσπίπτουσας ροής χρησιμοποιείται το διάγραμμα της εικόνας 11.

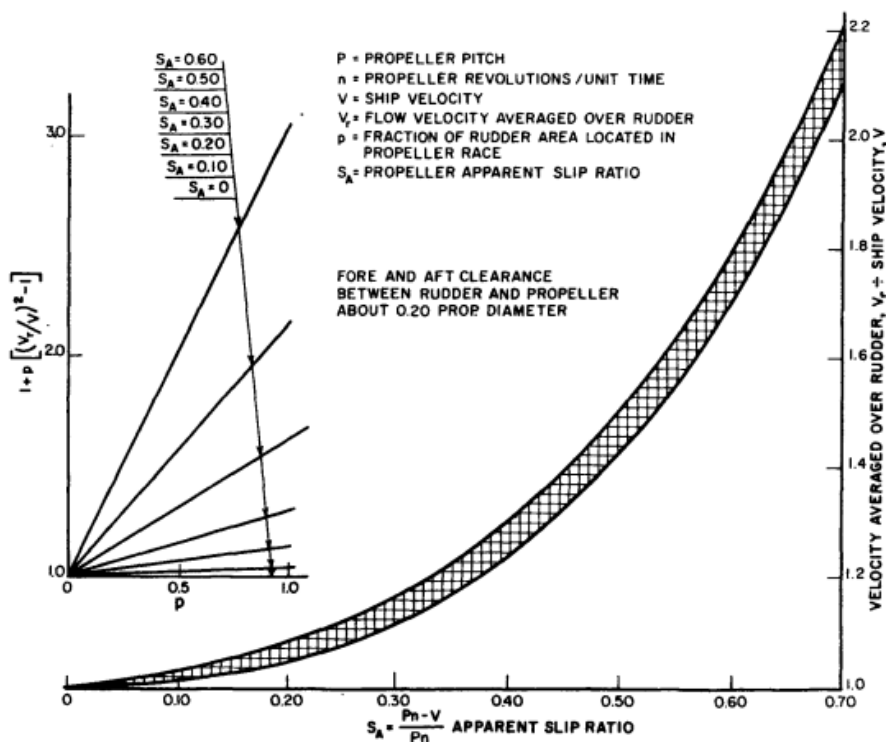


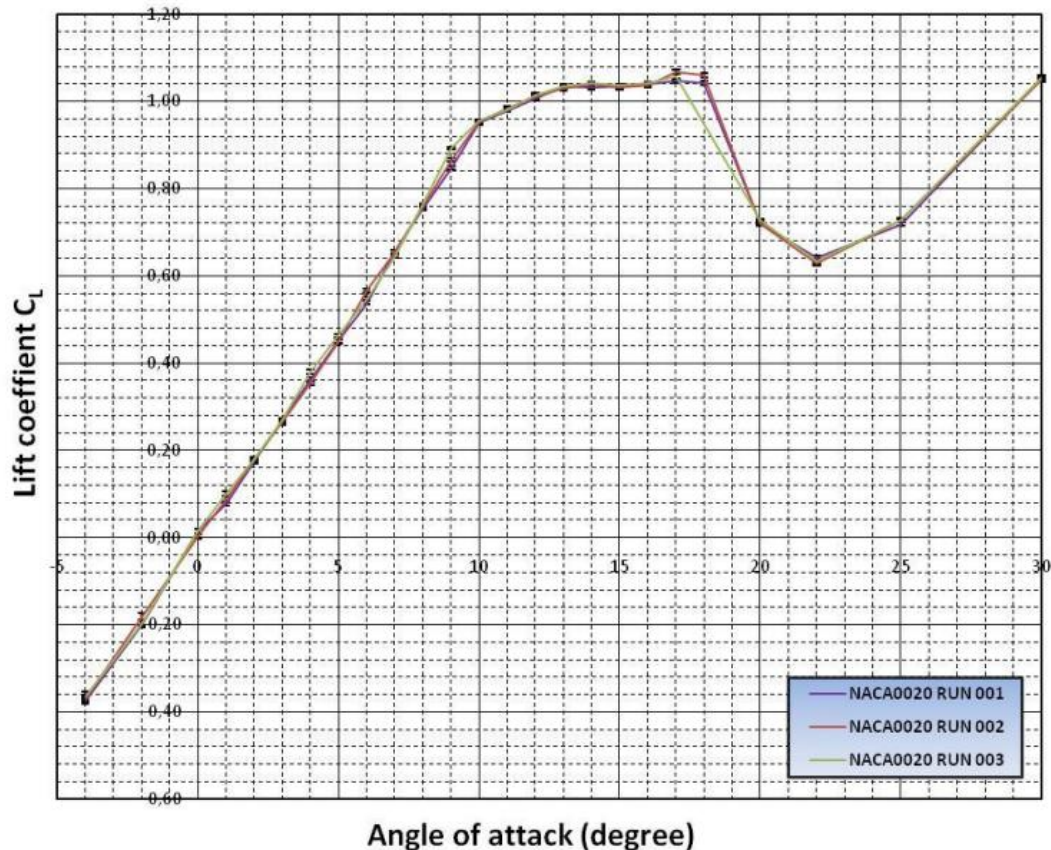
Fig. 250 Effect of propeller slip on velocity over rudder in propeller race (Shiba, 1960)

Εικόνα 11: Επίδραση ροής από την έλικα στην ροή επί του πηδαλίου. (πηγή: <https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up>)

Αρχικά, υπολογίζεται ο λόγος  $S_A = 1 - \frac{V}{P \cdot n}$ , όπου:

- $V$ , η ταχύτητα του πλοίου [m/s]
- $P$ , το βήμα της έλικας [m]
- $n$ , στροφές [rps]

Από το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας υπολογίζεται ο λόγος  $V_R/V=c >1$ , επομένως προκύπτει η τελική ταχύτητα της προσπίπτουσας ροής  $V_R = c \cdot V$ .



Εικόνα 12: Πειραματικά αποτελέσματα για τον  $C_L$  της γωνίας πρόσπτωσης (NACA 0020 και  $Re=2.9e5$ ). (πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/305044784\\_The\\_airfoil\\_thickness\\_effects\\_on\\_wavy\\_leading\\_edge\\_phenomena\\_at\\_low\\_Reynolds\\_number\\_regime](https://www.researchgate.net/publication/305044784_The_airfoil_thickness_effects_on_wavy_leading_edge_phenomena_at_low_Reynolds_number_regime))

Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης παρατηρείται γραμμική αύξηση του συντελεστή άνωσης όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Προφανώς, για μηδενική γωνία πρόσπτωσης ο συντελεστής άνωσης άρα και το *Lift* μηδενίζονται, δεδομένου ότι πρόκειται για συμμετρική υδροτομή.

### 3.3. Τύποι πηδαλίων και θέση τοποθέτησης

Η θέση που τοποθετείται το πηδάλιο αλλά και ο τύπος του καθορίζουν σημαντικά την απόδοση του, επομένως και την ικανότητα του πλοίου να πραγματοποιεί ελιγμούς. Το πηδάλιο πρέπει να τοποθετείται στην πρύμνη του πλοίου και πίσω από την έλικα, έτσι ώστε να επωφελείται της επιταχυνόμενης ροής από την έλικα. Ωστόσο, η τοποθέτηση του πηδαλίου πίσω από την έλικα μπορεί να δημιουργήσει φαινόμενα ταλαντώσεων, επομένως η απόσταση του πηδαλίου από την έλικα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει μια οριακή τιμή (στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η τιμή αυτή είναι περίπου  $0.09D$ , όπου  $D$ : διάμετρος έλικας). Ένα ακόμη ζήτημα είναι αυτό του βυθίσματος του πηδαλίου. Το πηδάλιο πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ολόκληρο βυθισμένο. Ο *Shiba* (1960) αναφέρει ότι το βύθισμα του μέσου προφίλ του πηδαλίου ( $T$ ) δε θα πρέπει να είναι μικρότερο από το  $0.9$  του *span* ( $b$ ), με σκοπό να αποφεύγεται η επίδραση της

ελεύθερης επιφάνειας. Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται, πως ο λόγος  $T/b$  επηρεάζει τον συντελεστή της δύναμης του πηδαλίου ( $C_N$ ), για τρία διαφορετικά *aspect ratio*, σε τέσσερις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.

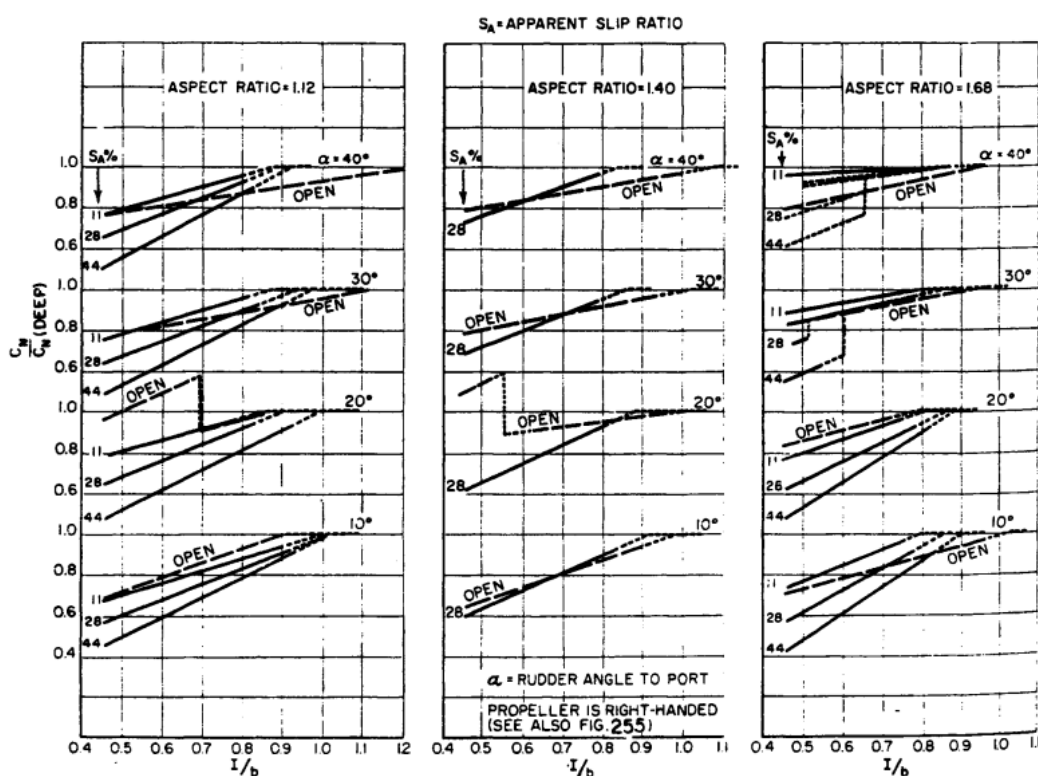


Fig. 127 Effect of rudder submergence ratio  $l/b$  on rudder normal force coefficient (Shiba, 1960)

Εικόνα 13: Επίδραση του βυθίσματος μέσω προφίλ στη δύναμη του πηδαλίου κατά Shiba. (πηγή: <https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up>)

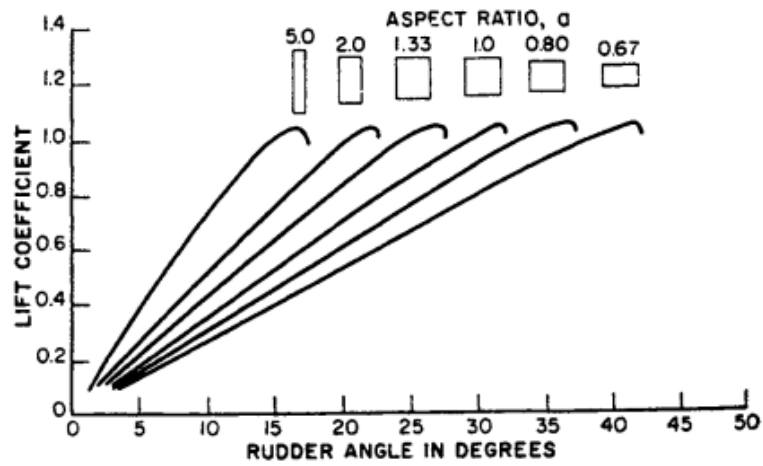
Οι τύποι των πηδαλίων ταξινομούνται με βάση την κατανομή της επιφάνειας κατά το ύψος του πηδαλίου αλλά και περί τον άξονα περιστροφής τους.

- Μη ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (*unbalanced rudders*): Στα μη ζυγοσταθμισμένα πηδάλια, ο άξονας περιστροφής βρίσκεται στο χείλος πρόσπτωσης. Επομένως, η ροπή του πηδαλίου θα πρέπει εξολοκλήρου να παραλαμβάνεται από τον μηχανισμό του πηδαλίου. Η εφαρμογή του συνεπώς γίνεται με μεγαλύτερη ευκολία όταν η επιφάνεια του πηδαλίου είναι μικρότερη.
- Ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (*balanced rudders*): Η επιφάνεια του πηδαλίου στα ζυγοσταθμισμένα πηδάλια διαμοιράζεται ομοιόμορφα κατά το ύψος του εκατέρωθεν του άξονα περιστροφής. Επιπλέον, άξονας περιστροφής βρίσκεται σε απόσταση 20-40% του μήκους χορδής από το χείλος πρόσπτωσης.
- Ημι-ζυγοσταθμισμένα (*semi-balanced ή semi-spade rudders*): Η επιφάνεια του πηδαλίου κατά το ύψος δεν διαμοιράζεται ομοιόμορφα σε σχέση με τον άξονα περιστροφής.

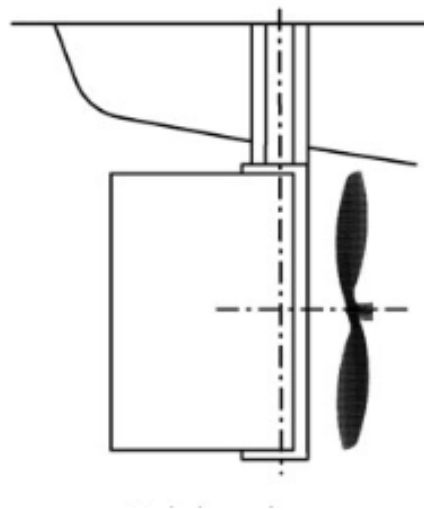
Οι VanLammeren, Troast και Koning (1948), παρουσίασαν για διάφορες τιμές του λόγου επιμήκους, τη σχέση του συντελεστή άνωσης με την γωνία πρόσπτωσης της ροής και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερο λόγο επιμήκους (*aspect ratio*) έχει η υδροτομή,



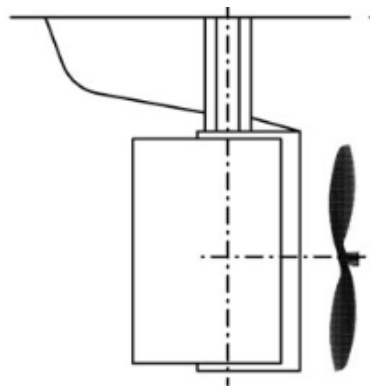
τόσο μικραίνει και γωνία πρόσπτωσης κατά την οποία μεγιστοποιείται ο συντελεστής άωσης (εικόνα 14).



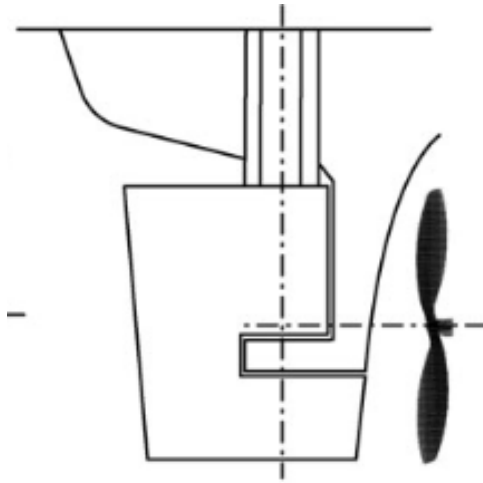
Εικόνα 14: Επίδραση του λόγου επιμήκους στον συντελεστή άωσης. (πηγή: <https://archive.org/details/principlesofnava0000unse/page/n7/mode/2up>)



Εικόνα 15: Μη ζυγостаθμισμένο πηδάλιο. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)



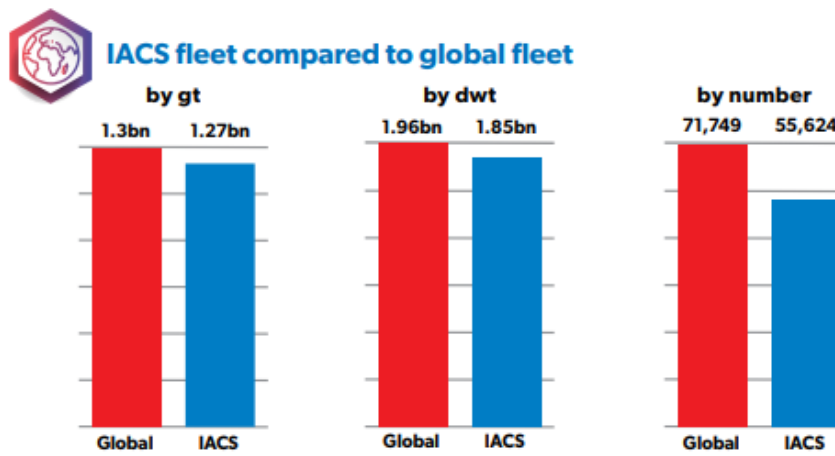
Εικόνα 16: Μερικώς ζυγостаθμισμένο πηδάλιο. (πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)



Εικόνα 17: Μερικώς ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο. (πηγή:  
<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>)

#### 4. Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (*IACS*) και *Unified Requirements* (*UR*)

Όπως είναι γνωστό, οι νηογνώμονες είναι μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί. Ωστόσο, πρακτικά υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ τους, για το ποιος θα διεκδικήσει το μεγαλύτερο κομμάτι της αγοράς. Έτσι, στις κατασκευές των πλοίων, κάθε νηογνώμονας εφάρμοζε τους δικούς του κανόνες οι οποίοι δεν ελέγχονταν από κάποια αρχή. Σκοπός τους ήταν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος ναυπήγησης του πλοίου, έτσι ώστε να είναι ανταγωνιστικοί, θυσιάζοντας σε πολλές περιπτώσεις την ασφάλεια της κατασκευής του πλοίου. Ήταν φανερό ότι αυτό το καθεστώς έπρεπε να σταματήσει και να τεθούν κοινά όρια σε ορισμένους θεμελιώδεις κανονισμούς. Υπό αυτές τις συνθήκες, το 1968 δημιουργήθηκε η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων, αρχικά αποτελούμενη από 7 νηογνώμονες. Σήμερα, η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων αποτελείται από 12 μέλη. Βασικός σκοπός του *IACS* είναι να θεσπίζει και να αναπτύσσει κανονισμούς για νεότευκτα αλλά και ήδη υπάρχοντα πλοία με κύριο γνώμονα την ασφάλεια της κατασκευής. Παράλληλα, με το πέρασμα των χρόνων και την εδραίωση της ένωσης, το όνομα του *IACS* έγινε συνώνυμο της διαφάνειας, της ασφάλειας και της εμπιστοσύνης. Τα πλοία που ξεκίνησαν να ναυπηγούνται με επιβλέποντα νηογνώμονα κάποιο μέλος του *IACS*, ασφαλιζόνταν πιο εύκολα και με σχετικά λιγότερα ασφάλιστρα, ενώ ταυτόχρονα είχαν και σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων σε περίπτωση μεταπώλησης. Επομένως, ήταν θέμα χρόνου οι πλοιοκτήτες να επιλέγουν κλάσεις, μέλη της ένωσης για την ναυπήγηση νέων πλοίων. Σήμερα, τη συντριπτική πλειοψηφία των νέων ναυπηγήσεων την αναλαμβάνουν τα μέλη της ένωσης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο *IACS* καταλαμβάνει σχεδόν το 50% του παγκόσμιου στόλου (σε *gross tonnage*). (πηγή: <https://iacs.org.uk/about-us/annual-review>)



Εικόνα 18: Σύγκριση μεγέθους παγκοσμίου στόλου σε σχέση με τον στόλο του *IACS*. (πηγή: <https://iacs.org.uk/about-us/annual-review>)

Στα πλαίσια των νομοθετημάτων που εκδίδει η ένωση εντάσσονται και οι κοινοί κανονισμοί (*unified requirements, UR*). Τα *UR*, είναι μία σειρά από τεύχη κανονισμών που υποχρεούνται να τηρούν όλα τα μέλη του οργανισμού. Σημαντικός αντιπρόσωπος αυτών των νομοθετημάτων είναι το τεύχος *UR S*, το οποίο πραγματεύεται την αντοχή του πλοίου. (πηγή: <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements>)

## 5. Το πρότυπο *UR S 10 (Rudders, Sole pieces and Rudder horns)*

Ο κανονισμός του *IACS* με το χαρακτηριστικό γράμμα *S* αφορούν κανονισμούς οι οποίοι έχουν να κάνουν με την αντοχή του πλοίου. Ειδικότερα, το τεύχος με τον αριθμό 10 (*S10*) ορίζει κανονισμούς για το πηδάλιο. Το πρότυπο αφορά κυρίως πηδάλια συνηθισμένου προφίλ, ωστόσο περιλαμβάνει και κάποιες ειδικότερες διατάξεις. Επιπλέον, οι παρακάτω κανονισμοί μπορούν να εφαρμοστούν σε χαλύβδινα πηδάλια και σε πλοία όχι μικρότερα από 24 [m].

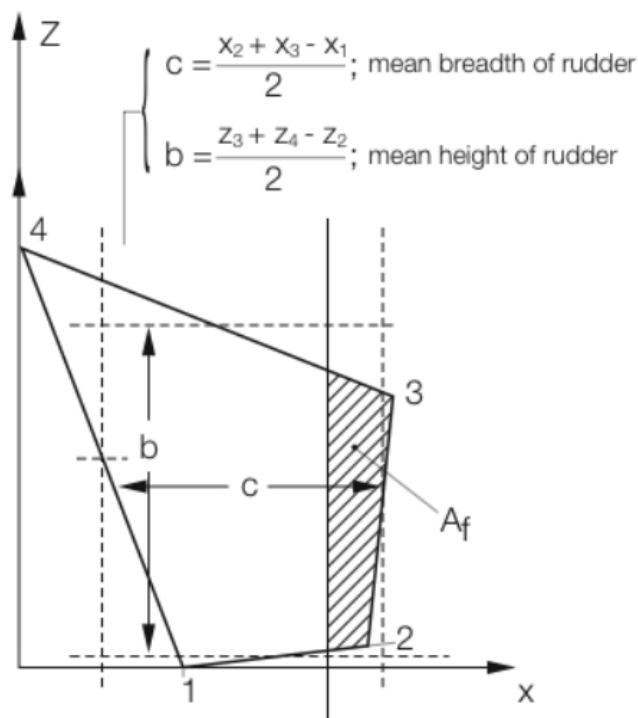
### 5.1. Δύναμη πηδαλίου

Η δύναμη του πηδαλίου για ζυγοσταθμισμένα και μη πηδάλια υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

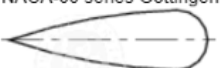
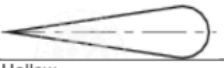


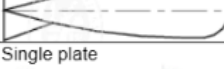

$$C_R = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot 132 \cdot A \cdot V^2 [\text{N}], \text{ (σχέση 1)}$$

Όπου:

- $A$ : η προβεβλημένη επιφάνεια του πηδαλίου [ $\text{m}^2$ ].
- $V$ : η μέγιστη ταχύτητα υπηρεσίας [knots]. (Για ταχύτητες μεγαλύτερες από 10 [kn],  $V_{\text{astern}}=0.5V$ )
- $K_1$ : συντελεστής που εξαρτάται από τον λόγο  $\lambda=b^2/A_t$  με τη σχέση  $K_1=(\lambda+2)/3$ .
- $b$ : το μέσο ύψος του πηδαλίου [m].
- $A_t$ : η προβεβλημένη επιφάνεια του πηδαλίου συμπεριλαμβανομένης της προβεβλημένης επιφάνειας του ποδοστήματος [ $\text{m}^2$ ].
- $K_2$ : συντελεστής που εξαρτάται από το επιλεγμένο προφίλ του πηδαλίου (εικόνα 20).
- $K_3$ : συντελεστής που εξαρτάται από την αλληλεπίδραση της έλικας με το πηδάλιο (εικόνα 21).



Εικόνα 19: Διαστασιολόγηση πηδαλίου για εφαρμογή κανονισμού *UR S 10*. (πηγή: <https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf>)

Profile Type	K <sub>2</sub>	
	Ahead condition	Astern condition
NACA-00 series Göttingen 	1.10	0.80
Flat side 	1.10	0.90
Hollow 	1.35	0.90
High lift rudders 	1.70	1.30
Fish tail 	1.40	0.80
Single plate 	1.00	1.00
Mixed profiles (e.g. HSVA)	1.21	0.90

Εικόνα 20: Πίνακας επιλογής συντελεστή K<sub>2</sub>. (πηγή: <https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf> )

<p>K<sub>3</sub> = 0.8 for rudders outside the propeller jet.          = 1.15 for rudders behind a fixed propeller nozzle.          = 1.0 otherwise.</p>
--

Εικόνα 21: Επιλογή του συντελεστή K<sub>3</sub>. (πηγή: <https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf> )

## 5.2. Ροπή πηδαλίου

Η ροπή του πηδαλίου για κατάσταση *ahead* αλλά και για κατάσταση *astern* υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_R = C_R \cdot r \text{ [Nm]}, \text{ (σχέση 2)}$$

Όπου:

- $r = c \cdot (a - k_1)$  [m] ( $r_{\min} = 0.1 \cdot c$  [m] για κατάσταση *ahead*).
- $c$ : το μέσο πλάτος του πηδαλίου (εικόνα 19).
- $\alpha = 0.33$  (*ahead*).
- $\alpha = 0.66$  (*astern*).
- $k_1 = A_f / A$ ,  $A_f$ : η προβεβλημένη επιφάνεια του πηδαλίου πέραθεν του άξονα περιστροφής (εικόνα 19).

Για τα ημι-ζυγιστάθμισμένα πηδάκια ο υπολογισμός της ροπής γίνεται ως εξής:

$$Q_R = C_{R1} \cdot r_1 + C_{R2} \cdot r_2 \text{ [Nm]} \text{ (σχέση 3)}$$

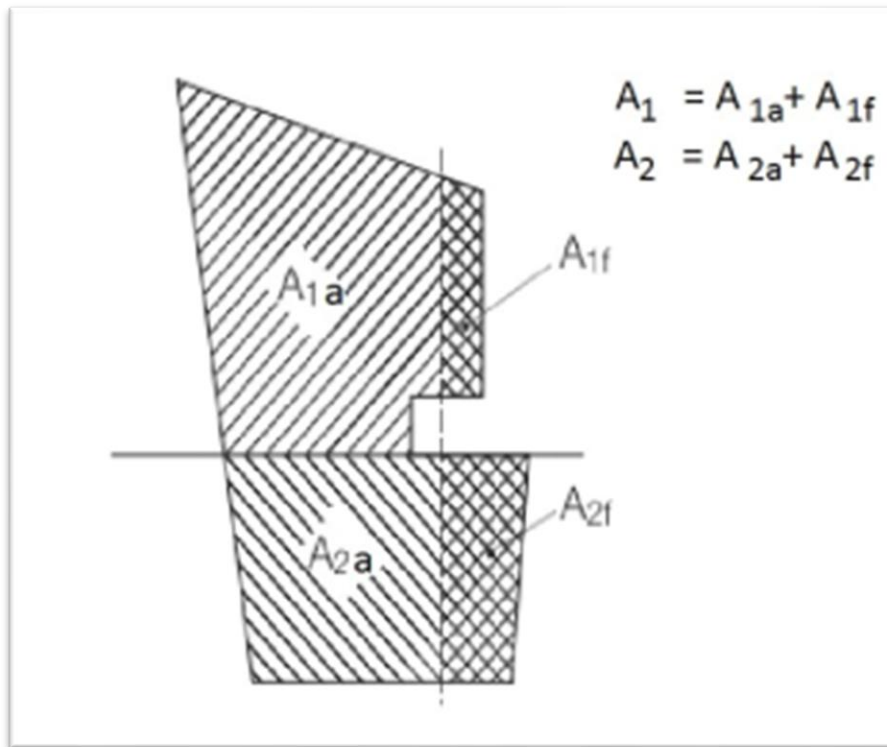
Όπου:

- $C_{R1} = C_R \cdot (A_1 / A)$  [N].

- $C_{R2} = C_R \cdot (A_2/A)$  [N].
- $r_1 = c_1 \cdot (a - k_1)$  [m].
- $r_2 = c_2 \cdot (a - k_2)$  [m].
- $c_1, c_2$  το μέσο πλάτος των εμβαδών  $A_1$  και  $A_2$  αντίστοιχα (εικόνα 22).
- $k_1 = A_{1f}/A_1$ .
- $k_2 = A_{2f}/A_2$ .
- $A_{1f}, A_{2f}$  τα τμήματα πρόραθεν του άξονα περιστροφής των προβεβλημένων επιφανειών  $A_1$  και  $A_2$  αντίστοιχα (εικόνα 22).
- $\alpha = 0.33$  (*ahead*).
- $\alpha = 0.66$  (*astern*).

Για κατάσταση πρόσω η ροπή δεν θα πρέπει να λαμβάνεται μικρότερη από:

$$Q_{\min} = 0.1 \cdot C_R \cdot (A_1 C_1 + A_2 C_2) / A$$



Εικόνα 22: Πηδάλιο semi-spade. (πηγή: <https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf>)

### 5.3. Διαστασιολόγηση πηδαλίου

#### Σταθερά k του υλικού

$$k = \left( \frac{235}{ReH} \right)^e, \text{ (σχέση 4)}$$

Όπου:

- $ReH$ , το όριο διαρροής του υλικού που έχει επιλεγθεί (σε MPa).
- $e = 0.75$  όταν  $ReH > 235$  [MPa] ή  $1$  όταν  $ReH \leq 235$  [MPa].

### Υπολογισμός διαμέτρου άξονα πηδαλίου

Η διάμετρος του άξονα του πηδαλίου προκειμένου να μπορεί να ανταπεξέλθει στην ροπή του πηδαλίου θα πρέπει να έχει ελάχιστη τιμή την παρακάτω:

$$d_t = 4.2 \cdot (Q_R \cdot k)^{\frac{1}{3}} \text{ [mm]}, \text{ (σχέση 5)}$$

Όπου:

- $Q_R$ , η συνολική ροπή πηδαλίου σε [Nm].
- $k$ , η σταθερά του υλικού (σχέση 4).

### Υπολογισμός πάχους εξωτερικών ελασμάτων

Το ελάχιστο πάχος ελασμάτων (*side, top, bottom*) δίνεται από τη σχέση:

$$t = 5.5 \cdot S \cdot \beta \cdot \sqrt{k} \cdot \sqrt{T_{sc} + C_R \cdot 10^{-4}/A} + 2.5 \text{ [mm]}, \text{ (σχέση 6)}$$

Όπου:

- $T_{sc}$ , το βύθισμα αντοχής σε [m].
- $C_R$  η δύναμη πηδαλίου σε [N].
- $A$ , το εμβαδόν του πηδαλίου σε [m<sup>2</sup>].
- $\beta = \sqrt{1.1 - 0.5(s/b)^2}$ , max. 1 εάν  $s/b \geq 2.5$ .
- $s$ , το ελάχιστο ανυποστήρικτο πλάτος του περιβλήματος σε [m].
- $b$ , το μέγιστο ανυποστήρικτο πλάτος του περιβλήματος σε [m].
- $k$ , η σταθερά του υλικού

### Υπολογισμός πάχους ενισχυτικών (οριζοντίων και κατακόρυφων)

Το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος για τα ενισχυτικά πρέπει να είναι το μεγαλύτερο των:

- $0.7 \cdot t$ , όπου  $t$  το πάχος του περιβλήματος που προκύπτει από τη σχέση 6.
- 8 [mm]

Δηλαδή πρέπει  $t_s = \max(0.7 \cdot t, 8)$ , (σχέση 7)

### Υπολογισμός πάχους οριζοντίων ενισχυτικών που συνδέονται με τα χυτά τμήματα

Το ελάχιστο πάχος των ενισχυτικών πρέπει να είναι το μέγιστο από τα:

$$t_H = \max(1.2 \cdot t, 0.0045 d_t^2/S_H) \text{ [mm]}, \text{ (σχέση 8)}$$

Όπου:

- $t$ , το πάχος του περιβλήματος σε [mm].
- $d_t$ , η διάμετρος του άξονα σε [mm].
- $S_H$ , η απόσταση μεταξύ των δύο οριζοντίων ενισχυτικών που συνδέονται στο χυτό.

### Υπολογισμός πάχους κατακόρυφων ενισχυτικών που συνδέονται στα χυτά και πλευρικού ελάσματος που τα περιβάλλει

Τα πάχη αυτά προσδιορίζονται από τον παρακάτω πίνακα, έχοντας υπολογίσει το πάχος  $t$  από την σχέση 6.

