

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GIMBAL ΓΙΑ UAV'S:
ΧΡΗΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΨΥΞΗΣ

OPTIMIZATION OF GIMBAL SYSTEM
DESIGN FOR UAV'S: PAYLOAD AND
COOLING SYSTEMS

Διπλωματική εργασία

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:
ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ – ΜΑΡΙΟΣ ΤΣΑΪΝΗΣ

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ: ΗΛΙΑΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2023

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η **Μαυρίδης Ηλίας** του **Αναστασίου**, με αριθμό μητρώου **1839213** φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, 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 πτυχίου μου».

Κομμάτια της παρούσας διπλωματικής έχουν αποκρυφθεί λόγου εταιρικών μυστικών.

Ο/Η Δηλών/ούσα



ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

| ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΗΜΟ | ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|------------------------|----------|
| ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥ | |
| ΑΝΔΡΕΑΣ-ΜΑΡΙΟΣ ΤΣΑΙΝΗΣ | |
| ΒΑΙΡΗΣ ΑΧΙΛΛΕΑΣ | |

1 ABSTRACT

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος αρθρωτού συστήματος (Gimbal) για UAV, εστιάζοντας στο ωφέλιμο φορτίο και στα συστήματα ψύξης. Μέσω μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης με τη χρήση εργαλείων όπως το ANSYS και το SolidWorks, η μελέτη αξιολογεί την απόδοση, τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος gimbal υπό διάφορες συνθήκες. Η έρευνα διερευνά επίσης τις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται κατά τη μετάβαση από τον σχεδιασμό στην παραγωγή, τηρώντας τα στρατιωτικά πρότυπα. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις πιθανές βελτιώσεις στα συστήματα αρθρωτού συστήματος UAV, ανοίγοντας το δρόμο για πιο αποτελεσματικές και αξιόπιστες επιχειρήσεις UAV στο μέλλον.

Περιεχόμενα

| | | |
|-----------|--|----|
| 1 | Abstract | 1 |
| 2 | List Of Abbreviations/acronyms | 7 |
| 3 | Λίστα εικόνων | 8 |
| 4 | Λίστα πινάκων | 9 |
| 5 | Εισαγωγή | 10 |
| 6 | Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 11 |
| 7 | Μεθοδολογία | 14 |
| 7.1 | Φάση Έρευνας και Ανάπτυξης 1: ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΣ Σχεδιασμός | 15 |
| 8 | Φάση Έρευνας και Ανάπτυξης 2: ΦΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ | 19 |
| 8.1.1 | Αρχιτεκτονική συστήματος και στοιχεία | 19 |
| 8.1.2 | Επιλογή υλικών και εξαρτημάτων | 20 |
| 8.1.3 | Ενσωμάτωση υποστήριξης ωφέλιμου φορτίου | 21 |
| 8.1.4 | Σχεδιασμός ψύξης | 30 |
| 8.1.5 | Εργονομία και διεπαφή χρήστη | 32 |
| 8.1.6 | Βελτιστοποίηση βάρους | 33 |
| 8.1.7 | Συνεργασία μεταξύ επιστημονικών κλάδων | 33 |
| 9 | Φάση Έρευνας και Ανάπτυξης 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ | 35 |
| 9.1 | Αεροδυναμική ανάλυση | 35 |
| 9.1.1 | Η φιλοσοφία του CFD | 36 |
| 9.1.2 | Φάσεις της ανάλυσης CFD | 37 |
| 9.1.2.1 | Φάση προετοιμασίας: | 37 |
| 9.1.2.2 | Φάση ανάλυσης: | 38 |
| 9.1.2.3 | Φάση εξέτασης δεδομένων: | 38 |
| 9.1.3 | Προετοιμασία της γεωμετρίας για ανάλυση CFD | 38 |
| 9.1.3.1 | Προσανατολισμός της γεωμετρίας: | 39 |
| 9.1.3.2 | Καθαρισμός της γεωμετρίας: Τεχνικές και σημασία | 40 |
| 9.1.3.2.1 | Διαγραφή διπλότυπων όψεων: | 41 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 9.1.3.2.2 | Δημιουργία νέων επιφανειών | 42 |
| 9.1.4 | Διακριτοποίηση και κριτήρια ποιότητας | 44 |
| 9.1.4.1 | Μέγεθος και κατανομή στοιχείων | 45 |
| 9.1.4.2 | Αναλογία διαστάσεων (Aspect Ratio) | 48 |
| 9.1.4.3 | Λοξότητα (Skewness) | 51 |
| 9.1.4.4 | Orthogonality (Ορθογωνιότητα)..... | 53 |
| 9.1.4.5 | Ομαλότητα (Smoothness) | 55 |
| 9.1.5 | Κατανόηση του y^+ και της σημασίας του στον ορισμό πλέγματος:.. | 56 |
| 9.1.6 | Μαθηματική μεθοδολογία στην αεροδυναμική ανάλυση | 58 |
| 9.1.6.1 | Εισαγωγή | 58 |
| 9.1.6.2 | Θεμελιώδεις εξισώσεις | 59 |
| 9.1.6.3 | Οριακές συνθήκες..... | 62 |
| 9.1.6.4 | Μοντελοποίηση τύρβης | 64 |
| 9.1.6.5 | Μέθοδοι επίλυσης στο ANSYS Fluent | 66 |
| 9.1.6.5.1 | Επαναληπτικές μέθοδοι στο Fluent | 66 |
| 9.1.6.5.2 | Σύγκλιση και παρακολούθηση | 69 |
| 9.1.6.6 | Επικύρωση και επαλήθευση | 73 |
| 9.1.6.7 | Μετεπεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων | 75 |
| 9.1.7 | Συμπέρασμα | 79 |
| 9.2 | Θερμική ανάλυση..... | 82 |
| 9.2.1 | Οριακές συνθήκες θερμικής ανάλυσης | 82 |
| 9.2.2 | Αποτελέσματα και δεδομένα των αναλύσεων..... | 83 |
| 9.3 | Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) | 85 |
| 9.3.1 | Προ-επεξεργασία για το σύστημα στο SolidWorks | 85 |
| 9.3.1.1 | Απλοποίηση μοντέλου: | 85 |
| 9.3.2 | Defeaturing:..... | 87 |
| 9.3.3 | Πλέγμα για το σύστημα:..... | 88 |
| 9.3.4 | Οριακές και αρχικές συνθήκες: | 90 |
| 9.3.5 | Ιδιότητες υλικού: | 92 |
| 9.3.6 | Στόχοι επιδόσεων:..... | 94 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9.3.7 | Επιλύτες στο SolidWorks FEA | 95 |
| 9.4 | Βελτιστοποίηση τοπολογίας | 97 |
| 9.4.1 | Αρχές βελτιστοποίησης τοπολογίας: | 97 |
| 9.4.1.1 | Μαθηματικό θεμέλιο | 98 |
| 9.4.1.2 | Ορισμός χώρου σχεδιασμού | 99 |
| 9.4.1.2.1 | Έννοια του σχεδιαστικού χώρου | 99 |
| 9.4.1.2.2 | Ορισμός της περιοχής σχεδίασης στο SolidWorks | 99 |
| 9.4.1.2.3 | Σημασία των οριακών συνθηκών..... | 100 |
| 9.4.1.2.4 | Ενσωμάτωση κατασκευαστικών περιορισμών..... | 100 |
| 9.4.1.2.5 | Εξετάζοντας επιχειρησιακά σενάρια..... | 100 |
| 9.4.2 | Στόχοι και περιορισμοί βελτιστοποίησης | 101 |
| 9.4.3 | Ερμηνεία αποτελεσμάτων και μετεπεξεργασία:..... | 102 |
| 9.4.4 | Μελέτη περίπτωσης: Εφαρμογή στο σύστημά μας | 105 |
| 9.4.4.1 | Καθορισμός του χώρου σχεδιασμού: | 105 |
| 9.4.5 | Προκλήσεις και περιορισμοί: | 108 |
| 9.5 | Συμπέρασμα..... | 110 |
| 10 | Μελοντικά Σχεδια | 111 |
| 10.1 | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ | 111 |
| 10.1.1 | Σκέψεις σχεδιασμού για πειραματικό Gimbal | 111 |
| 10.1.2 | Στρατηγική συλλογής στοιχείων..... | 112 |
| 10.1.3 | Ανάλυση και διορατικότητα | 113 |
| 10.2 | ΦΑΣΗ ΠΡΩΤΟΥ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ | 114 |
| 10.2.1 | Στόχοι σχεδιασμού πρωτοτύπου | 115 |
| 10.2.2 | Στρατηγική δοκιμών και επικύρωσης | 116 |
| 10.2.3 | Προσέγγιση ανατροφοδότησης και επαναληπτικής βελτίωσης .. | 117 |
| 10.3 | ΠΡΩΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ | 119 |
| 10.3.1 | Μετάβαση σε στρατηγική παραγωγής..... | 120 |
| 10.3.2 | Αναμενόμενες προκλήσεις παραγωγής | 121 |
| 10.3.3 | Σχέδια ελέγχου ποιότητας και δοκιμών | 123 |
| 11 | ΣΥΝΟΨΗ | 125 |

| | | |
|----|-------------------------------|-----|
| 12 | Παράρτημα α | 126 |
| 13 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 128 |

2 LIST OF ABBREVIATIONS/ACRONYMS

AHRS - Attitude and Heading Reference System
ANSYS - Analysis System (A commercial software for engineering simulation)
CAD - Computer-Aided Design
CFD - Computational Fluid Dynamics
CNC - Computer Numerical Control
DFM - Design for Manufacturability
DNS - Direct Numerical Simulation
FEA - Finite Element Analysis
LES - Large Eddy Simulation
R&D - Research and Development
RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Re - Reynolds Number
UAV - Unmanned Aerial Vehicle
y+ - Non-dimensional wall distance
VBA – Visual Basic for Application

3 ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1: Η ΣΥΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΖΥΓΟΥ 2 ΑΞΟΝΩΝ. Α) ΣΥΝΟΛΟ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ· Β) ΑΗΡΣ· Γ) ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ· Δ) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΙΜΑΝΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΧΑΛΙΑΣ· (Ε, Φ) ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ. (1) | 11 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΖΥΓΟΥ 3 ΑΞΟΝΩΝ (ΕΥΓΕΝΙΚΗ ΠΡΟΣΦΟΡΑ ΤΟΥ DJI) (2) | 12 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3: ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΒΑΣΗ ΓΙΑ 5-ΑΞΟΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ CNC. | 21 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΒΑΥΟΝΕΤ ΓΙΑ ΚΛΕΙΔΩΜΑ ΣΤΟ ΡΑΝ | 26 |
| ΕΙΚΟΝΑ 5: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ BALL CLUTCH | 27 |
| ΕΙΚΟΝΑ 6: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΒΑΣΗ | 28 |
| ΕΙΚΟΝΑ 7: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ | 29 |
| ΕΙΚΟΝΑ 8: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΔΥΟ ΣΥΜΜΟΡΦΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ. | 29 |
| ΕΙΚΟΝΑ 9: ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 46 |
| ΕΙΚΟΝΑ 10: «ΚΟΥΤΙΑ» ΓΙΑ ΝΑ ΠΥΚΝΩΣΟΥΜΕ ΤΟ ΠΛΕΓΜΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ | 47 |
| ΕΙΚΟΝΑ 11: ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΤΗΝ ΤΟΠΙΚΗ ΠΥΚΝΩΣΗ | 47 |
| ΕΙΚΟΝΑ 12: ΠΛΕΓΜΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ | 48 |
| ΕΙΚΟΝΑ 13: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΨΗΛΟΥ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΟΥ ΛΟΓΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ (3) | 49 |
| ΕΙΚΟΝΑ 14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΛΟΞΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (3) | 52 |
| ΕΙΚΟΝΑ 15: :ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΕΣ ΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟ ΚΟΙΝΟ ΠΡΟΣΩΠΟ ΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ (3) | 54 |
| ΕΙΚΟΝΑ 16: ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΣΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΤΑ ΚΕΛΙΑ ΥΠΕΥΘΥΝΑ ΝΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΟΥΝ ΤΑ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ. ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΕΧΕΙ ΠΑΧΟΣ 0.001Μ ΚΑΙ ΤΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ 9 ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΑ. | 58 |
| ΕΙΚΟΝΑ 17: ΛΙΣΤΑ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ | 63 |
| ΕΙΚΟΝΑ 18: ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ. | 73 |
| ΕΙΚΟΝΑ 19: ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΙΕΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GIMBAL ΣΕ ΡΑ | 76 |
| ΕΙΚΟΝΑ 20: ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΕ m^2/s^3 . | 77 |
| ΕΙΚΟΝΑ 21: ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΥΡΒΗΣ ΣΕ $Joule/Kg$ | 78 |
| ΕΙΚΟΝΑ 22: ΡΟΟΓΡΑΜΜΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΧΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΣΕ m/s . | 79 |
| ΕΙΚΟΝΑ 23: ΚΑΝΑΛΙ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΦΑΙΡΑ ΩΣΤΕ ΝΑ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ ΨΥΞΗ. | 83 |
| ΕΙΚΟΝΑ 24: ΑΠΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ KELVIN. | 84 |

4 ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1: MATRIX ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ | 17 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΣΦΙΞΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ ΓΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (ΚΟΚΚΙΝΟ) ΚΑΙ ΟΡΕΙΧΑΛΚΟ (ΜΠΛΕ)..... | 27 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ CD ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ..... | 71 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ CD ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ..... | 72 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΠΛΕΓΜΑ ΣΕ ΠΛΕΓΜΑ. | 72 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΛΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GIMBAL ΜΕ 0° ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΜΕ ΤΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΚΑΜΕΡΕΣ ΝΑ ΚΟΙΤΟΥΝΕ ΜΠΡΟΣΤΑ. | 80 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΛΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GIMBAL ΜΕ 0° ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΜΕ ΤΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΚΑΜΕΡΕΣ ΝΑ ΚΟΙΤΟΥΝΕ ΜΠΡΟΣΤΑ. | 80 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΣΗΜΕΙΟ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΗΝ ΜΗ-ΠΡΟΣΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GIMBAL ΣΤΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ. | 81 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΜΦΥΤΕΥΜΑ ΧΑΛΚΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GIMBAL..... | 85 |

5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

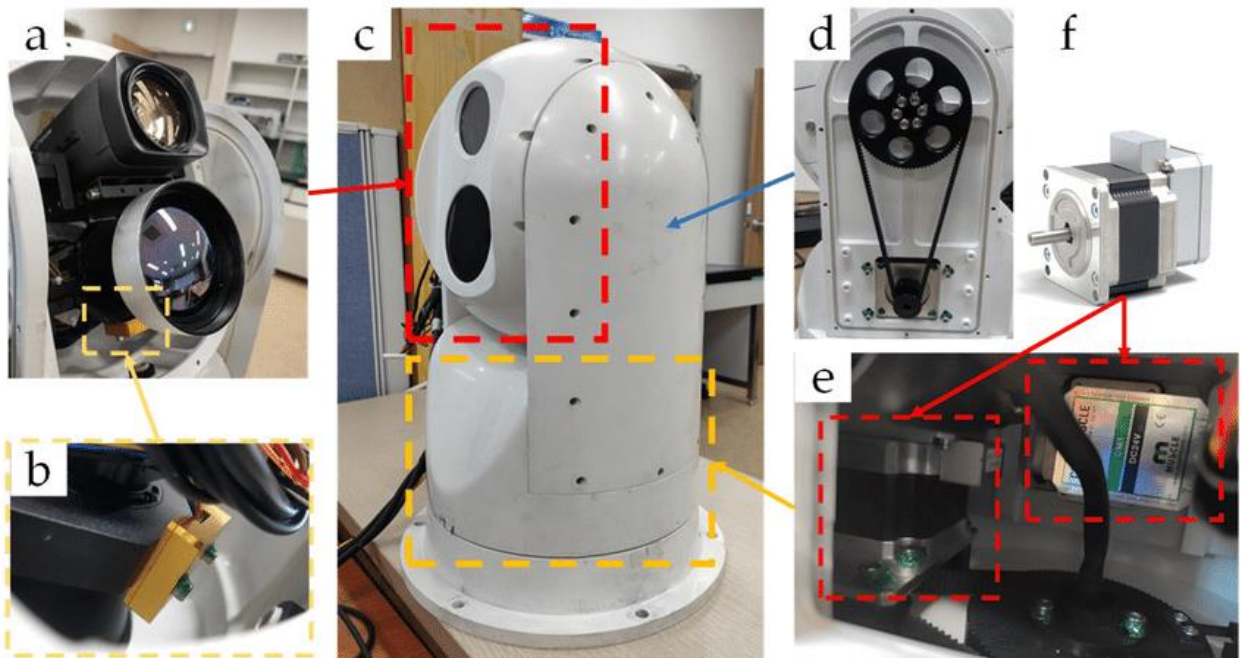
Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) έχουν γίνει όλο και πιο δημοφιλή τα τελευταία χρόνια για διάφορες εφαρμογές, όπως στρατιωτικές επιχειρήσεις, τοπογραφικές εργασίες και επιθεώρηση. Ένα κρίσιμο στοιχείο των UAV είναι το σύστημα gimbal, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη σταθεροποίηση της κάμερας ή άλλου ωφέλιμου φορτίου κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα συστήματα gimbal πρέπει να είναι ελαφριά, στιβαρά και ικανά να αντέχουν σε σκληρά περιβάλλοντα, ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία τους.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, χρησιμοποιούνται τεχνολογίες αιχμής, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση με ενισχυμένα θερμοπλαστικά και πολύ-μεταλλικά υλικά, η DFM σχεδίαση και ανασχεδίαση για φρέζες CNC 5 αξόνων, για να δημιουργηθεί ένας σχεδιασμός συστήματος gimbal που είναι όχι μόνο είναι εξαιρετικά αποδοτικός, αλλά και δομοστοιχειωτός και προσαρμόσιμος σε διαφορετικές διατάξεις και πλατφόρμες. Ο τελικός σχεδιασμός είναι βελτιστοποιημένος για χαμηλό βάρος, συμπαγές μέγεθος και στιβαρότητα, ενώ πληροί ή ξεπερνά τα στρατιωτικά πρότυπα.

Το υπόλοιπο της παρούσας διατριβής οργανώνεται ως εξής σύμφωνα με τις φάσεις που διέπουν ένα προϊόν παραγωγής στην διαδικασία RnD (Έρευνας και Ανάπτυξης). Στο Κεφάλαιο II παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των υφιστάμενων σχεδίων συστημάτων gimbal και των περιορισμών τους, καθώς και των τρεχουσών τάσεων στη σχεδίαση συστημάτων gimbal και στις τεχνικές ολοκλήρωσης. Το κεφάλαιο III περιγράφει λεπτομερώς τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένης της περιγραφής των εργαλείων λογισμικού και των αλγορίθμων, που αναπτύχθηκαν. Στο κεφάλαιο IV παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τελικού σχεδιασμού του πρωτοτύπου, συμπεριλαμβανομένης μιας λεπτομερούς ανάλυσης και σύγκρισης με τις υπάρχουσες κατασκευές. Το Κεφάλαιο V ολοκληρώνει τη διατριβή και περιγράφει τις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και τους πιθανούς τομείς βελτίωσης.

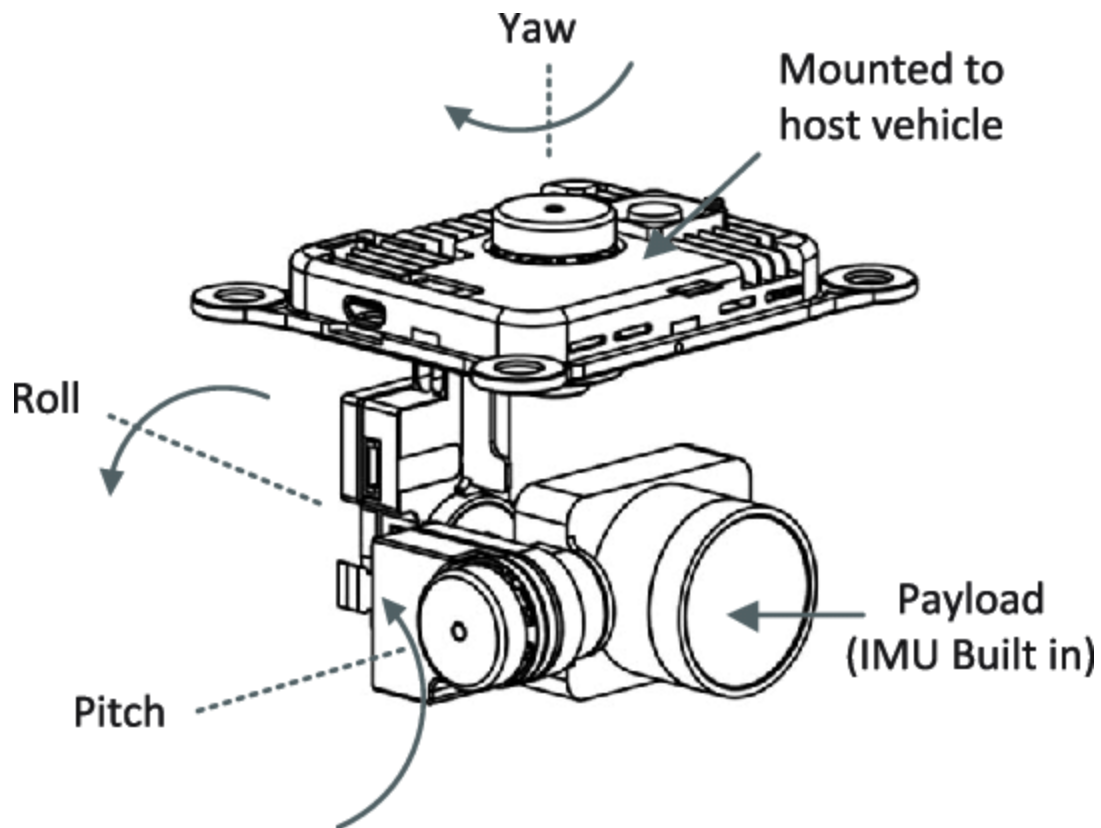
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα συστήματα καρντάνου έχουν μακρόχρονη ιστορία, η οποία χρονολογείται από την αρχαιότητα, αλλά τα σύγχρονα συστήματα καρντάνου έχουν γίνει όλο και πιο εξελιγμένα και αποτελούν κρίσιμα εξαρτήματα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Τα συστήματα αρθρωτού άξονα μπορούν να ταξινομηθούν σε γενικές γραμμές σε δύο κατηγορίες: αρθρωτά συστήματα δύο αξόνων και αρθρωτά συστήματα τριών αξόνων. Τα αρθρωτά συστήματα δύο αξόνων είναι απλούστερα και φθηνότερα, αλλά είναι περιορισμένα ως προς την ικανότητά τους να σταθεροποιούν το ωφέλιμο φορτίο.



Εικόνα 1: Η συσκευή συστήματος αντίζυγου 2 αξόνων. a) σύνολο φωτογραφικών μηχανών· b) AHRS· c) συνολική εικόνα του συστήματος· d) μηχανισμός μίαντα και τροχαλίας· (e, f) Ενεργοποιητές. (1)

Τα αρθρωτά συστήματα τριών αξόνων προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα, αλλά είναι πιο πολύπλοκα και ακριβά.



Εικόνα 2: Σχηματικές παραστάσεις ενός συστήματος αντίζυγου 3 αξόνων (Ευγενική προσφορά του DJI) (2)

Η ενσωμάτωση του ωφέλιμου φορτίου και των συστημάτων ψύξης είναι μία από τις κύριες δυσκολίες στο σχεδιασμό συστημάτων αρθρωτού άξονα. Εάν δεν ελέγχεται σωστά, η θερμότητα που παράγεται από τα συστήματα ωφέλιμου φορτίου μπορεί να βλάψει το αρθρωτό σύστημα και το ωφέλιμο φορτίο. Για την απαγωγή αυτής της θερμότητας και τη διατήρηση της μέγιστης απόδοσης, τα συστήματα ψύξης είναι ζωτικής σημασίας. Λόγω της ανάγκης μείωσης του βάρους και του μεγέθους με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της απόδοσης της ψύξης, η ενσωμάτωση του συστήματος ψύξης στο σχεδιασμό του συστήματος gimbal μπορεί να είναι δύσκολη.

Η χρήση ελαφρών υλικών, όπως τα ανθρακονήματα και το αλουμίνιο, καθώς και η ενσωμάτωση εργαλείων λογισμικού αιχμής και αλγορίθμων βελτιστοποίησης αποτελούν τις τρέχουσες τάσεις στον σχεδιασμό και τις τεχνικές ενσωμάτωσης του συστήματος gimbal. Επιπλέον, οι σχεδιασμοί που είναι εύκολα προσαρμόσιμοι και αρθρωτοί για διάφορες εφαρμογές λαμβάνουν μεγαλύτερη προσοχή. Ο σχεδιασμός

των συστημάτων gimbal παρουσιάζει επίσης αύξηση στη χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης τοπολογίας και γεννητικού σχεδιασμού, οι οποίοι επιτρέπουν την ανάπτυξη βελτιστοποιημένων σχεδίων που μεγιστοποιούν τις επιδόσεις, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το βάρος και τη χρήση υλικών.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια επισκόπηση των σημερινών σχεδίων συστημάτων gimbal, των μειονεκτημάτων τους και των τεχνικών ολοκλήρωσης, καθώς και των πρόσφατων εξελίξεων σε αυτούς τους τομείς. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία σχεδιασμού, καθώς και τα εργαλεία λογισμικού και οι αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν. Θα καλυφθούν λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο η διαδικασία σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων των εργαλείων λογισμικού και των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν.

7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τη διαδικασία που χρησιμοποιήσαμε για να δημιουργήσουμε το σύστημα UAV gimbal. Δεν επρόκειτο για μια στρατηγική ενός μεγέθους που ταιριάζει σε όλους, επειδή έπρεπε να λάβουμε υπόψη τις πολλές απαιτήσεις του UAV, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων κραδασμών, των περιβαλλοντικών παραγόντων και των περιορισμών βάρους. Στόχος μας ήταν να παράγουμε έναν σχεδιασμό που δεν ήταν μόνο πρωτοποριακός αλλά και εξαιρετικά αποτελεσματικός.

Κάναμε μια διεξοδική ανάλυση των απαιτήσεων και των περιορισμών του UAV ως πρώτο βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού μας. Στη συνέχεια, δημιουργήσαμε έναν κατάλογο στόχων που επιδιώκαμε να επιτύχουμε, όπως η ανθεκτικότητα, η συμπαγής κατασκευή και το μικρό βάρος. Ο στόχος ήταν να διασφαλίσουμε ότι ο τελικός σχεδιασμός ήταν τόσο εφευρετικός όσο και σύμφωνος με αυτές τις προδιαγραφές.

Το επόμενο βήμα μας ήταν ο εννοιολογικός σχεδιασμός καθώς και η αρχή της πρώτης φάσης του RnD (conceptual design). Χρησιμοποιώντας εργαλεία σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), δημιουργήσαμε σκίτσα και τρισδιάστατα μοντέλα αφού πραγματοποιήσαμε συνεδρίες καταιγισμού ιδεών και ιδεοληψίας. Ένας σχεδιασμός που θα ήταν ταυτόχρονα ελκυστικός και χρήσιμος ήταν αυτό που θέσαμε ως στόχο.

Χρησιμοποιώντας το υπερσύγχρονο λογισμικό ANSYS αλλά και το ίδιο λογισμικό σχεδίασης (Solidworks) καθώς παρέχει δυνατότητες FEA αναλύσεων, πραγματοποιήσαμε μια σειρά προσομοιώσεων και αναλύσεων για να δοκιμάσουμε και να βελτιώσουμε το σχεδιασμό μας. Οι δοκιμές αυτές περιλάμβαναν, μεταξύ άλλων, θερμική, δομική και ρευστοδυναμική ανάλυση. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων μας επέτρεψαν να βελτιώσουμε τον σχεδιασμό μας και να μειώσουμε το βάρος, αυξάνοντας παράλληλα τις επιδόσεις.

Το σύστημα gimbal μας, το οποίο περιλαμβάνει το ωφέλιμο φορτίο και τα συστήματα ψύξης, μοντελοποιήθηκε σχολαστικά σε 3D με το πρόγραμμα SolidWorks μετά την ολοκλήρωση του εννοιολογικού σχεδιασμού. Για να δημιουργήσουμε σχέδια που ήταν βελτιστοποιημένα ως προς το βάρος και τις

επιδόσεις, χρησιμοποιήσαμε επίσης αλγόριθμους βελτιστοποίησης τοπολογίας και γεννητικού σχεδιασμού. Αυτό ορίστηκε σαν η δεύτερη φάση του RnD (Detailed Design)

Στη συνέχεια, τέθηκε στο επίκεντρο η κατασκευή και η γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων. Βελτιώσαμε τη διαδικασία κατασκευής προκειμένου να επιτύχουμε αυτόν τον στόχο, εφαρμόζοντας τις αρχές του σχεδιασμού για κατασκευασιμότητα (DFM). Για τη δημιουργία πρωτοτύπων χρησιμοποιήσαμε προηγμένα ενισχυμένα θερμοπλαστικά και πολυμεταλλικά υλικά, καθώς και μηχανή φρεζαρίσματος 5 αξόνων CNC και τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Τέλος, όπως ορίζει και η τρίτη φάση ενός έργου σε RnD (Prototype Design) δημιουργήθηκε ένα πρωτότυπο για πειραματισμό συλλογή δεδομένων, αλλά και πιθανό troubleshooting για το τελικό προϊόν. Πραγματοποιήσαμε μια σειρά αυστηρών δοκιμών, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών κραδασμών, θερμικών δοκιμών και δοκιμών κρούσης, σύμφωνα με τις αποδεκτές μηχανικές και επιστημονικές διαδικασίες, για να βεβαιωθούμε ότι το τελικό μας πρωτότυπο ήταν στο ύψος των περιστάσεων. Οποιαδήποτε προβλήματα διορθώθηκαν και το τελικό αποτέλεσμα ήταν ένα τελικό πρωτότυπο που ήμασταν σίγουροι ότι ικανοποιούσε τις απαιτήσεις μας.

Συνολικά, χρησιμοποιήσαμε μια μεθοδολογία RnD που συνδύαζε το πιο σύγχρονο λογισμικό με δοκιμασμένες αρχές μηχανικής για να αναπτύξουμε έναν μοναδικό και βελτιστοποιημένο σχεδιασμό συστήματος αρθρωτού άξονα Καρντάνο που ταίριαζε σε ένα UAV. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί συζητάμε τα πιο αναλυτικά την πορεία μας στο έργο αυτό.

7.1 ΦΑΣΗ ΈΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ 1: ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Η πρώτη φάση της έρευνας και ανάπτυξης (R&D) για το σύστημα gimbal UAV ήταν ο εννοιολογικός σχεδιασμός. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, εστίασαμε στην ανάπτυξη μιας γενικής προσέγγισης για τον σχεδιασμό ενός συστήματος gimbal που θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις απαιτούμενες επιδόσεις. Θεωρήσαμε μια ποικιλία παραγόντων, όπως το μέγεθος και το βάρος του UAV, το είδος του

ωφέλιμου φορτίου που θα στερεώνουμε και τις απαιτούμενες επιδόσεις. Ως αποτέλεσμα των σκέψεων μας, αναπτύξαμε μια προσέγγιση που βασίζεται σε μια δομή από συνθετικά υλικά και ένα σύστημα κινητήρων που χρησιμοποιεί direct drive moter για κάθε άξονα. Αυτή η προσέγγιση μας έδωσε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα σύστημα gimbal που ήταν ελαφρύ, ισχυρό και αποτελεσματικό.

Ακολουθούν τα κύρια βήματα της διαδικασίας σχεδιασμού που ακολουθήθηκαν κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης της έρευνας και ανάπτυξης:

1. **Ταυτοποίηση των απαιτήσεων:** Το πρώτο βήμα ήταν να προσδιορίσουμε τις απαιτήσεις του συστήματος gimbal. Αυτό περιελάμβανε την εξέταση παραγόντων όπως το μέγεθος και το βάρος του UAV, το είδος του ωφέλιμου φορτίου που θα στερεώνουμε και τις απαιτούμενες επιδόσεις. Οι κύριες απαιτήσεις του συστήματος gimbal ήταν:
 - Να είναι ελαφρύ (κάτω από 4 κιλά)
 - Να είναι στιβαρό (ακρίβεια 10 μ m στα 3G)
 - Να είναι αποτελεσματικό σε κάθε περιβάλλον (IP67)
 - Να μπορεί να υποστηρίξει ένα ωφέλιμο φορτίο που αποτελείται από μια κανονική κάμερα ημέρας, μια θερμική κάμερα και έναν laser range finder
2. **Έρευνα και ανάλυση:** Το επόμενο βήμα ήταν να πραγματοποιήσουμε έρευνα και ανάλυση για να εντοπίσουμε τις διαθέσιμες επιλογές σχεδιασμού. Αυτό περιελάμβανε τη μελέτη των υπάρχων συστημάτων gimbal και την εξέταση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων κάθε επιλογής. Οι κύριες επιλογές σχεδιασμού που εξετάστηκαν ήταν:
 - Χρήση ιμάντων
 - Χρήση direct drive moter
 - Χρήση αρμονικού συστήματος μετάδοσης
 - Χρήση πλανητικού συστήματος μετάδοσης

Η επιλογή του συστήματος μετάδοσης ήταν σημαντική, καθώς θα επηρεάσει το βάρος, την ισχύ, την απόδοση του συστήματος καθώς θα επηρεάσει τον όγκο του συστήματος gimbal. Ο ιμάντας είναι η πιο ελαφριά επιλογή, αλλά δεν είναι τόσο ισχυρός όσο ο κινητήρας direct drive.

| System | Torque | Accuracy | Weight | Volume | Torque/Volume | Overall |
|--------------|--------|----------|--------|--------|---------------|---------|
| Belt Drive | +++ | ++ | ++ | + | ++ | ++ |
| Planetary | ++++ | ++++ | +++ | ++++ | ++++ | ++++ |
| Harmonic | +++++ | +++++ | +++ | +++++ | +++++ | ++++ |
| Direct Drive | +++ | +++++ | +++++ | +++++ | +++++ | +++++ |

Πίνακας 1: Matrix πλεονεκτημάτων κινηματικής αλυσίδας

Ο κινητήρας direct drive είναι πιο ισχυρός από τον κινητήρα ιμάντα, αλλά είναι επίσης πιο βαρύς.

Το αρμονικό σύστημα μετάδοσης είναι μια ενδιάμεση επιλογή μεταξύ του ιμάντα και του κινητήρα direct drive. Είναι ισχυρότερο από τον ιμάντα και ελαφρύτερο από τον κινητήρα direct drive, αλλά είναι επίσης πιο ακριβό.

Το πλανητικό σύστημα μετάδοσης είναι η ισχυρότερη επιλογή, αλλά είναι επίσης το βαρύτερο και το πιο ακριβό.

Τελικά, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την κίνηση με direct drive caseless μοτέρ, ώστε να μειώσουμε το βάρος όσο γίνεται αλλά και τον όγκο, διατηρώντας την ακρίβεια και την απόκριση του συστήματος καθώς το περίβλημα του μοτέρ θα είναι το ίδιο το κέλυφος του gimbal.

3. **Σχεδιασμός λεπτομερειών:** Το τρίτο βήμα ήταν να σχεδιάσουμε λεπτομερώς το σύστημα gimbal. Αυτό περιλάμβανε τον προσδιορισμό των υλικών, των εξαρτημάτων και της διαδικασίας κατασκευής που θα χρησιμοποιηθούν. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Συνθετικά υλικά
- Αλουμίνιο
- Τιτάνιο
- Θερμοπλαστικά
- Φυσικό λάστιχο

- Ατσάλι

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν για εξαρτήματα που η ακρίβεια των ανοχών είναι μικρότερης σημασίας, αλλά η χρησιμότητα του χαμηλού λόγου βάρους προς στιβαρότητα που προσφέρουν τα καθιστά ιδανικά για τεμάχια όπως το κέλυφος.

Τα κράματα αλουμινίου και τιτανίου χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις κύριες κατασκευές που χρειάζονται η ακρίβεια ανοχών και στιβαρότητα που προϋποθέτει ισοτροπικότητα. Για την ελαχιστοποίηση του βάρους θα υιοθετήσουμε τεχνικές αφαιρέσεις υλικού με βάση αναλύσεων.

Τα θερμοπλαστικά χρησιμοποιήθηκαν για μικρά τεμάχια που κυρίως είναι μίας χρήσης για το καλιμπράρισμα των θέσεων του φορτίου. Η φθηνή τους κατασκευή και η μεγαλύτερη ελαστική περιοχή τα καθιστά για εξαρτήματα μικρής αντοχής και παρελκόμενα τεμάχια λίγων χρήσεων.

Το φυσικό λάστιχο χρησιμοποιήθηκε σε αποσβεστήρες για την απομόνωση του φορτίου από κραδασμούς. Τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι δυνάμεις να αναγκάζουν την θλίψη των αποσβεστήρων, διότι μόνο τότε είναι πιο αποτελεσματικοί.

Ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιήθηκε κυρίως για κοχλίες, ένθετα και κατασκευαστικούς συνδέσμους κυρίως για την τιμή του και κατεργασιμότητα του. Δεν χρησιμοποιήθηκε εκτενώς λόγω του τεράστιου βάρους που το καθορίζει.

8 ΦΑΣΗ ΈΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ 2: ΦΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ

Η φάση 2 της διαδικασίας έρευνας και ανάπτυξης ("R&D") αφορά τον ειδικό σχεδιασμό του συστήματος UAV με αρθρωτό άξονα, με βάση τον βασικό εννοιολογικό σχεδιασμό της φάσης 1. Η φάση αυτή επικεντρώνεται στην εμβάθυνση της επιλεγμένης στρατηγικής, στη μετατροπή των εννοιών σε πραγματικά εξαρτήματα και στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης βάσης για τη δημιουργία του συστήματος.

8.1.1 Αρχιτεκτονική συστήματος και στοιχεία

Κατά τη φάση αυτή, η επιλεγμένη τεχνική της χρήσης μοτέρ άμεσης κίνησης (direct drive motors) για την κίνηση και συνθετικών υλικών για την κατασκευή αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του σχεδιασμού.

Τα μοτέρ άμεσης κίνησης παρέχουν αυξημένη ισχύ και αποδοτικότητα, η οποία ευθυγραμμίζεται με την απαίτηση του συστήματος για αντοχή και αποτελεσματικότητα. Τα συγκεκριμένα μοτέρ άμεσης κίνησης παρέχουν ισχυρή ροπή απευθείας στους άξονες του gimbal, εξαλείφοντας την ανάγκη για επιπλέον μέρη μετάδοσης. Αυτή η άμεση μεταφορά ισχύος βελτιώνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος και την ακρίβεια στη σταθεροποίηση της στάσης του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Επιπλέον, τα συνθετικά υλικά επιλέγονται μετά από ενδελεχή εξέταση του βάρους και των ιδιοτήτων ανθεκτικότητάς τους. Τα σύνθετα υλικά και τα ελαφριά πλαστικά έχουν βρεθεί ως αποδεκτές επιλογές, που εγγυώνται μια ισορροπία μεταξύ της μείωσης του βάρους και της ικανότητας να αντέχουν τα φορτία και τις τάσεις λειτουργίας. Συνδυάζοντας τα συνθετικά καλύμματα, μεταλλικές φλάντζες και τα μοτέρ χωρίς περίβλημα έχουμε ένα σύστημα που ενσωματώνει ολόκληρο τον μηχανισμό σε ένα όσο το δυνατόν λεπτότερο προφίλ.

Κατά την διάρκεια του σχεδιασμού δόθηκαν χρωματολογική κατηγοριοποίηση για να ξεχωρίζουν τα τεμάχια μέσα στην κατασκευή. Με πορτοκαλί παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά συστήματα όπως τα μοτέρ. Με κόκκινο έχουμε την εσωτερική και εξωτερική φλάντζα κρίσιμη για την στεγανότητα, αλλά και την στήριξη του φορτίου. Με πράσινο στις άκρες απεικονίζονται τα encoders που είναι υπεύθυνα για την κίνηση των μοτέρ, αλλά και φλάντζες που τα συγκρατούν. Επίσης με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι βάσεις συγκράτησης που έχουν υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση. Με μπλε έχουμε το κέλυφος κατασκευασμένο σε 3D εκτυπωτή με συνθετικό υλικό. Με μαύρο έχουμε τον μεταλλικό είτε από τιτάνιο ή αλουμίνιο 7^{ης} σειράς για τον σκελετό του συστήματος. Τέλος έχουμε το ροζ

εξάρτημα που είναι το εξωτερικό περίβλημα που θα αποτελείται από τρισδιάστατο εκτυπωμένο υλικό ή χυτό πλαστικό ανάλογα με την απαίτηση παραγωγής.

Χρησιμοποιήσαμε τις μεταλλικές φλάντζες για να πετύχουμε τις ανοχές, αλλά και να μην καταπονηθούν τα πλαστικά συνθετικά κατά την μεταφορά ροπής και τάσεων. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε κενά ανάμεσα στις φλάντζες. Αυτό έγινε για να τοποθετηθούν O-Rings για την στεγανότητα της κατασκευής κατά την τελική του συναρμολόγηση.

8.1.2 Επιλογή υλικών και εξαρτημάτων

Για να διασφαλιστεί η λειτουργία και η διάρκεια ζωής του συστήματος, χρησιμοποιούνται προσεκτικά επιλεγμένα υλικά και εξαρτήματα. Για δομικά μέρη που απαιτούν ταυτόχρονα αντοχή και μειωμένο όγκο, χρησιμοποιείται συχνά αλουμίνιο, το οποίο είναι αναγνωρισμένο για τα ελαφριά χαρακτηριστικά του και την αντοχή του στη διάβρωση.

