ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Τοπολογική Βελτιστοποίηση Φτερού Αεροπλάνου με την Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων»

Προσαλέντης Κωνσταντίνος

ΑΜ:ΤΜ20135

Επιβλέπουσα

Αμαλία Μουτσοπούλου

ΗΡΑΚΛΕΙΟ, «Ιούνιος», «2025»

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY

POLYTECHNIC SCHOOL

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS

for the Undergraduate Degree

«Topology Optimization of Airplane Wing using Finite Element Method»

Konstantinos Prosalentis

YD:TM20135

Supervisor

Amalia Moutsopoulou

HERAKLION «JUNE» «2025»

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Υπέθυνη Δήλωση Συγγραφεά:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Αποδέχομαι ότι η Βιβλιοθήκη μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από την ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο, καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέποντα καθηγήτρια κ. Αμαλία Μουτσοπούλου για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα σχετικό με το αντικείμενο που μου αρέσει, δηλαδή τα αεροπλάνα. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την σημαντική υποστήριξη και καθοδήγηση της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες ανατροφοδοτήσεις και παρατηρήσεις που βελτίωσαν σημαντικά το περιεχόμενο της.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Περίληψη

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization) είναι η μέθοδος με την οποία γίνεται η βέλτιστη κατανομή του υλικού σε ένα υποθετικό τρισδιάστατο σχέδιο στο χώρο με φορτία και συνοριακές συνθήκες. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση του σχήματος για τους σκοπούς μείωσης βάρους, για την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων σε υλικό. Αυτή η βελτιστοποίηση υλοποιείται μέσω της χρήσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) όπου στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε μέσω του προγράμματος Autodesk Fusion 360 ένα λογισμικό που βασίζεται στα πεπερασμένα στοιχεία. Σε αυτήν την εργασία ως αντικείμενο εφαρμογής έχει θεωρηθεί ένα σχέδιο στο χώρο ένα φτερό αεροπλάνου για να εξηγήσει τα οφέλη της τοπολογικής βελτιστοποίησης, το αποτέλεσμα ουσιαστικά θα δείξει σε ποια σημεία του φτερού μπορεί να γίνει αφαίρεση υλικού έτσι ώστε να επιτευχθεί χαμηλότερο βάρος κόστος και ίσως απόδοση.

Λέξεις- κλειδιά

Topology Optimization, Finite Element Analysis

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Abstract

The topology optimization it is the method by wich the optimal distribution is achieved in a hypothetical three-dimensional design in space with loads and boundary conditions. This method can be used to optimize the shape for weight reduction purposes to minimize material requirements. This optimization is implemented through the use of the finite element method (FEM) , where in this work, a software based on finite elements was applied throygh the Autodesk fusion 360 program. In this work, an airplane wing design has been considered as an application object to explain the benefits of topological optimazation, the result will essentially show at witch points of the wing material removal can be made so as to achieve lower weight, cost and perhaps performance.

Keywords

Topology Optimization, Finite Element Analysis

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Περιεχόμενα

1 Κεφάλαιο : Εισαγωγή 9
1.1 Σκοπός της Έρευνας 10
1.2 Στόχοι της Έρευνας 10
1.3 Συμβολή της Έρευνας 12
1.4 Διάρθρωση της Εργασίας 16
2 Κεφάλαιο : Ιστορική Αναδρομή 19
2.1 Πρώιμες Απόπειρες Πτήσης 19
2.1.1 Χαρταετοί και Ιδέες Πτήσης (200 π.Χ. – 1500 μ.Χ.) 20
2.1.2 Ανεμόπτερα (19ος αιώνας) 20
2.2 Η Εποχή των Πρωτοπόρων: Αδελφοί Ράιτ (1903) 22
2.2.1 Ο Flyer I: Ένα Τεχνολογικό Επίτευγμα 23
2.2.2 Η Πρώτη Πτήση 24
3 Κεφάλαιο : Ιστορική Αναδρομή για τα Φτερά Αεροπλάνου 26
3.1 Αρχική Ανάπτυξη: Πρωτόγονες Κατασκευές 26
3.2 Υλικά 27
3.3 Πειραματισμοί και Διδάγματα 28
4 Κεφάλαιο : Θεωρητικό Υπόβαθρο 30
4.1 Εισαγωγή στην Τοπολογική Βελτιστοποίηση 31
4.2 Θεμελιώδεις Αρχές της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης 31
4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) 33
4.4 Υπολογιστικές Τεχνικές 35
5 Κεφάλαιο : Μεθοδολογία 36
5.1 Δημιουργία Αρχικού Μοντέλου 36
5.2 Ανάλυση με FEM 38
5.3 Τοπολογική Βελτιστοποίηση 39
5.4 Επικύρωση και Αποτελέσματα 40
5.5 Συμπεράσματα 40
6 Κεφάλαιο : Αποτελέσματα και Ανάλυση 42
6.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά 42
6.2 Δοκιμές Αντοχής 43
6.3 Αεροδυναμικά Χαρακτηριστικά 43

6.4 Σύγκριση Αρχικού και Βελτιστοποιημένου Μοντέλου....44
6.5 Συμπεράσματα....45
7 Κεφάλαιο : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα....46
7.1 Συνολική Αξιολόγηση....46
7.2 Πρακτικές Εφαρμογές....46
7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα....47
7.4 Τελικές Σκέψεις....47
8 Κεφάλαιο : Παραδείγματα Ανάλυσης Εξαρτημάτων με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων....48
8.1 Παράδειγμα 1....48
9 Κεφάλαιο: Σχεδίαση και φορτία που εφαρμόστηκαν στο φτερό του αεροπλάνου ...53
9.1 FUSION 360....53
9.2 ΕΡΩΤΗΜΑ ΚΑΙ ΕΠΥΛΙΣΗ....54
9.3 ΣΧΕΔΙΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΠΟΙΗΣΗΣ ΦΤΕΡΩΝ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟΥ....55
9.3.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΦ1....55
9.3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΦ2....58
9.3.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΦ3....60
10 Κεφάλαιο :Επίλογος....62

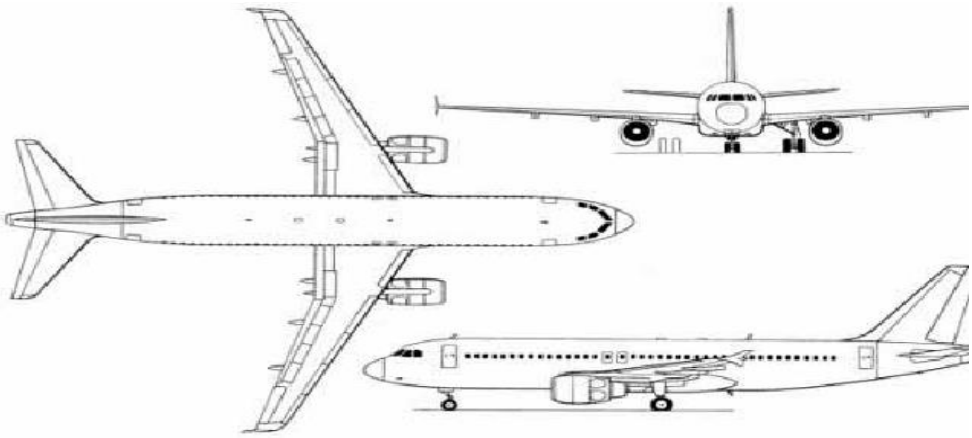
ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

1 Κεφάλαιο : Εισαγωγή

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί ένα από τα πλέον σύγχρονα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη μηχανολογία και την αεροναυπηγική. Σκοπός της είναι η ανακατανομή του υλικού σε μία δομή, ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή της με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η μείωση βάρους ή η αύξηση της αντοχής. Το φτερό ενός αεροπλάνου είναι ένα από τα σημαντικότερα μέρη του, καθώς συμβάλλει τόσο στην αεροδυναμική όσο και στη δομική σταθερότητα του αεροσκάφους. Η τοπολογική βελτιστοποίηση του φτερού έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά το βάρος του, διατηρώντας ταυτόχρονα την απαιτούμενη αντοχή και ασφάλεια.[1]

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται στη σχεδίαση φτερών βασίζονται σε προηγμένα μαθηματικά μοντέλα και τεχνικές υπολογιστικής μηχανικής. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την ανάλυση σύνθετων γεωμετριών και τη βελτιστοποίηση της κατανομής υλικού για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Στην αεροναυπηγική, η μείωση του βάρους είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και την αύξηση της εμβέλειας των αεροσκαφών.[2]

Επιπλέον, η βελτιστοποίηση προσφέρει τη δυνατότητα σχεδίασης καινοτόμων γεωμετριών που μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της σύγχρονης αεροναυπηγικής. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) επιτρέπουν τον εντοπισμό των περιοχών που υφίστανται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις, ώστε να διασφαλιστεί η αντοχή και η ανθεκτικότητα των φτερών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Μέσω της τοπολογικής βελτιστοποίησης, οι μηχανικοί μπορούν να επιτύχουν πιο αποδοτικές και βιώσιμες κατασκευές, προσφέροντας λύσεις που ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις του κλάδου. [1]



Εικόνα 1: Απεικόνιση επιβατικού αεροπλάνου

1.1 Σκοπός της Έρευνας

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό ενός φτερού αεροπλάνου. Στόχος είναι η επίτευξη σημαντικής μείωσης του βάρους του φτερού, διατηρώντας παράλληλα τη δομική του αντοχή και την αεροδυναμική του απόδοση. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται το λογισμικό Fusion 360, το οποίο παρέχει εργαλεία για τοπολογική βελτιστοποίηση και προσομοίωση.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) εφαρμόζεται για την ανάλυση των φορτίων και των παραμορφώσεων που υφίσταται το φτερό, ώστε να επιτευχθεί μια βέλτιστη κατανομή υλικού. Μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας, η εργασία αποσκοπεί στη δημιουργία ενός φτερού που συνδυάζει ελαφρότητα και αντοχή, ενώ παράλληλα εξετάζει τη βιωσιμότητα των αποτελεσμάτων για εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες αεροναυπηγικής.

1.2 Στόχοι της Έρευνας

I. **Μείωση του Βάρους:** Η μείωση του βάρους του φτερού αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση της αποδοτικότητας του αεροσκάφους. Στόχος είναι να επιτευχθεί μείωση του βάρους κατά τουλάχιστον 30%, διατηρώντας όμως τη δομική ακεραιότητα και αντοχή του φτερού. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της τοπολογικής βελτιστοποίησης, η οποία αφαιρεί υλικό από περιοχές χαμηλής

καταπόνησης, ενώ ενισχύει τις κρίσιμες περιοχές που υφίστανται μεγαλύτερα φορτία.

Ταυτόχρονα, η διαδικασία αυτή δεν πρέπει να επηρεάσει αρνητικά την αεροδυναμική απόδοση του φτερού. Η μείωση του βάρους συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθιστώντας την αεροναυπηγική πιο βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική.[2]

II. **Αύξηση Απόδοσης:** Η αύξηση της απόδοσης του φτερού αποτελεί βασικό ζητούμενο της παρούσας εργασίας, εστιάζοντας στη διατήρηση των αεροδυναμικών του χαρακτηριστικών, ακόμα και μετά την αλλαγή της γεωμετρίας του λόγω της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός φτερού, όπως η ανύψωση (lift) και η οπισθέλκουσα (drag), καθορίζουν την αποτελεσματικότητά του κατά την πτήση. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, αφαιρείται υλικό από περιοχές χαμηλής καταπόνησης, γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει την αεροδυναμική συμπεριφορά. [2]

Για να διατηρηθεί η απόδοση, οι περιοχές που συμβάλλουν στην ανύψωση, όπως η μπροστινή ακμή του φτερού, διατηρούνται άθικτες, ενώ εφαρμόζονται ενισχύσεις στις κρίσιμες ζώνες. Επιπλέον, η προσομοίωση αεροδυναμικών δυνάμεων με χρήση της μεθόδου FEM εξασφαλίζει ότι η νέα γεωμετρία πληροί τα κριτήρια απόδοσης. Το τελικό αποτέλεσμα στοχεύει σε ένα φτερό που συνδυάζει ελαφρότητα και βέλτιστη αεροδυναμική λειτουργία, εξασφαλίζοντας οικονομία καυσίμου και μέγιστη αποτελεσματικότητα κατά την πτήση. [2]

III. **Χρήση Σύγχρονων Εργαλείων:** Η χρήση σύγχρονων εργαλείων αποτελεί βασικό στοιχείο της παρούσας εργασίας, με έμφαση στην εφαρμογή και αξιολόγηση του Fusion 360 για τον σχεδιασμό και την ανάλυση. Το Fusion 360 είναι ένα προηγμένο λογισμικό που συνδυάζει λειτουργίες CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer-Aided Engineering) και CAM (Computer-Aided Manufacturing), επιτρέποντας την ολοκληρωμένη προσέγγιση στη σχεδίαση και τη βελτιστοποίηση. [2]

Στο πλαίσιο της τοπολογικής βελτιστοποίησης, το Fusion 360 παρέχει εξειδικευμένα εργαλεία, όπως το Generative Design, που επιτρέπουν την

αυτόματη δημιουργία εναλλακτικών σχεδίων με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Επιπλέον, η δυνατότητα προσομοίωσης φορτίων και παραμορφώσεων μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) εξασφαλίζει ότι οι σχεδιαστικές επιλογές είναι δομικά αποδοτικές και λειτουργικά βιώσιμες. [2]

Η αξιολόγηση του Fusion 360 επικεντρώνεται στη δυνατότητά του να παρέχει ακριβή και αποδοτικά μοντέλα, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικές αεροναυπηγικές κατασκευές. Μέσω της χρήσης του λογισμικού, η εργασία αποσκοπεί στη δημιουργία ενός φτερού που συνδυάζει καινοτομία, ακρίβεια και αποδοτικότητα. [2]

IV. **Διερεύνηση Τεχνικών Βελτιστοποίησης:** Η διερεύνηση τεχνικών βελτιστοποίησης είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της παρούσας εργασίας, με έμφαση στην κατανόηση και εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) σε συνδυασμό με την τοπολογική βελτιστοποίηση. Η μέθοδος FEM αποτελεί τη βάση για την ανάλυση και την προσομοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του φτερού, καθώς επιτρέπει τον διαχωρισμό της γεωμετρίας σε μικρά στοιχεία, τα οποία αναλύονται ξεχωριστά για να υπολογιστούν οι καταπονήσεις, οι παραμορφώσεις και η κατανομή των φορτίων. [2]

Η FEM εφαρμόζεται σε όλα τα στάδια της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αρχικά, εντοπίζονται οι περιοχές του φτερού που υφίστανται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις, όπως η βάση του φτερού που είναι συνδεδεμένη με την άτρακτο. Στη συνέχεια, η τοπολογική βελτιστοποίηση αξιοποιεί τα δεδομένα της FEM για την αφαίρεση υλικού από περιοχές χαμηλής καταπόνησης, διασφαλίζοντας ότι η νέα γεωμετρία πληροί τα κριτήρια απόδοσης. Ο συνδυασμός FEM και τοπολογικής βελτιστοποίησης επιτρέπει τη δημιουργία πιο ελαφριών και αποδοτικών δομών, μειώνοντας το βάρος χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή. Η μελέτη αυτή αποδεικνύει τη σημασία των υπολογιστικών εργαλείων στη διαδικασία σχεδιασμού, προσφέροντας βελτιστοποιημένες λύσεις για πραγματικές αεροναυπηγικές εφαρμογές. [2]

1.3 Συμβολή της Έρευνας

Η εργασία συμβάλλει στη μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης, εστιάζοντας στην εφαρμογή της στην αεροναυπηγική. Παρουσιάζει καινοτόμες μεθόδους σχεδίασης φτερών, αξιοποιεί το Fusion 360 για ανάλυση και βελτιστοποίηση, και

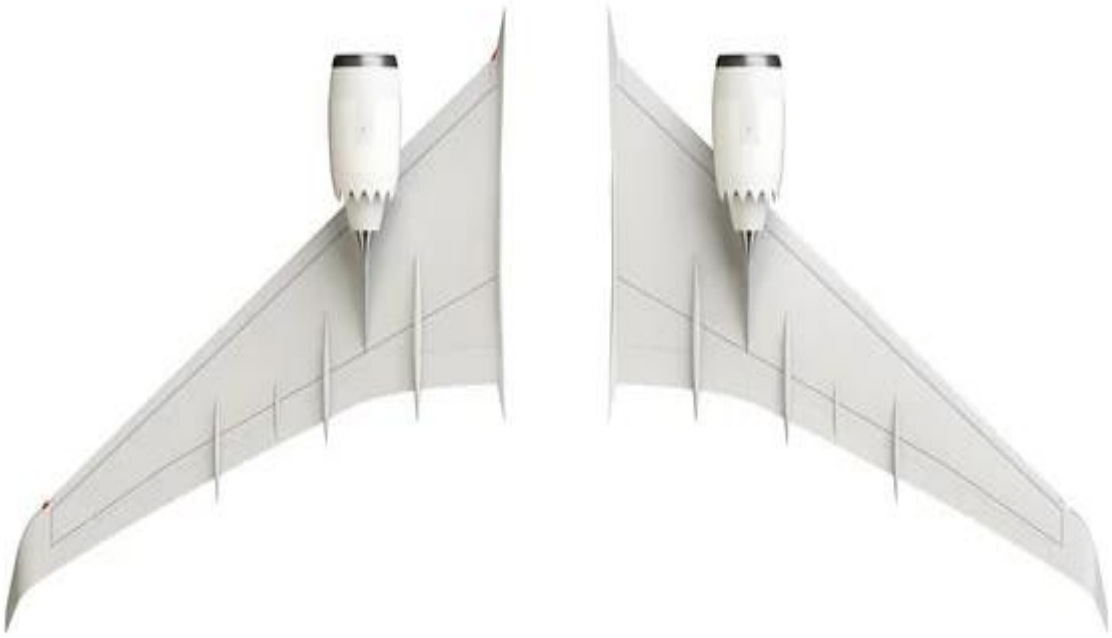
προάγει βιώσιμες πρακτικές μέσω μείωσης βάρους, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των αεροσκαφών. [2]

- **Παρουσίαση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού φτερών.**
  Η παρουσίαση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού φτερών αποτελεί κεντρικό σημείο της παρούσας εργασίας, με στόχο τη δημιουργία ελαφριών, ανθεκτικών και αποδοτικών φτερών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της σύγχρονης αεροναυπηγικής. [2]

  Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί μια πρωτοποριακή προσέγγιση που επιτρέπει την ανακατανομή του υλικού σε μια δομή, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη αντοχή με τη μικρότερη δυνατή χρήση υλικού. Μέσω του Fusion 360, εφαρμόζονται σύγχρονες τεχνικές, όπως το Generative Design, που δημιουργεί πολλαπλά σενάρια σχεδίασης με βάση προκαθορισμένα κριτήρια, όπως η αντοχή, το βάρος και η αεροδυναμική. [2]

  Παράλληλα, η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) επιτρέπει την ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. [2]

  Οι μέθοδοι αυτές όχι μόνο μειώνουν το βάρος του φτερού, αλλά και εξασφαλίζουν τη δομική του ακεραιότητα, προωθώντας την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των αεροναυπηγικών κατασκευών. Το αποτέλεσμα είναι φτερά με υψηλή απόδοση και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. [2]