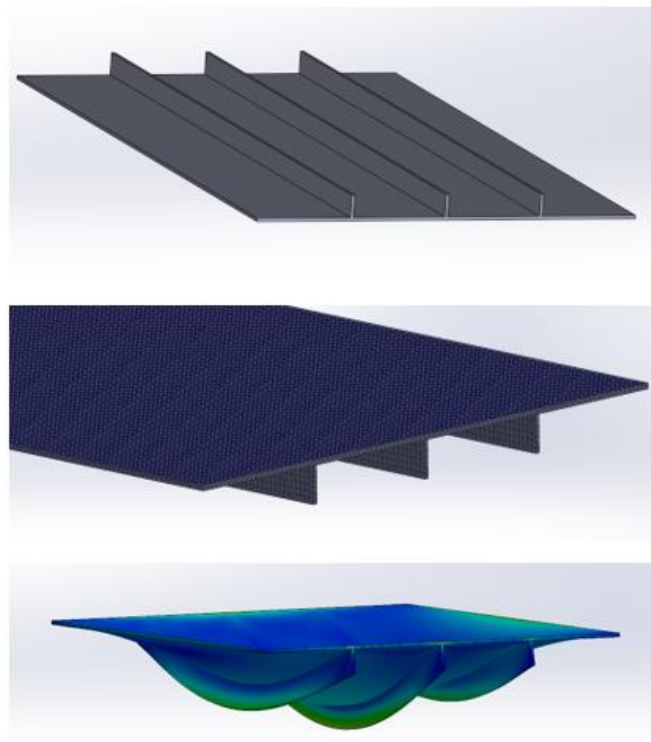
Type of rudder	Thickness of vertical web plates, in mm		Thickness of rudder plating, in mm	
	Rudder blade without opening	Rudder blade with opening	Rudder blade without opening	Area with opening
Rudder supported by sole piece	1.2 <i>t</i>	1.6 <i>t</i>	1.2 <i>t</i>	1.4 <i>t</i>
Semi-spade and spade rudders	1.4 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	1.3 <i>t</i>	1.6 <i>t</i>

Εικόνα 23: Προσδιορισμός παχών ενισχυτικών που συνδέονται στα χυτά και πλευρικού ελάσματος που τα περιβάλλει. (πηγή: <https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/08/10162619/ur-s10rev7-corr1-1.pdf> )



## 6. Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) είναι μια μέθοδος αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων που χρησιμοποιείται για πάσης φύσεως προβλήματα, όπου η αναλυτική τους λύση είναι πρακτικά αδύνατο να βρεθεί. Προβλήματα αντοχής, ρευστοδυναμικής, μεταφοράς θερμότητας κ. α. είναι τέτοιου είδους προβλήματα, τα οποία αφορούν άμεσα και την ναυπηγική. Τα θεμέλια της μεθόδου τέθηκαν τη δεκαετία του '40 από τους *Alexander Hrennikoff* και *Richard Courant*, οι οποίοι έφεραν στο παρασκήνιο την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου με στοιχεία καθορισμένης γεωμετρίας. Μια δεκαετία αργότερα ο Ιωάννης Αργύρης, δίνει υπόσταση στη μέθοδο, συσχετίζοντας τις μέχρι τότε γνωστές θεωρήσεις. Το 1960, ο *Ray Clough* στη δημοσίευσή του με τίτλο “*The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*”, χρησιμοποιεί για πρώτη φορά τον όρο πεπερασμένα στοιχεία (*finite elements*). Το 1960 κυκλοφορεί το βιβλίο “*The finite element method*”, του *Olgierd Zienkiewicz*. Έως σήμερα το βιβλίο του *Zienkiewicz* καλύπτει ικανοποιητικά το θεωρητικό μέρος της μεθόδου και χρησιμοποιείται ευρέως. Τα πρώτα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων έκαναν την εμφάνισή τους στην αρχή της δεκαετίας του '70 (*ANSYS*, *ABAQUS*, *MSC Nastran*), ωστόσο η αρχική μορφή τους δεν είχε καμία σχέση με αυτή που γνωρίζουμε σήμερα. Αρχικά, ο ορισμός του προβλήματος γινόταν μέσω κώδικα που συνέτασσε ο χρήστης. Αντίθετα σήμερα, κάθε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων έχει αναπτύξει το δικό του, φιλικό ως προς τον χρήστη, περιβάλλον εργασίας. Οι βασικοί πυλώνες που οδηγούν στην επίλυση των προβλημάτων, στα σύγχρονα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι τρεις. Αρχικά, γίνεται κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου της γεωμετρίας που βρίσκεται υπό μελέτη. Έπειτα, γίνεται διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων καθορισμένων διαστάσεων (δημιουργία πλέγματος). Τέλος, γίνεται η επίλυση του εκάστοτε προβλήματος.



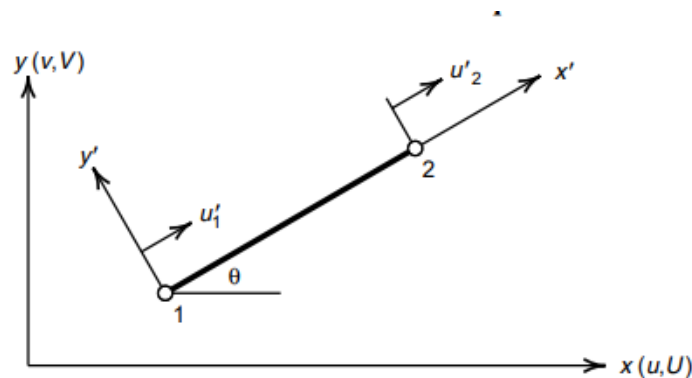
Εικόνα 24: Γεωμετρία ενισχυμένης πλάκας (πάνω), δημιουργία πλέγματος (μέση), εύρεση τασικού πεδίου(κάτω).

## Βασικές έννοιες μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

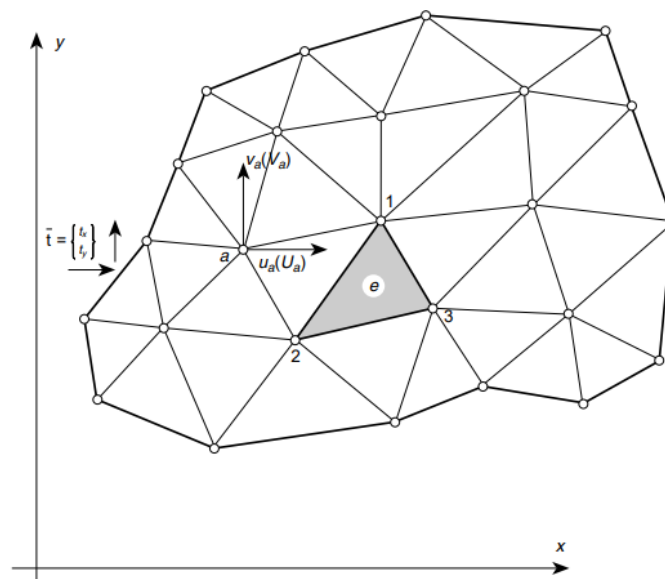
- Στοιχείο (*element*): ένα ιδεατό μέρος (επιφάνεια ή στερεό), πεπερασμένου μεγέθους, της συνολικής κατασκευής.
- Κόμβος (*node*): τα σημεία της κατασκευής στα οποία γίνεται η ένωση των στοιχείων.

Η λύση ενός προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας τα παρακάτω πέντε βήματα.

- 1) Διακριτοποίηση της γεωμετρίας: Σε αυτό το βήμα ουσιαστικά χωρίζεται η γεωμετρία του προβλήματος σε έναν διακριτό αριθμό στοιχείων πεπερασμένου μεγέθους. Ανάλογα με τη γεωμετρία, και το είδος του προβλήματος επιλέγεται το στοιχείο με το οποίο θα γίνει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Για παράδειγμα, για την επίλυση ενός δικτύματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγεται ένα σύνολο στοιχείων από την οικογένεια των ραβδόμορφων στοιχείων (εικόνα 25). Εκτός από στοιχεία δύο διαστάσεων υπάρχουν και στοιχεία τριών διαστάσεων. Σε κάθε κόμβο της διακριτοποιημένης γεωμετρίας αντιστοιχεί ένας αριθμός κομβικών παραμέτρων (μετατοπίσεις και στροφές).



Εικόνα 25: Στοιχείο ράβδου. (πηγή: <https://books.google.gr/books?id=YocoaH8lnx8C>)



Εικόνα 26: Διακριτοποίηση γεωμετρίας. (πηγή: <https://books.google.gr/books?id=YocoaH8lnx8C>)

- 2) Προσδιορισμός μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο: Εφόσον σε ένα πραγματικό πρόβλημα δεν είναι δυνατή η εύρεση των μετατοπίσεων με αναλυτικό τρόπο, είναι αναγκαία η χρήση μιας προσεγγιστικής μεθόδου. Επομένως, γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις σε ορισμένους κόμβους με την κατάλληλη παρεμβολή υπολογίζονται και οι μετατοπίσεις στους υπολοίπους κόμβους ενός στοιχείου. Η διακριτοποίηση του προβλήματος έχει άμεσα σχέση με την ακριβέστερη προσέγγιση των μετατοπίσεων. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί, τόσο πιο μικρό θα είναι το σφάλμα της παρεμβολής. Ωστόσο, αυξάνει η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς.
- 3) Υπολογισμός των κομβικών φορτίων και τα μητρώα ακαμψίας: Επόμενο βήμα αποτελεί η εύρεση των τάσεων και των παραμορφώσεων γνωρίζοντας τις κομβικές μετατοπίσεις. Κάνοντας εφαρμογή της αρχής των δυνατών έργων για κάθε στοιχείο της κατασκευής εισάγοντας ως εξωτερική φόρτιση του εκάστοτε στοιχείου τις τάσεις από την υπόλοιπη κατασκευή, υπολογίζονται οι κομβικές δυνάμεις. Κατά τον ίδιο τρόπο γίνεται υπολογισμός του μητρώου ακαμψίας του εκάστοτε στοιχείου.
- 4) Υπολογισμός συνολικού μητρώου ακαμψίας: Με εφαρμογή της αρχής των δυνατών έργων για το σύστημα συνολικά μπορεί να προκύψει το συνολικό μητρώο ακαμψίας.
- 5) Επίλυση του συστήματος ακαμψίας και υπολογισμός μεγεθών: Εφόσον βρεθεί το συνολικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής, γνωρίζοντας τις κομβικές μετατοπίσεις υπολογίζονται εύκολα οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σε κάθε σημείο της κατασκευής.

## 7. Περιγραφή του υπό μελέτη πηδαλίου

### 7.1. Χαρακτηριστικά πατρικού πλοίου

Το υπό μελέτη πηδάλιο ανήκει σε πλοίο τύπου *bulk carrier* 37650 [DWT] με τα εξής στοιχεία:

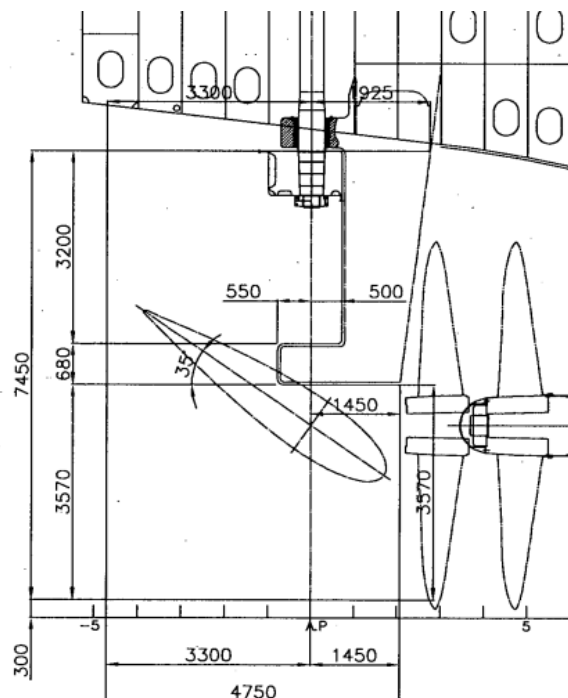
- Μήκος μεταξύ καθέτων:  $L_{bp}=175$  [m]
- Μήκος υπολογισμών (από κανονισμούς):  $0.97 \cdot L_{wl}=173.34$  [m]
- Πλάτος:  $B=30$  [m]
- Βύθισμα σχεδίασης:  $T=10.1$  [m]
- Βύθισμα αντοχής:  $T=10.6$  [m]
- Συντελεστής γάστρας:  $C_b=0.826$  [-]
- Ταχύτητα υπηρεσίας 13.8 [knots]
- Ταχύτητα δοκιμών 14.8 [knots]

### 7.2. Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πηδαλίου

Ο τύπος του πηδαλίου είναι *semi-spade* με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

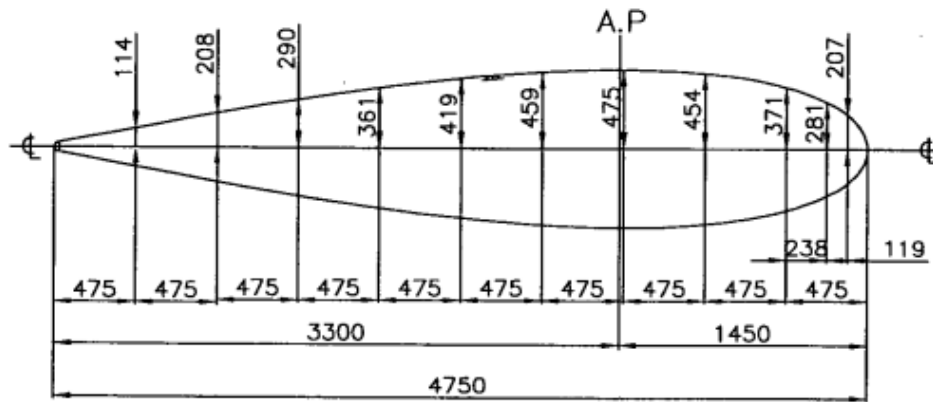
- Προφίλ τύπου NACA0020
- Μέγιστη γωνία στρέψης  $\pm 35^\circ$

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το *profile plan* του υπό μελέτη πηδαλίου

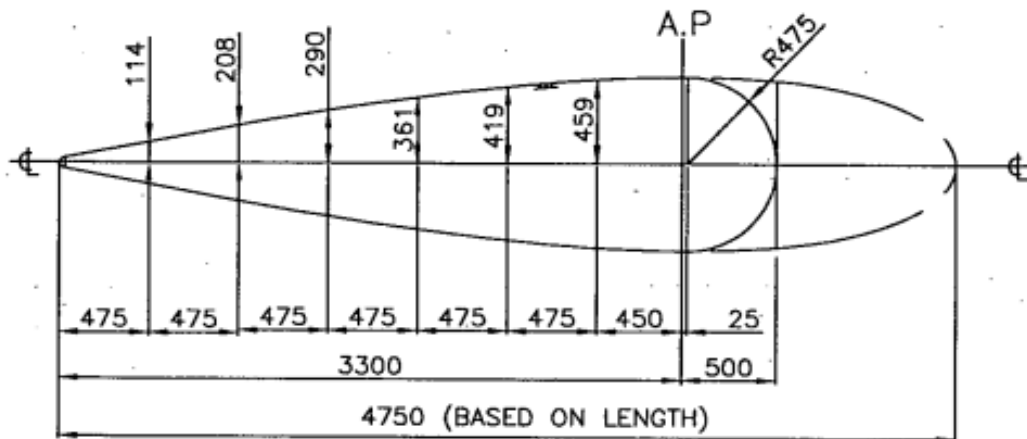


Εικόνα 27: *Center elevation* πηδαλίου

Στις εικόνες 28 και 29 παρουσιάζονται τα δύο προφίλ υδροτομών που χρησιμοποιούνται κατά το ύψος του πηδαλίου. Όπως παρατηρείται, η διαστασιολόγηση τους γίνεται εξωτερικά του περιβλήματος και πρόκειται για συμμετρικές υδροτομές ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (NACA0020).

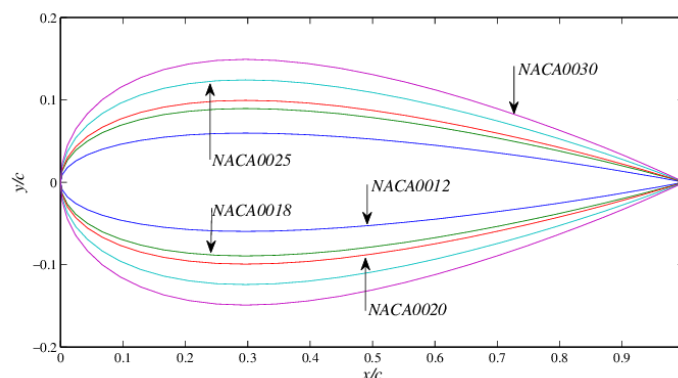


Εικόνα 28: Προφίλ υδροτομής πηδαλίου από το πέδιλο και κάτω



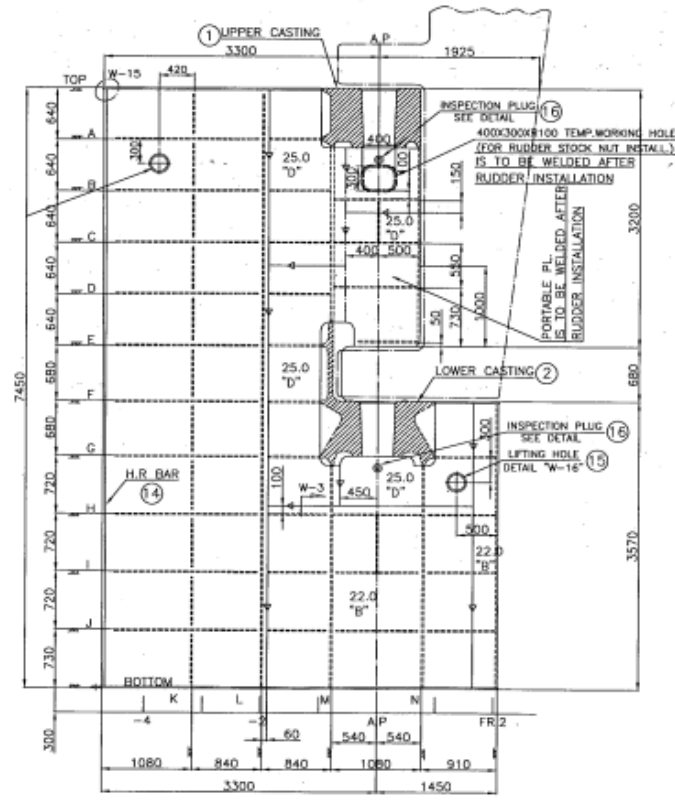
Εικόνα 29: Προφίλ υδροτομής πηδαλίου από το πέδιλο και άνω

Τα δύο τελευταία ψηφία της τυποποίησης της υδροτομής, στην συγκεκριμένη περίπτωση ο αριθμός 20, υποδηλώνει το ποσοστό του μέγιστου πλάτους (950 [mm]) προς το μήκος (4750 [mm]) της χορδής.

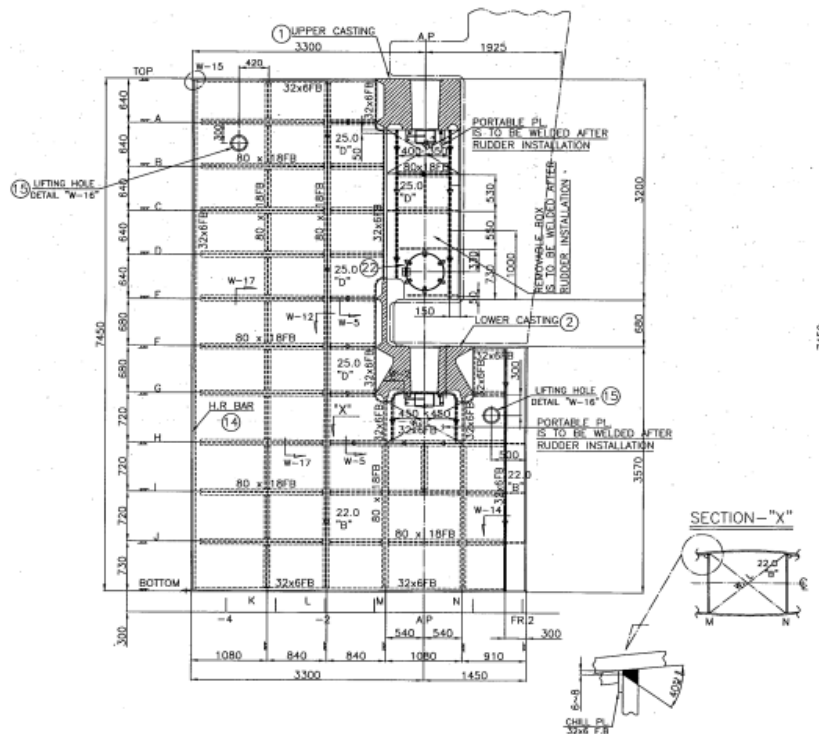


Εικόνα 30: Διάφορες υδροτομές NACA της σειράς 00. (πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/316866136\\_Self-start\\_performance\\_evaluation\\_in\\_Darrieus-type\\_vertical\\_axis\\_wind\\_turbines\\_Methodology\\_and\\_computational\\_tool\\_applied\\_to\\_symmetrical\\_airfoils](https://www.researchgate.net/publication/316866136_Self-start_performance_evaluation_in_Darrieus-type_vertical_axis_wind_turbines_Methodology_and_computational_tool_applied_to_symmetrical_airfoils))

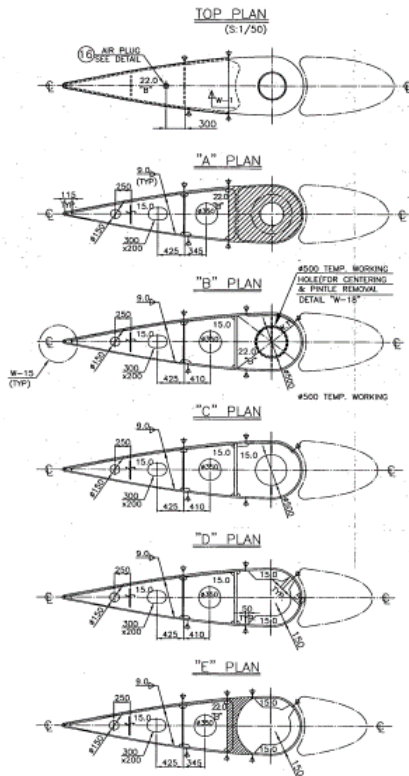
Παρακάτω παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια του υπό μελέτη πηδαλίου. Σε αυτά περιλαμβάνονται κατακόρυφες διαμήκεις τομές (*port side* και *starboard side*), οριζόντιες διαμήκεις τομές καθώς και εγκάρσιες τομές. Τέλος, περιλαμβάνεται το κατασκευαστικό σχέδιο των χυτών τμημάτων του πηδαλίου.



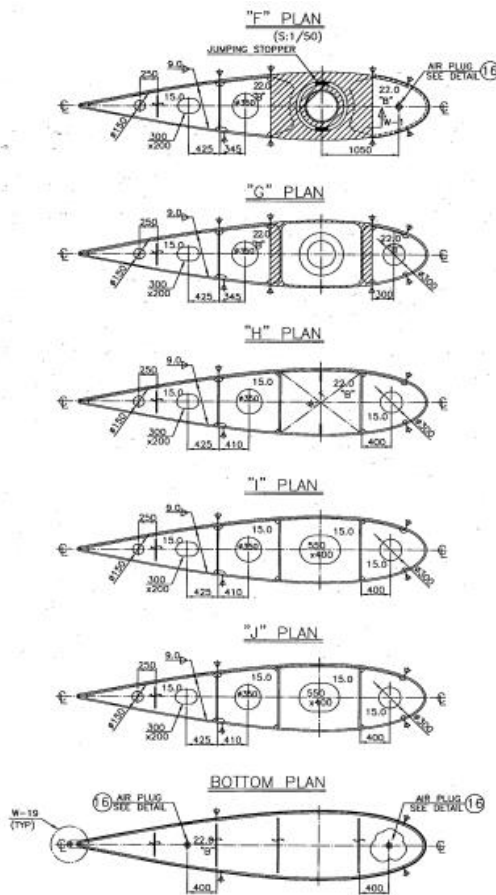
Εικόνα 31: Προφίλ πηδαλίου *STB'D SIDE*



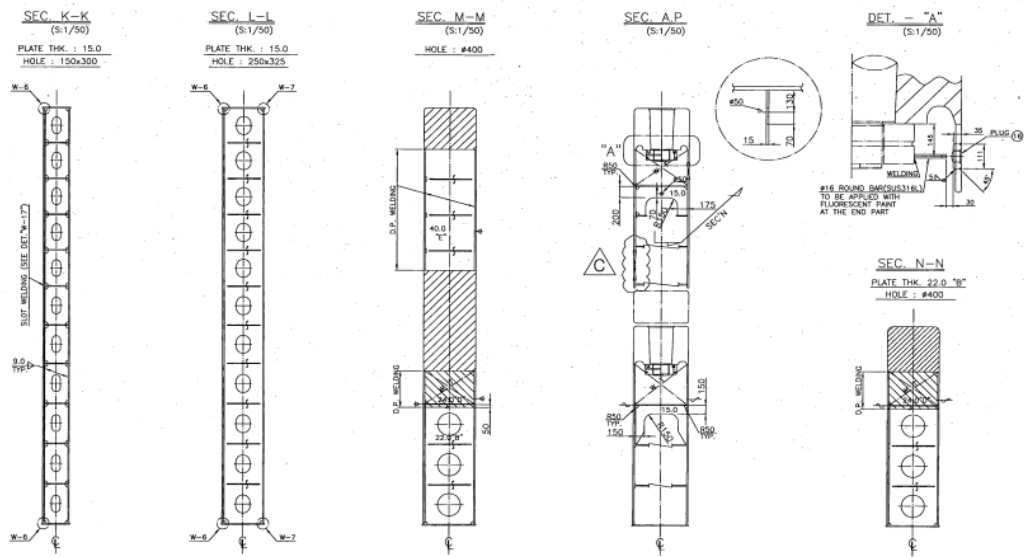
Εικόνα 32: Προφίλ πηδαλίου *PORT SIDE*



Εικόνα 33: Οριζόντιες διαμήκειες τομές πηδαλίου (Top plan-“E”plan)

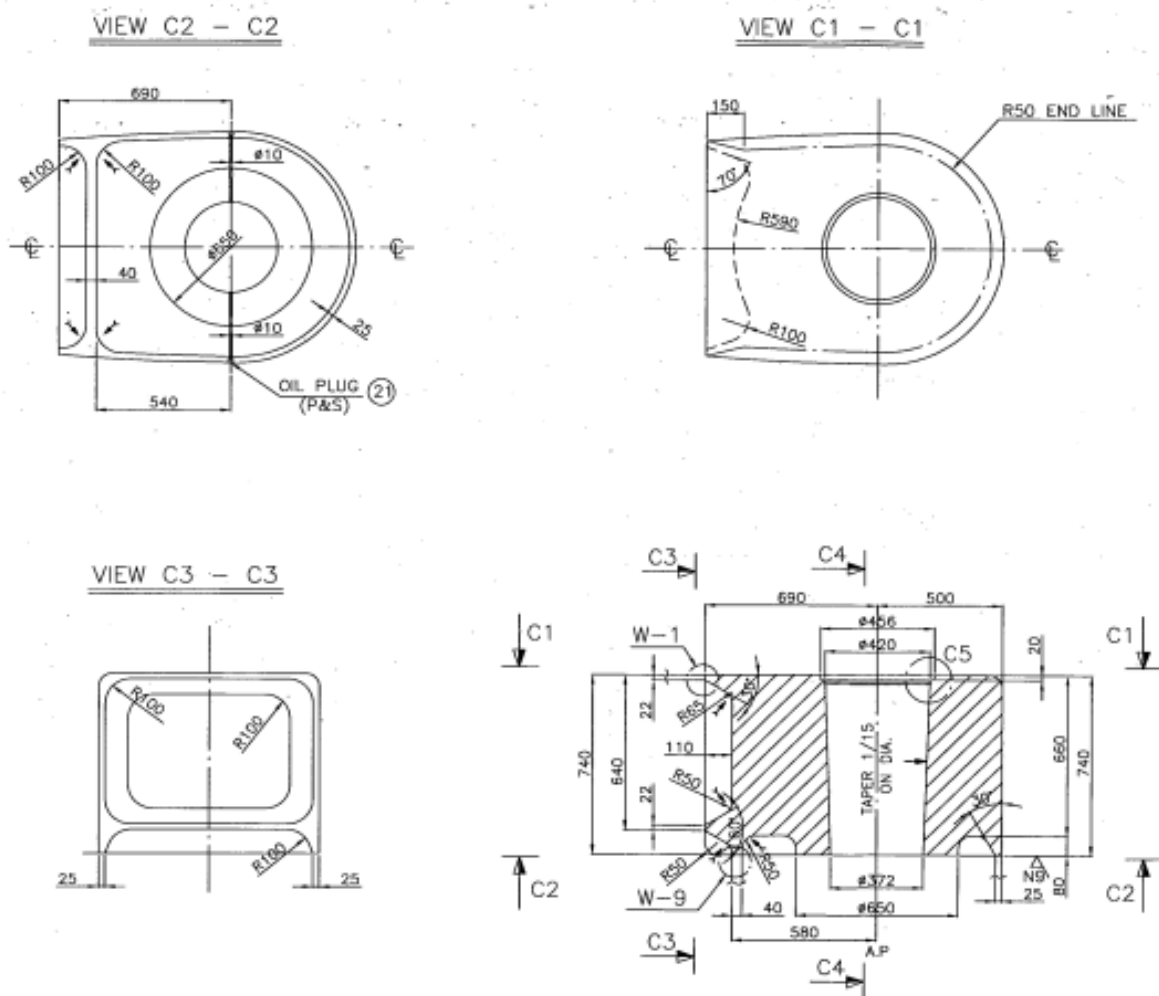


Εικόνα 34: : Οριζόντιες διαμήκειες τομές πηδαλίου (“F” plan-Bottom plan)



Εικόνα 35: Κατακόρυφες εγκάρσιες τομές πηδαλίου

Τέλος, παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια των χυτών τμημάτων του πηδαλίου.



Εικόνα 36: Σχέδιο του upper casting

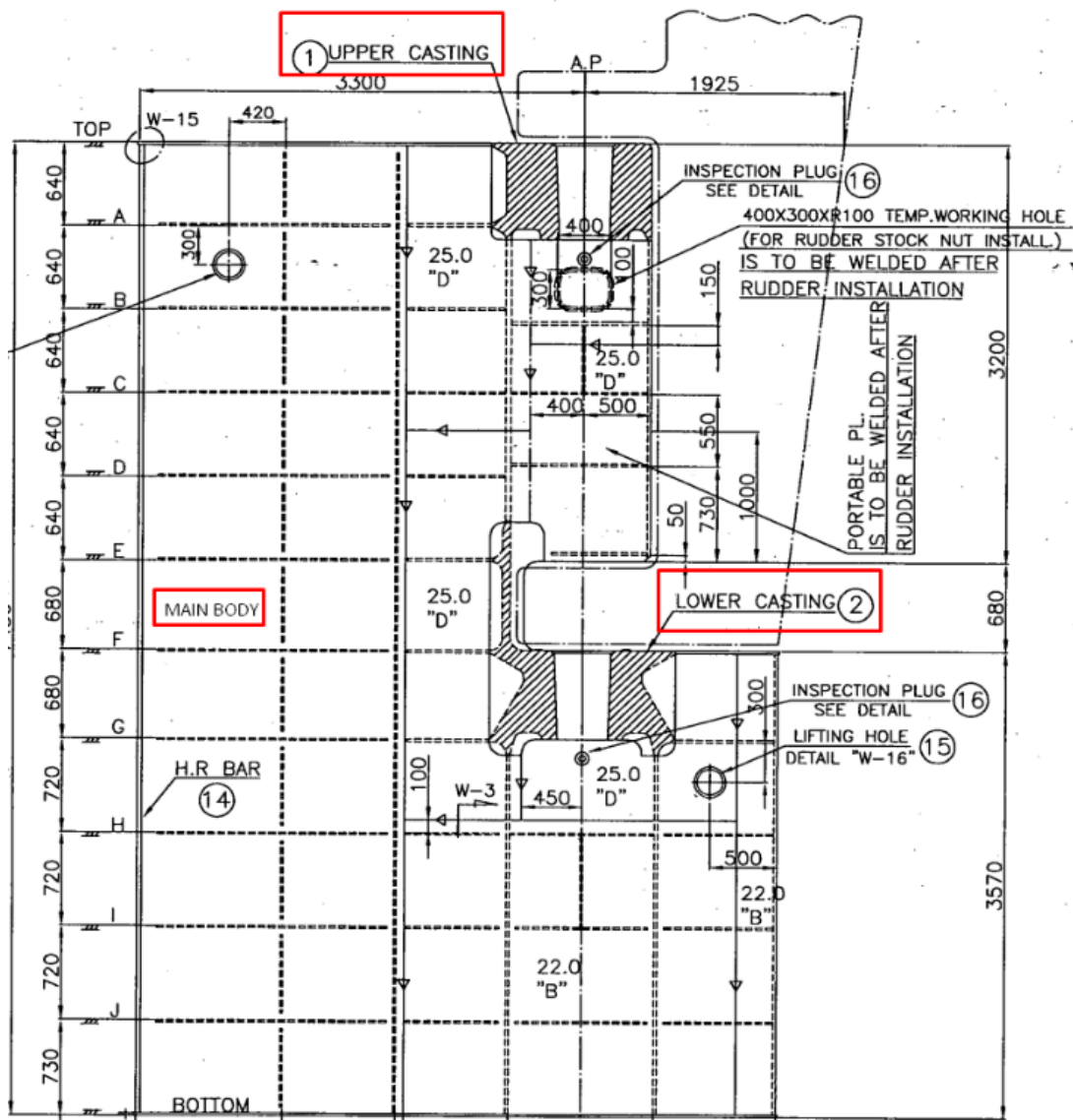




## 8. Επίλυση με την μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων

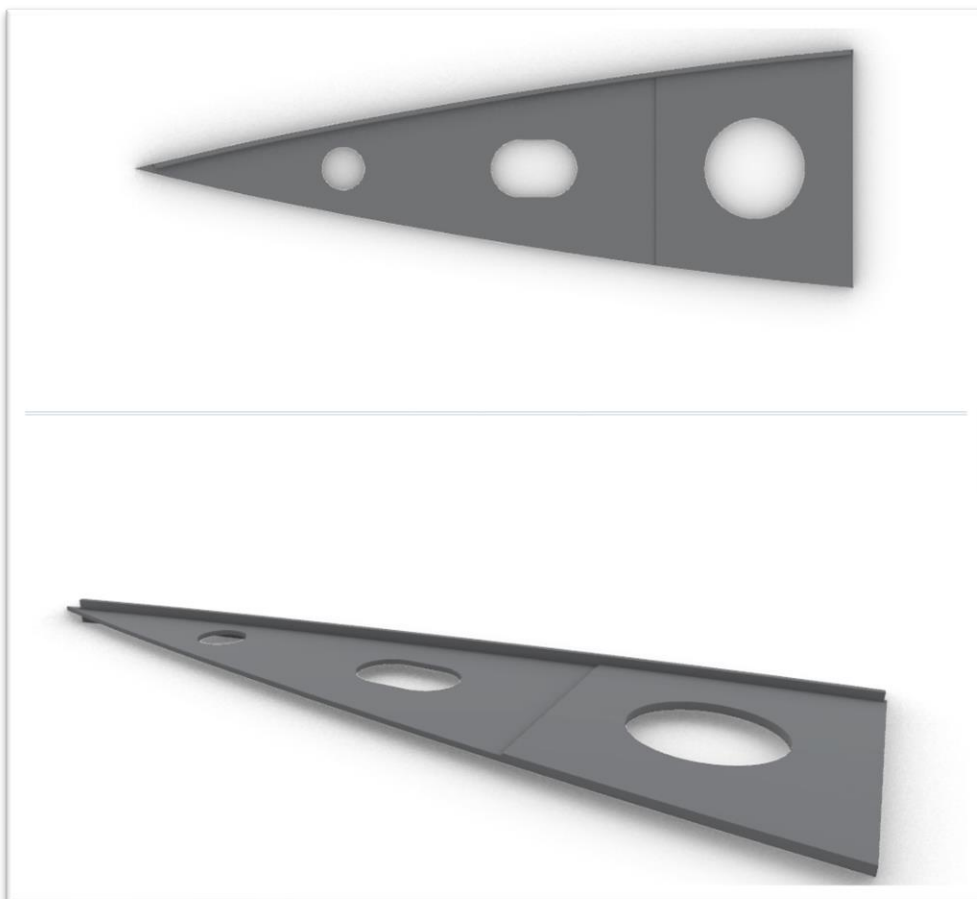
### 8.1. Γεωμετρική μοντελοποίηση

Για την σχεδίαση του μοντέλου θα γίνει τόσο χρήση του προγράμματος *Rhinoceros* όσο και του προγράμματος *SolidWorks*. Το μοντέλο του πηδαλίου θα αποτελείται από τρία επιμέρους κομμάτια, το κύριο σώμα (*main body*), το χυτό στο πάνω τμήμα (*upper casting*) και το χυτό στο κάτω τμήμα (*lower casting*).