Το πλαίσιο και τα υποστηρικτικά εξαρτήματα του gimbal είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, γεγονός που αυξάνει την ευελιξία και την οικονομία καυσίμου του UAV.

Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας που παράγεται κατά τη λειτουργία από τα μοτέρ άμεσης κίνησης.

Η συνετή χρήση τιτανίου βελτιώνει τη μακροζωία του συστήματος σε καταστάσεις που απαιτούν υψηλότερες αναλογίες αντοχής προς βάρος. Οι βάσεις ωφέλιμου φορτίου και οι συγκεκριμένες αρθρώσεις είναι δύο παραδείγματα εξαρτημάτων που επωφελούνται από τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά αντοχής του τιτανίου.

Η δομική ακεραιότητα του συστήματος ενισχύεται και η διάρκεια ζωής λειτουργίας του αυξάνεται με αυτή την προσεκτική χρήση των υλικών.



Εικόνα 3: Τοπολογική βελτιστοποιημένη βάση για 5-αξονική μηχανή CNC.

Για πιο περίπλοκα σχέδια που ήταν τοπολογικά βελτιστοποιημένα, το τιτάνιο είτε εκτυπώθηκε τρισδιάστατα είτε χρησιμοποιήθηκε ως τεμάχιο σε μηχανές φρεζαρίσματος CNC, εφόσον αυτό ήταν εφικτό.

8.1.3 Ενσωμάτωση υποστήριξης ωφέλιμου φορτίου

Η ενσωμάτωση πολλαπλών ωφέλιμων φορτίων που αναμένεται να υποστηρίξει το αρθρωτό σύστημα είναι ένα άλλο θέμα που καλύπτεται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

Για να επιτευχθεί άψογη απόδοση, το απαραίτητο ωφέλιμο φορτίο, το οποίο περιλαμβάνει μια συμβατική κάμερα ημέρας, μια θερμική κάμερα και έναν αποστασιόμετρο λέιζερ, απαιτεί μηχανική ακρίβεια. Για να διατηρηθεί η σταθερότητα του gimbal κατά τη διάρκεια ελιγμών και να επιτευχθεί η ιδανική κατανομή βάρους, κάθε ωφέλιμο φορτίο τοποθετείται προσεκτικά μέσα στο σύστημα. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη αλγορίθμου σε VBA για την εύρεση της

βέλτιστης τοποθέτησης των ωφέλιμων φορτίων. Παρατεθείτε παρακάτω ο αλγόριθμος:

```
1. Dim swApp As Object

Dim swModel As Object

Dim swSelMgr As Object

Dim swAssy As Object

Dim swComp As Object

Dim swInterference As Object

Dim retryCount As Integer

Sub Main()

    ' Initialize SolidWorks application

    Set swApp = CreateObject("SldWorks.Application")

    ' Open the assembly

    Dim fileName As String

    fileName = "C:\path_to_your_file\your_file_name.sldasm"

    Set swModel = swApp.OpenDoc6(fileName, 2, 0, "", 0, 0)

    Set swSelMgr = swModel.SelectionManager

    Set swAssy = swModel

    ' Optimize arrangement and check for interferences

    Dim success As Boolean

    success = False

    retryCount = 0

    Do While Not success And retryCount < 3

        ' Adjust positions slightly and optimize
```

```
    OptimizeArrangement

    ' Check interference

    success = CheckInterference()

    retryCount = retryCount + 1

Loop

If Not success Then

    MsgBox "Failed to optimize arrangement after 3 retries"

End If

End Sub

Sub OptimizeArrangement()

    Dim vComps As Variant

    Dim x As Double, y As Double, z As Double

    ' Get all components

    vComps = swAssy.GetComponents(False)

    ' Assuming the thermal camera is the first component and is our reference

    Set swComp = vComps(0)

    ' Get the position of the thermal camera

    x = swComp.GetTransform.TranslationX

    y = swComp.GetTransform.TranslationY

    z = swComp.GetTransform.TranslationZ

    ' Position the LRF relative to the thermal camera
```



```

Set swComp = vComps(2) ' Assuming the LRF is the third component

SetTransform swComp, x + 10, y, z ' 10 units to the right of the thermal camera

' Position the second camera relative to the thermal camera

Set swComp = vComps(1)

SetTransform swComp, x - 10, y, z ' 10 units to the left of the thermal camera

End Sub

Function CheckInterference() As Boolean

' Check for interference

Dim swInterference As Object

Set swInterference = swModel.Extension.RunInterferenceCheck(2, "", "")

If swInterference Is Nothing Then

    CheckInterference = False

Else

    Dim nCount As Integer

    nCount = swInterference.GetInterferenceCount

    If nCount > 0 Then

        CheckInterference = False

    Else

        CheckInterference = True

    End If

End If

End Function

Sub SetTransform(swComp As Object, x As Double, y As Double, z As Double)

Dim swMathUtil As Object

```

```

Dim swTransform As Object

Dim swMathPt As Object

Dim swMathMatrix As Object

' Get the math utility

Set swMathUtil = swApp.GetMathUtility

' Create a translation vector

Set swMathPt = swMathUtil.CreatePoint(Array(x, y, z))

' Create an identity matrix for orientation (no rotation)

Set swMathMatrix = swMathUtil.CreateIdentityMatrix

swMathMatrix.Translate swMathPt

' Set the transform

Set swTransform = swComp.Transform2

swTransform.Multiply swMathMatrix

swComp.Transform2 = swTransform

End Sub

```

Αυτή η δέσμη ενεργειών έχει σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση της διάταξης των εξαρτημάτων μέσα σε ένα συγκρότημα SolidWorks. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η τοποθέτηση δύο καμερών και ενός LRF (Laser Range Finder) μέσα σε ένα οριοθετημένο πλαίσιο, διασφαλίζοντας ότι όλα κοιτούν προς την ίδια κατεύθυνση και δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Για περισσότερη βιβλιογραφία σχετικά με τον κώδικα μπορείτε να ανατρέξετε στο [Παράρτημα 1](#)

Για την καταπολέμηση των κινήσεων που προκαλούνται από τη δυναμική της πτήσης του UAV και τις εξωτερικές επιδράσεις, δημιουργούνται διατάξεις σταθεροποίησης. Επιπλέον, ενσωματώσαμε μικρούς μηχανισμούς για μικρό-

διορθώσεις, ώστε να αποφύγουμε τις ανοχές της αστοχίας κατά την παραγωγή των τεμαχίων, οι οποίες είναι αναπόφευκτες.

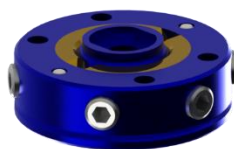
Ο πρωταρχικός μηχανισμός ήταν μία πρόιμη ιδέα στην αναλογική κίνηση και ασφάλιση του φορτίου με σύστημα ράγας τύπου Dovetail (χελιδονοουράς) για την αρχική ενσωμάτωση και ρυθμιστικών σύσφιξης για την περιστροφή στον οριζόντιο κάθετο άξονα (tilt) και σύστημα bayonet για την περιστροφή στον κάθετο άξονα (pan).



Εικόνα 4: Σύστημα bayonet για κλείδωμα στο pan

Το πρόβλημα σε αυτό τον μηχανισμό ήταν ο εξαιρετικός του όγκος και η περιπλοκότητα στην κατασκευή.

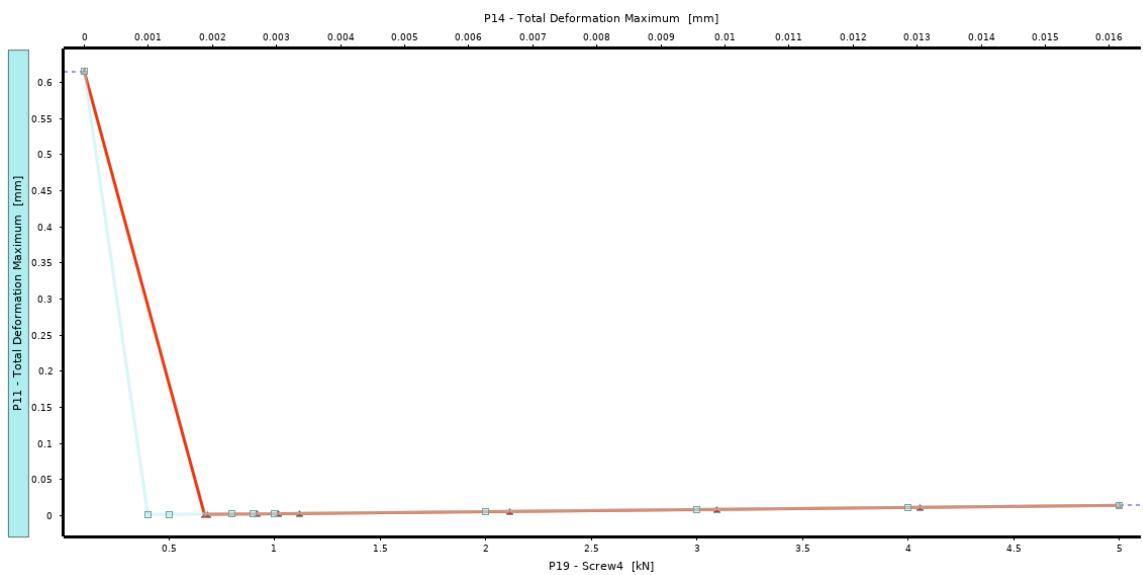
Έτσι χρησιμοποιήσαμε έναν υπάρχον μηχανισμό, που είχε δημιουργηθεί για προηγούμενο project.



Εικόνα 5: Μηχανισμός ball clutch

Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμοποιεί την τριβή που δημιουργείται ανάμεσα στα ορειχάλκινα ημι-δακτύλια στην κεντρική σφαίρα για την συγκράτηση του όταν ρυθμιστεί στην σωστή θέση. Ο μηχανισμός είναι πλήρως αναλογικός και δίνει ελευθερία σε δύο κινήσεις και μία περιστροφή.

Κάναμε μία ανάλυση συσφίξεων για να συμπεράνουμε το τελικό υλικό των δακτυλιδιών. Όπως φαίνεται και παρακάτω κρατήσαμε τον ορείχαλκο για την δυνατότητα συγκράτησης σε πιο μικρές δυνάμεις.

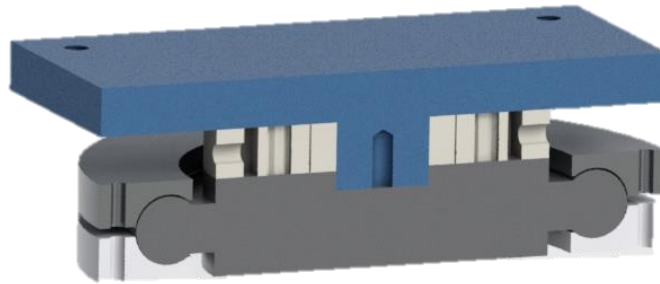


Πίνακας 2: Διάγραμμα μετατόπισης της κεντρικής σφαίρας σε συνάρτηση με την σύσφιξη των περιμετρικών κοχλίων για αλουμίνιο (κόκκινο) και ορείχαλκο (μπλε).

Αρχικά θέλαμε να κρατήσουμε την φιλοσοφία της σπονδυλωτής μορφή (modularity) του συστήματος. Για αυτό κρατήσαμε την ιδέα με τα Dovetails και ενσωματώθηκε η τοπολογική βελτιστοποιημένη βάση των φορτίων.

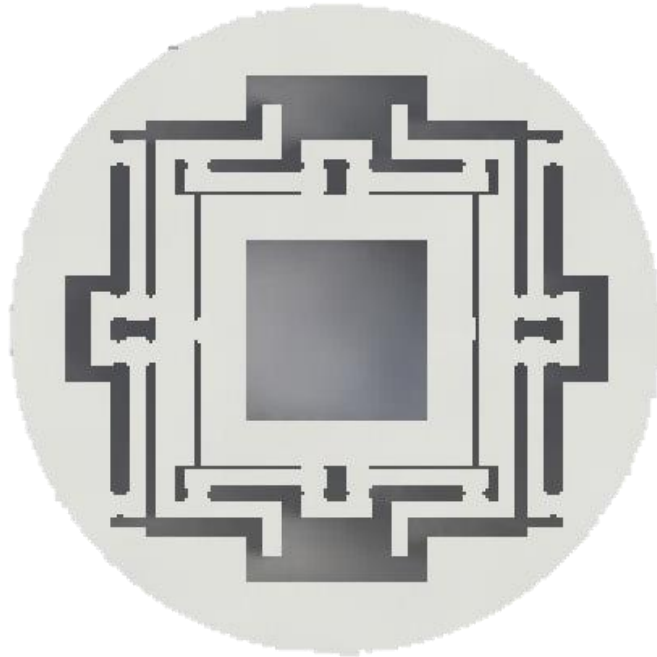
Η ίδια φιλοσοφία διατηρήθηκε και στην θερμικό πακέτο.

Εδώ τα ρυθμιστικά έπρεπε να σχεδιαστούν από την αρχή. Έτσι για την αποφυγή του όγκου δημιουργήθηκαν συμμορφούμενοι μηχανισμοί (compliant). Που τοποθετιόντουσαν στο κάτω μέρος του αισθητήρα για την σωστή ευθυγράμμιση του φακού.



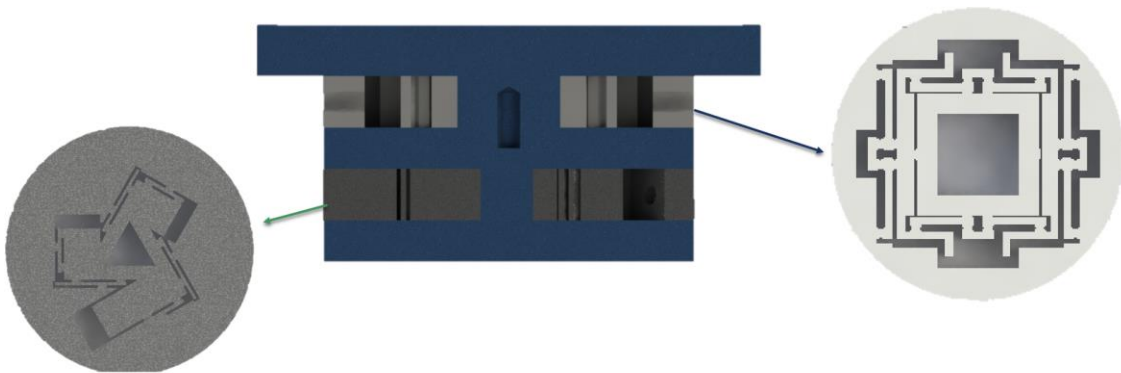
Εικόνα 6: Μηχανισμός συμμόρφωσης σε περιστρεφόμενη βάση

Παρατηρούμε ότι ο μηχανισμός συμμόρφωσης είναι στο κέντρο με την πλάκα πρόσδεσής από πάνω και την πλάκα περιστροφής από κάτω. Η πλάκα περιστροφής λειτουργεί με την ίδια φιλοσοφία όπως ball clutch μηχανισμός. Η λογική του μηχανισμού συμμόρφωσης είναι να φέρει στην σωστή θέση το σύστημα και έπειτα να γίνει σύσφιξη για την πρόσδεση του. Τότε ο μηχανισμός έχει ολοκληρώσει την λειτουργία του. Για αυτό κατασκευάζονται με τρισδιάστατο εκτυπωτή και συνθετικό υλικό.



Εικόνα 7: Μηχανισμός συμμόρφωσης

Για μείωση του όγκου ανασχεδιάστηκε το σύστημα περιστροφής και υιοθετήθηκε και σχεδιάστηκε ένας νέος μηχανισμός συμμόρφωσης για την επίτευξη της περιστροφής.



Εικόνα 8: Μηχανισμός μικρό-ρύθμισης δύο συμμορφούμενων μηχανισμών.

Για την κίνηση στο επίπεδο διατηρήθηκε ο ήδη υπάρχον μηχανισμός ενώ για την περιστροφική κίνηση δημιουργήθηκε καινούργιος μηχανισμός.

Ενώ αυτός ο μηχανισμός ήταν ο πιο μικρός που θα μπορούσε να υπάρξει με διάμετρο μόλις 36mm και πάχος λιγότερο από 50mm δεν προτιμήθηκε για δύο λόγους:

- Δεν υπήρχαν βιβλιογραφικές αναφορές ,πειράματα ή άρθρα σχετικά με μηχανισμό συμμόρφωσης που να προσδίδει μόνο περιστροφή.
- Η δομή του θερμικού πακέτου σε σειρά ήταν ακατόρθωτο να χωρέσει στην μέγεθος που είχε προεπιλεχθεί λόγω του μήκους του συνολικού πακέτου (φακός-αισθητήρας)

Έτσι καταλήξαμε σε έναν γωνιακό φακό που αρχικά ήταν πιο ακριβώς από την παραπάνω λύσεις, αλλά δεν χρειαζόταν μικρό-ρύθμιση και καταπιάνει μικρότερο όγκο.

Τέλος εγκαταλείφθηκε και η ιδέα για την το πακέτο LRF και κάμερας ημέρας για κάτι πιο συμπυκνωμένο καθώς υπήρχαν προβλήματα ύψους και πρόσδεσης στο υπόλοιπο σύστημα. Επίσης, θέλαμε να χωρίσουμε τα δύο πακέτα μεταξύ τους (θερμικό – LRF & Day) καθώς άλλαξαν τα σχεδιαστικά inputs και μπορέσαμε να μετατρέψουμε το ολικό σύστημα από μονό-μπράτσο σε δη-μπράτσο. Έτσι μπορέσαμε να απομονώσουμε κάθε πακέτο για καλύτερη μεταχείριση τυχών κραδασμών.

Οι συσκευές αυτές διασφαλίζουν ότι η οπτική γραμμή της κάμερας είναι σταθερή, επιτρέποντας ακριβείς και καθαρές εικόνες ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες φωτισμού.

Για την προστασία της ακεραιότητας του ευαίσθητου εξοπλισμού, εισάγονται επίσης προσαρμοσμένες βάσεις απορρόφησης κραδασμών για τη μείωση των δονήσεων και των κουνημάτων.

8.1.4 Σχεδιασμός ψύξης

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος gimbal, μία από τις κύριες προκλήσεις ήταν η διαχείριση των θερμικών φορτίων που δημιουργούσε η κάρτα επεξεργασίας. Η πρόκληση αυτή επιδεινώθηκε περαιτέρω από την απαίτηση να διατηρηθεί η αδιάβροχη αξιολόγηση IP67, η οποία περιορίζει τη χρήση παραδοσιακών μεθόδων ψύξης, όπως ανεμιστήρες ή αεραγωγοί.

Μέθοδος ψύξης θαλάμου ατμών

Για να αντιμετωπίσουμε τις θερμικές προκλήσεις, ενσωματώσαμε στο σχεδιασμό μας μια λύση ψύξης με θάλαμο ατμών. Ακολουθεί ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος:

- **Θάλαμοι ατμών (Vapor Chambers):** Πρόκειται για επίπεδους, σφραγισμένους θαλάμους γεμάτους με μικρή ποσότητα υγρού. Όταν η κάρτα επεξεργασίας παράγει θερμότητα, θερμαίνει το υγρό στο εσωτερικό του θαλάμου, μετατρέποντάς το σε ατμό.
- **Διάχυση θερμότητας:** Ο ατμός μετακινείται σε ψυχρότερες περιοχές του θαλάμου, όπου συμπυκνώνεται και πάλι σε υγρό. Αυτή η αλλαγή φάσης απελευθερώνει τη θερμότητα, η οποία στη συνέχεια διαχέεται στο περιβάλλον μέσω των μεταλλικών μπαλωμάτων, κατά προτίμηση από χαλκό λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητάς του.
- **Φυσική διάδοση της θερμότητας:** Ο σχεδιασμός βασίζεται στη φυσική διαδικασία διάδοσης της θερμότητας μέσω του μηχανισμού αλλαγής φάσης, διασφαλίζοντας ότι η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει εντός ασφαλών λειτουργικών ορίων χωρίς να διακυβεύεται η στεγανότητα του συστήματος.

Πλεονεκτήματα του σχεδιασμού

- **Αποδοτική ψύξη:** Οι θάλαμοι ατμών μπορούν να διαδώσουν τη θερμότητα πιο ομοιόμορφα και αποτελεσματικά από ό,τι οι συμπαγείς μεταλλικές πλάκες, καθιστώντας τους ιδανικούς για τη διαχείριση θερμών σημείων.
- **Διατηρεί τη στεγανότητα:** Η στεγανή φύση των θαλάμων ατμών σημαίνει ότι η αξιολόγηση IP67 του συστήματος είναι αδιάβλητη.
- **Μειωμένο πάχος:** Οι θάλαμοι ατμών είναι συχνά λεπτότεροι από τις παραδοσιακές ψήκτρες, επιτρέποντας έναν πιο συμπαγή σχεδιασμό.
- **Απλούστερη χρήση:** Καθώς έχει λιγότερα έως και καθόλου κινούμενα μέρη υπάρχουν λιγότερα σημεία αποτυχίας και απλούστερη εφαρμογή.

Προκλήσεις και περιορισμοί

- **Περιορισμένη ικανότητα ψύξης:** Ενώ οι θάλαμοι ατμών διαχέουν αποτελεσματικά τη θερμότητα, εξακολουθούν να βασίζονται σε εξωτερικές

μεθόδους (όπως τα μεταλλικά επιθέματα) για να διαχέουν αυτή τη θερμότητα στο περιβάλλον.

- **Πολυπλοκότητα σχεδιασμού:** Η ενσωμάτωση των θαλάμων ατμών απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό ώστε να διασφαλιστεί η αποτελεσματική τοποθέτησή τους για την αντιμετώπιση των θερμών σημείων χωρίς να προστεθεί αδικαιολόγητη πολυπλοκότητα ή βάρος.
- **Δυνατότητα διαρροής:** Αν και σπάνια, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος ο θάλαμος ατμών να αναπτύξει διαρροή με την πάροδο του χρόνου, ειδικά υπό ακραίες συνθήκες. Αυτό θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο τόσο την αποτελεσματικότητα της ψύξης όσο και τη στεγανοποίηση της συσκευής.
- **Επιπτώσεις στο κόστος:** Οι θάλαμοι ατμών μπορεί να είναι πιο ακριβοί στην παραγωγή από τις παραδοσιακές μεθόδους ψύξης, επηρεάζοντας ενδεχομένως την τιμή του gimbal.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, τα πλεονεκτήματα της διατήρησης της αδιάβροχης κατηγορίας IP67 και της ταυτόχρονης εξασφάλισης αποτελεσματικής ψύξης καθιστούν το σχέδιο μια βιώσιμη λύση για τις απαιτήσεις του συστήματος gimbal. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να έχουμε επίγνωση αυτών των πιθανών μειονεκτημάτων κατά τη διάρκεια των φάσεων σχεδιασμού, δοκιμών και παραγωγής για τον μετριασμό των κινδύνων και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων.

8.1.5 Εργονομία και διεπαφή χρήστη

Λαμβάνονται υπόψη η διεπαφή χρήστη και η εργονομία του συστήματος UAV με αρθρωτό άξονα. Οι χειριστές μπορούν απλά να ελέγχουν τις πτυχές του προσανατολισμού και του ωφέλιμου φορτίου του gimbal χάρη σε φιλικά προς το χρήστη χειριστήρια και διεπαφές. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και μηχανών είναι απαραίτητη για τον αποτελεσματικό έλεγχο και τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη.

Τα δεδομένα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο, οι οθόνες αφής και οι εύκολοι έλεγχοι αποτελούν μέρος της διεπαφής χρήστη. Μέσω μιας λεπτομερούς γραφικής διεπαφής, οι χειριστές μπορούν να παρακολουθούν τις κρίσιμες μετρήσεις του

UAV, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την ανατροφοδότηση του ωφέλιμου φορτίου. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική επιτρέπει διαμορφώσιμες λειτουργίες ελέγχου, που εξυπηρετούν τόσο άπειρους όσο και έμπειρους πιλότους, και εγγυάται την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των δυνατοτήτων του UAV και των εισροών του χρήστη.

8.1.6 Βελτιστοποίηση βάρους

Η εύρεση μιας ακριβούς ισορροπίας μεταξύ της μείωσης του βάρους και της βελτίωσης των επιδόσεων είναι μια κρίσιμη πτυχή της φάσης σχεδιασμού. Η έξυπνη χρήση ελαφρών υλικών και πρακτικών δομικών σχεδίων συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του βάρους χωρίς να χάνεται η ανθεκτικότητα.

Σημαντικοί στόχοι για τις μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της κατανομής των τάσεων και τον εντοπισμό των περιοχών όπου μπορεί να εξαλειφθεί επιλεκτικά υλικό, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση βάρους χωρίς να διακυβεύεται η δομική ακεραιότητα.

Μια αυστηρή στρατηγική ενσωμάτωσης εξαρτημάτων στοχεύει επίσης στην απομάκρυνση του υπερβολικού βάρους και στην απαλλαγή από τον πλεονασμό. Κάθε γραμμάριο που εξοικονομείται αυξάνει την ικανότητα μεταφοράς φορτίου, την αποδοτικότητα πτήσης και την αντοχή.

Οι επαναληπτικές προσομοιώσεις και τα πρωτότυπα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των προσεγγίσεων βελτιστοποίησης του βάρους, διασφαλίζοντας ότι ο τελικός σχεδιασμός συμμορφώνεται με τους αυστηρούς περιορισμούς βάρους, διατηρώντας παράλληλα τη βέλτιστη απόδοση.

8.1.7 Συνεργασία μεταξύ επιστημονικών κλάδων

Η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ρόλων, καθένας από τους οποίους συνεισφέρει στον τομέα της εξειδίκευσής του για τη δημιουργία του τελικού προϊόντος, είναι απαραίτητη στη φάση του σχεδιασμού. Σε στενή συνεργασία, η μηχανολογική μηχανική, η ανάλυση υλικών, η ανάπτυξη λογισμικού και η εμπειρογνωμοσύνη στην αεροδυναμική μπορούν να εναρμονίσουν τους αντίστοιχους τομείς τους για την παροχή ενός συνολικού σχεδιασμού. Οι τακτικές διεπιστημονικές συναντήσεις και οι ανασκοπήσεις του σχεδιασμού παρέχουν ευκαιρίες για ανταλλαγή πληροφοριών, έγκαιρη ανίχνευση τυχόν συγκρούσεων και ευθυγράμμιση των στόχων.

Οι επαναληπτικοί κύκλοι ανατροφοδότησης επιλύουν τυχόν προβλήματα που προκύπτουν κατά τη φάση του σχεδιασμού και επιτρέπουν τη συνεχή ανάπτυξη. Αυτή η ολοκληρωμένη στρατηγική βελτιώνει την πληρότητα, τη χρησιμότητα και

την ικανότητα προσαρμογής του σχεδιασμού στις μεταβαλλόμενες ανάγκες, οδηγώντας σε ένα ισχυρό και προσαρμόσιμο σύστημα gimbal-UAV.

Εν κατακλείδι, η φάση 2 της διαδικασίας R&D είναι ένα κρίσιμο βήμα στη διαδικασία μετάβασης μιας ιδέας από τη σύλληψη στην υλοποίηση. Η διαδικασία σχεδιασμού ακολουθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, ενσωματώνοντας τεχνικές απαιτήσεις, επιλογές υλικών, ενσωμάτωση ωφέλιμου φορτίου, εργονομικές εκτιμήσεις, τεχνικές εξοικονόμησης βάρους και έννοιες σχεδιασμού με επίκεντρο τον χρήστη. Αυτή η ενδεδειγμένη προετοιμασία ανοίγει το δρόμο για τα επόμενα βήματα, τα οποία τελικά καταλήγουν στη δημιουργία ενός χρήσιμου, υψηλής απόδοσης συστήματος gimbal-UAV.

9 ΦΑΣΗ ΈΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ

Η φάση 3 του ερευνητικού και αναπτυξιακού μας έργου (R&D) αντιπροσωπεύει ένα καίριο σημείο καμπής, καθώς μεταφέρουμε την προσοχή μας από τον σχεδιασμό στις κρίσιμες φάσεις της ανάλυσης και της ανάπτυξης πρωτοτύπων για το σύστημα Gimbal-UAV. Οι εκτεταμένες διαδικασίες δοκιμών, ανάλυσης και βελτιστοποίησης που οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός πλήρως λειτουργικού πρωτοτύπου περιγράφονται λεπτομερώς σε αυτό το κεφάλαιο. Ο σχεδιασμός διαμορφώθηκε για βέλτιστες επιδόσεις και δομική ακεραιότητα μέσω του συνδυασμού αεροδυναμικής ανάλυσης, ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), βελτιστοποίησης τοπολογίας και θερμικής ανάλυσης.

9.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΉ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η κατανόηση της αεροδυναμικής οποιουδήποτε εξαρτήματος, όσο μικρό ή φαινομενικά ασήμαντο και αν είναι, μπορεί να έχει βαθιές επιπτώσεις στο σύνολο του συστήματος στον τομέα της αεροδιαστημικής. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν τα συστήματα gimbal ενσωματώνονται σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV). Ενώ η αεροδυναμική του κύριου σώματος ενός UAV μπορεί να έχει βελτιωθεί μέσω πολλών επαναλήψεων σχεδιασμού, η ενσωμάτωση ενός gimbal προσθέτει ένα εντελώς νέο σύνολο προκλήσεων.

Ένα σύστημα gimbal είναι εξ ορισμού δυναμικό. Λόγω της λειτουργίας του, που είναι ο προσανατολισμός και η σταθεροποίηση αισθητήρων ή καμερών, πρέπει να κινείται ξεχωριστά από την κύρια κίνηση του UAV. Αυτές οι ξεχωριστές κινήσεις, όταν συνδυάζονται με το σχεδιασμό του gimbal, έχουν τη δύναμη να αλλάξουν σημαντικά τα μοτίβα ροής του αέρα γύρω από το UAV. Αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, μειωμένη σταθερότητα πτήσης ή ακόμη και δυσμενείς ταλαντωτικές συμπεριφορές συντονισμού μπορούν να προκληθούν από μια αεροδυναμική διαταραχή που προκαλείται από ένα gimbal.

Εδώ, η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) βρίσκεται στο επίκεντρο. Το υπολογιστικό σύστημα CFD είναι σε θέση να αναλύσει την αεροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του UAV και του gimbal του, δεδομένου ότι είναι ένα εργαλείο εικονικής προτυποποίησης. Είναι εφικτός ο εντοπισμός συγκεκριμένων

σημείων όπου οι κινήσεις ή τα δομικά στοιχεία του gimbal μπορεί να συμβάλλουν σε αεροδυναμικές ανεπάρκειες ή διαταραχές μέσω της μοντελοποίησης της δυναμικής των ρευστών που περιβάλλουν ένα UAV εξοπλισμένο με gimbal.

Η συζήτηση του παρόντος κεφαλαίου για το σύστημα Gimbal-UAV έχει πολλές πτυχές. Ξεκινάμε με τη διερεύνηση των ιδιαίτερων αεροδυναμικών δυσκολιών που παρουσιάζει το gimbal. Δεν πρόκειται μόνο για το πώς το gimbal μεταβάλλει το αεροδυναμικό προφίλ του UAV- πρόκειται επίσης για το πώς οι κινήσεις του κατά τη διάρκεια της πτήσης μπορεί να έχουν αντίκτυπο στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Δεύτερον, ο στόχος είναι να βελτιωθεί ο σχεδιασμός του gimbal ώστε να ελαχιστοποιηθούν τυχόν αρνητικές αεροδυναμικές επιπτώσεις οπλισμένοι με τη γνώση από τις προσομοιώσεις CFD. Αυτό μπορεί να χρειαστεί να γίνουν μικρές προσαρμογές στην κατασκευή του gimbal ή να επανεξεταστεί ο τρόπος πρόσδεσής του στο UAV.

Αυτό το κεφάλαιο προσφέρει μια ενδελεχή διαδρομή από τις πρώιμες σκέψεις σχεδιασμού έως τις μεταγενέστερες γνώσεις, χρησιμοποιώντας το ANSA της BETA CAE ως προεπεξεργασία και κατανόηση δεδομένων. Η χρήση του Fluent από την ANSYS χρησιμοποιήθηκε για να παρέχει τις κατάλληλες δυνατότητες του επιλυτή για το έργο. Ο στόχος είναι να επιδειχθεί ένα σύστημα gimbal που όχι μόνο εκπληρώνει τους πρωταρχικούς λειτουργικούς του στόχους, αλλά το κάνει ενώ ενσωματώνεται απρόσκοπτα στο αεροδυναμικό τοπίο του UAV.

9.1.1 Η φιλοσοφία του CFD

Μια κρίσιμη αναλυτική βάση παρέχεται από την υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) για την ανάλυση της συμπεριφοράς των ρευστών κοντά και μέσα σε περίπλοκες δομές, όπως το δικό μας σύστημα gimbal-UAV. Η πλαισίωση της χρήσης και των αποτελεσμάτων του CFD απαιτεί την κατανόηση της υποκείμενης φιλοσοφικής του βάσης.

Βασικές αρχές της φυσικής: Οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες εξηγούν πώς μεταβάλλεται το πεδίο ταχύτητας ενός ρευστού με την πάροδο του χρόνου, ρυθμίζουν τη δυναμική των ρευστών. Αυτές οι εξισώσεις χρησιμεύουν ως θεωρητικό θεμέλιο για την υπολογιστική ρευστοδυναμική και κατευθύνουν την ηλεκτρονική μοντελοποίηση της δυναμικής των ρευστών, δημιουργώντας μια σταθερή βάση στην αποδεκτή φυσική.

Από τον σχεδιασμό στην πρόβλεψη: Το CFD λειτουργεί ως υπολογιστική τεχνική που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ του θεωρητικού σχεδιασμού και της πραγματικής απόδοσης, από τον σχεδιασμό στην πρόβλεψη. Για το σύστημά μας gimbal-UAV, το CFD παρέχει την ευκαιρία να δούμε τις αεροδυναμικές αλληλεπιδράσεις που προκαλούνται από τον μηχανικό σχεδιασμό του gimbal και τις κινήσεις του, επιτρέποντας βελτιώσεις του σχεδιασμού πριν από τη φυσική εφαρμογή.

Εξισορρόπηση της θεωρίας και του εμπειρισμού: Οι συμπεριφορές των ρευστών στον πραγματικό κόσμο μπορεί να είναι πολύπλοκες, ειδικά σε πολύπλοκες γεωμετρικές όπως το σύστημα gimbal ενός UAV. Αν και οι βασικές εξισώσεις της ροής των ρευστών είναι ευρέως κατανοητές, οι περίπλοκες λύσεις προβλημάτων συχνά απαιτούν πρόσθετα εμπειρικά μοντέλα. Αυτή η αρμονία εγγυάται ότι το CFD συνεχίζει να είναι τόσο θεωρητικά ορθό όσο και πρακτικά χρήσιμο.

Επαναληπτική ανάλυση: Ο επαναληπτικός χαρακτήρας του CFD είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου για την παραγωγή νέων γνώσεων όταν αλλάζει ο σχεδιασμός ή όταν ανακαλύπτονται νέα προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός για το σύστημα Gimbal-UAV μπορεί να αξιολογείται τακτικά και να βελτιστοποιείται για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Εν κατακλείδι, οι βάσεις της θεωρητικής φυσικής και της πρακτικής εφαρμογής που διαθέτει το σύστημα CFD παρέχουν μια ισχυρή εργαλειοθήκη για την ανάλυση και τη βελτίωση συστημάτων όπως το Gimbal-UAV.

9.1.2 Φάσεις της ανάλυσης CFD

Η διαδικασία μελέτης CFD μπορεί να χωριστεί χονδρικά σε διάφορες φάσεις, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε πολύπλοκα συστήματα όπως το Gimbal-UAV. Για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια, η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, κάθε φάση είναι απαραίτητη.

9.1.2.1 Φάση προετοιμασίας:

Σε αυτό το πρώιμο στάδιο τίθενται οι βάσεις για ολόκληρη την προσομοίωση CFD. Περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός υπολογιστικού πλέγματος ή, στην περίπτωση μας, τη διαίρεση του πεδίου (στο παράδειγμά μας, το σύστημα Gimbal-UAV και το περιβάλλον του) σε μικρότερα τμήματα. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου καθορίζονται οι οριακές συνθήκες και η γεωμετρία. Λόγω της

περίπλοκης κατασκευής του gimbal, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το πλέγμα να περιλαμβάνει όλα τα περίπλοκα γεωμετρικά στοιχεία.

9.1.2.2 Φάση ανάλυσης:

Η ρύθμιση ολοκληρώνεται και στη συνέχεια αρχίζει η κύρια φάση υπολογισμού. Οι εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται επανειλημμένα σε όλο το πλέγμα, μαζί με τυχόν πρόσθετα εμπειρικά μοντέλα. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο αέρας ρέει γύρω από το gimbal ενώ το UAV βρίσκεται σε κίνηση και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζει τη συνολική αεροδυναμική απόδοση του UAV είναι απαραίτητη για το σύστημα Gimbal-UAV.

9.1.2.3 Φάση εξέτασης δεδομένων:

Τα ευρήματα πρέπει να προβληθούν και να αξιολογηθούν μετά τη διαδικασία υπολογισμού. Τα μοτίβα ροής, οι κατανομές πίεσης, οι ζώνες τύρβης και άλλα κρίσιμα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά γύρω από το σύστημα Gimbal-UAV μπορούν να προβληθούν από τους αναλυτές σε αυτή τη φάση. Για τους σχεδιαστές και τους μηχανικούς, αυτού του είδους οι οπτικές αναπαραστάσεις είναι απαραίτητες, επειδή προσφέρουν απτές γνώσεις για τις πιθανές περιοχές βελτίωσης ή βελτιστοποίησης.

Μια κρίσιμη αναλυτική βάση παρέχεται από την υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) για την ανάλυση της συμπεριφοράς των ρευστών κοντά και μέσα σε περίπλοκες δομές όπως το σύστημα Gimbal-UAV. Η πλαισίωση της χρήσης και των αποτελεσμάτων της CFD απαιτεί την κατανόηση της υποκείμενης φιλοσοφικής της βάσης.

9.1.3 Προετοιμασία της γεωμετρίας για ανάλυση CFD

Για πολύπλοκα συστήματα όπως το Gimbal-UAV, η προετοιμασία της γεωμετρίας αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της ανάλυσης CFD. Πριν ξεκινήσουν οι προσομοιώσεις, η γεωμετρία του συστήματος Gimbal πρέπει να χαρακτηριστεί με ακρίβεια και να βελτιστοποιηθεί για τη μελέτη στον υπολογιστή.

Το σύστημα gimbal έχει πολύπλοκο σχεδιασμό λόγω της κρίσιμης λειτουργίας του στην ευθυγράμμιση και σταθεροποίηση των ωφέλιμων φορτίων στα UAV. Είναι ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι η γεωμετρία του απεικονίζεται με ακρίβεια μέσα σε ένα υπολογιστικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των αεροδυναμικών δυνάμεων στη δομή του gimbal και του UAV στο σύνολό του θα αποτυπωθεί με μεγαλύτερη

ακρίβεια από τα αποτελέσματα προσομοίωσης με καλά προετοιμασμένη γεωμετρία.

Αυτή η προετοιμασία περιλαμβάνει μια ποικιλία δραστηριοτήτων, από την απλοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου με την εξάλειψη περιττών στοιχείων έως τη λεπτομερή ρύθμιση της πυκνότητας του πλέγματος σε κρίσιμες περιοχές. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί κανείς να εγγυηθεί ότι το μοντέλο θα συνεχίσει να παράγει προβλέψεις που είναι σωστές και υπολογιστικά αποδοτικές.

Θα εξετάσουμε τις επίπονες διαδικασίες και τους παράγοντες που εμπλέκονται στην προετοιμασία της γεωμετρίας του Gimbal-UAV για το δύσκολο πεδίο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής καθώς θα εμβαθύνουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

9.1.3.1 Προσανατολισμός της γεωμετρίας:

Ο προσανατολισμός της γεωμετρίας είναι ζωτικής σημασίας για την ανάλυση CFD, ειδικά για συστήματα με πολύπλοκα χαρακτηριστικά, όπως το gimbal που είναι εγκατεστημένο σε ένα UAV. Η προσομοίωση πρέπει να προσανατολίζεται σωστά για να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις αεροδυναμικές επιδράσεις στη γεωμετρία που θα υπήρχαν σε πραγματικές συνθήκες.

Το βασικό τρισδιάστατο μοντέλο του gimbal αναπαράγεται στο πλαίσιο του πρώτου σταδίου της διαδικασίας προσανατολισμού. Μπορούμε να μάθουμε για την ύπαρξη ενδιαφερουσών αεροδυναμικών περιοχών περιστρέφοντας το μοντέλο και εξετάζοντας τις επιφάνειες που προκύπτουν. Αυτές οι αποκλίσεις αναπαρίστανται συχνά με γκριζες και κίτρινες επιφάνειες στα εργαλεία μοντελοποίησης που διαθέτουμε. Οι γκριζες επιφάνειες αντιπροσωπεύουν τις εξωτερικές περιοχές όπου οι αεροδυναμικές δυνάμεις είναι πιο έντονες, οι οποίες είναι ουσιαστικά οι κύριες θέσεις όπου η ροή του αέρα αλληλοεπιδρά με τη ροή. Η κατανόηση της συμπεριφοράς αυτών των περιοχών όπου εμφανίζονται οριακά στρώματα είναι απαραίτητη για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό του αρθρωτού συστήματος. Από την άλλη πλευρά, τα εσωτερικά μέρη, όπου υπάρχει λιγότερο άμεση αεροδυναμική επαφή, αντιπροσωπεύονται γενικά από κίτρινες επιφάνειες.