Εικόνα 2 : Απεικόνιση φτερών αεροπλάνου

- **Εφαρμογή του Fusion 360 ως εργαλείο για τη σχεδίαση και ανάλυση αεροναυπηγικών κατασκευών.**
  Η εφαρμογή του Fusion 360 ως εργαλείου για τη σχεδίαση και ανάλυση αεροναυπηγικών κατασκευών αποτελεί σημαντικό σημείο της παρούσας εργασίας. Το Fusion 360 είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό που συνδυάζει δυνατότητες σχεδιασμού, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, παρέχοντας στους μηχανικούς τα εργαλεία για τη δημιουργία καινοτόμων και αποδοτικών κατασκευών.[7]

  Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, το Fusion 360 χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του αρχικού μοντέλου του φτερού αεροπλάνου, καθώς και για τη βελτιστοποίησή του μέσω του εργαλείου Generative Design. Αυτό το εργαλείο επιτρέπει τη δημιουργία εναλλακτικών σχεδίων με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως η αντοχή, το βάρος και η ακαμψία. [7]

  Παράλληλα, η ενσωματωμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των φορτίων και των παραμορφώσεων, εξασφαλίζοντας τη δομική ακεραιότητα και την αντοχή του φτερού. Το Fusion 360 παρέχει επίσης τη δυνατότητα οπτικοποίησης και ανάλυσης των

δεδομένων, επιτρέποντας στους μηχανικούς να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης. [7]

Με τη χρήση του λογισμικού, επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός φτερού που συνδυάζει ελαφρότητα, αεροδυναμική απόδοση και ανθεκτικότητα, προσφέροντας λύσεις που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες της αεροναυπηγικής.[7]

- **Προώθηση βιώσιμων πρακτικών μέσω της μείωσης του βάρους και της κατανάλωσης καυσίμου.**
  Η προώθηση βιώσιμων πρακτικών μέσω της μείωσης του βάρους και της κατανάλωσης καυσίμου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους της παρούσας εργασίας. Στην αεροναυπηγική, η μείωση του βάρους των κατασκευών, όπως τα φτερά αεροπλάνων, έχει άμεσο αντίκτυπο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ένα ελαφρύτερο φτερό απαιτεί λιγότερη ενέργεια για να παραχθεί ανύψωση, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου κατά τη διάρκεια της πτήσης. [4]

  Η τοπολογική βελτιστοποίηση παρέχει τη δυνατότητα αφαίρεσης υλικού από περιοχές χαμηλής καταπόνησης, διατηρώντας παράλληλα τη δομική αντοχή στις κρίσιμες ζώνες. Αυτό όχι μόνο μειώνει το βάρος της κατασκευής, αλλά εξασφαλίζει ότι η αεροδυναμική και μηχανική απόδοση του φτερού παραμένουν στα απαιτούμενα επίπεδα. [1]

  Με τη μείωση του βάρους, μειώνονται οι απαιτήσεις σε καύσιμα, κάτι που όχι μόνο μειώνει το κόστος λειτουργίας των αεροσκαφών αλλά και περιορίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθιστώντας τις πτήσεις πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Επιπλέον, η χρήση σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων, όπως το Fusion 360, επιτρέπει τη δημιουργία βελτιστοποιημένων σχεδίων που ενισχύουν τη βιωσιμότητα, ενώ προάγουν καινοτόμες πρακτικές στον σχεδιασμό αεροναυπηγικών κατασκευών. Έτσι, η εργασία συμβάλλει τόσο στην οικονομική όσο και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα.[1]

1.4 Διάρθρωση της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη σε οκτώ κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική σειρά που επιτρέπει στον αναγνώστη να κατανοήσει την προσέγγιση, τη μεθοδολογία, και τα αποτελέσματα της έρευνας. Κάθε κεφάλαιο συμβάλλει στην αναλυτική παρουσίαση της τοπολογικής βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό φτερού αεροπλάνου.

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**
  Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται ο σκοπός της εργασίας, οι στόχοι της έρευνας και η συμβολή της στον τομέα της αεροναυπηγικής. Εισάγεται το γενικό πλαίσιο της τοπολογικής βελτιστοποίησης, καθώς και η σημασία της μείωσης του βάρους και της βελτίωσης της απόδοσης των φτερών.

- **Κεφάλαιο 2: Ιστορική Αναδρομή στα Είδη Αεροπλάνων**
  Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στην εξέλιξη των αεροσκαφών, από τα πρώιμα μοντέλα έως τα σύγχρονα αεροπλάνα. Εξετάζεται η τεχνολογική πρόοδος και οι επιπτώσεις της στην αεροναυπηγική βιομηχανία, καθώς και η σύνδεση των αλλαγών αυτών με τη σχεδίαση φτερών.

- **Κεφάλαιο 3: Ιστορική Αναδρομή για τα Φτερά Αεροπλάνου**
  Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναδρομή στην εξέλιξη των φτερών αεροπλάνου, περιλαμβάνοντας αλλαγές στα υλικά, τη γεωμετρία, και τις τεχνικές κατασκευής. Εξετάζονται οι καινοτομίες που συνέβαλαν στη βελτίωση της απόδοσης των φτερών, καθώς και η επίδραση των τεχνολογικών εξελίξεων στη δομική τους σχεδίαση.
- **Κεφάλαιο 4: Θεωρητικό Υπόβαθρο**
  Το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει τις βασικές αρχές της τοπολογικής βελτιστοποίησης και της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της απόδοσης των κατασκευών, με έμφαση στη θεωρία πίσω από τη διαδικασία σχεδίασης και ανάλυσης.

- **Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία**
  Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού του φτερού. Περιλαμβάνει τη δημιουργία του αρχικού μοντέλου στο Fusion 360, τη ρύθμιση των παραμέτρων ανάλυσης, την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω προσομοιώσεων με τη μέθοδο FEM.

- **Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα και Ανάλυση**
  Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας, με συγκρίσεις μεταξύ της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας του φτερού. Συνοδεύονται από γραφήματα, πίνακες και αναλύσεις που καταδεικνύουν τη μείωση βάρους, τη βελτίωση της αντοχής, και τη διατήρηση της αεροδυναμικής απόδοσης.

- **Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα**
  Το έβδομο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια ευρήματα της έρευνας και περιγράφει τις δυνατότητες για περαιτέρω βελτιώσεις. Προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, όπως η χρήση σύνθετων υλικών και η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των φτερών.

- **Κεφαλιαο 8: Παραδείγματα ανάλυσης εξαρτημάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.**
  Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανάλυση ενός εξαρτήματος. Το ζητούμενο είναι να βρεθεί η μέγιστη τάση Von Mises. Το κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιείτε πιο πολύ σαν παράδειγμα για το τελικό ζητούμενο που είναι το φτερό του αεροπλάνου.

- **Κεφαλαιο 9: Σχεδίαση και φορτία που εφαρμόστηκαν στο φτερό του αεροπλάνου.**
  Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται το κύριο μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή η τυπολογική βελτιστοποίηση και η σχεδίαση ενός φτερού αεροπλάνου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

- **Κεφάλαιο 10: Βιβλιογραφία**
  Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει την πλήρη λίστα των επιστημονικών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας. Οι πηγές αυτές περιλαμβάνουν βιβλία, επιστημονικά άρθρα, και τεχνικές αναφορές σχετικές με την τοπολογική βελτιστοποίηση, τη μέθοδο FEM, και την αεροναυπηγική.

  Η παραπάνω διάρθρωση διασφαλίζει ότι η εργασία καλύπτει πλήρως το θέμα, συνδυάζοντας θεωρία, πρακτική ανάλυση και εφαρμογή, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την τοπολογική βελτιστοποίηση στον τομέα της αεροναυπηγικής.





Εικόνα 3:Απεικόνιση του πρώτου αεροπλάνου

2 Κεφάλαιο : Ιστορική Αναδρομή

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ιστορική αναδρομή και την εξέλιξη των αεροσκαφών, από τις πρώτες πειραματικές απόπειρες πτήσης έως την ανάπτυξη των σύγχρονων αεροπλάνων που χαρακτηρίζονται από υψηλή τεχνολογία και καινοτομία.[7]

Η ιστορία της αεροναυπηγικής ξεκινά από τις πρώτες προσπάθειες, όπως οι χαρταετοί της αρχαίας Κίνας και οι μηχανές πτήσης του Λεονάρντο ντα Βίντσι, οι οποίες έθεσαν τις βάσεις για τη μελέτη της αεροδυναμικής. Στη συνέχεια, τα ανεμόπτερα του Otto Lilienthal και οι ανακαλύψεις του Sir George Cayley άνοιξαν τον δρόμο για την κατανόηση των βασικών αρχών της πτήσης, όπως η ανύψωση και ο έλεγχος. [7]

Η εποχή των πρωτοπόρων, με αποκορύφωμα την πτήση των Αδελφών Ράιτ το 1903, σηματοδότησε την πρώτη επιτυχημένη μηχανοκίνητη πτήση. Ο Πρώτος Παγκόσμιος Πόλεμος συνέβαλε ραγδαία στην ανάπτυξη της αεροναυπηγικής, καθώς τα αεροσκάφη έγιναν απαραίτητα για στρατιωτικές επιχειρήσεις. Μετά τον πόλεμο, η εστίαση στράφηκε στην εμπορική αεροπορία, με αεροσκάφη όπως το DC-3 να καθορίζουν νέα πρότυπα. [7]

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από τζετ αεροπλάνα, σύνθετα υλικά, καινοτόμα σχέδια και τεχνολογίες που μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η εξέλιξη αυτή αντικατοπτρίζει την ανθρώπινη ανάγκη για ταχύτητα, ασφάλεια και αποδοτικότητα. [7]

2.1 Πρώιμες Απόπειρες Πτήσης

Η επιθυμία του ανθρώπου να κατακτήσει τους αιθέρες υπήρχε από την αρχαιότητα. Η πτήση πάντα ενέπνεε δέος και φαντασία, καθώς οι άνθρωποι παρατηρούσαν τα πτηνά να κινούνται ελεύθερα στον ουρανό. Παρόλο που οι πρώτες προσπάθειες δεν βασίζονταν σε επιστημονικές αρχές, έθεσαν τις βάσεις για τη μελλοντική ανάπτυξη της αεροναυπηγικής. [7]

2.1.1 Χαρταετοί και Ιδέες Πτήσης (200 π.Χ. – 1500 μ.Χ.)

Οι πρώτες οργανωμένες προσπάθειες πτήσης χρονολογούνται από την αρχαία Κίνα, όπου οι χαρταετοί έπαιξαν σημαντικό ρόλο. Οι Κινέζοι κατασκεύαζαν χαρταετούς από μπαμπού και μετάξι, οι οποίοι μπορούσαν να αιωρούνται στον αέρα χάρη στις αεροδυναμικές τους ιδιότητες. Αρχικά, οι χαρταετοί χρησιμοποιήθηκαν για τελετουργικούς σκοπούς και στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η μεταφορά σημάτων. Παρά την απλότητα αυτών των κατασκευών, οι χαρταετοί προσέφεραν τις πρώτες γνώσεις για τη ροή του αέρα και τη συμπεριφορά των αντικειμένων στον άνεμο. [7]

Η ιδέα της μηχανικής πτήσης αναπτύχθηκε περαιτέρω κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα. Ο Λεονάρντο ντα Βίντσι, ένας από τους μεγαλύτερους στοχαστές της Αναγέννησης, μελέτησε τη δομή και τις κινήσεις των πτηνών. Σχεδίασε μηχανές πτήσης, όπως η «ιπτάμενη μηχανή», η οποία είχε πτέρυγες που μιμούνταν την πτήση των πτηνών. Παρόλο που οι κατασκευές του δεν υλοποιήθηκαν στην εποχή του, οι ιδέες του ήταν πρωτοποριακές και έθεσαν τις βάσεις για την κατανόηση της αεροδυναμικής. Ο ντα Βίντσι εισήγαγε έννοιες όπως η άνωση, οι οποίες αποδείχθηκαν καθοριστικές για τη μελλοντική ανάπτυξη των αεροσκαφών. [7]

Ένα άλλο σημαντικό επίτευγμα εκείνης της περιόδου ήταν οι πειραματισμοί με φτερά προσαρτημένα στα χέρια. Παρόλο που αυτοί οι πειραματισμοί δεν ήταν επιτυχημένοι, αποτέλεσαν προσπάθειες κατανόησης της δυναμικής της πτήσης. Τα πρώτα αυτά βήματα, αν και ατελή, ανέδειξαν τη σημασία της αεροδυναμικής και ενέπνευσαν τους μεταγενέστερους. [7]

2.1.2 Ανεμόπτερα (19ος αιώνας)

Η είσοδος στον 19ο αιώνα αποτέλεσε σημείο καμπής για την πτήση, καθώς οι επιστήμονες άρχισαν να εφαρμόζουν επιστημονικές αρχές και να συνδυάζουν τη θεωρία με την πράξη. Μέχρι τότε, οι περισσότερες προσπάθειες βασίζονταν στη μίμηση της φύσης, όπως τα φτερά των πτηνών, χωρίς κατανόηση των βασικών μηχανικών αρχών. Ο 19ος αιώνας όμως έφερε την αλλαγή, καθώς επιστήμονες και μηχανικοί άρχισαν να μελετούν συστηματικά τη δυναμική των δυνάμεων που δρουν σε ένα ιπτάμενο σώμα. [7]

Ο Sir George Cayley ήταν πρωτοπόρος σε αυτό το πεδίο, διατυπώνοντας τις τρεις βασικές αρχές της πτήσης: ανύψωση, πρόωση και έλεγχο. Οι θεωρίες του έδειξαν ότι η πτήση μπορούσε να επιτευχθεί με τη σωστή διαχείριση

αυτών των δυνάμεων. Κατασκεύασε επίσης το πρώτο ανεμόπτερο που μπορούσε να μεταφέρει άνθρωπο, σηματοδοτώντας την αρχή της επιστημονικής προσέγγισης στην πτήση. [7]

Παράλληλα, ο Otto Lilienthal εφάρμοσε πρακτικά αυτές τις αρχές, κατασκευάζοντας ανεμόπτερα που επέτρεπαν ελεγχόμενες πτήσεις. Οι προσπάθειές του βασίστηκαν σε μελέτες της συμπεριφοράς των πτηνών, οδηγώντας σε βελτιώσεις στη σταθερότητα και την απόδοση των πτήσεων. Οι προσπάθειες αυτών των επιστημόνων έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη της αεροναυπηγικής και ενέπνευσαν τους μετέπειτα πρωτοπόρους. [7]



Εικόνα 4: Ανεμόπτερο του 19αιωνα

2.1.2.1 Ο Sir George Cayley: Ο Πατέρας της Αεροναυπηγικής

Ο Sir George Cayley, ένας Άγγλος μηχανικός και επιστήμονας, θεωρείται ο πατέρας της αεροναυπηγικής. Στις αρχές του 19ου αιώνα, ανέπτυξε τις βασικές αρχές της πτήσης, εισάγοντας την έννοια της ανύψωσης, της πρόωσης και του ελέγχου. Διαπίστωσε ότι η πτήση μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της σωστής κατανομής δυνάμεων σε ένα αεροσκάφος. [7]

Ο Cayley κατασκεύασε το πρώτο ανεμόπτερο που μπορούσε να μεταφέρει έναν άνθρωπο. Το ανεμόπτερο αυτό διέθετε σταθερά φτερά για την ανύψωση, ουρά για τον έλεγχο και προπέλα για την πρόωση. Η επιτυχία του ανεμόπτερου απέδειξε ότι η πτήση δεν ήταν μόνο ένα όνειρο, αλλά και μια επιστημονική δυνατότητα. [7]

2.1.2.2 Ο Otto Lilienthal: Ο Πρωτοπόρος της Ελεγχόμενης Πτήσης

Ο Otto Lilienthal, ένας Γερμανός μηχανικός, συνέχισε το έργο του Cayley και πραγματοποίησε τις πρώτες ελεγχόμενες πτήσεις με ανεμόπτερα στα τέλη του 19ου αιώνα. Ο Lilienthal κατασκεύασε διάφορους τύπους ανεμόπτερων, με διαφορετικά μεγέθη και σχήματα φτερών, και πραγματοποίησε πάνω από 2.000 πτήσεις. [7]

Η προσέγγισή του βασίστηκε στη μελέτη των πτηνών και στη χρήση πειραματικών δεδομένων για τη βελτίωση της απόδοσης των ανεμόπτερων. Ο Lilienthal ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε μια συστηματική μεθοδολογία για τη δοκιμή διαφορετικών σχεδίων πτήσης. Παρόλο που έχασε τη ζωή του σε ατύχημα κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, η συνεισφορά του ήταν καθοριστική για την πρόοδο της αεροναυπηγικής. [7]

Οι πρώιμες απόπειρες πτήσης, από τους χαρταετούς της Κίνας έως τα ανεμόπτερα του 19ου αιώνα, έθεσαν τα θεμέλια για την ανάπτυξη των σύγχρονων αεροσκαφών. Οι προσπάθειες αυτές κατέδειξαν τη σημασία της αεροδυναμικής, της μελέτης της άνωσης και της κατανόησης της ροής του αέρα. Επιστήμονες όπως ο Cayley και ο Lilienthal προσέφεραν τις πρώτες πρακτικές λύσεις για την πτήση, οι οποίες ενέπνευσαν τους επόμενους εφευρέτες, συμπεριλαμβανομένων των Αδελφών Ράιτ. [7]

Η ιστορία αυτή αναδεικνύει την ανθρώπινη περιέργεια και τη συνεχή αναζήτηση για την κατάκτηση των αιθέρων, δημιουργώντας τις βάσεις για την επανάσταση της αεροναυπηγικής. [7]

2.2 Η Εποχή των Πρωτοπόρων: Αδελφοί Ράιτ (1903)

Η συμβολή των Αδελφών Ράιτ στην ιστορία της αεροναυπηγικής θεωρείται καθοριστική, καθώς το 1903 κατάφεραν να κατασκευάσουν το Flyer I, το πρώτο επιτυχημένο μηχανοκίνητο αεροσκάφος. Αυτή η πτήση, αν και διήρκεσε



μόλις 12 δευτερόλεπτα και κάλυψε απόσταση 37 μέτρων, σηματοδότησε την αρχή της εποχής της αεροναυπηγικής. [7]

Η επιτυχία τους δεν ήταν απλώς αποτέλεσμα μηχανικής ευφυΐας, αλλά και μιας συστηματικής και επιστημονικής προσέγγισης που εισήγαγε έννοιες και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Στις αρχές του 20ού αιώνα, η επιθυμία για την κατάκτηση των αιθέρων εντάθηκε. Παρόλο που υπήρχαν πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη μηχανοκίνητων αεροσκαφών, οι περισσότερες απέτυχαν να επιτύχουν ελεγχόμενη και διατηρήσιμη πτήση. [7]

Οι Αδελφοί Ράιτ, Orville και Wilbur, αδέλφια με καταγωγή από το Οχάιο των Ηνωμένων Πολιτειών, δεν είχαν επίσημη μηχανική εκπαίδευση, αλλά διέθεταν βαθιά κατανόηση της μηχανικής, της αεροδυναμικής και της πρακτικής εφαρμογής. Ξεκίνησαν τη δραστηριότητά τους κατασκευάζοντας ποδήλατα, μια εμπειρία που τους βοήθησε να κατανοήσουν την ισορροπία και τον έλεγχο. [7]