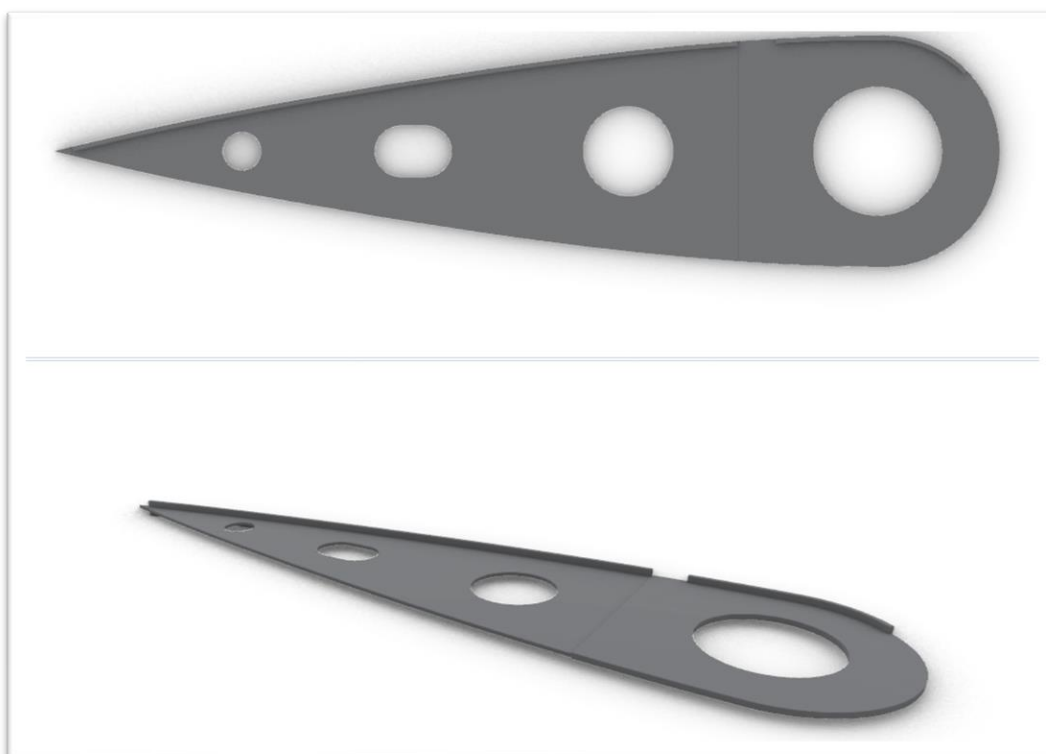


Εικόνα 38: Επιμέρους τμήματα πηδαλίου

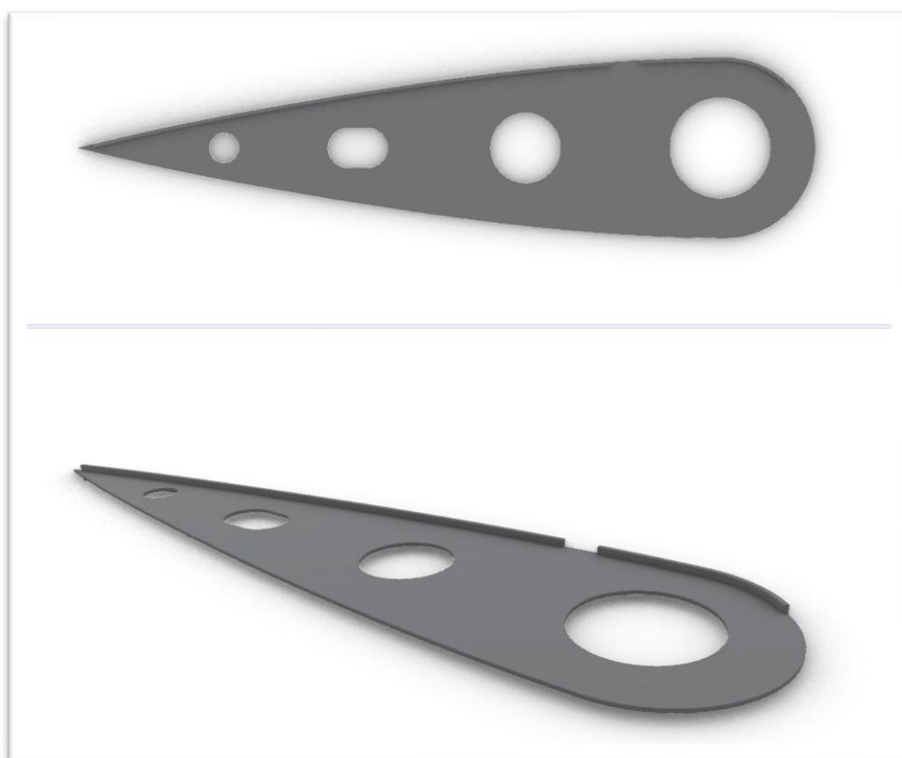
Για την δημιουργία του *main body* αρχικά θα δημιουργήσουμε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros* τα οριζόντια διαμήκη ενισχυτικά (εικόνες 33, 34). Στην παρούσα φάση της σχεδίασης θα αμεληθούν τα εγκάρσια ενισχυτικά καθώς θα δημιουργηθούν σε δεύτερο χρόνο στο μοντέλο. Τα ενισχυτικά θα δημιουργηθούν ως κλειστές πολύ-επιφάνειες (*poly-surfaces*) με πάχη ελασμάτων, τα αναφερόμενα επί του σχεδίου. Για το περίγραμμα των ενισχυτικών θα χρησιμοποιηθούν τα σημεία της υδροτομής όπως παρουσιάζονται στις εικόνες 28, 29.



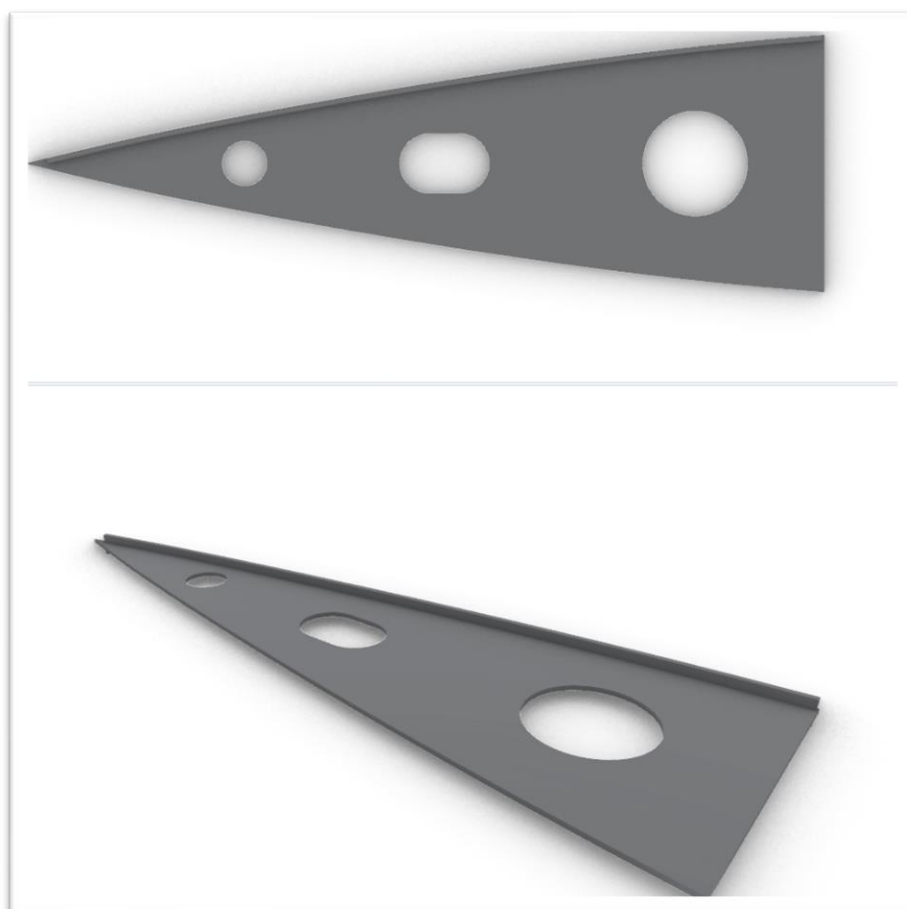
Εικόνα 39: Ενισχυτικό "Α"



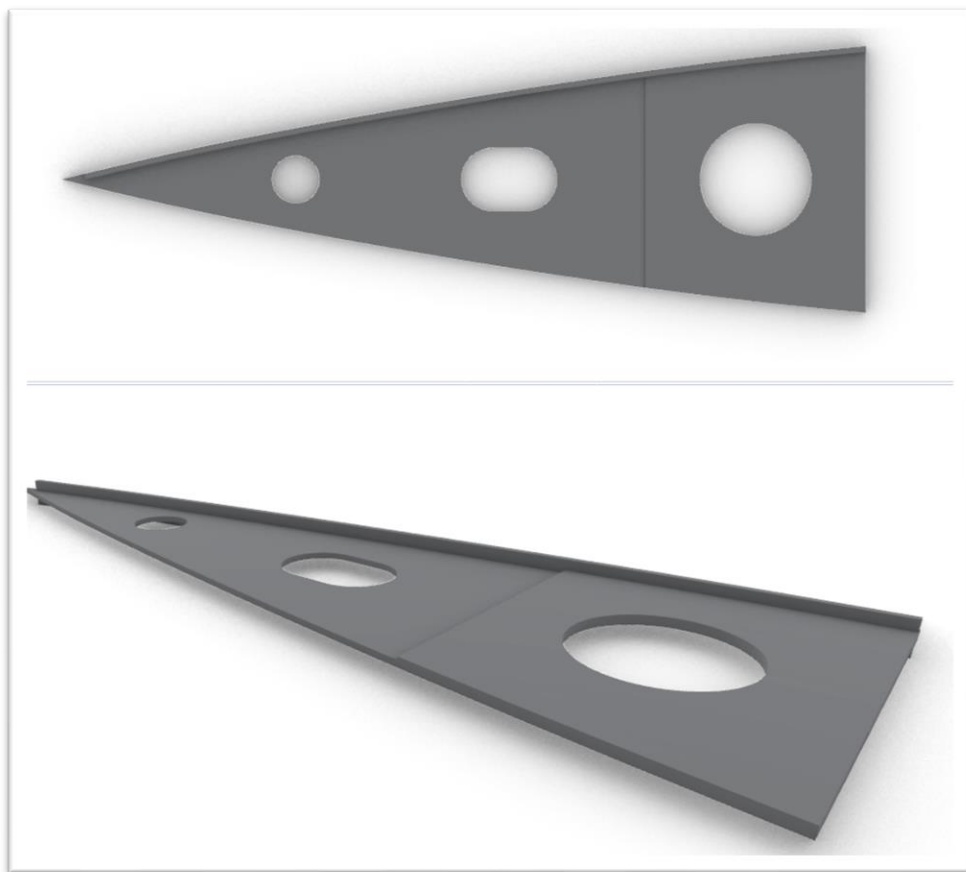
Εικόνα 40: Ενισχυτικό "Β"



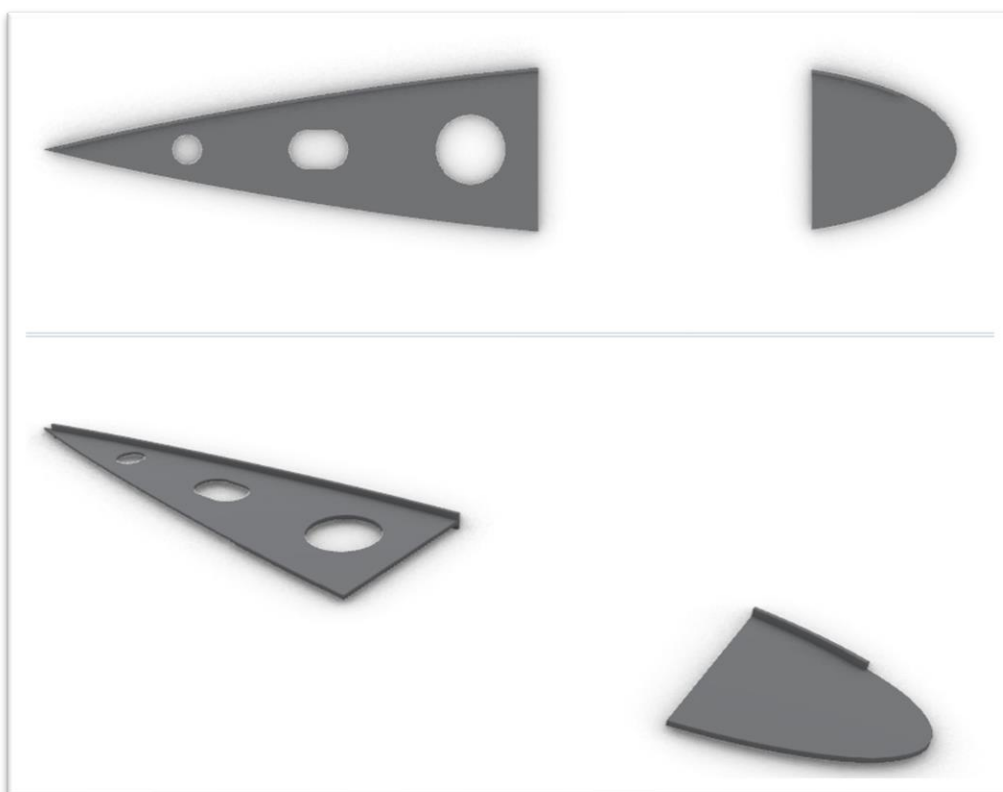
Εικόνα 41: Ενισχυτικό "C"



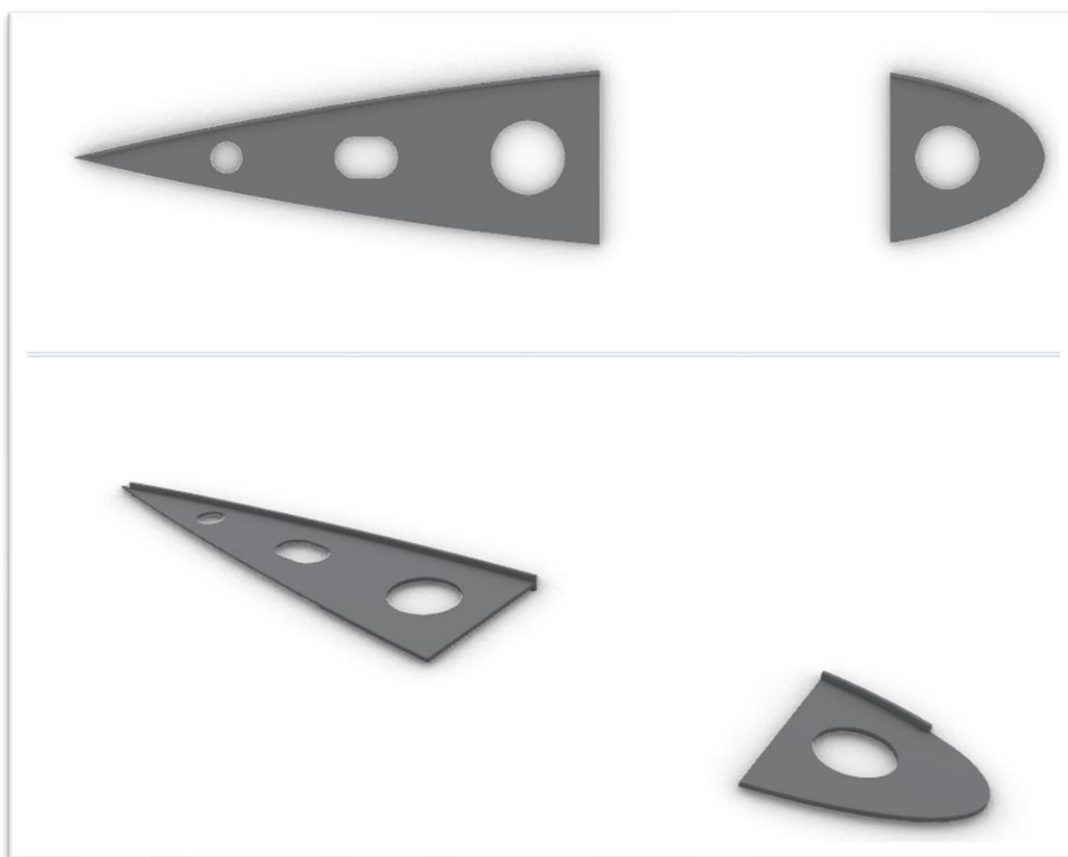
Εικόνα 42: Ενισχυτικό "D"



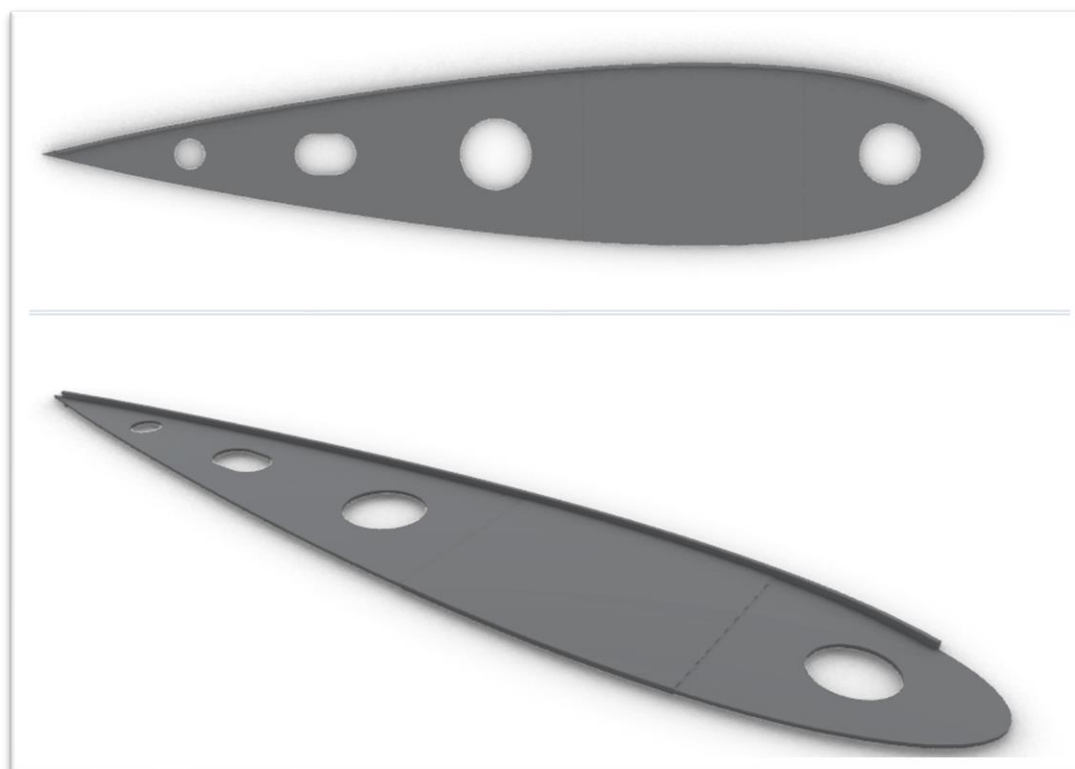
Εικόνα 43: Ενισχυτικό "E"



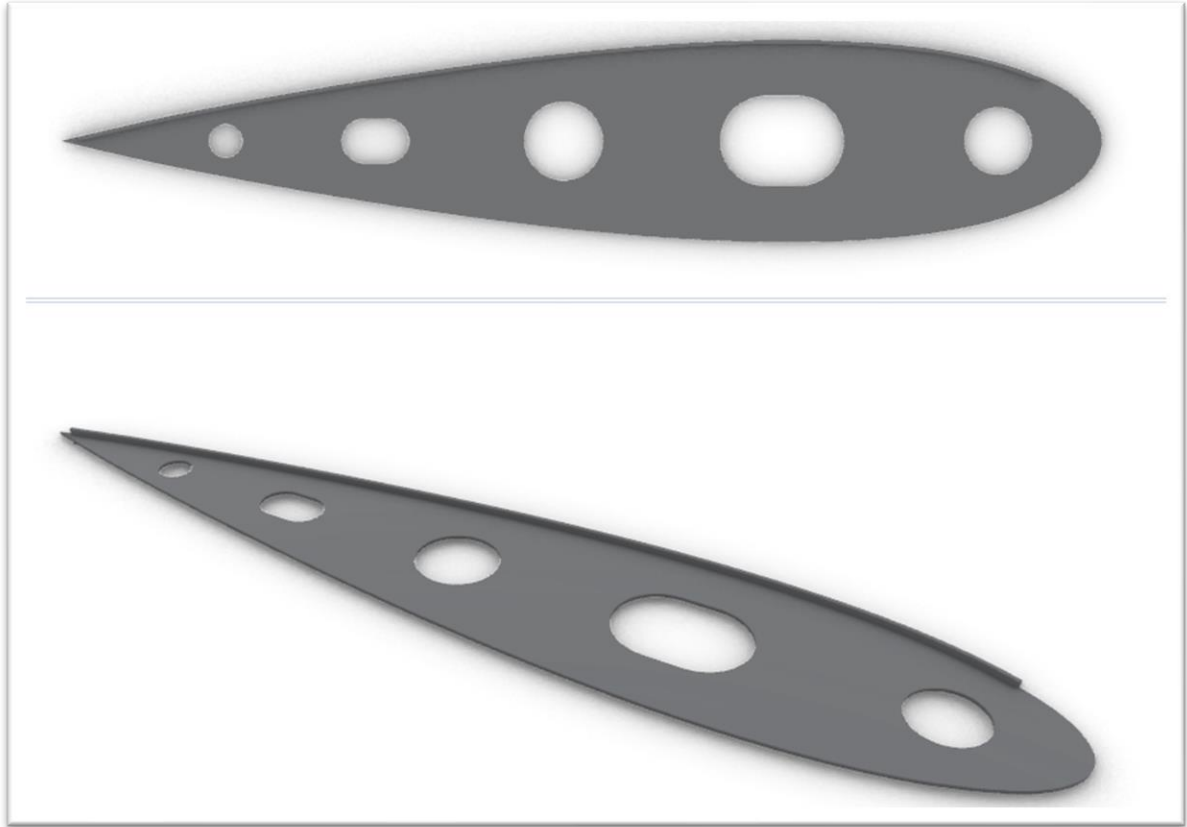
Εικόνα 44: Ενισχυτικό "F"



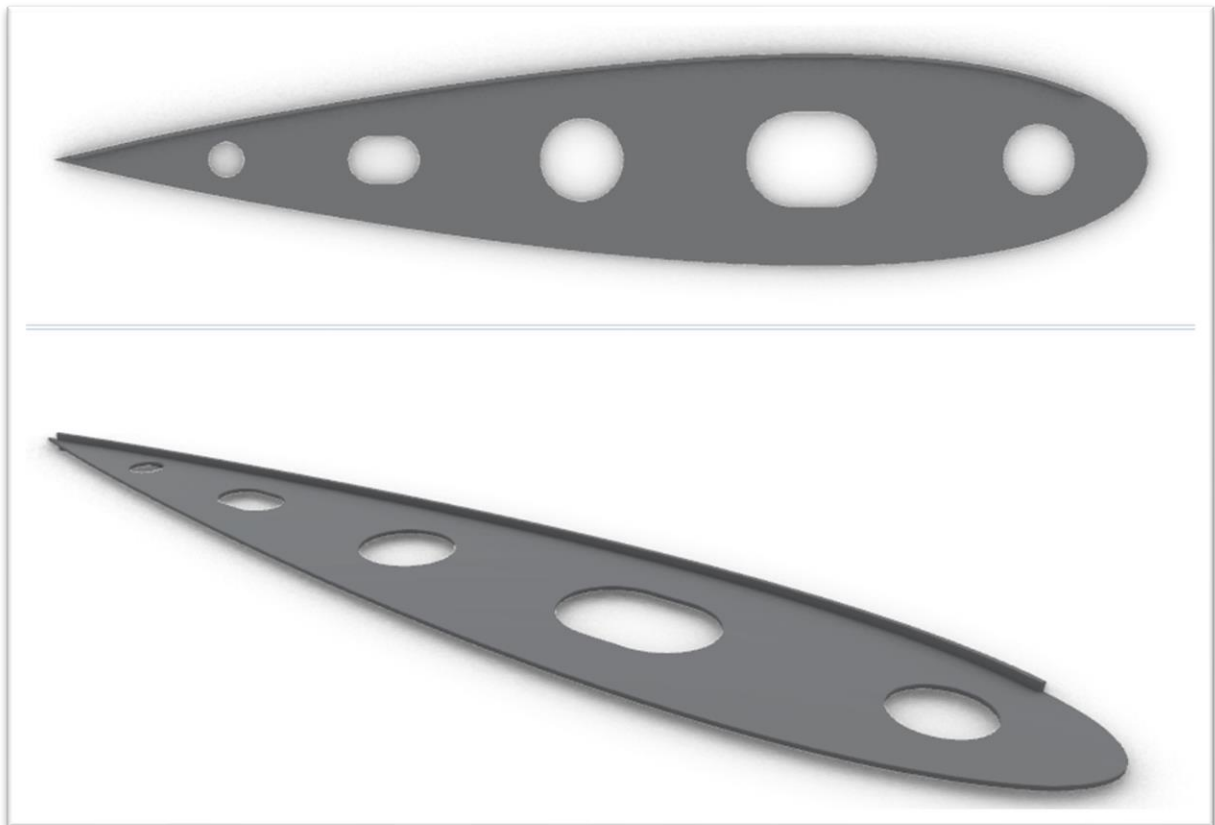
Εικόνα 45: Ενισχυτικό "G"



Εικόνα 46: Ενισχυτικό "H"

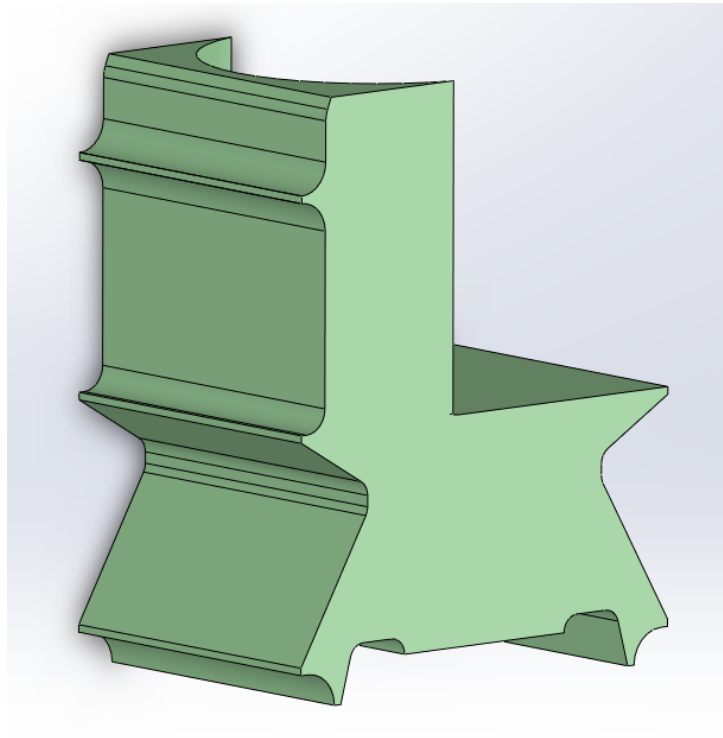


Εικόνα 47: Ενισχυτικό “Γ”



Εικόνα 48: Ενισχυτικό “J”

Για την σχεδίαση των χυτών τμημάτων θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό *SolidWorks*, καθώς πρόκειται για απαιτητικές γεωμετρίες που απαιτούν την χρήση παραμετρικών προγραμμάτων σχεδίασης. Η προσέγγιση των γεωμετριών έγινε όσο το δυνατόν καλύτερα, ωστόσο πραγματοποιήθηκαν ορισμένες παραδοχές.

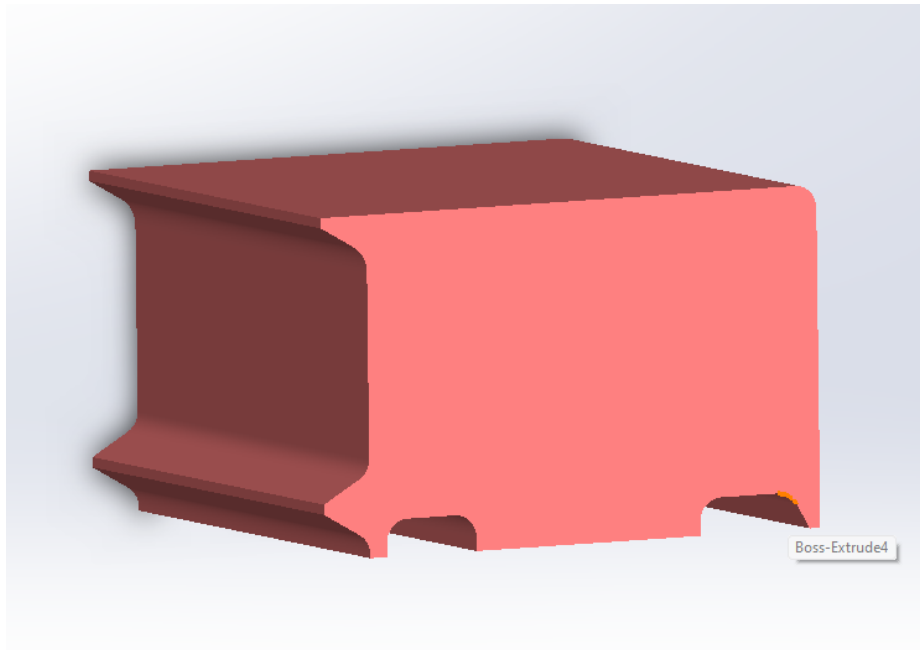


Εικόνα 49: Μοντέλο *lower casting* (τρισεδιάστατη απεικόνιση)

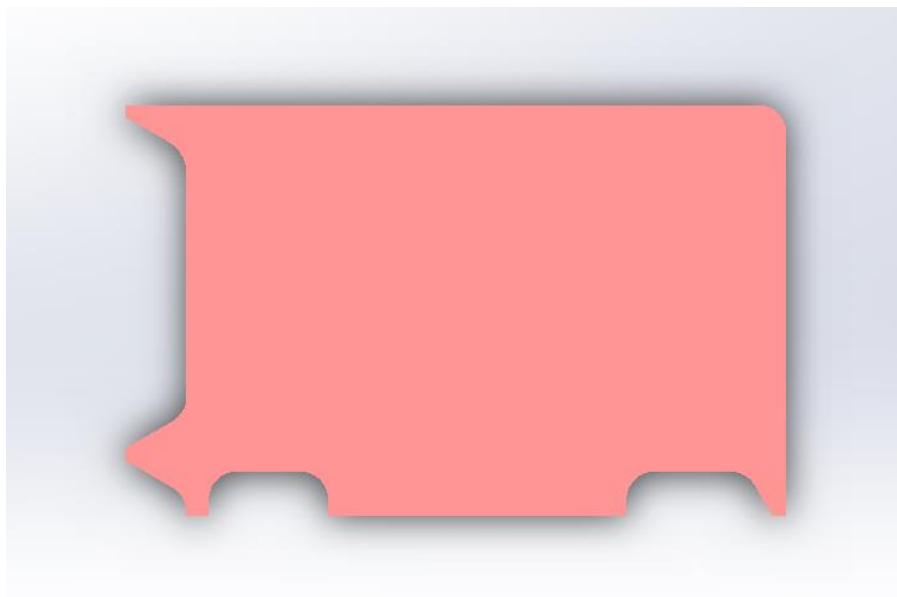


Εικόνα 50: Μοντέλο *lower casting* (πλάγια όψη)





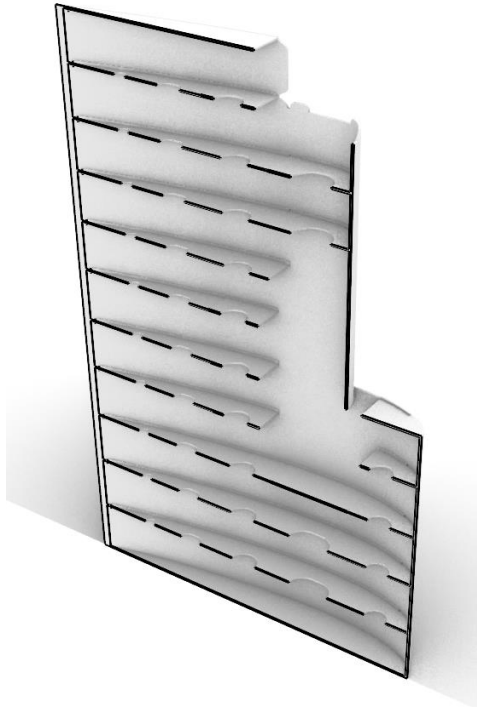
Εικόνα 51: Μοντέλο *upper casting* (τρισδιάστατη απεικόνιση)



Εικόνα 52: Μοντέλο *upper casting* (πλάγια όψη)

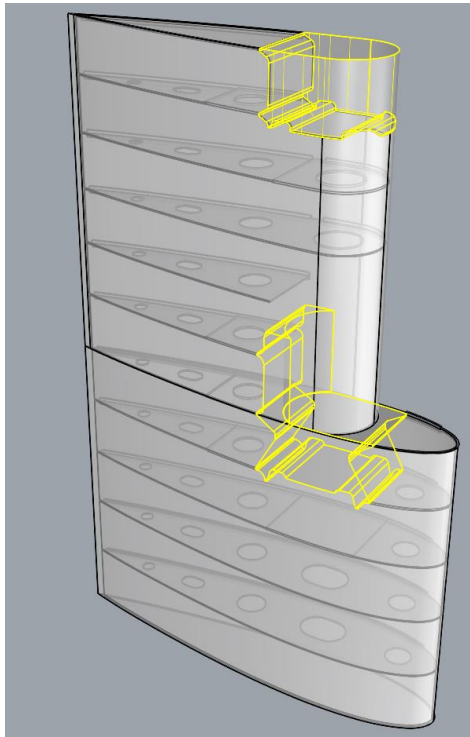
Κατά τον σχεδιασμό των χυτών τμημάτων του πηδαλίου δεν δημιουργήθηκε η οπή για την διέλευση του άξονα του πηδαλίου. Η οπή θα δημιουργηθεί στο τελικό μοντέλο εφόσον γίνει η συναρμογή των επιμέρους τμημάτων.