Τυχόν πιθανές ανωμαλίες στο μοντέλο μπορούν να βρεθούν με περιστροφή και επιθεώρηση της γεωμετρίας. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν ανεπιθύμητες προεξοχές και εσφαλμένη ρύθμιση σε εξαρτήματα, τα οποία θα μπορούσαν να μειώσουν τον ρεαλισμό των προσομοιώσεων.

9.1.3.2 Καθαρισμός της γεωμετρίας: Τεχνικές και σημασία

Μετά τον κατάλληλο προσανατολισμό της γεωμετρίας του συστήματος gimbal εντός του υπολογιστικού πεδίου, ένα κρίσιμο βήμα είναι ο καθαρισμός της γεωμετρίας. Στο πλαίσιο της ανάλυσης, η εκκαθάριση δεν αφορά μόνο την εμφάνιση ή την ευταξία, αλλά και τη βελτίωση της σαφήνειας και της ακρίβειας της προσομοίωσης, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα ευρήματα είναι σωστά και αξιόπιστα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πολυάριθμα κινούμενα εξαρτήματα, τα σημεία περιστροφής και τις πολυπλοκότητες που σχετίζονται με το ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει, η γεωμετρία ενός συστήματος gimbal που είναι τοποθετημένο σε UAV μπορεί να είναι περίπλοκη. Αυτές οι δυσκολίες μπορεί να προκαλέσουν στο τρισδιάστατο μοντέλο να έχει περιττά ή περιττά μέρη. Αυτό θα μπορούσε να προκληθεί από επικαλύψεις, διασκορπισμένα εξαρτήματα ή ακόμη και από προσθήκες κατά τη φάση του σχεδιασμού εξαρτημάτων που είναι άσχετα με την ανάλυση CFD.

Ο καθαρισμός είναι σημαντικός γιατί:

1. **Διαφοροποίηση βασικών επιφανειών:** Για παράδειγμα, οι εξωτερικές (γκρι) και οι εσωτερικές (κίτρινες) περιοχές έχουν σημαντική αεροδυναμική σημασία, όπως φαίνεται κατά τον προσανατολισμό. Ο καθαρισμός εξασφαλίζει ότι κάθε επιφάνεια έχει ξεχωριστή αναπαράσταση, διευκολύνοντας τον καθορισμό οριακών συνθηκών στη συνέχεια.
2. **Εξάλειψη των πλεονασμών:** Ακόμη και αν οι διπλές επιφάνειες ή στοιχεία μπορεί να φαίνονται αθώες, μπορούν να προκαλέσουν λάθη στον υπολογισμό CFD. Θα μπορούσαν να προκαλέσουν σύγχυση στο λύτη ή να δυσχεράνουν το πλέγμα. Με την εξάλειψη αυτών των περιττών κομματιών, ο επιλύτης αποτρέπεται από το να σπαταλά χρόνο υπολογισμού σε μη συνεισφέροντα στοιχεία.
3. **Διασφάλιση της ποιότητας του πλέγματος:** Η σαφήνεια της γεωμετρίας έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ποιότητα του πλέγματος που θα δημιουργηθεί στο επόμενο στάδιο. Οι αιχμηρές γωνίες, τα μικροσκοπικά κενά ή οι σπασμένες επιφάνειες ενδέχεται να οδηγήσουν σε κακή ποιότητα πλέγματος, η οποία μπορεί στη συνέχεια να μειώσει την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Προκειμένου να βοηθήσουν στη διάκριση, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη φάση καθαρισμού περιλαμβάνουν τη χρήση εξειδικευμένων οδηγιών για την αναστροφή του χρώματος συγκεκριμένων επιφανειών (orient). Μια άλλη επιλογή είναι η χρήση εργαλείων που απομακρύνουν γρήγορα τα περιττά ή επικαλυπτόμενα στοιχεία εντοπίζοντας και επισημαίνοντάς τα με τη χρήση του εξειδικευμένου διαχειριστή ελέγχων (checks manager).

Η διαδικασία καθαρισμού της γεωμετρίας του gimbal μοιάζει με την προετοιμασία των θεμελίων για ένα κρίσιμο πείραμα. Αυτή η σχολαστική προετοιμασία διασφαλίζει ότι η επακόλουθη ανάλυση CFD λειτουργεί σε μια βελτιωμένη, βελτιστοποιημένη πλατφόρμα, οδηγώντας σε αποτελέσματα που είναι τόσο ακριβή όσο και διαφωτιστικά όσον αφορά την αεροδυναμική συμπεριφορά.

9.1.3.2.1 Διαγραφή διπλότυπων όψεων:

Η ενασχόληση με περίπλοκα σχέδια όπως το σύστημα αρθρωτού τροχού για UAV, το οποίο είναι ένα πολύπλοκο τρισδιάστατο μοντέλο, οδηγεί αναγκαστικά σε ορισμένα γεωμετρικά σφάλματα. Οι διπλές επιφάνειες ή επιφάνειες είναι ένα από τα πιο συχνά προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την προετοιμασία της γεωμετρίας για τη μελέτη CFD.

Οι διπλές επιφάνειες της γεωμετρίας μπορούν να θεωρηθούν ως στρώματα επικαλυπτόμενων επιφανειών που καταλαμβάνουν την ίδια περιοχή και αντιπροσωπεύουν το ίδιο στοιχείο του σχεδιασμού. Μπορεί να προέρχονται από διαφορετικά σημεία:

- **Επανάληψεις σχεδιασμού:** Πολλαπλές επαναλήψεις και αναθεωρήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού του αρθρωτού συστήματος μπορεί να οδηγήσουν σε διπλές ή επικαλυπτόμενες γεωμετρίες. Όταν προστίθενται νέα στοιχεία σχεδιασμού χωρίς να διαγράφονται ή να ενημερώνονται οι υπάρχουσες εκδόσεις, αυτό μπορεί να συμβεί.
- **Σφάλματα εισαγωγής/εξαγωγής:** Ενίοτε είναι δυνατόν να δημιουργηθούν λάθη ή αντιγραφές κατά τη μεταφορά μοντέλων μεταξύ διαφόρων λογισμικών CAD ή σχεδιασμού. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν τα αρχεία μετατρέπονται μεταξύ διαφόρων μορφών αρχείων.

- **Ιστορικό πλέγματος:** Οι διπλές επιφάνειες μπορεί να προκύψουν από υπολείμματα ή τεχνουργήματα που έχουν απομείνει από την διακριτοποίηση ή άλλες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στη γεωμετρία στο παρελθόν.

Η αγνόηση αυτών των πλεονασμάτων μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις:

- **Επιπλοκές πλέγματος:** Οι διπλές επιφάνειες μπορεί να διαταράξουν τη διαδικασία πλέγματος και να οδηγήσουν σε υποβαθμισμένα κελιά, λοξά εξαρτήματα ή ακόμη και σε αποτυχίες πλέγματος.
- **Ανακρίβειες του επιλυτή:** Ο επιλυτής μπορεί να ερμηνεύσει λανθασμένα τις οριακές συνθήκες όταν συναντήσει αυτά τα αντίγραφα, με αποτέλεσμα ανακριβείς εκτιμήσεις ροής ή απόκλιση προσομοίωσης.
- **Αυξημένος υπολογιστικός χρόνος:** Οι διπλές επιφάνειες σημαίνουν περισσότερα στοιχεία για τον επιλυτή που πρέπει να υπολογίσει, αυξάνοντας τον υπολογιστικό χρόνο και τη χρήση πόρων χωρίς να προσθέτει καμία αξία.

Η λειτουργία "διαγραφής" του λογισμικού προετοιμασίας είναι αρκετά χρήσιμη για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Είναι κάτι περισσότερο από ένα απλό εργαλείο απλής αφαίρεσης. Οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν κριτήρια για τον εντοπισμό και την επισήμανση αυτών των προβληματικών περιοχών χρησιμοποιώντας τα προηγμένα εργαλεία που προσφέρονται. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν θα χαθούν ακούσια κρίσιμες γεωμετρικές πληροφορίες, ο αναλυτής μπορεί να ελέγξει και να επικυρώσει οπτικά τα αντίγραφα αφού επισημανθούν πριν από τη διαγραφή τους.

Στο πλαίσιο του συστήματος gimbal, αυτό το βήμα είναι ζωτικής σημασίας. Δεδομένης της ανάγκης του συστήματος για ακριβή κίνηση και σταθερότητα, η διασφάλιση της ακρίβειας της αεροδυναμικής ανάλυσης μέχρι την παραμικρή λεπτομέρεια είναι υψίστης σημασίας. Εξαλείφοντας αυτά τα αντίγραφα, ανοίγουμε το δρόμο για μια πιο ομαλή και ακριβή διαδικασία προσομοίωσης CFD

9.1.3.2.2 Δημιουργία νέων επιφανειών

Η διαδικασία προετοιμασίας της γεωμετρίας μας για ανάλυση CFD περιλαμβάνει πολλά περίπλοκα βήματα, και η απλή αφαίρεση των περιττών χαρακτηριστικών

είναι μόνο ένα από αυτά. Η ανάπτυξη νέων επιφανειών ή τομέων ειδικά σχεδιασμένων για προσομοιώσεις είναι ένα σημαντικό αλλά μερικές φορές αγνοούμενο στοιχείο.

Γιατί είναι αυτό σημαντικό, ειδικά για το σύστημα gimbal που τοποθετείται σε UAV;

- **Οριακές συνθήκες:** Μια ακριβής προσομοίωση απαιτεί ακριβή καθορισμό των ορίων. Για παράδειγμα, εάν μελετάμε την αεροδυναμική γύρω από το gimbal μας, θα χρειαστούμε ένα πεδίο που περιλαμβάνει αρκετή από τη γύρω περιοχή εκτός από την τοπική περιοχή, ώστε να μας επιτρέψει να κατανοήσουμε τα μοτίβα της εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής του αέρα.
- **Εξ ορθολογισμός της υπολογιστικής προσπάθειας:** Με τη δημιουργία εξειδικευμένων πεδίων προσομοίωσης, εξασφαλίζουμε ότι η υπολογιστική μας ισχύς συγκεντρώνεται σε αυτό που πραγματικά έχει σημασία - στην προκειμένη περίπτωση, τη συμπεριφορά της ροής του αέρα γύρω από το gimbal και την αλληλεπίδρασή του με το UAV.
- **Ακρίβεια και ανάλυση:** Ορισμένες περιοχές, όπως τα σημεία όπου το gimbal συνδέεται με το UAV ή τα περιστρεφόμενα μέρη του gimbal, ενδέχεται να απαιτούν υψηλότερη ανάλυση πλέγματος. Αυτή η διαδικασία κατασκευής επιταχύνεται στο πρόγραμμα προ-επεξεργασίας ANSA με την εφαρμογή Scripts. Τα Scripts παρέχουν αυτόματες ή ημιαυτόματες τεχνικές για την κατασκευή αυτών των περιοχών αντί της χειροκίνητης σχεδίασης ή περιγραφής τους, εξοικονομώντας χρόνο και μειώνοντας τα πιθανά λάθη. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι στην προσομοίωσή μας περιλαμβάνεται επαρκής "εναέριος χώρος" για την πλήρη κατανόηση της αεροδυναμικής εικόνας, μπορεί να κατασκευαστεί ένα ορθογώνιο πεδίο γύρω από το UAV για το σύστημα gimbal. λόγω πολύπλοκων μοτίβων ροής ή σημαντικών αεροδυναμικών αλληλεπιδράσεων. Η δημιουργία ειδικών επιφανειών ή τομέων γύρω από αυτές τις περιοχές επιτρέπει τη στοχευμένη βελτίωση του πλέγματος, εξασφαλίζοντας ακρίβεια εκεί που χρειάζεται περισσότερο.

Στο λογισμικό προ επεξεργασίας, ANSA, αυτή η διαδικασία δημιουργίας απλοποιείται μέσω της χρήσης Scripts. Αντί να σχεδιάζονται ή να οροθετούνται χειροκίνητα αυτές οι περιοχές, τα Scripts προσφέρουν αυτοματοποιημένους ή ημι-αυτοματοποιημένους τρόπους για τη δημιουργία τους, εξοικονομώντας χρόνο και ελαχιστοποιώντας τα πιθανά σφάλματα. Για το σύστημα gimbal, μπορεί να δημιουργηθεί ένα ορθογώνιο πεδίο γύρω από το UAV, διασφαλίζοντας ότι στην προσομοίωσή μας περιλαμβάνεται αρκετός "εναέριος χώρος" για να κατανοήσουμε την πλήρη αεροδυναμική εικόνα. Στην δική μας περίπτωση ο χώρος που δημιουργήθηκε γύρω από το μοντέλο μας έχει διαστάσεις 5H μπροστά, κάτω, αριστερά και δεξιά του gimbal. Ενώ πίσω δημιουργήθηκε μία απόσταση 12H. Όπου H το μέγιστο ύψος της εμπρόσθιας επιφάνειας. (3) Αυτό έγινε για να δώσουμε χώρο στην ανάπτυξη των αεροδυναμικών φαινομένων, ειδικά αφού ο αέρας χτυπήσει στο gimbal.

Η γεωμετρία μας θα είναι καλά προετοιμασμένη και χωρισμένη σε διάφορα πεδία μέχρι να τελειώσουμε με αυτό το στάδιο, αντιπροσωπεύοντας τα φυσικά χαρακτηριστικά του gimbal και του UAV μας, ενώ παράλληλα θα είναι βελτιστοποιημένη για τις υπολογιστικές ανάγκες του CFD.

Με τη δημιουργία και τον ορισμό των νέων επιφανειών μας, το μοντέλο μας πλησιάζει όλο και πιο κοντά στο να είναι έτοιμο για προσομοίωση. Τα επερχόμενα βήματα θα βελτιώσουν περαιτέρω τις προετοιμασίες μας, διασφαλίζοντας ότι η ανάλυση CFD μας παρέχει πολύτιμες, ακριβείς πληροφορίες για την αεροδυναμική του συστήματος του αρθρωτού τροχού μας

9.1.4 Διακριτοποίηση και κριτήρια ποιότητας

Σε κάθε ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), η διαδικασία της διακριτοποίησης είναι ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα. Στον πυρήνα του, το πλέγμα μετατρέπει το συνεχές πεδίο ενός προβλήματος ροής ρευστών σε διακριτό πεδίο, επιτρέποντας την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για το σύστημα gimbal τοποθετημένο σε UAV, η σημασία αυτού του βήματος δεν μπορεί να υπερτιμηθεί.

Κάθε φυσικό χαρακτηριστικό του αρθρωτού συστήματος, από τις περιστροφικές αρθρώσεις του έως τους λεπτούς βραχίονες στήριξης, πρέπει να αναπαρασταθεί με ακρίβεια στο υπολογιστικό μοντέλο. Κατά συνέπεια, το πλέγμα που περιβάλλει αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Λειτουργεί ως δίκτυο, αποτυπώνοντας τις αποχρώσεις της συμπεριφοράς της ροής του αέρα γύρω από τα εξαρτήματα του gimbal, το οποίο, με τη σειρά του, βοηθά στην κατανόηση της αεροδυναμικής τους απόδοσης.

Ωστόσο, η δημιουργία αυτού του πλέγματος δεν αφορά απλώς τον ορισμό ενός πλέγματος υψηλής πυκνότητας και την επικάλυψή του πάνω στη γεωμετρία του gimbal μας. Η ποιότητα είναι υψίστης σημασίας. Διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας απαιτούν διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας πλέγματος, ανάλογα με την αναμενόμενη συμπεριφορά της ροής και τις γεωμετρικές περιπλοκές.

Επιπλέον, η ποιότητα του πλέγματος δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την πυκνότητά του. Παράμετροι όπως η λοξότητα, η ομαλότητα και ο λόγος διαστάσεων γίνονται κρίσιμοι δείκτες της καταλληλότητας ενός πλέγματος για την ανάλυση.

Στις επόμενες ενότητες, θα αναλύσουμε τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πλεγμάτων, δίνοντας έμφαση στην ανάγκη για συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας και στον αντίκτυπό τους στην ακρίβεια των προσομοιώσεων CFD.

9.1.4.1 Μέγεθος και κατανομή στοιχείων

Η κοκκομετρία του πλέγματος, που συχνά καθορίζεται από το μέγεθος των επιμέρους στοιχείων, αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο σε κάθε μελέτη CFD. Παίζει καθοριστικό ρόλο στην ακριβή αποτύπωση της δυναμικής των ρευστών γύρω από πολύπλοκες δομές, όπως ένα σύστημα gimbal που είναι τοποθετημένο σε ένα UAV.

Κατανόηση του μεγέθους των στοιχείων:

Το μέγεθος των στοιχείων, στην ουσία, αναφέρεται στις διαστάσεις των μεμονωμένων κελιών ή στοιχείων στο πλέγμα του πλέγματος. Ένα μικρότερο μέγεθος στοιχείου μπορεί να αποτυπώσει λεπτομερέστερες μεταβολές στις παραμέτρους ροής, αλλά με το κόστος της υπολογιστικής έντασης. Αντίθετα, ένα μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείου μπορεί να απλοποιήσει τις υπολογιστικές διαδικασίες, αλλά ενέχει τον κίνδυνο να παραβλέψει περίπλοκες λεπτομέρειες της ροής.

Τυπικά, οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση του ρευστού, δίνονται ως εξής:

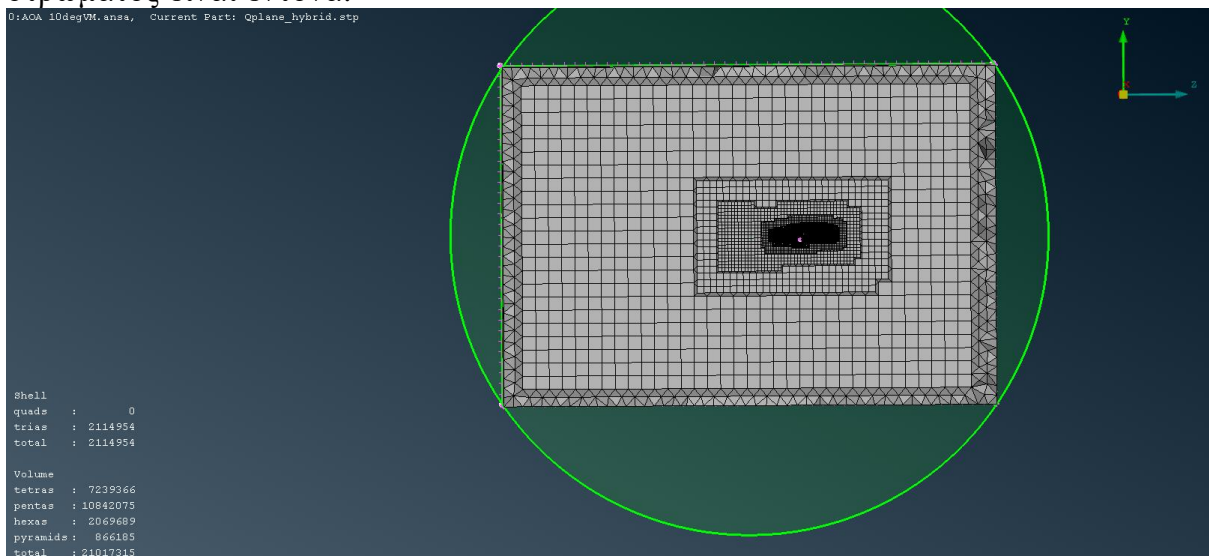
$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g}$$

Όπου:

- ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού,
- u είναι το πεδίο ταχύτητας,
- p είναι η πίεση,
- μ είναι το δυναμικό ιξώδες και
- g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

Για τη διακριτοποίηση αυτής της εξίσωσης στο πλέγμα, το μέγεθος και η κατανομή των στοιχείων αποκτούν καθοριστική σημασία. Περιοχές με σημαντικές κλίσεις ροής ή περίπλοκες γεωμετρίες αρθρωτών δοκών απαιτούν πυκνότερο πλέγμα.

Για το δικό μας σύστημα gimbal, οι μοναδικές γεωμετρικές περιπλοκές, ειδικά σε περιοχές όπως οι περιστροφικές αρθρώσεις και οι διεπαφές όπου το gimbal συνδέεται με το UAV, απαιτούν ένα λεπτότερο πλέγμα. Πρόκειται για περιοχές όπου η ροή μπορεί να είναι ιδιαίτερα τυρβώδης ή όπου τα φαινόμενα οριακού στρώματος είναι έντονα.



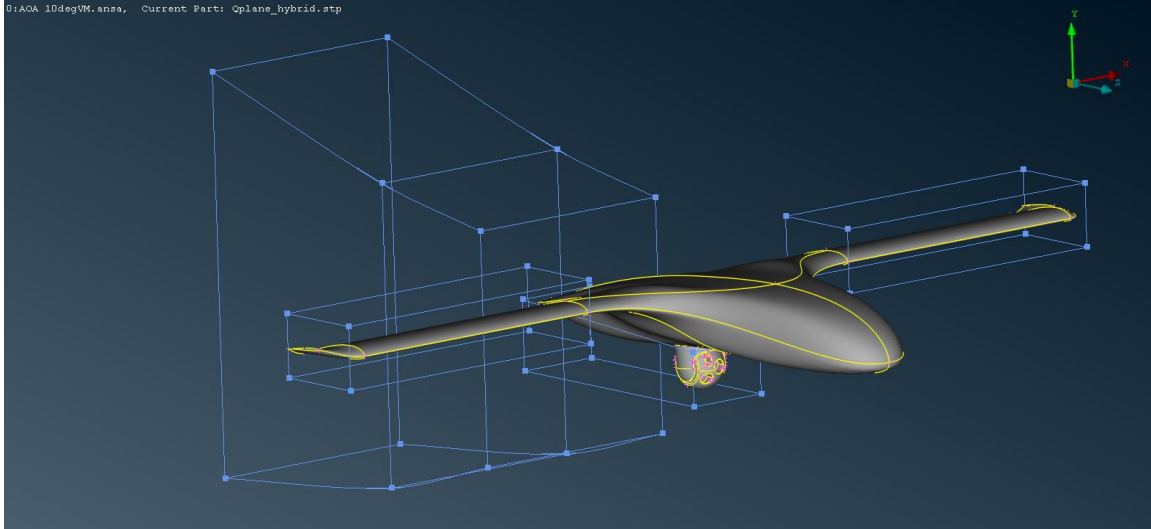
Εικόνα 9: Συμμετρική τομή πλέγματος

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο είδη πλέγματος. Το ένα που αποτελείται από ορθογώνια που ονομάζεται δομημένο πλέγμα και προφέρει την καλύτερη απόκριση αποτελεσμάτων με τα λιγότερα στοιχεία. Ενώ το δεύτερο αποτελείται από πυραμιδοειδή στοιχεία που αποτελούν το στοιχείο μελέτης. Αυτό γίνεται καθώς είναι πιο εύκολο να αποτυπώσουμε την καμπυλότητα που υπάρχει και στο UAV και στο Gimbal.

Αποτελεσματικές τεχνικές διανομής:

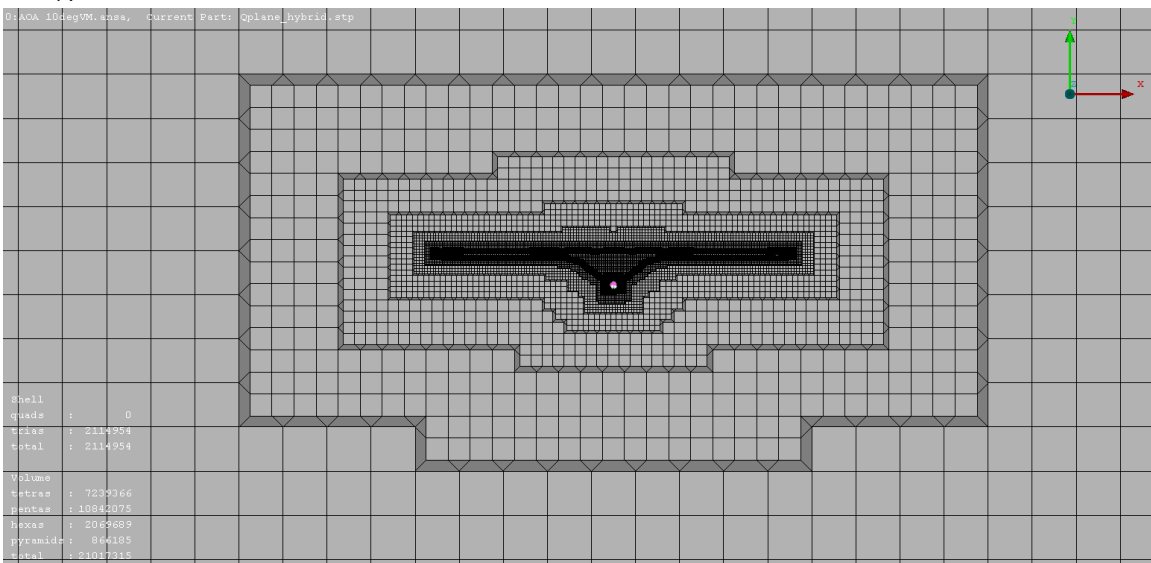
Η ομοιόμορφη κατανομή δεν είναι πάντα η απάντηση. Αν και μπορεί να είναι δελεαστικό να διατηρηθεί ένα σταθερό μέγεθος στοιχείου σε όλη τη γεωμετρία,

σπάνια είναι η βέλτιστη προσέγγιση για πολύπλοκα συστήματα. Η ανάγκη ποικίλλει ανάλογα με την τοπική γεωμετρία και τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά ροής.



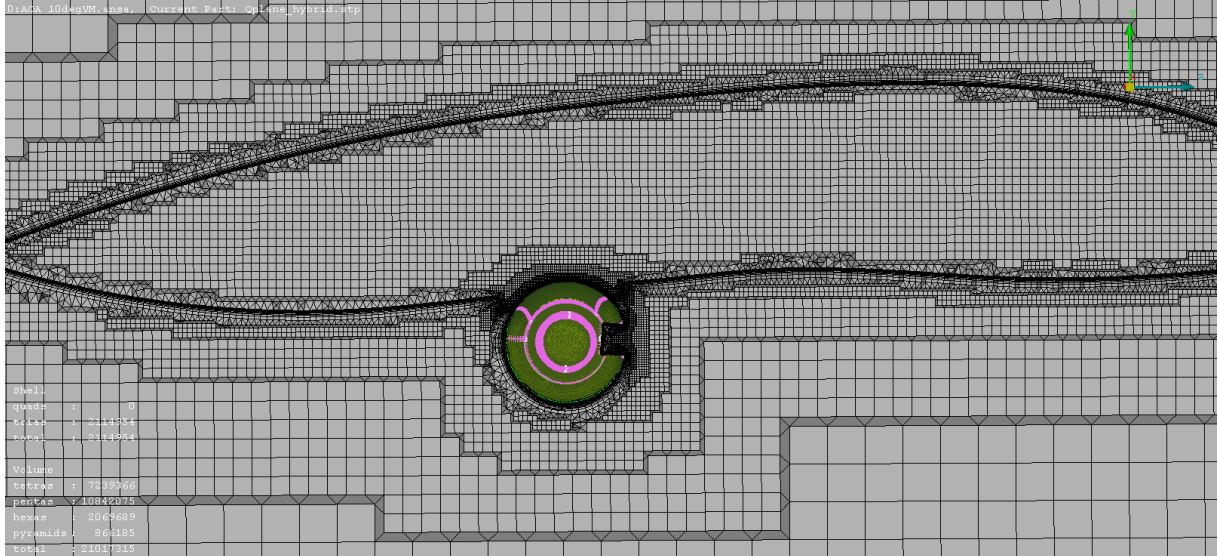
Εικόνα 10: «Κουτιά» για να πυκνώσουμε το πλέγμα γύρω από σημεία ενδιαφέροντος

Το προσαρμοστικό πλέγμα είναι μια τεχνική που χρησιμοποιήσαμε εκτενώς. Αυτή η μέθοδος προσαρμόζει το μέγεθος των στοιχείων με βάση τις τοπικές ιδιότητες της ροής, διασφαλίζοντας ότι οι περιοχές με ταχείες αλλαγές στις παραμέτρους, όπως η ταχύτητα ή η πίεση, λαμβάνουν λεπτότερο πλέγμα. Από την άλλη πλευρά, οι περιοχές με σχετικά σταθερή ροή μπορούν να αρκестούν σε ένα πιο χοντρό πλέγμα.



Εικόνα 11: Παρατηρούμε την τοπική πυκνωση

Τα οριακά στρώματα, ειδικά γύρω από τις επιφάνειες του αρθρωτού συστήματος, αποτελούν ζώνες σημαντικών κλίσεων ταχύτητας. Εδώ, ένα πυκνότερο πλέγμα εξασφαλίζει την ακριβή αποτύπωση του προφίλ ροής, απαραίτητη για την αξιολόγηση παραμέτρων όπως η αντίσταση και η άνωση.



Εικόνα 12: Πλέγμα γύρω από το σύστημα

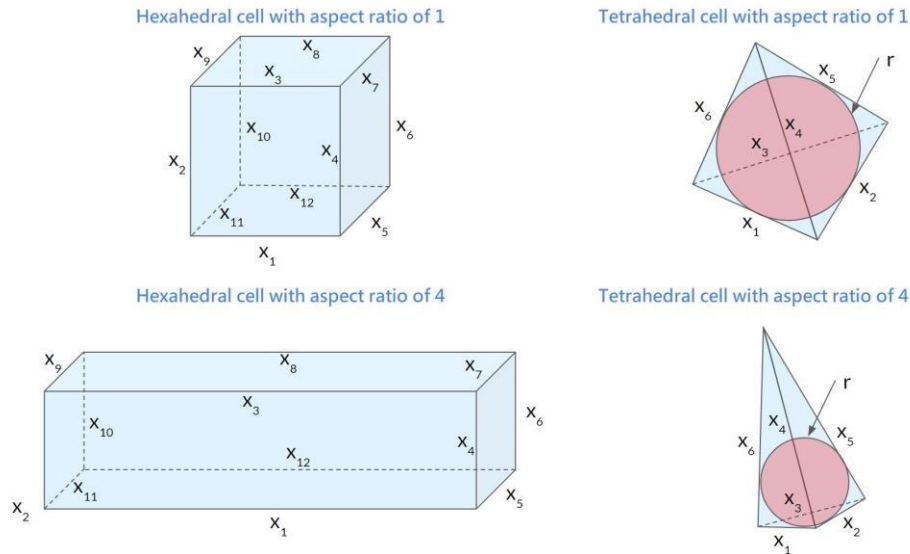
Η χρησιμότητα του υβριδικού πλέγματος είναι ότι χρησιμοποιούνται υπολογιστικοί χώροι για το στοιχείο μελέτης και όχι για την γύρω περιοχή της εικονικής σήραγγας. Έτσι εξοικονομούμε χρόνο στην ανάλυση μας.

Εξισορρόπηση της ακρίβειας με τον υπολογισμό:

Η δημιουργία πλέγματος, ιδίως η επιλογή του μεγέθους των στοιχείων και η κατανομή τους, είναι μια λεπτή προσπάθεια που βρίσκεται στο μεταίχμιο της ακρίβειας και του υπολογιστικού πραγματισμού. Και τα δύο άκρα αυτού του φάσματος προσφέρουν οφέλη και προκλήσεις, και η επίτευξη της σωστής ισορροπίας είναι αναπόσπαστο μέρος κάθε αποτελεσματικής μελέτης CFD.

9.1.4.2 Αναλογία διαστάσεων (Aspect Ratio)

Ο λόγος διαστάσεων, στο πλαίσιο της δημιουργίας πλεγμάτων για υπολογιστική ρευστοδυναμική, αναφέρεται στον λόγο του μήκους προς το ύψος ενός στοιχείου πλέγματος. Η έννοια του λόγου διαστάσεων είναι υψίστης σημασίας, ιδίως όταν μοντελοποιούνται πολύπλοκα συστήματα όπως ένα σύστημα αρθρωτού τροχού σε ένα UAV. Ακολουθεί μια εις βάθος εξέταση αυτής της κρίσιμης παραμέτρου.



Εικόνα 13: Σύγκριση υψηλού και χαμηλού λόγου διαστάσεων ανά στοιχείο τύπου (3)

Ορισμός και σημασία:

Ο λόγος διαστάσεων μπορεί να οριστεί μαθηματικά ως εξής:

$$AR = \frac{\text{Shortest side of the element}}{\text{Longest side of the element}}$$

Για τετραγωνικά ή ορθογώνια στοιχεία σε επίπεδο 2D, είναι ο λόγος του μήκους προς το πλάτος. Για τρισδιάστατα στοιχεία όπως τα εξάεδρα, ο υπολογισμός γίνεται πιο περίπλοκος, περιλαμβάνοντας τις διάφορες διαστάσεις του στοιχείου.

Για ένα ισόπλευρο τρίγωνο, ο λόγος διαστάσεων είναι πάντα 2, ο οποίος είναι βέλτιστος για πολλές εφαρμογές. Καθώς το τρίγωνο γίνεται πιο επιμήκες, ο λόγος διαστάσεων αυξάνεται και η ποιότητα του στοιχείου συνήθως μειώνεται, μειώνοντας ενδεχομένως την ακρίβεια και τη σταθερότητα των προσομοιώσεων.

Μια καλά διατηρημένη αναλογία διαστάσεων εξασφαλίζει:

- **Ακρίβεια:** Τα λοξά ή τεντωμένα στοιχεία, τα οποία έχουν πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές αναλογίες διαστάσεων, μπορούν να προκαλέσουν αριθμητικά σφάλματα στη λύση. Τέτοια στοιχεία μπορεί να οδηγήσουν σε μη σωστή αποτύπωση των κλίσεων, ειδικά σε περιοχές με υψηλές κλίσεις ροής, όπως κοντά στα τοιχώματα ή στα οριακά στρώματα γύρω από το αρθρωτό σύστημα.

- **Σύγκλιση:** Ένας ισορροπημένος λόγος διαστάσεων προάγει την ταχύτερη και σταθερότερη σύγκλιση κατά την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης.
- **Υπολογιστική αποδοτικότητα:** Τα στοιχεία με καλό λόγο διαστάσεων επιτρέπουν καλύτερη κατανομή των υπολογιστικών πόρων, εξασφαλίζοντας ταχύτερες προσομοιώσεις.

Προκλήσεις στη διατήρηση του λόγου διαστάσεων για συστήματα Gimbal:

Δεδομένης της πολύπλοκης γεωμετρίας ενός συστήματος αρθρωτού συστήματος, ειδικά όταν ενσωματώνεται σε ένα UAV, υπάρχουν πολλές προκλήσεις:

- **Ποικίλες περιοχές ροής:** Το σύστημα gimbal, με τα κινούμενα μέρη και τον περίπλοκο σχεδιασμό του, στεγάζει περιοχές με ποικίλη συμπεριφορά ροής. Οι περιοχές κοντά στο τοίχωμα, για παράδειγμα, απαιτούν λεπτότερα και πιο ομοιόμορφα πλέγματα για την ακριβή αποτύπωση των φαινομένων του οριακού στρώματος. Αυτές οι απαιτήσεις μπορεί μερικές φορές να έρχονται σε σύγκρουση με τις εντολές του λόγου διαστάσεων, απαιτώντας σχολαστικές προσαρμογές.
- **Κινούμενα μέρη:** Η δυναμική φύση του αρθρωτού συστήματος, με μέρη που μπορούν να κινηθούν ή να περιστρέφουν, δημιουργεί προκλήσεις στη διατήρηση σταθερών λόγων διαστάσεων σε όλο το πλέγμα, ιδίως κατά την παραμόρφωση του πλέγματος που προκαλείται από την κίνηση.
- **Διασύνδεση με το UAV:** Η διασταύρωση όπου το gimbal συναντά το σώμα του UAV παρουσιάζει τις δικές της προκλήσεις πλέγματος. Αυτές οι περιοχές μπορεί να είναι επιρρεπείς σε λοξότητα του πλέγματος, απαιτώντας ως εκ τούτου ιδιαίτερη προσοχή στις αναλογίες διαστάσεων.

Εφαρμοσμένες στρατηγικές:

Δεδομένων των προκλήσεων, χρησιμοποιήθηκαν μερικές βασικές στρατηγικές:

Προσαρμοστικό πλέγμα (Adaptive Meshing): Οι περιοχές που είναι γνωστές για την πολύπλοκη συμπεριφορά της ροής ή τις υψηλές μεταβολές κλίσης, όπως η περιοχή γύρω από το σύστημα του αρθρωτού τροχού, υποβλήθηκαν σε προσαρμοστικό πλέγμα. Αυτή η τεχνική επέτρεψε τη δυναμική προσαρμογή του λόγου διαστάσεων του πλέγματος με βάση τις εξελισσόμενες απαιτήσεις της λύσης.

Τοπικός εξευγενισμός (Local Refinement): Αντί να επιλεγεί ένα συνολικά λεπτό πλέγμα (το οποίο είναι υπολογιστικά δαπανηρό), έγιναν τοπικές βελτιώσεις σε κρίσιμα σημεία, διασφαλίζοντας ότι ο λόγος διαστάσεων παρέμενε εντός αποδεκτών ορίων.

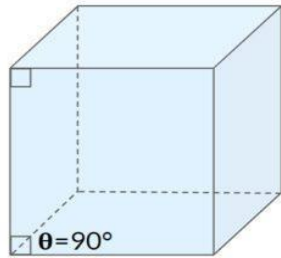
Επικύρωση με περιπτώσεις αναφοράς (Validation with Benchmark Cases): Πριν από την οριστικοποίηση του πλέγματος για το σύστημα gimbal-UAV, χρησιμοποιήθηκαν δοκιμές αναφοράς με γνωστές λύσεις για την επικύρωση της ποιότητας του πλέγματος, συμπεριλαμβανομένων των λόγων διαστάσεων.

9.1.4.3 Λοξότητα (Skewness)

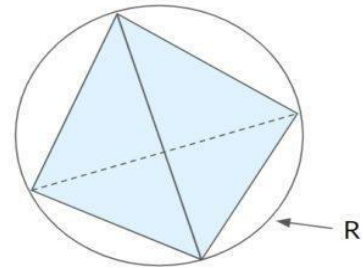
Η λοξότητα, στο πλαίσιο της δημιουργίας πλέγματος για προσομοιώσεις υπολογιστικής δυναμικής ρευστών, μετρά πόσο κοντά βρίσκεται ένα κελί ή στοιχείο στο ιδανικό του σχήμα. Αν και αποτελεί ένα από τα πολλά κριτήρια ποιότητας που παρακολουθούν οι αναλυτές, είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς η υψηλή λοξότητα μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες προσομοίωσης και προβλήματα σύγκλισης.

Η τιμή της λοξότητας κυμαίνεται συνήθως από 0 (για ένα στοιχείο με τέλειο σχήμα) έως 1 (για ένα εξαιρετικά λοξό στοιχείο). Για πολλές προσομοιώσεις, είναι σκόπιμο να διατηρείται η λοξότητα κάτω από ένα ορισμένο όριο (συνήθως κάτω από 0,9), για να διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης.

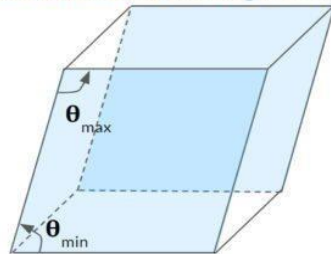
Hexahedral cell with skewness of 0



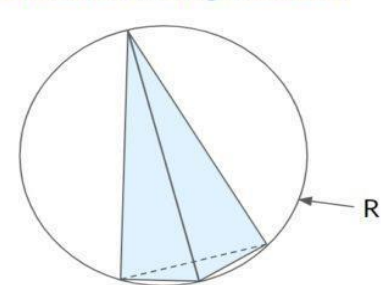
Tetrahedral cell with skewness of 0



Hexahedral cell with high skewness



Tetrahedral cell with high skewness



Εικόνα 14: Σύγκριση υψηλής και χαμηλής λοξότητας ανά τύπο στοιχείου (3)

Ορισμός:

Η λοξότητα για ένα τριγωνικό στοιχείο υπολογίζεται συγκρίνοντας τις γωνίες μεταξύ του πραγματικού τριγώνου και ενός ισόπλευρου τριγώνου (το ιδανικό σχήμα). Για ένα τετράπλευρο, προσδιορίζεται συγκρίνοντας τις γωνίες του τετραπλεύρου με εκείνες ενός τέλειου τετραγώνου. Ο τύπος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\text{Skewness} = \max\left(\frac{\text{Worst angle} - \text{Ideal angle}}{180 - \text{Ideal Angle}}, \frac{\text{Ideal angle} - \text{Best angle}}{\text{Ideal angle}}\right)$$

Όπου:

- Η "Χειρότερη γωνία" είναι η μεγαλύτερη γωνία στο κελί.
- Η "Καλύτερη γωνία" είναι η μικρότερη γωνία στο κελί.
- Η "Ιδανική γωνία" είναι 60° για τρίγωνα και 90° για τετράπλευρα.

Σημασία στο CFD:

Ενώ ένα πλέγμα μπορεί να έχει στοιχεία που είναι ελαφρώς λοξά και εξακολουθούν να παρέχουν μια αποδεκτή λύση, είναι ζωτικής σημασίας να παρακολουθούνται και να αντιμετωπίζονται τα ιδιαίτερα λοξά στοιχεία. Η υψηλή λοξότητα μπορεί:

- Να έχει ως αποτέλεσμα βραδύτερη σύγκλιση ή αποτυχία σύγκλισης.
- Να παράγει ψευδείς διακυμάνσεις στη λύση.
- Αυξάνει την αριθμητική διάχυση, με αποτέλεσμα να θολώνει τα έντονα χαρακτηριστικά της λύσης.