Η αφοσίωσή τους στην έρευνα και η προθυμία τους να μάθουν από τις αποτυχίες τους οδήγησε στην επιτυχία. Σε αντίθεση με άλλους πρωτοπόρους της εποχής, οι Ράιτ βασίστηκαν σε εμπειρικά δεδομένα, δοκιμές και πειραματισμούς για να τελειοποιήσουν τις κατασκευές τους. [7]

2.2.1 Ο Flyer I: Ένα Τεχνολογικό Επίτευγμα

Το Flyer I ήταν το πρώτο αεροσκάφος που κατάφερε να πραγματοποιήσει ελεγχόμενη πτήση με κινητήρα. Ο σχεδιασμός του ήταν αποτέλεσμα πολυετούς έρευνας και ανάπτυξης. Οι Ράιτ κατασκεύασαν το Flyer I χρησιμοποιώντας ξύλο και ύφασμα, με ένα ελαφρύ και αξιόπιστο κινητήρα που παρήγαγαν οι ίδιοι. [7]

Το αεροσκάφος είχε άνοιγμα φτερών 12,3 μέτρα και βάρος περίπου 274 κιλά.
Ο κινητήρας, ισχύος 12 ίππων, παρήγαγε αρκετή ενέργεια για να επιτρέψει την απογείωση και την πτήση. [7]

Οι Ράιτ εισήγαγαν την έννοια του ελέγχου τριών αξόνων (ανύψωση, κύλιση και απόκλιση), που παραμένει βασική στα σύγχρονα αεροσκάφη. Ο έλεγχος αυτός επιτρέπει την ευελιξία και τη σταθερότητα κατά την πτήση.
Χρησιμοποίησαν πηδάλια για τον έλεγχο της απόκλισης και αναδιπλούμενα πτερύγια για την κύλιση. [7]





Εικόνα 5: flyer 1

2.2.2 Η Πρώτη Πτήση

Στις 17 Δεκεμβρίου 1903, κοντά στο Kill Devil Hills στη Βόρεια Καρολίνα, οι Αδελφοί Ράιτ πραγματοποίησαν την πρώτη επιτυχημένη πτήση. Το Flyer I απογειώθηκε υπό τον έλεγχο του Orville Wright και πέταξε για 12 δευτερόλεπτα, καλύπτοντας απόσταση 37 μέτρων. Αν και η διάρκεια και η απόσταση ήταν μικρές, η πτήση αυτή κατέδειξε την πρακτική δυνατότητα ελεγχόμενης πτήσης με μηχανοκίνητο αεροσκάφος. [31]

Οι δυνατοί άνεμοι και οι πρωτόγονες συνθήκες στον χώρο της πτήσης έκαναν την απογείωση ιδιαίτερα δύσκολη. Η έλλειψη προηγούμενων επιτυχημένων παραδειγμάτων σήμαινε ότι οι Ράιτ έπρεπε να βασιστούν αποκλειστικά στις δικές τους παρατηρήσεις και αναλύσεις. [31]

Μία από τις μεγαλύτερες καινοτομίες των Ράιτ ήταν η εισαγωγή του ελέγχου τριών αξόνων. Μέχρι τότε, οι περισσότερες προσπάθειες για πτήση επικεντρώνονταν στην ανύψωση και την πρόωση, αγνοώντας τη σημασία της σταθερότητας και της ευελιξίας κατά την πτήση. [31]

Οι Ράιτ χρησιμοποίησαν καμπύλες επιφάνειες στα φτερά για να δημιουργήσουν ανύψωση, μελετώντας τη συμπεριφορά του αέρα μέσω πειραμάτων σε αεροδυναμικές σήραγγες που κατασκεύασαν οι ίδιοι. Ο

έλεγχος της κύλισης επιτεύχθηκε μέσω αναδιπλούμενων πτερυγίων στα φτερά, τα οποία επέτρεπαν στο αεροσκάφος να γέρνει προς τα δεξιά ή αριστερά. [31]

Ένα πηδάλιο στην ουρά του αεροσκάφους προσέφερε έλεγχο της κατεύθυνσης, δίνοντας στον πιλότο τη δυνατότητα να αλλάζει πορεία.
Αυτή η προσέγγιση αποτέλεσε τη βάση για τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου πτήσης και εξακολουθεί να εφαρμόζεται σε όλα τα αεροσκάφη. [31]

Μετά την επιτυχημένη πτήση του Flyer I, οι Ράιτ αφιέρωσαν τη ζωή τους στη βελτίωση της τεχνολογίας. Κατασκεύασαν διαδοχικά μοντέλα, όπως το Flyer II και το Flyer III, τα οποία είχαν αυξημένη σταθερότητα και δυνατότητα μεγαλύτερων πτήσεων. [31]

- Flyer II (1904):
  Επέτρεψε πτήσεις μεγαλύτερης διάρκειας και απόστασης, με βελτιωμένο έλεγχο και απόδοση. [31]

- Flyer III (1905):
  Το πρώτο αεροσκάφος που μπορούσε να πραγματοποιήσει πλήρως ελεγχόμενες και συνεχείς πτήσεις, με δυνατότητα επιστροφής στο σημείο εκκίνησης. [31]

Η συμβολή των Αδελφών Ράιτ δεν περιορίζεται μόνο στην επιτυχία του Flyer I. Οι μέθοδοι και οι τεχνολογίες που ανέπτυξαν αποτέλεσαν τη βάση για τη μελλοντική ανάπτυξη της αεροναυπηγικής. Οι Ράιτ απέδειξαν ότι η πτήση δεν ήταν μόνο εφικτή, αλλά και βιώσιμη, ανοίγοντας τον δρόμο για τις επαναστάσεις που ακολούθησαν. [31]

Η κληρονομιά τους είναι εμφανής σε κάθε πτήση που πραγματοποιείται σήμερα, καθώς οι αρχές που εισήγαγαν συνεχίζουν να καθοδηγούν τη σχεδίαση και την κατασκευή αεροσκαφών. Η πρώτη τους πτήση παραμένει ένα από τα πιο εμβληματικά επιτεύγματα στην ιστορία της μηχανικής και της τεχνολογίας. [31]

3 Κεφάλαιο : Ιστορική Αναδρομή για τα Φτερά Αεροπλάνου

Η εξέλιξη των φτερών των αεροπλάνων αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς της αεροναυπηγικής, καθώς τα φτερά παίζουν κεντρικό ρόλο στην αεροδυναμική, την ανύψωση και τη σταθερότητα ενός αεροσκάφους. Από τις πρώτες χειροποίητες κατασκευές μέχρι τα σύγχρονα σύνθετα υλικά, η ιστορία των φτερών αντικατοπτρίζει την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας. Τα φτερά των αεροπλάνων αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της αεροναυπηγικής, καθορίζοντας την ανύψωση, τη σταθερότητα και τη συνολική απόδοση ενός αεροσκάφους. Από τις πρώτες απόπειρες πτήσης, όπου οι άνθρωποι μιμούνταν τα φτερά των πτηνών, έως τα σημερινά σύνθετα υλικά και τις υπερσύγχρονες αεροτομές, η εξέλιξη των φτερών αντικατοπτρίζει τη συνεχή πρόοδο της επιστήμης, της μηχανικής και της τεχνολογίας. [11]

3.1 Αρχική Ανάπτυξη: Πρωτόγονες Κατασκευές

Η επιθυμία για πτήση συνοδεύει την ανθρωπότητα από την αρχαιότητα. Τα πρώτα τεκμηριωμένα σχέδια για μηχανές πτήσης εμφανίστηκαν κατά την Αναγέννηση, με τον Λεονάρντο ντα Βίντσι να σχεδιάζει ιπτάμενες μηχανές βασισμένες στις κινήσεις των πτηνών. Ωστόσο, οι πραγματικές εφαρμογές ξεκίνησαν μόλις τον 19ο αιώνα. [11]

Ο Otto Lilienthal, Γερμανός μηχανικός και φυσικός, ήταν από τους πρώτους που ανέπτυξαν ανεμόπτερα βασισμένα στην αεροδυναμική ανάλυση. Τα ανεμόπτερά του είχαν φτερά που μιμούνταν τα πτηνά και προσέφεραν ελεγχόμενη πτήση για σύντομες αποστάσεις. Ο Lilienthal πραγματοποίησε περισσότερες από 2000 πτήσεις με αυτά τα ανεμόπτερα, αποδεικνύοντας ότι η μηχανική πτήση ήταν εφικτή. [11]

Οι Αδελφοί Ράιτ, Orville και Wilbur, συνέχισαν αυτή την πορεία και ανέπτυξαν το πρώτο μηχανοκίνητο αεροσκάφος. Το Flyer I είχε φτερά βασισμένα σε καμπυλωτές γεωμετρίες και χρησιμοποιούσε υλικά όπως ξύλο και ύφασμα, δείχνοντας πώς οι αρχές της ανύψωσης μπορούσαν να εφαρμοστούν πρακτικά. [11]

Name / operty	Titanium Alloy	Aluminum Alloy	Haynes Alloy	Carbon Fiber Composite Materia
Elastic modulus E (Pa)	9.6×10^{10}	7.1×10^{10}	1.54×10^{11}	1.35×10^{11}
Poisson's ratio v	0.36	0.33	0.3	0.33
Density ρ (kg/m^3)	4620	2270	9130	1610
Shear modulus G (Pa)	3.53×10^{10}	2.67×10^{10}	5.92×10^{10}	5.1×10^{10}
Thermal conductivity λ (W/(m · K))	21.9	170	26.7	6.5
Thermal Conductivity α (K^{-1})	9.4×10^{-6}	2.3×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.5×10^{-6}

ress Analysis

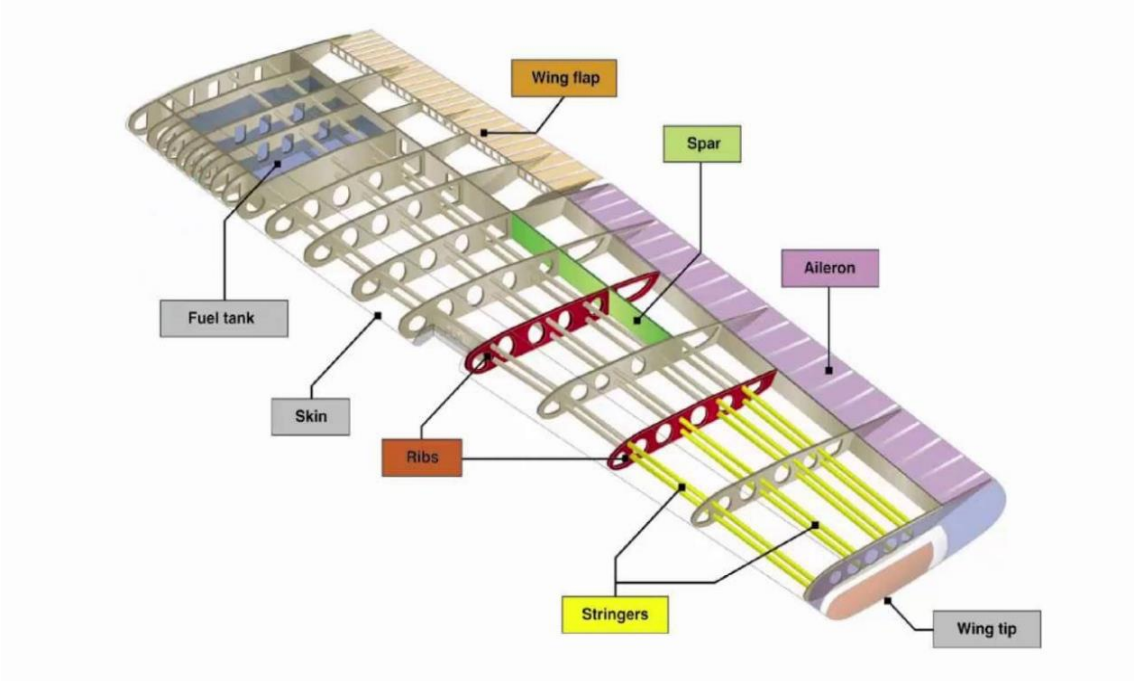
Εικόνα 6: Πληροφορίες για τα υλικά των φτερων

3.2 Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες κατασκευές φτερών ήταν περιορισμένα και βασίζονταν στη διαθεσιμότητα και την ευκολία επεξεργασίας. Το ξύλο αποτέλεσε το κύριο υλικό για τον σκελετό των φτερών, καθώς ήταν ελαφρύ, εύκαμπτο και σχετικά ανθεκτικό. Είδη ξύλου όπως η σημύδα και η ελάτη προτιμούνταν λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής προς βάρος. Αυτά τα είδη ξύλου μπορούσαν να επεξεργαστούν εύκολα, ενώ η δομή τους προσέφερε τη δυνατότητα για αντοχή στις καταπονήσεις κατά την πτήση. [11]

Εκτός από το ξύλο, το ύφασμα χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την κάλυψη των φτερών. Το λινό και το βαμβάκι ήταν οι κύριες επιλογές, καθώς προσέφεραν μια λεία επιφάνεια που διευκόλυνε τη ροή του αέρα πάνω από τα φτερά. Το ύφασμα στερεωνόταν σφιχτά στον ξύλινο σκελετό, εξασφαλίζοντας μια ομοιόμορφη επιφάνεια. Σε πολλές περιπτώσεις, το ύφασμα επικαλυπτόταν με βερνίκια ή άλλα υλικά για να αυξηθεί η αντοχή του στο νερό και τον άνεμο, βελτιώνοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα της συνολικής κατασκευής. [11]

Οι μέθοδοι συναρμολόγησης περιλάμβαναν τη χρήση μεταλλικών καρφιών ή συγκολλητικών ουσιών για τη σύνδεση των διαφορετικών μερών των φτερών. Παρόλο που αυτές οι μέθοδοι ήταν λειτουργικές, συχνά περιόριζαν την αντοχή των κατασκευών, ιδιαίτερα σε συνθήκες μεγάλης καταπόνησης. Παρά τους περιορισμούς αυτών των υλικών, οι πρώτες αυτές προσπάθειες έδειξαν την κατεύθυνση για τη μελλοντική χρήση πιο ανθεκτικών και ελαφριών υλικών, ανοίγοντας τον δρόμο για την εξέλιξη της αεροναυπηγικής. [11]



Εικόνα 7: Απεικόνιση ενός τυπικού φτερού αεροπλάνου

3.3 Πειραματισμοί και Διδάγματα

Οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής φτερών για αεροπλάνα αποτέλεσαν έναν πολύτιμο πυλώνα γνώσης για την αεροδυναμική και τη μηχανική, προσφέροντας διδάγματα που έθεσαν τα θεμέλια για τη σύγχρονη αεροναυπηγική. [40]

Ο Otto Lilienthal, Γερμανός μηχανικός και επιστήμονας, ήταν ένας από τους πρώτους που μελέτησαν τη σημασία της καμπυλότητας στην αεροτομή. Μέσα από λεπτομερή πειράματα, ανέπτυξε ένα μοντέλο πτήσης που βασιζόταν στη φυσική ροή του αέρα πάνω από καμπυλωτές επιφάνειες. Οι πτήσεις του με ανεμόπτερα απέδειξαν ότι η σωστή γεωμετρία του φτερού μπορούσε να προσφέρει ανύψωση και σταθερότητα, στοιχεία που επηρέασαν όλους τους μετέπειτα σχεδιαστές. Η δουλειά του Lilienthal δεν ήταν απλώς εμπειρική, αλλά επιστημονικά τεκμηριωμένη, θέτοντας τη βάση για την κατανόηση της αεροδυναμικής. [40]

Οι Αδελφοί Ράιτ, από την άλλη πλευρά, ανέβασαν τον πήχη, εισάγοντας τη δυνατότητα ελέγχου τριών αξόνων (ανύψωση, κύλιση και απόκλιση). Το Flyer I, το πρώτο μηχανοκίνητο αεροπλάνο, διέθετε φτερά που ήταν ελαφριά αλλά ισχυρά, προσαρμοσμένα για να λειτουργούν σε περιορισμένες συνθήκες πτήσης. Ο σχεδιασμός τους έφερε επανάσταση στη σταθερότητα και τον έλεγχο κατά την

πτήση, καθιστώντας την πτήση πιο αξιόπιστη και προβλέψιμη. Παράλληλα, χρησιμοποίησαν προσομοιώσεις και πειράματα για να επιτύχουν βέλτιστη ανύψωση, μειώνοντας την αντίσταση. [40]

Ωστόσο, οι πρώτες αυτές προσπάθειες δεν ήταν χωρίς προκλήσεις. Η αδυναμία των υλικών να αντέξουν σε ισχυρούς ανέμους ήταν μια από τις μεγαλύτερες δυσκολίες που αντιμετώπισαν οι πρώτοι σχεδιαστές. Επίσης, οι περιορισμένες δυνατότητες πρόωσης περιόριζαν την απόδοση και τη σταθερότητα των πτήσεων. Παρά τα εμπόδια, αυτές οι πρωτοποριακές προσπάθειες έδειξαν τη σημασία της έρευνας, της πειραματικής ανάλυσης και της συνεχούς βελτίωσης. Οι εμπειρίες από αυτές τις αποτυχίες και επιτυχίες διαμόρφωσαν τις μελλοντικές εξελίξεις, προσφέροντας διδάγματα που συνεχίζουν να καθοδηγούν τη σχεδίαση και την κατασκευή φτερών μέχρι σήμερα. [40]

4 Κεφάλαιο : Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί ένα από τα πλέον καινοτόμα εργαλεία στη μηχανική και τις υπολογιστικές μεθόδους, έχοντας στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των δομών μέσω της βέλτιστης κατανομής του υλικού. Η διαδικασία αυτή συνδυάζει τις αρχές της μηχανικής, της αεροδυναμικής και της αριθμητικής ανάλυσης, προκειμένου να μειωθεί το βάρος μιας κατασκευής χωρίς να θυσιάζεται η αντοχή ή η λειτουργικότητά της. Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν την τοπολογική βελτιστοποίηση, οι εφαρμογές της μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων , καθώς και οι σύγχρονες τεχνικές που την υποστηρίζουν.[1],[3],[5],[22]

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποσκοπεί στη δημιουργία κατασκευών που πληρούν τις λειτουργικές απαιτήσεις με το ελάχιστο δυνατό υλικό. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω της αφαίρεσης υλικού από περιοχές όπου οι καταπονήσεις είναι μικρές ή μη σημαντικές, ενισχύοντας παράλληλα τις κρίσιμες περιοχές. Οι εφαρμογές της είναι πολλαπλές και καλύπτουν τομείς όπως η αεροναυπηγική, όπου η μείωση βάρους συμβάλλει στην εξοικονόμηση καυσίμων, και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η βελτιστοποίηση αυξάνει την απόδοση και μειώνει τις εκπομπές. [1],[3],[5],[22]

Η ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων και μαθηματικών μεθόδων υπήρξε καταλυτική για την πρόοδο της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι το πιο διαδεδομένο εργαλείο που χρησιμοποιείται, καθώς επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής. Μέσω της FEM, διακρίνονται οι περιοχές όπου το υλικό μπορεί να αφαιρεθεί, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται ότι η κατασκευή διατηρεί τη δομική της ακεραιότητα. [1],[3],[5],[22]

Επιπλέον, οι σύγχρονες τεχνικές, όπως η προσέγγιση SIMP , επιτρέπουν τη σταδιακή αναδιαμόρφωση της γεωμετρίας με μαθηματική ακρίβεια. Οι τεχνικές αυτές έχουν εξελιχθεί σημαντικά, καθιστώντας εφικτή τη χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Παρότι η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένο λογισμικό, οι δυνατότητές της ξεπερνούν τους περιορισμούς, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. [1],[3],[5],[22]