Εφόσον έχουν δημιουργηθεί τα οριζόντια διαφράγματα, θα δημιουργηθεί το κέλυφος του πηδαλίου στο πρόγραμμα *Rhinoceros*. Έπειτα, θα τα τοποθετήσουμε σε αυτό στην κατάλληλη θέση κατά το ύψος του πηδαλίου. Ομοίως με τα ενισχυτικά, το κέλυφος θα είναι μια κλειστή πολύ-επιφάνεια με πάχη ελασμάτων τα αναφερόμενα επί του σχεδίου. Εφόσον γίνει η συναρμογή των οριζοντίων ενισχυτικών με το κέλυφος, θα δημιουργηθεί μια ενιαία κλειστή πολύ-επιφάνεια (εντολή: *Boolean Union*). Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται το σώμα που έχουμε δημιουργήσει ως έναν ενιαίο όγκο. Στην εικόνα 53 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα.



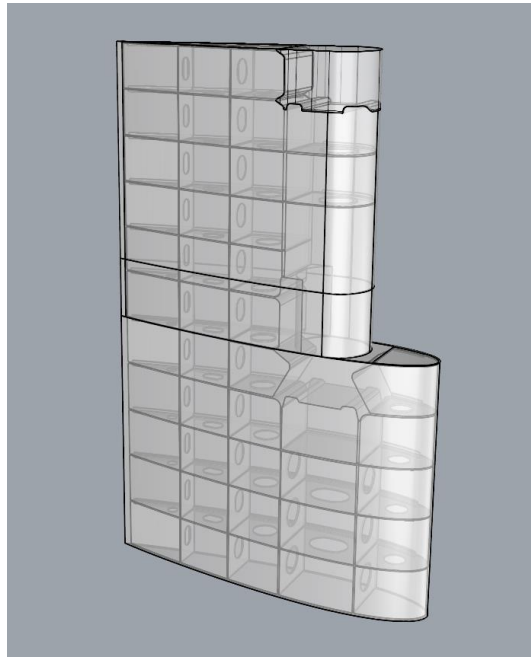
Εικόνα 53: Τομή μοντέλου κελύφους- οριζοντίων διαφραγμάτων ως προς κεντρικό διάμηκες επίπεδο

Επόμενο στάδιο της σχεδίασης αποτελεί η συναρμογή των χυτών μοντέλων με το κύριο σώμα του πηδαλίου. Δεδομένης της σωστής διαστασιολόγησης των επιμέρους τμημάτων ευκολά προκύπτει το συνολικό μοντέλο της εικόνας 54.



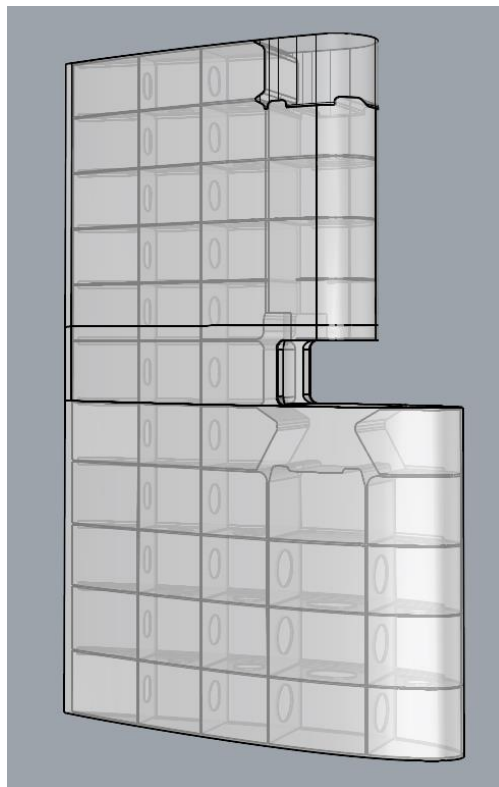
Εικόνα 54: Μοντέλο πηδαλίου μαζί με τα χυτά τμήματα

Η σχεδίαση των εγκαρσίων ενισχυτικών πραγματοποιήθηκε επί του έως τώρα σχεδιασμένου μοντέλου. Τα πάχη των εγκαρσίων διαφραγμάτων και η διάταξη των οπών έγιναν όπως ορίζει το κατασκευαστικό σχέδιο της εικόνας 35.

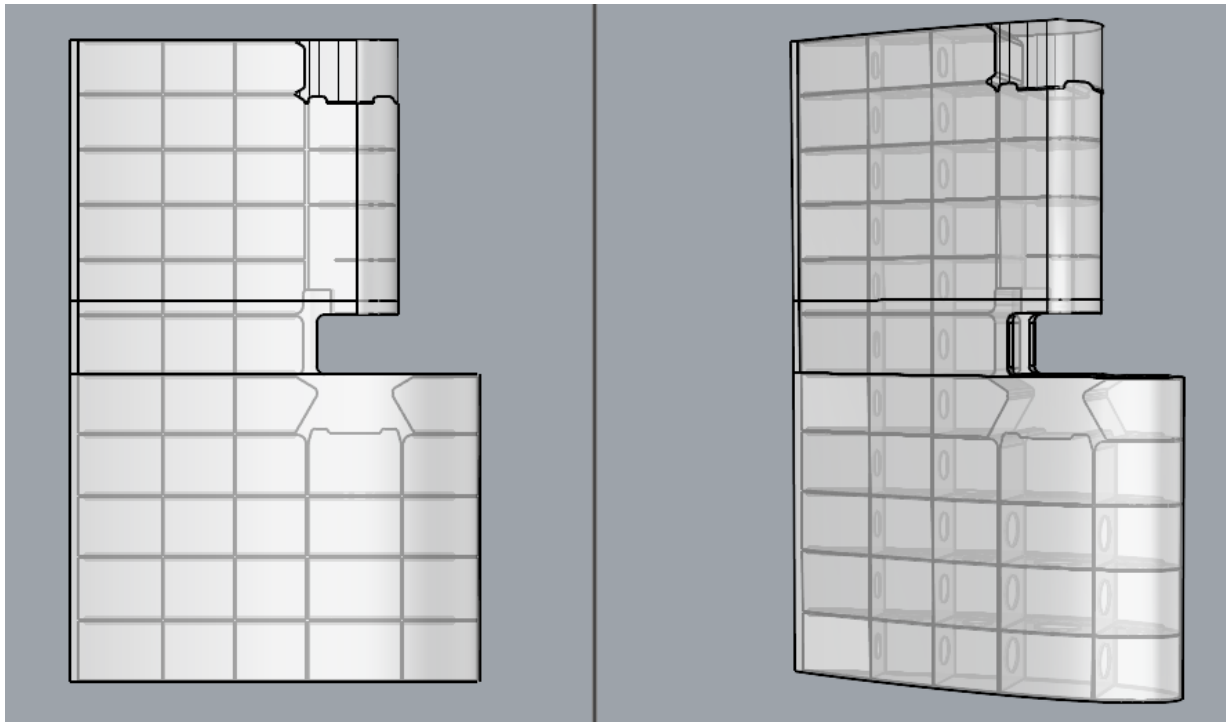


Εικόνα 55: Μοντέλο πηδαλίου με εγκάρσια ενισχυτικά

Για την ολοκλήρωση του τρισδιάστατου μοντέλου υπολείπεται η διαμόρφωση του κελύφους στην περιοχή που εισέρχεται το ποδόστημα του πλοίου. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 56.



Εικόνα 56: Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο πηδαλίου



Εικόνα 57: Πλάγια όψη μοντέλου (αριστερά) και τρισδιάστατη αναπαράσταση μοντέλου (δεξιά)

Το τελικό μοντέλο έχει δημιουργηθεί με τρεις διαφορετικές κλειστές επιφάνειες, δηλαδή το σχεδιαστικό πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τρεις διαφορετικούς όγκους (χυτά και κύριο σώμα). Ο λόγος που δεν έγινε ενοποίηση των τριών όγκων είναι διότι τα επιμέρους στοιχεία αποτελούνται από υλικά διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Η διαφοροποίηση των όγκων θα βοηθήσει στον ευκολότερο ορισμό του κάθε υλικού κατά την διαδικασία της μελέτης αντοχής της κατασκευής.

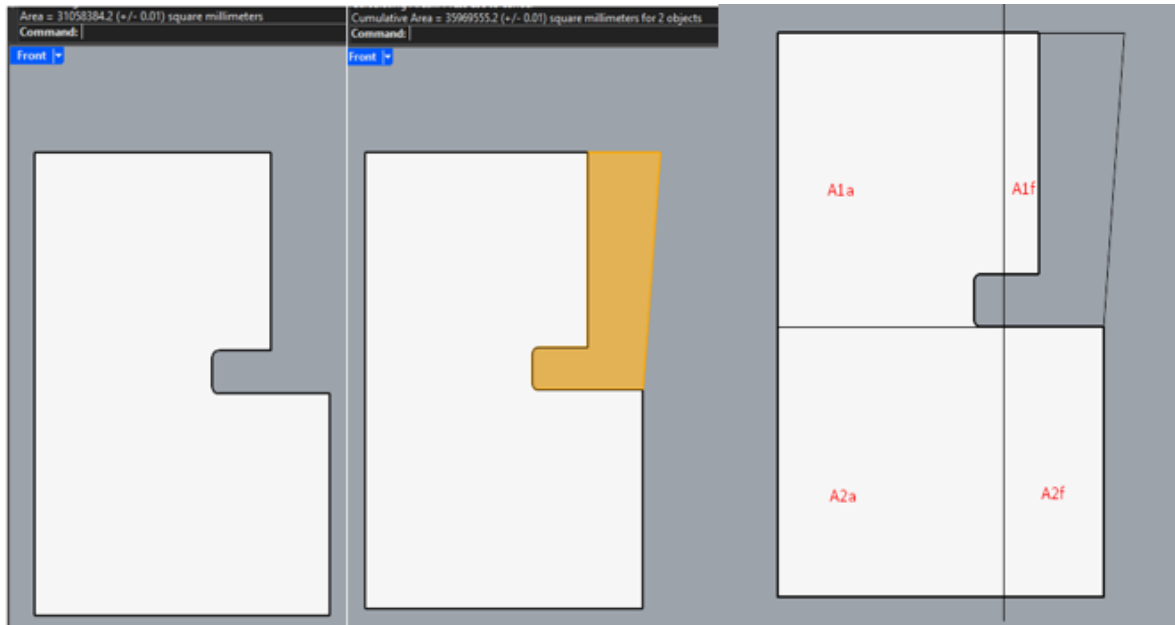
## 8.2. Υπολογισμός φορτίσεων πηδαλίου κατά το πρότυπο UR S10

### Υπολογισμός του εμβαδού των προβεβλημένων επιφανειών πηδαλίου

Το εμβαδόν της προβεβλημένης επιφάνειας του πηδαλίου χωρίς την προβεβλημένη επιφάνεια του ποδοστήματος υπολογίστηκε από το τρισδιάστατο μοντέλο ως  $A=31.058 \text{ [m}^2\text{]}$ . Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίστηκε και το εμβαδόν συμπεριλαμβανομένου του ποδοστήματος ως  $A_t=35.969 \text{ [m}^2\text{]}$ . Για τον υπολογισμό της ροπής απαιτείται και η εύρεση των εμβαδών  $A_{1,2f}$  και  $A_{1,2a}$  (εικόνα 58). Τα εμβαδά υπολογίστηκαν ως:

- $A_{1a}= 12.504 \text{ [m}^2\text{]}$
- $A_{1f}= 1.597 \text{ [m}^2\text{]}$
- $A_{2a}= 11.781 \text{ [m}^2\text{]}$
- $A_{2f}= 5.177 \text{ [m}^2\text{]}$

Αθροίζοντας τα παραπάνω εμβαδά προκύπτει το εμβαδόν  $A$ . Οι υπολογισμοί όλων των παραπάνω επιφανειών έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος *Rhinoceros*, χρησιμοποιώντας το περιγράμμα του τρισδιάστατου μοντέλου.



Εικόνα 58: Προβλεβλημένη επιφάνεια πηδαλίου (αριστερά), προβλεβλημένη επιφάνεια πηδαλίου και ποδοστήματος (μέση), χωρισμός επιφανειών κατά τον κανονισμό του IACS (UR S 10) δεξιά.

### Υπολογισμός δύναμης πηδαλίου στην κατάσταση *ahead*

Η δύναμη στην κατάσταση *ahead* υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σχέση 1, αντικαθιστώντας όπου  $V$  την μέγιστη ταχύτητα υπηρεσίας. Προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα.

$C_{R(ahead)} = K_1 * K_2 * K_3 * 132 * A * V^2 = 1166598.412$  [N], (αναλυτικός υπολογισμός στον πίνακα 1 του παραρτήματος).

### Υπολογισμός δύναμης πηδαλίου στην κατάσταση *astern*

Η δύναμη του πηδαλίου στην κατάσταση *astern* υπολογίζεται από την σχέση 1, αντικαθιστώντας όπου  $V = 0.5 * V_{ahead}$ . Προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα.

$C_{R(astern)} = K_1 * K_2 * K_3 * 132 * A * V^2 = 291649.603$  [N], (αναλυτικός υπολογισμός στον πίνακα 1 του παραρτήματος).

### Υπολογισμός ροπής πηδαλίου στην κατάσταση *ahead*

Η ροπή του πηδαλίου στην κατάσταση *ahead* υπολογίζεται από τη σχέση 3. Η σχέση υπολογισμού αναφέρεται αποκλειστικά σε ημι-ζυγοσταθμισμένα πηδάλια. Προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα.

$Q_{R(ahead)} = C_{R1} * r_1 + C_{R2} * r_2 = 511030.209$  [N\*m], (αναλυτικός υπολογισμός στον πίνακα 2 του παραρτήματος).

### Υπολογισμός ροπής πηδαλίου στην κατάσταση *astern*

Ο υπολογισμός της ροπής του πηδαλίου στην κατάσταση *astern* γίνεται από τη σχέση 3. Η διαφοροποίηση σε σχέση με τον υπολογισμό της ροπής στην κατάσταση *ahead*, βρίσκεται στον συντελεστή  $\alpha$ , αλλά και στη δύναμη του πηδαλίου ( $C_{R(astern)}$ ).

$Q_{R(\text{astern})} = C_{R1} * r_1 + C_{R2} * r_2 = 543407.092 \text{ [N*m]}$ , (αναλυτικός υπολογισμός στον πίνακα 2 του παραρτήματος).

Στην εικόνα 59, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών των δυνάμεων και των ροπών του πηδαλίου σύμφωνα με τον κανονισμό του *IACS (UR S 10)*.

Κατάσταση Λειτουργίας	Δύναμη Πηδαλίου [N]	Ροπή Πηδαλίου [N*m]
AHEAD	1166598.412	511030.209
ASTERN	291649.603	543407.092

Εικόνα 59: Δυνάμεις και ροπές πηδαλίου

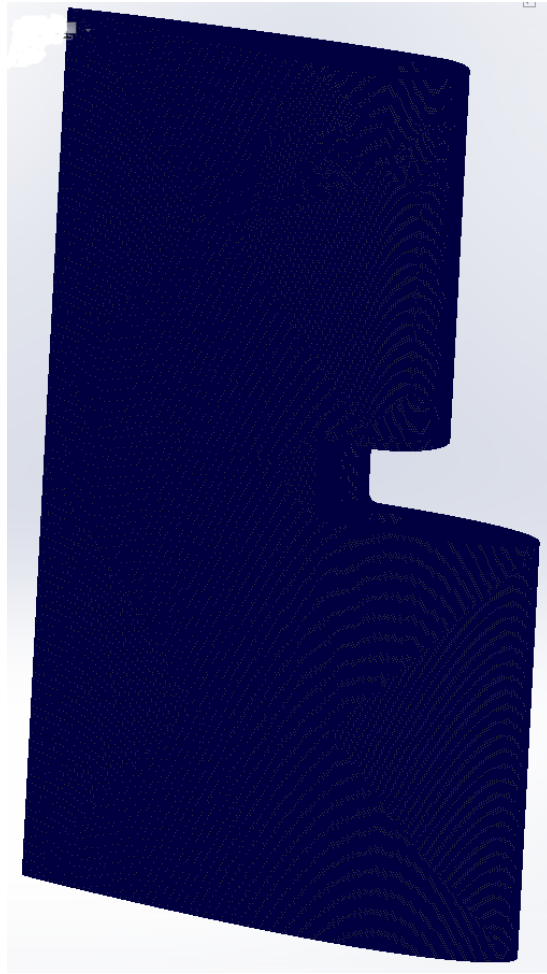
### 8.3. Υπολογισμός αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η αντοχή της κατασκευής, δηλαδή ο υπολογισμός, θα εξεταστεί με τη βοήθεια του προγράμματος *SolidWorks (simulation)*. Προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να εκτελεστούν τα παρακάτω βήματα.

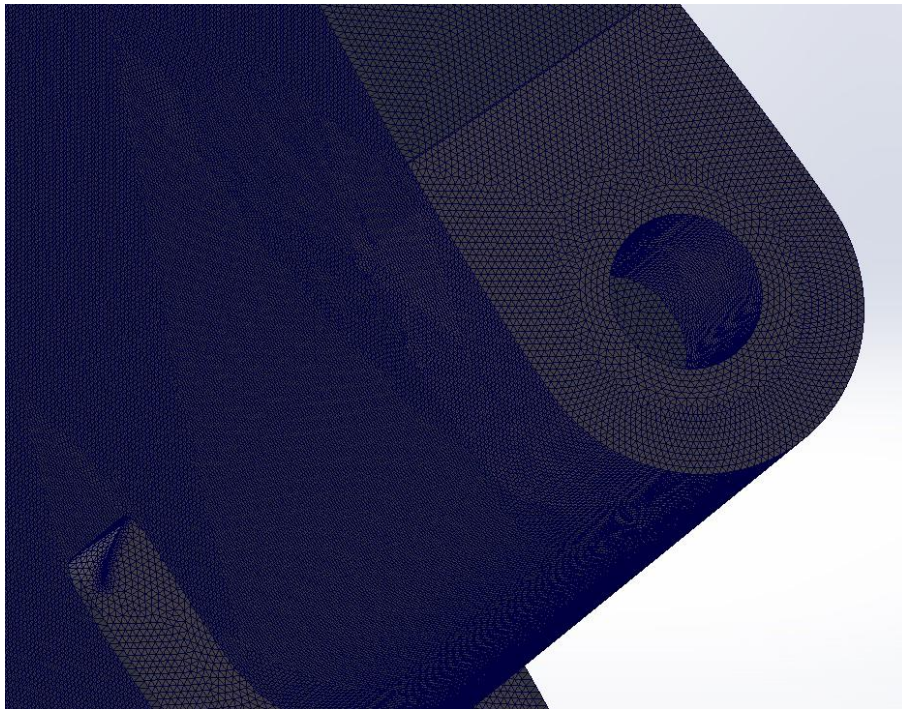
- Διακριτοποίηση κατασκευής (δημιουργία πλέγματος).
- Ορισμός υλικών κατασκευής.
- Ορισμός συνθηκών στήριξης.
- Ορισμός εξωτερικών δυνάμεων, πιέσεων και ροπών.
- Επίλυση του προβλήματος (*Run*).

#### Διακριτοποίηση κατασκευής

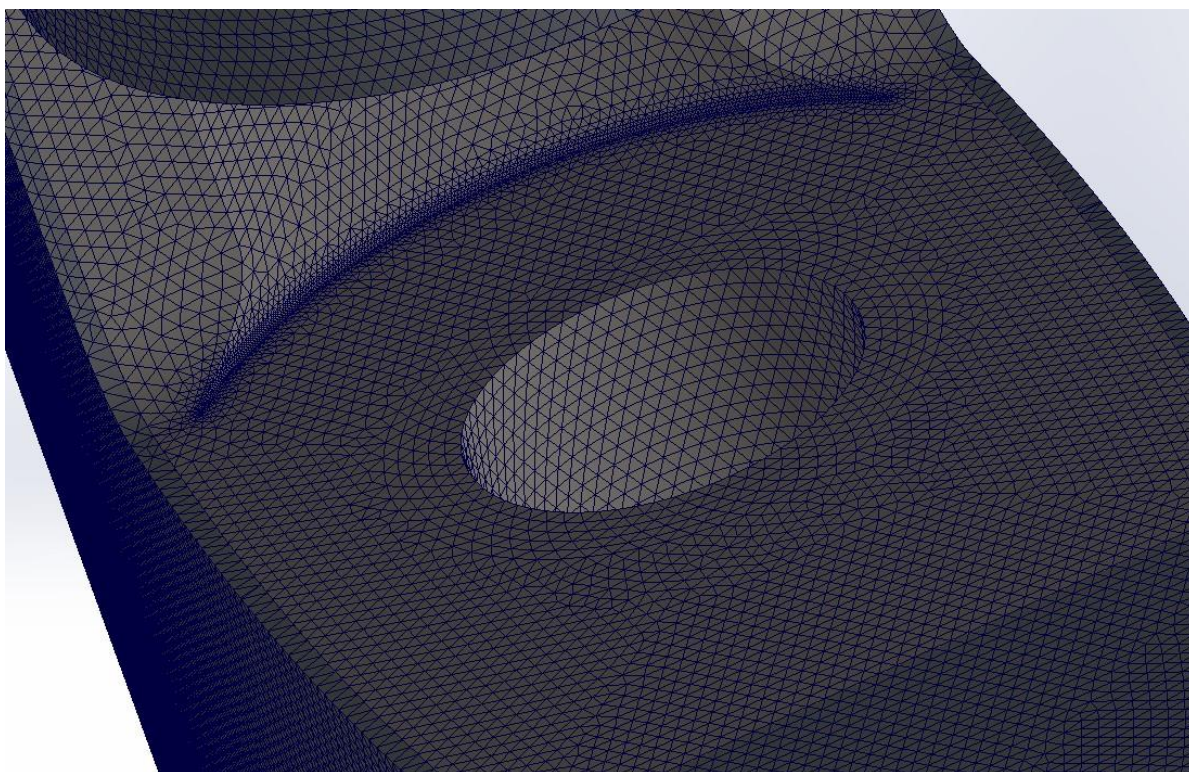
Κατά τη δημιουργία του πλέγματος στο μοντέλο, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν ορισμένοι παράγοντες-δείκτες ποιότητας. Ένας τέτοιος βασικός δείκτης είναι ο λόγος επιμήκους των στοιχείων (*aspect ratio*). Ένα πλέγμα χαρακτηρίζεται ποιοτικό όταν ο λόγος επιμήκους των στοιχείων του βρίσκεται κοντά στη μονάδα. Δεδομένου ότι το μοντέλο του πηδαλίου είναι μια λεπτότοιχη κατασκευή, το μήκος της μιας πλευράς των στοιχείων περιορίζεται από το πάχος της διατομής της κατασκευής. Για να μπορεί να τηρηθεί το κριτήριο του ιδανικού λόγου επιμήκους θα πρέπει και η πλευρά του στοιχείου που είναι παράλληλη στο τοίχωμα να έχει κατά το δυνατόν ίδιο μήκος. Τα ενισχυτικά και το κέλυφος της κατασκευής κατά μέσο όρο είναι κατασκευασμένα από έλασμα πάχους 20 [mm], επομένως θα οριστεί ως μέγιστο μήκος πλευράς στοιχείου τα 20 [mm]. Το πλέγμα συνολικά αποτελείται από 6564530 κόμβους και 5072693 στοιχεία. Τέλος, με τον περιορισμό του άνω ορίου του μήκους της πλευράς των στοιχείων επιτεύχθηκε το 99.8% των στοιχείων να έχουν *aspect ratio* μικρότερο από 3. (πίνακας 3 παραρτήματος). Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε.



Εικόνα 60: Πλέγμα μοντέλου (1)

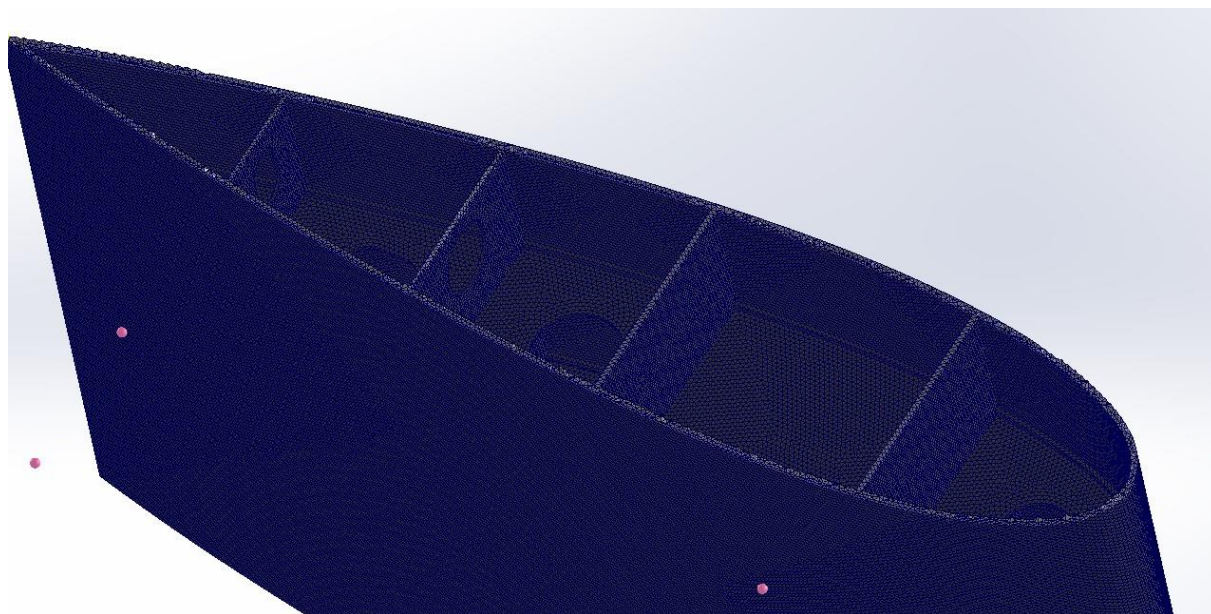


Εικόνα 61: Πλέγμα μοντέλου (2)



Εικόνα 62: Πλέγμα μοντέλου (3)

Στην εικόνα 63, παρουσιάζεται μια οριζόντια τομή του μοντέλου, κατά την οποία διακρίνεται το τρισδιάστατο πλέγμα που έχει δημιουργηθεί.



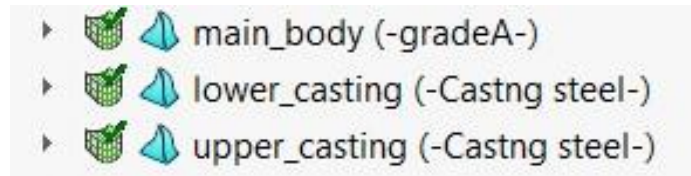
Εικόνα 63: Πλέγμα μοντέλου, τομή (4)

### Ορισμός υλικών

Το υλικό κατασκευής του περιβλήματος και των ενισχυτικών, σύμφωνα με το κατασκευαστικό σχέδιο είναι κοινός ναυπηγικός χάλυβας *grade A*. Όριο διαρροής του υλικού είναι τα 235 [MPa], ενώ όριο θραύσης είναι τα 480 [MPa]. Τα χυτά τμήματα της κατασκευής αποτελούν



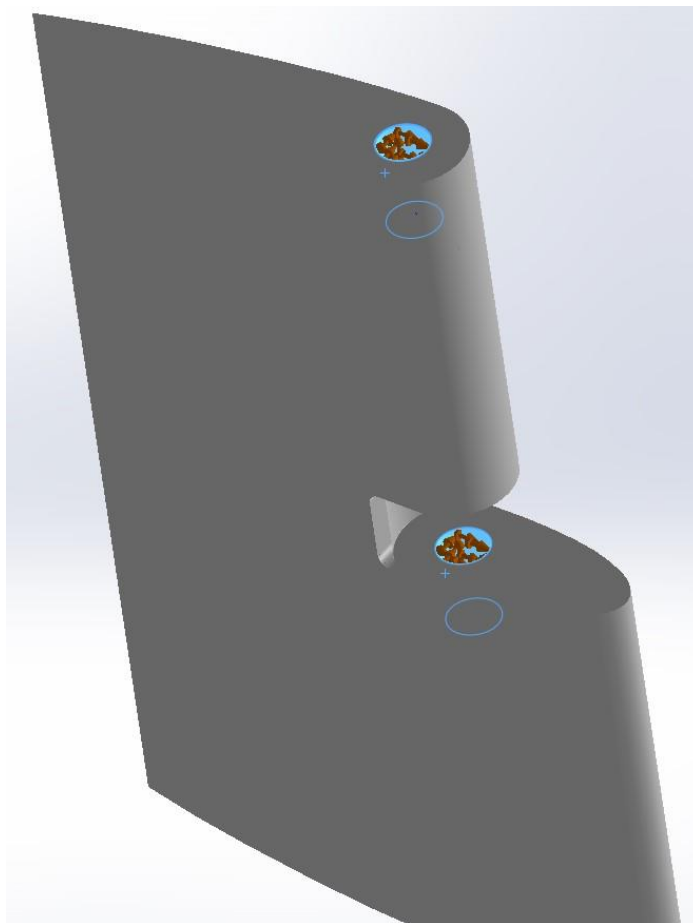
κράματα με όριο αντοχής τα 240 [MPa] και όριο θραύσης τα 480 [MPa]. Για να έχουν τα υλικά που θα επιλέξουμε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα τις απαιτούμενες ιδιότητες, θα δημιουργηθούν νέα υλικά όπως παρουσιάζονται στο παράρτημα (πίνακες 4, 5). Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, το τελικό μοντέλο έχει προκύψει από την ένωση των τριών βασικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει ξεχωριστά για κάθε τμήμα της κατασκευής η επιλογή του υλικού (εικόνα 64).



Εικόνα 64: Επιλογή υλικών στο SolidWorks

### Ορισμός συνθηκών στήριξης

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης το πηδάλιο θα θεωρείται ακίνητο στην μέγιστη γωνία που μπορεί να λάβει, δηλαδή στις 35°. Σε αυτή τη συνθήκη λειτουργίας θεωρείται ότι ο άξονας παραμένει ακλόνητος όπως και τα σημεία του πηδαλίου που έρχονται σε επαφή με αυτόν. Επομένως, θα θεωρηθεί συνθήκη πάκτωσης στις επιφάνειες επαφής του πηδαλίου με τον άξονα. Στην εικόνα 65 παρουσιάζονται οι επιφάνειες στις οποίες έχει θεωρηθεί πάκτωση.



Εικόνα 65: Συνθήκες στήριξης μοντέλου

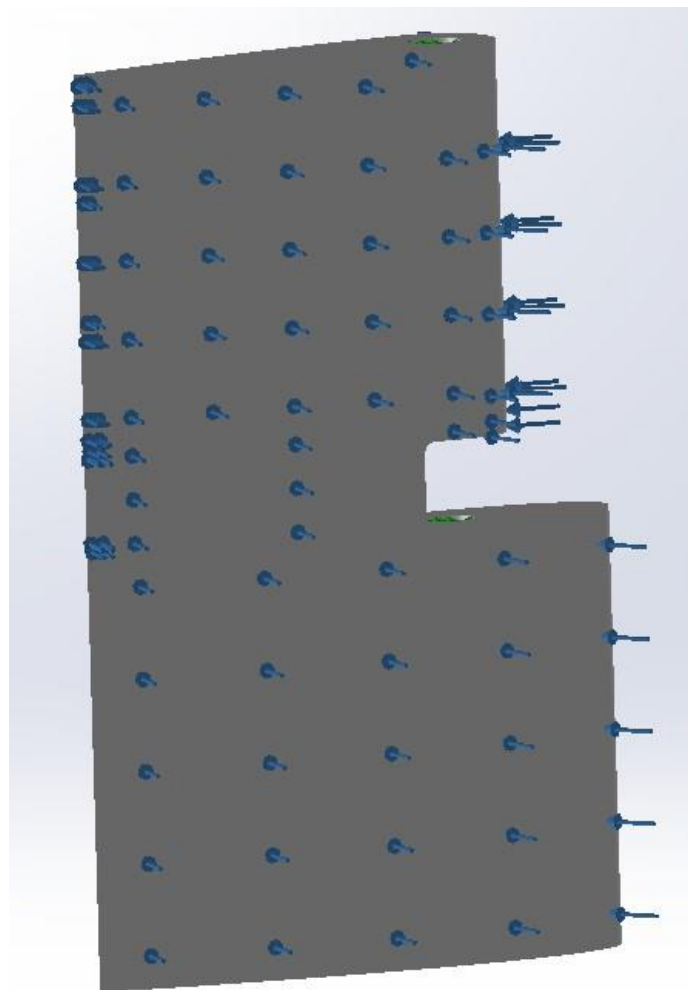
### Ορισμός εξωτερικών φορτίσεων

Στο αντίστοιχο κεφάλαιο υπολογισμού δυνάμεων και ροπών πηδαλίου έχουν υπολογιστεί οι δυνάμεις και ροπές στις δύο καταστάσεις λειτουργίας. Υπολογίστηκε ότι η μεγαλύτερη δύναμη ασκείται στην κατάσταση *ahead*. Επομένως, έχοντας ως δεδομένη εξωτερική φόρτιση την δύναμη που έχει υπολογιστεί, θα προσδιοριστούν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις επί του πηδαλίου.

Κατάσταση Λειτουργίας	Δύναμη Πηδαλίου [N]
AHEAD	1166598.412
ASTERN	291649.603

Εικόνα 66: Δυνάμεις και ροπές πηδαλίου

Ο ορισμός της εξωτερικής δύναμης μέσα στο πρόγραμμα SolidWorks θα γίνει επιλέγοντας την μισή εξωτερική επιφάνεια του κελύφους του πηδαλίου. Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 67), παρουσιάζεται το μοντέλο και πως ασκείται συνολικά η δύναμη στην επιφάνεια του. Ουσιαστικά, έχοντας υπολογίσει τη δύναμη του πηδαλίου, επιλέγοντας τις κατάλληλες επιφάνειες, το πρόγραμμα τις μετατρέπει σε πίεση (δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας).