Αντιμετώπιση της λοξότητας:

Κατά την προεπεξεργασία για CFD, οι αναλυτές συχνά χρησιμοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης πλέγματος για να μειώσουν τη λοξότητα. Μπορούν να προσαρμόσουν το μέγεθος των στοιχείων, να χρησιμοποιήσουν αλγορίθμους εξομάλυνσης πλέγματος ή να βελτιώσουν χειροκίνητα τις προβληματικές περιοχές. Δεδομένης της ευαισθησίας των προσομοιώσεων CFD στην ποιότητα του πλέγματος, η δαπάνη χρόνου για τη βελτίωση και τον εξευγενισμό του πλέγματος σε περιοχές με υψηλή λοξότητα μπορεί να είναι μια αξιόλογη επένδυση για τη διασφάλιση ακριβών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

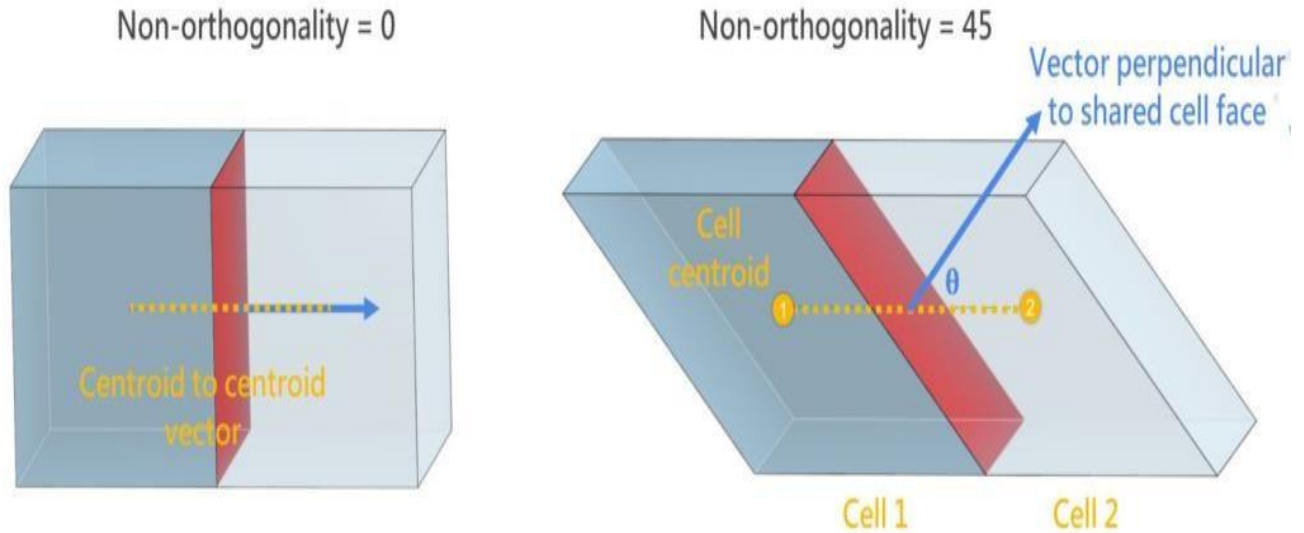
Η λοξότητα μετράει πόσο ένα κελί αποκλίνει από το ιδανικό του σχήμα. Για ένα τετράπλευρο στοιχείο, η λοξότητα (S) μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο:

$$S = \frac{|AC - BD|}{AC + BD}$$

Όπου AC και BD είναι οι διαγώνιοι του τετραπλεύρου. Στο πλαίσιο του gimbal, οι περιοχές κοντά σε κινούμενα μέρη μπορεί να έχουν παραμορφώσεις του πλέγματος, οπότε χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη λοξότητα.

9.1.4.4 Orthogonality (Ορθογωνιότητα)

Η ορθογωνιότητα στο πλαίσιο του πλέγματος αναφέρεται στη γωνία μεταξύ του διανύσματος που συνδέει τα κεντροειδή γειτονικών κελιών και του διανύσματος που είναι κάθετο στην επιφάνεια που μοιράζονται αυτά τα κελιά. Ιδανικά, αυτά τα δύο διανύσματα πρέπει να είναι παράλληλα για μέγιστη ορθογωνιότητα. (4)



Εικόνα 15: :Αναπαράσταση της μετρικής ποιότητας πλέγματος μη ορθογωνιότητας με βάση το κεντροειδές του κελιού και το κοινό πρόσωπο του κελιού (3)

Η μαθηματική αναπαράσταση είναι η εξής:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{d}}{|\vec{n}| \times |\vec{d}|} \right)$$

Όπου \vec{n} είναι το κανονικό διάνυσμα της όψης και \vec{d} είναι το διάνυσμα που συνδέει τα κεντροειδή των γειτονικών κελιών.

Σημασία στο CFD::

Η υψηλή ορθογωνιότητα εξασφαλίζει ότι τα σφάλματα παρεμβολής κατά τη διαδικασία επίλυσης ελαχιστοποιούνται.

Τα μη ορθογώνια πλέγματα μπορούν να εισάγουν σφάλματα στη σύζευξη πίεσης-ταχύτητας, οδηγώντας σε προβλήματα σταθερότητας και ανακριβείς προβλέψεις ροής, ιδίως κοντά σε τοιχώματα όπου οι κλίσεις του οριακού στρώματος είναι υψηλές.

Επίτευξη ορθογωνικών πλεγμάτων:

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πλέγματος, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για τη διατήρηση καλής ορθογωνιότητας, ιδίως σε περιοχές με μεγάλη καμπυλότητα ή πολύπλοκη γεωμετρία. Για τη βελτιστοποίηση της ορθογωνιότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι εξομάλυνσης πλέγματος και τεχνικές προσαρμογής πλέγματος.

Συνάφεια με το σύστημα Gimbal-UAV:

Δεδομένης της περίπλοκης φύσης των εξαρτημάτων του συστήματος gimbal και της αλληλεπίδρασής τους με το αεροδυναμικό πεδίο του UAV, η διασφάλιση της

ορθογωνιότητας του πλέγματος καθίσταται υψίστης σημασίας. Εξασφαλίζει την ακριβή πρόβλεψη των αεροδυναμικών φορτίων, των τάσεων και των χαρακτηριστικών ροής γύρω από το σύστημα αρθρωτού τροχού.

Η κακή ορθογωνιότητα μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες προβλέψεις, οι οποίες ενδέχεται να υπονομεύσουν την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος gimbal-UAV.

9.1.4.5 Ομαλότητα (Smoothness)

Η ομαλότητα του πλέγματος είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό κατά την αξιολόγηση της ποιότητας ενός πλέγματος. Όσο πιο ομαλό είναι ένα πλέγμα, τόσο λιγότερο πιθανό είναι η προσομοίωση να αντιμετωπίσει προβλήματα σύγκλισης ή να παράγει μη ρεαλιστικές κλίσεις στα αποτελέσματα. Ιδανικά, οι μεταβάσεις μεταξύ γειτονικών στοιχείων θα πρέπει να είναι λεπτές χωρίς απότομες διακυμάνσεις.

Ορισμός:

Η ομαλότητα του πλέγματος αφορά την κλίση ή τη διαφορά μεταξύ των τιμών των γειτονικών κελιών. Σε ένα καλά εκλεπτυσμένο πλέγμα, δεν θα πρέπει να υπάρχουν απότομα άλματα στα μεγέθη των κελιών ή απότομες αλλαγές γωνίας, οι οποίες μπορούν να εισάγουν σφάλματα ή προκλήσεις στους αριθμητικούς υπολογισμούς του επιλυτή.

$$M = \frac{\Delta V_{max}}{\Delta V_{avg}}$$

Όπου:

- ΔV_{max} : είναι η μέγιστη διαφορά όγκου μεταξύ γειτονικών κελιών
- ΔV_{avg} : είναι η μέση διαφορά όγκου μεταξύ γειτονικών κελιών.

Σημασία στο CFD:

Η ομαλότητα εξασφαλίζει καλύτερη ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής, ιδίως όταν αποτυπώνονται οριακά στρώματα ή ζώνες διαχωρισμού της ροής. Εάν το πλέγμα δεν είναι ομαλό, ο επιλυτής μπορεί είτε να μην συγκλίνει είτε να οδηγήσει σε ανακριβή αναπαράσταση της φυσικής της ροής.

Τεχνικές για τη βελτίωση της ομαλότητας:

Εξομάλυνση με βάση την κλίση: Η μέθοδος αυτή τροποποιεί τις θέσεις των κόμβων με βάση μια υπολογισμένη κλίση, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή και ομαλότερες μεταβάσεις.

Εξομάλυνση Laplacian: Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τον μέσο όρο των θέσεων των κόμβων με τους γειτονικούς τους κόμβους, οδηγώντας σε ομοιόμορφη και ομαλή κατανομή.

Τεχνικές που βασίζονται στη βελτιστοποίηση: Αυτές οι μέθοδοι εξετάζουν τη βελτιστοποίηση της ποιότητας ολόκληρου του πλέγματος, όπου η ομαλότητα είναι ένα από τα κριτήρια.

Για το σύστημά μας gimbal-UAV, η διατήρηση καλής ομαλότητας πλέγματος είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές με περίπλοκα σχέδια ή κινούμενα εξαρτήματα.

Για το σύστημά μας gimbal-UAV, η διατήρηση καλής ομαλότητας πλέγματος είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές με περίπλοκα σχέδια ή κινούμενα εξαρτήματα

9.1.5 Κατανόηση του y^+ και της σημασίας του στον ορισμό πλέγματος:

Η μη διαστατική απόσταση των τοιχωμάτων, y^+ , είναι μια βασική παράμετρος στη μοντελοποίηση της τύρβης, ιδίως όταν επιλύονται οριακά στρώματα σε προσομοιώσεις CFD. Προκύπτει από τη φυσική απόσταση από το τοίχωμα, το κινηματικό ιξώδες του ρευστού και τη διατμητική ταχύτητα του τοιχώματος. Ο τύπος περιγράφεται ως εξής:

$$y^+ = \frac{u_t y}{\nu}$$

Όπου:

- u_t : ταχύτητα τριβής
- y είναι η απόσταση του κέντρου του πρώτου κελιού από τον τοίχο
- ν είναι το κινηματικό ιξώδες.

Σημασία στο CFD

Το Y^+ είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της ακρίβειας των προβλέψεων του οριακού στρώματος. Διαφορετικά μοντέλα τύρβης έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις y^+ για την ακριβή αποτύπωση της φυσικής της ροής κοντά στο τοίχωμα.

Βοηθά στη διάκριση μεταξύ διαφορετικών περιοχών στο οριακό στρώμα: ιξώδες υποστρώμα ($y^+ < 5$), ρυθμιστικό στρώμα ($5 < y^+ < 30$) και το λογαριθμικό ή αδρανειακό στρώμα ($y^+ > 30$).

Συνέπειες για το πλέγμα:

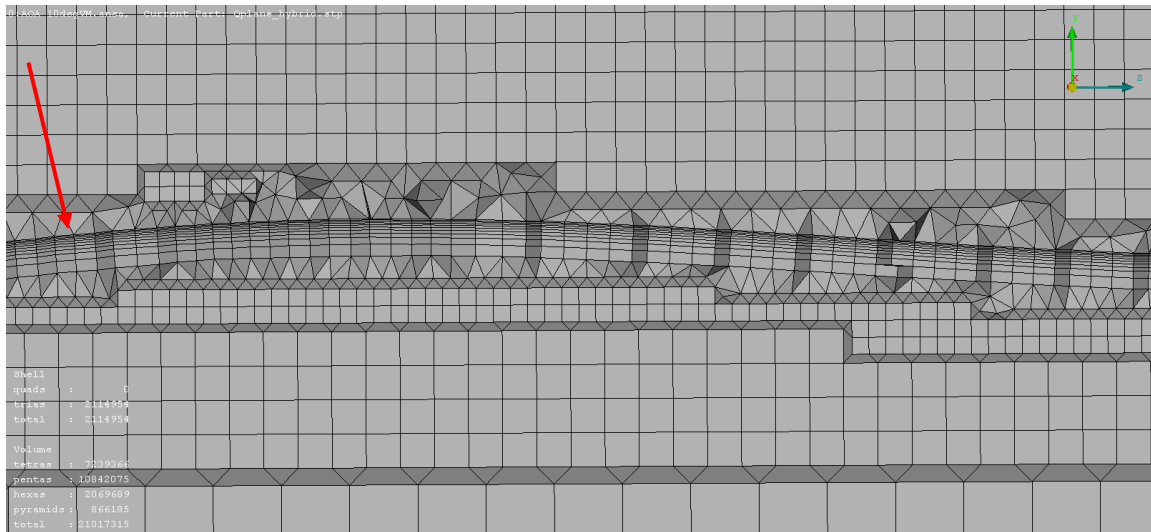
Εάν η πρόθεση είναι να επιλυθεί το ιξώδες υποστρώμα (συνήθως για προσομοιώσεις υψηλής πιστότητας), το ύψος του πρώτου κελιού πρέπει να προσαρμοστεί ώστε να επιτευχθούν τιμές y^+ κάτω από 5. Αυτό απαιτεί συχνά ένα πολύ λεπτό πλέγμα κοντά στο τοίχωμα.

Για πιο χονδροειδή πλέγματα ή όταν χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοιχώματος, μπορεί να επιδιωχθεί ένα υψηλότερο εύρος y^+ , παρακάμπτοντας την ανάγκη επίλυσης του ιξώδους υποστρώματος.

Ρόλος στην ανάλυση συστημάτων Gimbal-UAV:

Η αεροδυναμική απόδοση και η σταθερότητα ελέγχου του συστήματος αρθρωτού τροχού σε ένα UAV επηρεάζονται από την αλληλεπίδρασή του με τον περιβάλλοντα αέρα, ιδίως κοντά στην επιφάνεια. Η σωστή επίλυση ή μοντελοποίηση αυτής της περιοχής οριακού στρώματος μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερες προβλέψεις σχετικά με την απόδοση του συστήματος.

Δεδομένης της σημασίας αυτού του στρώματος, ειδικά γύρω από περιοχές όπως οι έλικες ή τα περίπλοκα μέρη του gimbal, ένας ακριβής υπολογισμός y^+ εξασφαλίζει ότι το πλέγμα είναι προσαρμοσμένο για καλύτερα αποτελέσματα. Στην περίπτωσή μας το ANSA παρέχει έναν ενσωματωμένο υπολογιστή για το y^+ , ο οποίος υπολογίζει την τιμή γύρω στο 1mm ή 0,001m.



Εικόνα 16: Διακρίνονται σε στρώσεις τα κελία υπεύθυνα να αποτυπώσουν τα οριακά στρώματα. Το αρχικό στρώμα έχει πάχος 0.001m και τα υπόλοιπα 9 αυξάνονται εκθετικά.

Με την αντιμετώπιση καθενός από αυτά τα κριτήρια πλέγματος και την κατανόηση των θεμελιωδών αρχών τους, προετοιμαζόμαστε για μια ακριβή και αξιόπιστη ανάλυση CFD του συστήματος gimbal. Στην περίπτωσή μας τα κριτήρια ποιότητας ορίστηκαν ως "Fluent Strict" υποδεικνύοντας τον επιλυτή και την ανοχή αυτών των κριτηρίων.

9.1.6 Μαθηματική μεθοδολογία στην αεροδυναμική ανάλυση

Καθώς ξεκινήσαμε να σχεδιάζουμε και να βελτιστοποιούμε το σύστημα Gimbal-UAV, έγινε φανερό ότι ενώ η κατανόηση της φυσικής και των αρχών της μηχανικής αποτελούσε το θεμέλιο, οι μαθηματικές μεθοδολογίες ήταν αυτές που προσέφεραν ακρίβεια. Τα μαθηματικά, ειδικά στον τομέα της αεροδυναμικής, παρέχουν τη γλώσσα για τη μετάφραση των θεωρητικών εννοιών σε εφαρμόσιμες γνώσεις.

9.1.6.1 Εισαγωγή

Το σύστημα Gimbal-UAV λειτουργεί σε ένα περιβάλλον γεμάτο μεταβλητές. Οι άνεμοι, οι ατμοσφαιρικές πιέσεις, τα διαφορετικά υψόμετρα, ακόμη και οι περίπλοκες γεωμετρίες του ίδιου του UAV αποτελούν ένα πολύπλοκο παζλ. Η επίλυση αυτού του απαιτεί κάτι περισσότερο από απλή διαίσθηση- απαιτεί μια συστηματική, μαθηματική προσέγγιση.

Η μαθηματική μοντελοποίηση στην αεροδυναμική μοιάζει με την κατασκευή μιας ψηφιακής αεροδυναμικής σήραγγας. Εδώ, δεν βασιζόμαστε απλώς σε παρατηρήσεις, αλλά προσομοιώνουμε πραγματικές συνθήκες, προβλέποντας πώς θα αποδώσει το Gimbal-UAV σε διάφορα σενάρια. Αυτά τα μοντέλα μας επιτρέπουν να εξετάσουμε τη δυναμική της ροής των ρευστών, την κατανομή των τάσεων, τις αναταράξεις, ακόμη και τα πιθανά σημεία αστοχίας, όλα μέσα στα όρια ενός εικονικού περιβάλλοντος.

Μια τέτοια μοντελοποίηση έχει διπλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, προσφέρει ένα οικονομικά αποδοτικό, γρήγορο πεδίο δοκιμών όπου οι ιδέες μπορούν να επαναληφθούν και να επικυρωθούν. Δεύτερον, παρέχει ακρίβεια. Ενώ οι δοκιμές στον πραγματικό κόσμο μπορεί να έχουν μεταβλητές που δεν μπορούμε να ελέγξουμε, τα μαθηματικά μοντέλα μας επιτρέπουν να ορίσουμε συγκεκριμένες συνθήκες, διασφαλίζοντας ότι συγκρίνουμε τα πάντα.

Καθώς προχωράμε σε αυτό το κεφάλαιο, θα επικεντρωθούμε σε αυτή τη μαθηματική ακρίβεια, διευκρινίζοντας τις μεθοδολογίες που αποτέλεσαν τον οδηγό μας στην αεροδυναμική ανάλυση του συστήματος Gimbal-UAV.

Στις επόμενες ενότητες, θα αναλύσουμε τις βασικές εξισώσεις που διέπουν τη δυναμική των ρευστών, θα αναπτύξουμε τις οριακές συνθήκες που είναι ζωτικής σημασίας για ακριβείς προσομοιώσεις, θα εμβαθύνουμε στις περιπλοκές της μοντελοποίησης της τύρβης και πολλά άλλα. Στόχος είναι να προσφέρουμε μια ολιστική άποψη της μαθηματικής αυστηρότητας που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυσή μας, διασφαλίζοντας ότι ο σχεδιασμός μας δεν είναι απλώς θεωρητικά ορθός, αλλά και βελτιστοποιημένος για επιδόσεις στον πραγματικό κόσμο.

9.1.6.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις

Στην καρδιά κάθε προσομοίωσης υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD) βρίσκονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις που περιγράφουν τη φυσική της ροής των ρευστών. Αυτές οι εξισώσεις αποτελούν τη βάση, πάνω στην οποία δομείται ολόκληρη η προσομοίωση. Στο πλαίσιο της αεροδυναμικής ανάλυσης του συστήματός μας Gimbal-UAV, η κατανόηση αυτών των εξισώσεων είναι επιτακτική ανάγκη για να διασφαλίσουμε ότι οι προσομοιώσεις μας εδράζονται σε στέρεα θεωρητικά θεμέλια.

Εδώ, περιγράφουμε τις κύριες εξισώσεις που έχουν αποτελέσει πηγή πληροφόρησης για την αεροδυναμική μας ανάλυση:

1. **Εξίσωση συνέχειας:** Η εξίσωση αυτή επιβεβαιώνει τη διατήρηση της μάζας στο πεδίο ροής. Για ένα ασυμπίεστο ρευστό, μπορεί να δοθεί ως εξής:

$$\nabla \cdot u = 0$$

Όπου:

- u είναι το διάνυσμα της ταχύτητας.

2. **Εξισώσεις Navier-Stokes:** Νόμος του Νεύτωνα εφαρμοσμένος στην κίνηση των ρευστών και ενσωματώνει τις επιδράσεις του ιξώδους. Για ένα ασυμπίεστο ρευστό, οι εξισώσεις είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$$

Where:

- ρ είναι η πυκνότητα του υγρού,
- t είναι ο χρόνος
- p είναι η πίεση,
- μ είναι το δυναμικό ιξώδες
- f είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό (όπως η βαρύτητα).

3. **Εξίσωση ενέργειας:** Η εξίσωση αυτή είναι απαραίτητη όταν εξετάζεται η μεταφορά θερμότητας και η διατήρηση της ενέργειας στη ροή των ρευστών:

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla e = \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi$$

Όπου:

- e είναι η εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας
- k είναι η θερμική αγωγιμότητα
- T είναι η θερμοκρασία
- ϕ αντιπροσωπεύει τις πηγές θερμότητας.

Κάθε μία από αυτές τις εξισώσεις είναι πολύπλοκη και περιέχει πλήθος πληροφοριών σχετικά με τη συμπεριφορά του ρευστού. Επιλύοντάς τις σε συνδυασμό -συχνά χρησιμοποιώντας αριθμητικές τεχνικές, δεδομένης της

πολυπλοκότητάς τους- μπορούμε να προβλέψουμε πώς θα συμπεριφερθεί το ρευστό σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Αυτή η πρόβλεψη είναι ζωτικής σημασίας για το σύστημα Gimbal-UAV, όπου η κατανόηση της ροής του αέρα γύρω από τη δομή, η πρόβλεψη της άντωσης, της αντίστασης και άλλων αεροδυναμικών δυνάμεων είναι υψίστης σημασίας για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης.

Συντελεστής άντωσης -Lift Coefficient (CL)

Ο συντελεστής άντωσης είναι ένας αριθμός χωρίς διαστάσεις που ποσοτικοποιεί την άντωση που δημιουργείται από ένα σώμα που κινείται μέσα σε ένα ρευστό, σε σχέση με την πυκνότητα του ρευστού, την περιοχή αναφοράς και την ταχύτητα ροής. Η άνωση L που υφίσταται το σώμα δίνεται από τη σχέση

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Όπου:

- ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού,
- V είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής (ταχύτητα ροής),
- S είναι η περιοχή αναφοράς.

Επαναδιατάσσοντας, ο συντελεστής ανύψωσης C_L ορίζεται ως εξής:

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 S}$$

Συντελεστής οπισθέλκουσας -Drag Coefficient (CD)

Ο συντελεστής αντίστασης αντιπροσωπεύει την αντίσταση D που παράγεται από ένα σώμα που κινείται μέσα σε ένα ρευστό, κανονικοποιημένη από την πυκνότητα του ρευστού, την επιφάνεια αναφοράς και την ταχύτητα ροής στο τετράγωνο. Η αντίσταση που υφίσταται το σώμα είναι:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

Όπου:

- ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού,
- V είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος,
- S είναι η περιοχή αναφοράς.

Έτσι, ο συντελεστής αντίστασης C_D είναι:

$$C_D = \frac{2D}{\rho V^2 S}$$

Η επιλογή αυτών των εξισώσεων και η μετέπειτα διακριτοποίησή τους αποτελεί τη βάση των προσομοιώσεων CFD. Αποτελούν το θεμέλιο πάνω στο οποίο κατασκευάζεται η εικονική αεροσήραγγα του συστήματος Gimbal-UAV. Στις επόμενες ενότητες, θα εμβαθύνουμε στον τρόπο με τον οποίο οι οριακές συνθήκες και τα μοντέλα τύρβης επαυξάνουν αυτές τις βασικές εξισώσεις, προσθέτοντας επίπεδα πολυπλοκότητας και πιστότητας στις προσομοιώσεις μας.

9.1.6.3 Οριακές συνθήκες

Στην υπολογιστική ρευστοδυναμική, η επιλογή και ο ακριβής ορισμός των οριακών συνθηκών είναι ζωτικής σημασίας. Οι συνθήκες αυτές καθορίζουν την κατάσταση της ροής στα όρια του υπολογιστικού μας πεδίου. Όταν πρόκειται για αεροδυναμική ανάλυση, ειδικά για τέτοια συστήματα, οι συνθήκες αυτές δεν καθορίζουν μόνο την εισροή και την εκροή του πεδίου, αλλά και τυχόν στερεά τοιχώματα (όπως η επιφάνεια του UAV ή του gimbal), γραμμές συμμετρίας και μερικές φορές ακόμη και τις συνθήκες του μακρινού πεδίου ή της ελεύθερης ροής.

Οι οριακές συνθήκες εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς στην CFD:

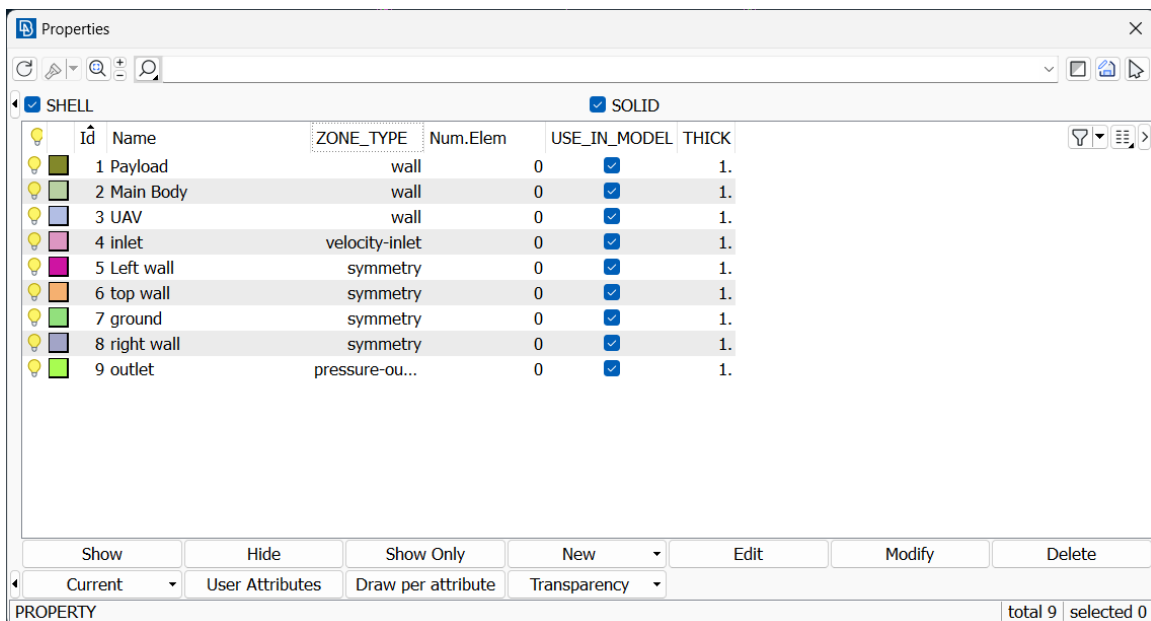
- **Αρχικοποίηση του προβλήματος:** Παρέχουν τις αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιεί ο επιλύτης ως σημείο εκκίνησης. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας, καθώς ένα καλά καθορισμένο σημείο εκκίνησης μπορεί να μειώσει δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο.
- **Προδιαγραφές ροής:** Με τον καθορισμό των ταχυτήτων εισόδου, των πιέσεων και των παραμέτρων τύρβης, καθορίζεται η φύση της εισερχόμενης ροής στο υπολογιστικό πεδίο. Αυτή μπορεί να είναι μια ομοιόμορφη ροή, μια ροή με προφίλ ή ακόμη και μια περιστρεφόμενη ροή, με βάση το συγκεκριμένο σενάριο.
- **Επιφανειακές αλληλεπιδράσεις:** Για επιφάνειες όπως το UAV και το gimbal, μπορεί να χρησιμοποιηθούν συνθήκες μη ολίσθησης, που σημαίνει ότι η ταχύτητα του ρευστού στο τοίχωμα είναι μηδενική. Αυτό είναι σημαντικό κατά την εξέταση της ανάπτυξης οριακού στρώματος και άλλων χαρακτηριστικών ροής κοντά στο τοίχωμα.
- **Συνθήκες εκροής:** Στην έξοδο, ειδικές συνθήκες, συχνά προ εκτιμώμενες από το εσωτερικό, εξασφαλίζουν ότι η ροή εξέρχεται ομαλά από το πεδίο χωρίς να προκαλεί τεχνητές διαταραχές.

- **Συμμετρία και περιοδικότητα:** Σε ορισμένες περιπτώσεις, μοντελοποιείται μόνο ένα τμήμα της πραγματικής γεωμετρίας, βασιζόμενο σε συνθήκες συμμετρίας ή περιοδικότητας για την αναπαράσταση του πλήρους συστήματος. Αυτό μπορεί να εξοικονομήσει υπολογιστικό χρόνο, ενώ εξακολουθεί να αποτυπώνει την απαραίτητη φυσική της ροής.

Για το σύστημα Gimbal-UAV, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ρευστού (αέρα) και των στερεών επιφανειών. Η τύρβη που δημιουργείται από την κίνηση του UAV και τα περιστροφικά στοιχεία του συστήματος Gimbal ήταν πρωταρχικού ενδιαφέροντος. Με τον ακριβή ορισμό αυτών των οριακών συνθηκών εξασφαλίσαμε την πιστή αναπαράσταση των φαινομένων ροής.

Ο προσεκτικός ορισμός των οριακών συνθηκών δεν είναι απλώς μια τεχνική αναγκαιότητα- αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ των σεναρίων του πραγματικού κόσμου και της υπολογιστικής αναπαράστασής τους. Μόνο με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες μπορεί η προσομοίωση να συντονιστεί πραγματικά με τη φυσική πραγματικότητα.

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες οριακές συνθήκες:



| Id | Name | ZONE_TYPE | Num.Elem | USE_IN_MODEL | THICK |
|----|------------|----------------|----------|-------------------------------------|-------|
| 1 | Payload | wall | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 2 | Main Body | wall | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 3 | UAV | wall | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 4 | inlet | velocity-inlet | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 5 | Left wall | symmetry | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 6 | top wall | symmetry | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 7 | ground | symmetry | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 8 | right wall | symmetry | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |
| 9 | outlet | pressure-ou... | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1. |

Εικόνα 17: Λίστα οριακών συνθηκών

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες.

- **Τοίχος (Wall):** Τοίχος ονομάζουμε οτιδήποτε επηρεάζει το ρευστό μας. Έτσι ονομάζουμε τα σώματα ενδιαφέροντος που μελετάμε.

- **Συμμετρία (Symmetry):** Συμμετρία ονομάζουμε συνήθως σώματα που είναι μέσα στην ανάλυση μας αλλά δεν επηρεάζουν στον φυσικό κόσμο. Για παράδειγμα τα τοιχώματα της εικονικής μας σήραγγας. Έτσι ο λύτης συμπεριφέρεται σε αυτά σαν να μην έχουν συντελεστή τριβής και απλοποιεί την ανάλυση. Το όνομα έχει παρθεί λόγω ότι όταν ένα σώμα ενδιαφέροντος είναι συμμετρικό υπάρχει ένας τοίχος που ορίζει την συμμετρία.
- **Είσοδος- Ταχύτητας (Velocity-Inlet):** Έτσι ορίζουμε το τοίχος ή τοιχώματα που ξεκινάει η ροή του ρευστού μας, με συντελεστή την ταχύτητα. Επίσης μπορούμε να ορίσουμε τον λευκό θόρυβο που μπορεί να υπάρχει στο ρευστό.
- **Έξοδος-Πίεσης (Pressure-Outlet):** Η έξοδος πίεσης είναι το τοίχωμα ή τα τοιχώματα που ορίζουν τα αριθμητικά δεδομένα με βάση την πίεση και την έξοδο του ρευστού από το σύστημα.

9.1.6.4 Μοντελοποίηση τύρβης

Η τύρβη, με τη χαοτική και ακανόνιστη κίνησή της, αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα της ρευστοδυναμικής. Σε πολλές αεροδυναμικές εφαρμογές, ιδίως σε αυτές που αφορούν υψηλούς αριθμούς Reynolds, όπως συμβαίνει στα συστήματα UAV, η τύρβη παίζει κυρίαρχο ρόλο. Η μοντελοποίηση της τύρβης είναι απαραίτητη για την ακριβή αποτύπωση των χαρακτηριστικών της ροής, της αντίστασης, της άντωσης και άλλων αεροδυναμικών δυνάμεων που δρουν σε ένα σύστημα.

Δεδομένης της πολυπλοκότητας των τυρβωδών ροών, οι άμεσες αριθμητικές προσομοιώσεις (DNS) που επιλύουν τις εξισώσεις Navier-Stokes χωρίς καμία μοντελοποίηση είναι υπολογιστικά εντατικές και συχνά μη εφικτές για πρακτικές εφαρμογές μηχανικής. Έτσι, καταφεύγουμε σε μοντέλα τύρβης που παρέχουν προσεγγίσεις των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής.

Τύποι μοντέλων τύρβης:

Μοντέλα Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS): Αυτά τα μοντέλα υπολογίζουν κατά μέσο όρο τις εξισώσεις κίνησης με την πάροδο του χρόνου για να φιλτράρουν τις τυρβώδεις διακυμάνσεις μικρής κλίμακας, με αποτέλεσμα να προκύπτουν πρόσθετοι όροι που χρειάζονται μοντελοποίηση. Τα συνήθη μοντέλα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν:

- **Μοντέλο k-ε:** Ένα μοντέλο δύο εξισώσεων που βασίζεται στην κινητική ενέργεια της τύρβης (k) και στο ρυθμό διάχυσης (ε).

Για k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho$$

Για ε:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

- **Μοντέλο k-ω:** Ένα άλλο μοντέλο δύο εξισώσεων που χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια της τύρβης (k) και τον ειδικό ρυθμό διάχυσης της τύρβης (ω).

Για ω:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

Μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων στροβίλων (LES): Τα μοντέλα LES επιλύουν απευθείας τις μεγάλες δομές που περιέχουν ενέργεια, ενώ μοντελοποιούν τις μικρότερες κλίμακες. Προσφέρει μια ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής δαπάνης και ακρίβειας.

Μοντέλα προσομοίωσης δινών (DES): Αυτή η προσέγγιση είναι ένα υβρίδιο μεταξύ RANS και LES, όπου η ροή κοντά στα τοιχώματα μοντελοποιείται με τη χρήση RANS και μακριά από το τοίχωμα χρησιμοποιείται η LES.

Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS): Όπως αναφέρθηκε, η DNS επιλύει τις εξισώσεις Navier-Stokes απευθείας χωρίς καμία μοντελοποίηση της τύρβης. Είναι η πιο ακριβής αλλά και η πιο δαπανηρή υπολογιστικά μέθοδος.

Για το σύστημα Gimbal-UAV, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, την ταχύτητα και το εύρος των συνθηκών λειτουργίας, επιλέχθηκε το μοντέλο k-ε SST. Το μοντέλο αυτό κρίθηκε κατάλληλο για την αποτύπωση των περιπλοκών της τυρβώδους ροής γύρω από τα εξαρτήματα του συστήματος χωρίς να επιβαρύνεται με απαγορευτικό υπολογιστικό κόστος. Η επιλογή του μοντέλου τύρβης βασίστηκε στην

αποδεδειγμένη ικανότητά του σε παρόμοιες εφαρμογές, καθώς και στην ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής απόδοσης.

Συμπερασματικά, ενώ κανένα μοντέλο τύρβης δεν είναι καθολικά "τέλειο", η επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου με βάση τα χαρακτηριστικά του προβλήματος και η κατανόηση των περιορισμών του είναι ζωτικής σημασίας. Για την ανάλυση του συστήματός μας Gimbal-UAV, το επιλεγμένο μοντέλο τύρβης παρείχε πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αεροδυναμική απόδοση και τις πιθανές περιοχές βελτίωσης.

9.1.6.5 Μέθοδοι επίλυσης στο ANSYS Fluent

Κατά την ανάλυση της αεροδυναμικής του συστήματος, η επιλογή του λογισμικού και των σχετικών μεθόδων επίλυσης είναι υψίστης σημασίας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το ANSYS Fluent, ένα λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Το Fluent προσφέρει μια σειρά από μεθόδους επίλυσης προσαρμοσμένες στην πολυπλοκότητα των διαφόρων προβλημάτων ροής, εξασφαλίζοντας ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Εδώ, θα συζητήσουμε τις κύριες μεθόδους επίλυσης που είναι διαθέσιμες στο Fluent και τη σημασία τους για το σύστημα Gimbal-UAV.

9.1.6.5.1 Επαναληπτικές μέθοδοι στο Fluent

Το ANSYS Fluent χρησιμοποιεί επαναληπτικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων της ρευστοδυναμικής. Αυτές οι μέθοδοι έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν μια αρχική εικασία της λύσης μέσω διαδοχικών επαναλήψεων μέχρι να επιτευχθεί ένα καθορισμένο κριτήριο σύγκλισης. Η επιλογή της επαναληπτικής μεθόδου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια, τη σταθερότητα και την υπολογιστική αποδοτικότητα της προσομοίωσης

Ατμοσφαιρικός αέρας και συμπίεστικότητα

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι εγγενώς συμπιέσιμος. Ωστόσο, η απόφαση για την αντιμετώπισή του ως συμπιεζόμενου ή ασυμπίεστου σε μια προσομοίωση CFD εξαρτάται από τις συγκεκριμένες συνθήκες και τους στόχους της ανάλυσης. Για ροές χαμηλής ταχύτητας με αριθμούς Mach μικρότερους από 0,3, οι μεταβολές της πυκνότητας είναι ελάχιστες και η ροή μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ασυμπίεστη. Ωστόσο, για υψηλότερες ταχύτητες, ειδικά καθώς ο αριθμός Mach πλησιάζει ή υπερβαίνει το 1, τα συμπεστικά φαινόμενα γίνονται σημαντικά, καθιστώντας αναγκαία μια προσομοίωση ροής με συμπεστικό τρόπο.

Διαχωρισμένοι vs. συζευγμένοι επιλύτες

Το Fluent προσφέρει δύο βασικούς επαναληπτικούς επιλυτές με βάση τη συμπίεστικότητα της ροής:

- **Επιλύτης με βάση την πίεση:** Κατάλληλος για ασυμπίεστες και ελαφρώς συμπιεζόμενες ροές, αυτός ο επιλύτης επιλέχθηκε για το σύστημα Gimbal-UAV λόγω της λειτουργίας του σε υποηχητικές ταχύτητες. Χρησιμοποιεί μια διαχωρισμένη προσέγγιση, επιλύοντας χωριστά τις εξισώσεις συνέχειας με βάση την ορμή και την πίεση.
- **Επιλύτης βασισμένος στην πυκνότητα:** Αυτός ο επιλύτης, προσαρμοσμένος για συμπιεζόμενες ροές υψηλής ταχύτητας, δεν ήταν η πρωταρχική επιλογή για το σύστημά μας, αλλά είναι απαραίτητος για το χειρισμό κρουστικών κυμάτων και ταχέων αλλαγών ροής.

Σχήματα διακριτοποίησης

Η διακριτοποίηση είναι ένα θεμελιώδες βήμα στις προσομοιώσεις Υπολογιστικής Δυναμικής Ρευστών (CFD). Περιλαμβάνει τη μετατροπή των συνεχών εξισώσεων που διέπουν τη ροή των ρευστών σε διακριτή μορφή κατάλληλη για αριθμητική επίλυση σε υπολογιστικό πλέγμα. Το ANSYS Fluent προσφέρει μια ποικιλία σχημάτων διακριτοποίησης για την κάλυψη διαφορετικών καθεστώτων ροής και απαιτήσεων ακρίβειας. (4) (5) (6)

Χωρική διακριτοποίηση

Η χωρική διακριτοποίηση ασχολείται με την προσέγγιση των χωρικών παραγώγων στις κυρίαρχες εξισώσεις. Το Fluent παρέχει διάφορα σχήματα:

- **First-Order Upwind:** Αυτή είναι η απλούστερη μορφή διακριτοποίησης. Χρησιμοποιεί τιμές στην "ανοδική" πλευρά του όγκου ελέγχου. Ενώ είναι λιγότερο δαπανηρή υπολογιστικά και εγγυάται σταθερότητα, είναι λιγότερο ακριβής λόγω της διαχυτικής φύσης της. (7)
- **Second-Order Upwind:** Για το σύστημά μας Gimbal-UAV, επιλέχθηκε το σύστημα ανοδικού δεύτερης τάξης. Χρησιμοποιεί μια γραμμική παρεμβολή των τιμών από το κεντροειδές του όγκου ελέγχου στο κέντρο του προσώπου. Αυτό το σχήμα προσφέρει μια ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και σταθερότητας, αποτυπώνοντας τα χαρακτηριστικά της ροής με μεγαλύτερη ακρίβεια από το σχήμα πρώτης τάξης. (7)

- **Central Differencing:** Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί τιμές τόσο από την ανοδική όσο και από την καθοδική πλευρά του όγκου ελέγχου. Είναι πιο ακριβές από τα σχήματα upwind, αλλά μπορεί να εισάγει μη φυσικές ταλαντώσεις στη λύση, ειδικά κοντά σε απότομες κλίσεις. (5)

Διακριτοποίηση χρόνου

Για μεταβατικές προσομοιώσεις, πρέπει επίσης να διακριτοποιηθούν οι χρονικές παράγωγοι στις κυβερνητικές εξισώσεις:

- **Implicit Methods:** Αυτές οι μέθοδοι, όπως το σχήμα Crank-Nicolson, περιλαμβάνουν τιμές τόσο στο τρέχον όσο και στο επόμενο χρονικό βήμα. Είναι άνευ όρων σταθερές, αλλά απαιτούν την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων σε κάθε χρονικό βήμα. (5)
- **Explicit Methods:** Μέθοδοι όπως το σύστημα Forward Euler χρησιμοποιούν μόνο τιμές από το τρέχον χρονικό βήμα. Είναι υπό όρους σταθερές, που σημαίνει ότι το χρονικό βήμα πρέπει να είναι αρκετά μικρό για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα. (6)

Σύζευξη πίεσης-ταχύτητας

Στις προσομοιώσεις CFD, ειδικά για ασυμπίεστες ροές, τα πεδία πίεσης και ταχύτητας είναι ισχυρά συνδεδεμένα. Το Fluent προσφέρει αλγορίθμους για τον χειρισμό αυτής της σύζευξης:

- **SIMPLE:** Ο αλγόριθμος αυτός, ακρωνύμιο των λέξεων Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, διορθώνει επαναληπτικά τα πεδία ταχύτητας και πίεσης έως ότου ικανοποιήσουν τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας. (4)
- **PISO:** Η μέθοδος Pressure-Implicit with Splitting of Operators είναι πιο κατάλληλη για μεταβατικές προσομοιώσεις, προσφέροντας ταχύτερη σύγκλιση για χρονικά εξαρτώμενες ροές. (5)

Η επιλογή των συστημάτων διακριτοποίησης στο Fluent είναι κρίσιμη, καθώς επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια, τη σταθερότητα και το υπολογιστικό κόστος της

προσομοίωσης. Για το δικό μας σύστημα, δεδομένων των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ροής και της ανάγκης για ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής απόδοσης, το σχήμα χωρικής διακριτοποίησης δεύτερης τάξης upwind κρίθηκε ως το πλέον κατάλληλο.