4.1 Εισαγωγή στην Τοπολογική Βελτιστοποίηση

Η τοπολογική βελτιστοποίηση εστιάζει στη δημιουργία βελτιστοποιημένων δομών, αφαιρώντας υλικό από περιοχές που δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην αντοχή ή τη λειτουργικότητα της κατασκευής. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης υλικών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας, ενώ διατηρείται η απαιτούμενη ακαμψία και αντοχή. [1],[3],[5],[22]

Ιστορικά, η τοπολογική βελτιστοποίηση εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1980, με τη σταδιακή ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων που μπορούσαν να επιλύσουν πολύπλοκα μηχανικά προβλήματα. Οι εφαρμογές της καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από τη σχεδίαση εξαρτημάτων αεροσκαφών και αυτοκινήτων, έως τη βελτιστοποίηση δομικών στοιχείων στις κατασκευές. [1],[3],[5],[22]

4.2 Θεμελιώδεις Αρχές της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η τοπολογική βελτιστοποίηση βασίζεται σε ένα σύνολο μαθηματικών, φυσικών και μηχανικών αρχών που αποσκοπούν στην ανάπτυξη βέλτιστων δομών. Οι βασικές αρχές της περιλαμβάνουν τη διατήρηση της ισορροπίας των δυνάμεων, τη συμβατότητα των παραμορφώσεων και την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή και τη λειτουργία της δομής. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή του υλικού μέσα σε μια κατασκευή προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι κρίσιμες περιοχές ενώ παράλληλα αφαιρείται υλικό από λιγότερο κρίσιμες. [1],[3],[5],[22]

Η προσέγγιση SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές στην τοπολογική βελτιστοποίηση. Επιτρέπει τη σταδιακή μείωση της πυκνότητας του υλικού στις περιοχές που υποβάλλονται σε μικρότερες τάσεις, διατηρώντας την ακαμψία της δομής. Ο αλγόριθμος SIMP συνδυάζει τη μαθηματική μοντελοποίηση με αριθμητικές τεχνικές, διευκολύνοντας τη βαθμιαία προσαρμογή της γεωμετρίας σε κάθε επανάληψη. [1],[3],[5],[22]

Ένα κρίσιμο στοιχείο είναι η αλληλεπίδραση της τοπολογικής βελτιστοποίησης με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Οι περιοχές που βρίσκονται σε υψηλές καταπονήσεις ενισχύονται με μεγαλύτερη πυκνότητα υλικού, ενώ περιοχές με μικρότερη καταπόνηση υπόκεινται σε αφαίρεση ή μείωση υλικού. Το αποτέλεσμα



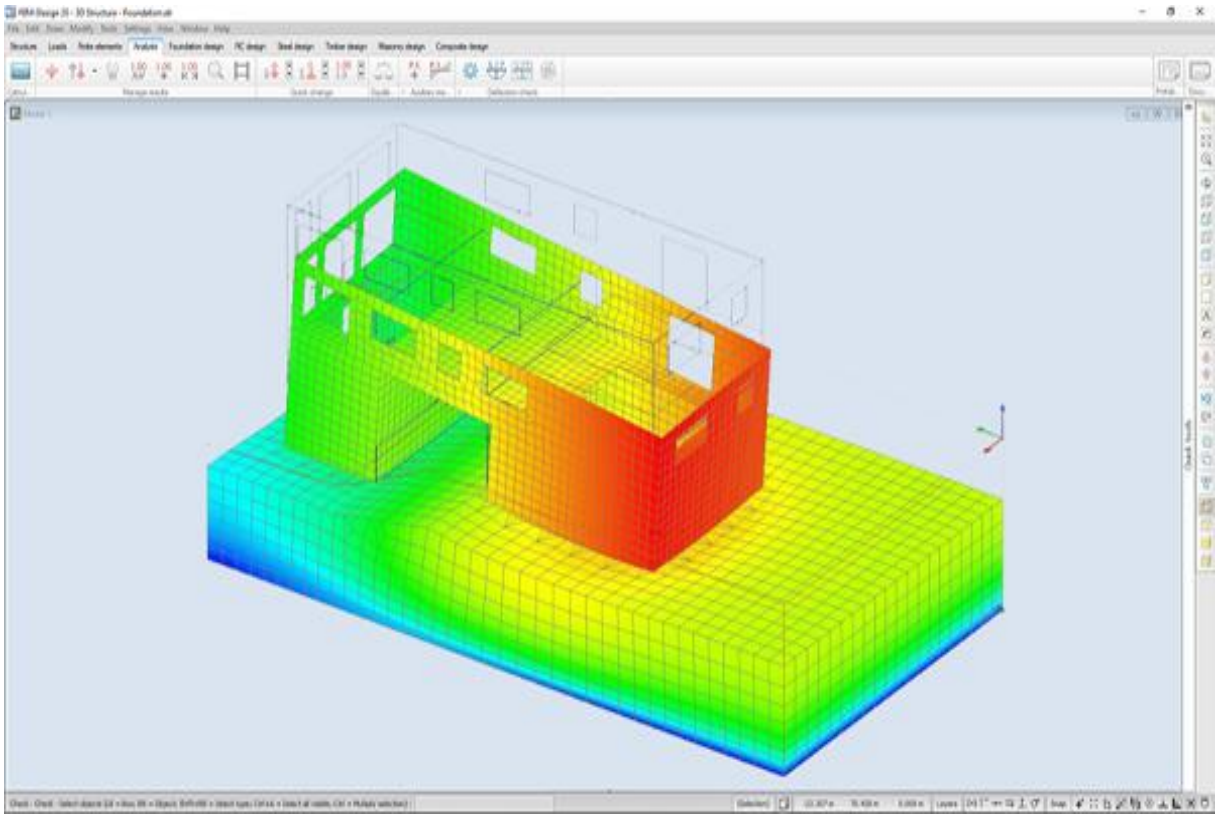
είναι μια κατασκευή που όχι μόνο πληροί τις δομικές απαιτήσεις αλλά είναι επίσης ελαφρύτερη και πιο αποδοτική. Η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης δεν περιορίζεται μόνο σε στατικές συνθήκες φόρτισης. [1],[3],[5],[22]

Η προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί και σε δυναμικές εφαρμογές, όπως η βελτιστοποίηση κατασκευών που υπόκεινται σε ταλαντώσεις ή κρουστικά φορτία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η φυσική συχνότητα και η απόκριση στις δυνάμεις, προσφέροντας επιπλέον δυνατότητες για πιο αποδοτικές λύσεις. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την ενσωμάτωση υπολογιστικών εργαλείων, η τοπολογική βελτιστοποίηση έχει γίνει πιο προσιτή και εφαρμόσιμη σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών. [1],[3],[5],[22]

Οι μηχανικοί σήμερα μπορούν να αξιοποιήσουν λογισμικά προηγμένης τεχνολογίας, όπως αυτά που υποστηρίζουν προσομοιώσεις μέσω FEM, για να ενσωματώσουν τις αρχές της τοπολογικής βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη κατασκευών. Η τοπολογική βελτιστοποίηση βασίζεται σε μια σειρά μαθηματικών και φυσικών αρχών που περιλαμβάνουν τη διατήρηση της ισορροπίας δυνάμεων, τη συμβατότητα παραμορφώσεων και την ελαχιστοποίηση ενέργειας. Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί η ιδανική κατανομή του υλικού, ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη αντοχή με ελάχιστο κόστος. [1],[3],[5],[22]

Η προσέγγιση SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) αποτελεί μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές, επιτρέποντας τη βαθμιαία μείωση της πυκνότητας του υλικού σε περιοχές χαμηλής καταπόνησης. Με τη χρήση αριθμητικών αλγορίθμων, οι μηχανικοί μπορούν να επαναλάβουν τη διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί μια βέλτιστη λύση, τόσο από άποψη μηχανικής αντοχής όσο και αεροδυναμικής απόδοσης. [1],[3],[5],[22]





Εικόνα 8: οπτική απεικόνιση της μεθόδου της FEM σε ένα λογισμικό

4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) αποτελεί το βασικό εργαλείο για την ανάλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Η FEM επιτρέπει τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας μιας κατασκευής σε μικρότερα στοιχεία, για τα οποία υπολογίζονται οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι αντιδράσεις στις εξωτερικές δυνάμεις. Αυτή η τεχνική παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς μελέτης πολύπλοκων κατασκευών, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση. [9],[25]

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα: η γεωμετρία της κατασκευής διαχωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία, καθένα από τα οποία έχει καθορισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται εξωτερικές δυνάμεις και περιορισμοί στις κατάλληλες περιοχές. Η FEM επιλύει τις εξισώσεις ισορροπίας που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου, παρέχοντας ακριβή δεδομένα για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της FEM είναι η ανάγκη για μεγάλη υπολογιστική ισχύ, ειδικά όταν πρόκειται για σύνθετες γεωμετρίες και πολλαπλές συνθήκες φόρτισης. [9],[25]



Ωστόσο, οι σύγχρονες υπολογιστικές τεχνολογίες έχουν καταστήσει τη μέθοδο πιο προσιτή και αποτελεσματική. Οι εξαγόμενες πληροφορίες από την ανάλυση FEM χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση περιοχών που μπορούν να αφαιρεθούν υλικά χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή της κατασκευής. Επιπλέον, η FEM υποστηρίζει τη χρήση διαφορετικών υλικών σε μια κατασκευή, επιτρέποντας την προσομοίωση πολυσύνθετων δομών. [9],[25]

Αυτό προσφέρει μεγάλη ευελιξία στη διαδικασία σχεδιασμού και καθιστά δυνατή τη δοκιμή διαφόρων σεναρίων προτού προχωρήσει η φυσική κατασκευή. Το αποτέλεσμα είναι βελτιστοποιημένες κατασκευές με αυξημένη απόδοση, μειωμένο κόστος παραγωγής και βελτιωμένες περιβαλλοντικές επιδόσεις. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) αποτελεί το βασικό εργαλείο για την ανάλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης. [9],[25]

Η FEM επιτρέπει τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας μιας κατασκευής σε μικρότερα στοιχεία, για τα οποία υπολογίζονται οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι αντιδράσεις στις εξωτερικές δυνάμεις. [9],[25]

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Διακριτοποίηση Γεωμετρίας: Το αντικείμενο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία με συγκεκριμένες ιδιότητες.
- Ορισμός Φορτίων και Περιορισμών: Καθορίζονται οι εξωτερικές δυνάμεις και οι περιοχές στήριξης.
- Επίλυση Εξισώσεων Ισορροπίας: Χρησιμοποιούνται μαθηματικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που περιγράφει τη μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου.

Η FEM διευκολύνει την ανάλυση πολύπλοκων κατασκευών, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την κατανομή των δυνάμεων και την αφαίρεση περιττού υλικού. [9],[25]



4.4 Υπολογιστικές Τεχνικές

Οι σύγχρονες εφαρμογές της τοπολογικής βελτιστοποίησης βασίζονται σε εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές που περιλαμβάνουν τόσο την ανάλυση όσο και τη βελτίωση γεωμετριών μέσω προσομοιώσεων υψηλής ακρίβειας. Οι τεχνικές αυτές συνδυάζουν μαθηματικούς αλγορίθμους και υπολογιστική ισχύ για τη βέλτιστη ανακατανομή του υλικού στις δομές. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η προσέγγιση SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), η οποία βασίζεται στη σταδιακή μείωση της πυκνότητας υλικού σε περιοχές χαμηλής καταπόνησης, διατηρώντας παράλληλα την ακαμψία της δομής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω επαναληπτικών αλγορίθμων που προσαρμόζουν τη γεωμετρία έως ότου επιτευχθεί μια βέλτιστη λύση. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι εξελικτικής βελτιστοποίησης αξιοποιούνται για τη δυναμική προσαρμογή του σχήματος της δομής, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι συνθήκες φόρτισης και οι περιορισμοί κατασκευής. [9],[25]

Η χρήση λογισμικών CAD/CAE, όπως το Fusion 360, αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την επιτυχή εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν τη μοντελοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών, την ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης πολλαπλών σεναρίων φόρτισης διευκολύνει τη δημιουργία βελτιστοποιημένων κατασκευών που ανταποκρίνονται στις πρακτικές απαιτήσεις. [9],[25]

Παρά τους περιορισμούς που μπορεί να παρουσιαστούν, όπως η ανάγκη για υψηλή υπολογιστική ισχύ και το κόστος εξειδικευμένου λογισμικού, οι σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα της πληροφορικής έχουν μειώσει σημαντικά αυτά τα εμπόδια. Οι συνεχείς βελτιώσεις στην ταχύτητα και την απόδοση των υπολογιστικών συστημάτων καθιστούν την τοπολογική βελτιστοποίηση πιο προσιτή και εφαρμόσιμη σε ευρύ φάσμα βιομηχανιών. [9],[25]

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης αναμένεται να φέρει ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα στις διαδικασίες τοπολογικής βελτιστοποίησης. Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των υλικών και της γεωμετρίας υπό διάφορες συνθήκες, οδηγώντας σε πιο αποδοτικά και βιώσιμα αποτελέσματα. [9],[25]

Παρόλο που η τοπολογική βελτιστοποίηση παρουσιάζει περιορισμούς, όπως η ανάγκη για υψηλή υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένο λογισμικό, οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις καθιστούν τη μέθοδο πιο προσιτή και ευρέως εφαρμόσιμη. [9],[25]



5 Κεφάλαιο : Μεθοδολογία

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση του φτερού ενός επιβατικού αεροσκάφους. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση του λογισμικού Fusion 360, που ενσωματώνει εργαλεία CAD και FEM, για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του φτερού. Η εφαρμογή αυτών των εργαλείων επιτρέπει τη δημιουργία ενός αρχικού μοντέλου που αντιπροσωπεύει τις γεωμετρικές και λειτουργικές απαιτήσεις του φτερού. Μέσω προσομοιώσεων, εξετάζονται οι μηχανικές καταπονήσεις και οι αεροδυναμικές απαιτήσεις, ενώ παράλληλα εντοπίζονται περιοχές που μπορούν να υποστούν βελτιώσεις. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει ότι το τελικό σχέδιο θα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις τόσο για την απόδοση όσο και για τη δομική σταθερότητα του αεροσκάφους.[8]

5.1 Δημιουργία Αρχικού Μοντέλου

Το αρχικό μοντέλο βασίζεται σε διαστάσεις ενός μέσου επιβατικού αεροσκάφους, όπως το Airbus A320. Οι διαστάσεις περιλαμβάνουν άνοιγμα φτερών 34,1 μέτρων, μέση αεροδυναμική χορδή 4,29 μέτρων και επιφάνεια φτερού 122,6 τετραγωνικών μέτρων. Η γεωμετρία του φτερού δημιουργείται με τη χρήση παραμετρικών εργαλείων μοντελοποίησης, επιτρέποντας την εύκολη τροποποίηση και βελτιστοποίηση. [8]

Η επιλογή του υλικού αποτελεί κρίσιμο βήμα στη διαδικασία σχεδίασης. Το αλουμίνιο επιλέγεται ως κύριο υλικό λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής προς βάρος και της ευκολίας κατασκευής. Το μοντέλο του φτερού σχεδιάζεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες δομικές ενισχύσεις, εξασφαλίζοντας την αντοχή του υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι αεροδυναμικές απαιτήσεις, διασφαλίζοντας την αποδοτικότητα κατά την πτήση. Το αρχικό μοντέλο δημιουργεί τη βάση για τις επόμενες φάσεις ανάλυσης και βελτιστοποίησης. [8]

Παράλληλα, οι σχεδιαστές λαμβάνουν υπόψη και τις διαδικασίες παραγωγής, διασφαλίζοντας ότι το φτερό μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας



συμβατικές μεθόδους κατασκευής ή προηγμένες τεχνικές, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση. Η ευελιξία στη διαδικασία σχεδίασης είναι καθοριστική για την προσαρμογή του φτερού στις απαιτήσεις των σύγχρονων αεροσκαφών, ενώ η χρήση υπολογιστικών μοντέλων επιτρέπει τη δοκιμή πολλαπλών σεναρίων πριν από την υλοποίηση. Τέλος, η επιλογή των υλικών και των διαστάσεων βασίζεται σε αναλυτικές μελέτες που ενσωματώνουν τις αρχές της αεροδυναμικής και της μηχανικής αντοχής, διασφαλίζοντας την απόλυτη αξιοπιστία του τελικού προϊόντος. [8]



Εικονα 9: Απεικόνιση επιλεγμένου φτερού αεροπλάνου Airbus A320

5.2 Ανάλυση με FEM

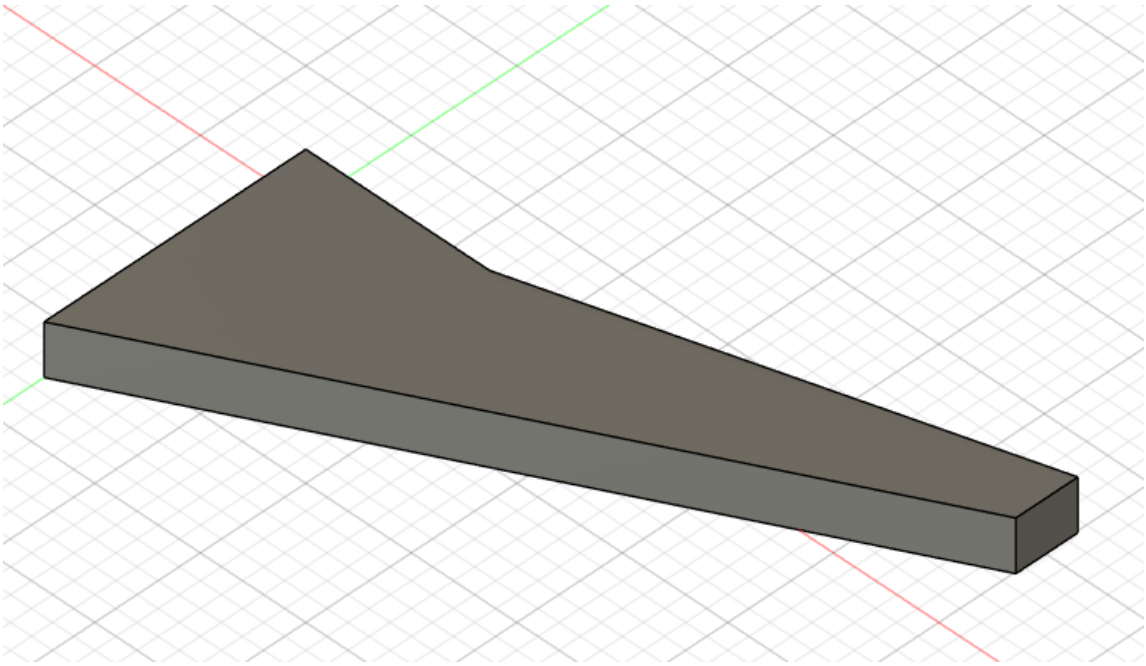
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς του φτερού υπό κανονικές συνθήκες πτήσης. Τα αεροδυναμικά φορτία προσομοιώνονται ως ομοιόμορφα κατανεμημένες δυνάμεις στην επιφάνεια του φτερού. Παράλληλα, καθορίζονται οι περιοχές στήριξης και οι περιορισμοί κίνησης, προκειμένου να διασφαλιστεί η στατική και δυναμική σταθερότητα. [8]