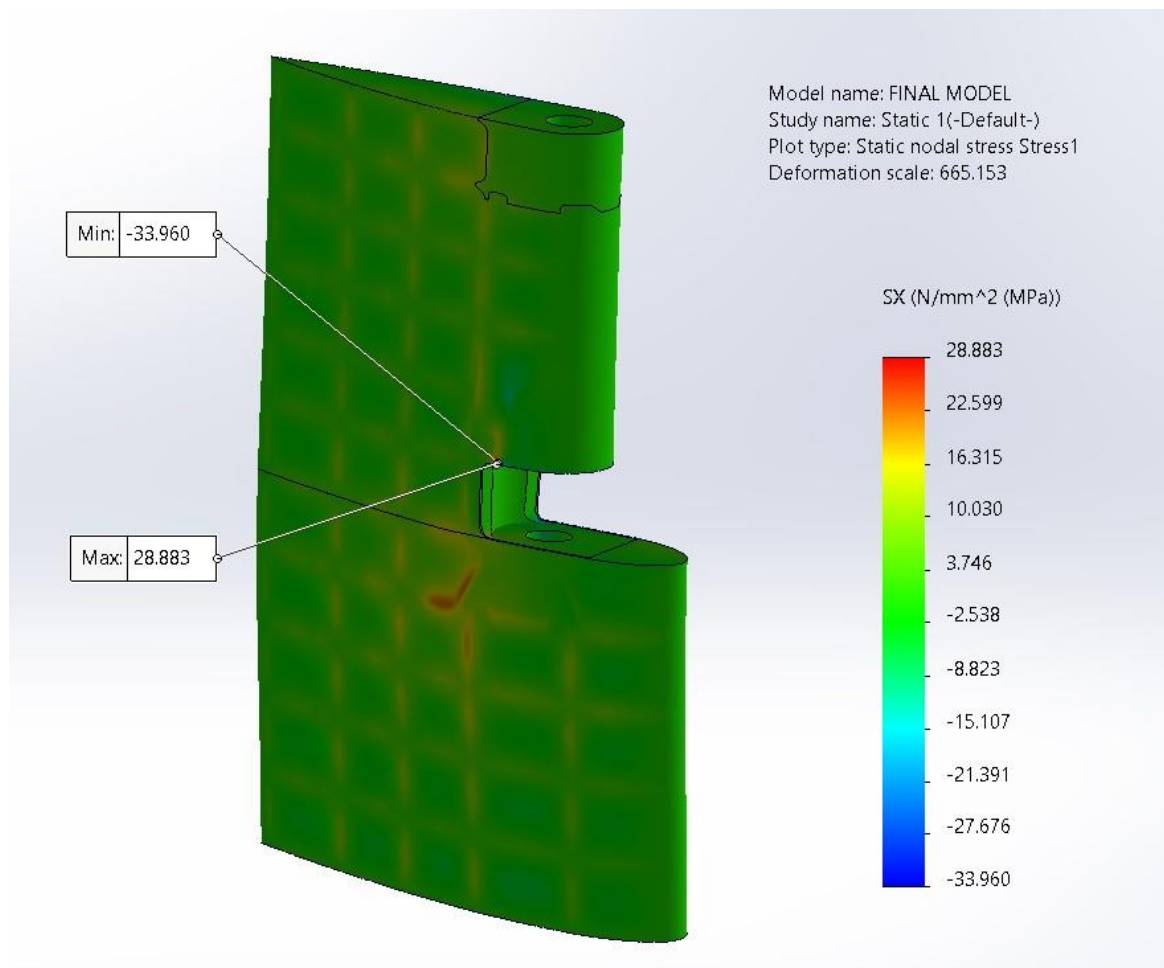


Εικόνα 67: Ορισμός δύναμης πηδαλίου στο SolidWorks

#### 8.4. Αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη αντοχής του πηδαλίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται τα πεδία των τάσεων (ορθές, διατμητικές και κύριες τάσεις), καθώς και το πεδίο των μετατοπίσεων. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή αποτελούν το κλειδί για τον εντοπισμό της αστοχίας της κατασκευής, ενώ οι μετατοπίσεις βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής, με την δεδομένη εξωτερική φόρτιση.

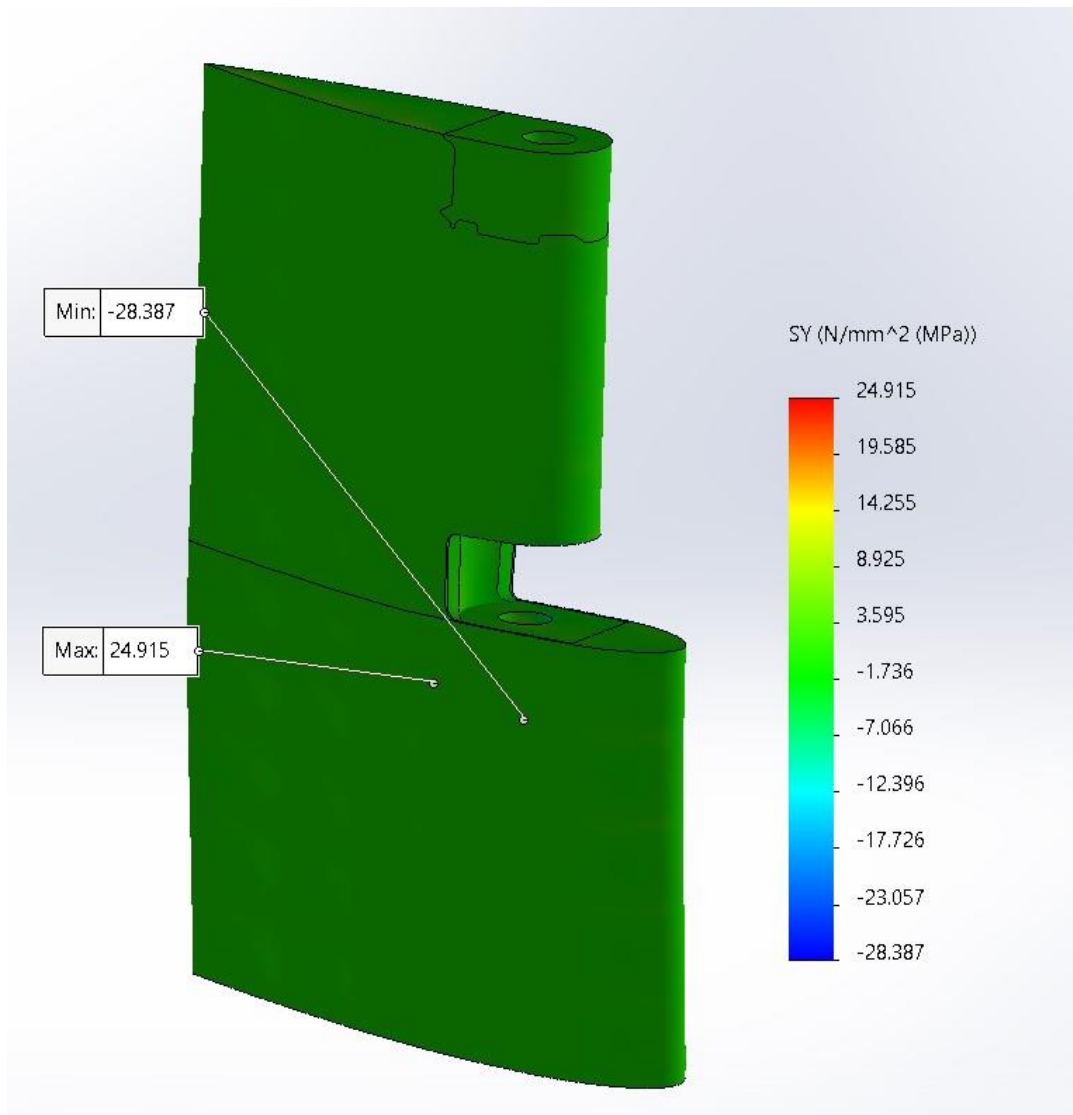
##### Ορθές τάσεις $\sigma_x$



Εικόνα 68: Ορθές τάσεις  $\sigma_x$

Η μέγιστη εφελκυστική ορθή τάση  $\sigma_x$  έχει τιμή 29 [MPa], ενώ η μέγιστη θλιπτική τάση έχει τιμή -34 [MPa]. Η περιοχή που εμφανίζονται οι μέγιστες αυτές τάσεις είναι η περιοχή στην οποία γίνεται η ένωση του *lower casting* με το περίβλημα του πηδαλίου (εικόνα 68).

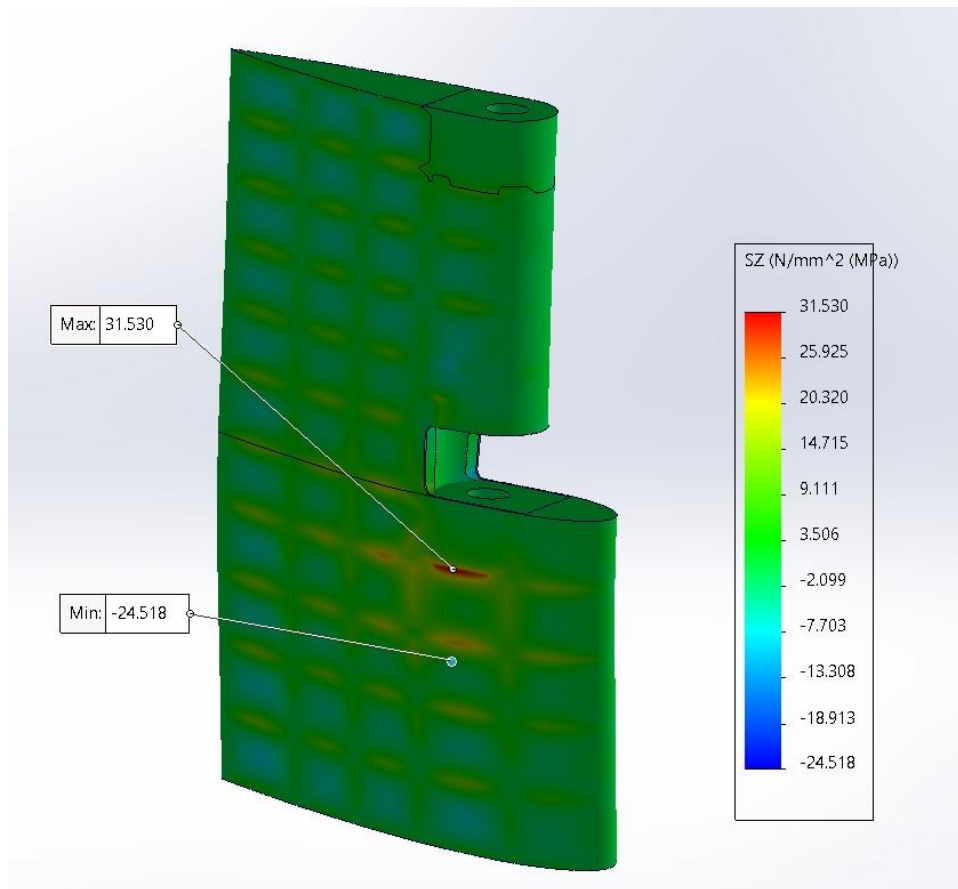
## Ορθές τάσεις $\sigma_y$



Εικόνα 69: Ορθές τάσεις  $\sigma_y$

Οι μέγιστη ορθή εφελκυστική τάση παράλληλη στον άξονα  $y$  έχει τιμή 25 [MPa], ενώ η μέγιστη θλιπτική τάση έχει τιμή -29 [MPa] (εικόνα 69).

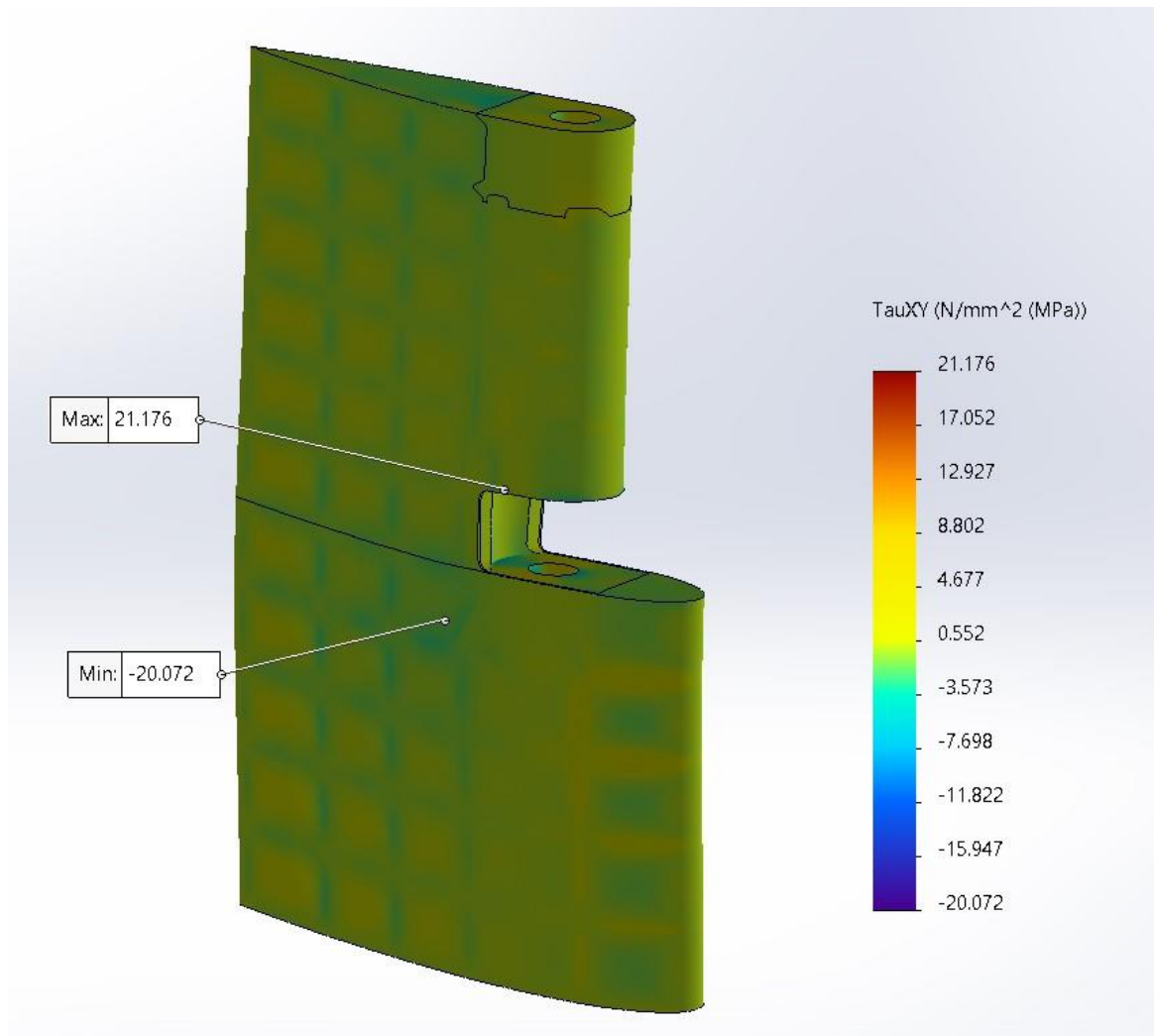
## Ορθές τάσεις $\sigma_z$



Εικόνα 70: Ορθές τάσεις  $\sigma_z$

Αντιστοίχως, η μέγιστη ορθή εφελκυστική τάση στη διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα είναι 31.5 [MPa], ενώ η μέγιστη θλιπτική είναι -24.5 [MPa] (εικόνα 70).

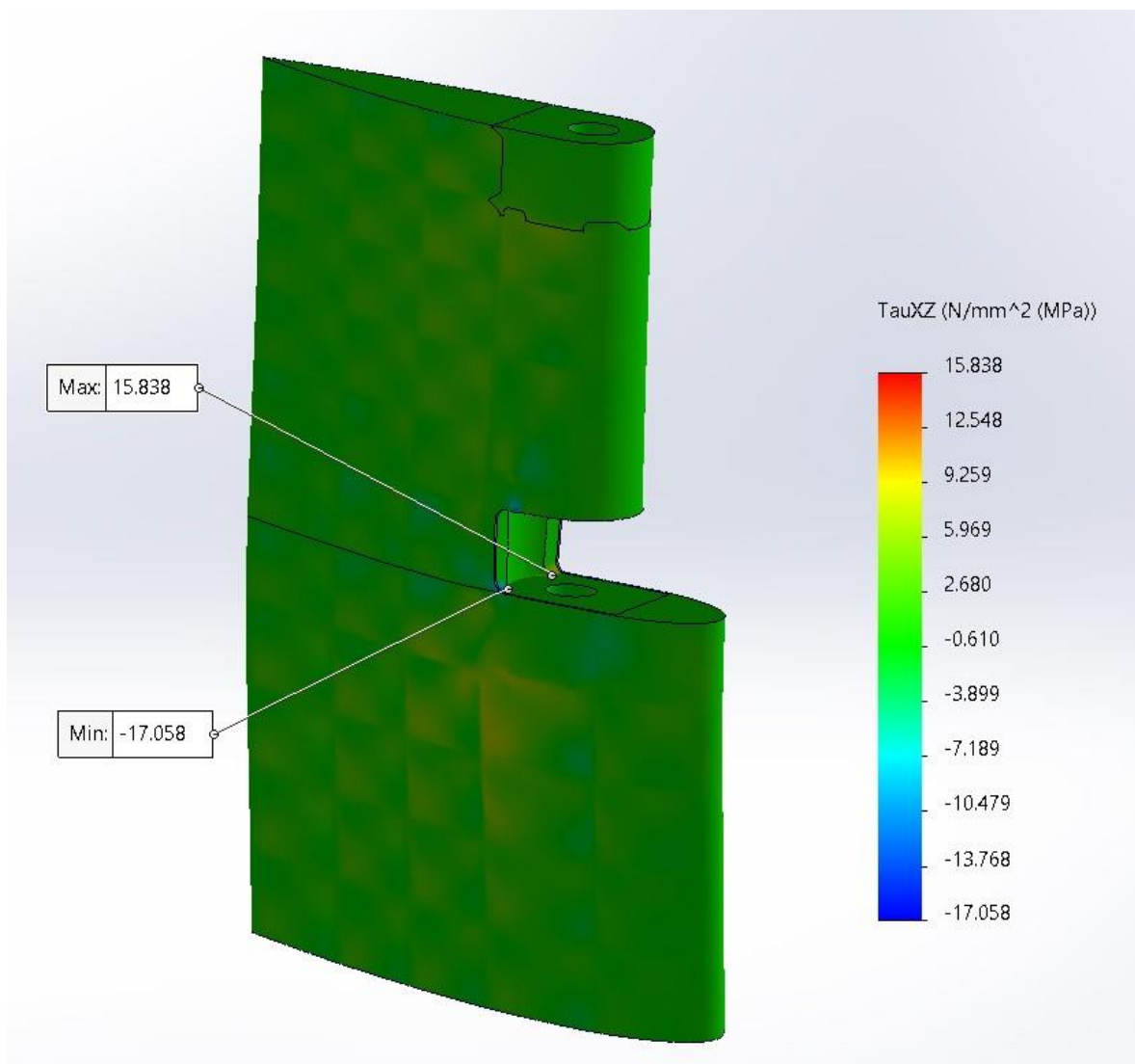
Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$



Εικόνα 71: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$

Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις οι οποίες είναι κάθετες στον άξονα x, στην διεύθυνση του άξονα y, παίρνουν τιμή έως 22 [MPa] (σε απόλυτη τιμή).

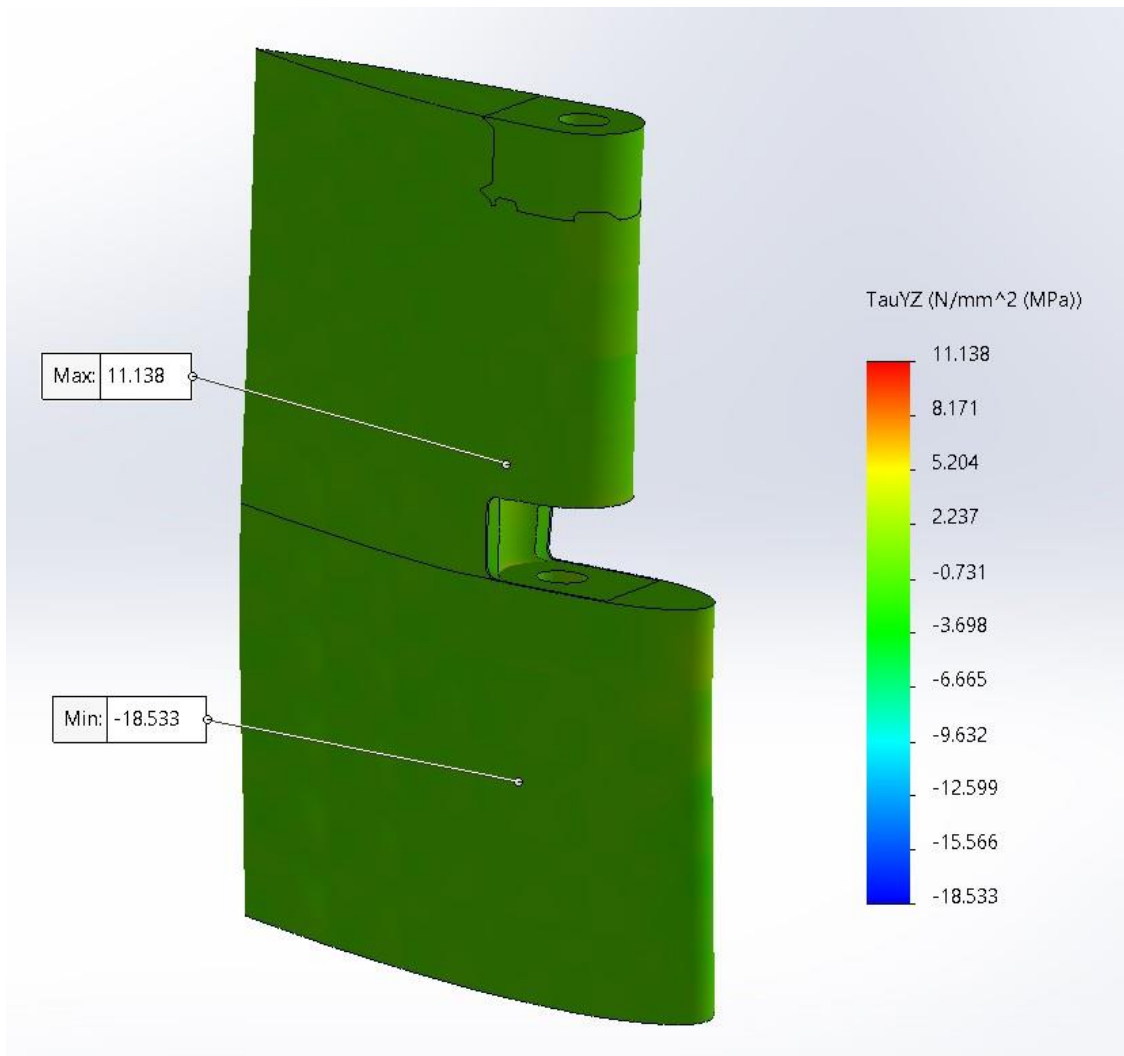
Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$



Εικόνα 72: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$

Οι διατμητικές τάσεις κάθετες στον άξονα x, στην διεύθυνση του άξονα z, παίρνουν τιμές έως 17 [MPa] σε απόλυτη τιμή.

Διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$



Εικόνα 73: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$

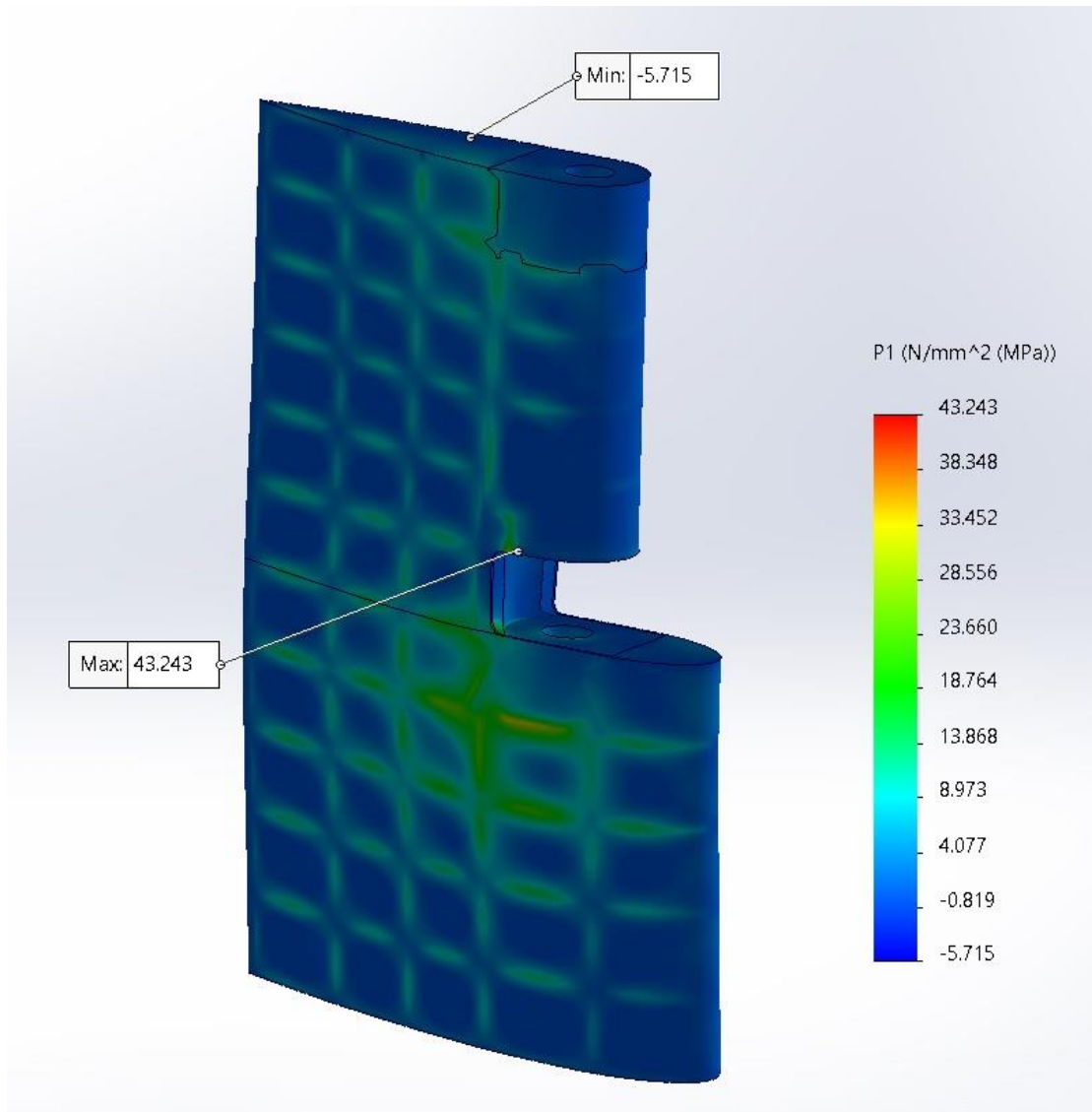
Οι διατμητικές τάσεις οι οποίες είναι κάθετες στον άξονα y και στη διεύθυνση του άξονα z, έχουν μέγιστη τιμή τα 18.5 [MPa].



### Προσδιορισμός κυρίων τάσεων

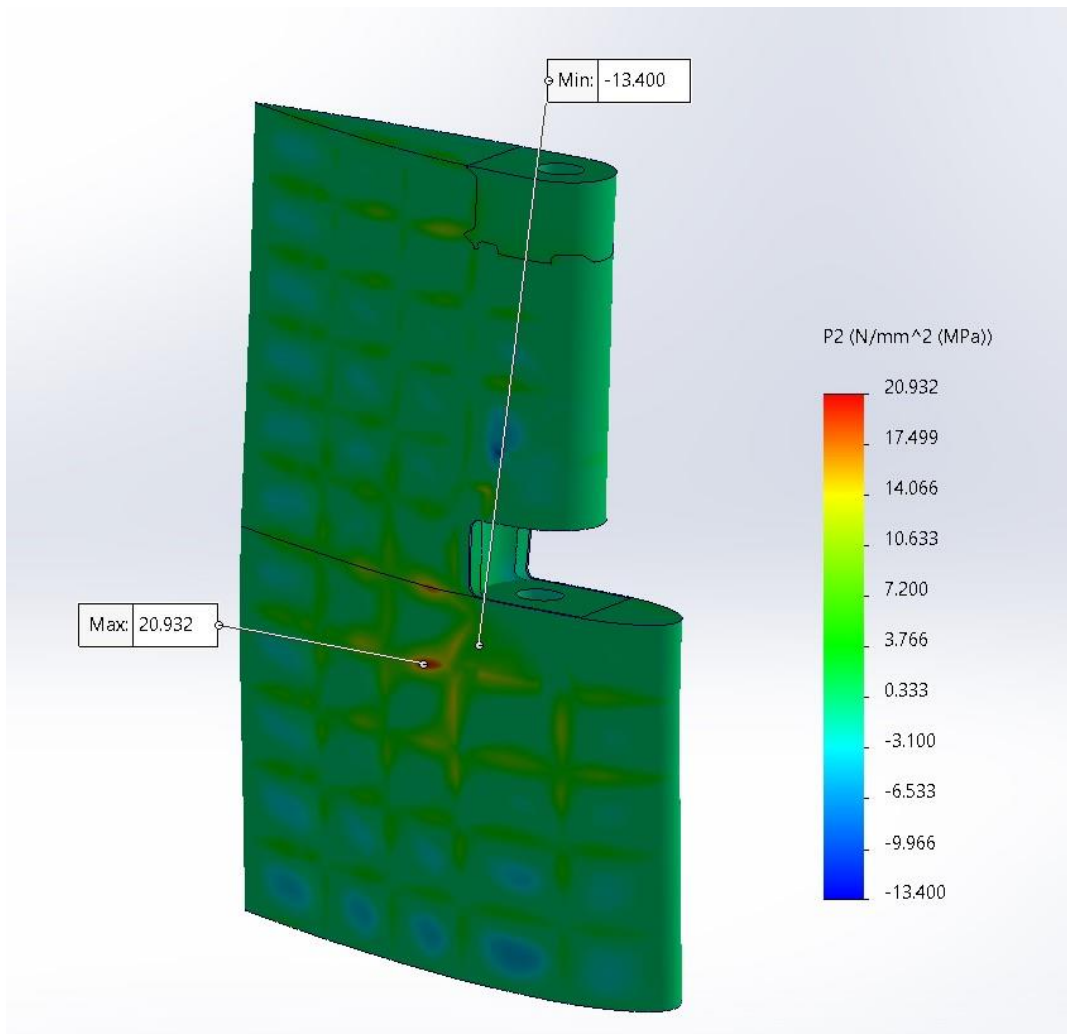
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα τασικά πεδία των κυρίων τάσεων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . Οι κύριες τάσεις είναι οι ορθές τάσεις που προκύπτουν εάν χρησιμοποιηθούν οι κύριοι άξονες του μοντέλου, δηλαδή εκείνοι οι άξονες ως προς τους οποίους οι διατμητικές τάσεις μηδενίζονται.

#### Κύριες τάσεις $\sigma_1$



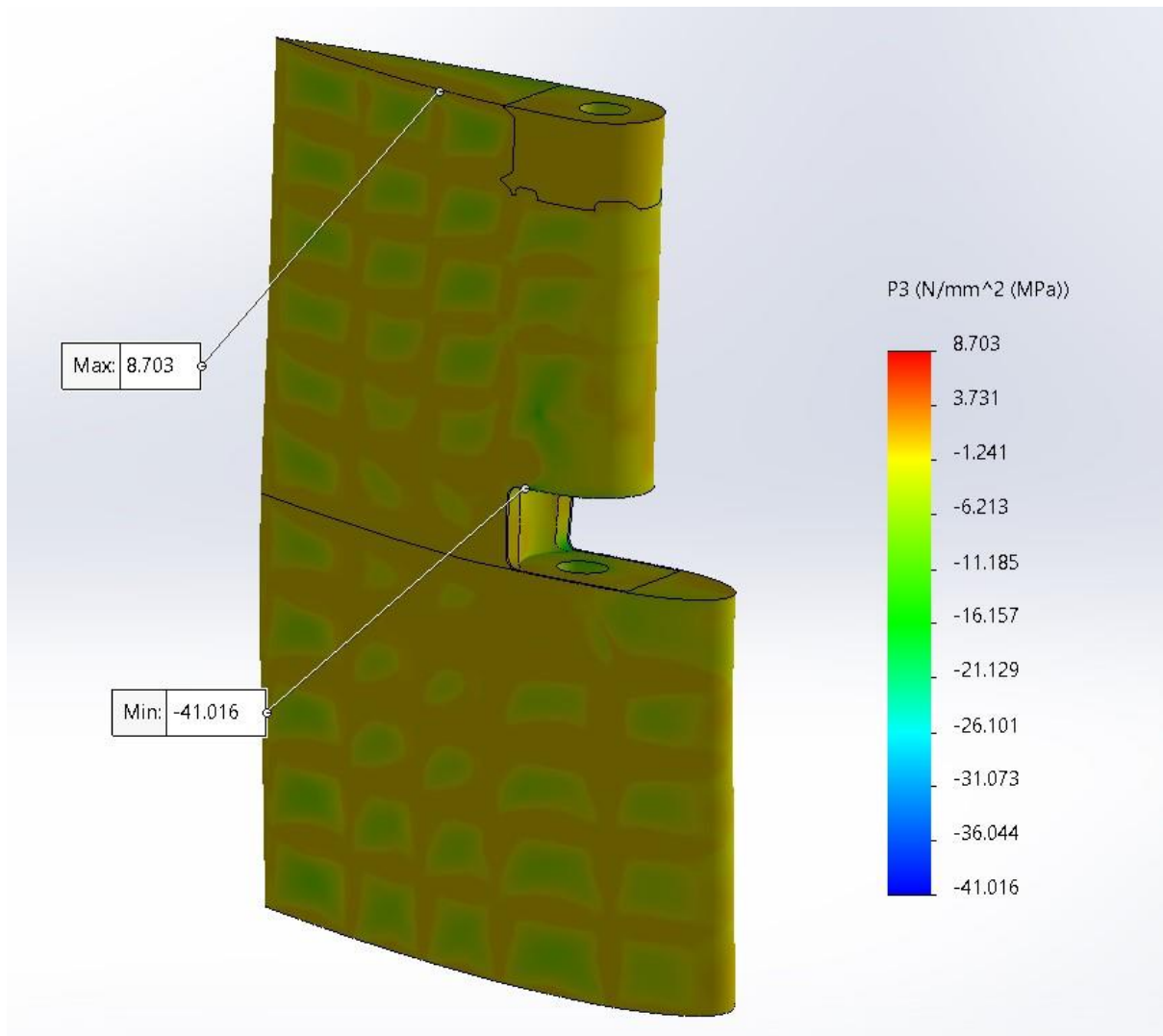
Εικόνα 74: Κύριες τάσεις  $\sigma_1$

## Κύριες τάσεις $\sigma_2$



Εικόνα 75: κύριες τάσεις  $\sigma_2$

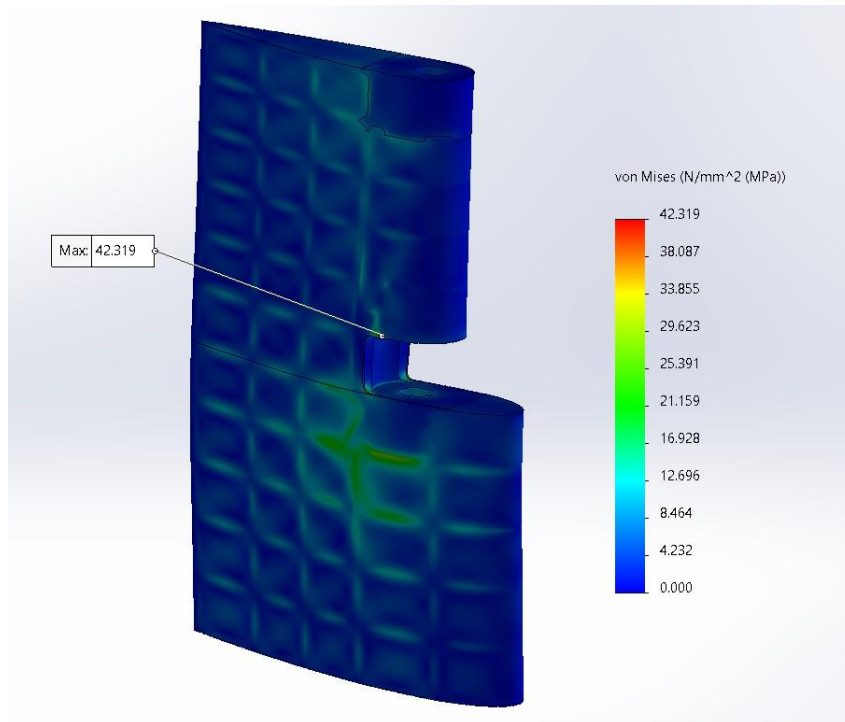
## Κύριες τάσεις $\sigma_3$



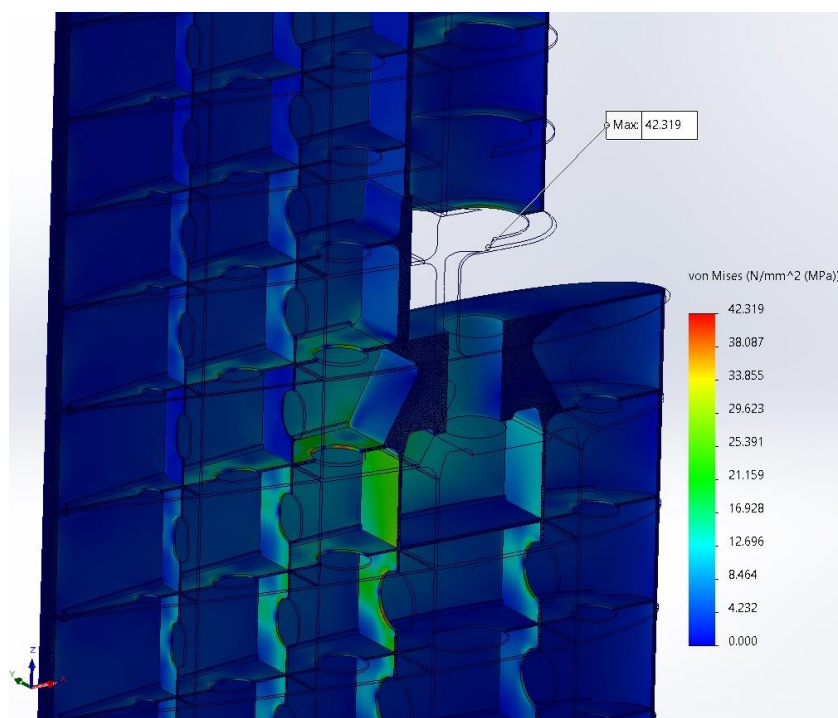
Εικόνα 76: Κύριες τάσεις  $\sigma_3$

## Τάσεις von-Mises

Η ισοδύναμη τάση *von Mises* αποτελεί ένα μέτρο της συμβολής των ορθών και των διατμητικών τάσεων σε κάθε σημείο της κατασκευής. Επομένως, συχνά χρησιμοποιείται για τον έλεγχο αντοχής μιας κατασκευής. Στις παρακάτω εικόνες (εικόνα 77, 78) παρουσιάζεται το τασικό πεδίο von-Mises για το υπό μελέτη πηδάλιο. Η μέγιστη τάση έχει τιμή 42.3 [MPa].