9.1.6.5.2 Σύγκλιση και παρακολούθηση

Η σύγκλιση σε μια προσομοίωση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) εξασφαλίζει ότι η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης έχει φτάσει σε μια κατάσταση όπου περαιτέρω επαναλήψεις δεν οδηγούν σε σημαντικές αλλαγές στη λύση. Η παρακολούθηση της σύγκλισης είναι ζωτικής σημασίας για την εγγύηση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Το ANSYS Fluent παρέχει μια ολοκληρωμένη σειρά εργαλείων και κριτηρίων για την παρακολούθηση και την επίτευξη σύγκλισης. (8) (9)

Residuals

Τα residuals αντιπροσωπεύουν την ανισορροπία στις κυβερνητικές εξισώσεις και αποτελούν πρωταρχικό δείκτη σύγκλισης στο Fluent:

- **Absolute Residuals:** Αυτές είναι οι ακατέργαστες ανισορροπίες στις εξισώσεις διακυβέρνησης. Η μείωση των απόλυτων υπολοίπων υποδηλώνει πρόοδο προς μια συγκλίνουσα λύση.
- **Normalized Residuals:** Πρόκειται για τα απόλυτα κατάλοιπα κανονικοποιημένα με βάση μια τιμή αναφοράς, συχνά το αρχικό κατάλοιπο. Για την ανάλυση του συστήματος Gimbal-UAV, ορίστηκε ένα αυστηρό όριο υπολοίπου 10^{-4} για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια. (10)

Σημεία παρακολούθησης

Το Fluent επιτρέπει στους χρήστες να ορίζουν συγκεκριμένα σημεία ή περιοχές στο πεδίο για την παρακολούθηση συγκεκριμένων ποσοτήτων ροής, όπως η ταχύτητα, η πίεση ή η θερμοκρασία. Η παρακολούθηση αυτών των ποσοτήτων κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά σύγκλισης και τη φυσική εγκυρότητα της λύσης. (11)

Κριτήρια σύγκλισης

Ο καθορισμός κατάλληλων κριτηρίων σύγκλισης είναι ζωτικής σημασίας:

- **Υπολειμματικό κατώφλι:** Όπως αναφέρθηκε, για την ανάλυσή μας, ορίστηκε όριο υπολειμμάτων 10^{-3} .

- **Ανισορροπίες λύσης:** Το Fluent ελέγχει τις συνολικές ανισορροπίες για τη μάζα και την ορμή για να διασφαλίσει ότι είναι κάτω από τα καθορισμένα όρια.
- **Όριο επανάληψης:** Ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων μπορεί να οριστεί ως κριτήριο διακοπής, διασφαλίζοντας ότι η προσομοίωση δεν θα εκτελείται επ' άπειρον. Στην περίπτωση μας το όριο αυτό τέθηκε στις 1200 επαναλήψεις. Αρκετές για να δώσει στην ροή να αναπτυχθεί πλήρως και να μην είναι ιδιαίτερα μακροσκελής διαδικασία.

Τεχνικές επιτάχυνσης της σύγκλισης

Το Fluent ενσωματώνει διάφορες τεχνικές για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της επαναληπτικής διαδικασίας:

- **Υπο-χαλάρωση- (Under Relaxation):** Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την προσαρμογή των υπολογισμένων τιμών κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης για την αποφυγή της απόκλισης. Με τη χρήση ενός συντελεστή (μικρότερου από ένα) για την υποχαλάρωση της λύσης, ενισχύεται η σταθερότητα, ιδίως σε προβλήματα με ισχυρή σύζευξη μεταξύ των μεταβλητών.
- **Μέθοδοι πολλαπλών πλεγμάτων - (Multigrid Methods):** Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν μια ιεραρχία πλεγμάτων για να επιταχύνουν τη σύγκλιση της λύσης. Επιλύοντας τις εξισώσεις σε πιο χονδροειδή πλέγματα και μεταφέροντας στη συνέχεια τη λύση σε πιο λεπτά πλέγματα, η μέθοδος πολλαπλών πλεγμάτων μπορεί να εξομαλύνει αποτελεσματικά τα σφάλματα και να επιτύχει ταχύτερη σύγκλιση. (12)

Η προσέγγιση του πλέγματος σε τρία επίπεδα:

Αναγνωρίζοντας τις περιπλοκές του συστήματος gimbal και τις ποικίλες αεροδυναμικές προκλήσεις που παρουσίαζε, αποφασίσαμε να παρεκκλίνουμε από την παραδοσιακή προσέγγιση. Αντί για μεμονωμένες ρυθμίσεις πλέγματος, καθιερώσαμε ένα τριπλό σύστημα πλέγματος.

Αυτά περιλάμβαναν:

- **Χοντρό πλέγμα:** Αυτό το πλέγμα, με τον μικρότερο αριθμό στοιχείων, επέτρεψε γρήγορες προκαταρκτικές αναλύσεις. Λειτουργήσε ως το πρώτο

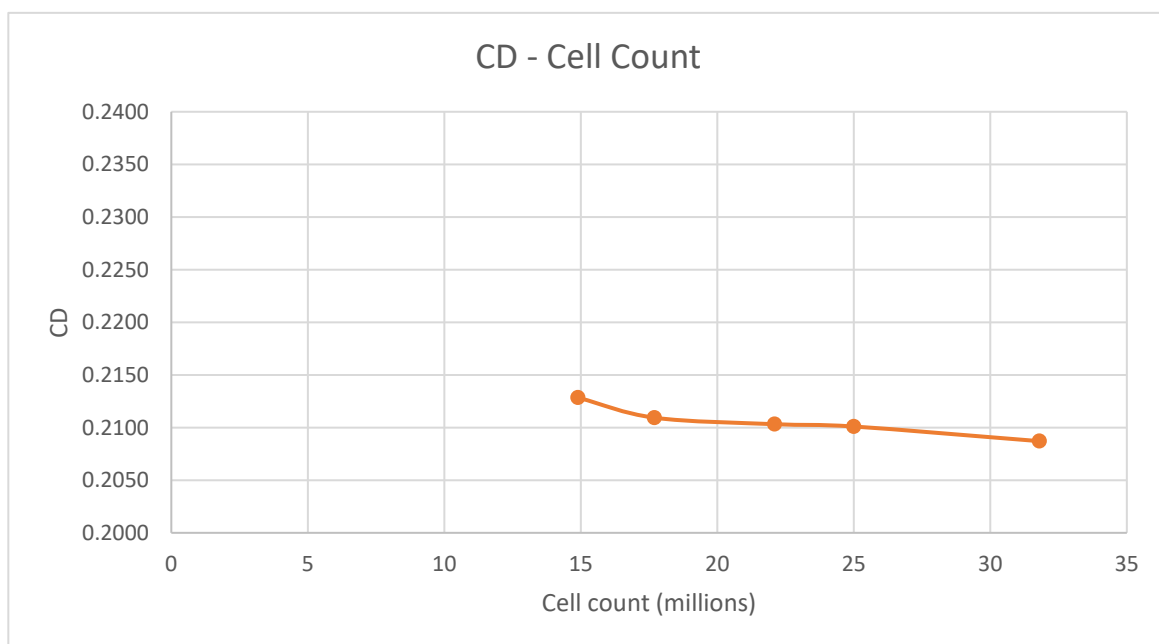
βήμα για την κατανόηση των γενικών χαρακτηριστικών ροής γύρω από το gimbal.

- **Ενδιάμεσο πλέγμα:** Με σταθερό ρυθμό αύξησης του αριθμού των στοιχείων σε σύγκριση με το χονδρό πλέγμα, αυτή η ρύθμιση προσέφερε μια μέση λύση. Παρείχε βελτιωμένη λεπτομέρεια ροής, διατηρώντας παράλληλα σχετικά ταχύτερο υπολογιστικό χρόνο.
- **Λεπτό πλέγμα:** Το πιο λεπτομερές από τα τρία, αυτό το πλέγμα είχε αριθμό στοιχείων μεγαλύτερο από το ενδιάμεσο πλέγμα. Σχεδιάστηκε για να αποτυπώσει τις λεπτομέρειες της ροής, ειδικά στις περίπλοκες περιοχές του συστήματος του αρθρωτού μοχλού.

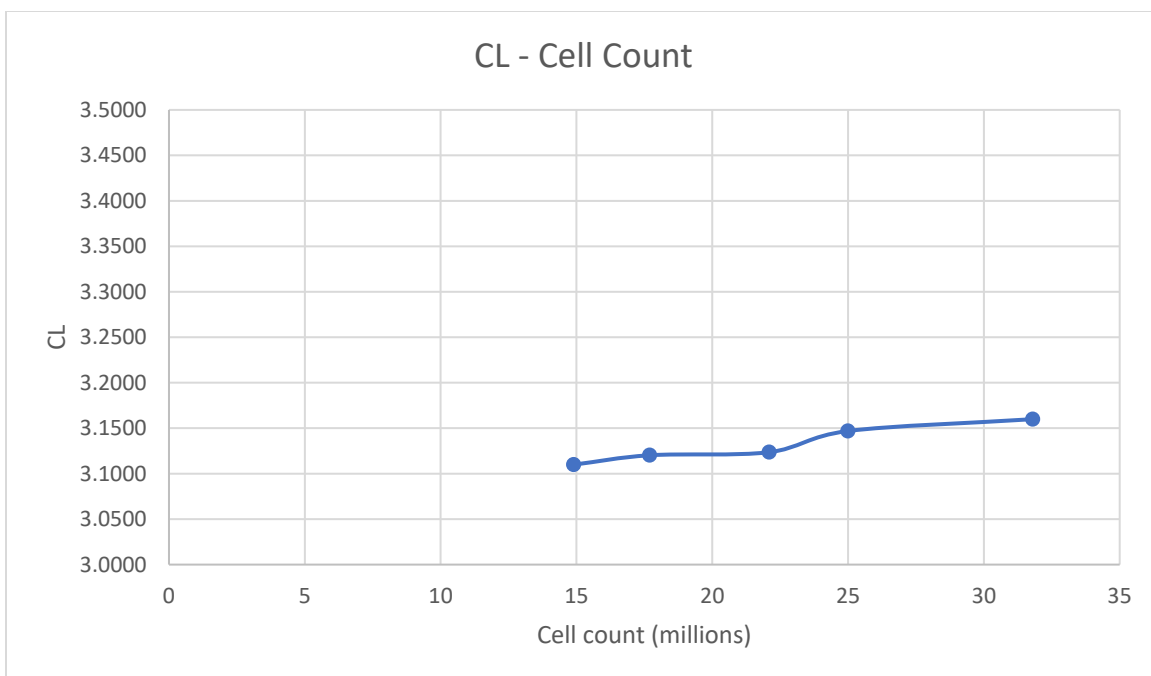
Σύγκλιση προς τον βέλτιστο αριθμό στοιχείων:

Εκτελώντας προσομοιώσεις σε αυτές τις τρεις διαβαθμίσεις πλέγματος, επιδιώξαμε να συγκλίνουμε σε έναν αριθμό στοιχείων που να συνδυάζει την ακρίβεια με την υπολογιστική αποδοτικότητα.

Η επαναληπτική διαδικασία περιελάμβανε την ανάλυση των αποτελεσμάτων από το χονδρό πλέγμα, τη βελτίωσή του με βάση τα αποτελέσματα και, στη συνέχεια, τη σταδιακή μετάβαση στα λεπτότερα πλέγματα. Αυτή η μεθοδολογία εξασφάλιζε ότι το τελικό επιλεγμένο πλέγμα δεν ήταν ούτε υπερβολικά υπολογιστικό ούτε ελλιπές σε λεπτομέρειες. Έτσι, επιτυχαμε την ανεξαρτησία του πλέγματος.



Πίνακας 3: Διάγραμμα αποτελεσμάτων CD ανάμεσα στα διαφορετικά πλέγματα.



Πίνακας 4: Διάγραμμα αποτελεσμάτων CD ανάμεσα στα διαφορετικά πλέγματα

| Cell count (millions) | CL | CD | ΔCI | ΔCd |
|-----------------------|--------|--------|-------------|-------------|
| 14.9 | 3.1099 | 0.2128 | - | - |
| 17.7 | 3.1202 | 0.2109 | 0.33% | 0.90% |
| 22.1 | 3.1236 | 0.2103 | 0.11% | 0.29% |
| 25 | 3.1469 | 0.2101 | 0.74% | 0.10% |
| 31.8 | 3.1599 | 0.2087 | 0.41% | 0.66% |

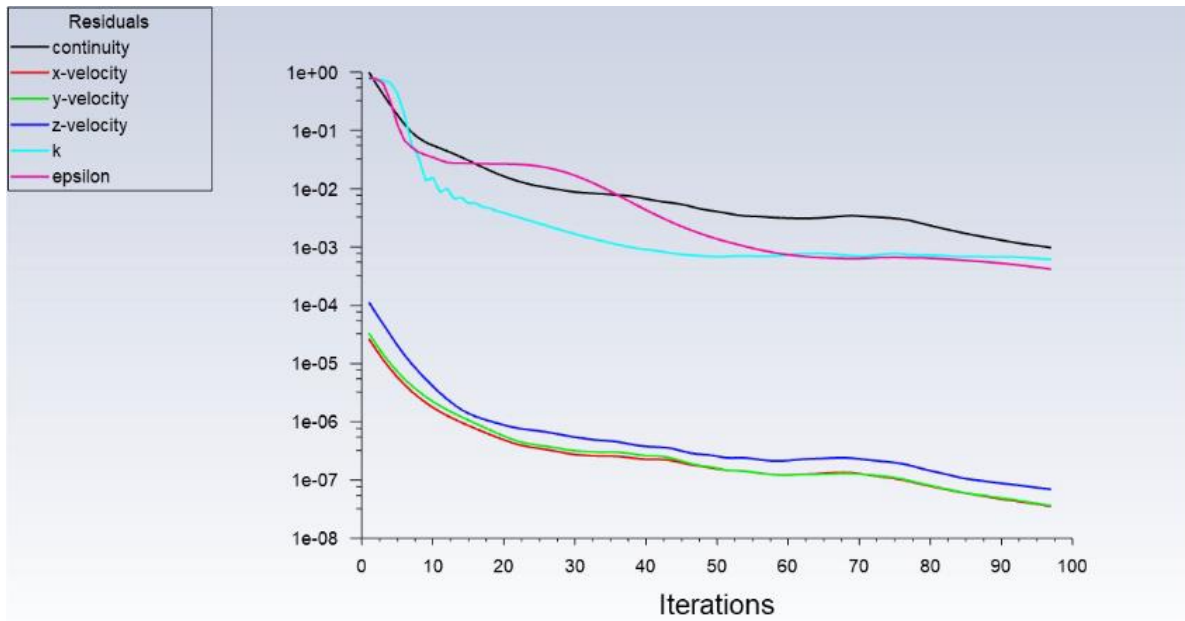
Πίνακας 5: Πίνακας με το ποσοστό διαφοράς από πλέγμα σε πλέγμα.

Παρατηρούμε ότι στο στάδιο των 31.8εκ. κελίων υπάρχει απόκλιση. Αυτό συμβαίνει λόγω αστάθειας της λύσης, αριθμητικών λαθών ή άλλων σφαλμάτων κατά την επίλυση. Αυτό μπορεί να παρουσιάζεται σαν διακύμανση ή σαν απόκλιση. Στην δική μας περίπτωση για το τι χαρακτηρίζει αυτήν την ανωμαλία (διακύμανση ή απόκλιση) χρήζει περεταίρω αναλύσεις σε πυκνότερα πλέγματα. Δυστυχώς αυτό δεν μπορούσε να επιτευχθεί με τα υπολογιστικό εξοπλισμό που κατέχουμε.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία επιλέχθηκε το πλέγμα των 22,1 εκατομμυρίων κελίων, διότι παρουσιάζει το μικρότερο ποσοστό μεταβολής των αποτελεσμάτων από το προηγούμενο πιο αραιό πλέγμα.

Η επίτευξη σύγκλισης είναι υψίστης σημασίας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αξιοποιώντας τις τεχνικές επιτάχυνσης της

σύγκλισης, εξασφάλισαμε μια στιβαρή και ακριβή αναπαράσταση των αεροδυναμικών αλληλεπιδράσεων στο σύστημα. Με την επιτυχία ότι όλες οι συγκλίσεις πέρασαν το κατώφλι των 10^{-3} και 10^{-6} .



Εικόνα 18: Πίνακας υπολειμμάτων και το κατώφλι σύγκλισης.

9.1.6.6 Επικύρωση και επαλήθευση

Στο πεδίο των προσομοιώσεων υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD), η επικύρωση και η επαλήθευση (Validation & Verification) είναι απαραίτητα βήματα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Οι διαδικασίες αυτές επιβεβαιώνουν ότι το μαθηματικό μοντέλο αναπαριστά σωστά τα φυσικά φαινόμενα και ότι η αριθμητική λύση επιλύει με ακρίβεια το μαθηματικό μοντέλο. (13)

Επαλήθευση

Η επαλήθευση είναι η διαδικασία προσδιορισμού ότι η υλοποίηση ενός μοντέλου αντιπροσωπεύει με ακρίβεια την εννοιολογική περιγραφή του μοντέλου και τη λύση του μοντέλου από τον προγραμματιστή. Εξασφαλίζει ότι οι εξισώσεις επιλύονται σωστά.

- **Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος:** Μία από τις κύριες μεθόδους επαλήθευσης. Περιλαμβάνει την εκτέλεση της προσομοίωσης σε

διαφορετικά μεγέθη πλέγματος και τη διασφάλιση ότι τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν σημαντικά με τη βελτίωση του πλέγματος. Αυτό εξασφαλίζει ότι η λύση δεν εξαρτάται από το μέγεθος του πλέγματος και, επομένως, είναι " ανεξάρτητο από το πλέγμα ". (14)

- **Επαλήθευση κώδικα:** Αυτό περιλαμβάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από το λογισμικό CFD με αναλυτικές λύσεις ή αποτελέσματα από άλλους καθιερωμένους κώδικες CFD. Εξασφαλίζει ότι το λογισμικό λειτουργεί όπως προβλέπεται. (15) Στην δική μας περίπτωση επειδή χρησιμοποιήσαμε ένα πολύ γνωστό εμπορικό λογισμικό δεν χρειάστηκε να το επαληθεύσουμε αριθμητικά.
- **Ευαισθησία χρονικού βήματος:** Για τις προσομοιώσεις μεταβατικών καταστάσεων, είναι ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα δεν είναι υπερβολικά ευαίσθητα στο μέγεθος του χρονικού βήματος. Μεταβάλλοντας το χρονικό βήμα και παρατηρώντας τη σταθερότητα και τη σύγκλιση της λύσης, μπορεί κανείς να εξακριβώσει το βέλτιστο χρονικό βήμα για την προσομοίωση. (16)

Επικύρωση

Η επικύρωση είναι η διαδικασία προσδιορισμού του βαθμού στον οποίο ένα μοντέλο αποτελεί ακριβή αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου από την άποψη των προβλεπόμενων χρήσεων του μοντέλου. Εξασφαλίζει ότι χρησιμοποιούνται οι σωστές εξισώσεις και μοντέλα.

- **Πειραματική σύγκριση:** Η πιο άμεση μέθοδος επικύρωσης. Περιλαμβάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων CFD με πειραματικά δεδομένα. Εάν τα αποτελέσματα CFD ταιριάζουν με τα πειραματικά δεδομένα, το μοντέλο θεωρείται επικυρωμένο για το συγκεκριμένο σενάριο. (14)
- **Χρήση καθιερωμένων περιπτώσεων:** Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με καλά τεκμηριωμένες και καθιερωμένες περιπτώσεις αναφοράς μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως μέθοδος επικύρωσης.
- **Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας:** Αυτό περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του επιπέδου αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων CFD. Κάθε προσομοίωση έχει κάποιο βαθμό αβεβαιότητας, είτε από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται, είτε από τις οριακές συνθήκες, είτε από τις αρχικές συνθήκες. Η ποσοτικοποίηση αυτής της αβεβαιότητας παρέχει ένα μέτρο εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα. (16)

9.1.6.7 Μετεπεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων

Η μετα-επεξεργασία είναι μια κρίσιμη φάση στη διαδικασία ανάλυσης. Περιλαμβάνει την ερμηνεία και την οπτικοποίηση των υπολογισμένων αποτελεσμάτων, επιτρέποντας τη βαθύτερη κατανόηση της δυναμικής της ροής και της απόδοσης του συστήματος. Για το σύστημά μας, η μετα-επεξεργασία ήταν καθοριστική για την εξαγωγή ουσιαστικών πληροφοριών από τα δεδομένα προσομοίωσης.

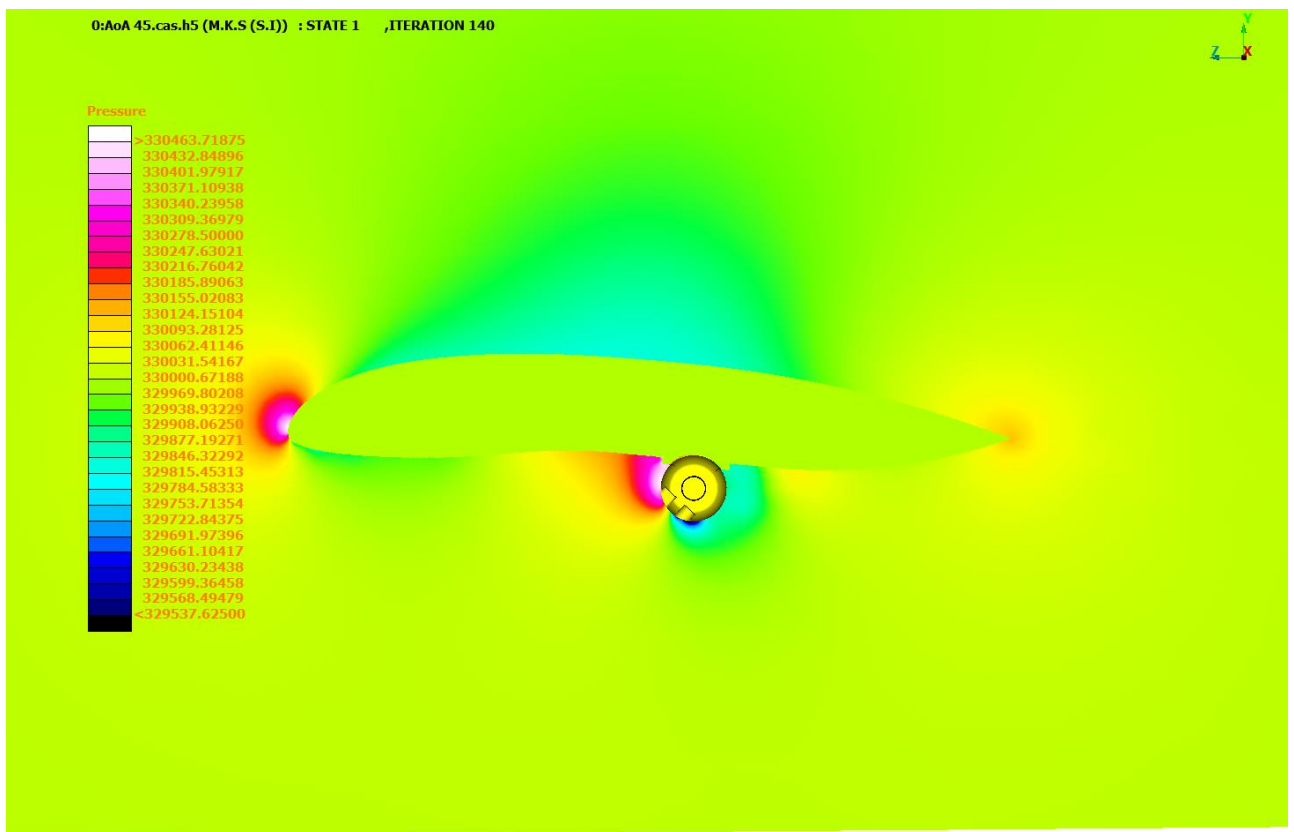
Τεχνικές οπτικοποίησης

- **Περιγράμματα και ισοεπιφάνειες:** Αυτές οι γραφικές αναπαραστάσεις χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς για την απεικόνιση κλιμακωτών μεγεθών όπως η πίεση, το μέγεθος της ταχύτητας και η ένταση της τύρβης. Αναλύοντας αυτά τα περιγράμματα, μπορέσαμε να διακρίνουμε την κατανομή της ροής γύρω από το σύστημα, εντοπίζοντας περιοχές υψηλής και χαμηλής πίεσης και περιοχές δυνητικού διαχωρισμού της ροής.
- **Γραμμές ροής και γραμμές πορείας:** Αυτές οι μέθοδοι απεικόνισης παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της τροχιάς της ροής και των μοτίβων κυκλοφορίας. Ειδικά γύρω από περίπλοκες γεωμετρίες, όπως η αρθρωτή άρθρωση, η κατανόηση της διαδρομής της ροής ήταν ζωτικής σημασίας για τον εντοπισμό σχηματισμών δίνης, ζωνών ανακυκλοφορίας και πιθανών αεροδυναμικών προκλήσεων.
- **Διανυσματικά διαγράμματα:** Αυτά τα διαγράμματα, που αντιπροσωπεύουν τόσο την κατεύθυνση όσο και το μέγεθος της ταχύτητας, ήταν πολύτιμα για τον εντοπισμό περιοχών ανακυκλοφορίας, διαχωρισμού της ροής και περιοχών υψηλής ορμής. Μελετώντας τα διανυσματικά διαγράμματα, μπορούσαμε επίσης να εκτιμήσουμε την αποτελεσματικότητα των οριακών μας συνθηκών και τη συνολική σταθερότητα της ροής.

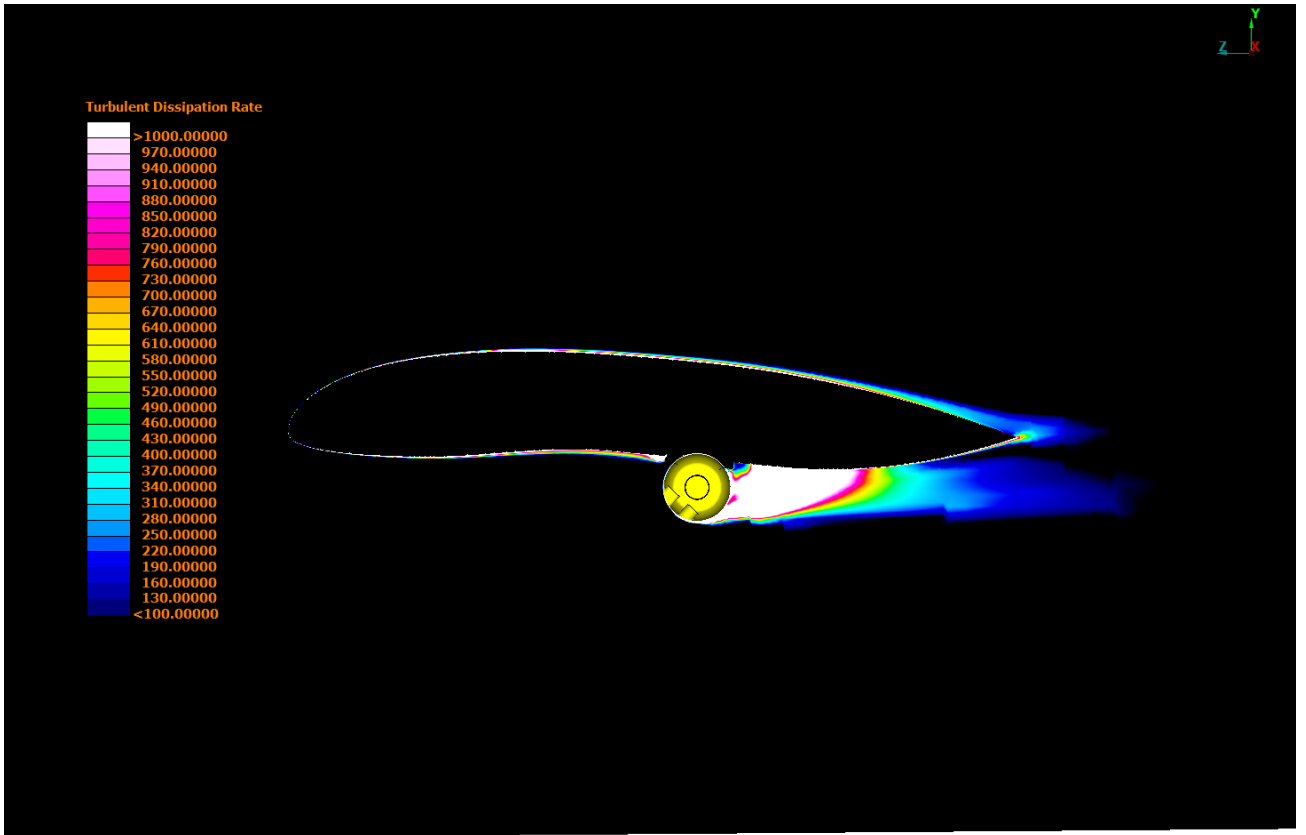
Αεροδυναμικές μετρήσεις

- **Συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας:** Αυτές είναι βασικές μετρήσεις για κάθε αεροδυναμικό σύστημα. Για το Gimbal-UAV, η κατανόηση αυτών των συντελεστών ήταν υψίστης σημασίας για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων πτήσης, της σταθερότητας και της αποδοτικότητάς του. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με δεδομένα αναφοράς, μπορούσαμε να αξιολογήσουμε την αεροδυναμική απόδοση του σχεδιασμού μας.

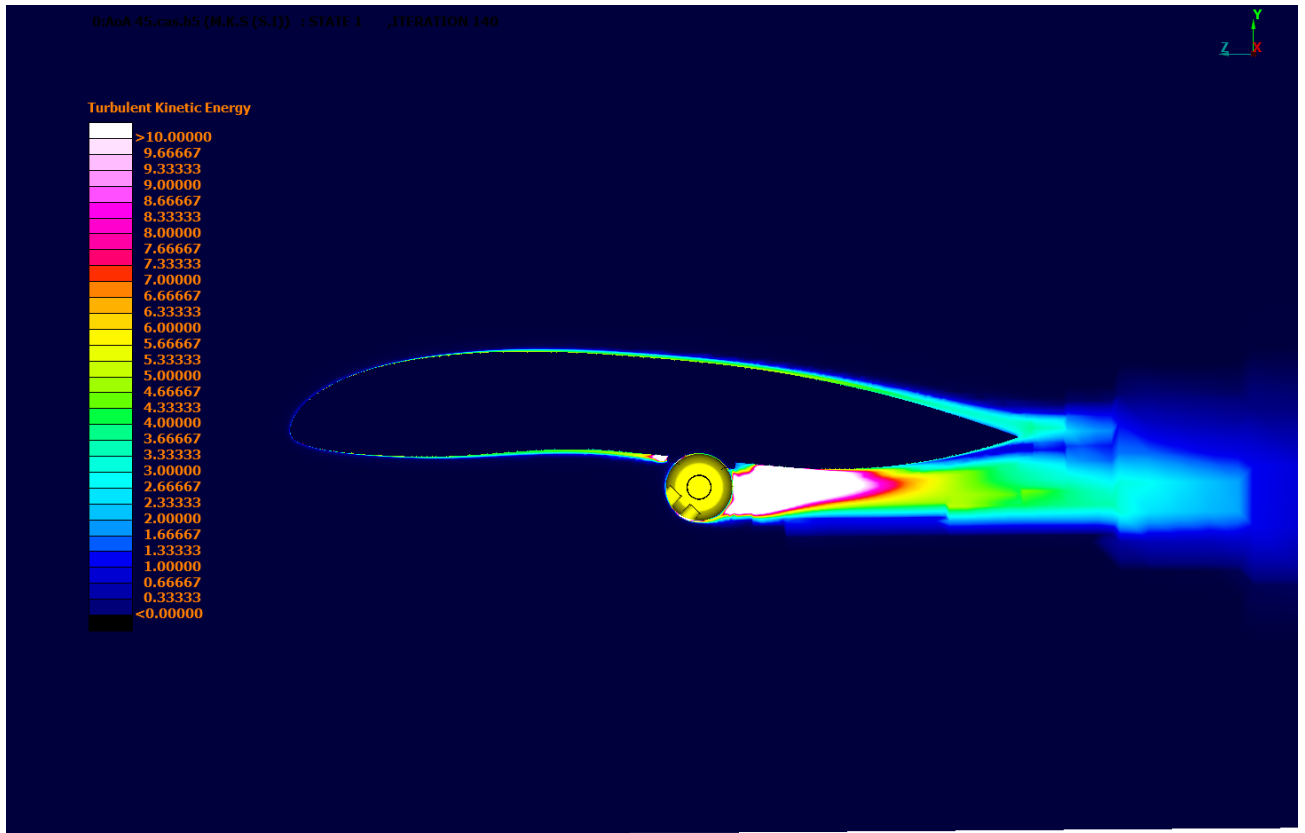
- **Ένταση τύρβης και στροβιλισμός:** Η ανάλυση αυτών των μετρήσεων προσέφερε μια βαθύτερη κατανόηση της τυρβώδους φύσης της ροής. Οι περιοχές με υψηλή ένταση τύρβης εξετάστηκαν προσεκτικά για να διασφαλιστεί ότι δεν επηρεάζουν αρνητικά τη σταθερότητα του UAV ή τη λειτουργικότητα του gimbal.
- **Κατανομή πίεσης:** Πραγματοποιήθηκε διεξοδική ανάλυση της κατανομής της πίεσης στις επιφάνειες του Gimbal-UAV. Αυτό ήταν ζωτικής σημασίας όχι μόνο για την αξιολόγηση των αεροδυναμικών επιδόσεων αλλά και από δομική άποψη. Εντοπίστηκαν περιοχές με κλίσεις υψηλής πίεσης και αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις τους στη δομική ακεραιότητα και τις επιδόσεις του συστήματος Gimbal-UAV.



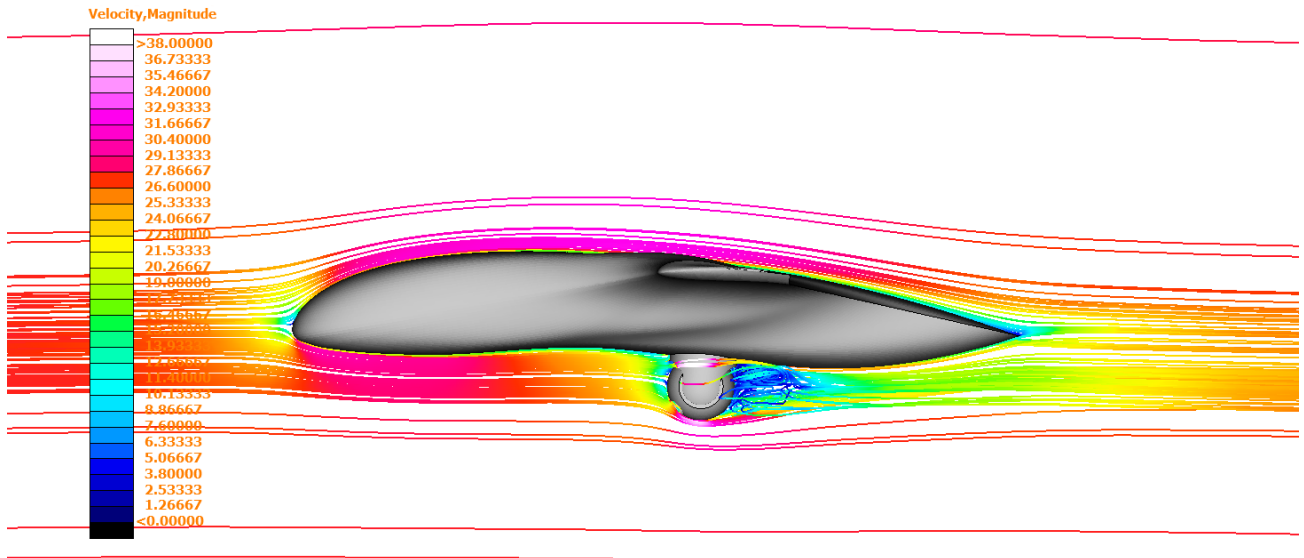
Εικόνα 19: Διαφορά πίεσης γύρω από το αεροσκάφος και στο σύστημα Gimbal σε Pa



Εικόνα 20: Ρυθμός διάχυσης της τύρβης σε m^2/s^3 .



Εικόνα 21: Κινητική ενέργεια τύρβης σε Joule/Kg



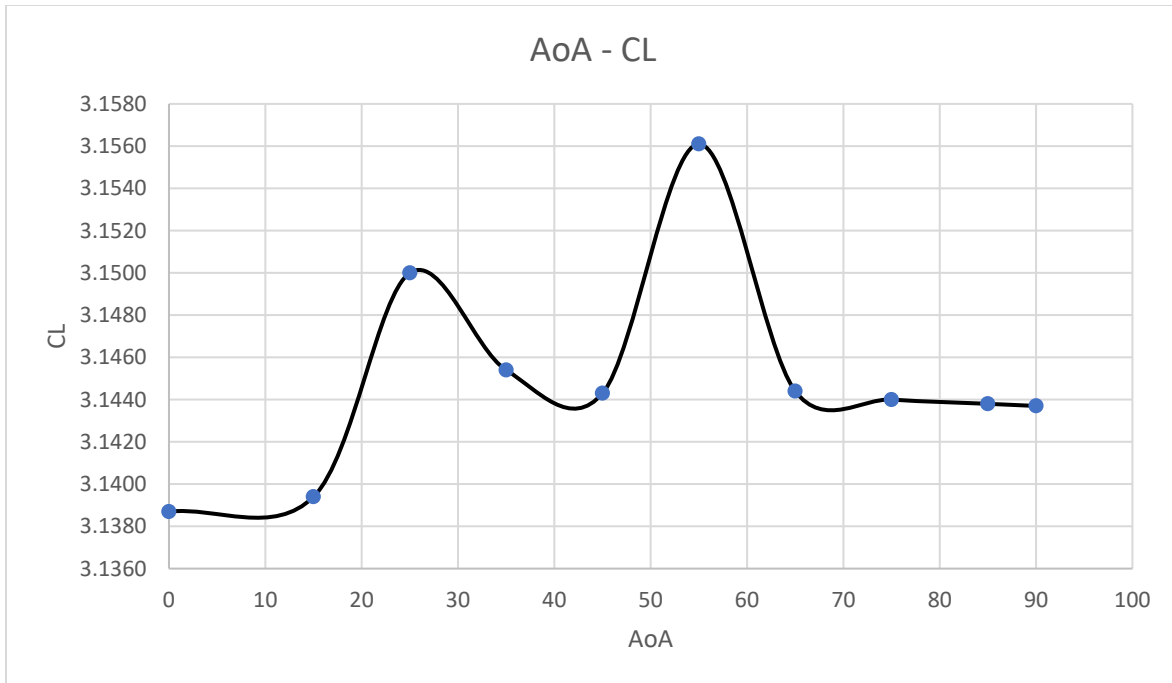
Εικόνα 22: Ροογραμμές του διανύσματος της ταχύτητας και απόχρωση με την τιμή του διανύσματος σε m/s.

Όλες οι παραπάνω εικόνες είναι ε κλήση των 45 μοιρών για το σύστημα Gimbal, μία από της γωνίες χρήσης κατά την πτήση. Ενώ το αεροσκάφος βρίσκεται σε 6 μοίρες σε πορεία πτήσης (cruising) στα 10000 πόδια (περίπου 3500 μέτρα) σε ταχύτητα 28m/s (100km/h) (17) με τις ανάλογες συνθήκες περιβάλλοντος για το υψόμετρο.

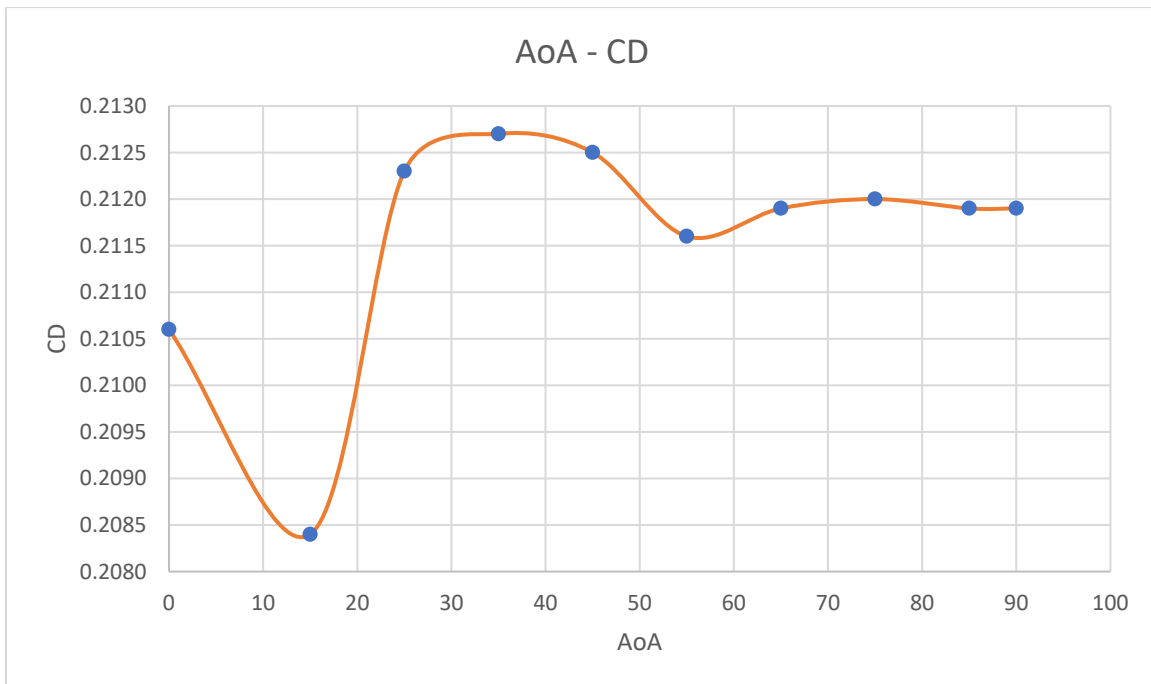
Στην ουσία, η μετα-επεξεργασία και η ανάλυση των αποτελεσμάτων αποτελούν τη ραχοκοκαλιά κάθε μελέτης CFD. Οι γνώσεις και η κατανόηση που προκύπτουν από αυτή τη φάση είναι καθοριστικές για την καθοδήγηση των τροποποιήσεων του σχεδιασμού, τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων και τον καθορισμό της κατεύθυνσης για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξης.

9.1.7 Συμπέρασμα

Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να είναι αρκετά αεροδυναμικός ώστε να μην επηρεάζει το συγκεκριμένο αεροσκάφος στην πτήση του και συνεπώς στην ευστάθειά του.



Πίνακας 6: Διάγραμμα συντελεστή άντωσης σε συνάρτηση με την κλίση του συστήματος gimbal με 0° να είναι παράλληλο με το αεροσκάφος και οι κάμερες να κοιτούνε μπροστά.



Πίνακας 7: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας σε συνάρτηση με την κλίση του συστήματος gimbal με 0° να είναι παράλληλο με το αεροσκάφος και οι κάμερες να κοιτούνε μπροστά.

Παρατηρούμε ότι όσο αλλάζει η γωνία του συστήματος αλλάζουν και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο λόγω της μικρής διαφοράς των

δεδομένων από κλίση σε κλίση ήταν σωστό να διεξαχθεί και μία ανάλυση χωρίς το σύστημα προσαρτημένο στο αεροσκάφος ώστε να υπάρχει ένα σημείου ελέγχου (control study). Αναλυτικά έχουμε:

| AoA UAV | 6 | degrees | Diffirence with control | |
|-----------------------------|--------|---------|-------------------------|--------|
| | | | CL | CD |
| Control | 3.1080 | 0.1807 | - | - |
| Gimbal AoA (degrees) | | | | |
| 0 | 3.1387 | 0.2106 | 0.98% | 15.29% |
| 15 | 3.1394 | 0.2084 | 1.01% | 14.25% |
| 25 | 3.1500 | 0.2123 | 1.34% | 16.09% |
| 35 | 3.1454 | 0.2127 | 1.20% | 16.28% |
| 45 | 3.1443 | 0.2125 | 1.16% | 16.18% |
| 55 | 3.1561 | 0.2116 | 1.54% | 15.76% |
| 65 | 3.1444 | 0.2119 | 1.17% | 15.90% |
| 75 | 3.1442 | 0.2120 | 1.16% | 15.95% |
| 85 | 3.1439 | 0.2119 | 1.15% | 15.90% |
| 90 | 3.1437 | 0.2119 | 1.14% | 15.90% |

Πίνακας 8: Αναλυτικός πίνακας αριθμητικών δεδομένων με σημείο σύγκρισης την μη-προσάρτηση του συστήματος Gimbal στο αεροσκάφος.

Παρατηρείτε ότι και οι δύο συντελεστές είναι σταθεροί στην διαφορά με το σημείου ελέγχου. Συγκεκριμένα έχουμε ότι ο συντελεστής άντωσης επηρεάζει 1% με 1.2% το οποίο είναι κάτι λογικό λόγω του σφαιρικού σχήματος. Ωστόσο λόγω ότι προεξέχει από την άτρακτο του αεροσκάφους και λόγω της κυκλικής του φύσης δημιουργούνται δίνες (Εικόνα 19 ,Εικόνα 20 ,Εικόνα 21 ,Εικόνα 22) στο πίσω μέρος με αποτέλεσμα να παράγεται μεγαλύτερη οπισθέλκουσα της τάξεως του 15% με 16%. Αυτές οι μεταβολές και στους δύο συντελεστές οφείλονται στις εσοχές που υπάρχουν για τα ανοίγματα των καμερών που μεταβάλουν ανάλογα με την τοποθεσία τους το σχήμα της τέλει σφαίρας.

Μετά το πέρας των αναλύσεων και μετατροπή των δεδομένων σε διαγράμματα και εικόνες για την κατανόηση τους μπορούμε να φτάσουμε στο εξής συμπέρασμα. Το σύστημα gimbal δεν επιφέρει σημαντική καταπόνηση στο αεροσκάφος λόγω της αεροδυναμικής για τα οφέλη που προφέρει ως μια φορητή μηχανικά σταθεροποιημένη μονάδα παρακολούθησης

| AoA UAV | 6 | degrees | Diffirence with control |
|---------|---|---------|-------------------------|
|---------|---|---------|-------------------------|

| | CL | CD | CL | CD |
|----------------------|--------|--------|-------|--------|
| Control | 3.1080 | 0.1807 | - | - |
| Gimbal AoA (degrees) | | | | |
| 0 | 3.1387 | 0.2106 | 0.98% | 15.29% |
| 15 | 3.1394 | 0.2084 | 1.01% | 14.25% |
| 25 | 3.1500 | 0.2123 | 1.34% | 16.09% |
| 35 | 3.1454 | 0.2127 | 1.20% | 16.28% |
| 45 | 3.1443 | 0.2125 | 1.16% | 16.18% |
| 55 | 3.1561 | 0.2116 | 1.54% | 15.76% |
| 65 | 3.1444 | 0.2119 | 1.17% | 15.90% |
| 75 | 3.1442 | 0.2120 | 1.16% | 15.95% |
| 85 | 3.1439 | 0.2119 | 1.15% | 15.90% |
| 90 | 3.1437 | 0.2119 | 1.14% | 15.90% |

9.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η μελέτη έγινε σχεδόν ταυτόχρονα με την αεροδυναμική καθώς η θερμική ανάλυση είναι υποκατηγορία του CFD. Έτσι με την ενεργοποίηση των εξισώσεων ενέργειας μπορέσαμε να δημιουργήσουμε μια εικόνα σχετικά με την ψύξη και τη ροή θερμικής ενέργειας από το χάλκινο εμφύτευμα στο πίσω μέρος του κελύφους. {3}

9.2.1 Οριακές συνθήκες θερμικής ανάλυσης

Εκτός από την πρωτοαναφέρουσες οριακές συνθήκες προστέθηκαν οι εξής.

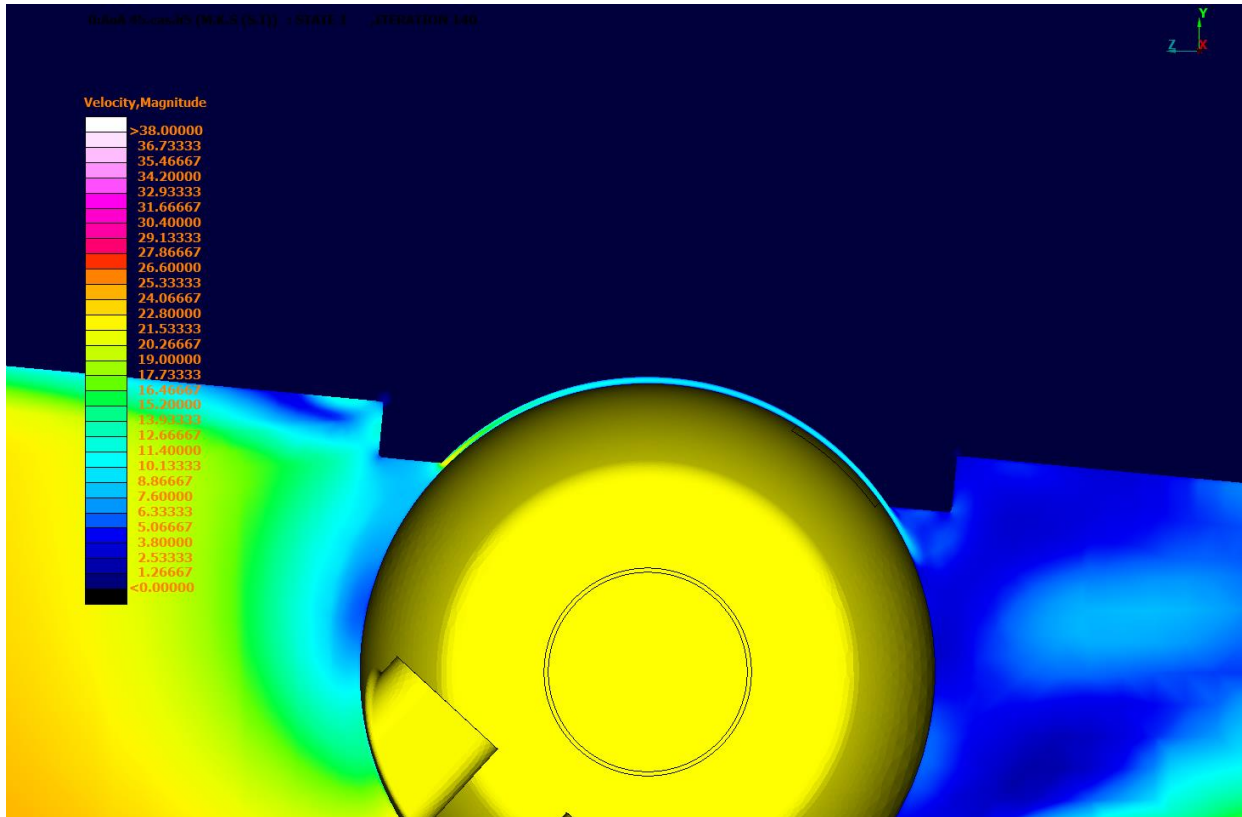
- Αρχική θερμοκρασία στην επιφάνεια του εναλλάκτη που την θέσαμε στους 80 βαθμούς Κελσίου(μια πολύ ακραία περίπτωση), προσομοιώνοντας την είδη σε λειτουργία κατάσταση του συστήματος για πολλές ώρες.
- Δεύτερον την παραγόμενη θερμική ενέργει που τέθηκε στα 17W/m^2 που είναι η μέση παραγόμενη θερμότητα των ηλεκτρονικών που μας δόθηκε από τους ηλεκτρονικούς του έργου.
- Τέλος το εικονικό πάχος του εναλλάκτη που θεωρήθηκε στα 10mm.

Σημαντικό είναι να επισημανθεί το γεγονός ότι θεωρούμε την μεταφορά θερμότητας από τους θαλάμους υδρατμών στον εναλλάκτη τέλεια και χωρίς

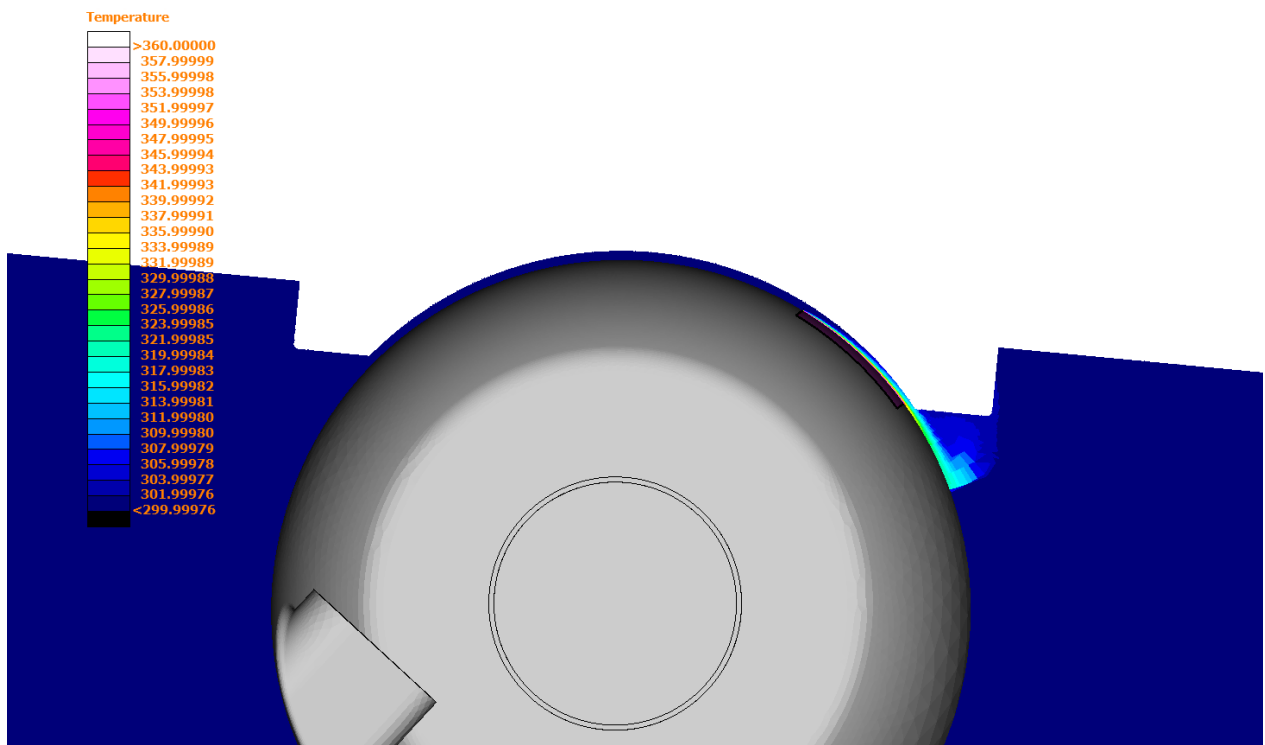
απώλειες. Έτσι απλοποιούμε το πρόβλημα και επικεντρωνόμαστε κυρίως στον εναλλάκτη.

9.2.2 Αποτελέσματα και δεδομένα των αναλύσεων

Έπειτα από την ταυτόχρονη ανάλυση του εξισώσεων ενέργειας έπρεπε να διερευνηθεί αν ο ρυθμός ψύξης είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τον ρυθμό παραγωγής ενέργειας.



Εικόνα 23: Κανάλι συμπίεσης γύρω από την σφαίρα ώστε να προσφέρει ψύξη.



Εικόνα 24: Απαγωγή θερμότητας σε Kelvin.

Όπως παρατηρούμε το κενό ανάμεσα στην βάση και στην σφαίρα είναι αρκετό ώστε να επιταχύνει την ροή ώστε να υπάρξει μία πολύ γρήγορη ροή και πτώσης της θερμοκρασίας όταν το μεταλλικό εμφύτευμά βρίσκεται σε εκείνη την περιοχή. Αναλυτικότερα έχουμε:

| Gimbal AoA (degrees) | Heat flow (watt) | Difference with control |
|----------------------|------------------|-------------------------|
| 0 | 13.855 | - |
| 15 | 15.582 | 11.73% |
| 25 | 17.773 | 24.78% |
| 35 | 21.818 | 44.64% |
| 45 | 23.8172 | 52.89% |
| 55 | 22.3710 | 47.02% |
| 65 | 22.8036 | 48.82% |
| 75 | 22.8036 | 48.82% |
| 85 | 22.8036 | 48.82% |

| | | |
|----|--------|--------|
| 90 | 24.431 | 55.25% |
|----|--------|--------|

Πίνακας 9: Αναλυτικός πίνακας παραγωγής θερμικής ενέργειας από το εμφύτευμα χαλκού ως προς την γωνιά προσβολής του συστήματος gimbal.

Παρατηρούμε ότι όσο το πλακίδιο χαλκού προσαρτημένο στο πίσω μέρος του κελύφους προσφέρει όλο και καλύτερη ψύξη όσο βρίσκεται μέσα στο κανάλι συμπίεσης προσφέροντας αρκετή ψύξη χωρίς την χρήση κάποιου κινούμενου εξαρτήματος.

9.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΪΩΝ (FEA)

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) είναι μια ισχυρή υπολογιστική τεχνική που επιτρέπει στους μηχανικούς να προσομοιώνουν και να αναλύουν σύνθετα φυσικά φαινόμενα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Με τη διακριτοποίηση ενός μεγαλύτερου συστήματος σε μικρότερα, απλούστερα μέρη (γνωστά ως στοιχεία), τα FEA παρέχει αριθμητική λύση σε προβλήματα οριακών τιμών που μπορεί να είναι πολύ περίπλοκα για αναλυτικές λύσεις.

9.3.1 Προ-επεξεργασία για το σύστημα στο SolidWorks

Στην ανάλυση του συστήματός μας, η προ-επεξεργασία ήταν ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστούν ακριβή και ουσιαστικά αποτελέσματα. Ακολουθεί ο τρόπος με τον οποίο προσαρμόσαμε τις δυνατότητες του SolidWorks στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του έργου μας:

Προετοιμασία γεωμετρίας:

Όπως και τα CFD έτσι και τα FEA χρειάζονται μια προεργασία, ώστε να μπορέσουμε να αντλήσουμε τα δεδομένα από την ανάλυσή μας όσο πιο ανώδυνα γίνεται και με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια.

9.3.1.1 Απλοποίηση μοντέλου:

Η απλούστευση του μοντέλου είναι ένα ουσιαστικό βήμα στην προετοιμασία ενός σχεδίου CAD για FEA. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η αναπαράσταση του φυσικού συστήματος με ένα μοντέλο που αποτυπώνει τα βασικά χαρακτηριστικά του και είναι ταυτόχρονα υπολογιστικά αποδοτικό για την ανάλυση.

Σκοπός της απλούστευσης του μοντέλου:

- **Βελτίωση της υπολογιστικής αποδοτικότητας:** Ένα απλοποιημένο μοντέλο έχει συχνά λιγότερα στοιχεία, γεγονός που οδηγεί σε ταχύτερους χρόνους ανάλυσης και μειωμένους υπολογιστικούς πόρους.
- **Εστίαση σε κρίσιμες περιοχές:** Απλοποιώντας μη κρίσιμες περιοχές, οι μηχανικοί μπορούν να εστιάσουν τους υπολογιστικούς πόρους στις περιοχές ενδιαφέροντος, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια εκεί που έχει μεγαλύτερη σημασία.
- **Διευκόλυνση του πλέγματος:** Ένα απλούστερο μοντέλο μπορεί να διακριτοποιηθεί ευκολότερα, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα στοιχείων και ακριβέστερα αποτελέσματα.

Κοινές τεχνικές απλοποίησης μοντέλων:

- **Συμμετρία:** Εάν ένα εξάρτημα ή συγκρότημα είναι συμμετρικό, μπορεί να μοντελοποιηθεί μόνο ένα κλάσμα του (το μισό, το τέταρτο κ.λπ.), μειώνοντας το μέγεθος της ανάλυσης.
- **Απλούστευση ορίων:** Αντί της μοντελοποίησης ολόκληρου του συστήματος, μερικές φορές αρκεί η μοντελοποίηση της περιοχής κοντά στα όρια όπου εφαρμόζονται φορτία ή περιορισμοί.
- **Αντικατάσταση στοιχείων:** Στα συγκροτήματα, τα λεπτομερή εξαρτήματα μπορούν να αντικατασταθούν με απλούστερες αναπαραστάσεις. Για παράδειγμα, οι κοχλίες μπορούν να αντικατασταθούν με κυλινδρικά σώματα.
- **Χρήση στοιχείων 2D για λεπτές κατασκευές:** Οι λεπτές δομές, όπως οι πλάκες ή τα κελύφη, μπορούν να αναπαρασταθούν με τη χρήση 2D στοιχείων αντί για 3D, μειώνοντας σημαντικά τον αριθμό των στοιχείων.

Συνάφεια με το έργο μας:

Για το σύστημά μας, η απλούστευση του μοντέλου ήταν καθοριστική για τον εξορθολογισμό της διαδικασίας FEA. Πραγματοποιήσαμε τα ακόλουθα βήματα:

- **Διατήρηση βασικών στοιχείων:** Ενώ ορισμένα μη ουσιώδη στοιχεία παραλείφθηκαν ή απλοποιήθηκαν, εξασφαλίσαμε ότι όλα τα κρίσιμα στοιχεία που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος διατηρήθηκαν στο μοντέλο. Για παράδειγμα όταν αναλύσαμε τις βάσεις του φορτίου καταστείλαμε τα υπόλοιπα κομμάτια όπως τα μοτέρ και τα ρουλεμάν.
- **Χρήση αντιπροσωπευτικών γεωμετριών:** Για εξαρτήματα με επαναλαμβανόμενα ή παρόμοια χαρακτηριστικά, χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικές γεωμετρίες για να αποτυπωθεί η συνολική συμπεριφορά

χωρίς να μοντελοποιηθεί κάθε λεπτομέρεια. Τέτοια χρήση ήταν η μετατροπή των κοχλίων σε μπουλόνια.

- **Εξασφάλιση ακριβών οριακών συνθηκών:** Παρά τις απλουστεύσεις, εξασφαλίσαμε ότι όλες οι οριακές συνθήκες, όπως οι περιορισμοί και τα φορτία, αναπαρίστανται με ακρίβεια ώστε να αποτυπωθεί η συμπεριφορά του συστήματος στον πραγματικό κόσμο.

9.3.2 Defeaturing:

Η αφαίρεση των στοιχείων είναι ένα κρίσιμο βήμα στη φάση προ-επεξεργασίας της FEA, ειδικά όταν εργάζεται με πολύπλοκα μοντέλα CAD. Πρωταρχικός στόχος είναι η απλοποίηση του μοντέλου ώστε να καταστεί πιο κατάλληλο για ανάλυση χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Σκοπός του Defeaturing:

- **Μείωση της πολυπλοκότητας:** Τα μοντέλα CAD συχνά περιέχουν περίπλοκες λεπτομέρειες που είναι απαραίτητες για την κατασκευή, αλλά ενδέχεται να μην επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Π.χ. Λογότυπα, χαράξεις, σπειρώματα. Με την αφαίρεση αυτών των λεπτομερειών, το μοντέλο γίνεται λιγότερο πολύπλοκο, καθιστώντας ευκολότερο το πλέγμα και την ανάλυση.
- **Βελτίωση της υπολογιστικής αποδοτικότητας:** Ένα απλοποιημένο μοντέλο απαιτεί λιγότερα στοιχεία και κόμβους, οδηγώντας σε ταχύτερους χρόνους ανάλυσης και μειωμένους υπολογιστικούς πόρους.
- **Αποφυγή προβλημάτων πλέγματος:** Μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα πλέγματος, όπως έντονα παραμορφωμένα στοιχεία. Η αφαίρεση αυτών των χαρακτηριστικών μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία ενός πλέγματος υψηλής ποιότητας.

Κοινές τεχνικές απομάκρυνσης:

- **Αφαίρεση μικρών χαρακτηριστικών:** Αυτό περιλαμβάνει την απαλλαγή από μικρά φιλέτα, τρύπες ή μικροσκοπικές προεξοχές που μπορεί να μην επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα.
- **Καταστολή λεπτομερειών:** Χαρακτηριστικά όπως νήματα, λογότυπα ή περίπλοκα μοτίβα μπορούν να κατασταλούν.
- **Συγχώνευση όψεων:** Δίπλα όψεις με μικρές διαφορές καμπυλότητας μπορούν να συγχωνευθούν για να δημιουργήσουν μια ενιαία, ομαλή όψη.

- **Απλοποίηση της γεωμετρίας:** Πολύπλοκες συναρμολογήσεις μπορούν να αναπαρασταθούν με απλούστερα σχήματα που αποτυπώνουν τη συνολική συμπεριφορά.

Συνάφεια με το έργο μας:

Για το σύστημά μας, το defeaturing έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση μιας ομαλής διαδικασίας FEA. Δεδομένης της περίπλοκης σχεδίασης, εστίασαμε σε:

- **Διατήρηση κρίσιμων χαρακτηριστικών:** Ενώ απλοποιήσαμε το μοντέλο, ήταν σημαντικό να διατηρήσουμε χαρακτηριστικά που επηρεάζουν σημαντικά τη δομική συμπεριφορά υπό τα εφαρμοζόμενα φορτία. Τέτοιες ενέργειες γίναν στην ανάλυση κάθε βάσης φορτιού ξεχωριστά, γιατί δεν επηρεάζει η μία την άλλη. Έτσι μπορέσαμε να απομονώσουμε κάθε ανάλυση χωρίς να χάνουμε σε χρόνο και διατηρώντας την ορθότητα των αποτελεσμάτων
- **Εξασφάλιση ακριβών αποτελεσμάτων:** Παρά τις απλουστεύσεις, διασφάλισαμε ότι η διαδικασία defeaturing δεν έθετε σε κίνδυνο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας. Πρωταρχικός στόχος ήταν να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της απλότητας του μοντέλου και της πιστότητας των αποτελεσμάτων.

Το defeaturing και η απλούστευση, όταν γίνεται με σύνεση, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας FEA. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι απλοποιήσεις δεν οδηγούν σε απώλεια κρίσιμων πληροφοριών ή δεν θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα της ανάλυσης.

9.3.3 Πλέγμα για το σύστημα:

Το πλέγμα είναι ένα κρίσιμο βήμα στη διαδικασία FEA, μετατρέποντας το συνεχές πεδίο του μοντέλου σε διακριτό πεδίο που μπορεί να αναλυθεί αριθμητικά. Η ποιότητα και ο τύπος του πλέγματος επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης.

Τύποι στοιχείων:

- **Τετραεδρικά στοιχεία:** Πρόκειται για τετράπλευρα, τρισδιάστατα στοιχεία που χρησιμοποιούνται συνήθως στο SolidWorks για πολύπλοκες γεωμετρίες. Δεδομένου του περίπλοκου σχεδιασμού του συστήματός μας, τα τετραεδρικά στοιχεία ήταν η φυσική επιλογή. Μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε ακανόνιστα σχήματα, καθιστώντας τα ιδανικά για την αποτύπωση των αποχρώσεων του σχεδιασμού μας.

- **Οφέλη για το σύστημά μας:** Η προσαρμοστικότητα των τετραεδρικών στοιχείων μας επέτρεψε να αναπαραστήσουμε τη γεωμετρία του συστήματος με ακρίβεια, διασφαλίζοντας ότι κάθε λεπτομέρεια, καμπύλη και γωνία αποτυπώθηκε επαρκώς στο πλέγμα.

Έλεγχοι πλέγματος:

- **Σκοπός:** Οι έλεγχοι πλέγματος επιτρέπουν στους χρήστες να βελτιώνουν το πλέγμα σε συγκεκριμένες περιοχές του μοντέλου. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιοχές με υψηλές κλίσεις τάσεων ή πολύπλοκες γεωμετρίες.
- **Εφαρμογή στο σύστημά μας:** Δεδομένης της δυναμικής φύσης του συστήματός μας, με κινούμενα μέρη και αεροδυναμικές επιφάνειες, ήταν ζωτικής σημασίας η ύπαρξη λεπτότερου πλέγματος σε αυτές τις περιοχές. Αυτό εξασφάλιζε ότι το πλέγμα θα μπορούσε να καταγράψει τις ταχείες αλλαγές στην τάση και την παραμόρφωση, παρέχοντας ακριβή αποτελέσματα.
- **Πλεονεκτήματα:** Με τη βελτίωση του πλέγματος σε κρίσιμες περιοχές, εξασφαλίσαμε μεγαλύτερη ακρίβεια εκεί που είχε μεγαλύτερη σημασία, χωρίς να αυξήσουμε άσκοπα το υπολογιστικό κόστος για ολόκληρο το μοντέλο.

Ποιότητα πλέγματος:

- **Σημασία:** Η ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Κακώς διαμορφωμένα στοιχεία μπορεί να οδηγήσουν σε αριθμητικά σφάλματα ή προβλήματα σύγκλισης.
- **Εργαλεία αξιολόγησης:** Το SolidWorks παρέχει διαγνωστικά εργαλεία για την αξιολόγηση της ποιότητας του πλέγματος, εξετάζοντας μετρήσεις όπως ο λόγος διαστάσεων, η λοξότητα και το μέγεθος των στοιχείων.
- **Συνάφεια με το σύστημά μας:** Δεδομένης της σημασίας της λήψης ακριβών αποτελεσμάτων για τους σχεδιαστικούς μας στόχους, πραγματοποιήσαμε μια ενδελεχή αξιολόγηση της ποιότητας του πλέγματος. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίσαμε ότι όλα τα στοιχεία ήταν καλά διαμορφωμένα και ότι οι πιθανές προβληματικές περιοχές αντιμετωπίστηκαν πριν από την ανάλυση.

Δίνοντας σχολαστική προσοχή στο πλέγμα, θέσαμε τις βάσεις για μια επιτυχημένη FEA του συστήματός μας. Το σωστό πλέγμα εξασφάλισε ότι οι προσομοιώσεις μας ήταν τόσο υπολογιστικά αποδοτικές όσο και ακριβείς, παρέχοντας γνώσεις που ήταν άμεσα σχετικές με τους στόχους του σχεδιασμού μας.

9.3.4 Οριακές και αρχικές συνθήκες:

Οι οριακές και αρχικές συνθήκες είναι θεμελιώδους σημασίας για τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο το σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και πώς συμπεριφέρεται σε διάφορα σενάρια. Θέτουν τις βάσεις για τη FEA, διασφαλίζοντας ότι η προσομοίωση μιμείται όσο το δυνατόν καλύτερα τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου.

Φορτία:

- **Φορτία βαρύτητας:** Κάθε αντικείμενο εντός του βαρυτικού πεδίου ενός ουράνιου σώματος, όπως η Γη, υφίσταται μια δύναμη λόγω βαρύτητας. Στο SolidWorks, εφαρμόζονται βαρυτικά φορτία για να ληφθεί υπόψη αυτή η δύναμη, επηρεάζοντας την τάση, την παραμόρφωση και τη μετατόπιση εντός του συστήματος.
- **Δυνάμεις G κατά τη διάρκεια της πτήσης:** Πρόκειται για τα αδρανειακά φορτία που υφίσταται το σύστημα κατά τη διάρκεια ελιγμών, επιταχύνσεων ή επιβραδύνσεων. Για το σύστημά μας, εξετάστηκαν τυπικά σενάρια πτήσης για την προσομοίωση των δυνάμεων g που θα βίωνε. Αυτό εξασφάλισε ότι η ανάλυση αποτύπωσε τη δομική απόκριση υπό ρεαλιστικές συνθήκες πτήσης.

- **Συνάφεια με το σύστημά μας:** Η κατανόηση των επιπτώσεων αυτών των φορτίων ήταν ζωτικής σημασίας, ιδίως κατά την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας και της απόδοσης του συστήματος κατά τη διάρκεια επιχειρησιακών σεναρίων.

Περιορισμοί:

- **Σκοπός:** Οι περιορισμοί περιορίζουν την κίνηση ορισμένων τμημάτων του συστήματος, προσομοιώνοντας τον τρόπο με τον οποίο αυτό συγκρατείται ή στερεώνεται στον πραγματικό κόσμο.
- **Σημεία τοποθέτησης και περιοχές πρόσδεσης:** Πρόκειται για τις περιοχές όπου το σύστημα συνδέεται με άλλες δομές ή εξαρτήματα. Στην ανάλυσή μας, τα σημεία αυτά περιορίστηκαν για να μιμηθούν τα πραγματικά σημεία σταθερής ή περιορισμένης κίνησης του συστήματος στο επιχειρησιακό του περιβάλλον.
- **Οφέλη:** Με τον ακριβή περιορισμό του συστήματος, εξασφάλισαμε ότι η προσομοιωμένη συμπεριφορά αντανακλούσε στενά την αντίστοιχη του πραγματικού κόσμου, παρέχοντας πληροφορίες για το πώς θα λειτουργούσε υπό πραγματικές επιχειρησιακές συνθήκες.

Αρχικές συνθήκες:

- **Σημασία:** Οι αρχικές συνθήκες καθορίζουν την αρχική κατάσταση του συστήματος για την ανάλυση. Είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για δυναμικές προσομοιώσεις όπου η κατάσταση του συστήματος αλλάζει με την πάροδο του χρόνου.
- **Ταχύτητες και προσανατολισμοί:** Για ένα σύστημα με δυναμική συμπεριφορά, η κατανόηση της αρχικής κατάστασης κίνησής του είναι απαραίτητη. Στην ανάλυσή μας, θέτουμε αρχικές συνθήκες όπως οι ταχύτητες και οι προσανατολισμοί με βάση τυπικά σενάρια λειτουργίας. Αυτό εξασφάλισε ότι η προσομοίωση ξεκινούσε από μια ρεαλιστική κατάσταση, παρέχοντας μια πιο ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος με την πάροδο του χρόνου.
- **Συνάφεια με το σύστημά μας:** Δεδομένης της δυναμικής φύσης του συστήματός μας, ο καθορισμός ακριβών αρχικών συνθηκών ήταν ζωτικής σημασίας για την αποτύπωση της απόκρισής του σε διάφορα σενάρια, διασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα ήταν τόσο σημαντικά όσο και αντιπροσωπευτικά της συμπεριφοράς του πραγματικού κόσμου.

Θέτοντας σχολαστικά τις οριακές και αρχικές συνθήκες προσαρμοσμένες στις απαιτήσεις του συστήματός μας, εξασφάλισαμε ότι τα FEA παρείχε πληροφορίες

που ήταν τόσο ακριβείς όσο και άμεσα σχετικές με τους στόχους του σχεδιασμού μας.

9.3.5 Ιδιότητες υλικού:

Οι ιδιότητες των υλικών είναι θεμελιώδους σημασίας για την ακρίβεια και τη συνάφεια οποιασδήποτε ανάλυσης FEA. Η συμπεριφορά ενός συστήματος υπό διάφορες φορτίσεις καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένο. Το SolidWorks παρέχει μια ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη υλικών, και για το έργο μας κάναμε συγκεκριμένες επιλογές ώστε να ταιριάζουν στενά με τα εξαρτήματα του συστήματός μας στον πραγματικό κόσμο.

Κράματα μετάλλων:

Τα μέταλλα, με την εγγενή αντοχή και την ανθεκτικότητά τους, αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των μηχανολογικών κατασκευών και εξαρτημάτων εδώ και αιώνες. Η προβλέψιμη μηχανική τους συμπεριφορά, σε συνδυασμό με ένα εύρος διαθέσιμων κραμάτων προσαρμοσμένων για συγκεκριμένες εφαρμογές, τα καθιστά απαραίτητα σε πολλά μηχανολογικά εξαρτήματα και κατασκευές.

- **Κράματα αλουμινίου:** Λόγω του μικρού βάρους και της καλής αναλογίας αντοχής προς βάρος. Για το σύστημά μας, τα κράματα αλουμινίου παρείχαν την απαραίτητη αντοχή, διατηρώντας παράλληλα το βάρος στο ελάχιστο.
- **Κράματα τιτανίου:** Γνωστά για την εξαιρετική αντοχή τους, την αντίσταση στη διάβρωση και τις επιδόσεις τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιλέχθηκαν για μέρη του συστήματος που απαιτούσαν πρόσθετη αντοχή ή εκτίθεντο σε σκληρές συνθήκες με την δυνατότητα να αφαιρέσουμε υλικό για να εξοικονομήσουμε μάζα.

Θερμοπλαστικά:

Τα θερμοπλαστικά είναι ένα υποσύνολο πολυμερών που μπορούν να λιώσουν και να στερεοποιηθούν επανειλημμένα χωρίς να αλλάξουν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Η ευελιξία τους, σε συνδυασμό με τις εξελίξεις στην τρισδιάστατη εκτύπωση, τα έχει καταστήσει δημοφιλή επιλογή για διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές, ιδίως όταν πρόκειται για ταχεία προτυποποίηση ή πολύπλοκες γεωμετρίες.

- **Κριτήρια επιλογής:** Δεδομένης της αύξησης της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή, ενσωματώσαμε διάφορα θερμοπλαστικά. Η επιλογή βασίστηκε στις μηχανικές τους ιδιότητες, την ευκολία εκτύπωσης και την ανθεκτικότητά τους.

- **Πλεονεκτήματα:** Τα θερμοπλαστικά προσφέρουν ευελιξία στο σχεδιασμό, ταχεία προτυποποίησή και τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών που μπορεί να είναι δύσκολη με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής.

Σύνθετα υλικά:

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που κατασκευάζονται με το συνδυασμό δύο ή περισσότερων φυσικών ή τεχνητών στοιχείων με διαφορετικές φυσικές ή χημικές ιδιότητες. Το υλικό που προκύπτει συχνά εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα των συστατικών του, ενώ παράλληλα μετριάξει τις αδυναμίες τους, οδηγώντας σε βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης.

- **Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης:** Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, έχει γίνει διαθέσιμη μια σειρά σύνθετων υλικών. Αυτά τα σύνθετα υλικά συχνά συνδυάζουν την αντοχή των ινών (όπως ο άνθρακας ή το γυαλί) με την ευελιξία και την ευκολία εκτύπωσης των θερμοπλαστικών.
- **Οφέλη για το σύστημά μας:** Η χρήση σύνθετων υλικών μας επέτρεψε να επιτύχουμε τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή ή δυσκαμψία, σε συγκεκριμένες περιοχές του συστήματος χωρίς σημαντική μείωση του βάρους. Όπως για παράδειγμα το κέλυφος

Ενσωμάτωση στο SolidWorks:

- **Βιβλιοθήκη υλικών:** Η εκτεταμένη βιβλιοθήκη υλικών του SolidWorks ήταν ανεκτίμητη σε αυτή τη διαδικασία. Μπορούσαμε εύκολα να αντιστοιχίσουμε υλικά σε διαφορετικά μέρη, εξασφαλίζοντας την ακριβή αναπαράσταση των μηχανικών ιδιοτήτων στην ανάλυση.
- **Προσαρμοσμένα υλικά:** Για ορισμένα συγκεκριμένα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης ή σύνθετα υλικά που δεν ήταν διαθέσιμα στην προεπιλεγμένη βιβλιοθήκη, προσθέσαμε προσαρμοσμένα υλικά εισάγοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες στο SolidWorks.

Επιλέγοντας και αντιστοιχίζοντας σχολαστικά τα υλικά, διασφαλίσαμε ότι το μοντέλο FEA μας αντιπροσώπευε με ακρίβεια τη συμπεριφορά του συστήματος στον πραγματικό κόσμο. Αυτή η προσοχή στις ιδιότητες των υλικών ήταν καθοριστικής σημασίας για τη λήψη αποτελεσμάτων που είναι τόσο ουσιαστικά όσο και άμεσα εφαρμόσιμα στους σχεδιαστικούς και επιχειρησιακούς μας στόχους.

9.3.6 Στόχοι επιδόσεων:

Σε κάθε τεχνικό έργο, ο καθορισμός σαφών και μετρήσιμων στόχων απόδοσης είναι υψίστης σημασίας. Αυτοί οι στόχοι καθοδηγούν τη διαδικασία σχεδιασμού, διασφαλίζοντας ότι το τελικό προϊόν πληροί τις επιθυμητές προδιαγραφές και αποδίδει βέλτιστα σε πραγματικές συνθήκες.

- **Ανάλυση μετατόπισης:** Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους των FEA μας ήταν να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος όσον αφορά τη μετατόπιση υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η μετατόπιση, ιδίως σε δυναμικά συστήματα, μπορεί να επηρεάσει την απόδοση, την αντοχή και την ασφάλεια.
- **Ελάχιστη μετατόπιση:** Ο σχεδιασμός του συστήματος αποσκοπούσε στην ελαχιστοποίηση της μετατόπισης, διασφαλίζοντας ότι όλα τα εξαρτήματα παραμένουν εντός των λειτουργικών τους ορίων ακόμη και υπό ακραίες συνθήκες. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της λειτουργικότητας και της μακροζωίας του συστήματος.
- **Βελτιστοποίηση βάρους:** Ενώ η δομική ακεραιότητα είναι ζωτικής σημασίας, είναι εξίσου σημαντικό να ληφθεί υπόψη το βάρος του

συστήματος, ειδικά σε αεροναυτικές εφαρμογές όπου το βάρος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση και την αποδοτικότητα καυσίμου. Ο στόχος μας ήταν να βρούμε μια ισορροπία - εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα είναι αρκετά ανθεκτικό ώστε να αντέχει στις λειτουργικές καταπονήσεις, ενώ παράλληλα είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερο.

Προσαρμοσμένη προεπεξεργασία:

Η φάση της προεπεξεργασίας στη FEA θέτει τις βάσεις για ολόκληρη την ανάλυση. Καθορίζοντας προσεκτικά υλικά, οριακές συνθήκες και παραμέτρους πλέγματος προσαρμοσμένες στις μοναδικές απαιτήσεις του συστήματός μας, εξασφαλίσαμε μια σταθερή βάση για τις προσομοιώσεις.

- **Ακρίβεια και συνάφεια:** Αυτή η σχολαστική προσέγγιση στην προεπεξεργασία δεν αφορούσε μόνο τη διασφάλιση ακριβών αποτελεσμάτων. Αφορούσε και τη διασφάλιση ότι οι γνώσεις που προέκυπταν από τις προσομοιώσεις ήταν άμεσα σχετικές με τους στόχους του σχεδιασμού μας, παρέχοντας ανατροφοδότηση με βάση τη δράση για τη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

Θέτοντας σαφείς στόχους απόδοσης και ευθυγραμμίζοντας τη διαδικασία FEA με αυτούς τους στόχους, μπορέσαμε να αντλήσουμε σημαντικές γνώσεις από τις προσομοιώσεις. Αυτές οι γνώσεις έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην καθοδήγηση του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης του συστήματός μας, διασφαλίζοντας ότι πληροί τα επιθυμητά κριτήρια απόδοσης.

9.3.7 Επιλύτες στο SolidWorks FEA

Ο επιλύτης είναι ο κινητήρας πίσω από τη διαδικασία FEA. Λαμβάνει την είσοδο από τη φάση της προεπεξεργασίας και υπολογίζει τη λύση του προβλήματος, παρέχοντας αποτελέσματα που μπορούν να υποβληθούν σε μεταγενέστερη επεξεργασία και ανάλυση.. (17) Το SolidWorks Simulation προσφέρει μια σειρά επιλυτών προσαρμοσμένων σε διαφορετικούς τύπους αναλύσεων. (18)

Γραμμική vs μη γραμμικής ανάλυσης:

- **Γραμμική ανάλυση:** Υποθέτει ότι η σχέση μεταξύ φορτίων και μετατοπίσεων είναι γραμμική. (19) Είναι κατάλληλο για προβλήματα όπου

το υλικό παραμένει εντός του ορίου ελαστικότητάς του και η γεωμετρία και οι οριακές συνθήκες δεν αλλάζουν σημαντικά με τη φόρτιση. (20)

- **Μη γραμμική ανάλυση:** Χρησιμοποιείται όταν το πρόβλημα περιλαμβάνει μεγάλες παραμορφώσεις, μη γραμμικά υλικά (όπως τα πλαστικά) ή όταν οι οριακές συνθήκες αλλάζουν με το εφαρμοζόμενο φορτίο. Είναι πιο εντατική σε υπολογισμούς από τη γραμμική ανάλυση.

Επαναληπτικές μέθοδοι και άμεσοι επιλύτες:

- **Επαναληπτικές μέθοδοι:** Αυτοί οι επιλύτες είναι γενικά ταχύτεροι και απαιτούν λιγότερη μνήμη (19), ειδικά για μεγάλα μοντέλα. Λειτουργούν με επαναληπτική βελτίωση της λύσης έως ότου συγκλίνει σε ένα καθορισμένο κριτήριο.
- **Άμεσοι επιλύτες:** Υπολογίζουν τη λύση απευθείας και είναι συχνά πιο ισχυρές από τις επαναληπτικές μεθόδους, ειδικά για μοντέλα με πολύπλοκες επαφές ή μη γραμμικότητες. (20)

Αποδοτικότητα και ακρίβεια:

Το SolidWorks Simulation προσφέρει εργαλεία για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας και της ακρίβειας του επιλυτή. (17) Οι χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν την ανοχή σύγκλισης, η οποία καθορίζει πόσο κοντά πρέπει να είναι η επαναληπτική λύση στην ακριβή λύση πριν σταματήσει ο επιλύτης. Η σύσφιξη της ανοχής μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα, αλλά μπορεί να αυξήσει το χρόνο υπολογισμού. (18)

Συνάφεια με το έργο μας:

Για το σύστημά μας, δεδομένης της έμφασης στην κατανόηση των επιδράσεων της βαρύτητας, των δυνάμεων g και της μετατόπισης (19), χρησιμοποιήσαμε κυρίως στατική ανάλυση με γραμμικό επιλύτη. Αυτή η προσέγγιση παρείχε μια ισορροπία μεταξύ της υπολογιστικής απόδοσης και της ακρίβειας που απαιτείται για τους στόχους του σχεδιασμού μας..

Με τις σωστές ρυθμίσεις του επιλυτή, εξασφαλίσαμε ότι τα αποτελέσματα της FEA ήταν ακριβή και συναφή, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες..

9.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας βρίσκεται στη διασταύρωση του σχεδιασμού, των μαθηματικών και της μηχανικής. Πρόκειται για μια μέθοδο που επιδιώκει να προσδιορίσει την καλύτερη κατανομή υλικών σε έναν προκαθορισμένο χώρο σχεδιασμού, δεδομένου ενός συνόλου φορτίων, οριακών συνθηκών και περιορισμών. Ο στόχος; Η επίτευξη βέλτιστης απόδοσης με τη χρήση της μικρότερης δυνατής ποσότητας υλικού.

Ενώ η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) παρέχει πληροφορίες για το πώς θα αποδώσει ένας σχεδιασμός υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η βελτιστοποίηση τοπολογίας το πάει ένα βήμα παραπέρα. Δεν προβλέπει απλώς την απόδοση, αλλά καθοδηγεί την ίδια τη διαδικασία σχεδιασμού. Αξιοποιώντας μαθηματικούς αλγόριθμους και επαναληπτικές διαδικασίες, υποδεικνύει πού μπορεί να προστεθεί ή να αφαιρεθεί υλικό για τη βελτίωση των επιδόσεων, είτε πρόκειται για αντοχή, είτε για δυσκαμψία, είτε για άλλα κριτήρια.

Στην εποχή της βιώσιμης μηχανικής και της προσθετικής κατασκευής, η σημασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας έχει αυξηθεί εκθετικά. Με τη δυνατότητα δημιουργίας περίπλοκων σχεδίων που ήταν προηγουμένως αδιανόητα, οι μηχανικοί μπορούν πλέον να σχεδιάζουν εξαρτήματα και συστήματα που δεν είναι μόνο αποδοτικά αλλά και φιλικά προς το περιβάλλον, ελαχιστοποιώντας τη σπατάλη υλικών.

Για το έργο μας, η βελτιστοποίηση τοπολογίας προσέφερε ένα μονοπάτι για την τελειοποίηση του σχεδιασμού μας, διασφαλίζοντας ότι κάθε γραμμάριο υλικού τοποθετήθηκε σκόπιμα, κάθε καμπύλη και περίγραμμα βελτιστοποιήθηκε σχολαστικά για μέγιστη απόδοση.

9.4.1 Αρχές βελτιστοποίησης τοπολογίας:

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει τις ρίζες της στη μαθηματική διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Πρόκειται για μια μέθοδο που εξελίσσει και βελτιώνει ένα σχέδιο με την ανακατανομή του υλικού σε ένα δεδομένο χώρο για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων απόδοσης.

9.4.1.1 Μαθηματικό θεμέλιο

Η βελτιστοποίηση της τοπολογίας είναι βασικά ένα μεταβλητό πρόβλημα, το οποίο επιδιώκει να καθορίσει τη βέλτιστη κατανομή του υλικού σε έναν προκαθορισμένο τομέα για την επίτευξη ενός επιθυμητού στόχου απόδοσης. Η μαθηματική διατύπωση μπορεί να περιγραφεί σε γενικές γραμμές ως εξής:

- **Μεταβλητές σχεδιασμού:** Έστω ρ που αντιπροσωπεύει τη σχετική πυκνότητα του υλικού σε ένα σημείο του πεδίου σχεδιασμού, όπου $\rho=1$ υποδηλώνει πλήρες υλικό και $\rho=0$ υποδηλώνει κενό ή καθόλου υλικό. (21). Ολόκληρο το πεδίο σχεδιασμού διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία και σε κάθε στοιχείο ανατίθεται μια μεταβλητή σχεδιασμού ρ .

Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση $f(\rho)$ ποσοτικοποιεί την απόδοση του σχεδιασμού. Ένας κοινός στόχος στη βελτιστοποίηση δομικών κατασκευών είναι η ελαχιστοποίηση της συμμόρφωσης, η οποία σχετίζεται αντίστροφα με τη δυσκαμψία (22). Μαθηματικά, ο στόχος μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

Ελαχιστοποίηση

$$f(\rho) = u^T K(\rho)u$$

όπου:

- u είναι το διάνυσμα μετατόπισης και
- $K(\rho)$ είναι ο πίνακας δυσκαμψίας που εξαρτάται από τη μεταβλητή σχεδιασμού ρ (23).

Περιορισμοί

Οι περιορισμοί διασφαλίζουν ότι ο σχεδιασμός τηρεί ορισμένες προϋποθέσεις. Ένας κοινός περιορισμός είναι το κλάσμα όγκου, που εξασφαλίζει ότι ο σχεδιασμός δεν υπερβαίνει μια ορισμένη ποσότητα υλικού (24)

Ο περιορισμός όγκου μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$\int \Omega \rho d\Omega \leq V_{max}$$

Όπου:

- Ω είναι ο τομέας σχεδιασμού
- V_{max} είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος όγκος (23).

Πρόβλημα βελτιστοποίησης

Συνδυάζοντας την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της τοπολογίας μπορεί να διατυπωθεί ως εξής

$$f(\rho) = u^T K(\rho)u$$

$$\int \Omega \rho d\Omega \leq Vmax$$

και άλλους κατασκευαστικούς ή σχεδιαστικούς περιορισμούς. (21)

Με την επίλυση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης, μπορεί να προκύψει ένας σχεδιασμός που πληροί τα επιθυμητά κριτήρια απόδοσης, τηρώντας παράλληλα τους καθορισμένους περιορισμούς.

9.4.1.2 Ορισμός χώρου σχεδιασμού

Ο χώρος σχεδιασμού είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Καθορίζει την περιοχή εντός της οποίας ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να προσθέσει ή να αφαιρέσει υλικό για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων απόδοσης. Ο σωστός ορισμός του χώρου σχεδιασμού είναι απαραίτητος για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης έχουν νόημα και είναι εφαρμόσιμα.

9.4.1.2.1 Έννοια του σχεδιαστικού χώρου

Ο χώρος σχεδιασμού είναι το θεμελιώδες υπόβαθρο πάνω στο οποίο λειτουργεί η βελτιστοποίηση τοπολογίας. Μοιάζει με τον καμβά ενός καλλιτέχνη, αλλά αντί για μπογιά, το μέσο είναι η κατανομή των υλικών.

Εντός αυτής της προκαθορισμένης περιοχής, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης καθορίζει τη βέλτιστη διάταξη υλικών με βάση τους στόχους απόδοσης και τους περιορισμούς. Προσδιορίζει περιοχές όπου το υλικό είναι απαραίτητο για τη δομική ακεραιότητα ή τη λειτουργικότητα και περιοχές όπου το υλικό μπορεί να μειωθεί ή να εξαλειφθεί για την επίτευξη εξοικονόμησης βάρους ή άλλων στόχων.

Η ευελιξία του χώρου σχεδιασμού επιτρέπει καινοτόμες λύσεις που μπορεί να μην είναι άμεσα εμφανείς στις παραδοσιακές διαδικασίες σχεδιασμού.

9.4.1.2.2 Ορισμός της περιοχής σχεδίασης στο SolidWorks

Στο SolidWorks, ο χώρος σχεδιασμού συχνά αναπαρίσταται ως γεωμετρική περιοχή, συνήθως ένα στερεό σώμα που παρέχει ένα εξωτερικό όριο για τον τελικό σχεδιασμό.

Αυτός ο τομέας είναι σκόπιμα υπερμεγέθης και απλοϊκός, παρέχοντας στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης την ελευθερία να εξερευνήσει ένα ευρύ φάσμα διαμορφώσεων χωρίς να επηρεάζεται αδικαιολόγητα από μια αρχική εικασία σχεδιασμού.

Ξεκινώντας με έναν πιο γενναιόδωρο χώρο σχεδιασμού, οι μηχανικοί μπορούν να διασφαλίσουν ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει το περιθώριο να ανακαλύψει πραγματικά βέλτιστες λύσεις, αντί να περιορίζεται σε τοπικά βέλτιστα.

9.4.1.2.3 Σημασία των οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες λειτουργούν ως βάση για τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας. Καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το εξάρτημα ή το σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, είτε μέσω σταθερών στηρίξεων, είτε μέσω εφαρμογών φορτίου, είτε μέσω διεπαφών με άλλα εξαρτήματα.

Αυτές οι συνθήκες παρέχουν πραγματικό πλαίσιο στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, διασφαλίζοντας ότι ο σχεδιασμός που προκύπτει δεν είναι απλώς θεωρητικά βέλτιστος αλλά και πρακτικά βιώσιμος.

Στο SolidWorks, οι οριακές συνθήκες ορίζονται με τα ίδια εργαλεία όπως και στο FEA, εξασφαλίζοντας συνέπεια και ακρίβεια στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

9.4.1.2.4 Ενσωμάτωση κατασκευαστικών περιορισμών

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας, αν και ισχυρή, μπορεί μερικές φορές να παράγει σχέδια που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν. Χαρακτηριστικά όπως προεξοχές, λεπτά τοιχώματα ή περίπλοκες γεωμετρίες μπορεί να είναι βέλτιστα από άποψη απόδοσης, αλλά δεν είναι εφικτά από άποψη κατασκευής.

Έτσι είναι σημαντικό να ενσωματώνονται οι περιορισμοί κατασκευής στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ελάχιστα όριο μεγεθών χαρακτηριστικών, εκτιμήσεις σχετικά με την αποχύτευση στην έγχυση ή περιορισμούς που σχετίζονται με τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής.

Με την ενσωμάτωση αυτών των περιορισμών, μπορούμε να διασφαλίσουμε ότι ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός δεν είναι μόνο υψηλής απόδοσης αλλά και κατασκευάσιμος με τις προβλεπόμενες μεθόδους παραγωγής.

9.4.1.2.5 Εξετάζοντας επιχειρησιακά σενάρια

Ένα εξάρτημα ή σύστημα σπάνια λειτουργεί υπό ένα ενιαίο, στατικό σύνολο συνθηκών. Αντίθετα, μπορεί να αντιμετωπίσει μια ποικιλία φορτίων, θερμοκρασιών ή άλλων λειτουργικών σεναρίων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Ο χώρος σχεδιασμού θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει αυτές τις διακυμάνσεις. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τον ορισμό πολλαπλών περιπτώσεων φόρτισης ή την εξέταση δυναμικών επιδράσεων. Τα εργαλεία βελτιστοποίησης τοπολογίας του SolidWorks επιτρέπουν τον ορισμό πολλαπλών σεναρίων, διασφαλίζοντας ότι η προκύπτουσα σχεδίαση είναι ευέλικτη και ανθεκτική σε όλο το προβλεπόμενο εύρος λειτουργίας της.

9.4.2 Στόχοι και περιορισμοί βελτιστοποίησης

Στόχοι βελτιστοποίησης

Οι στόχοι βελτιστοποίησης καθορίζουν τους στόχους της διαδικασίας βελτιστοποίησης της τοπολογίας. Παρέχουν μια μετρήσιμη μετρική που ο αλγόριθμος επιδιώκει να μεγιστοποιήσει ή να ελαχιστοποιήσει.

Οι κοινοί στόχοι περιλαμβάνουν:

- **Ελαχιστοποίηση της συμμόρφωσης:** Αυτό ισοδυναμεί με μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Ένας σχεδιασμός με χαμηλότερη συμμόρφωση θα παραμορφώνεται λιγότερο κάτω από ένα δεδομένο φορτίο, οδηγώντας σε καλύτερη δομική απόδοση.
- **Μεγιστοποίηση της ιδιοσυχνότητας:** Ο στόχος αυτός αποσκοπεί στον σχεδιασμό κατασκευών ανθεκτικών στις δονήσεις, εξασφαλίζοντας ότι οι φυσικές τους συχνότητες βρίσκονται εκτός του εύρους των αναμενόμενων εξωτερικών διεγέρσεων.
- **Ελαχιστοποίηση της μάζας:** Για εφαρμογές ευαίσθητες στο βάρος, η μείωση της μάζας με παράλληλη διατήρηση των επιδόσεων μπορεί να αποτελεί πρωταρχικό στόχο..

Περιορισμοί

Οι περιορισμοί είναι συνθήκες ή όρια που πρέπει να ικανοποιεί ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός. Εξασφαλίζουν ότι ο σχεδιασμός είναι εφικτός και πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Οι συνήθεις περιορισμοί στη βελτιστοποίηση τοπολογίας περιλαμβάνουν:

- **Κλάσμα όγκου:** Αυτός ο περιορισμός περιορίζει την ποσότητα του υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχέδιο. Για παράδειγμα, ένας περιορισμός κλάσματος όγκου 0,4 σημαίνει ότι ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο το 40% του υλικού του αρχικού χώρου σχεδιασμού.

- **Συμμετρία:** Για σχέδια που πρέπει να είναι συμμετρικά ως προς ένα επίπεδο ή άξονα, αυτός ο περιορισμός εξασφαλίζει ότι το βελτιστοποιημένο σχέδιο διατηρεί την επιθυμητή συμμετρία.
- **Κατασκευαστικοί περιορισμοί:** Αυτοί οι περιορισμοί διασφαλίζουν ότι ο σχεδιασμός που προκύπτει μπορεί να κατασκευαστεί με τις προβλεπόμενες μεθόδους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει περιορισμούς που σχετίζονται με τις διαδικασίες χύτευσης, φρεζαρίσματος ή προσθετικής κατασκευής.

Εξισορρόπηση στόχων και περιορισμών:

Συχνά, υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι που πρέπει να εξεταστούν ταυτόχρονα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, υιοθετείται μια προσέγγιση βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, όπου ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει μια ισορροπία μεταξύ των ανταγωνιστικών στόχων.

Η ανάλυση μετώπου Pareto μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση των συμβιβασμών μεταξύ διαφορετικών στόχων και την επιλογή ενός σχεδιασμού που ανταποκρίνεται καλύτερα στις συνολικές απαιτήσεις του έργου.

Καθορίζοντας σαφώς τους στόχους και τους περιορισμούς, οι μηχανικοί μπορούν να καθοδηγήσουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας για την παραγωγή σχεδίων που πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις επιδόσεων, κατασκευής και λειτουργίας. Αυτοί οι ορισμοί διασφαλίζουν ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης παράγει αποτελέσματα που είναι τόσο βέλτιστα όσο και ευθυγραμμισμένα με τους στόχους του έργου.

9.4.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και μετεπεξεργασία:

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης της τοπολογίας, το πρώτο βήμα είναι η οπτικοποίηση του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού. Το SolidWorks παρέχει εργαλεία για την απεικόνιση της κατανομής των υλικών, επισημαίνοντας τις περιοχές υψηλής και χαμηλής πυκνότητας υλικών.

Αυτή η οπτικοποίηση μας βοηθά να κατανοήσουμε τις κρίσιμες διαδρομές φόρτισης και τις περιοχές όπου το υλικό είναι απαραίτητο για τη δομική απόδοση.

Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός παρουσιάζει συχνά μια δομή που μοιάζει με "οστό", όπου το υλικό συγκεντρώνεται κατά μήκος των κύριων διαδρομών φόρτισης και απομακρύνεται από τις μη κρίσιμες περιοχές.

Οι βασικοί τομείς στους οποίους πρέπει να εστιάσουμε κατά τη διάρκεια της διερμηνείας περιλαμβάνουν:

- **Μονοπάτια τάσεων:** Αυτοί είναι οι πρωταρχικοί δίαυλοι μέσω των οποίων κινούνται οι δυνάμεις στο σχέδιο. Συχνά έχουν την υψηλότερη πυκνότητα υλικού στο βελτιστοποιημένο αποτέλεσμα, υποδεικνύοντας τη σημασία τους στην ανάληψη φορτίων.
- **Διανομή υλικού:** Περιοχές με μειωμένο υλικό ή κενά υποδεικνύουν περιοχές όπου το υλικό δεν είναι κρίσιμο για τη δομική απόδοση του σχεδίου. Αντίθετα, οι περιοχές με πυκνό υλικό υπογραμμίζουν τις κρίσιμες ζώνες.
- **Μετρήσεις επιδόσεων:** Είναι σημαντικό να επανεξετάζετε τις επιτυγχανόμενες μετρήσεις, όπως η μειωμένη μάζα ή η αυξημένη ακαμψία, για να διασφαλίσετε ότι η βελτιστοποίηση ευθυγραμμίζεται με τους καθορισμένους στόχους.

Είναι σημαντικό να ερμηνεύσετε τα αποτελέσματα αυτά στο πλαίσιο των στόχων και των περιορισμών του σχεδιασμού. Για παράδειγμα, οι περιοχές με ελάχιστο υλικό μπορεί να υποδεικνύουν περιοχές όπου μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση βάρους χωρίς να διακυβεύεται η δομική ακεραιότητα.

Μεταγενέστερη επεξεργασία για κατασκευασιμότητα

Ενώ η βελτιστοποίηση της τοπολογίας παρέχει μια βέλτιστη κατανομή υλικών, ο σχεδιασμός που προκύπτει μπορεί να μην είναι πάντα άμεσα κατασκευάσιμος. Η άμεση κατασκευή του ακατέργαστου μοντέλου από τη βελτιστοποίηση τοπολογίας μπορεί να είναι δύσκολη λόγω περίπλοκων ή εύθραυστων χαρακτηριστικών. Η μεταγενέστερη επεξεργασία βελτιώνει τον σχεδιασμό για την παραγωγή στον πραγματικό κόσμο. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει εξομάλυνση αιχμηρών ακμών, πάχυνση λεπτών τμημάτων ή απλοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών.

- **Εξομάλυνση γεωμετρίας:** Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση των αιχμηρών άκρων ή των μεταβάσεων για την παραγωγή ενός πιο κατασκευάσιμου σχεδίου..
- **Ενίσχυση χαρακτηριστικών:** Λεπτά ή εύθραυστα χαρακτηριστικά μπορεί να χρειάζονται ενίσχυση για να διασφαλιστεί ότι μπορούν να αντέξουν τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου..
- **Απλούστευση:** Οι υπερβολικά πολύπλοκες περιοχές μπορούν να απλουστευθούν χωρίς να διακυβεύονται σημαντικά οι επιδόσεις.

Η μετα-επεξεργασία περιλαμβάνει τη βελτίωση του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού για να διασφαλιστεί ότι είναι κατασκευάσιμος..

Επικύρωση

Μετά τη μετα-επεξεργασία, είναι ζωτικής σημασίας η επικύρωση του βελτιωμένου σχεδιασμού με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι οι τροποποιήσεις του σχεδιασμού που έγιναν κατά τη μετα-επεξεργασία δεν επηρέασαν αρνητικά την απόδοση του σχεδιασμού. Τέτοια εργαλεία είναι:

- **Προσομοιώσεις FEA:** Χρησιμοποιώντας τα ολοκληρωμένα εργαλεία FEA, ο σχεδιασμός υποβάλλεται σε προσομοίωση φορτίων και συνθηκών για την αξιολόγηση της απόδοσής του. Όπως και το αρχικό μέρος.
- **Σύγκριση με τον αρχικό σχεδιασμό:** Είναι ωφέλιμο να συγκρίνουμε τις επιδόσεις του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού με τον αρχικό ή βασικό σχεδιασμό για να ποσοτικοποιήσουμε τις βελτιώσεις που επιτεύχθηκαν μέσω της βελτιστοποίησης.

Επαναληπτική βελτίωση:

Συχνά, τα βήματα μετα-επεξεργασίας και επικύρωσης οδηγούν σε πληροφορίες που μπορούν να τροφοδοτηθούν ξανά στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτή η επαναληπτική προσέγγιση διασφαλίζει ότι ο τελικός σχεδιασμός είναι τόσο βέλτιστος όσο και πρακτικός. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με:

- **Βρόχος ανατροφοδότησης:** Οι γνώσεις από τη μετα-επεξεργασία και την επικύρωση μπορούν να οδηγήσουν σε προσαρμογές του χώρου σχεδιασμού, των περιορισμών ή των στόχων για τις επόμενες εκτελέσεις βελτιστοποίησης..
- **Convergence:** Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ο σχεδιασμός συγκλίνει σε μια λύση που πληροί όλους τους στόχους και τους περιορισμούς και είναι κατασκευάσιμη και πρακτική.

Μπορεί να προσαρμόσουμε τους περιορισμούς, να βελτιώσουμε το χώρο σχεδιασμού ή να τροποποιήσουμε τους στόχους με βάση τις γνώσεις που αποκομίσαμε από τα βήματα μετα-επεξεργασίας και επικύρωσης.

Τεκμηρίωση και αναφορές:

Αφού είμαστε ικανοποιημένοι με το σχεδιασμό, μπορούμε να τεκμηριώσουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα και τις επακόλουθες αποφάσεις σχεδιασμού..

- **Τεκμηρίωση διαδικασίας:** Αυτό αποτυπώνει τα βήματα που ακολουθήθηκαν, από τον καθορισμό του χώρου σχεδιασμού έως τον καθορισμό των στόχων και των περιορισμών..

- **Ανάλυση αποτελεσμάτων:** Λεπτομερής ανάλυση του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων επιδόσεων και συγκρίσεων με τον βασικό σχεδιασμό..
- **Αποφάσεις σχεδιασμού:** Η τεκμηρίωση των αποφάσεων που λαμβάνονται κατά τη μετα-επεξεργασία παρέχει πλαίσιο και αιτιολόγηση για τις αλλαγές στο σχεδιασμό.

Με τη σχολαστική ερμηνεία, μετεπεξεργασία και τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης τοπολογίας, οι μηχανικοί μπορούν να διασφαλίσουν ότι ο τελικός σχεδιασμός δεν είναι μόνο βέλτιστος όσον αφορά την απόδοση αλλά και πρακτικός και κατασκευάσιμος..

9.4.4 Μελέτη περίπτωσης: Εφαρμογή στο σύστημά μας

Αυτή η μελέτη περίπτωσης περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόσαμε τις αρχές και τις τεχνικές της βελτιστοποίησης τοπολογίας στο συγκεκριμένο σύστημά μας, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση, τηρώντας παράλληλα τους περιορισμούς του πραγματικού κόσμου.

9.4.4.1 Καθορισμός του χώρου σχεδιασμού:

Ο χώρος σχεδιασμού είναι το θεμελιώδες σημείο εκκίνησης για κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας. Αντιπροσωπεύει τη μέγιστη έκταση και όγκο εντός του οποίου μπορεί να λειτουργήσει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Για το σύστημά μας, ο καθορισμός ενός κατάλληλου χώρου σχεδιασμού ήταν ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης θα είχαν νόημα και θα ήταν εφαρμόσιμα.

Αρχικά μοντέλα CAD:

Το ταξίδι μας ξεκίνησε με τα αρχικά μοντέλα CAD του συστήματος. Αυτά τα μοντέλα αντιπροσώπευαν τις προκαταρκτικές ιδέες μας για το σχεδιασμό και παρείχαν μια απτή αναπαράσταση της γεωμετρίας του συστήματος.

Αυτά τα μοντέλα χρησίμευσαν ως βάση για τον καθορισμό του χώρου σχεδιασμού, διασφαλίζοντας ότι η βελτιστοποίηση θα είχε τις ρίζες της σε θεωρήσεις σχεδιασμού του πραγματικού κόσμου.

Γενναιόδωρα όρια:

Για να δώσουμε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης μεγάλη ελευθερία, ορίσαμε σκόπιμα ένα χώρο σχεδιασμού που ήταν μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο τελικό σχεδιασμό. Αυτή η προσέγγιση εξασφάλισε ότι ο αλγόριθμος δεν περιοριζόταν αδικαιολόγητα από τις αρχικές παραδοχές του σχεδιασμού μας.

Παρέχοντας ένα πιο γενναιόδωρο όριο, επιτρέψαμε στον αλγόριθμο να εξερευνήσει ένα ευρύτερο φάσμα κατανομών υλικών, οδηγώντας σε δυνητικά καινοτόμες λύσεις.

Ενσωμάτωση της πρόθεσης σχεδιασμού:

Ενώ ο χώρος σχεδιασμού ήταν γενναιόδωρος, δεν ήταν αυθαίρετος. Ενσωματώσαμε την πρόθεση σχεδιασμού στον ορισμό του, διασφαλίζοντας ότι τα κρίσιμα εξαρτήματα, οι διεπαφές και οι λειτουργικές περιοχές αντιπροσωπεύονται επαρκώς.

Αυτή η προσέγγιση εξασφάλισε ότι η βελτιστοποίηση θα σέβεται τα βασικά χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του σχεδιασμού, παράγοντας αποτελέσματα που ήταν τόσο καινοτόμα όσο και ευθυγραμμισμένα με τις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματός μας.

Εξέταση της κατασκευής και της συναρμολόγησης:

Ο χώρος σχεδιασμού έλαβε επίσης υπόψη τις πτυχές της κατασκευής και της συναρμολόγησης. Τα χαρακτηριστικά που ήταν απαραίτητα για τις διαδικασίες κατασκευής ή τις ακολουθίες συναρμολόγησης διατηρήθηκαν στον ορισμό του χώρου σχεδιασμού. Για παράδειγμα, οι διεργασίες κατασκευής στη διάθεσή μας ήταν μια φρεζομηχανή CNC 5 αξόνων, τρισδιάστατοι εκτυπωτές για θερμοπλαστικά και σύνθετα υλικά και τρισδιάστατος εκτυπωτής 3 αξόνων για μεταλλικά κράματα.

Με την ενσωμάτωση αυτών των εκτιμήσεων, εξασφαλίσαμε ότι ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός που θα προέκυπτε θα ήταν κατασκευάσιμος και φιλικός προς τη συναρμολόγηση, αποφεύγοντας πιθανές παγίδες στη συνέχεια.

Επαναληπτική βελτίωση:

Καθώς το έργο προχωρούσε, επανεξετάσαμε και βελτιώσαμε το χώρο σχεδιασμού με βάση νέες ιδέες, ανατροφοδότηση και αλλαγές στο σχεδιασμό. Πρωτίστως για την ευκολία συναρμολόγησης στη φάση παραγωγής του gimbal. Αυτή η επαναληπτική προσέγγιση διασφάλισε ότι ο χώρος σχεδιασμού παρέμεινε σχετικός και ευθυγραμμισμένος με τις εξελισσόμενες απαιτήσεις του έργου. Οι τακτικές αναθεωρήσεις και προσαρμογές εξασφάλιζαν ότι ο χώρος σχεδιασμού ήταν πάντα σε συγχρονισμό με τους στόχους και τους περιορισμούς του έργου μας.

Καθορισμός στόχων και περιορισμών:

Ο πρωταρχικός μας στόχος ήταν να μεγιστοποιήσουμε τη δυσκαμψία με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του βάρους, εξασφαλίζοντας ένα στιβαρό αλλά ελαφρύ σύστημα. Λόγω του περιβάλλοντος λειτουργίας και του γεγονότος ότι επρόκειτο για ένα προϊόν που θα κυκλοφορούσε σύντομα, αυτοί οι στόχοι ήταν δύσκολο να επιτευχθούν.

Οι περιορισμοί τέθηκαν με βάση κατασκευαστικές εκτιμήσεις, σενάρια λειτουργίας, απαιτήσεις διασύνδεσης με άλλα εξαρτήματα και ευκολία παραγωγής κατά τη συναρμολόγηση.

Ερμηνεία των αποτελεσμάτων:

Ο σχεδιασμός που προέκυψε παρουσίαζε υλικό συγκεντρωμένο κατά μήκος των κύριων διαδρομών φορτίου, με σημαντική μείωση του υλικού σε μη κρίσιμες περιοχές.

Παρατηρήσαμε μια δομή που έμοιαζε με οστά, ενδεικτική μιας αποτελεσματικής κατανομής υλικών που αντικατοπτρίζει την προσέγγιση της φύσης στον δομικό σχεδιασμό. Δυστυχώς δεν μπορούσαμε να το χρησιμοποιήσουμε ως έχει, οπότε συνεχίσαμε τη μεταγενέστερη επεξεργασία.

Μετα-επεξεργασία και βελτίωση:

Ο πρώτος βελτιστοποιημένος σχεδιασμός υπέστη αρκετές βελτιώσεις για να εξασφαλιστεί η δυνατότητα κατασκευής. Αυτό περιελάμβανε την εξομάλυνση απότομων μεταβάσεων, την ενίσχυση λεπτών χαρακτηριστικών και την απλοποίηση πολύπλοκων περιοχών.

Ο βελτιωμένος σχεδιασμός διατήρησε τα βασικά οφέλη της βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα ήταν περισσότερο ευθυγραμμισμένος με τις κατασκευαστικές και λειτουργικές πραγματικότητες.

Επικύρωση:

Ο μετα-επεξεργασμένος σχεδιασμός υποβλήθηκε σε προσομοιώσεις FEA στο SolidWorks για να επικυρωθεί η απόδοσή του. Παρουσίασε ανώτερες μετρήσεις απόδοσης σε σύγκριση με τον αρχικό σχεδιασμό, επικυρώνοντας τα οφέλη της διαδικασίας βελτιστοποίησης τοπολογίας.

9.4.5 Προκλήσεις και περιορισμοί:

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας, αν και ισχυρό εργαλείο, δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Η κατανόηση αυτών των προκλήσεων και των επιπτώσεών τους είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική αξιοποίηση της τεχνικής και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της..

Υπολογιστικές απαιτήσεις:

Η βελτιστοποίηση της τοπολογίας είναι υπολογιστικά εντατική. Καθώς ο χώρος σχεδιασμού μεγαλώνει και η πολυπλοκότητα των στόχων και των περιορισμών αυξάνεται, οι υπολογιστικές απαιτήσεις μπορούν να κλιμακωθούν.

Η εξασφάλιση επαρκών υπολογιστικών πόρων και η βελτιστοποίηση της εγκατάστασης μπορούν να βοηθήσουν στον μετριασμό αυτής της πρόκλησης, αλλά παραμένει περιοριστικός παράγοντας, ιδίως για μεγάλα ή περίπλοκα σχέδια.

Υπερβολική βελτιστοποίηση:

Υπάρχει ο κίνδυνος υπερ-βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού, με αποτέλεσμα μια δομή που είναι θεωρητικά βέλτιστη αλλά πρακτικά ανέφικτη. Τα υπερ-βελτιστοποιημένα σχέδια μπορεί να είναι πολύ εύθραυστα, δύσκολα στην κατασκευή ή να μην είναι ανθεκτικά στις μεταβολές των συνθηκών του πραγματικού κόσμου. Μερικές φορές δεν υπάρχει λόγος να βελτιστοποιηθεί κάτι που δεν χρειάζεται βελτιστοποίηση.

Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ βελτιστοποίησης και πρακτικότητας είναι απαραίτητη για την αποφυγή αυτής της παγίδας.

Κατασκευαστικοί περιορισμοί:

Το ακατέργαστο αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης τοπολογίας μπορεί μερικές φορές να παράγει σχέδια που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν. Χαρακτηριστικά όπως προεξοχές, λεπτά τοιχώματα ή περίπλοκες γεωμετρίες μπορεί να είναι βέλτιστα από άποψη απόδοσης, αλλά δεν είναι εφικτά από άποψη κατασκευής.

Η ενσωμάτωση των κατασκευαστικών περιορισμών κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι ζωτικής σημασίας, αλλά μπορεί επίσης να περιορίσει την ελευθερία του σχεδιασμού και τα πιθανά κέρδη απόδοσης.

Προκλήσεις ερμηνείας:

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης τοπολογίας απαιτεί τεχνογνωσία. Οι οργανικές δομές που αναδύονται, οι οποίες μοιάζουν με οστά, μπορεί να είναι δύσκολο να αποκρυπτογραφηθούν και να μεταφραστούν σε αξιοποιήσιμες γνώσεις σχεδιασμού.

Η διασφάλιση ότι η ομάδα σχεδιασμού είναι καλά εξοικειωμένη με τις αρχές της βελτιστοποίησης τοπολογίας και διαθέτει τα εργαλεία για την ερμηνεία και τη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη.

Ενσωμάτωση με τις παραδοσιακές διαδικασίες σχεδιασμού

Η ενσωμάτωση της βελτιστοποίησης τοπολογίας στις παραδοσιακές ροές εργασίας σχεδιασμού μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Ο επαναληπτικός χαρακτήρας της διαδικασίας, σε συνδυασμό με την ανάγκη για μετεπεξεργασία και επικύρωση, μπορεί να διαταράξει τις καθιερωμένες ροές εργασίας.

Η διασφάλιση της ομαλής ενσωμάτωσης απαιτεί προσαρμογές στις διαδικασίες σχεδιασμού, στα χρονοδιαγράμματα και στους μηχανισμούς συνεργασίας.

Υλικοί περιορισμοί:

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας συχνά υποθέτει ομοιογενείς ιδιότητες υλικών. Στην πραγματικότητα, τα υλικά μπορεί να έχουν παραλλαγές, ανισοτροπίες ή μη γραμμικές συμπεριφορές που δεν καταγράφονται στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Ενώ οι προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης μπορούν να λάβουν υπόψη τους ορισμένες από αυτές τις πολυπλοκότητες, προσθέτουν στις υπολογιστικές απαιτήσεις και μπορούν να εισάγουν πρόσθετες προκλήσεις.

Είναι προφανές ότι ενώ η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι μια ισχυρή τεχνική, η πραγματική της αξία γίνεται αντιληπτή όταν ενσωματώνεται προσεκτικά στην ευρύτερη διαδικασία σχεδιασμού. Καθώς συνεχίζουμε, οι γνώσεις που αποκτούμε από τη βελτιστοποίηση τοπολογίας θα διαδραματίσουν αναμφίβολα καθοριστικό ρόλο στην καθοδήγηση των αποφάσεών μας και στη διαμόρφωση της εξέλιξης του συστήματός μας.

9.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν συστηματικά οι υπολογιστικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία σχεδιασμού μας. Αυτές οι μεθοδολογίες περιλάμβαναν δομικές, αεροναυπηγικές και θερμικές αναλύσεις, καθώς και βελτιστοποίηση τοπολογίας. Κάθε ανάλυση, που εκτελέστηκε σε υπολογιστικό πλαίσιο, συνέβαλε σημαντικά στην τελειοποίηση του σχεδιασμού και στη διασφάλιση της βιωσιμότητάς του. Καθώς προχωράμε στο Κεφάλαιο 8, η εστίαση μετατοπίζεται από αυτές τις υπολογιστικές αξιολογήσεις στις πρακτικές φάσεις της υλοποίησης του σχεδιασμού. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η προγραμματισμένη εξέλιξη από τις πειραματικές διατάξεις στα πρωτότυπα και, στη συνέχεια, στις εκτιμήσεις παραγωγικών διαδικασιών, παρέχοντας έναν δομημένο οδικό χάρτη για τα επόμενα στάδια του έργου.

10 ΜΕΛΟΝΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν λεπτομερώς οι υπολογιστικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό μας. Αυτές περιλάμβαναν μελέτες πεπερασμένων στοιχείων για τη δομική αξιολόγηση, αεροδυναμικές και θερμικές αναλύσεις για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και βελτιστοποίηση της τοπολογίας για τη βελτίωση του σχεδιασμού. Καθεμία από αυτές τις αναλύσεις, που διεξήχθησαν σε εικονικό περιβάλλον, συνέβαλε καθοριστικά στη διαμόρφωση των αποφάσεων του σχεδιασμού και στη διασφάλιση της ευρωστίας του.

Το κεφάλαιο 8 σηματοδοτεί τη μετάβαση από τις υπολογιστικές αναλύσεις στις φάσεις πρακτικής υλοποίησης. Ενώ οι γνώσεις που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις ήταν ανεκτίμητες, η εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο παρουσιάζει ένα ξεχωριστό σύνολο προκλήσεων. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τα προγραμματισμένα βήματα για το εγγύς μέλλον, περιγράφοντας λεπτομερώς την εξέλιξη από τις αρχικές πειραματικές διατάξεις έως την ανάπτυξη πρωτοτύπων και τις εκτιμήσεις για την παραγωγή πλήρους κλίμακας.

Στόχος είναι να παρασχεθεί ένας οδικός χάρτης που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ θεωρητικών αναλύσεων και πρακτικής εφαρμογής, διασφαλίζοντας ότι ο σχεδιασμός δεν είναι βέλτιστος μόνο στα χαρτιά αλλά και αποτελεσματικός σε πραγματικές συνθήκες.

10.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΉ ΦΑΣΗ

Η πειραματική φάση αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο σημείο στη διαδικασία σχεδιασμού, καθώς αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ των υπολογιστικών αναλύσεων και της εφαρμογής στον πραγματικό κόσμο. Προσφέρει την ευκαιρία να επικυρωθούν τα ευρήματα από τις προσομοιώσεις, εξασφαλίζοντας ότι ο σχεδιασμός αποδίδει όπως αναμενόταν υπό πραγματικές συνθήκες.

10.1.1 Σκέψεις σχεδιασμού για πειραματικό Gimbal

Το πειραματικό gimbal έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να διαφέρει από το τελικό προϊόν, με συγκεκριμένες τροποποιήσεις προσαρμοσμένες για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων.

- **Διαμόρφωση ωφέλιμου φορτίου:** Σε αντίθεση με τον τελικό σχεδιασμό, το ωφέλιμο φορτίο του πειραματικού gimbal αποτελείται από δύο ράγες που διευκολύνουν τη μετατόπιση ενός βάρους. Αυτό το βάρος αντιπροσωπεύει το κέντρο βάρους (CoG) και μπορεί να ρυθμιστεί τόσο αδρά όσο και λεπτά. Αυτή η ρύθμιση είναι ζωτικής σημασίας για την προσομοίωση διαφόρων θέσεων CoG και την κατανόηση των επιπτώσεών τους στην απόδοση του gimbal.
- **Ενσωμάτωση αποστασιόμετρου λείζερ:** Για την ακριβή μέτρηση της εκτροπής του gimbal καθώς μετατοπίζεται το CoG, ενσωματώνεται ένα αποστασιόμετρο λείζερ. Αυτό εξασφαλίζει ακριβείς μετρήσεις, επιτρέποντας τη σαφή κατανόηση της συμπεριφοράς του αρθρωτού τροχού σε διαφορετικά σενάρια CoG..
- **Δοκιμή μηχανισμού λεπτής ρύθμισης:** Παράλληλα με τις πρωτογενείς δοκιμές, οι μηχανισμοί λεπτής ρύθμισης του ωφέλιμου φορτίου θα υποβληθούν σε δοκιμές δόνησης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι, αφού ρυθμιστούν, παραμένουν κλειδωμένοι στη θέση τους και δεν ολισθαίνουν, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται.

10.1.2 Στρατηγική συλλογής στοιχείων

Η στρατηγική για τη συλλογή δεδομένων έχει σχεδιαστεί για να καταγράψει τις διαφορές απόδοσης του gimbal υπό διάφορες ρυθμίσεις CoG και να επικυρώσει τους μηχανισμούς λεπτής ρύθμισης..

- **Ανάλυση καταπόνησης μοτέρ:** Οι αισθητήρες θα παρακολουθούν την τάση που απαιτείται από τα μοτέρ, καθώς το CoG μετατοπίζεται εντός του καθορισμένου όγκου. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι τα μοτέρ λειτουργούν εντός των ορίων του κατασκευαστή, ακόμη και με μεταβαλλόμενες θέσεις CoG.
- **Συλλογή δεδομένων παραμόρφωσης:** Με τη χρήση του αποστασιόμετρου λείζερ, της ποτενσιομετρικής μεμβράνης παραμόρφωσης και των μετρητικών οργάνων, θα συλλεχθούν σχολαστικά τα δεδομένα παραμόρφωσης. Αυτή η προσέγγιση πολλαπλών εργαλείων εξασφαλίζει μια

λεπτομερή κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς του gimbal και της ικανότητάς του να διατηρεί τη θέση του σε διαφορετικά σενάρια CoG..

- **Επικύρωση μηχανισμού λεπτομερούς ρύθμισης:** Οι δοκιμές δόνησης στους μηχανισμούς λεπτής ρύθμισης θα επικυρώσουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία τους, διασφαλίζοντας ότι παραμένουν κλειδωμένοι υπό συνθήκες δόνησης.

10.1.3 Ανάλυση και διορατικότητα

Μετά την ολοκλήρωση της συλλογής δεδομένων, θα ξεκινήσει μια αυστηρή διαδικασία ανάλυσης για την ερμηνεία των ευρημάτων. Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στην εξυπηρέτηση πολλαπλών στόχων:

- **Επικύρωση υπολογιστικών μοντέλων:** Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους είναι η επικύρωση των υπολογιστικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Τα πειραματικά δεδομένα θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των υπολογιστικών αναλύσεων. Μπορεί να προστεθούν αναλύσεις σε αεροσήραγγα για την επικύρωση της αεροδυναμικής και θερμικής ανάλυσης.
- **Απόδοση και καταπόνηση μοτέρ:** Τα δεδομένα τάσης που συλλέγονται από τα μοτέρ θα αναλυθούν για να αξιολογηθεί η αποδοτικότητά τους και η ανταπόκρισή τους στις μεταβολές της CoG. Θα εντοπιστούν και θα αξιολογηθούν κριτικά οι περιπτώσεις όπου τα μοτέρ καταπονούνται πέραν των ορίων του κατασκευαστή και θα δημιουργηθεί ένας φανταστικός όγκος λειτουργίας. Δηλαδή ένας όγκος που θα μπορεί να υπάρχει το κέντρο μάζας χωρίς κάποια επιπλοκή.
- **Ανάλυση παραμόρφωσης:** Τα δεδομένα παραμόρφωσης, τα οποία συλλέγονται με συνδυασμό αποστασιόμετρων λέιζερ, ποτενσιόμετρων παραμόρφωσης και μετρητικών οργάνων, θα αναλυθούν για την κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς του gimbal. Αυτό θα περιλαμβάνει μια αξιολόγηση του πόσο καλά το αρθρωτό σύστημα διατηρεί τη θέση του σε διαφορετικά σενάρια CoG.

- **Αξιοπιστία μηχανισμού λεπτής ρύθμισης:** Τα αποτελέσματα των δοκιμών δόνησης στους μηχανισμούς λεπτής ρύθμισης θα αναλυθούν για να επιβεβαιωθεί η σταθερότητα και η αξιοπιστία τους. Οποιοσδήποτε αποκλίσεις ή αστοχίες θα εξεταστούν διεξοδικά για να εντοπιστούν πιθανές περιοχές για βελτίωση. Η μέτρηση θα γίνει με ρολόγια πριν και μετά στην επιβολή τους σε δόνηση
- **Συνολική αξιολόγηση επιδόσεων:** Όλα τα δεδομένα που θα αναλυθούν θα συντεθούν για να παρέχουν μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης του αρθρωτού συστήματος. Αυτό θα περιλαμβάνει τον εντοπισμό τυχόν περιοχών που ενδέχεται να απαιτούν περαιτέρω βελτίωση ή επανασχεδιασμό. Επίσης, τα δεδομένα θα αποτελέσουν τον ακρογωνιαίο λίθο του υλικό-λογισμικού που θα αποτελεί το μυαλό του gimbal, ώστε να μπορεί να αντιδρά σε εξωτερικά ερεθίσματα είτε από τον χρήστη είτε από το περιβάλλον.

Οι πληροφορίες που θα προκύψουν από αυτή την αναλυτική φάση θα είναι καθοριστικές για την καθοδήγηση των επόμενων σταδίων ανάπτυξης πρωτοτύπων και ενδεχόμενης παραγωγής. Θα χρησιμεύσουν επίσης ως βάση για τυχόν τροποποιήσεις ή βελτιώσεις του σχεδιασμού, διασφαλίζοντας ότι το τελικό προϊόν θα είναι τόσο ισχυρό όσο και αποτελεσματικό.

10.2 ΦΑΣΗ ΠΡΩΤΟΥ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ

Μετά τις γνώσεις και τα ευρήματα από την πειραματική φάση, το έργο μεταβαίνει στην ανάπτυξη του πρώτου πρωτοτύπου. Η φάση αυτή αποτελεί σημαντικό ορόσημο, καθώς μετατρέπει τα θεωρητικά και υπολογιστικά σχέδια σε απτή μορφή. Το πρωτότυπο χρησιμεύει ως φυσική εκδήλωση των εννοιών σχεδιασμού, επιτρέποντας μια πιο πρακτική αξιολόγηση της απόδοσης και της λειτουργικότητάς του.

Σε αυτή τη φάση, η έμφαση μετατοπίζεται από ελεγχόμενες πειραματικές διατάξεις σε σενάρια εφαρμογών στον πραγματικό κόσμο. Το πρωτότυπο θα υποβληθεί σε μια σειρά δοκιμών και αξιολογήσεων, προσομοιώνοντας λειτουργικές συνθήκες για να εκτιμηθεί η στιβαρότητα, η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία του. Ενώ η

πειραματική φάση παρείχε αρχική επικύρωση, η φάση του πρωτοτύπου προσφέρει βαθύτερη κατανόηση των πρακτικών επιπτώσεων του σχεδιασμού.

Η παρούσα ενότητα θα περιγράψει λεπτομερώς τις εκτιμήσεις, τις προκλήσεις και τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου, υπογραμμίζοντας την επαναληπτική διαδικασία βελτίωσης του σχεδιασμού με βάση την ανατροφοδότηση από τον πραγματικό κόσμο.

10.2.1 Στόχοι σχεδιασμού πρωτοτύπου

Καθώς το έργο εξελίσσεται προς την πρώτη φάση του πρωτοτύπου, η δημιουργία του θα καθοδηγείται από διάφορες εκτιμήσεις σχεδιασμού και ανάπτυξης:

- **Επιλογή υλικών:** Το πρωτότυπο, που είναι μια ακριβής αναπαράσταση της μονάδας παραγωγής, θα απαιτήσει προσεκτικές τελικές επιλογές υλικών. Ο στόχος θα είναι να εξασφαλιστεί η ανθεκτικότητα, διατηρώντας παράλληλα μια ελαφριά δομή, επιτυγχάνοντας μια ισορροπία μεταξύ αντοχής και βάρους, ιδίως δεδομένης της εναέριας εφαρμογής του gimbal.
- **Ενσωμάτωση αισθητήρων:** Το πρωτότυπο θα είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες για τη διευκόλυνση διαφόρων δοκιμών, ιδίως για την αξιολόγηση των χρόνων αντίδρασης και των ταχυτήτων περιστροφής. Αυτοί οι αισθητήρες δεν θα μετρούν μόνο μετρήσεις επιδόσεων, αλλά αναμένεται επίσης να παρέχουν ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας άμεσες προσαρμογές.
- **Μηχανισμοί στεγανοποίησης:** Η επίτευξη της κατηγορίας στεγανότητας IP67 θα αποτελέσει προτεραιότητα. Η βαθμολογία IP67 σημαίνει ότι η συσκευή θα είναι στεγανή σε σκόνη και θα μπορεί να αντέξει τη βύθιση σε νερό έως και 1 μέτρο για 30 λεπτά. Αυτό προϋποθέτει την ενσωμάτωση στεγανοποιήσεων, φλαντζών και εξειδικευμένων επιστρώσεων. Κάθε πιθανό σημείο εισόδου νερού και σκόνης θα εντοπιστεί και θα ενισχυθεί για να εξασφαλιστεί η προστασία.
- **Βελτιώσεις μηχανικού σχεδιασμού:** Οι γνώσεις από την πειραματική φάση θα δώσουν πληροφορίες για πιθανές βελτιώσεις στον μηχανικό σχεδιασμό.

Οι προσαρμογές θα αποσκοπούν στην ενίσχυση της σταθερότητας, την ελαχιστοποίηση των δονήσεων και τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης.

- **Λογισμικό και υλικολογισμικό (Firmware):** Το λογισμικό και το υλικολογισμικό που είναι ενσωματωμένα στο gimbal θα προσαρμοστούν ώστε να εξασφαλίζουν γρήγορες αντιδράσεις, ακριβή τοποθέτηση και απρόσκοπτη ενσωμάτωση με άλλα συστήματα κατά τη διάρκεια δοκιμαστικών πτήσεων, όπως παρακολούθηση ή αναγνώριση στόχων.
- **Πρωτόκολλα ασφαλείας:** Δεδομένων των προγραμματισμένων σεναρίων δοκιμών στον πραγματικό κόσμο, και ιδίως της δοκιμαστικής πτήσης, θα θεσπιστούν πρωτόκολλα ασφαλείας για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του gimbal.

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του πρώτου πρωτοτύπου θα είναι μια επαναληπτική διαδικασία, με συνεχείς βρόχους ανατροφοδότησης που θα διασφαλίζουν ότι κάθε πτυχή είναι βελτιστοποιημένη για την απόδοση, την ασφάλεια και την αξιοπιστία.

10.2.2 Στρατηγική δοκιμών και επικύρωσης

Καθώς αναπτύσσεται το πρώτο πρωτότυπο, θα δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα δοκιμών για την αξιολόγηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του υπό διάφορες συνθήκες. Η παρούσα ενότητα περιγράφει τις μεθοδολογίες που θα χρησιμοποιηθούν:

- **Δοκιμή στεγανοποίησης:** Για να επικυρωθεί η βαθμολογία IP67, το gimbal θα υποβληθεί σε δοκιμές βύθισης. Θα βυθιστεί σε νερό σε βάθος 1 μέτρου για διάρκεια 30 λεπτών. Μετά τη βύθιση, θα αξιολογηθεί η λειτουργικότητα και η ακεραιότητα του gimbal για να διασφαλιστεί ότι δεν έχει συμβεί εισροή νερού.
- **Δοκιμές κρούσης και δόνησης:** Αυτές οι δοκιμές θα προσομοιώσουν τις πιθανές καταπονήσεις που μπορεί να αντιμετωπίσει το αρθρωτό σύστημα κατά τη λειτουργία. Με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού, το gimbal θα εκτεθεί σε ελεγχόμενους κραδασμούς και δονήσεις και θα παρακολουθούνται οι

μετρήσεις των επιδόσεών του για τον εντοπισμό τυχόν αποκλίσεων ή δυσλειτουργιών.

- **Αξιολόγηση του χρόνου αντίδρασης και της ταχύτητας περιστροφής:** Χρησιμοποιώντας τους ενσωματωμένους αισθητήρες, θα μετρηθεί η απόκριση του gimbal. Ο χρόνος που χρειάζεται το gimbal για να αντιδράσει στις εντολές και η ταχύτητα περιστροφής του υπό διάφορες συνθήκες θα μετρηθούν και θα συγκριθούν με τα καθορισμένα σημεία αναφοράς
- **Αξιολόγηση δοκιμαστικής πτήσης:** Θα διεξαχθεί ελεγχόμενη δοκιμαστική πτήση για την αξιολόγηση της αεροδυναμικής απόδοσης του gimbal στον πραγματικό κόσμο. Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της πτήσης, όπως η σταθερότητα, η ανταπόκριση και η κατανάλωση ενέργειας, θα παράσχουν ανεκτίμητες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργική αποδοτικότητά του.
- **Πρωτόκολλα ασφάλειας και λειτουργίας:** Πέρα από τις επιδόσεις, θα αξιολογηθεί η τήρηση των πρωτοκόλλων ασφαλείας από το αρθρωτό σύστημα. Αυτό περιλαμβάνει τη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια δυσλειτουργιών, τις διαδικασίες τερματισμού έκτακτης ανάγκης και την ενσωμάτωσή του με άλλα συστήματα πτήσης.

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών όχι μόνο θα επικυρώσουν τις επιλογές σχεδιασμού αλλά και θα αναδείξουν τομείς που ενδέχεται να απαιτούν περαιτέρω βελτίωση. Υποβάλλοντας το πρωτότυπο σε αυστηρές αξιολογήσεις, ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι το τελικό προϊόν είναι αξιόπιστο και βελτιστοποιημένο για την προβλεπόμενη εφαρμογή του.

10.2.3 Προσέγγιση ανατροφοδότησης και επαναληπτικής βελτίωσης

Μόλις το πρώτο πρωτότυπο υποβληθεί σε ολοκληρωμένο πρόγραμμα δοκιμών, θα είναι διαθέσιμος πλούτος δεδομένων για ανάλυση. Η παρούσα ενότητα θα περιγράψει τις αναμενόμενες γνώσεις και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από τα δεδομένα αυτά:

- **Επικύρωση μετρικών επιδόσεων:** Ο χρόνος αντίδρασης, η ταχύτητα περιστροφής και άλλες μετρικές επιδόσεων που θα προκύψουν από τις δοκιμές θα συγκριθούν με τα αρχικά σημεία αναφοράς του σχεδιασμού. Αυτή η σύγκριση θα επικυρώσει εάν το gimbal πληροί, υπερβαίνει ή υπολείπεται των καθορισμένων προτύπων επιδόσεων.
- **Αποτελεσματικότητα στεγανοποίησης:** Οι δοκιμές βύθισης θα παράσχουν σαφήνεια σχετικά με την αποτελεσματικότητα των μέτρων στεγανοποίησης IP67. Κάθε περίπτωση εισόδου νερού ή λειτουργικών διαταραχών μετά την εμβάπτιση θα τεκμηριώνεται σχολαστικά.
- **Δομική ακεραιότητα:** Οι δοκιμές κραδασμών και δονήσεων θα ρίξουν φως στη δομική ανθεκτικότητα του gimbal. Τυχόν παραμορφώσεις, θραύσεις ή δυσλειτουργίες που θα προκύψουν από αυτές τις δοκιμές θα είναι κρίσιμες για την κατανόηση της ανθεκτικότητας του σχεδιασμού.
- **Αεροδυναμική απόδοση:** Οι πληροφορίες από τη δοκιμαστική πτήση θα είναι ανεκτίμητες για τη μέτρηση της αεροδυναμικής απόδοσης του gimbal. Θα αξιολογηθούν παράγοντες όπως η σταθερότητα κατά τη διάρκεια της πτήσης, η κατανάλωση ενέργειας και η ενσωμάτωση με άλλα συστήματα πτήσης. Καθώς το εξωτερικό κέλυφος του ζυγωματικού και η βάση στήριξης και οι αποσβεστήρες που το συνοδεύουν.
- **Τήρηση πρωτοκόλλου ασφαλείας:** Η συμπεριφορά του gimbal κατά τη διάρκεια πιθανών δυσλειτουργιών και η τήρηση των διαδικασιών τερματισμού λειτουργίας έκτακτης ανάγκης θα δώσουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά ασφαλείας του. Τυχόν αποκλίσεις ή αποτυχίες στην τήρηση των πρωτοκόλλων ασφαλείας θα αξιολογηθούν κριτικά.
- **Τομείς βελτίωσης:** Πέρα από την επικύρωση, οι δοκιμές θα αναδείξουν αναπόφευκτα τομείς που απαιτούν περαιτέρω βελτίωση ή επανασχεδιασμό. Αυτές οι περιοχές θα τεκμηριωθούν, παρέχοντας έναν οδικό χάρτη για τις επόμενες επαναλήψεις του σχεδιασμού.

Οι γνώσεις και τα ευρήματα αυτής της φάσης θα είναι καθοριστικά για την καθοδήγηση των επόμενων σταδίων ανάπτυξης. Θα χρησιμεύσουν ως βάση

για τυχόν τροποποιήσεις ή βελτιώσεις, διασφαλίζοντας ότι το τελικό προϊόν θα είναι αποτελεσματικό και αξιόπιστο..

10.3 ΠΡΩΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Με βάση τις γνώσεις από την πειραματική φάση και τις αξιολογήσεις του πρώτου πρωτοτύπου, το έργο θα προχωρήσει στην ανάπτυξη της πρώτης μονάδας παραγωγής. Η φάση αυτή σηματοδοτεί ένα σημαντικό ορόσημο, που σηματοδοτεί τη μετάβαση από το σχεδιασμό και τις δοκιμές στην πραγματική παραγωγή.

Στην παρούσα ενότητα, η έμφαση θα δοθεί στις προκλήσεις και τις εκτιμήσεις που σχετίζονται με την κλιμάκωση του σχεδιασμού για παραγωγή. Η μονάδα παραγωγής θα πρέπει όχι μόνο να διατηρήσει τα πρότυπα επιδόσεων που τέθηκαν κατά τη φάση του πρωτοτύπου, αλλά και να μπορεί να κατασκευαστεί με οικονομικά αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο.

Οι βασικοί τομείς εστίασης θα περιλαμβάνουν:

- **Προμήθεια υλικών:** Διασφάλιση ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μονάδα παραγωγής δεν είναι μόνο υψηλής ποιότητας αλλά και άμεσα διαθέσιμα για παραγωγή μεγάλης κλίμακας.
- **Τεχνικές κατασκευής:** Προσδιορισμός των αποδοτικότερων τεχνικών παραγωγής που διασφαλίζουν τη συνέπεια και την ποιότητα των προϊόντων, βελτιστοποιώντας παράλληλα την ταχύτητα παραγωγής.
- **Ποιοτικός έλεγχος:** Εφαρμογή αυστηρών μέτρων ποιοτικού ελέγχου ώστε να διασφαλίζεται ότι κάθε μονάδα παραγωγής πληροί τα καθορισμένα πρότυπα και είναι απαλλαγμένη από ελαττώματα.
- **Ενσωμάτωση και συναρμολόγηση:** Εξορθολογισμός της διαδικασίας συναρμολόγησης για να διασφαλιστεί ότι κάθε εξάρτημα ταιριάζει τέλεια και λειτουργεί απρόσκοπτα.

- **Βρόχος ανατροφοδότησης:** Δημιουργία μηχανισμού για τη συλλογή ανατροφοδότησης από τους αρχικούς χρήστες της μονάδας παραγωγής. Αυτή η ανατροφοδότηση θα είναι ανεκτίμητη για μελλοντικές επαναλήψεις και βελτιώσεις.

Η ανάπτυξη της πρώτης μονάδας παραγωγής θα αποτελέσει απόδειξη της επιτυχίας του έργου, δίνοντας ζωή στο σχέδιο και καθιστώντας το διαθέσιμο για πραγματικές εφαρμογές..

10.3.1 Μετάβαση σε στρατηγική παραγωγής

Η μετάβαση από ένα πρωτότυπο σε μια μονάδα έτοιμη για παραγωγή είναι μια κρίσιμη φάση στην ανάπτυξη προϊόντων. Περιλαμβάνει την κλιμάκωση του σχεδιασμού, τη διασφάλιση της κατασκευασιμότητας και την αντιμετώπιση των προκλήσεων της μαζικής παραγωγής. Ακολουθούν οι βασικές στρατηγικές και εκτιμήσεις για αυτή τη μετάβαση:

- **Σχεδιασμός για κατασκευασιμότητα (DfM):** Μία από τις πρωταρχικές εκτιμήσεις θα είναι η βελτίωση του σχεδιασμού ώστε να εξασφαλιστεί η βελτιστοποίησή του για κατασκευή μεγάλης κλίμακας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την απλοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών, την τυποποίηση εξαρτημάτων ή την επιλογή υλικών που είναι πιο κατάλληλα για μαζική παραγωγή..
- **Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας:** Καθώς αυξάνουμε την κλίμακα, η προμήθεια υλικών και εξαρτημάτων σε μεγαλύτερες ποσότητες καθίσταται ζωτικής σημασίας. Η καθιέρωση αξιόπιστων αλυσίδων εφοδιασμού, η διαπραγμάτευση των τιμών χύμα και η εξασφάλιση έγκαιρης παράδοσης θα είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή εμπλοκών στην παραγωγή..
- **Πρωτόκολλα διασφάλισης ποιότητας:** Με τον αυξημένο όγκο παραγωγής, η διατήρηση της σταθερής ποιότητας γίνεται πρόκληση. Η εφαρμογή αυστηρών πρωτοκόλλων διασφάλισης ποιότητας, συμπεριλαμβανομένων τακτικών επιθεωρήσεων, δοκιμών και επικύρωσης, θα διασφαλίσει ότι κάθε μονάδα πληροί τα καθορισμένα πρότυπα.

- **Κλιμάκωση εγκαταστάσεων παραγωγής:** Ανάλογα με την αναμενόμενη ζήτηση, ενδέχεται να υπάρξει ανάγκη επέκτασης ή αναβάθμισης των εγκαταστάσεων παραγωγής. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει επενδύσεις σε νέα μηχανήματα, εκπαίδευση του προσωπικού ή βελτιστοποίηση των ροών εργασίας στην παραγωγή.
- **Ενσωμάτωση ανατροφοδότησης:** Καθώς κυκλοφορούν οι πρώτες μονάδες, η συλλογή ανατροφοδότησης από τους χρήστες και η ταχεία ενσωμάτωσή της στη διαδικασία παραγωγής θα είναι απαραίτητη. Αυτή η επαναληπτική προσέγγιση διασφαλίζει την άμεση αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων, οδηγώντας σε ένα καλύτερο προϊόν με την πάροδο του χρόνου..
- **Διαχείριση κόστους:** Καθώς μεταβαίνουμε στην παραγωγή, θα υπάρχει μια συνεχής πίεση και έλξη μεταξύ της διατήρησης της ποιότητας και της διαχείρισης του κόστους. Θα πρέπει να ληφθούν στρατηγικές αποφάσεις για την επίτευξη της σωστής ισορροπίας, εξασφαλίζοντας ένα προϊόν υψηλής ποιότητας που θα είναι επίσης οικονομικά αποδοτικό.

Η μετάβαση στην παραγωγή είναι κάτι περισσότερο από απλή κλιμάκωση-πρόκειται για τη βελτίωση, τη βελτιστοποίηση και τη διασφάλιση ότι το τελικό προϊόν όχι μόνο ανταποκρίνεται αλλά και υπερβαίνει τις προσδοκίες που τέθηκαν κατά τη φάση του πρωτοτύπου.

10.3.2 Αναμενόμενες προκλήσεις παραγωγής

Η μετάβαση από ένα πρωτότυπο σε μια μονάδα έτοιμη για παραγωγή δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Καθώς αυξάνουμε την κλίμακα και εξορθολογίζουμε τις διαδικασίες, ενδέχεται να προκύψουν διάφορα εμπόδια. Ακολουθούν ορισμένες αναμενόμενες προκλήσεις και οι στρατηγικές για την αντιμετώπισή τους:

- ❖ **Σταθερή ποιότητα σε κλίμακα:** Καθώς αυξάνονται οι όγκοι παραγωγής, η διατήρηση του ίδιου επιπέδου ποιότητας σε όλες τις μονάδες μπορεί να αποτελέσει πρόκληση.

- **Στρατηγική:** Η εφαρμογή αυτοματοποιημένων ελέγχων ποιότητας, η τακτική εκπαίδευση της ομάδας παραγωγής και η αυστηρή δοκιμή του τελικού προϊόντος μπορούν να βοηθήσουν στη διατήρηση σταθερής ποιότητας.

- ❖ **Διαταραχές στην αλυσίδα εφοδιασμού:** Η εξάρτηση από πολλαπλούς προμηθευτές μπορεί να οδηγήσει σε πιθανές διαταραχές, ιδίως εάν ένα βασικό εξάρτημα δεν είναι διαθέσιμο.
 - **Στρατηγική:** Η διαφοροποίηση των προμηθευτών, η διατήρηση αποθέματος ασφαλείας και η σύναψη μακροπρόθεσμων συμβάσεων μπορούν να μετριάσουν τους κινδύνους της αλυσίδας εφοδιασμού.

- ❖ **Υπερβάσεις κόστους:** Οι απρόβλεπτες πολυπλοκότητες της παραγωγής ή τα προβλήματα της αλυσίδας εφοδιασμού μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβάσεις κόστους.
 - **Στρατηγική:** Οι τακτικές αναθεωρήσεις του προϋπολογισμού, οι αναλύσεις κόστους-οφέλους και οι προληπτικές διαπραγματεύσεις με τους προμηθευτές μπορούν να βοηθήσουν στη συγκράτηση του κόστους.

- ❖ **Τεχνικά ζητήματα με νέα μηχανήματα:** Η εισαγωγή νέων μηχανημάτων ή τεχνολογιών μπορεί να συνοδεύεται από καμπύλη εκμάθησης και πιθανές τεχνικές δυσλειτουργίες.
 - **Στρατηγική:** Οι ολοκληρωμένες εκπαιδευτικές συνεδρίες, η ύπαρξη τεχνικής υποστήριξης σε ετοιμότητα και η τακτική συντήρηση των μηχανημάτων μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις.

- ❖ **Καθυστερήσεις ενσωμάτωσης ανατροφοδότησης:** Καθώς έρχεται η ανατροφοδότηση από τους αρχικούς χρήστες, η ενσωμάτωσή της στη διαδικασία παραγωγής μπορεί να πάρει χρόνο, οδηγώντας σε πιθανές καθυστερήσεις.
 - **Στρατηγική:** Η δημιουργία μιας ειδικής ομάδας για τη διαχείριση των ανατροφοδοτήσεων, την ιεράρχηση των ζητημάτων και την εφαρμογή των αλλαγών μπορεί να βελτιώσει αυτή τη διαδικασία.

❖ **Ρυθμιστικά εμπόδια και εμπόδια συμμόρφωσης:** Το gimbal, δεδομένης της προοριζόμενης εφαρμογής του, πρέπει να συμμορφώνεται με συγκεκριμένα στρατιωτικά πρότυπα, ιδίως το στρατιωτικό πρότυπο 810 (MIL-STD-810G). Αυτό το πρότυπο ελέγχει την ικανότητα του εξοπλισμού να λειτουργεί σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, εξασφαλίζοντας ανθεκτικότητα και αξιοπιστία.

➤ **Στρατηγική:** Η έγκαιρη συνεργασία με εμπειρογνώμονες που είναι εξοικειωμένοι με το MIL-STD-810G, η διεξαγωγή των απαραίτητων δοκιμών σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του προτύπου και η εξασφάλιση όλων των εγγράφων και πιστοποιήσεων θα είναι ζωτικής σημασίας.

Η πρόβλεψη αυτών των προκλήσεων και η ύπαρξη στρατηγικών για την αντιμετώπισή τους θα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ομαλής μετάβασης στην παραγωγή. Με την προληπτική και προετοιμασμένη λειτουργία, το έργο μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά αυτές τις προκλήσεις, εξασφαλίζοντας την επιτυχή παραγωγή ενός προϊόντος υψηλής ποιότητας.

10.3.3 Σχέδια ελέγχου ποιότητας και δοκιμών

Η διασφάλιση της κορυφαίας ποιότητας του συστήματος gimbal είναι υψίστης σημασίας, ιδίως λόγω των εξειδικευμένων εφαρμογών του. Η παραγωγή θα διέπεται από ένα σχολαστικό καθεστώς ποιοτικού ελέγχου και δοκιμών, σύμφωνα με τα πρότυπα και τις πιστοποιήσεις που κατέχει η κατασκευάστρια εταιρεία.

Το πρότυπο IPC/WHMA-A-620 θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο, ιδίως λαμβάνοντας υπόψη τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του gimbal. Το πρότυπο αυτό θέτει το σημείο αναφοράς για τις απαιτήσεις και την αποδοχή των συγκροτημάτων καλωδίων και καλωδιώσεων. Η τήρησή του εξασφαλίζει την αξιοπιστία και τη βέλτιστη απόδοση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων εντός του αρθρωτού τροχού.

Το MIL-STD-810G παραμένει ακρογωνιαίος λίθος για τις δοκιμές, δεδομένου ότι εστιάζει στην ανθεκτικότητα του εξοπλισμού σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το gimbal θα υποβληθεί σε μια σειρά δοκιμών που υπαγορεύονται από αυτό το στρατιωτικό πρότυπο, από δοκιμές θερμοκρασίας και υγρασίας έως αξιολογήσεις κραδασμών και δονήσεων.

Πέρα από τις τυποποιημένες δοκιμές, θα καθιερωθεί ένα εσωτερικό πρόγραμμα δοκιμών. Αυτό θα περιλαμβάνει λειτουργικές δοκιμές, αξιολογήσεις επιδόσεων και δοκιμές παρατεταμένης διάρκειας για τη μέτρηση της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας του gimbal με την πάροδο του χρόνου.

Μια κρίσιμη πτυχή της διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου θα είναι η δοκιμή εργοστασιακής αποδοχής (FAT). Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη δοκιμή του εξοπλισμού στο εργοστάσιο για να διασφαλιστεί ότι πληροί τις καθορισμένες απαιτήσεις. Πρόκειται για μια αυστηρή διαδικασία επικύρωσης που διασφαλίζει ότι το σύστημα gimbal είναι έτοιμο για εγκατάσταση και θα αποδίδει όπως αναμένεται στο επιχειρησιακό του περιβάλλον.

Για να διασφαλιστεί η συνεχής βελτίωση, θα θεσπιστεί ένας μηχανισμός ανατροφοδότησης. Οι αρχικοί χρήστες της μονάδας παραγωγής θα παρέχουν πολύτιμες γνώσεις, οι οποίες θα διοχετεύονται πίσω στη διαδικασία παραγωγής για μελλοντικές βελτιώσεις.

Τέλος, θα δοθεί έμφαση στην τεκμηρίωση και την ιχνηλασιμότητα. Κάθε μονάδα gimbal που θα παράγεται θα συνοδεύεται από πλήρη τεκμηρίωση, διασφαλίζοντας ότι κάθε βήμα της διαδικασίας παραγωγής, από την προμήθεια υλικών έως τις τελικές δοκιμές, θα καταγράφεται και θα είναι ανιχνεύσιμο.

Συνοπτικά, αυτή η πολύπλευρη προσέγγιση στον έλεγχο ποιότητας και τις δοκιμές διασφαλίζει ότι το σύστημα gimbal είναι προετοιμασμένο για πραγματικές εφαρμογές, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας και αξιοπιστίας.

11 ΣΥΝΟΨΗ

Το ταξίδι της βελτιστοποίησης του συστήματος αρθρωτού συστήματος για UAV ήταν τόσο προκλητικό όσο και διαφωτιστικό. Μέσω αυστηρών υπολογιστικών και πειραματικών αναλύσεων, η έρευνα αυτή έριξε φως στις περιπλοκές του σχεδιασμού του αρθρωτού συστήματος, από την κατανόηση της δυναμικής του ωφέλιμου φορτίου και των συστημάτων ψύξης έως την αντιμετώπιση των προκλήσεων της παραγωγής. Η τήρηση των στρατιωτικών προτύπων εξασφάλισε την αξιοπιστία και την ευρωστία του σχεδιασμού. Καθώς η τεχνολογία UAV συνεχίζει να εξελίσσεται, οι γνώσεις από την παρούσα μελέτη θα διαδραματίσουν αναμφίβολα καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των συστημάτων αρθρωτού συστήματος UAV, εξασφαλίζοντας ασφαλέστερες και αποτελεσματικότερες λειτουργίες. Οι μελλοντικές προσπάθειες σε αυτόν τον τομέα μπορούν να διερευνήσουν περαιτέρω την ενσωμάτωση προηγμένων υλικών και συστημάτων ελέγχου με βάση την τεχνητή νοημοσύνη για τη βελτίωση των επιδόσεων του αρθρωτού συστήματος.

12 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Κύρια συστατικά:

Αρχικοποίηση:

- Η εφαρμογή SolidWorks αρχικοποιείται.
- Ανοίγεται η επιθυμητή συναρμολόγηση.
- Ρυθμίζονται τα απαραίτητα αντικείμενα, όπως ο διαχειριστής επιλογής και η συναρμολόγηση.

Βρόχος βελτιστοποίησης:

- Το σενάριο προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη διάταξη των εξαρτημάτων.
- Μετά από κάθε προσπάθεια βελτιστοποίησης, το σενάριο ελέγχει για παρεμβολές.
- Εάν εντοπιστούν παρεμβολές, η βελτιστοποίηση επαναλαμβάνεται.
- Ο βρόχος θα επιχειρήσει εκ νέου έως και 3 φορές.

Λογική βελτιστοποίησης:

- Η θερμική κάμερα χρησιμοποιείται ως στοιχείο αναφοράς.
- Το LRF τοποθετείται σε σχέση με τη θερμική κάμερα.
- Η δεύτερη κάμερα τοποθετείται επίσης σε σχέση με τη θερμική κάμερα.

Έλεγχος παρεμβολής:

- Μετά την τοποθέτηση των εξαρτημάτων, το σενάριο ελέγχει για τυχόν παρεμβολές.
- Εάν δεν εντοπιστούν παρεμβολές, η βελτιστοποίηση θεωρείται επιτυχής.

Βοηθητικό πρόγραμμα μετασχηματισμού:

Παρέχεται μια βοηθητική συνάρτηση (SetTransform) για τον καθορισμό της θέσης και του προσανατολισμού των στοιχείων.

Συναρτήσεις και υπορουτίνες:

- **Main()**: Η κύρια υπορουτίνα που αρχικοποιεί την εφαρμογή SolidWorks, ανοίγει τη συναρμολόγηση και διαχειρίζεται τον βρόχο βελτιστοποίησης.
- **OptimizeArrangement()**: Χειρίζεται τη λογική για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων εντός της συναρμολόγησης.

- **CheckInterference()**: Ελέγχει το συγκρότημα για παρεμβολές μετά την τοποθέτηση των εξαρτημάτων.
- **SetTransform(swComp, x, y, z)**: Μια βοηθητική συνάρτηση για τον καθορισμό της θέσης (και του προσανατολισμού) ενός εξαρτήματος. Λαμβάνει ένα εξάρτημα και τις συντεταγμένες x, y, z ως ορίσματα.

Χρήση:

- Βεβαιωθείτε ότι το SolidWorks είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή σας.
- Ανοίξτε τον επεξεργαστή VBA μέσα στο SolidWorks.
- Εισάγετε το παρεχόμενο σενάριο.
- Προσαρμόστε τη μεταβλητή fileName στην υπορουτίνα Main() ώστε να δείχνει στο αρχείο συναρμολόγησης.
- Εκτελέστε την υπορουτίνα Main().

13 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. *A Nonlinear Backstepping Controller Design for High-Precision Tracking Applications with Input-Delay Gimbal Systems.* **Hwan-Cheol Park, Soumayya Chakir, Young-Bok Kim, Tinh Huynh.** 2021, ResearchGate, p. 11.
2. *Simultaneous Self-Calibration of Nonorthogonality and Nonlinearity of Cost-Effective Multiaxis Inertially Stabilized Gimbal Systems.* **Zhang, Fu.** 2017, ResearchGate, p. 132.
3. **SimScale.** Mesh Quality. *SimScale.* [Online] <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/>.
4. *Spatial and Temporal Validation of a CFD Model Using Residence Time Distribution Test in a Tubular Reactor.* **Rivas, J., Sadino-Riquelme, M. C., Garcés, I., Carvajal, A., & Donoso-Bravo, A.** s.l. : MDPI, 2020.
5. *Sequential implicit vertex approximate gradient discretization of incompressible two-phase Darcy flows with discontinuous capillary pressure.* **Brenner, K., Chorfi, N., & Masson, R.** s.l. : JAE, 2021.
6. *CFD-based numerical simulation of cyclone separator for separating stigmas from petals of saffron.* **Nemati, J., Beheshti, B., & Borghei, A.** s.l. : JAE, 2020.
7. *Study and Simulation of the Thrust Vectoring in Supersonic Nozzles.* **Hakim, K., Toufik, H., & Mouloudj, Y.** s.l. : Journal of Advance Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2022.
8. **Versteeg, H. K., & Malalasekera, W.** *n introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.* . s.l. : Pearson Education., 2007.
9. **Ferziger, J. H., & Perić, M.** *Computational methods for fluid dynamics.* Springer. 2002.
10. **Tannehill, J. C., Anderson, D. A., & Pletcher, R. H.** *Computational fluid mechanics and heat transfer.* . s.l. : Taylor & Francis., 1997.
11. **Patankar, S. V.** *Numerical heat transfer and fluid flow.* s.l. : CRC Press., 1980.
12. **Hirsch, C.** **Numerical computation of internal and external flows.** Vol. 2: *Computational methods for inviscid and viscous flows.* . s.l. : Wiley., 1988.
13. *ON THE QUANTIFICATION OF DISCRETIZATION.* **JULIEN BECT, SOULEYMANE ZIO, GUILLAUME PERRIN, CLAIRE CANNAMELA, EMMANUEL VAZQUEZ.** Universit´e Paris-Saclay : Shipedia, 2020.

14. *CFD code comparison, verification and validation for decay tests.* **Gonçalves, Manuel Rentschler · Pranav Chandramouli · Guilherme Vaz · Axelle Viré · Rodolfo T.** s.l. : Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2022.
15. *Experimental validation of a deforming grid 4D dose.* **Miriam Krieger, Grisca Klimpki, Giovanni Fattori, David Oxley.** s.l. : Krieger, 2018.
16. *FRAMEWORK FOR CONVERGENCE AND VALIDATION OF STOCHASTIC UNCERTAINTY QUANTIFICATION AND RELATIONSHIP TO DETERMINISTIC VERIFICATION AND VALIDATION.* **S. Maysam Mousaviraad, Wei He, Matteo Diez, Frederick Stern.** s.l. : International Journal for Uncertainty Quantification, , 2013.
17. *Advanced static and dynamic analysis method for helical springs of non-linear geometries.* **Gu, Z., Hou, X., & Ye, J.** Department of Engineering, Lancaster University, Lancaster : s.n., 2021.
18. *on-Linear Dynamic Analysis on Hybrid Air Bearing-Rotor System under Ultra-High Speed Condition.* **Song, L., Yuan, G., Zhang, H., Ding, Y., & Cheng, K.** s.l. : MDPI, 2022.
19. *Proposal of A Non Linear Static Analysis Procedure for Bridges: The Incremental Modal Pushover Analysis for Bridges.* **Bergami, A., Nuti, C., Lavorato, D., Fiorentino, G., & Briseghella, B.** s.l. : MPDI, 2020.
20. *Non-linear Analysis of Laterally Loaded Piles Using "p-y" Curves.* **saroudakis, E., Mylonakis, G., & Klimis, N.** University OF Bristol : s.n., 2020.
21. **Junker, P., & Balzani, D.** *A new variational approach for the thermodynamic topology optimization of hyperelastic structures.* 2020.
22. *Metaheuristic optimization approach and computational study on advanced mathematical modeling of solar cell.* **Mallick, S.** 2020.
23. *Topology-Optimization-Based Learning: A Powerful Teaching and Learning Framework under the Prism of the CDIO Approach.* **Tyflopoulos, E., Haskins, C., & Steinert, M.** 2021.
24. *Group theoretic particle swarm optimization for multi-level threshold lung cancer image segmentation.* **Lan, K., Zhou, J., & Jiang, X. et al.** s.l. : QIMS, 2022.
25. *Air Flow Study around Isolated Cubical Building in the City of Athens under Various Climate Conditions.* **Chariton L. Pavlidis, Anargyros V. Palampigik, Konstantinos Vasilopoulos, Ioannis C. Lekakis, Ioannis E. Sarris.** 2022, MDPI, p. 27.

26. *Investigation of the Trailing Edge Modification Effect on Compressor Blade Aerodynamics Using SST $k-\omega$ Turbulence Model.* **Mongkol Kaewbumrung, Worapol Tangsopa, Jatuporn Thongsri.** Thailand : MDPI, 2019. <https://doi.org/10.3390/aerospace6040048>.

27. **Ilias Mavridis, Efi Tsigonia.** *CFD_methodology_in_ANSA-ANSYS_setup.* Athens : Poseidon Team, 2023.