Η ανάλυση περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων φόρτισης για να διαπιστωθεί η αντοχή του φτερού σε διάφορες συνθήκες. Οι περιοχές που υφίστανται τις μεγαλύτερες τάσεις εντοπίζονται και ενισχύονται, ενώ οι περιοχές χαμηλής καταπόνησης επισημαίνονται για ενδεχόμενη αφαίρεση υλικού κατά τη βελτιστοποίηση. Η FEM επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς της δομής, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας όπως η αεροναυπηγική. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία και οι δυναμικές φορτίσεις, ώστε να διασφαλιστεί η μακροχρόνια αξιοπιστία του σχεδιασμού. [8]

Η διαδικασία FEM περιλαμβάνει τη δημιουργία λεπτομερούς πλέγματος που αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία του φτερού. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε κάθε κόμβο του πλέγματος, επιτρέποντας τη λεπτομερή ανάλυση των παραμορφώσεων και των τάσεων. Καθώς το φτερό λειτουργεί υπό διάφορες αεροδυναμικές συνθήκες, η FEM παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης πολλαπλών σεναρίων φόρτισης, βοηθώντας στην πρόβλεψη κρίσιμων σημείων αποτυχίας. [8]

Ένα σημαντικό στοιχείο της ανάλυσης είναι η ενσωμάτωση παραμέτρων όπως η αντοχή σε κόπωση και η επίδραση της θερμοκρασίας, οι οποίες επηρεάζουν την ανθεκτικότητα της δομής σε βάθος χρόνου. Η FEM, μέσω προηγμένων λογισμικών, επιτρέπει επίσης την ταυτόχρονη μελέτη σύνθετων υλικών και πολυστρωματικών δομών, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. [8]





Εικόνα 10: Απλοποιημένο φτερό αεροπλάνου Airbus A320 για την χρήση στο λογισμικό Fusion 360

5.3 Τοπολογική Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με στόχο τη μείωση του βάρους του φτερού κατά 30% χωρίς να θυσιάζεται η αντοχή ή η αεροδυναμική απόδοση. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, περιοχές χαμηλής καταπόνησης υπόκεινται σε αφαίρεση υλικού, ενώ οι κρίσιμες περιοχές, όπως οι σύνδεσμοι με την άτρακτο, παραμένουν ανέπαφες. [8]

Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει πολλαπλές επαναλήψεις, κατά τις οποίες η γεωμετρία του φτερού προσαρμόζεται σταδιακά. Η προσέγγιση SIMP χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι η κατανομή του υλικού είναι βέλτιστη, ενώ ταυτόχρονα πληρούνται οι δομικές απαιτήσεις. Το αποτέλεσμα είναι μια ελαφρύτερη, αλλά εξίσου ανθεκτική δομή, που μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και βελτιώνει τη συνολική απόδοση του αεροσκάφους. Παράλληλα, ενσωματώνονται υπολογιστικές τεχνικές που αξιοποιούν την τεχνητή νοημοσύνη για τη βελτίωση της ακρίβειας και της ταχύτητας της βελτιστοποίησης. [8]

5.4 Επικύρωση και Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης επικυρώνονται μέσω νέας ανάλυσης FEM, διασφαλίζοντας ότι η βελτιστοποιημένη γεωμετρία ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας. Το τελικό σχέδιο παρουσιάζει σημαντική μείωση βάρους και βελτιωμένη απόδοση, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές στην αεροναυπηγική. [8]

Η επικύρωση περιλαμβάνει τη σύγκριση του βελτιστοποιημένου φτερού με το αρχικό σχέδιο, τόσο από άποψη μηχανικών ιδιοτήτων όσο και αεροδυναμικής συμπεριφοράς. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι πρακτικοί περιορισμοί κατασκευής, εξασφαλίζοντας ότι το τελικό προϊόν μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς πρόσθετο κόστος ή τεχνικές δυσκολίες. Για την αξιολόγηση της διαδικασίας, χρησιμοποιούνται μετρήσεις από φυσικά πρωτότυπα, οι οποίες επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά αποτελέσματα. [8]

Σημαντικό στοιχείο στην επικύρωση αποτελεί και η προσομοίωση λειτουργικών συνθηκών σε πραγματικό περιβάλλον. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν τη μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του φτερού σε διάφορες ταχύτητες και συνθήκες καιρού. Επιπλέον, εξετάζεται η αντίσταση του φτερού σε κόπωση λόγω επαναλαμβανόμενων φορτίσεων, εξασφαλίζοντας τη μακροχρόνια αξιοπιστία του. Η διαδικασία επικύρωσης ολοκληρώνεται με αναλύσεις αντοχής σε ακραίες καταστάσεις, όπως σφοδρές ταλαντώσεις ή ακραίες θερμοκρασίες, για να διασφαλιστεί ότι η δομή παραμένει σταθερή και λειτουργική υπό κάθε πιθανή συνθήκη. [8]

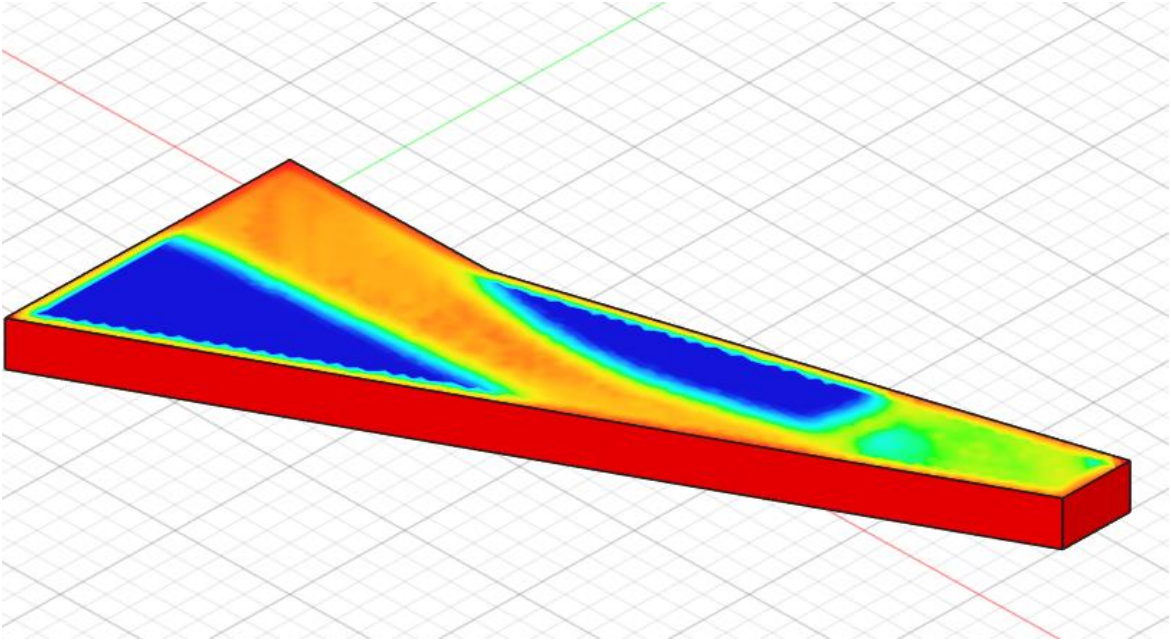
5.5 Συμπεράσματα

Με τη χρήση του Fusion 360 και των τεχνικών τοπολογικής βελτιστοποίησης, η παρούσα μελέτη αναδεικνύει τη δυνατότητα δημιουργίας πιο αποδοτικών και βιώσιμων αεροναυπηγικών κατασκευών. Η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει την ακριβή ανάλυση των δομών, ενώ η τοπολογική βελτιστοποίηση προσφέρει καινοτόμες λύσεις για τη μείωση του βάρους και την αύξηση της απόδοσης. [8]



Η μελέτη δείχνει ότι οι τεχνικές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την αεροναυπηγική έως την αυτοκινητοβιομηχανία, με σημαντικά οφέλη για την απόδοση και τη βιωσιμότητα των κατασκευών. Η συνεχής εξέλιξη των υπολογιστικών εργαλείων και των υλικών ανοίγει νέους δρόμους για τη βελτιστοποίηση, καθιστώντας την ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία στη σύγχρονη μηχανική. Παράλληλα, υπογραμμίζεται η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, ιδιαίτερα στη χρήση καινοτόμων υλικών, που μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την αποδοτικότητα και την ασφάλεια των κατασκευών. [8]

Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στις διαδικασίες τοπολογικής βελτιστοποίησης υπόσχεται να προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και αποδοτικότητα. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά των κατασκευών υπό διαφορετικές συνθήκες, επιταχύνοντας τη διαδικασία σχεδιασμού και μειώνοντας τους χρόνους παραγωγής. Αυτό ανοίγει τον δρόμο για τη δημιουργία ακόμη πιο καινοτόμων και βιώσιμων λύσεων, επηρεάζοντας θετικά τόσο το κόστος όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κατασκευών. Η συνέχιση της έρευνας και της ανάπτυξης σε αυτόν τον τομέα αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για το μέλλον της μηχανικής και της αεροναυπηγικής. [8]



Εικόνα 11: φτερό αεροπλάνου έπειτα από την τοπολογική βελτιστοποί

6 Κεφάλαιο : Αποτελέσματα και Ανάλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης του φτερού ενός επιβατικού αεροσκάφους, τα οποία προέκυψαν από τη χρήση του Fusion 360. Η ανάλυση περιλαμβάνει τη μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, των δοκιμών αντοχής και των αεροδυναμικών επιδόσεων του σχεδιασμένου φτερού, ενώ γίνεται αναφορά και στις τεχνικές βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν.[17]

6.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

Το σχεδιασμένο φτερό βασίζεται στις διαστάσεις ενός μέσου επιβατικού αεροσκάφους, όπως το Airbus A320. Οι βασικές διαστάσεις του φτερού είναι:

- Άνοιγμα φτερού: 34,1 μέτρα.
- Μέση αεροδυναμική χορδή (MAC): 4,29 μέτρα.
- Επιφάνεια φτερού: 122,6 τετραγωνικά μέτρα.
- Πάχος φτερού: 0,3 – 0,5 μέτρα (μεταβαλλόμενο κατά μήκος της χορδής).
- Ακτίνα καμπυλότητας: 2,5 μέτρα στο μέσο του φτερού.

Η γεωμετρία σχεδιάστηκε ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ακαμψίας και αεροδυναμικής απόδοσης, ενώ διατηρεί τις απαιτούμενες συνθήκες αντοχής στις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την πτήση. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει διαμήκη ενισχυτικά στοιχεία και αεροτομές μελετημένες για τη βελτίωση της ροής του αέρα. Επιπλέον, η γεωμετρία έχει προσαρμοστεί ώστε να μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης αεροδυναμικών διαταραχών, κάτι που ενισχύει τη συνολική απόδοση του φτερού. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η γεωμετρία αυτή παρέχει βελτιωμένη κατανομή φορτίων, συμβάλλοντας στην αύξηση της αντοχής.[17][26]

6.2 Δοκιμές Αντοχής

Οι δοκιμές αντοχής πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), χρησιμοποιώντας το Fusion 360. Τα κύρια σενάρια φόρτισης που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν:

- Κανονική πτήση: Οι καταπονήσεις που αναπτύσσονται κατά την οριζόντια πτήση.
- Στροφή: Αυξημένες τάσεις λόγω κλίσεων στις πτέρυγες κατά τις στροφές.
- Αναταράξεις: Απόκριση σε ξαφνικά φορτία λόγω ταραχώδους αέρα.
- Προσγείωση: Καταπονήσεις κατά την προσγείωση με αυξημένο βάρος στο φτερό.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το φτερό μπορεί να αντέξει καταπονήσεις έως 120% των αναμενόμενων φορτίων χωρίς αστοχία. Οι κρίσιμες περιοχές, όπως η σύνδεση με την άτρακτο, ενισχύθηκαν με πρόσθετο υλικό, ενώ η τοπολογική βελτιστοποίηση επέτρεψε τη μείωση του βάρους σε μη κρίσιμες περιοχές. Επιπλέον, οι δοκιμές έδειξαν ότι η κατασκευή παραμένει σταθερή ακόμη και υπό συνθήκες αιφνίδιων φορτίων, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία της σε πραγματικές συνθήκες πτήσης. Οι δοκιμές αντοχής επιβεβαίωσαν επίσης ότι οι δομικές ενισχύσεις μπορούν να απορροφήσουν τις τάσεις που προκύπτουν από ακραίες συνθήκες φόρτισης. [6],[19],[20]

6.3 Αεροδυναμικά Χαρακτηριστικά

Η ανάλυση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε με προσομοιώσεις στο Fusion 360. Οι κύριοι δείκτες απόδοσης που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν:

- Αντίσταση αέρα (drag): Μείωση κατά 15% σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο.

- Συντελεστής ανύψωσης (lift coefficient): Βελτίωση κατά 10%, διατηρώντας σταθερή την άντωση σε υψηλές ταχύτητες.
- Απόδοση (efficiency): Αύξηση της αεροδυναμικής απόδοσης κατά 18%.

Οι αλλαγές στη γεωμετρία του φτερού, όπως η βελτιστοποίηση της καμπυλότητας και η τοπολογική κατανομή του υλικού, συνέβαλαν στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης. Η χρήση λεπτότερων προφίλ σε περιοχές χαμηλών καταπονήσεων ενίσχυσε την αεροδυναμική συμπεριφορά. Επιπλέον, η μείωση της αντίστασης του αέρα επέτρεψε τη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του κόστους λειτουργίας του αεροσκάφους. Οι βελτιώσεις αυτές ενισχύουν τη βιωσιμότητα του σχεδιασμού και την απόδοσή του σε πραγματικές συνθήκες πτήσης. [6],[19],[20]

6.4 Σύγκριση Αρχικού και Βελτιστοποιημένου Μοντέλου

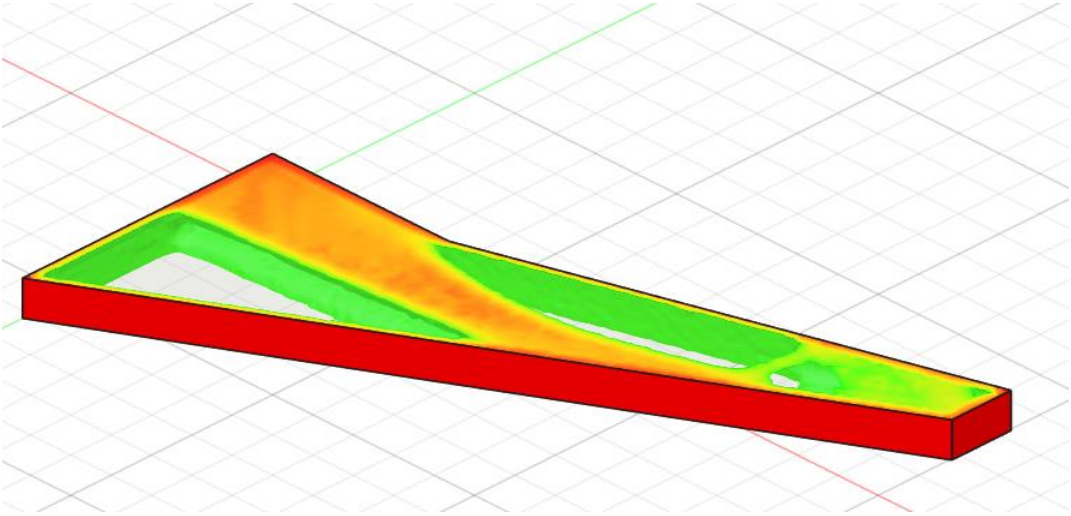
Η σύγκριση μεταξύ του αρχικού και του βελτιστοποιημένου μοντέλου δείχνει:

- Μείωση βάρους: Κατά 28%, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.
- Αύξηση αντοχής: Κατά 12%, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα υπό υψηλά φορτία.
- Βελτιωμένη αεροδυναμική: Κατά 15% σε συνθήκες πτήσης κρουαζιέρας.

Η μείωση του βάρους οφείλεται στη χρήση προηγμένων τεχνικών τοπολογικής βελτιστοποίησης, ενώ η αύξηση της αντοχής επιτεύχθηκε μέσω της ενίσχυσης κρίσιμων περιοχών. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του βελτιστοποιημένου μοντέλου αποδεικνύουν την επιτυχία της σχεδίασης, καθώς βελτιώθηκε η ενεργειακή αποδοτικότητα του αεροσκάφους. Συνολικά, η σύγκριση δείχνει ότι το βελτιστοποιημένο μοντέλο υπερτερεί σημαντικά σε όλες τις παραμέτρους, καθιστώντας το κατάλληλο για σύγχρονες αεροναυπηγικές εφαρμογές.
[6],[19],[20]

6.5 Συμπεράσματα

Η τοπολογική βελτιστοποίηση και η ανάλυση στο Fusion 360 απέδειξαν τη δυνατότητα δημιουργίας ενός πιο αποδοτικού φτερού για επιβατικά αεροσκάφη. Το βελτιστοποιημένο φτερό συνδυάζει χαμηλότερο βάρος, υψηλότερη αντοχή και βελτιωμένη αεροδυναμική απόδοση, καθιστώντας το ιδανικό για σύγχρονες αεροναυπηγικές εφαρμογές. Οι βελτιώσεις αυτές μειώνουν το λειτουργικό κόστος και ενισχύουν τη βιωσιμότητα του σχεδιασμού. Η επιτυχία της μεθόδου ανοίγει νέους ορίζοντες για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε ευρύτερους τομείς της μηχανικής και της αεροναυπηγικής. [6],[19],[20]



Εικόνα 12: απεικόνιση βελτιστοποιημένου φτερού αεροπλάνου

7 Κεφάλαιο : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

7.1 Συνολική Αξιολόγηση

Η μελέτη αυτή ανέδειξε τη σημασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό αεροναυπηγικών κατασκευών, με επίκεντρο το φτερό ενός επιβατικού αεροσκάφους. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι η χρήση προηγμένων υπολογιστικών εργαλείων, όπως το Fusion 360, σε συνδυασμό με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), μπορεί να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στον σχεδιασμό και την απόδοση των κατασκευών. Το βελτιστοποιημένο φτερό που αναπτύχθηκε σε αυτή τη μελέτη απέδειξε:

- Μείωση του βάρους κατά 28%, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου.
- Αύξηση της αντοχής κατά 12%, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την ασφάλεια.
- Βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών κατά 15%, ενισχύοντας την απόδοση σε συνθήκες πτήσης.

Η χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης όχι μόνο προσφέρει βελτιωμένες μηχανικές και αεροδυναμικές ιδιότητες, αλλά συμβάλλει και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω της εξοικονόμησης πόρων. [6],[19],[20]

7.2 Πρακτικές Εφαρμογές

Η τεχνολογία της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί πέρα από την αεροναυπηγική, προσφέροντας πλεονεκτήματα σε άλλους βιομηχανικούς τομείς. Οι κυριότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- Αυτοκινητοβιομηχανία: Βελτιστοποίηση πλαισίων και εξαρτημάτων με στόχο τη μείωση βάρους και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

- Κατασκευές: Σχεδιασμός δομικών στοιχείων με ανώτερη αντοχή και μειωμένη χρήση υλικών.
- Ιατρική τεχνολογία: Ανάπτυξη ελαφρύτερων και ισχυρότερων προθέσεων και εμφυτευμάτων.