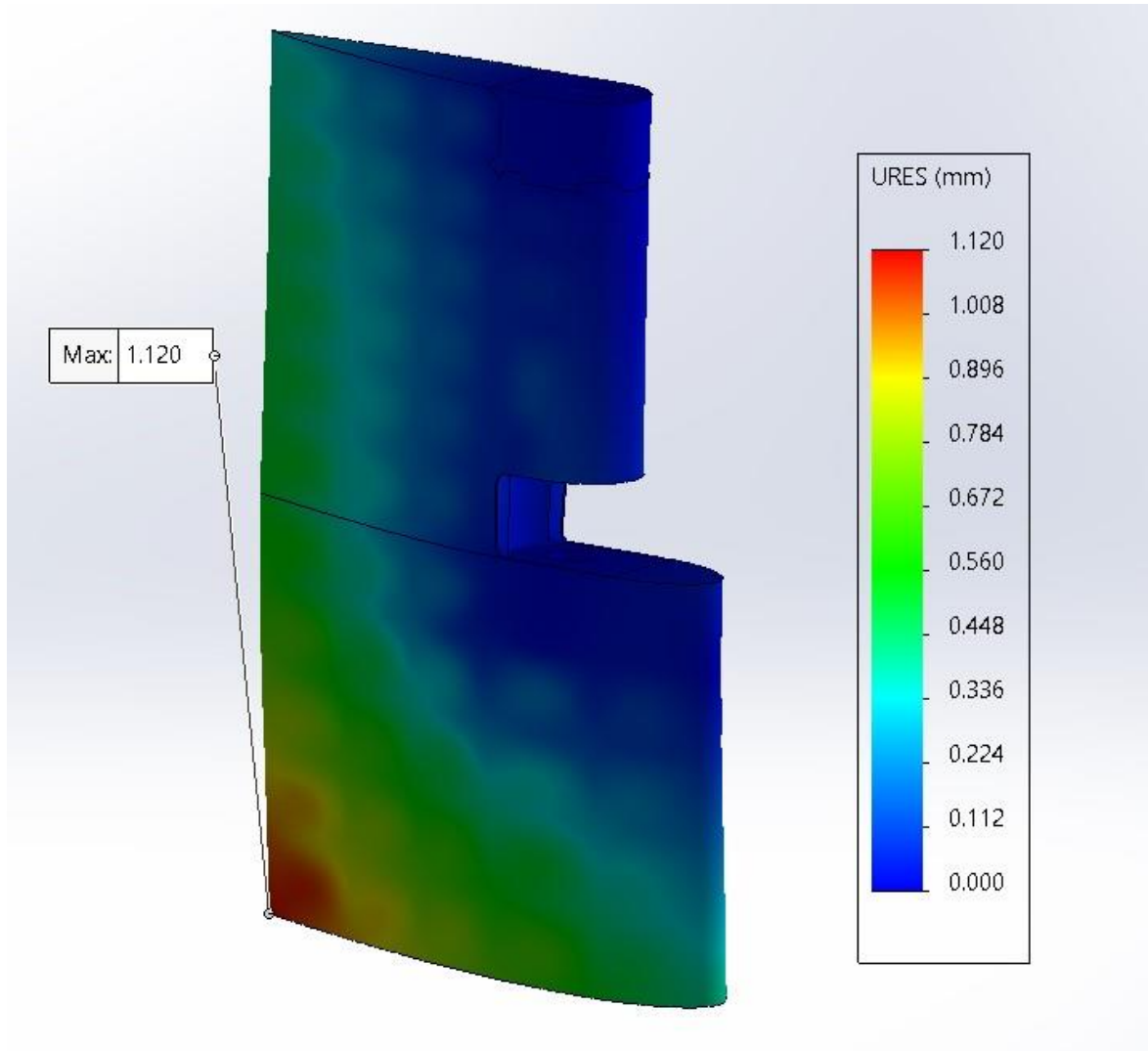
Εικόνα 77: Τάσεις Von Mises (1)



Εικόνα 78: Τάσεις Von Mises, τομή (2)

## Μετατοπίσεις

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το πεδίο των μετατοπίσεων στο υπό μελέτη πηδάλιο. Παρατηρείται ότι στην περιοχή του άξονα του πηδαλίου οι μετατοπίσεις είναι σχεδόν μηδενικές, γεγονός που είναι λογικό καθώς το μοντέλο θεωρείται πακτωμένο σε αυτό το σημείο. Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στο χείλος εκφυγής της κατώτερης χορδής του πηδαλίου και έχει τιμή 1.12 [mm].



Εικόνα 79: Πεδίο μετατοπίσεων

### Κριτήριο αστοχίας von-Mises

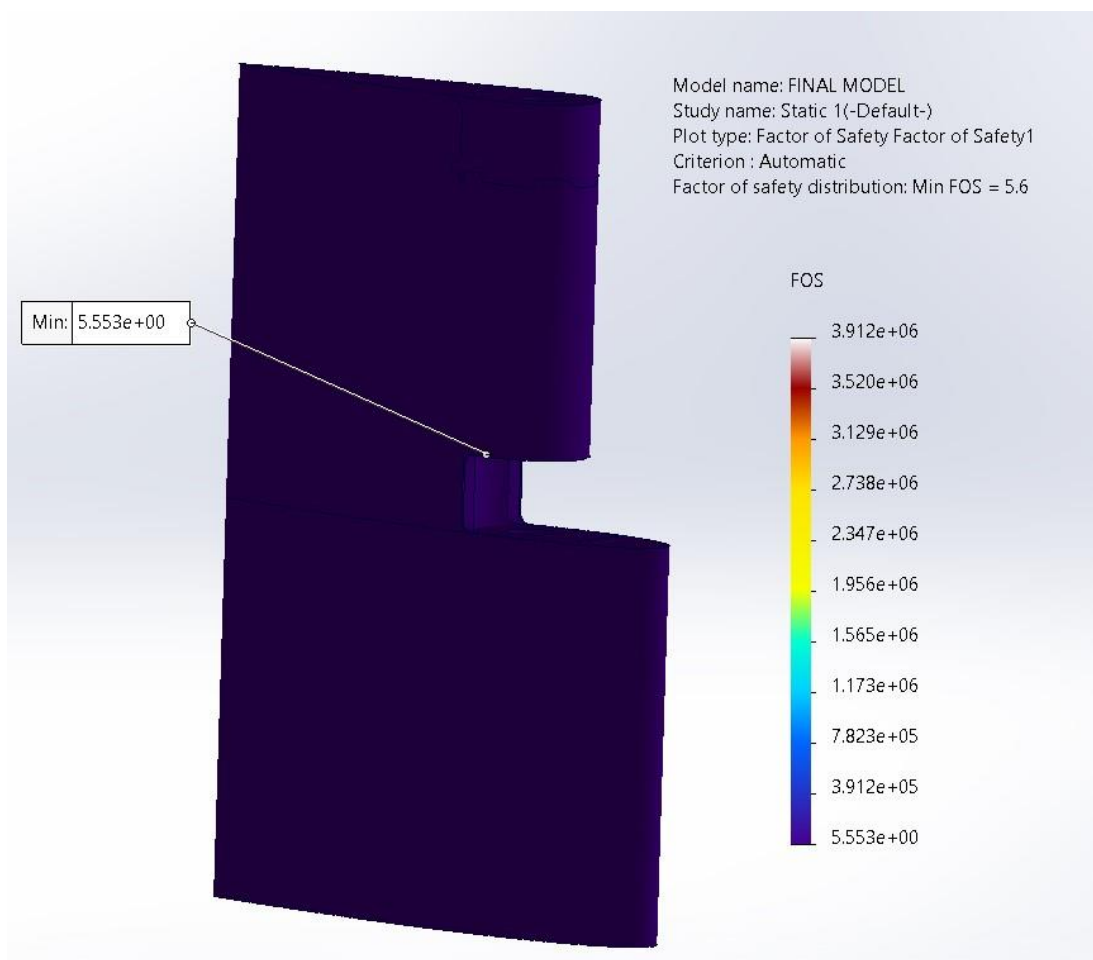
Για να μην επέλθει διαρροή στην κατασκευή σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας von-Mises, θα πρέπει η τάση von-Mises σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής να είναι μικρότερη της τάσης διαρροής, δηλαδή να είναι μικρότερη από 235 [MPa]. Όπως παρατηρείται και στις εικόνες 77, 78 οι τάσεις von-Mises δεν ξεπερνούν τα 43 [MPa] σε κανένα σημείο της κατασκευής. Επομένως, η κατασκευή είναι ασφαλής έναντι διαρροής κατά το κριτήριο von-Mises.

Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το κριτήριο είναι η παρακάτω (τρισδιάστατη εντατική κατάσταση):

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}) \leq \sigma_y$$

(πηγή: Leckie, F. A., & Bello, D. J. (2009))

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο συντελεστής ασφαλείας της κατασκευής (εικόνα 80).



Εικόνα 80: Συντελεστής ασφαλείας κατασκευής

## 9. Βελτιστοποίηση κατασκευής ως προς το βάρος

### 9.1. Διαστασιολόγηση πηδαλίου με βάση το πρότυπο *UR S10*

Ακολουθώντας τον κανονισμό του *UR S10* έχοντας υπολογιστεί τη δύναμη και τη ροπή του πηδαλίου, θα υπολογιστούν τα πάχη που προκύπτουν από τον κανονισμό. Τα πάχη για τα οποία θα γίνει υπολογισμός είναι:

- Ελάχιστο πάχος διαμέτρου άξονα πηδαλίου.
- Ελάχιστο πάχος ελασμάτων περιβλήματος.
- Ελάχιστο πάχος ενισχυτικών.
- Ελάχιστο πάχος οριζοντίων ενισχυτικών που συνδέονται με τα χυτά τμήματα.
- Ελάχιστο πάχος κατακόρυφων ενισχυτικών που συνδέονται με τα χυτά τμήματα.

Οι παραπάνω υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν ακολουθώντας τις σχέσεις που ορίζει ο κανονισμός του *IACS*, οι οποίες παρουσιάζονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

#### Διάμετρος άξονα

Από τη σχέση 5 προκύπτει ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή διαμέτρου ως  $d_i=321.397$  [mm].

#### Πάχος ελασμάτων περιβλήματος

Από τη σχέση 6 προκύπτει το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος των ελασμάτων του περιβλήματος ως  $t=18$  [mm].

#### Πάχος ενισχυτικών

Από τη σχέση 7 προκύπτει το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος των ενισχυτικών (οριζοντίων και κατακόρυφων) ως  $t_s=12.693$  [mm].

#### Πάχος οριζοντίων ενισχυτικών που συνδέονται με τα χυτά τμήματα

Ο υπολογισμός του ελάχιστου πάχους των οριζοντίων ενισχυτικών γίνεται από την σχέση 8. Το ελάχιστο πάχος υπολογίστηκε ως  $t_H=21.759$  [mm].

#### Υπολογισμός πάχους κατακόρυφων ενισχυτικών που συνδέονται τα χυτά τμήματα και πάχους περιβλήματος στην περιοχή των χυτών τμημάτων

Ο υπολογισμός των αναφερόμενων παχών γίνεται, εφόσον έχει υπολογιστεί το πάχος  $t$  από τη σχέση 6, με τη βοήθεια του πίνακα της εικόνας 23. Τα πάχη υπολογίστηκαν ως:

- πάχος κατακόρυφων ενισχυτικών που συνδέονται τα χυτά:  $t_V=36.265$  [mm].
- πάχος περιβλήματος στην περιοχή των χυτών:  $23.572$  [mm].

Οι παραπάνω υπολογισμοί παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 6 του παραρτήματος.

#### Διαφορές στη διαστασιολόγηση μεταξύ αρχικού και βελτιστοποιημένου μοντέλου

Ορισμένα πάχη του υπάρχοντος πηδαλίου εμφανίζονται επαυξημένα σε σχέση με τα κατώτατα όρια που θέτει ο κανονισμός. Αυτή η υπέρ-διαστασιολόγηση γίνεται προκειμένου να μην γίνεται επίπονη η συντήρηση του πηδαλίου, αλλά και για μεγαλύτερη ασφάλεια της

κατασκευής. Ωστόσο, η υπέρ-διαστασιολόγηση οδηγεί και σε μεγαλύτερο βάρος κατασκευής, επομένως και σε υψηλότερο κόστος. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα πάχη του υπάρχοντος πηδαλίου σε αντίθεση με τα υπολογισθέντα.

	Πάχη που προκύπτουν από το UR S10		Πάχη υπάρχοντος σχεδίου [mm]	Πάχη νέου μοντέλου [mm]	μείωση πάχους %
minimum plate thickness (side top bottom)	18	mm	18	18.00	0
min web plate thickness	12.693	mm	15	13.00	13.3
min horizontal plate thickness (connected to the solid parts)	21.759	mm	22	22.00	0
min vertical plate thickness (connected to the solid parts)	36.265499	mm	40	37.00	7.5
min thickness of plating (bonded with the solid parts)	23.57257435	mm	25	24.00	4

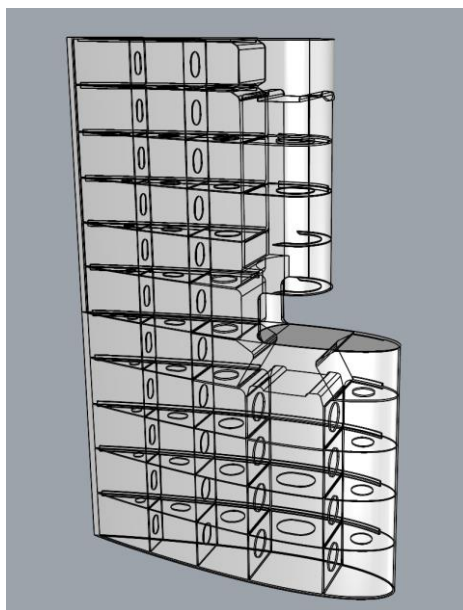
Εικόνα 81: Σύγκριση παχών, με μπλε φόντο τα πάχη που διαφέρουν

Προκειμένου να γίνει βελτιστοποίηση της κατασκευής ως προς το βάρος (άρα και ως προς το κόστος), θα κατασκευαστεί νέο βελτιστοποιημένο μοντέλο το οποίο θα έχει τη διαστασιολόγηση που ορίζει ο κανονισμός. Το νέο μοντέλο θα έχει τις παρακάτω αλλαγές.

- Μείωση πάχους ενισχυτικών από 15 [mm] σε 13 [mm], μείωση 13.3%.
- Μείωση πάχους κατακόρυφων ενισχυτικών που συνδέονται στα χυτά από 40[mm] σε 37 [mm], μείωση 7.5%.
- Μείωση πάχους περιβλήματος στην περιοχή των χυτών από 25 [mm] σε 24 [mm], μείωση 4%.

## 9.2. Κατασκευή βελτιστοποιημένου μοντέλου

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την κατασκευή του πρωτότυπου μοντέλου, θα δημιουργηθεί το νέο βελτιστοποιημένο μοντέλο. Ομοίως με το αρχικό μοντέλο θα δημιουργηθούν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros*, τρεις κλειστοί ξεχωριστοί όγκοι, με σκοπό τον ορισμό των υλικών για κάθε έναν από τους τρεις όγκους κατά την μελέτη αντοχής του βελτιστοποιημένου μοντέλου.



Εικόνα 82: Νέο βελτιστοποιημένο μοντέλο



### 9.3. Υπολογισμός βάρους αρχικού και βελτιστοποιημένου πηδαλίου

Έχοντας κατασκευάσει τα μοντέλα ως κλειστές επιφάνειες στο σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros* μπορεί πολύ εύκολα να γίνει υπολογισμός του όγκου για κάθε ένα από τα μοντέλα. Προκύπτουν οι όγκοι ως εξής:

- Όγκος αρχικού πηδαλίου (εικόνα 84):  $V=3.7 \text{ m}^3$
- Όγκος βελτιστοποιημένου μοντέλου (εικόνα 85):  $V_{\text{opt}}=3.6 \text{ m}^3$

Έχοντας υπολογίσει τον όγκο του υλικού που αποτελείται κάθε ένα από τα δύο μοντέλα υπολογίζεται το βάρος κάθε κατασκευής. Πυκνότητα τόσο για τα ελάσματα όσο και για τα χυτά θεωρείται  $\rho_{\text{st}}=7.85[\text{tn/m}]$

#### Βάρος αρχικής κατασκευής

$$B=\rho_{\text{st}}*V=29.045 [\text{tn}]$$

#### Βάρος βελτιστοποιημένης κατασκευής

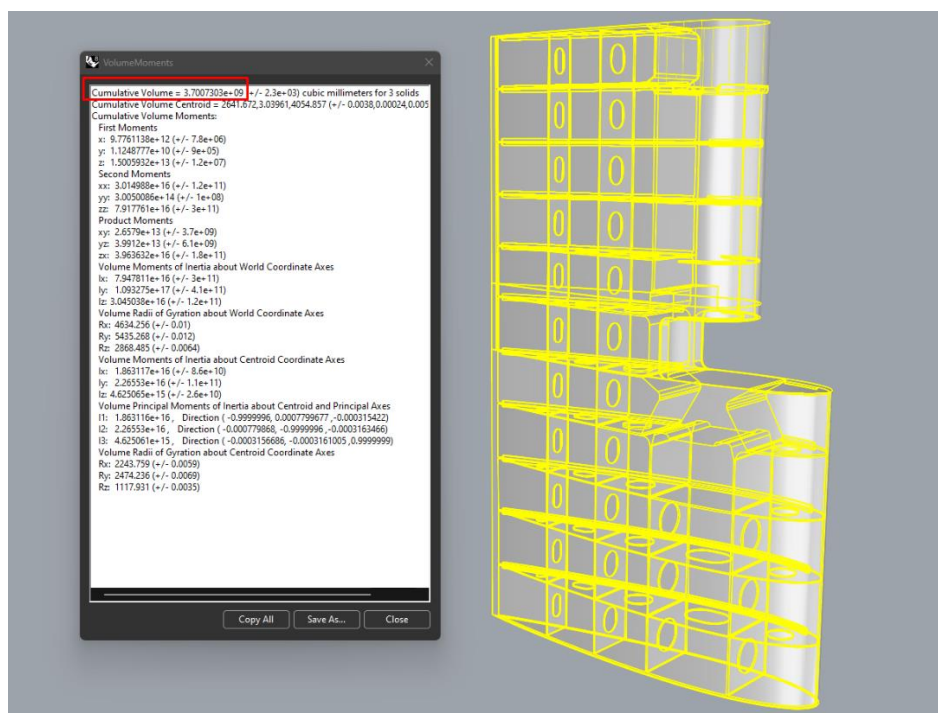
$$B_{\text{opt}}= \rho_{\text{st}}*V_{\text{opt}}=28.260 [\text{tn}]$$

#### Ποσοστιαία μείωση του βάρους

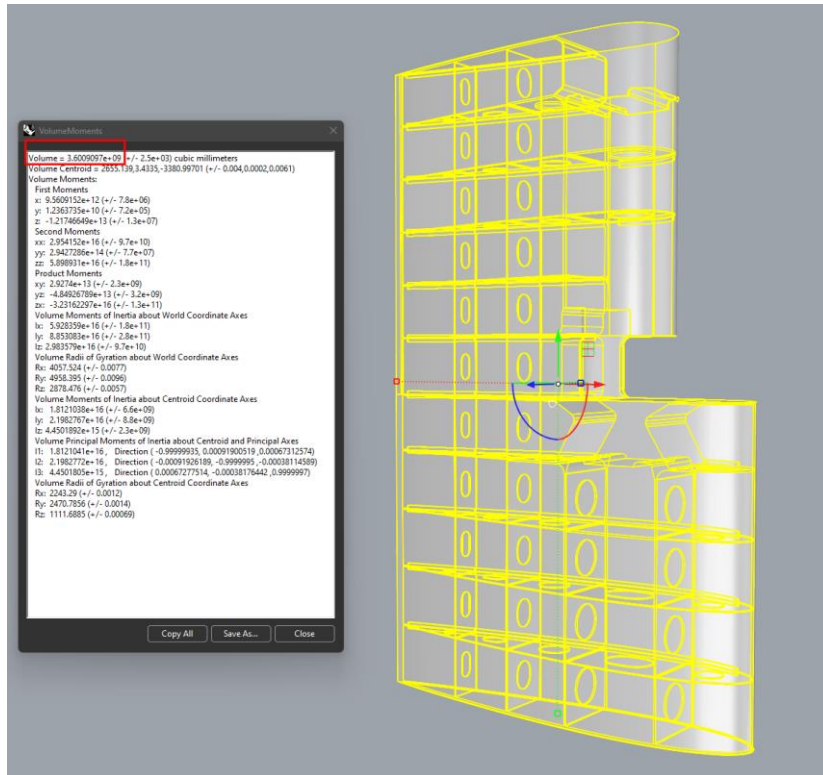
Το βάρος της βελτιστοποιημένης κατασκευής μειώνεται κατά  $(B-B_{\text{opt}})/B)100= 2.7 \%$

	Αρχικό μοντέλο	Βελτιστοποιημένο μοντέλο	Ποσοστιαία μείωση του βάρους
Όγκος από Rhinoceros [m <sup>3</sup> ]	3.700	3.600	
Συνολικό Βάρος [tn]	29.045	28.260	2.703
Πυκνότητα [tn/m <sup>3</sup> ]	7.850		

Εικόνα 83: Υπολογισμός βάρους αρχικής και βελτιστοποιημένης κατασκευής



Εικόνα 84: Υπολογισμός όγκου αρχικού μοντέλου στο *Rhinoceros*



Εικόνα 85: Υπολογισμός όγκου βελτιστοποιημένου μοντέλου στο *Rhinoceros*

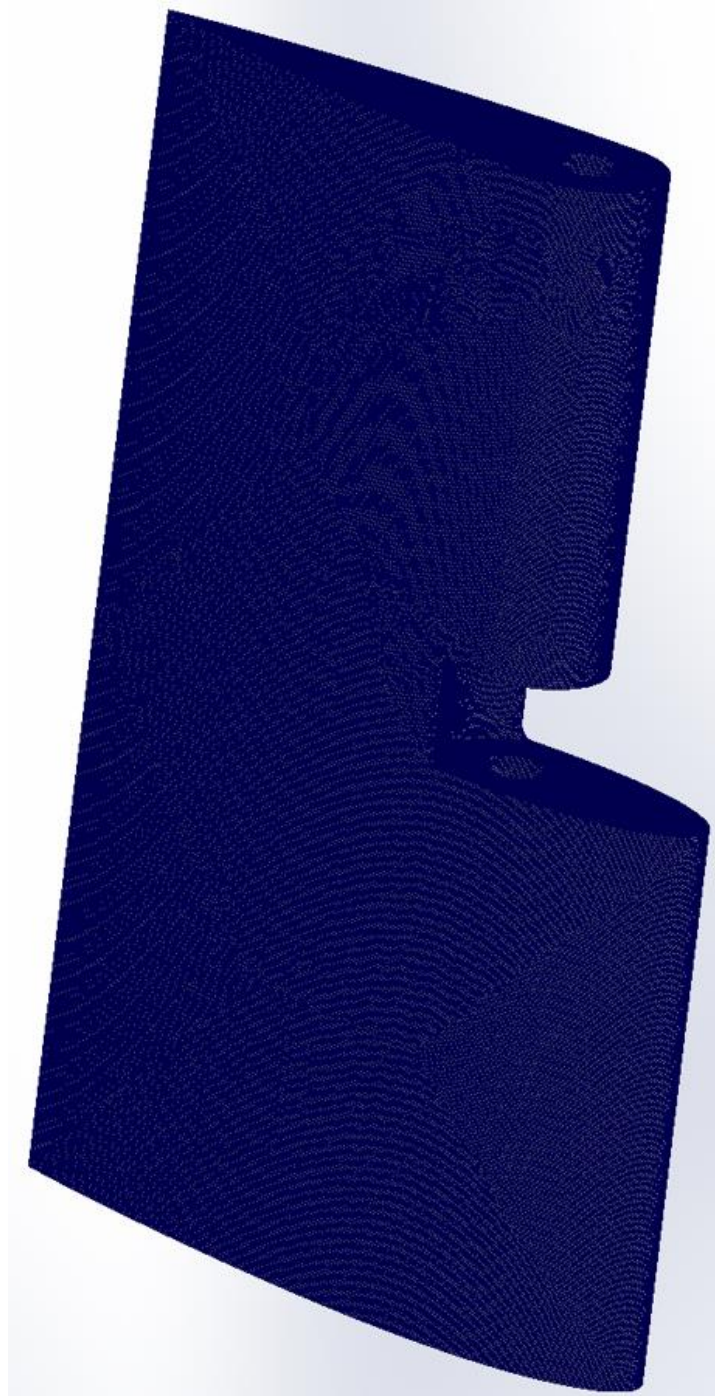
#### 9.4. Υπολογισμός αντοχής βελτιστοποιημένου πηδαλίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Όπως και στο πρωτότυπο μοντέλο ο υπολογισμός της αντοχής του βελτιστοποιημένου μοντέλου θα πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα *SolidWorks*. Η διαδικασία κατάστρωσης του προβλήματος των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί την ίδια λογική με το αρχικό πρόβλημα.

- Δημιουργία πλέγματος (*meshing*).
- Ορισμός συνθηκών στήριξης.
- Ορισμός εξωτερικών δυνάμεων.
- Επίλυση του προβλήματος.

##### Διακριτοποίηση βελτιστοποιημένου μοντέλου

Όπως και στο αρχικό μοντέλο, επειδή το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι μια λεπτότοιχη γεωμετρία, το πλέγμα που πρέπει να δημιουργηθεί θα πρέπει να έχει το πολύ 20 [mm] μέγιστο μήκος πλευράς στοιχείου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συνθήκη αυτή είναι αναγκαία έτσι ώστε να τηρείται το κριτήριο του βέλτιστου *aspect ratio* (AR=1). Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 86), παρουσιάζεται το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί.



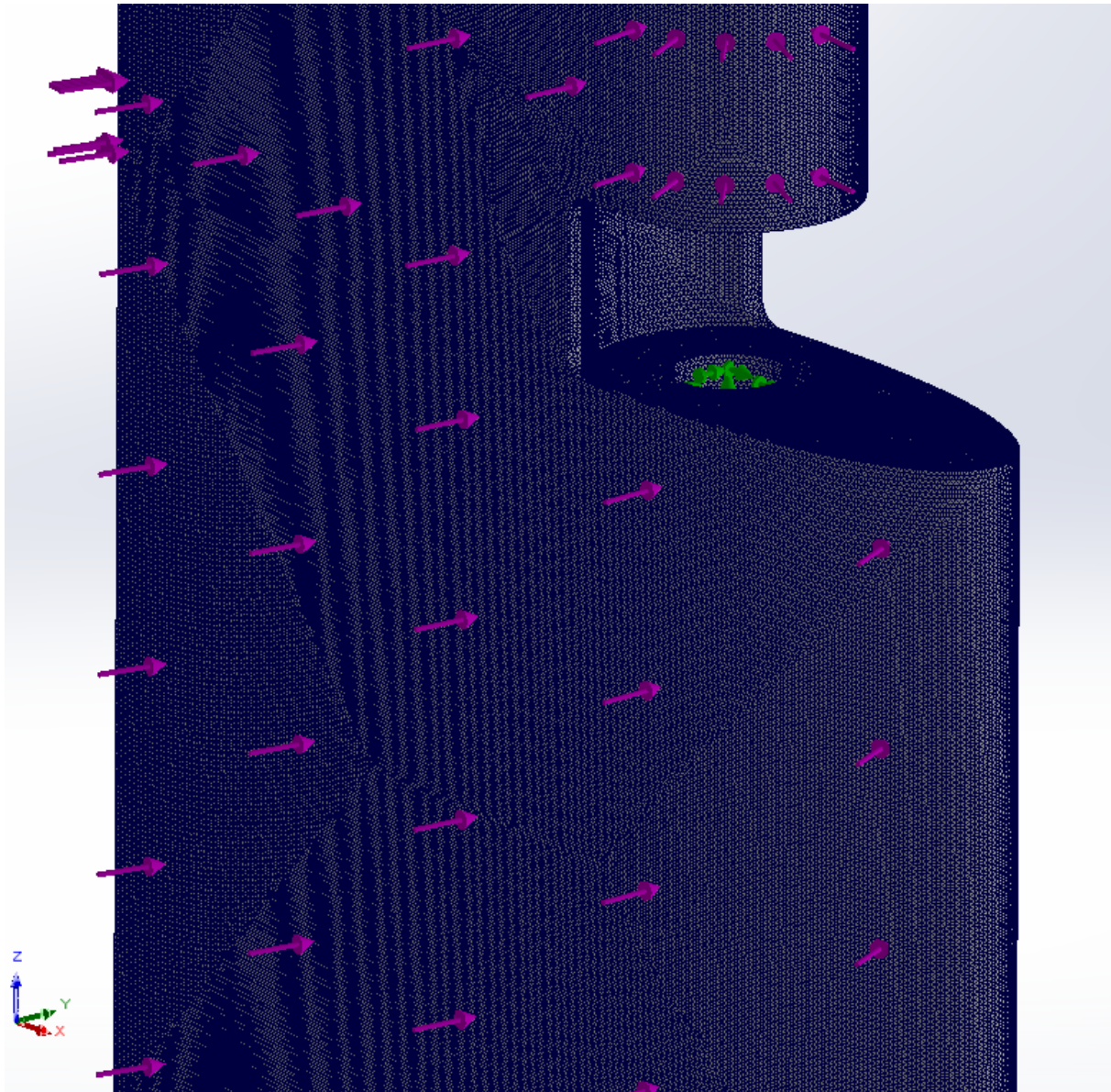
Εικόνα 86: Πλέγμα βελτιστοποιημένου μοντέλου

Στον πίνακα 7 του παραρτήματος παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες του πλέγματος του βελτιστοποιημένου μοντέλου (αριθμοί κόμβων στοιχείων κ. α.).

Ορισμός συνθηκών στήριξης και εξωτερικής δύναμης στο βελτιστοποιημένο μοντέλο

Τόσο οι συνθήκες στήριξης όσο και η εξωτερική δύναμη δεν αλλάζουν σε σχέση με το αρχικό μοντέλο, καθώς οι συνθήκες του προβλήματος δεν μεταβάλλονται. Επομένως, θεωρούνται τα παρακάτω.

- Πάκτωση του μοντέλου στις επιφάνειες που έρχεται σε επαφή με τον άξονα του πηδαλίου.
- Εξωτερική δύναμη συνολικής τιμής 1166598.412 [N], η οποία εφαρμόζεται συνολικά στην μισή εξωτερική επιφάνεια ως προς το κεντρικό διάμηκες επίπεδο.



Εικόνα 87: Συνθήκες στήριξης και εξωτερική φόρτιση βελτιστοποιημένου μοντέλου

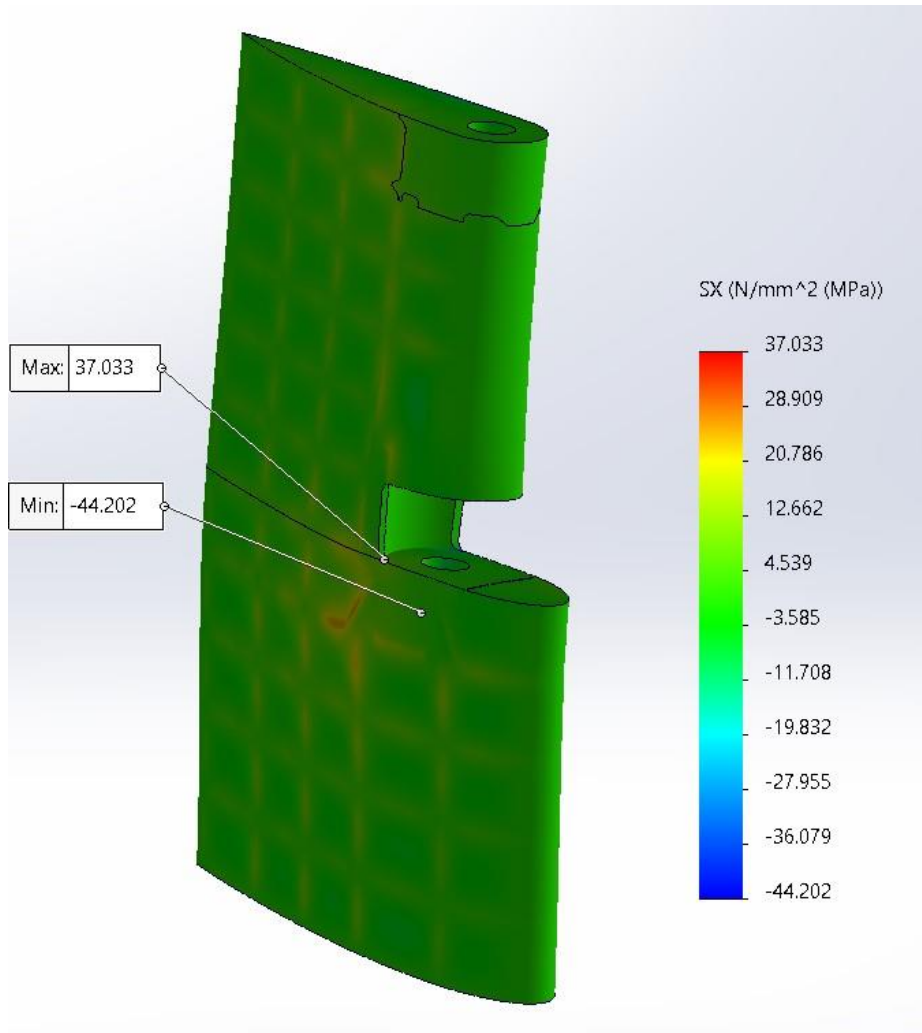
### 9.5. Αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για το βελτιστοποιημένο μοντέλο

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το νέο μοντέλο. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- Ορθές τάσεις ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ).

- Διατμητικές τάσεις ( $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx}$ ).
- Τάσεις ως προς τους κύριους άξονες (κύριες τάσεις,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ).
- Τάσεις von-Mises.
- Πεδίο μετατοπίσεων.

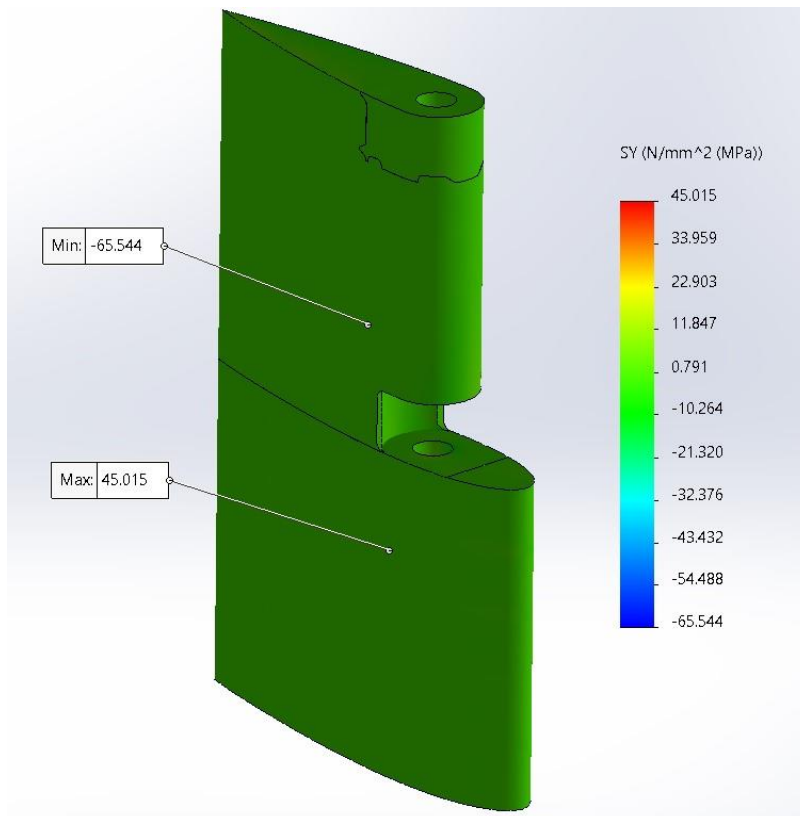
Ορθές τάσεις σχ βελτιστοποιημένου μοντέλου



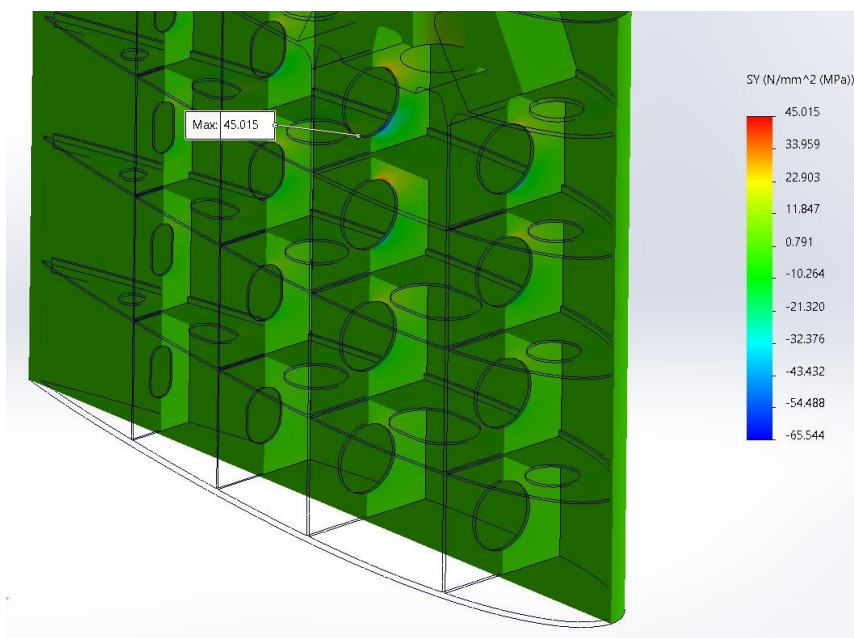
Εικόνα 88: Ορθές τάσεις σχ βελτιστοποιημένου μοντέλου

Η μέγιστη εφελκυστική ορθή τάση κατά τη διεύθυνση του άξονα x έχει τιμή 37 [MPa], ενώ η αντίστοιχη θλιπτική ορθή τάση έχει τιμή -44 [MPa]. Οι περιοχές που εμφανίζονται οι μέγιστες αυτές τάσεις είναι κοντά στην ένωση του lower casting με το κύριο σώμα του πηδαλίου.

## Ορθές τάσεις σγ βελτιστοποιημένου μοντέλου



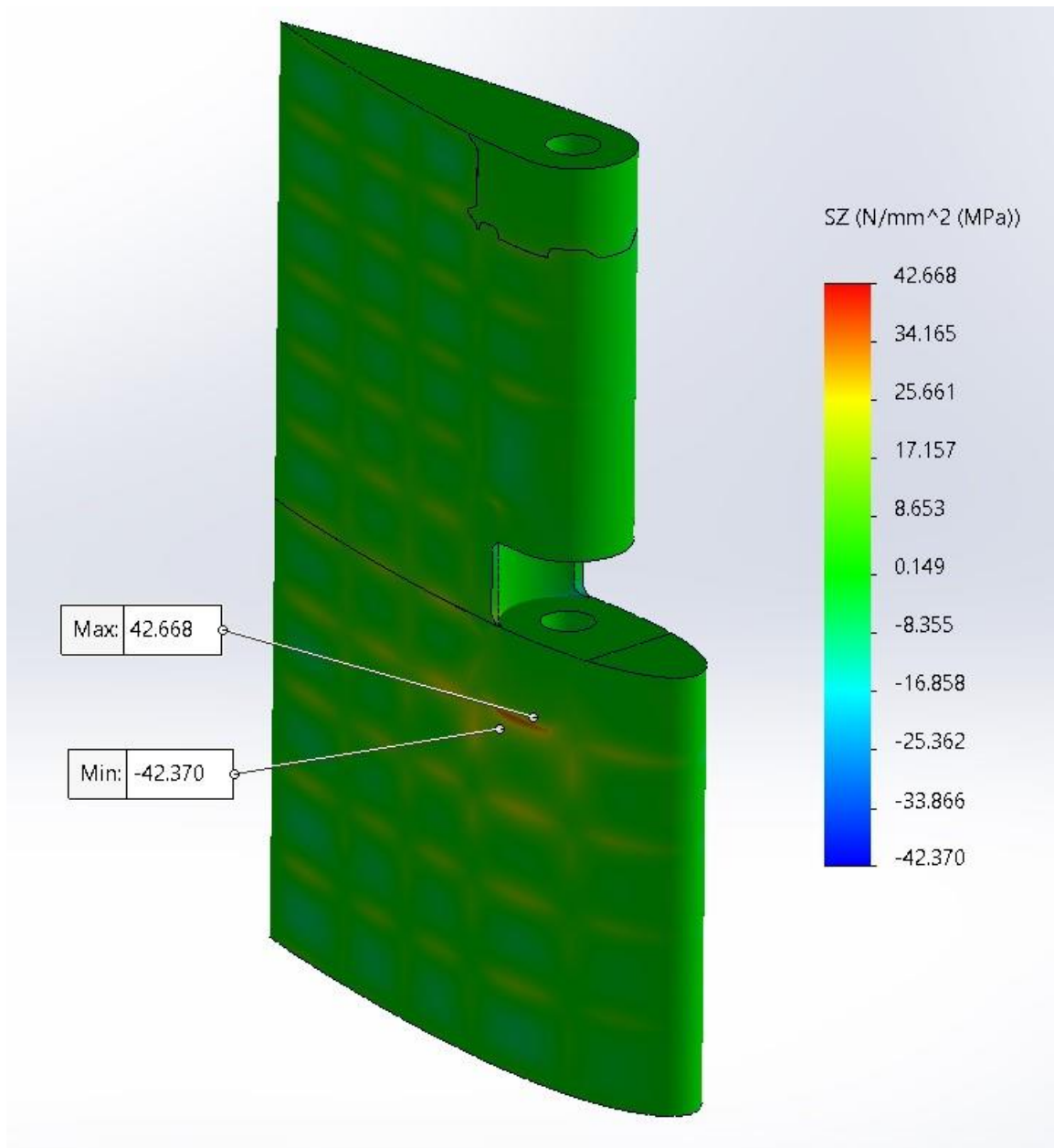
Εικόνα 89: Ορθές τάσεις σγ βελτιστοποιημένου μοντέλου (1)



Εικόνα 90: Ορθές τάσεις σγ βελτιστοποιημένου μοντέλου (2)

Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τάσεις κατά τη διεύθυνση του άξονα y, εμφανίζονται στην περιοχή των οπών των κατακόρυφων ενισχυτικών που βρίσκονται κάτω από το lower casting. Η μέγιστη εφελκυστική έχει τιμή 45 [MPa], ενώ η μέγιστη θλιπτική έχει τιμή -65 [MPa].

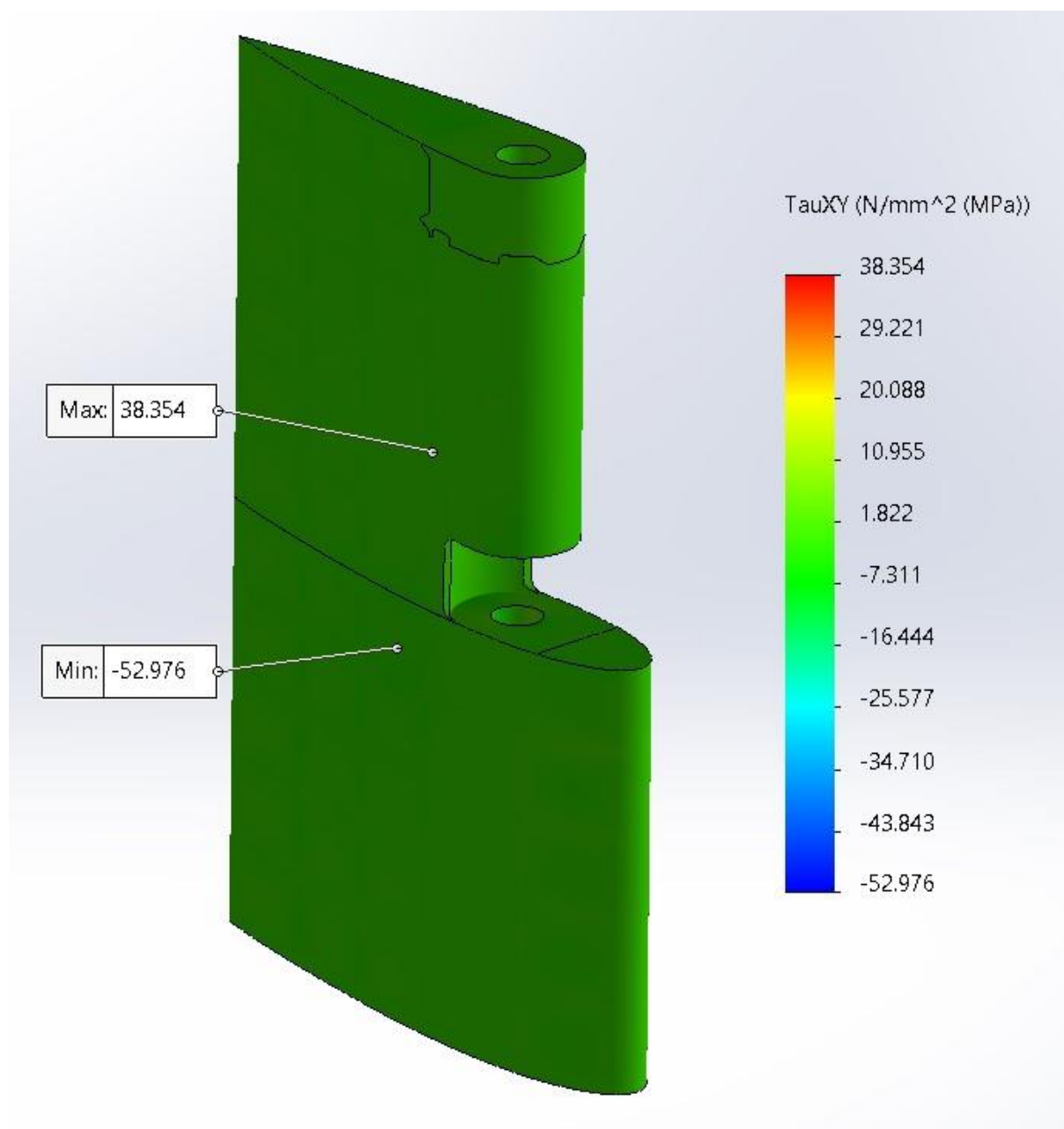
## Ορθές τάσεις σz βελτιστοποιημένου μοντέλου



Εικόνα 91: Ορθές τάσεις σz βελτιστοποιημένου μοντέλου (2)

Οι μέγιστες ορθές τάσεις κατά τη διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα εμφανίζονται στα σημεία ένωσης του lower casting με το κέλυφος της κατασκευής. Οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις αγγίζουν τα 42 [MPa], ενώ οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις έχουν κατά απόλυτη τιμή ίδιο μέτρο.

### Διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$

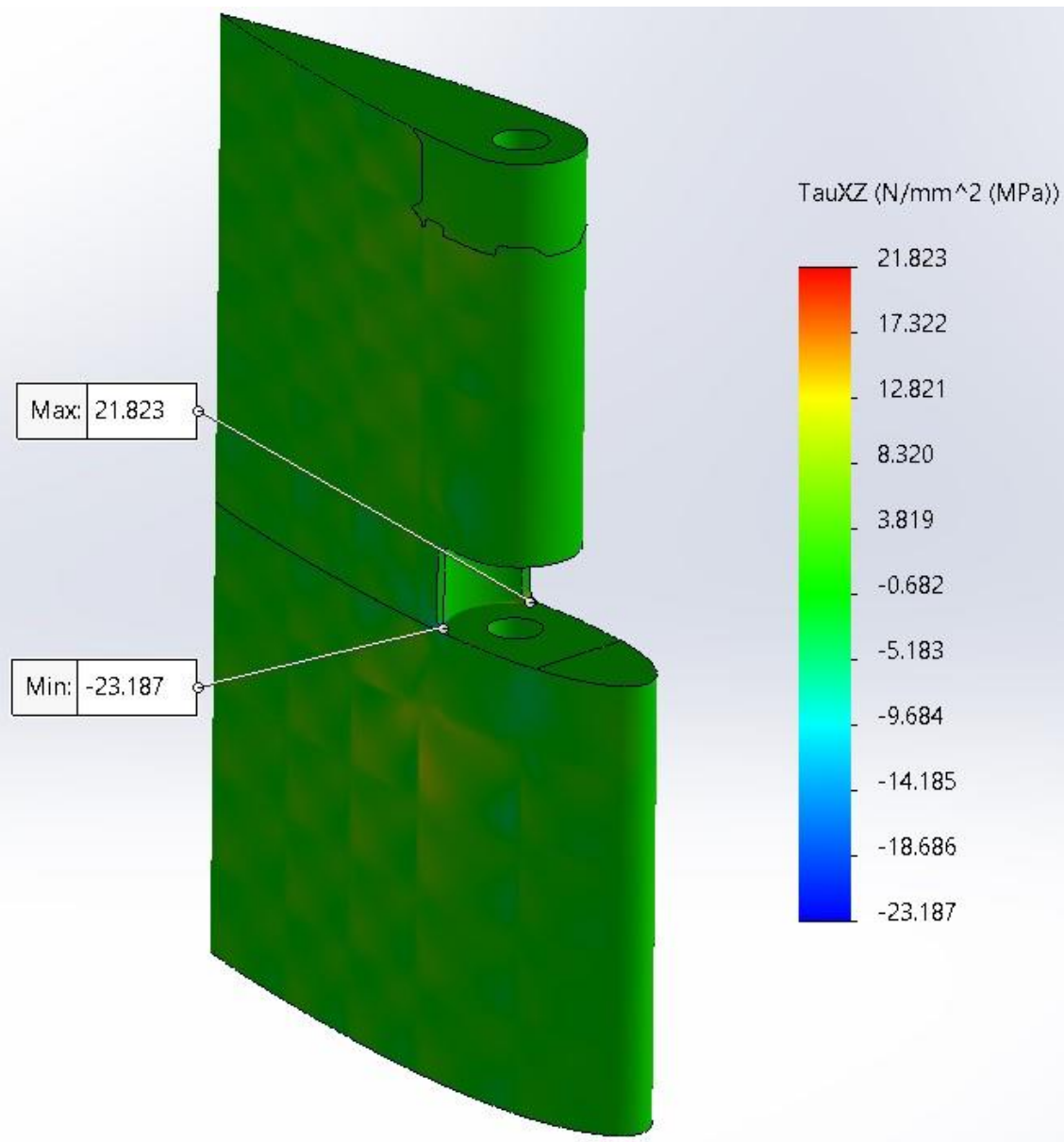


Εικόνα 92: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  βελτιστοποιημένου μοντέλου

Οι διατμητικές τάσεις οι οποίες είναι κάθετες στον άξονα x, κατά τη διεύθυνση του άξονα y έχουν μέγιστη τιμή -52 [MPa] (σε απόλυτη τιμή). Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εντοπίζονται στην περιοχή κοντά στο χυτό τμήμα (*lower casting*).



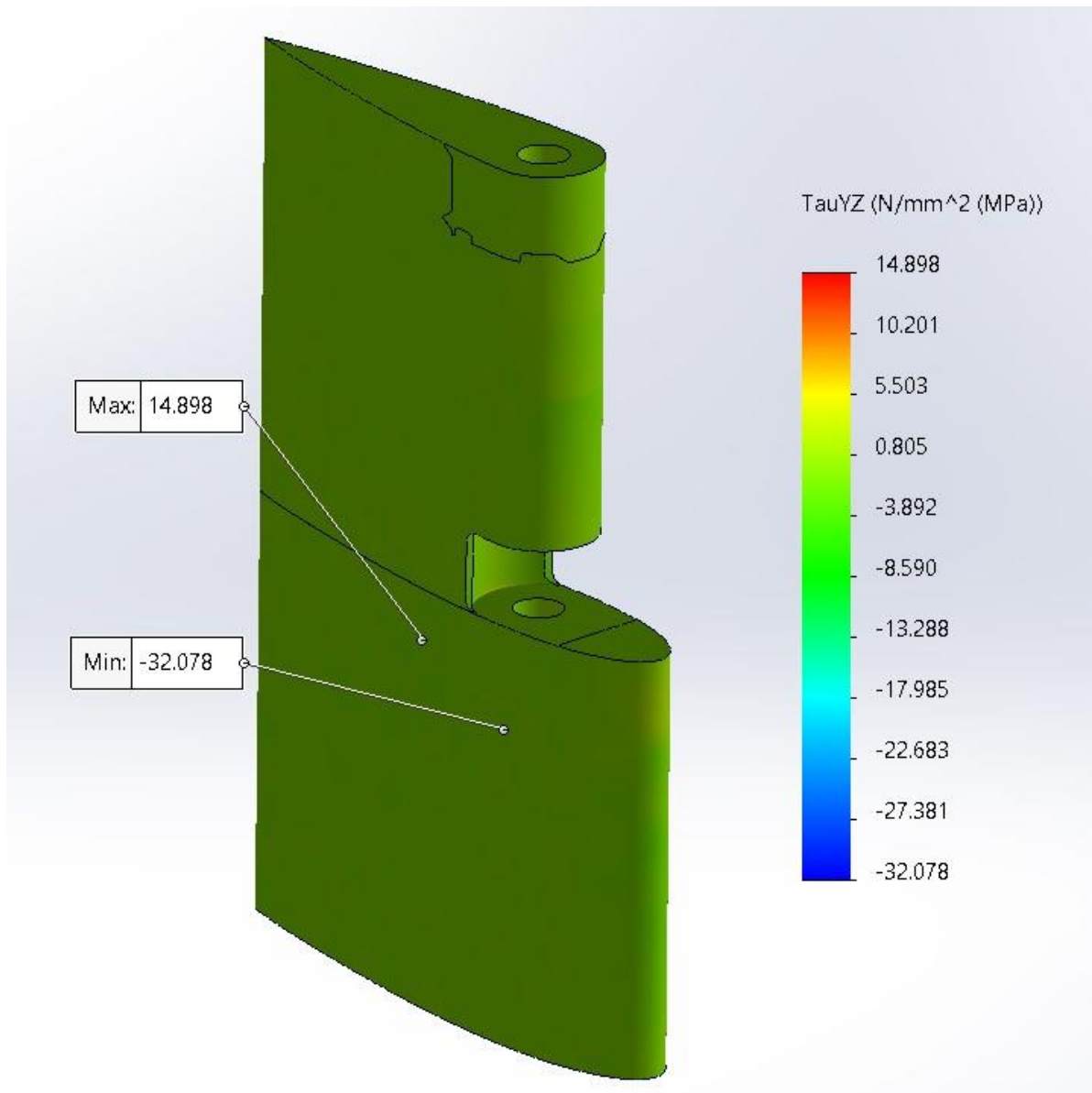
### Διατμητικές τάσεις $\tau_{xz}$ βελτιστοποιημένου μοντέλου



Εικόνα 93: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  βελτιστοποιημένου μοντέλου

Οι διατμητικές τάσεις κάθετες στον άξονα  $x$ , κατά τη διεύθυνση του άξονα  $z$  εμφανίζονται μέγιστες στις ακμές του κελύφους στην περιοχή που συνδέεται το πηδάλιο με το ποδόστημα του πλοίου. Σε απόλυτη τιμή οι διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  παίρνουν τιμές έως 23 [MPa].

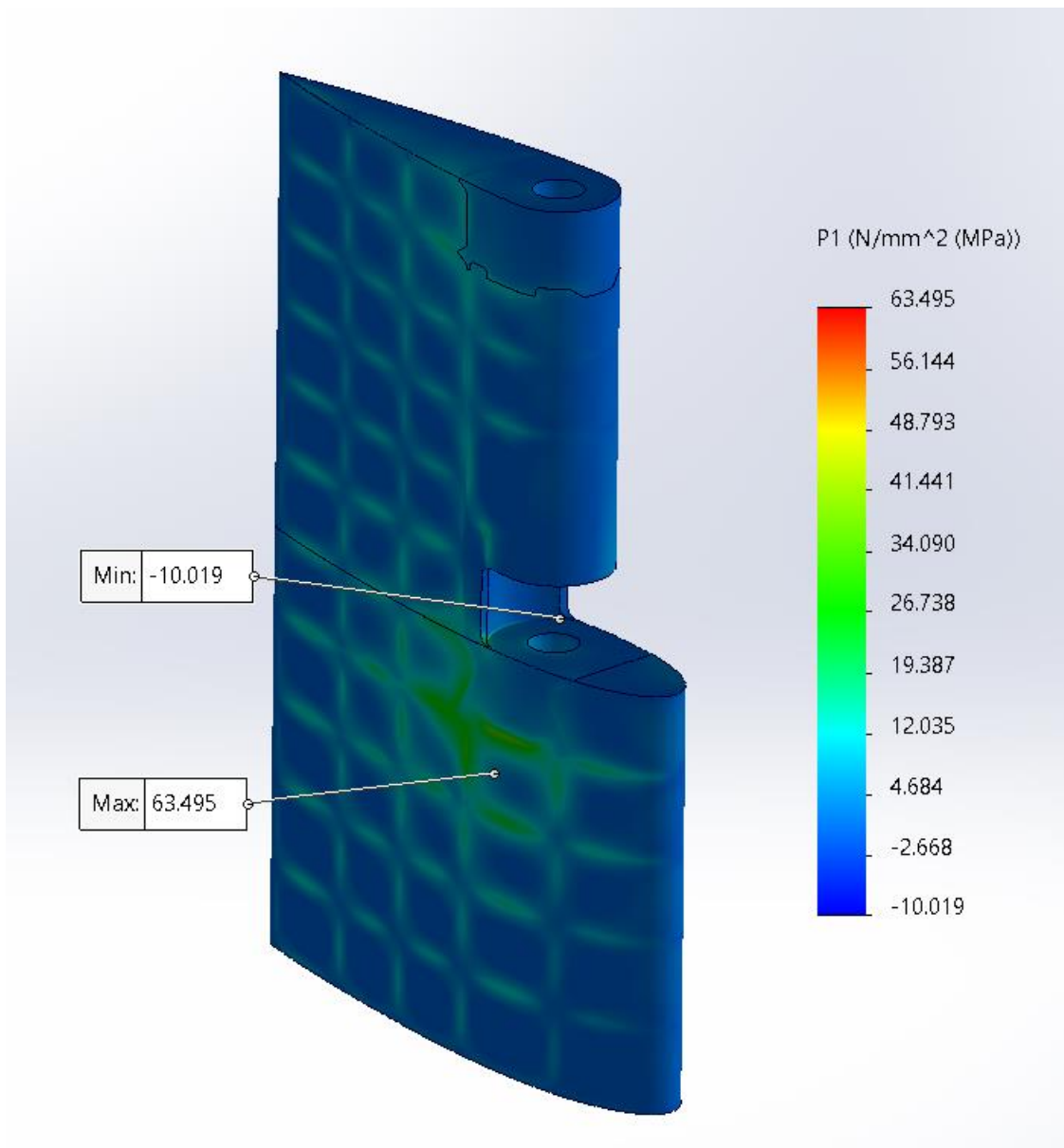
Διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  βελτιστοποιημένου μοντέλου



Εικόνα 94: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  βελτιστοποιημένου μοντέλου

Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις κάθετες στον άξονα  $y$ , κατά τη διεύθυνση του άξονα  $z$  φτάνουν τα 32 MPa.

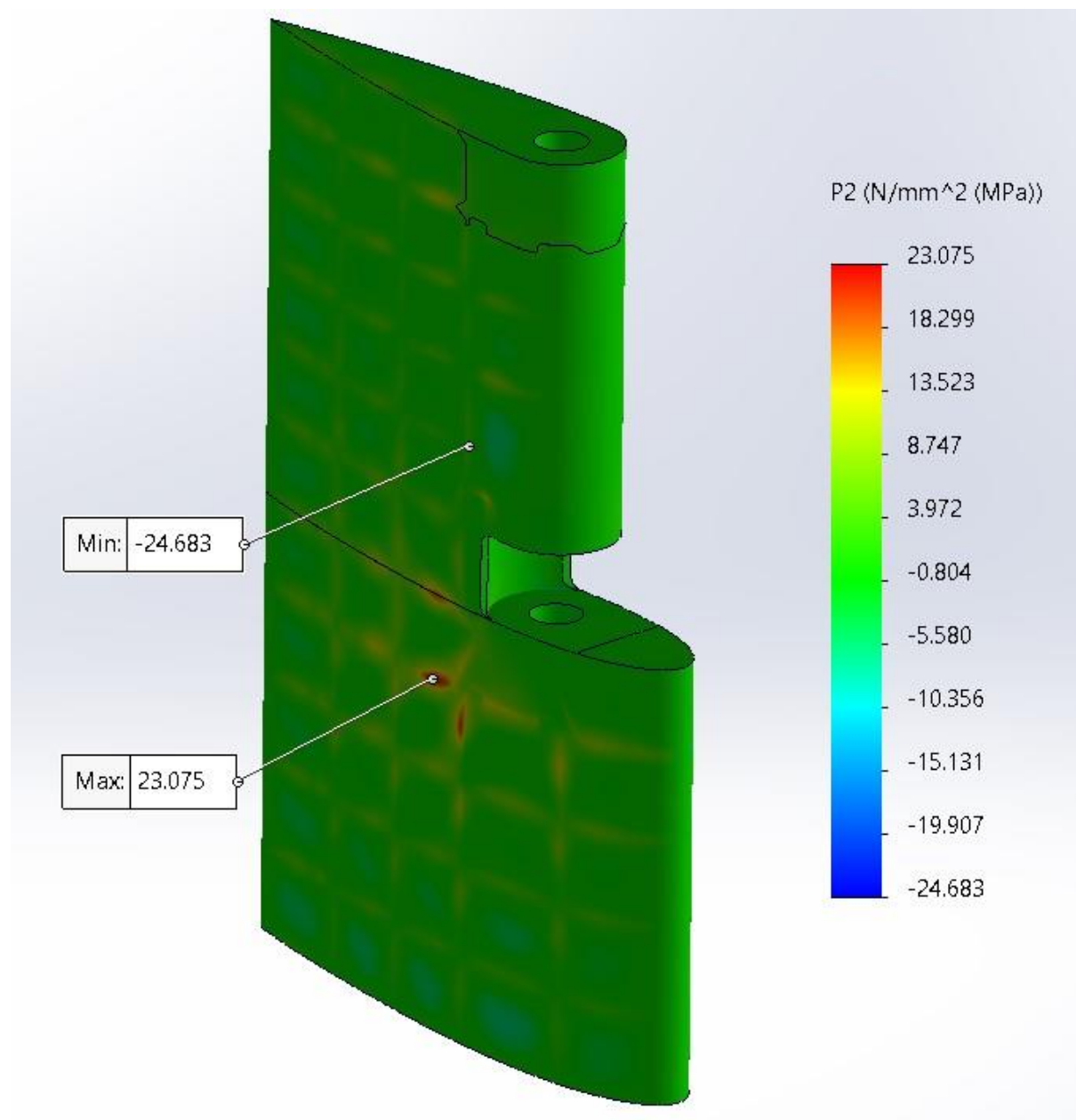
## Κύριες τάσεις $\sigma_1$ βελτιστοποιημένου μοντέλου



Εικόνα 95: Κύριες τάσεις  $\sigma_1$  βελτιστοποιημένης κατασκευής

Περιστρέφοντας το μοντέλο με τέτοιο τρόπο, έτσι ως προς τους νέους άξονες οι διατμητικές τάσεις να μηδενίζονται, προκύπτουν οι κύριες τάσεις. Κύριες τάσεις είναι οι ορθές τάσεις κατά την φορά των νέων αξόνων (κύριοι άξονες). Οι κύριες τάσεις  $\sigma_1$  σε εφελκυσμό φτάνουν μέγιστη τιμή τα 63.5 [MPa], ενώ σε θλίψη φτάνουν -10 [MPa].

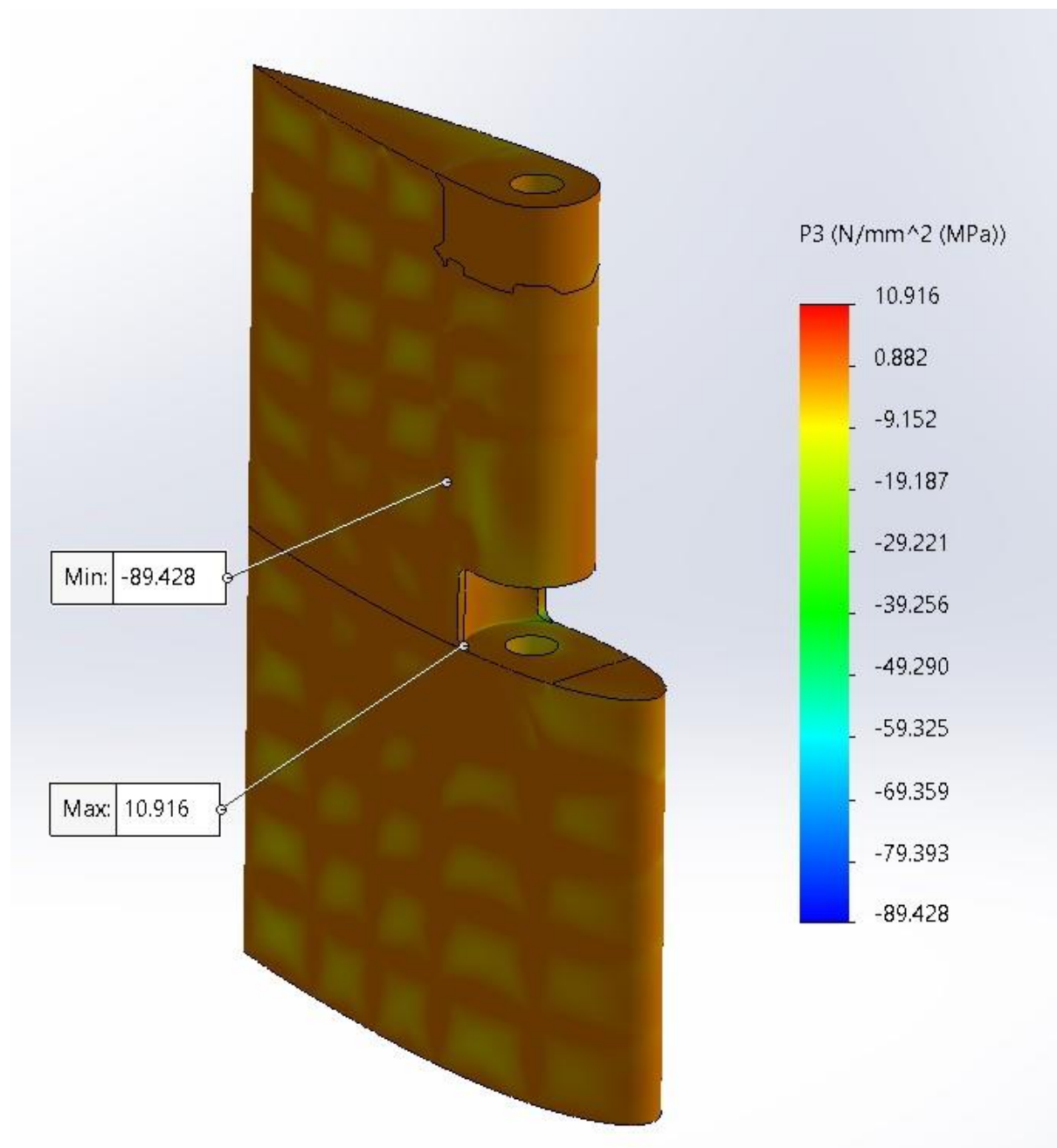
Κύριες τάσεις  $\sigma_2$  βελτιστοποιημένου μοντέλου



Εικόνα 96: Κύριες τάσεις  $\sigma_2$  βελτιστοποιημένης κατασκευής

Μέγιστη τιμή κυρίων τάσεων  $\sigma_2$  (σε απόλυτη τιμή): 24 [MPa].