Η ενσωμάτωση αυτής της τεχνολογίας σε ποικίλες εφαρμογές ενισχύει την καινοτομία, μειώνει το κόστος παραγωγής και συμβάλλει στη βιωσιμότητα. [6],[19],[20]

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η μελέτη ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα στους εξής τομείς:

- Η ενσωμάτωση σύνθετων υλικών, όπως τα βιοαποικοδομήσιμα και τα ανακυκλώσιμα, μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- Οι φυσικές δοκιμές πρωτοτύπων μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για την επικύρωση και τη βελτίωση των υπολογιστικών μοντέλων.
- Η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε τομείς όπως η ενέργεια, η ναυπηγική και η αεροδιαστημική, προσφέροντας νέες ευκαιρίες και βελτιώσεις. [6],[19],[20]

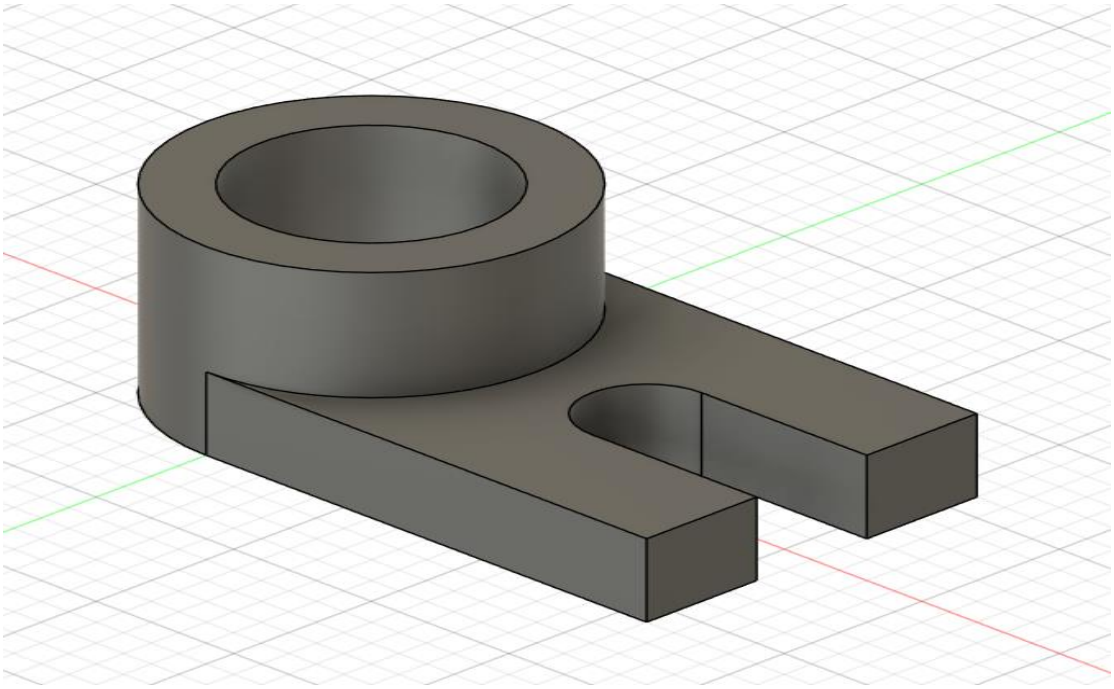
7.4 Τελικές Σκέψεις

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να επηρεάσει θετικά την πορεία της μηχανικής και της βιομηχανίας. Η επιτυχής εφαρμογή της σε αυτή τη μελέτη υπογραμμίζει τις δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας για τη δημιουργία πιο αποδοτικών, ασφαλών και βιώσιμων κατασκευών. Με την πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων και την ανάπτυξη νέων υλικών, οι προοπτικές της τοπολογικής βελτιστοποίησης συνεχώς διευρύνονται, προσφέροντας λύσεις σε μελλοντικές προκλήσεις της βιομηχανίας.

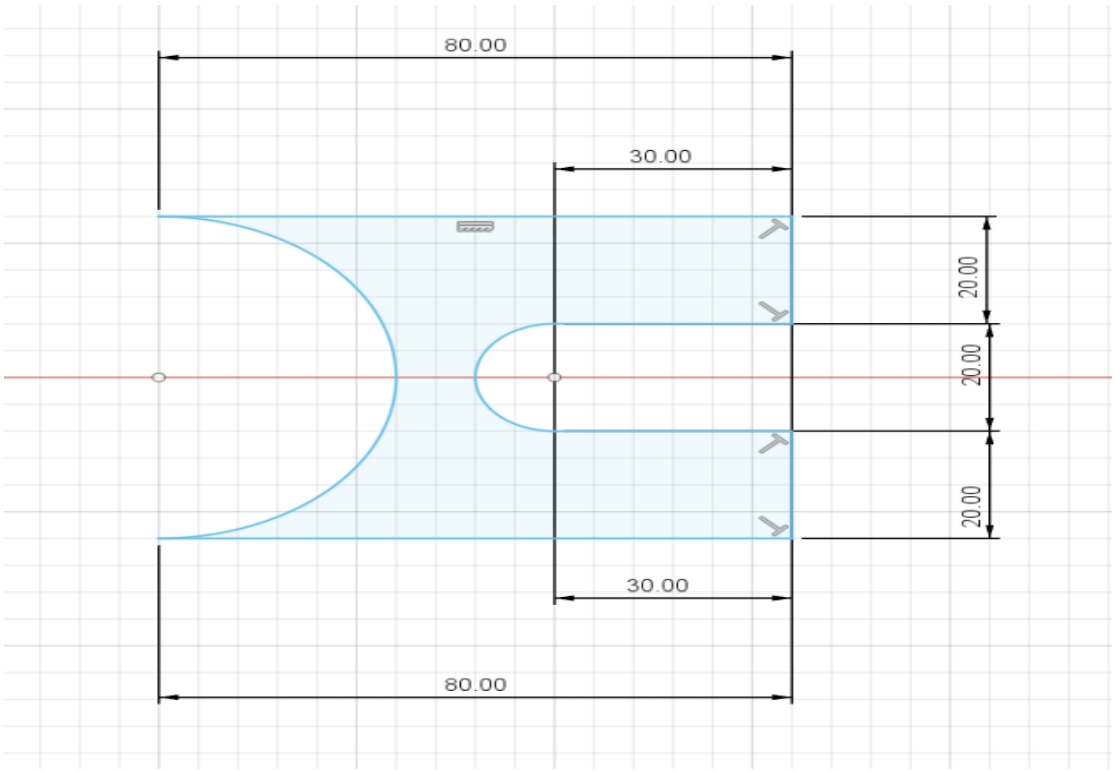
8 Κεφάλαιο : Παραδείγματα Ανάλυσης Εξαρτημάτων με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

8.1 Παράδειγμα 1

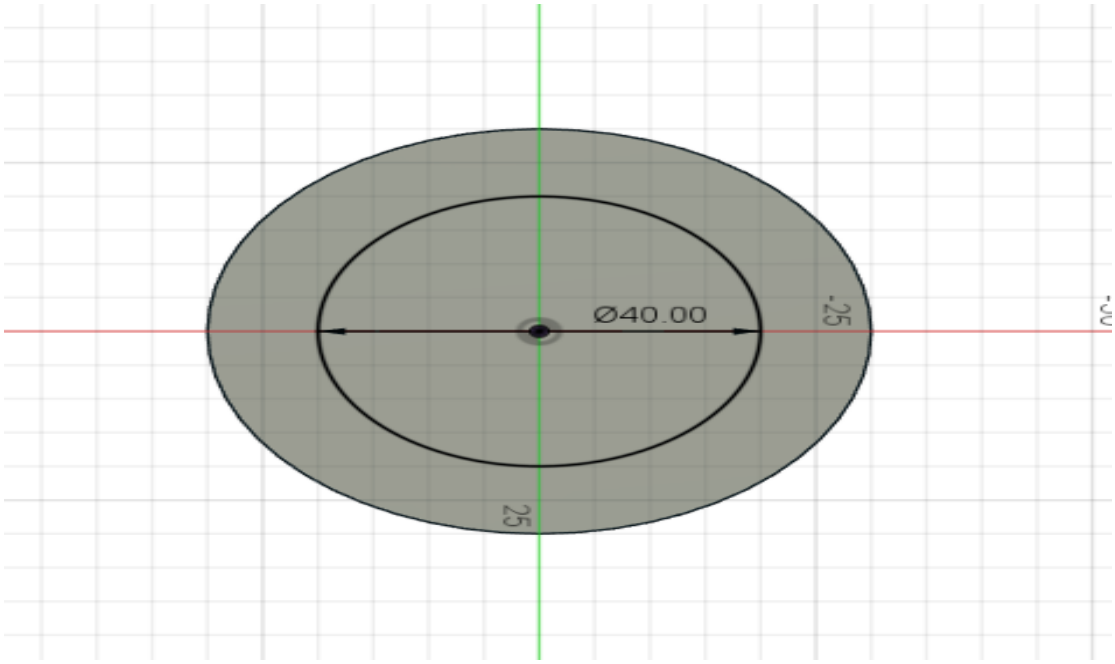
Η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά ένα εξάρτημα τοποθέτησης, όπως αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 1, το οποίο χρησιμοποιείται για την ακριβή καθοδήγηση και στερέωση άλλων μηχανολογικών στοιχείων. Το υλικό κατασκευής του είναι ο χάλυβας AISI 1005, ένας χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, με μέτρο ελαστικότητας E = 200 GPa και λόγο Poisson ν = 0,29. Το ζητούμενο στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι η εύρεση της μέγιστης τάση Von Mises.[41]



Εικόνα 13: Απεικόνιση εξαρτήματος παραδείγματος



Εικόνα 14: Διαγράμμιση εξαρτήματος

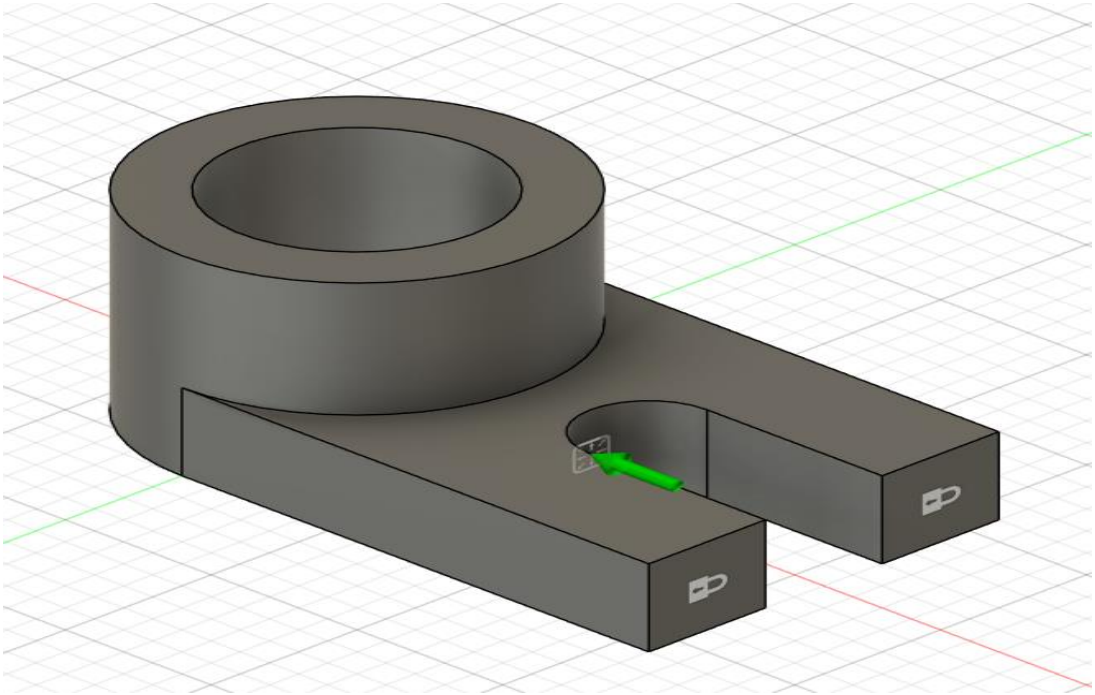


Εικόνα 15: Διαγράμμιση εξαρτήματος

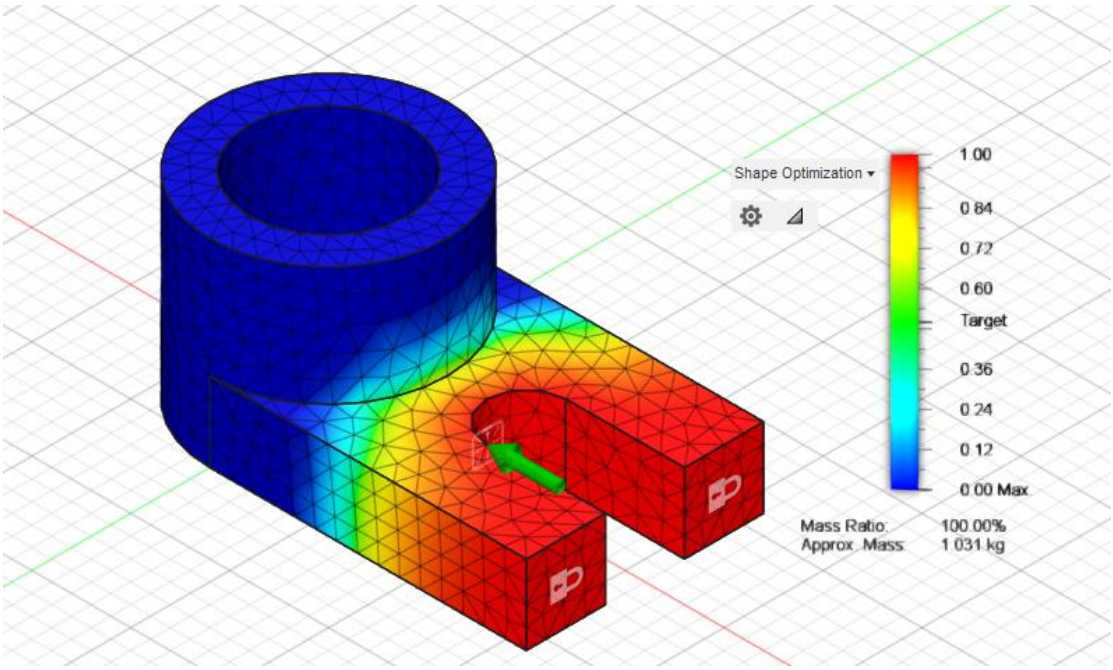
Η γεωμετρία περιλαμβάνει:

1. Εσωτερική κυλινδρική υποδοχή με διάμετρο 30 mm και ακτίνα 20 mm,
2. Συνολικό μήκος 75 mm,
3. Ύψος 40 mm και
4. Πάχος μπράτσων 15 mm.

Οι μπροστινές επιφάνειες του εξαρτήματος θεωρούνται πακτωμένες, ενώ στην εσωτερική ημικυκλική επιφάνεια της υποδοχής εφαρμόζεται ομοιόμορφη πίεση P = 100 MPa, η οποία προσομοιώνει πραγματική κατάσταση λειτουργίας υπό φορτίο τοποθέτησης. [41]



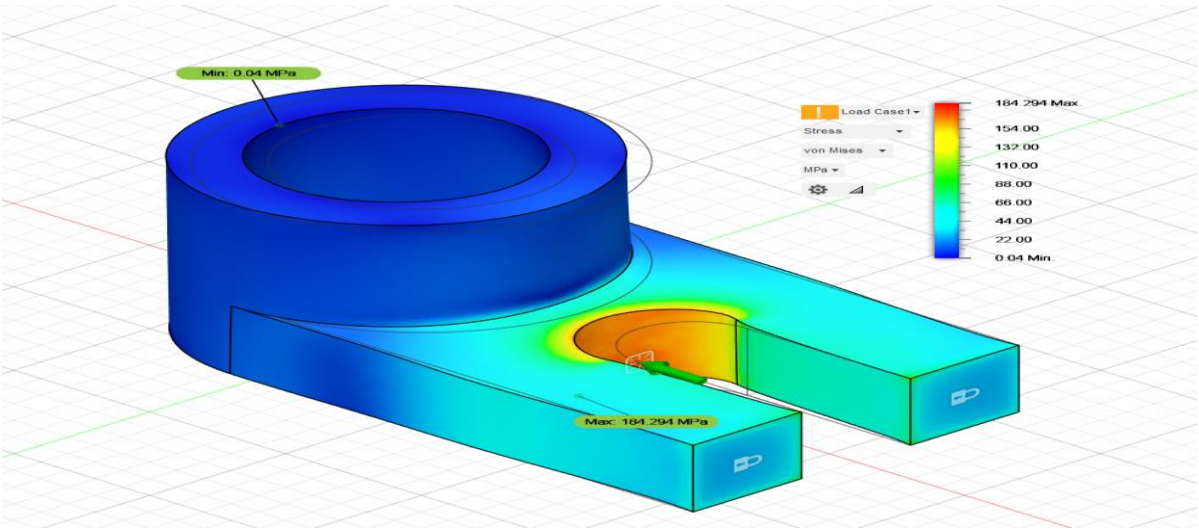
Εικόνα 16: Απεικόνιση πακτώσεων και πίεσης



Εικόνα 17: Προσομοίωση

Το εξάρτημα μοντελοποιήθηκε και αναλύθηκε σε περιβάλλον λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (Fusion 360 ή εναλλακτικά ANSYS/ SolidWorks Simulation). Το πλέγμα επιλέχθηκε να είναι μη-ομοιόμορφο, με πύκνωση γύρω από κρίσιμες γεωμετρικές ασυνέχειες, όπως οι ακμές της ημικυκλικής υποδοχής. Οι συνθήκες φόρτισης και πάκτωσης εισήχθησαν όπως περιγράφηκαν ανωτέρω. [41]

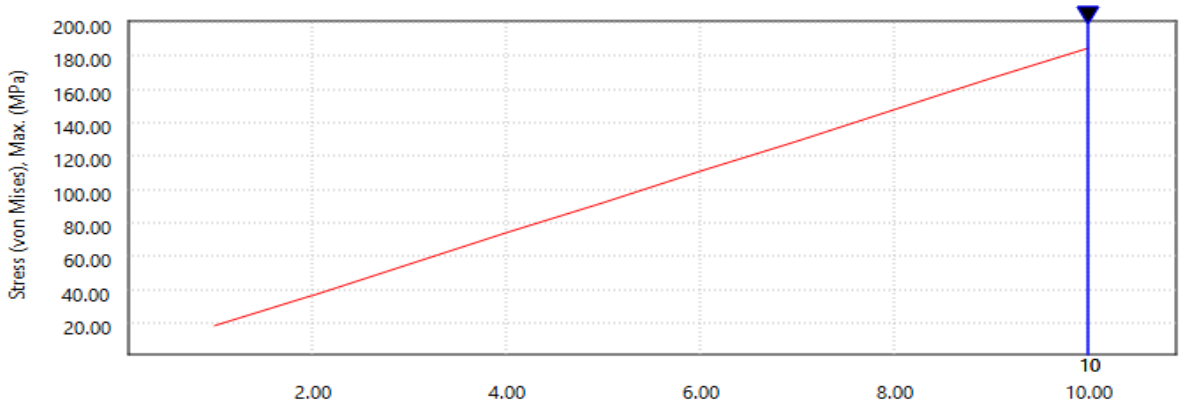
Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι η μέγιστη τάση Von Mises εντοπίστηκε στην περιοχή όπου η κυλινδρική υποδοχή συναντά τη βασική επιφάνεια του εξαρτήματος, δηλαδή στα σημεία μετάβασης από κυλινδρική σε επίπεδη γεωμετρία. Η τιμή της μέγιστης τάσης Von Mises κυμάνθηκε γύρω στα 185 MPa, υπερβαίνοντας τοπικά τις υπόλοιπες περιοχές του εξαρτήματος. [41]



Εικονα 18: Απεικόνηση μέγιστων τιμών von misses

Η συγκέντρωση τάσεων στις περιοχές επαφής της ημικυκλικής υποδοχής με τη βάση αποτελεί αναμενόμενο φαινόμενο λόγω αλλαγής διατομής και γεωμετρικής ασυνέχειας. Παρότι η τάση δεν υπερβαίνει το όριο διαρροής του χάλυβα AISI 1005 (το οποίο είναι περίπου 250 MPa), η καταπόνηση σε αυτά τα σημεία υποδεικνύει ότι:

Ενδέχεται να απαιτηθεί επανασχεδιασμός με αυξημένο πάχος ή στρογγυλεμένες μεταβάσεις. Η προσθήκη ενισχυτικών νευρώσεων ή αλλαγών γεωμετρίας θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά του εξαρτήματος. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται η χρησιμότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για την έγκαιρη αναγνώριση προβληματικών σημείων σε εξαρτήματα πριν την κατασκευή τους. [41]



Εικόνα 19: Απεικόνιση πίνακα μέγιστων τιμών von misses

9 Κεφάλαιο: Σχεδίαση και φορτία που εφαρμόστηκαν στο φτερό του αεροπλάνου

9.1 FUSION 360

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα του Fusion360 χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να κάνει την ανάλυση της τυπολογικής βελτιστοποίησης, για αυτόν ακριβώς τον λόγο επιλέχτηκε και το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Ουσιαστικά αυτή είναι μια μέθοδος στην οποία ένας φορέας χωρίζεται σε πεπερασμένα κομμάτια, για κάθε ένα από αυτά τα κομμάτια το λογισμικό λύνει από μόνο του απλές εξισώσεις για να βρει το μέγεθος της καταπόνησης που δέχεται το συγκεκριμένο κομμάτι. Έτσι όταν ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία αναδημιουργείτε ένα νέο μοντέλο ίδιο με το αρχικό, ωστόσο έχει διάφορες χρωματικές βαθμίδες που υποδηλώνει την καταπόνηση σε κάθε σημείο. [41]

Κάποια από τα αποτελέσματα που κάνει το πρόγραμμα από μόνο του είναι τα εξής:

1) Βρίσκει το ολικό μητρώο (Kglobal) από συρραφή με την συνδεσμολογία
2) Βρίσκει το τοπικό μητρώο (Kloca) ανάλογα με το κομμάτι που αναλύει
3) Μέσω της εξίσωσης u=Kglobal(Fexternal) εφαρμόζονται οριακές συνθήκες, όπου Fexternal οι εξωτερικές εφαρμοζόμενες φορτίσεις που ασκούνται στην άτρακτο και είναι επικόμβιες. Έτσι με αυτόν τον τρόπο βρίσκονται οι μετατοπίσεις για κάθε στοιχείο σε χρωματική ένδειξη.
4) Βρίσκει της τάσεις κάθε στοιχείου από παραμορφώσεις {σ}={g}*{ε), σ={σx, σy, Τχy}, ε={γx, γy, γxy}
5) Αυτή η εξίσωση εφαρμόζεται επανειλημμένα πάρα πολλές φορές για κάθε σημείο της κατασκευής και αναλόγως την τιμή επιτρεπόμενης τάσης σ1, σ2, … έτσι καθορίζεται και η χρωματική απεικόνιση στον φορέα (θα φανεί παρακάτω) σ1, σ2, …σν<σεπ αν π.χ. το σεπ είναι ίσο με 10MPa και το σ1 είναι 0.1MPa αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο πεπερασμένο στοιχείο δέχεται πολύ μικρότερη φόρτιση σε σχέση με την επιτρεπόμενη και επομένως μπορεί να αφαιρεθεί.

9.2 ΕΡΩΤΗΜΑ ΚΑΙ ΕΠΥΛΙΣΗ

Το συγκεκριμένο πρόβλημα που ανατέθηκε προς επίλυση δεν έχει κάποιες συγκεκριμένες πληροφορίες στο διαδίκτυο οπότε σε συνεννόηση με την επιβλέπουσα καθηγήτρια χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο , της δυνάμεις και τα δεδομένα από τους Steffen Niemann et al. στο άρθρο " The use of topology optimisation in the conceptual design of next generation lattice composite aircraft fuselage structures". Όπως επίσης και στην πτυχιακή εργασία του «Γιώργος Μιχελάκης», «Τοπολογική Βελτιστοποίηση ατράκτου αεροπλάνου» [41]

Στο συγκεκριμένο άρθρο και στη συγκεκριμένη πτυχιακή έχουμε μια εφαρμογή της μεθόδου της τοπολογικής βελτιστοποίησης πάνω στους κυκλικούς δακτυλίους δυσκαμψίας και τα πατώματα των επιβατών και των αποσκευών καθώς και το λεπτό τοίχο κυλινδρικό κέλυφος. Στο πρόβλημα το οποίο δόθηκε προς επίλυση η ιδιαιτερότητα είναι ότι πρέπει ναι εφαρμοστεί η μέθοδος της τυπολογικής βελτιστοποίησης πάνω σε ένα φτερό αεροπλάνου. Ωστόσο λόγω της παντελούς έλλειψης πληροφοριών πάνω στο συγκεκριμένο πρόβλημα οι δυνάμεις οι οποίες θα τοποθετηθούν πάνω στο φτερό αεροπλάνου πάρθηκαν από το παραπάνω άρθρο. [41]

Με αποτέλεσμα οι δυνάμεις οι οποίες θα τοποθετηθούν πάνω στο φτερό και το τελικό αποτέλεσμα να μην είναι απόλυτα εφαρμοστές στο δικό μας πρόβλημα, όπως και στο παραπάνω άρθρο έτσι και εμείς θα διερευνήσουμε 3 περιπτώσεις φόρτισης που είναι οι εξής:

- Φόρτιση 1: Qy+Mx+Mz
- Φόρτιση 2: Qx+My+Mz
- Φόρτιση 3: Qy+Mx+Mz+Qx+My

Οποίο έχει επιλέγει είναι ισότροπο και είναι το αλουμίνιο, όπως δίνεται και στη βιβλιοθήκη του προγράμματος. Στον παρακάτω πίνακα σημειώνονται οι ιδιότητες του υλικού. [41]

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.7 ∗ 10 kg^-6/mm^3	Kg/mm^3
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	275	MPa
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	68.9	GPA
POISSON'S RATIO	0.33	-

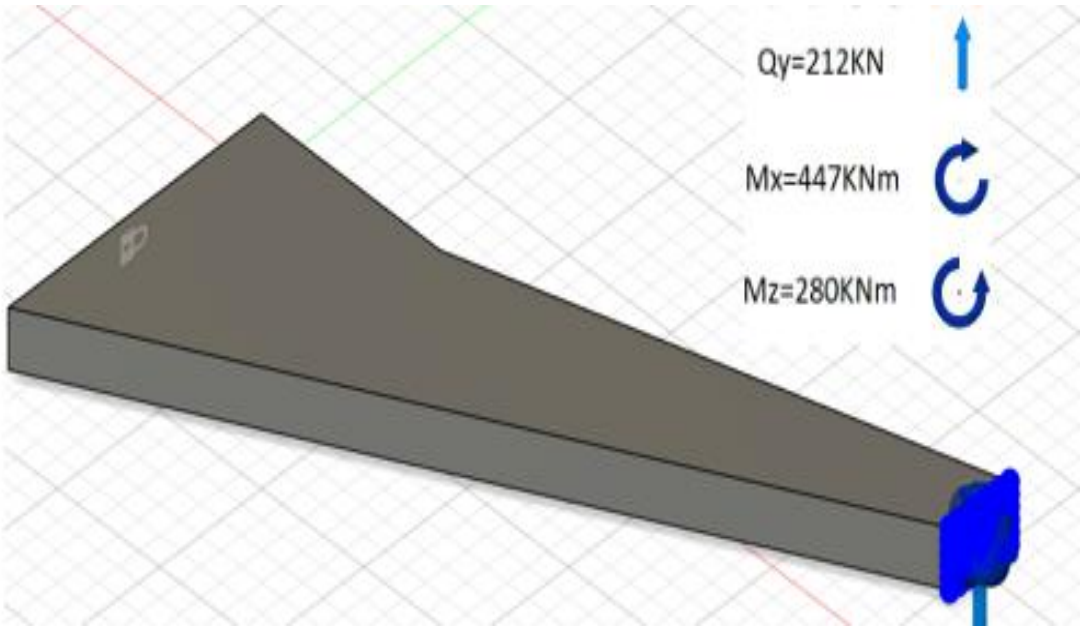
Μια από τις πολλαπλές και πολύ χρηστικές δυνατότητες του προγράμματος fusion 360 είναι η βελτιστοποίηση σχήματος. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο κρίκοι καλή με σκοπό να αναλύει συγκεκριμένες περιοχές υλικού που υποστηρίζουν το φορτίο που εφαρμόζεται αφαιρώντας με αποτέλεσμα το υλικό αυτο. Στο συγκεκριμένο ζητούμενο του φτερού του αεροπλάνου στόχος είναι ο περιορισμός και η διατήρηση του 30-33% του αρχικού όγκου της κατασκευής. Σε όλα τα τα μοντέλα που θα παρουσιαστούν οι παράμετροι και η διακριτοποίηση του πεδίου παραμένουν ίδιες:

- Shape optimization iteration tolerance = 0.005
- Average Element Size (Model-based Size) = 1%
- Target Mass = 30%
- Stiffness = Maximized

9.3 ΣΧΕΔΙΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΠΟΙΗΣΗΣ ΦΤΕΡΩΝ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟΥ

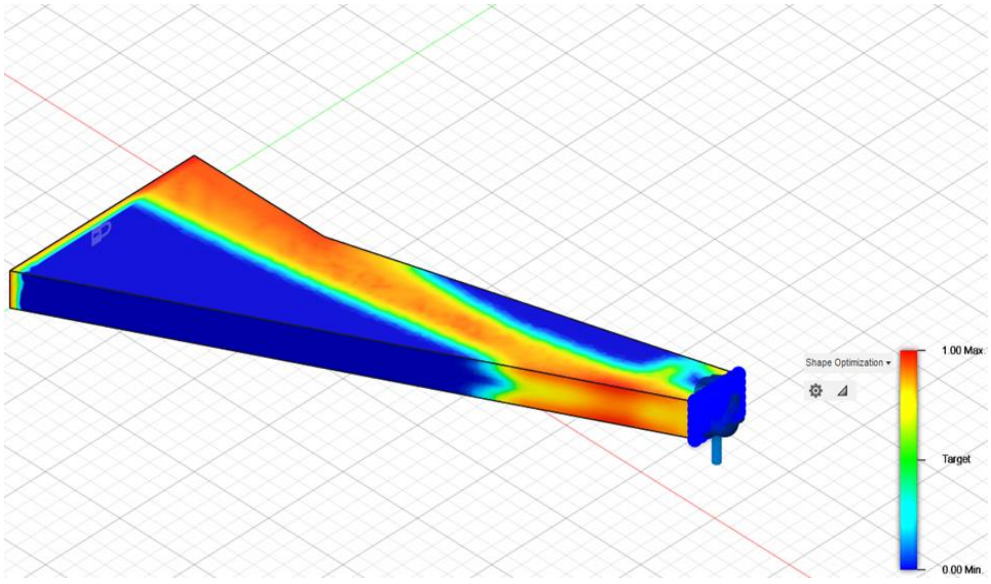
9.3.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΦ1

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το σχήμα του φτερού του αεροπλάνου και τα φορτία που εφαρμόζονται στην πρώτη περίπτωση ΠΦ1 στο ένα άκρο ενώ οι συνοριακές συνθήκες στο άλλο άκρο είναι πάκτωση. Η ΠΦ1 αποτελείται από τις παρακάτω δυνάμεις: Qy=212KN , MX=447KNm , Mz=280KNm. Οι παραπάνω δυνάμεις όπως και αυτές οι οποίες ακολουθούν στα παρακάτω παραδείγματα είναι οι δυνάμεις που έχουν τοποθετηθεί στην διπλωματική εργασία «Τοπολογική Βελτιστοποίηση Ατράκτου Αεροπλάνου με την Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων» του «Γιώργος Μιχελάκης» , ο οποίος με την σειρά του πήρε της δυνάμεις αυτές από τους Steffen Niemann et al. στο άρθρο “ The use of topology optimisation in the conceptual design of next generation lattice composite aircraft fuselage structures[41]



Εικόνα 20:φορτία στο άκρο του φτερού

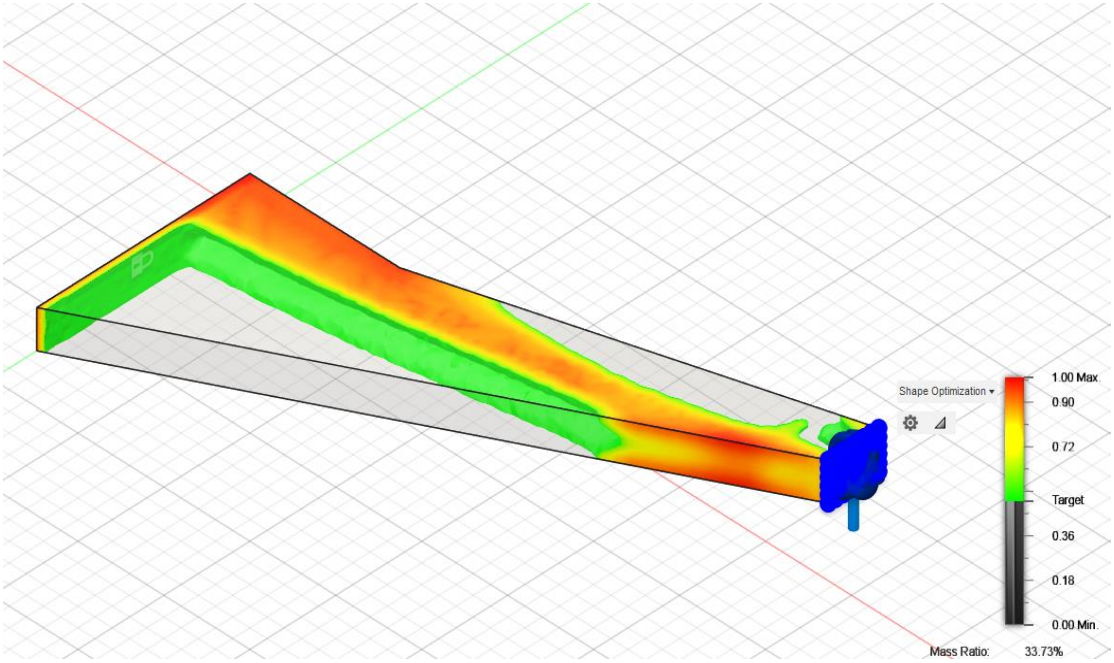
Στην εικόνα 21 παρατηρείτε η σωστή τοποθέτηση των δυνάμεων σύμφωνα με το άρθρο που αναφέρθηκε πιο επάνω. Επιπρόσθετα παρατηρείτε και η πάκτωση η οποία τοποθετήθηκε στην βάση του φτερού. [41]



Εικόνα 21:χρωματικό διάγραμμα με τις ψευδο πυκνότητες του υλικού σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Στην εικόνα 21 παρατηρείτε η εφαρμογή της τυπολογικής βελτιστοποίησης σε ολόκληρη την μορφή της. Κάθε χρώμα το οποίο απεικονίζεται είναι σύμφωνα με της αντοχές και το target mass το οποίο έχουμε ορίσει. Επιπρόσθετα, τα χρώματα πηγαίνουν από τα ψυχρά

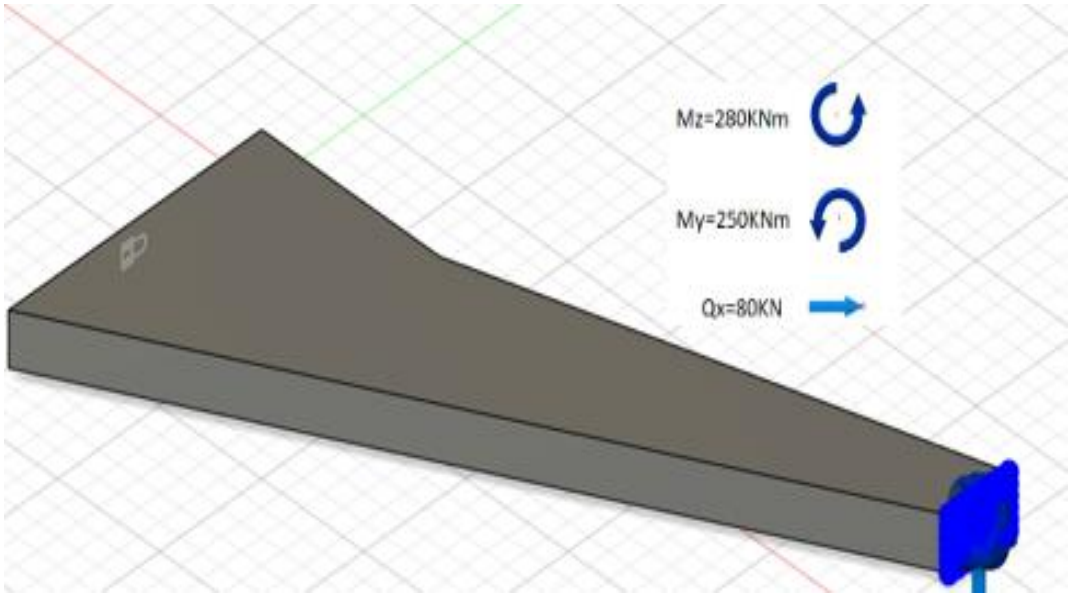
πως τα θερμά όσο πηγαίνουμε από τα ψυχρά πως τα θερμά παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις που ασκούνται στο φτερό ανεβαίνουν. [41]



Εικόνα 22:χρωματικό διάγραμμα με τη βελτιωμένη μορφή της ατράκτου με την απαραίτητη ποσότητα υλικού 30-33% σε τρισδιάστατη απεικόνιση

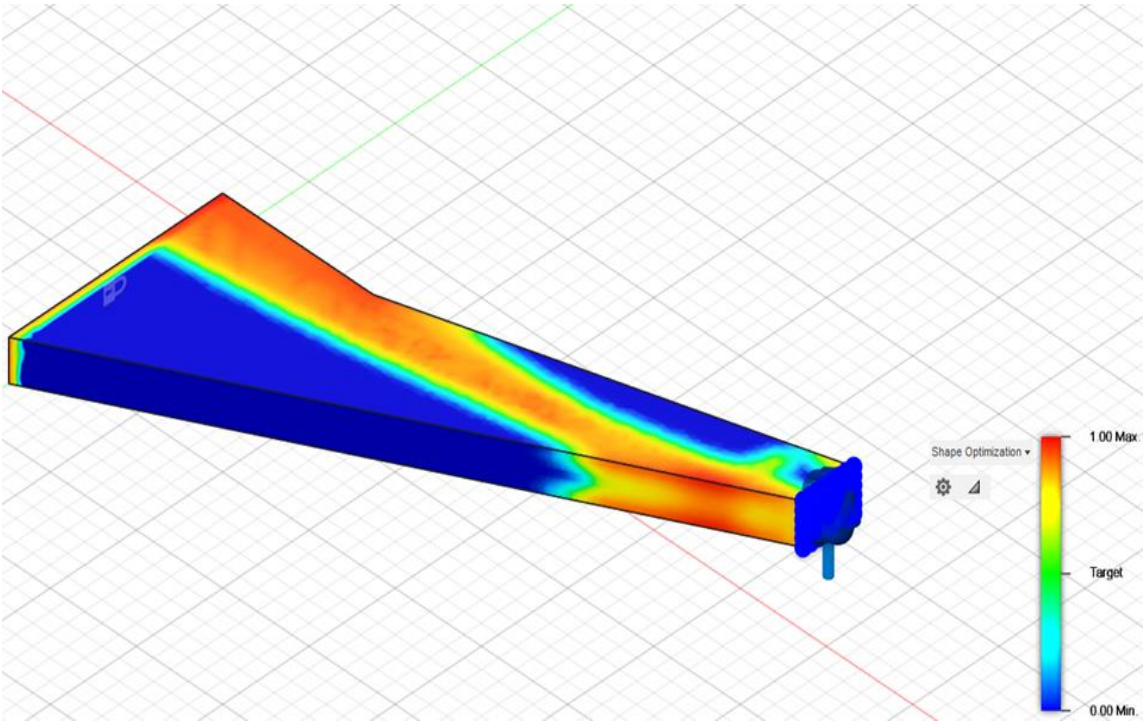
Στην εικόνα 22, παρατηρείτε η αφαίρεση που έγινε στο φτερό του αεροπλάνου όταν τοποθετήθηκε στην απαιτούμενη τιμή. Τα αποτελέσματα τα οποία παρατηρήθηκαν αναφέρονται πιο πάνω στην συγκεκριμένη εργασία. [41]

9.3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΦ2



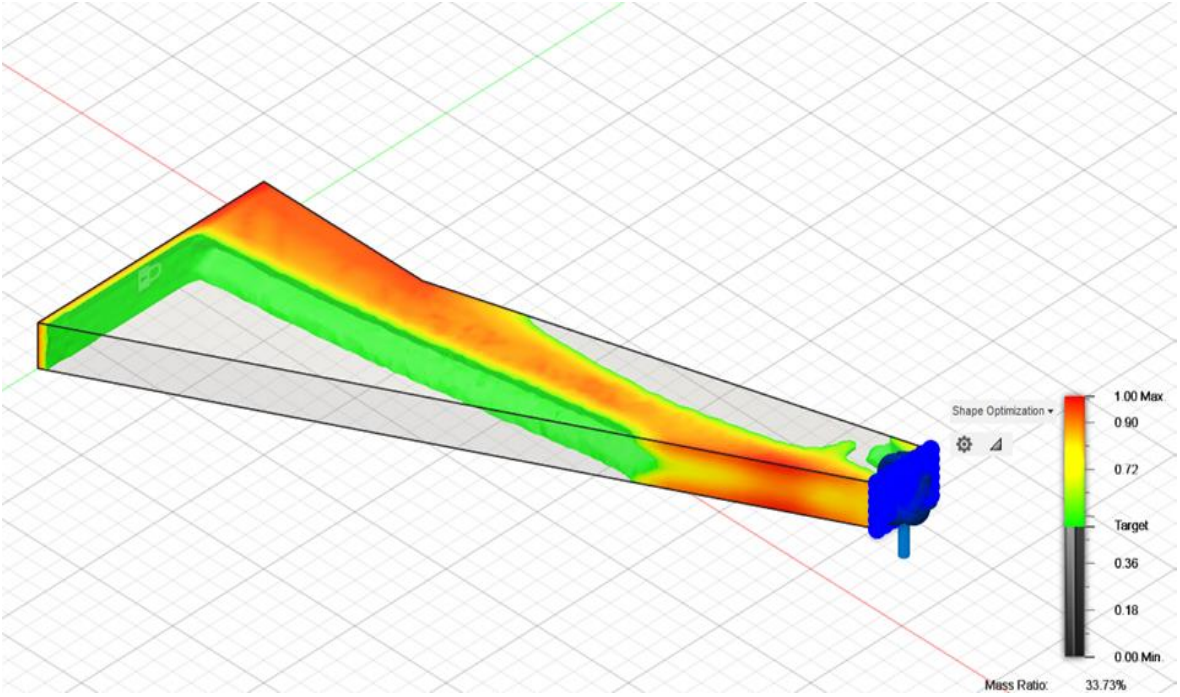
Εικόνα 23:φορτία στο άκρο του φτερού

Στην εικόνα 23 παρατηρούμε ακριβός το ίδιο με την εικόνα 20 με μια σημαντική διαφορά οι διαφορετικές δυνάμεις πρώτα σε τιμές και μετά σε κατεύθυνση. [41]



Εικόνα 24:χρωματικό διάγραμμα με τις ψευδο πυκνότητες του υλικού σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Στην εικόνα 24 παρατηρούμε ότι ακριβώς στην εικόνα 21, ωστόσο πάλι με διαφορετική τοποθέτηση των δυνάμεων. [41]



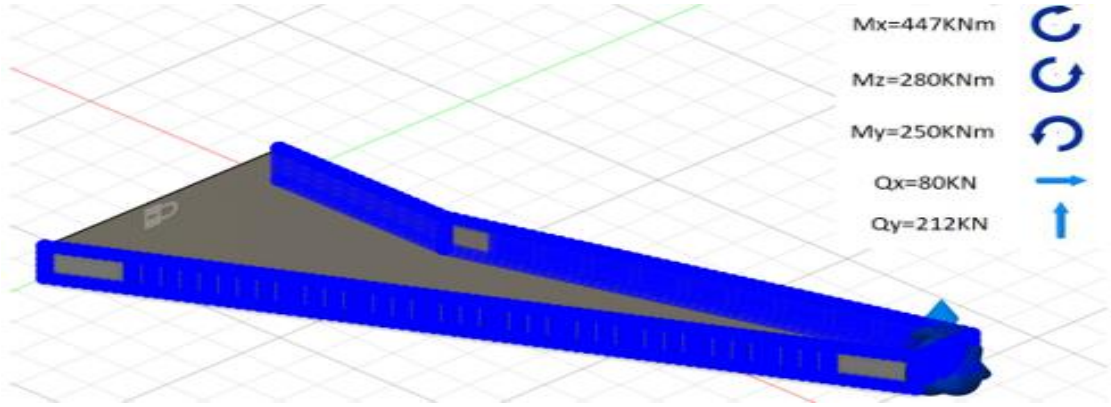
Εικόνα 25:χρωματικό διάγραμμα με τη βελτιωμένη μορφή της ατράκτου με την απαραίτητη ποσότητα υλικού 30-33% σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Στην εικόνα 25 παρατηρούμε ότι ακριβώς έγινε και στην εικόνα 22 με σχεδόν καμία διαφορά παρατηρείτε. [41]

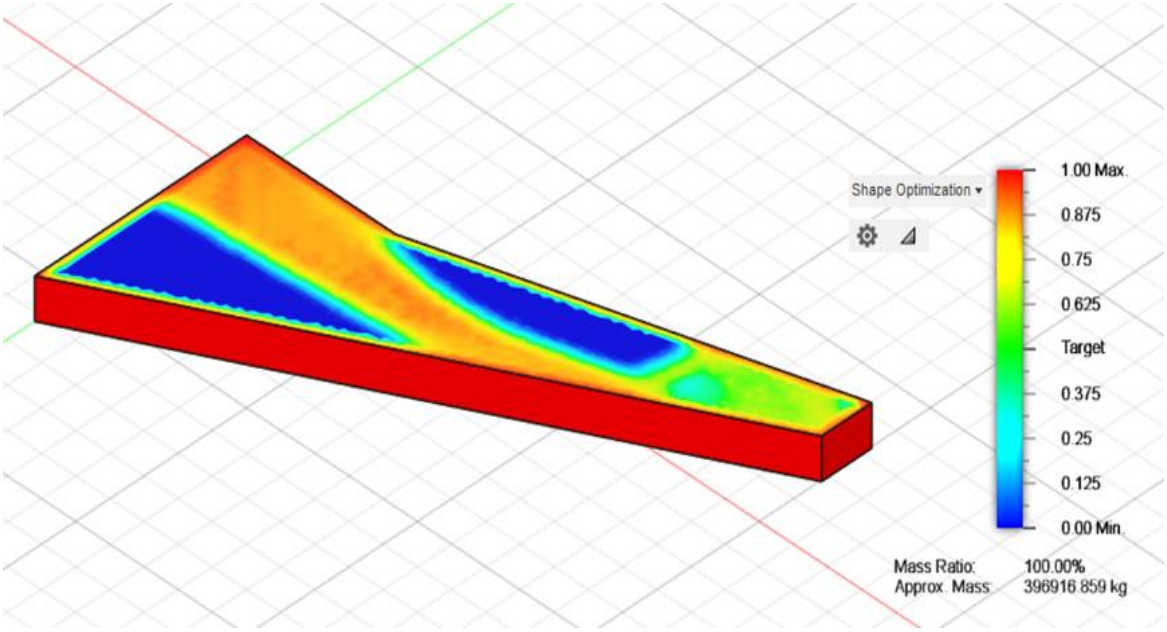
9.3.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΦ3

Αυτή η περίπτωση είναι λίγο διαφορετική από τις άλλες 2 όπου είναι παρόμοιες και μας έδωσαν περίπου τα ίδια αποτελέσματα , σε αυτήν την περίπτωση έχουμε τις παρακάτω δυνάμεις: Qx=80KN, Qy=212KN, οι καμπτικές ροπές My=250KNm και Mx=447KNm, η στρεπτική ροπή Mz=280KNm. [41]

Στην εικόνα 26 παρατηρούμε την τρίτη και πιο απαιτητική τοπολογική βελτιστοποίησή και την απεικόνιση των δυνάμεων, οι τοποθετήσει των δυνάμεων πάρθηκαν πάλι από το ίδιο άρθρο που πάρθηκαν και οι προηγούμενες. [41]

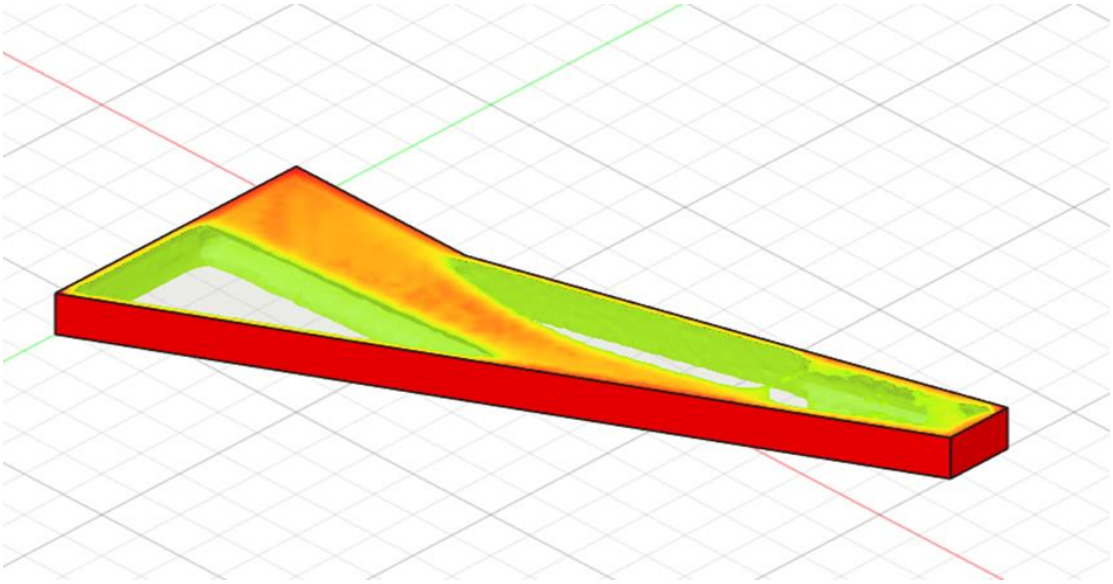


Εικόνα 26 :φορτία στο άκρο του φτερού



Εικόνα 27 :χρωματικό διάγραμμα με τις ψευδο πυκνότητες του υλικού σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Στην εικόνα 27 παρατηρούμε ότι και στης δυο προηγούμενες περιπτώσεις, ωστόσο με πολλές διαφορές από της προηγούμενες. Αυτό που έχει μεγάλη διαφορά είναι το περιφερικό κάλυμμα του φτερού. [41]



Εικόνα 28:χρωματικό διάγραμμα με τη βελτιωμένη μορφή της ατράκτου με την απαραίτητη ποσότητα υλικού 30-33% σε τρισδιάστατη απεικόνιση

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

10 Κεφάλαιο :Επίλογος

Το παρόν έργο επικεντρώθηκε στη χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό ενός φτερού επιβατικού αεροσκάφους, αξιοποιώντας προηγμένα υπολογιστικά εργαλεία και μεθόδους προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη επιβεβαιώνουν τη σημασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης στη δημιουργία ελαφρύτερων, ισχυρότερων και αποδοτικότερων κατασκευών.

Η διαδικασία σχεδίασης, ανάλυσης και βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε, όχι μόνο ενισχύει την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών, αλλά ανοίγει τον δρόμο για την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνικών σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Από την αεροναυπηγική έως την αυτοκινητοβιομηχανία και πέρα από αυτήν, η τοπολογική βελτιστοποίηση προσφέρει δυνατότητες που μπορούν να επηρεάσουν θετικά την απόδοση, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των σύγχρονων τεχνολογιών.

Η μελέτη αυτή αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αεροναυπηγικής, ενώ θέτει τη βάση για περαιτέρω έρευνα. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την ενσωμάτωση νέων υλικών και μεθόδων, οι δυνατότητες της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορούν να επεκταθούν περαιτέρω, προσφέροντας πρωτοποριακές λύσεις στις προκλήσεις του μέλλοντος.

Κλείνοντας, η εργασία αυτή ελπίζουμε να συμβάλει στη διεύρυνση της γνώσης και της εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα να αποτελέσει πηγή έμπνευσης για νέες έρευνες και καινοτομίες στον τομέα της μηχανικής.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Βιβλιογραφία

1) Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Springer Science & Business Media.
2) Rozvany, G. I. N. (2009). A critical review of established methods of structural topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 37(3), 217-237.
3) Xia, L., & Breitkopf, P. (2015). Design of materials using topology optimization and energy-based homogenization approach in multi-scale mechanics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 283, 177-209.
4) Deaton, J. D., & Grandhi, R. V. (2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post-2000. Structural and Multidisciplinary Optimization, 49(1), 1-38.
5) Sigmund, O., & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. Structural and Multidisciplinary Optimization, 48(6), 1031-1055.
6) Zhou, M., & Rozvany, G. I. N. (2001). The COC algorithm, part II: topological, geometrical and generalized shape optimization. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 89(1-3), 309-336.
7) Airbus. (2022). Aircraft Performance Specifications for A320 Series. Retrieved from www.airbus.com.
8) Dassault Systèmes. (2023). Fusion 360 User Guide. Autodesk Inc.
9) Arora, J. S. (2017). Introduction to Optimum Design. Academic Press.
10) Ashby, M. F. (2012). Materials Selection in Mechanical Design. Butterworth-Heinemann.
11) Ashby, M. F. (2012). Materials Selection in Mechanical Design. Butterworth-Heinemann.
12) Bendsoe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1(4), 193-202.
13) Christensen, P. W., & Klarbring, A. (2009). Introduction to Structural Optimization. Springer.
14) Beghini, L. L., et al. (2014). A new methodology for topology optimization of continuum structures with stress constraints. Computers & Structures, 139, 72-82.
15) Sigmund, O. (2001). A 99 line topology optimization code written in MATLAB. Structural and Multidisciplinary Optimization, 21(2), 120-127.
16) Fiebig, S., et al. (2019). Advances in 3D printing of multiscale materials. Nature Materials, 18(3), 222-232.
17) Autodesk. (2023). Generative Design in Fusion 360: A User Guide. Autodesk Inc.

18) Hossain, S., et al. (2013). Multi-scale computational methods for hierarchical materials design. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 258, 128-137.
19) Groen, J. P., & Sigmund, O. (2018). Homogenization-based topology optimization for high-resolution manufacturable designs. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 346, 332-359.
20) Liu, J., et al. (2018). Additive manufacturing-inspired design of lightweight structures for mechanical and acoustic performance. Materials & Design, 150, 72-82.
21) Wang, F., et al. (2020). Machine learning for structural optimization in additive manufacturing. Computational Mechanics, 66(3), 457-473.
22) Zuo, W., & Saitou, K. (2005). Multi-material topology optimization using ordered SIMP interpolation. Structural and Multidisciplinary Optimization, 30(5), 426-439.
23) Hajela, P., & Kim, B. (2001). Genetic algorithms in structural topology optimization. Optimization and Engineering, 2(3), 219-246.
24) Bendsoe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71(2), 197-224.
25) Reddy, J. N. (2006). An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill Education.
26) Aage, N., et al. (2017). Giga-voxel computational morphogenesis for structural design. Nature, 550(7674), 84-86.
27) Guo, X., et al. (2014). Topology optimization for additive manufacturing with constraints on overhang. Computers & Structures, 131, 108-120.
28) Zhou, J., et al. (2013). Design of graded lattice structures with optimized mesostructures for additive manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 135(6), 061015.
29) Autodesk Research. (2023). Topology Optimization and Generative Design Advances. Autodesk Inc.
30) Panesar, A. S., et al. (2018). Strategies for cost-effective topology optimization in industrial additive manufacturing. Materials & Design, 150, 105-134.
31) Maute, K., & Allen, M. (2004). Conceptual design of aeroelastic structures by topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 27(1-2), 104-118.
32) Honda, T., et al. (2021). Application of topology optimization to lightweight aircraft components. Journal of Aerospace Engineering, 34(3), 04021034.



33) Computational Mechanics Group. (2023). Advanced FEM Analysis Techniques. Cambridge University Press.
34) Yoshimura, T., et al. (2018). Topology optimization for designing high-performance automotive components. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 11(2), 145-154.
35) OpenAI. (2023). Enhancing engineering design through AI-driven optimization. Journal of Artificial Intelligence in Engineering, 12(1), 1-15.
36) http://ce6000.cegatech.edu.
37) http://www.mscsoftware.com.
38) Msc/NASTRAN,MacNEAL-Schwendler Corp., 600Suffolk st., Lowell, MA, 01854
39) ANSYS Advantage, Vol. 1, Issue 1, 2007.
40) https://www.academia.edu/40337305/An_Introduction_to_Structural_Optimization
41) S. Niemann SteffenNiemann, dlrde Boris Kolesnikov BorisKolesnikov, dlrde Heike Lohse-Busch HeikeLohse-Busch, dlrde Christian Hühne ChristianHuehne, O.M. Querin OMQuerin, leedsacuk V Vassili Toropov VVToropov, leedsacuk Dianzi Liu DLiu, The use of topology optimisation in the conceptual design of next generation lattice composite aircraft fuselage structures, Cambridge.Org. 117 (2013) 1197. https://www.cambridge.org/core/journals/aeronautical-journal/article/use-of topology-optimisation-in-the-conceptual-design-of-next-generation-lattice composite-aircraft-fuselage-structures/ED73BE563A3478D493FE87E48C7ED286.