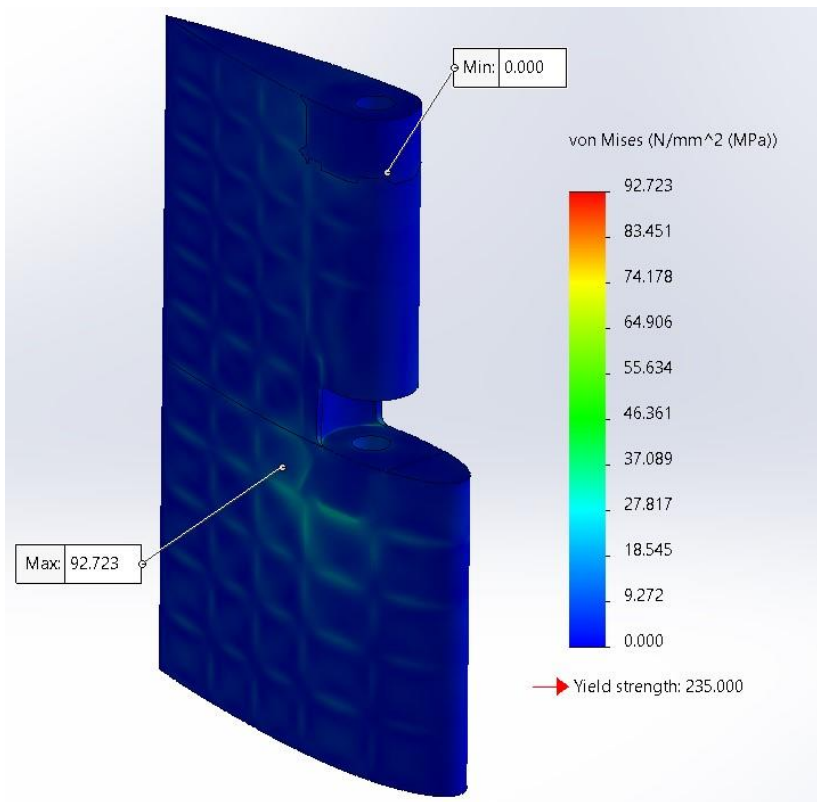
Κύριες τάσεις  $\sigma_3$  βελτιστοποιημένου μοντέλου



Εικόνα 97: Κύριες τάσεις  $\sigma_3$  βελτιστοποιημένης κατασκευής

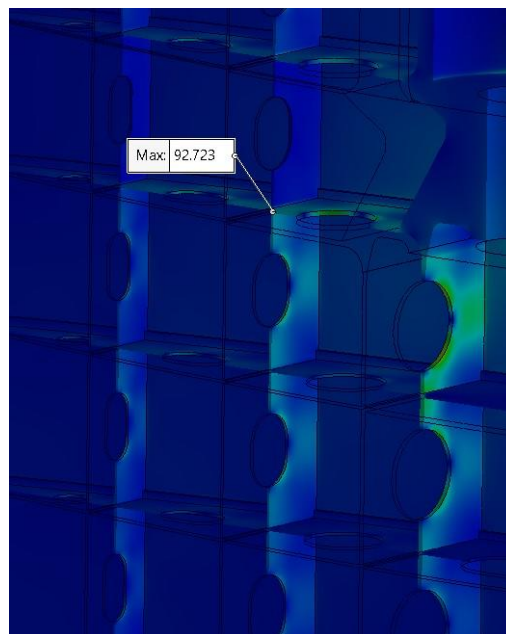
Μέγιστη τιμή κυρίων τάσεων  $\sigma_3$  (σε απόλυτη τιμή): 90 [MPa].

## Πεδίο τάσεων von-Mises βελτιστοποιημένου μοντέλου



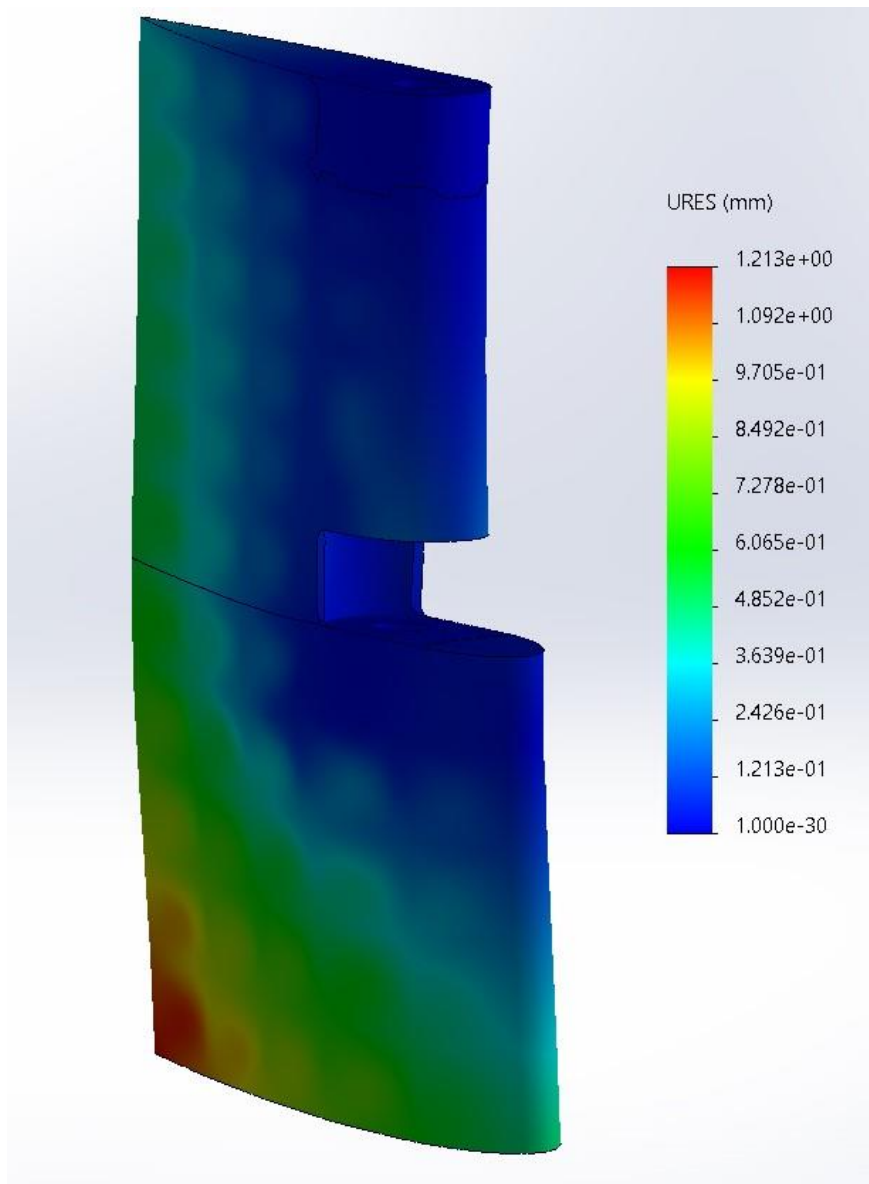
Εικόνα 98: Τασικό πεδίο von-Mises βελτιστοποιημένου μοντέλου (1)

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το πεδίο των τάσεων von-Mises, όπως υπολογίστηκε από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση von-Mises έχει τιμή 92.7 [MPa] και εμφανίζεται στο σημείο της ένωσης ενός οριζοντίου με ένα κατακόρυφο ενισχυτικό όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 99.



Εικόνα 99: Τασικό πεδίο von-Mises βελτιστοποιημένου μοντέλου (2)

## Πεδίο μετατοπίσεων



Εικόνα 100: Πεδίο μετατοπίσεων βελτιστοποιημένου μοντέλου

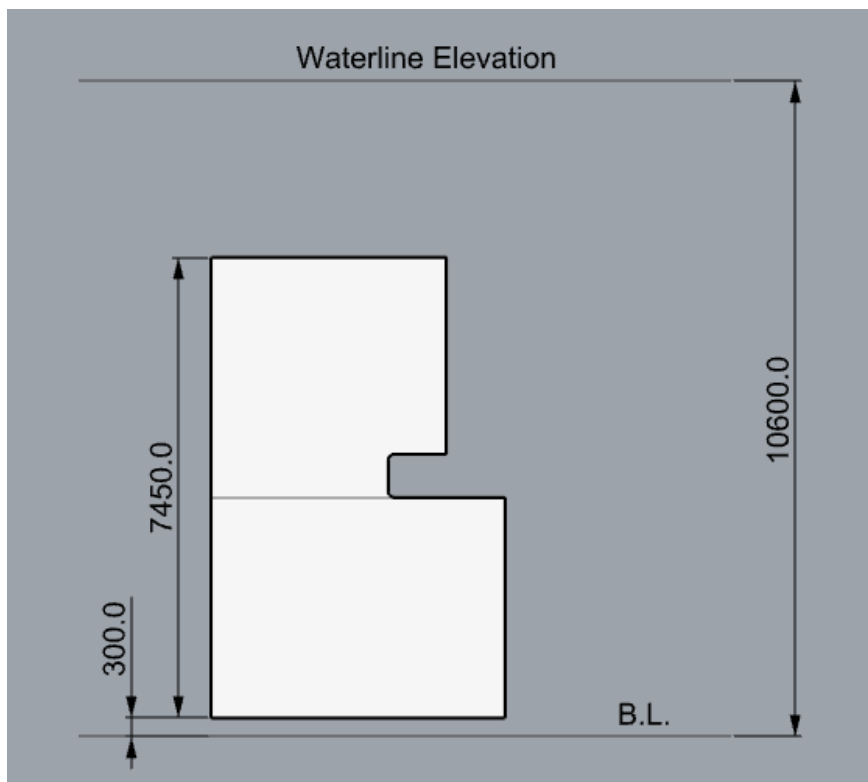
Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στην χορδή επί της *baseline*, στο χείλος εκφυγής και έχει τιμή 1.213 [mm].

## 10. Έλεγχος αντοχής του πρωτοτύπου μοντέλου υποβαλλόμενο αποκλειστικά σε υδροστατική πίεση

Σκοπός της παραπάνω μελέτης ήταν να γίνει ο προσδιορισμός της αντοχής του πηδαλίου με δεδομένη την πίεση που προκύπτει από το πρότυπο *UR S10*, καθώς και πως αυτή επηρεάζει την κατασκευή. Έτσι, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε η υδροστατική πίεση αμελητέα σε σχέση με την πίεση που δέχεται το πηδάλιο από την ροή. Ωστόσο, θα ήταν ορθό να γίνει μια επιπλέον διερεύνηση για την επίδραση της υδροστατικής πίεσης στο πηδάλιο και κατά πόσο η παράλειψη της μπορεί να επιφέρει σημαντικό σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα. Η διερεύνηση αυτή θα πραγματοποιηθεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το πρωτότυπο μοντέλο, χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα και για το βελτιστοποιημένο.

### Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στο μοντέλο

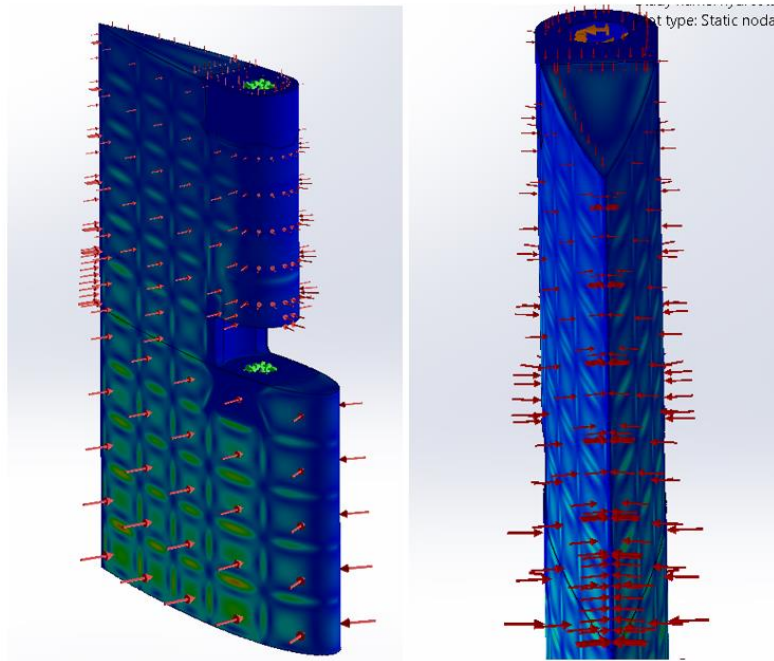
Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, το πηδάλιο βρίσκεται σε απόσταση 2.85 [m] από την ελεύθερη επιφάνεια επομένως η κατανομή της υδροστατικής πίεσης είναι τραπεζοειδής.



Εικόνα 101: Θέση πηδαλίου σε σχέση με την ελεύθερη επιφάνεια

Ορίζοντας ένα νέο σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο με αρχή την ελεύθερη επιφάνεια, είναι εφικτό στο σχεδιαστικό πρόγραμμα, η πίεση σε κάθε σημείο να δοθεί ως συνάρτηση της θέσης του σε σχέση με αυτό. Στην περίπτωση της υδροστατικής πίεσης, η συνάρτηση της πίεσης είναι μια ευθεία εξαρτάται από την κατακόρυφη συνιστώσα ( $z$ ) και έχει γνωστή κλίση  $\rho \times g$ . Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προέκυψε η κατανομή της πίεσης όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 102. Προφανώς, για την εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης επιλέχθηκαν όλες οι εξωτερικές επιφάνειες εκατέρωθεν του επιπέδου  $x-z$ .

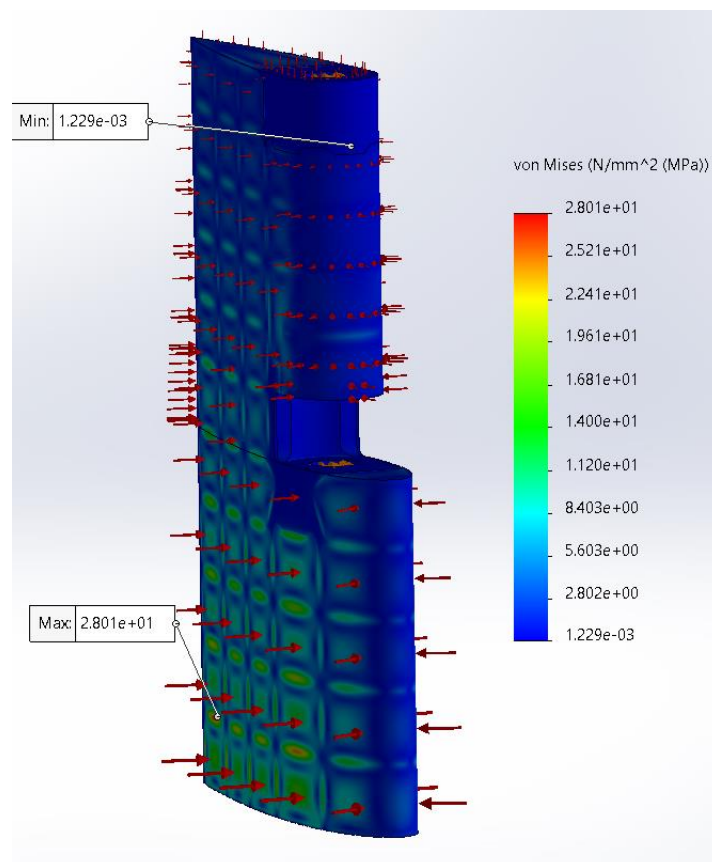




Εικόνα 102: Εφαρμογή υδροστατικής πίεσης στο μοντέλο

### Επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Κατά την επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε το τασικό πεδίο von-Mises όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



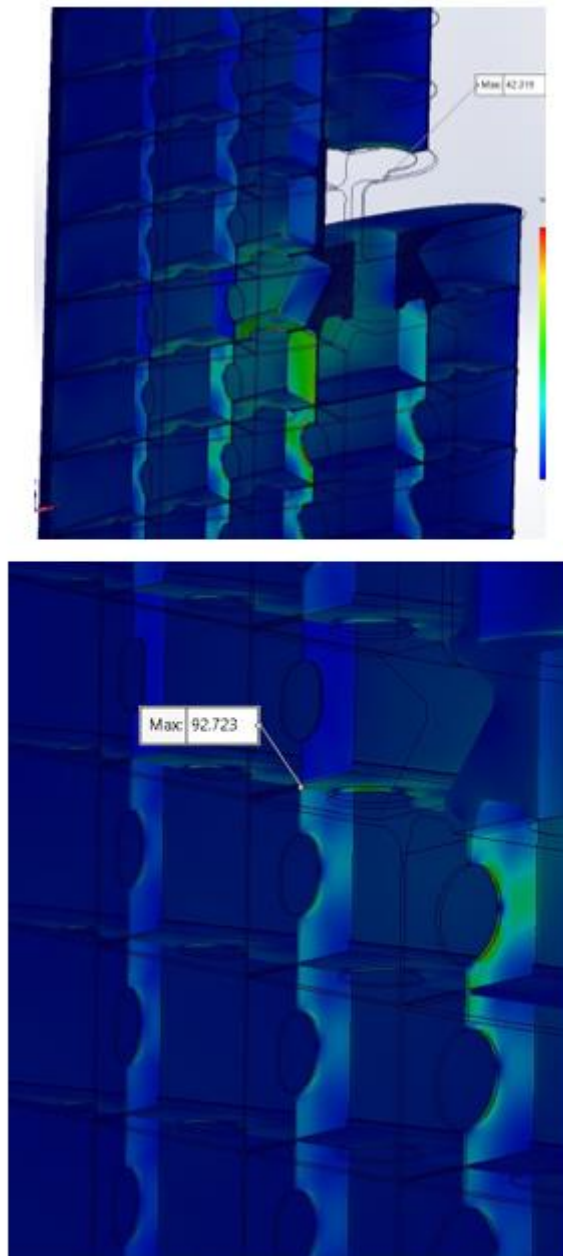
Εικόνα 103: Αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για τις τάσεις Von-Mises

## Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση von-Mises έχει τιμή 28 [MPa] και εμφανίζεται στο κατώτερο τμήμα του πηδαλίου. Προφανώς, οι τάσεις αυξάνονται ανάλογα με την πίεση και αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό. Στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε αμελώντας την επίδραση της υδροστατικής πίεσης, οι μέγιστες τάσεις έχουν τιμή σχεδόν 45 [MPa], ωστόσο, εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα του πηδαλίου και συγκεκριμένα στην περιοχή κοντά στην πάκτωση. Επομένως, δεδομένου ότι η ζώνη υψηλών τάσεων λόγω της υδροστατικής πίεσης εμφανίζεται στο κατώτερο τμήμα του πηδαλίου και ταυτόχρονα είναι μια περιοχή όπου οι τάσεις που οφείλονται στην πίεση από την ροή έχουν μικρή τιμή, δεν θα έχουμε μεγάλη απόκλιση στις μέγιστες τάσεις αλλά και στην περιοχή που αυτές εμφανίζονται. Επομένως, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη, δεν θα έχουν μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα, όσον αφορά τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις.

## 11. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα μεγέθη που παρουσιάζουν ενδιαφέρον κατά τη σύγκριση τους είναι οι τάσεις von-Mises και οι μετατοπίσεις του αρχικού και του βελτιστοποιημένου μοντέλου. Στην εικόνα 104 παρουσιάζονται τα τασικά πεδία von-Mises των δύο μοντέλων στην περιοχή όπου αυτές εμφανίζονται μέγιστες. Παρατηρείται ότι το νέο μοντέλο εμφανίζει μέγιστη τάση von-Mises 92.72 [MPa], σε αντίθεση με το αρχικό μοντέλο όπου οι μέγιστη τάση von-Mises ήταν 42.32 [MPa]. Δηλαδή, οι πραγματικές τάσεις επί τις κατασκευής αυξήθηκαν κατά 54.6%.



Εικόνα 101: Τάσεις von-Mises (αρχικού πάνω, βελτιστοποιημένου κάτω)

Τέλος, συγκρίνοντας τα πεδία των μετατοπίσεων γίνεται αντιληπτό ότι η συμπεριφορά των δύο μοντέλων είναι ίδια, με αύξηση της μέγιστης μετατόπισης του βελτιστοποιημένου μοντέλου κατά 7.43%.

## 12. Συμπεράσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το βελτιστοποιημένο μοντέλο παρουσιάζει αύξηση των πραγματικών τάσεων της τάξεως του 50%. Ωστόσο, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας *von-Mises* δεν υπάρχει διαρροή. Αντίθετα, στη βελτιστοποιημένη κατασκευή ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (στις κρίσιμες περιοχές του μοντέλου) είναι 2.5. Επομένως, υπάρχει μεγάλη ανοχή έως ότου επέλθει διαρροή της κατασκευής. Επιπλέον, διαστασιολόγώντας οριακά με τις προβλέψεις του κανονισμού το πηδάλιο, προκύπτει μείωση του συνολικού του βάρους κατά 2.7%.

Η διαστασιολόγηση του πηδαλίου προκύπτει από τους κοινούς κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί από τον *IACS*. Όπως όλοι οι περιγραφικοί κανονισμοί (*prescriptive rules*), έτσι και αυτοί, έχουν προκύψει ως αποτελέσματα της μηχανικής σε συνδυασμό με την εμπειρία που έχει προκύψει από καταγεγραμμένα γεγονότα. Τέλος, όπως είναι λογικό εμπεριέχουν συντελεστές ασφαλείας. Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης γίνεται αντιληπτό ότι οι συγκεκριμένοι κανονισμοί είναι αρκετά συντηρητικοί, με σκοπό την επίτευξη μέγιστης ασφάλειας, προλαμβάνοντας τυχόν απρόβλεπτα γεγονότα. Κατά τη βελτιστοποίηση παρατηρήθηκε ότι για πολύ μικρή μεταβολή πάχους, με σχεδόν με αμελητέα επιρροή στο συνολικό βάρος του πηδαλίου, ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας περιορίστηκε κατά το μισό σε σχέση με τον αρχικό. Έτσι, προκύπτει ως συμπέρασμα, ότι ενώ τα αποτελέσματα του κανονισμού είναι συντηρητικά, μικρές μειώσεις ενδεχομένως να οδηγήσουν σε μη ασφαλείς σχεδιάσεις.

### 13. Προτάσεις

Η παρούσα μελέτη προσεγγίζει ικανοποιητικά το πρόβλημα της αντοχής του πηδαλίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψιν τις διατάξεις του κανονισμού. Ωστόσο, δίνει πρόσφορο έδαφος, για κάποιον που ενδιαφέρεται για το θέμα, να επεκτείνει την μελέτη.

- Αρχικά, θα μπορούσε να γίνει μελέτη της κατασκευής έναντι κόπωσης. Έχει παρατηρηθεί στα πηδάλια η εμφάνιση ταλαντώσεων λόγω της παρουσίας δινών (*vortex-induced vibration*). Συνεπώς, στην μελέτη ενός πηδαλίου δε θα πρέπει να αμελείται ο υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση.
- Η θέση του πηδαλίου στο πλοίο, το καθιστά ευάλωτο σε τυχόν προσαράξεις και συγκρούσεις. Ωστόσο, αποτελεί εξάρτημα ζωτικής σημασίας για ένα πλοίο και οι πιθανότητες βλάβης του θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστες. Επομένως, θα μπορούσε κάποιος να πραγματοποιήσει ορισμένες προσομοιώσεις σύγκρουσης κατά τις οποίες θα γινόταν υπολογισμός της αντοχής και γενικότερα της συμπεριφοράς του.
- Μια συμπληρωματική μελέτη που θα μπορούσε κάποιος να πραγματοποιήσει αφορά την συντήρηση και προστασία του πηδαλίου έναντι διάβρωσης (εφαρμογή καθοδικής προστασίας, υπολογισμός βάρους θυσιαζομένων ανοδίων κ. α.).
- Εναλλακτικά, προτείνεται η μοντελοποίηση του συστήματος πηδάλιο-άξονας-πρύμνη και η μελέτη αντοχής να περιλαμβάνει το συνολικό σύστημα. Στο παρόν μοντέλο κατά την επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εφαρμόσαμε συνθήκη πάκτωσης στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον άξονα του πηδαλίου. Οι παραπάνω συνθήκες είναι πιθανόν να δίνουν λανθασμένα αποτελέσματα για τις πεδιακές μεταβλητές, στην περιοχή κοντά στην πάκτωση. Δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο μοντέλο της πρύμνης, θεωρείται ότι τα αποτελέσματα για το πηδάλιο θα έχουν μεγαλύτερο δείκτη αξιοπιστίας.
- Ένα θέμα για επιπλέον μελέτη γύρω από το συγκεκριμένο πηδάλιο θα ήταν ο υπολογισμός της πραγματικής δύναμης που δέχεται από το ρευστό, λύνοντας το αντίστοιχο πρόβλημα με χρήση κώδικα *CFD*. Έτσι, θα μπορούσε να γίνει σύγκριση του αποτελέσματος, με τον υπολογισμό από τους κανονισμούς. Η λύση αυτού του προβλήματος θα έδινε μια απάντηση στο ερώτημα, εάν ο κανονισμός δίνει συντηρητικό αποτέλεσμα για την δύναμη επί του πηδαλίου.

## 14. Παράρτημα

Περιγραφή μεγέθους		AHEAD	ASTERN	
Μέσο πλάτος	b	7.450		[m]
Πρ. Εμβαδόν με ποδόστημα	At	35.969		[m <sup>2</sup> ]
	λ	1.543		[-]
	K1	1.181		[-]
	K2	1.100		[-]
	K3	1.000		[-]
Πρ. επιφάνεια πηδαλίου	A	31.058		[m <sup>2</sup> ]
Ταχύτητα	V	14.800	7.400	[knots]
	CR	1166598.412	291649.603	[N]

Πίνακας 1: Υπολογισμός δυνάμεων πηδαλίου

	AHEAD	ASTERN	
A1a	12.504		[m <sup>2</sup> ]
A1f	1.597		[m <sup>2</sup> ]
A2a	11.781		[m <sup>2</sup> ]
A2f	5.177		[m <sup>2</sup> ]
A1	14.101		[m <sup>2</sup> ]
A2	16.957		[m <sup>2</sup> ]
A	31.058		[m <sup>2</sup> ]
c1	3.800		[m]
c2	4.750		[m]
k1	0.113		[-]
k2	0.305		[-]
a	0.330	0.660	[-]
CR	1166598.412	291649.603	[N]
r1	0.824	2.078	[m]
r2	0.117	1.685	[m]
CR1	529648.654	132412.163	[N]
CR2	636949.758	159237.440	[N]
QR	511030.209	543407.092	[N*m]

Πίνακας 2: Υπολογισμός ροπών πηδαλίου

Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Default-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	20 mm
Min Element Size	1 mm
Mesh quality	High
Total nodes	6564530
Total elements	4037573
Maximum Aspect Ratio	2,039.7
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99.8
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.0578
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:07:10
Computer name	

Πίνακας 3: Λεπτομέρειες πλέγματος

Material properties  
Materials in the default library can not be edited. You must first copy the material to a custom library to edit it.

Model Type:   Save model type in library

Units:

Category:

Name:

Default failure criterion:

Description:

Source:

Sustainability:

Property	Value	Units
Elastic Modulus	210000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	79000	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	7850	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	480	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	235	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.3e-05	/K
Thermal Conductivity	43	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Πίνακας 4: Δημιουργία υλικού ενισχυτικών και κελύφους

Material properties

Materials in the default library can not be edited. You must first copy the material to a custom library to edit it.

Model Type:   Save model type in library

Units:

Category:

Name:

Default failure criterion:

Description:

Source:

Sustainability:

Property	Value	Units
Elastic Modulus	190000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.26	N/A
Shear Modulus	78000	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	7300	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	480	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	240	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.5e-05	/K
Thermal Conductivity	38	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Πίνακας 5: Δημιουργία υλικού χυτών τμημάτων

	Πάχη που προκύπτουν από το UR S10	
<b>STOCK</b>		
Reh stock	280.000	MPa
k(stock)	0.877	
stock diameter (dt)	321.397	mm
<b>RUDDER PLATING</b>		
scantling draught Tsc	10.600	m
rudder force CR	1166598.412	N
rudder area A	31.058	m <sup>2</sup>
smalest unsupported width of plating	0.840	m
gratest unsupported width of plating	1.080	m
β	0.893	
k(rudder plating)	1.000	-
minimum plate thickness (side top bottom)	18	mm
min web plate thickness	12.693	mm
min horizontal plate thickness (connected to the solid parts)	21.759	mm
min vertical plate thickness (connected to the solid parts)	36.265499	mm
min thickness of plating (bonded with the solid parts)	23.57257435	mm

Πίνακας 6: Διαστασιολόγηση με βάση το UR S10



Mesh quality	High
Total nodes	6327693
Total elements	3884773
Maximum Aspect Ratio	1,863.9
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99.7
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.104
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:07:09
Computer name	

Πίνακας 7: Λεπτομέρειες πλέγματος βελτιστοποιημένου μοντέλου

## 15. Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Batista, N., Melicio, R., Matias, J., & Catalão, J. (2011). *Self-start performance evaluation in Darrieus-type vertical axis wind turbines: Methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils*. 250–255. <https://doi.org/10.24084/repqj09.302>
2. De paula, A. (2016). *The airfoil thickness effects on wavy leading edge phenomena at low Reynolds number regime*.
3. Delefortrie, G., Van Hoydonck, W., & Eloot, K. (2022). Forces and Torque acting on a Rudder while Manoeuvring. *Journal of Marine Science and Technology*, 27(1), 383–407. <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00840-y>
4. Fig. 4. NACA0012, NACA0018, NACA0020, NACA0025 and NACA0030 blade profiles. (n.d.). ResearchGate. Retrieved December 5, 2023, from [https://www.researchgate.net/figure/NACA0012-NACA0018-NACA0020-NACA0025-and-NACA0030-blade-profiles\\_fig6\\_316866136](https://www.researchgate.net/figure/NACA0012-NACA0018-NACA0020-NACA0025-and-NACA0030-blade-profiles_fig6_316866136)
5. HSVA new Website. (n.d.). Retrieved December 17, 2023, from <https://www.hsva.de/>
6. Júnior, S. (n.d.-a). *Principles of Naval Architecture Second Revision Volume III @BULLET Motions in Waves and Controllability*. Retrieved December 19, 2023, from [https://www.academia.edu/37034242/Principles\\_of\\_Naval\\_Architecture\\_Second\\_Revision\\_Volume\\_III\\_at\\_BULLET\\_Motions\\_in\\_Waves\\_and\\_Controllability](https://www.academia.edu/37034242/Principles_of_Naval_Architecture_Second_Revision_Volume_III_at_BULLET_Motions_in_Waves_and_Controllability)
7. Júnior, S. (n.d.-b). *Principles of Naval Architecture Second Revision Volume III @BULLET Motions in Waves and Controllability*. Retrieved December 19, 2023, from [https://www.academia.edu/37034242/Principles\\_of\\_Naval\\_Architecture\\_Second\\_Revision\\_Volume\\_III\\_at\\_BULLET\\_Motions\\_in\\_Waves\\_and\\_Controllability](https://www.academia.edu/37034242/Principles_of_Naval_Architecture_Second_Revision_Volume_III_at_BULLET_Motions_in_Waves_and_Controllability)
8. Leckie, F. A., & Bello, D. J. (2009). *Strength and Stiffness of Engineering Systems*. Springer Science & Business Media.

9. Liu, W. K., Li, S., & Park, H. S. (2022). Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), 4431–4453. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>
10. Madier, D. (n.d.). *History of Finite Element Method*. FEA Academy. Retrieved December 19, 2023, from <https://www.fea-academy.com/index.php/component/content/article/27-blog/fea-generalities/73-fem-history>
11. National Advisory Committee for Aeronautics. (2023). In *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=National\\_Advisory\\_Committee\\_for\\_Aeronautics&oldid=1185346383](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=National_Advisory_Committee_for_Aeronautics&oldid=1185346383)
12. Oar. (2023). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oar&oldid=1138872510>
13. *Principles of naval architecture. Volume III, Motions in waves and controllability*. (1989). Jersey City, NJ : Society of Naval Architects and Marine Engineers. <http://archive.org/details/principlesofnava0000unse>
14. *Rhino—Rhinoceros 3D*. (n.d.). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.rhino3d.com/>
15. *Rudder—History of The Rudder—Medieval Europe*. (n.d.). Retrieved November 5, 2023, from [https://www.liquisearch.com/rudder/history\\_of\\_the\\_rudder/medieval\\_europe](https://www.liquisearch.com/rudder/history_of_the_rudder/medieval_europe)
16. Runyan, T. J. (1999). Review of The Development of the Rudder: A Technological Tale. [Review of *Review of The Development of the Rudder: A Technological Tale*., by L. V. Mott]. *Speculum*, 74(4), 1096–1098. <https://doi.org/10.2307/2887019>
17. *Safer and Cleaner Shipping—IACS*. (n.d.-a). Retrieved December 18, 2023, from <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements>
18. *Safer and Cleaner Shipping—IACS*. (n.d.-b). Retrieved December 18, 2023, from <https://iacs.org.uk/about-us/annual-review>

19. *Safer and Cleaner Shipping—IACS*. (n.d.-c). Retrieved December 18, 2023, from <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements>
20. *Sixty years of research on ship rudders: Effects of design choices on rudder performance*. (n.d.). Retrieved December 17, 2023, from <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17445302.2016.1178205?needAccess=true>
21. *SOLIDWORKS / 3D CAD Design Software & PDM Systems*. (n.d.). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.solidworks.com/>
22. Steering oar. (2023). In *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Steering\\_oar&oldid=1162607171](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Steering_oar&oldid=1162607171)
23. *The Medieval Cog Ship And Its Use In History—About History*. (2022, December 13). <https://about-history.com/the-medieval-cog-ship-and-its-use-in-history/>
24. *The Phoenicians / Western Civilization*. (n.d.). Retrieved October 31, 2023, from <https://courses.lumenlearning.com/suny-hccc-worldhistory/chapter/the-phoenicians/>
25. Vortex-induced vibration. (2023). In *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vortex-induced\\_vibration&oldid=1179205072](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vortex-induced_vibration&oldid=1179205072)
26. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier.