



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΛΟΝΟΜΟΥ ΙΠΤΑΜΕΝΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΡΕΙΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΕΣ ΕΛΙΚΕΣ**

Γεωργακόπουλος Βασίλειος-Ευφραίμ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάλυση και ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός ολόνομου tricopter με τρεις κατευθυνόμενες έλικες. Η ολόνομη φύση αυτού του οχήματος προκύπτει από την ιδιότητα των ελίκων να είναι κατευθυνόμενες μέσα σε μια νοητή σφαίρα. Την κατεύθυνση της κάθε έλικας μέσα σε αυτόν τον χώρο αναλαμβάνει ένας ειδικός μηχανισμός.

Έπειτα από συστηματική εξέταση και σύγκριση ποικίλων μηχανισμών προσδιορίζεται ο βέλτιστος αυτός ειδικός μηχανισμός. Κριτήρια επιλογής του είναι το εύρος κίνησης, η θέση του κέντρου μάζας, το βάρος, η αδράνεια, η απλότητα, η ευκολία κατασκευής, η ευρωστία και το κόστος.

Στη συνέχεια, αναλύεται και βελτιστοποιείται το όχημα ως προς τα θεμελιώδη γεωμετρικά του μεγέθη που είναι το μήκος της ακτίνας στο άκρο της οποίας βρίσκεται η κάθε έλικα, η κλίση του, οι αποστάσεις των κέντρων μάζας και της θέσης εφαρμογής των δυνάμεων ώσης από το ουδέτερο επίπεδο. Τα κριτήρια ανάλυσης που μελετάμε, είτε πιο απλά είτε πιο μαθηματικοποιημένα είναι καθαρά κινηματικά και στοχεύουν στην ομαλή και βέλτιστη συμπεριφορά του οχήματος.

Δεδομένου του βέλτιστου μηχανισμού που έχει προσδιορισθεί και των συμπερασμάτων βασισμένων στα κινηματικά κριτήρια, στη συνέχεια επικεντρώνουμε την προσοχή μας στο βέλτιστο προσδιορισμό όλων των μεγεθών που συνιστούν το ρομπότ. Αυτά είναι συνιστώσες όπως η μπαταρία, οι οδηγήσεις των ηλεκτροκινητήρων, οι επενεργητές, οι έλικες καθώς και όλα τα γεωμετρικά μεγέθη του. Έτσι, αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε Matlab ο οποίος βασίζεται στις δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα ιπτάμενο ολόνομο όχημα 15 β.ε. [1]. Οι εξισώσεις αυτές απλοποιούνται και παραμετροποιούνται σύμφωνα με τη μορφή του ρομπότ μας. Το βέλτιστο διάγραμμα σχεδιασμού προκύπτει για ένα ωφέλιμο φορτίο-payload 300gr και ελάχιστο χρόνο πτήσης τα 10 min, ενώ το ρομπότ αιωρείται αλλά έχει και τη δυνατότητα να περιστρέφεται και να μετατοπίζεται στο χώρο.

Τέλος, έχοντας προσδιορίσει επ'ακριβώς όλα τα μεγέθη του ρομπότ προχωρούμε στο λεπτομερή σχεδιασμό του ενώ παράλληλα κάθε δομικό του στοιχείο ελέγχεται ως προς την αντοχή του για στατικές φορτίσεις μέσω του περιβάλλοντος SolidWorks. Η κατακλείδα της εργασίας αυτή αποτελείται από την πλήρη πραγματική μορφή του ρομπότ συνοδευόμενη από διαγράμματα επάρκειας των επενεργητών του ώστε να οπτικοποιηθούν οι τελικές του δυνατότητες.

Abstract

This Thesis regards the analysis and the design optimization of a holonomic tricopter with three vectored propellers. This is achieved by a proper mechanism that allows the propellers to have any desired orientation in the three dimensional space.

After a thorough examination and comparison between various mechanisms we choose the optimal one based on performance standards and criteria. These are the propellers' working space, the mass, the inertia, the mechanism simplicity, to be easily constructed, the robustness and the cost.

Next, the fundamental geometric characteristics of this robot are analyzed and optimized based on kinematic criteria, in order to achieve the smooth and optimal performance of this vehicle. Such characteristics are the length of the radius which connects the main body with each propeller, its incline, the distance between the plane of the base and the centers of masses as well as the distance between the exact location of the Thrust and the plane of the base.

Based on the chosen mechanism and the conclusions regarding its geometric characteristics, the optimal combination of all the robot's components is defined. The vital parameters of this robot are the battery, the actuators, the drives, the propellers as well as its geometric components. Hence, an optimization algorithm which is based on the dynamic equations that describe this holonomic vehicle [1] is developed in the Matlab environment. These equations are simplified and parametrized according to the aforementioned parameters. The optimal design vector is determined under the requirement that the robot must be capable of hovering as well as translating and rotating about any direction in the 3D space. During this maneuver the robot's payload is 300gr while its minimum flight time must be 10 mins.

Finally, after having defined in an optimal way the vital components that this robot includes, we focus on its detailed design. Next, every structural component of this robot is statically balanced and checked using the SolidWorks environment. This Thesis ends with the detailed drawings and assemblies of the final actual robot. The final results also include the diagrams that illustrate the sufficiency of the actuators as well as predict its capabilities.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου
και στην αδερφή μου*

Πρόλογος

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην περάτωση της παρούσας εργασίας και κατ' επέκταση στην ανέλιξη και κατάρτιση μου ως μηχανικό αλλά και γενικότερα ως άνθρωπο.

Πρώτα ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα αυτής της εργασίας και Καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο τόσο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα στοχευμένο στα ενδιαφέροντα μου όσο και για την κατανόηση και τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του καθ' όλα τα στάδια της εργασίας αυτής. Ακόμη, ευχαριστώ τον Υ.Δ Μ.Ραμπ για την πολύ καλή συνεργασία μας, τις συμβουλές και τη συνεχή στήριξη του.

Οφείλω επίσης ένα ευχαριστώ σε όλους τους ανθρώπους της ερευνητικής ομάδας του Καθηγητή κ. Ευάγγελου Παπαδόπουλου και ιδιαίτερα στο μέλος ΕΔΙΠ Δρα. Ιωάννη Νταβλιάκο και Δρα. Κώστα Νάνο, οι οποίοι ομαλοποίησαν την εκπόνηση της εργασίας αυτής κατά τις ώρες απασχόλησης μου στο εργαστήριο, μέσω του ευχάριστου κλίματος και της πολύ φιλικής τους διάθεσης.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στην αδερφή μου για τη γενικότερη και συνεχή υποστήριξη τους, κυρίως ψυχολογικής φύσεως, κατά τη διάρκεια αυτού του ταξιδιού.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	5
Πρόλογος.....	8
Περιεχόμενα.....	9
Κατάλογος Σχημάτων	12
Κατάλογος Πινάκων.....	19
Κατάλογος Συντμήσεων	20
Κατάλογος Συμβόλων.....	21
1 Εισαγωγή	27
1.1 Εισαγωγή στα rotorcrafts.....	27
1.2 Περιγραφή των multirotors και αρχή λειτουργίας τους.....	28
1.3 Ολόνομα ιπτάμενα οχήματα	31
1.4 Σκοπός - Δομή εργασίας	35
2 Επιλογή Μηχανισμού.....	37
2.1 Εισαγωγή	37
2.2 Παρουσίαση και περιγραφή μηχανισμών.....	38
2.3 Τελικός πίνακας σύγκρισης και επιλογή μηχανισμού	54
3 Βελτιστοποίηση ιπτάμενου ρομπότ ως προς τις βασικές γεωμετρικές παραμέτρους.....	57
3.1 Θέση τοποθέτησης του κέντρου μάζας στο ΙΣΗΕ	57
3.2 Προσδιορισμός θεμελιωδών γεωμετρικών μεγεθών του οχήματος και θέση εφαρμογής της δύναμης ώσης.....	66
4 Βέλτιστη επιλογή συνιστωσών και γεωμετρικών μεγεθών του ρομπότ	78
4.1 Εισαγωγή	78
4.2 Δυναμικό μοντέλο και αντίστοιχες εξισώσεις προς επεξεργασία	79
4.3 Παραμετροποίηση των εξισώσεων.....	83
4.4 Κατάστρωση αναλυτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης των συνιστωσών και της γεωμετρίας του οχήματος.....	98
4.5 Σύνοψη.....	125
5 Λεπτομερής σχεδιασμός του ρομπότ.....	127
5.1 Εισαγωγή	127

5.2	Λεπτομερειακός σχεδιασμός του ρομπότ και έλεγχος της αντοχής των μηχανικών μερών του	133
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	194
6.1	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.....	194
6.2	Μελλοντική εργασία.....	195
	Βιβλιογραφία	197
	Παράρτημα Α.....	200
A.1	Κύριες μήτρες περιστροφής.....	200
A.2	Αντισυμμετρικός πίνακας.....	200
	Παράρτημα Β	201
B.1	Παρουσίαση των όρων \mathbf{N}_i , β_i , θ_i , $\bar{\zeta}_i$, Φ_i και \mathbf{B}_i που εμφανίζονται στις Εξ. (4.13) - (4.20).....	201
B.2	Υπολογισμός των όρων I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} του μητρώου αδράνειας της βάσης	201
	Παράρτημα Γ	208
Γ.1.	Διαστάσεις όλων των τεμαχίων που απαρτίζουν το ρομπότ και εμφανίζονται στο Κεφάλαιο 5.	208

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.	Κατηγοριοποίηση RUAV σύμφωνα με το μέγεθος τους [2].	27
Σχήμα 1.2.	Κατηγοριοποίηση multirotors σύμφωνα με τον αριθμό των ελίκων.	28
Σχήμα 1.3.	Κύρια δομή ενός multirotor.	28
Σχήμα 1.4.	Quadrotor με αντίρροπες γωνιακές ταχύτητες ανά δύο έλικες [3].	29
Σχήμα 1.5.	Οριζόντια μετατόπιση ενός συμβατικού quadrotor [3].	30
Σχήμα 1.6.	Tilting του ηλεκτροκινητήρα μέσω ενός rc servo.	31
Σχήμα 1.7.	Y4 copter διάταξη.	31
Σχήμα 1.8.	Y6 copter διάταξη.	31
Σχήμα 1.9.	Multirotor 8 ελίκων με τις 4 να αναλαμβάνουν τις πλευρικές μετατοπίσεις [4].	32
Σχήμα 1.10.	Hexrotor αποτελούμενο από έλικες τοποθετημένες σε κεκλιμένα επίπεδα [5].	33
Σχήμα 1.11.	Quadrotor με δυνατότητα tilting στο κάθε πόδι του [6].	33
Σχήμα 1.12.	Quadrotor με δύο έλικες κατευθυνόμενες στο χώρο [7].	34
Σχήμα 1.13.	Διάγραμμα Ελευθέρου σώματος του ολόνομου tricopter 15β.ε [1].	35
Σχήμα 2.1.	Μηχανισμός υβριδικού συστήματος.	39
Σχήμα 2.2.	Μηχανισμός μηχανικού συστήματος με επενεργητές στη βάση.	41
Σχήμα 2.3.	Μηχανισμός μηχανικού συστήματος με επιθυμητό κέντρο μάζας.	43
Σχήμα 2.4.	Μηχανισμός παραλλαγής 1 μηχανικού συνδυασμένου συστήματος.	45
Σχήμα 2.5.	Μηχανισμός παραλλαγής 2 μηχανικού συνδυασμένου συστήματος.	46
Σχήμα 2.6.	Σχηματική απεικόνιση του απτικού μηχανισμού 5 β.ε. [9].	48
Σχήμα 2.7.	Φωτογραφία του πραγματικού απτικού μηχανισμού 5 β.ε. [9].	48
Σχήμα 2.8.	Διαδρομή μικρονημάτων ώστε να μην επηρεάζονται τα μήκη τους κατά τις μεταφορικές κινήσεις [9].	48
Σχήμα 2.9.	Σφαιρική άρθρωση [9].	49
Σχήμα 2.10.	Σφαιρική άρθρωση 3 β.ε με τα συστήματα τροχαλιών A, B, C [9].	49
Σχήμα 2.11.	Μηχανισμός σφαιρικής άρθρωσης μηχανισμού απτικής διεπαφής.	50
Σχήμα 2.12.	Omnidirectional wheel.	52
Σχήμα 2.13.	Μηχανισμός προωστήρα τοποθετημένου σε κινούμενη σφαίρα.	53
Σχήμα 3.1.	Ροπή ευστάθειας στο πλοίο.	58
Σχήμα 3.2.	Τρισδιάστατη απεικόνιση του οχήματος με τα κέντρα μάζας του.	58
Σχήμα 3.3.	Διανύσματα της θέσης μαζών για όχημα στην οριζόντια θέση.	59
Σχήμα 3.4.	Διανύσματα και δυνάμεις για εκτροπή του οχήματος +50° γύρω από τον άξονα Y.	61
Σχήμα 3.5.	Αντιπροσωπευτικές διακριτές τιμές των γωνιών θ_{i1}, θ_{i2} .	63
Σχήμα 3.6.	Συμπεριφορά των αδιάστατων ροπών γύρω από άξονα X και Y για θετικές εκτροπές οχήματος.	64
Σχήμα 3.7.	Συμπεριφορά των αδιάστατων ροπών γύρω από άξονα X και Y για αρνητικές εκτροπές οχήματος.	64
Σχήμα 3.8.	Τελική τρισδιάστατη απεικόνιση οχήματος με τα κέντρα μάζας του.	65
Σχήμα 3.9.	Διανυσματική απεικόνιση οχήματος για τον προσδιορισμό των θεμελιωδών γεωμετρικών του μεγεθών.	67
Σχήμα 3.10.	Απεικόνιση των γεωμετρικών μεγεθών προς διερεύνηση.	67

Σχήμα 3.11.	To Inspire 1 της εταιρείας DJI [10].....	68
Σχήμα 3.12.	Διακριτοποίηση του τριγωνομετρικού κύκλου για τις γωνίες roll και pitch	72
Σχήμα 3.13.	Δείκτης κατάστασης συναρτήσει αδιάστατων d_T και L_z	74
Σχήμα 3.14.	Δείκτης κατάστασης συναρτήσει αδιάστατων L και d_T	74
Σχήμα 3.15.	Δείκτης κατάστασης συναρτήσει αδιάστατων L και L_z	75
Σχήμα 3.16.	Δείκτης κατάστασης συναρτήσει του όρου σ	76
Σχήμα 3.17.	Τρισδιάστατη απεικόνιση οχήματος μετά τα συμπεράσματα των Παρ. 3.1 και 3.2.	77
Σχήμα 4.1.	Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το ιπτάμενο όχημα 15 β.ε [1].....	80
Σχήμα 4.2.	Απλοποιημένη απεικόνιση του οχήματος προς βελτιστοποίηση.	83
Σχήμα 4.3.	Βάση ως κυκλικός δίσκος.	85
Σχήμα 4.4.	Διατομή Ποδιού.	85
Σχήμα 4.5.	Διατομή στεφάνης.	85
Σχήμα 4.6.	Διατομή άξονα κάθετου στο πόδι.	86
Σχήμα 4.7.	Απεικόνιση του οχήματος για αδράνεια βάσης.	88
Σχήμα 4.8.	Συνιστώσες ΙΣΗΕ που συνεισφέρουν στο μητρώο αδράνειας \mathbf{J}_p	89
Σχήμα 4.9.	Brushless Outrunner DC motor της εταιρείας AXI [18].	91
Σχήμα 4.10.	Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών για έναν DC motor.	92
Σχήμα 4.11	Δείγμα ESC της εταιρείας JETI [23].	92
Σχήμα 4.12.	ESC ως μια συνεχής αντίσταση.	93
Σχήμα 4.13.	Δείγμα μπαταρίας από την εταιρεία Kokam [24].	94
Σχήμα 4.14.	Συσχέτιση ενέργειας μπαταρίας E_{bat} με τον όγκο της V_{bat}	96
Σχήμα 4.15.	Συσχέτιση μάζας μπαταρίας m_{bat} με τον όγκο της V_{bat}	96
Σχήμα 4.16.	Δείγμα έλικας της εταιρείας APC [25].	97
Σχήμα 4.17.	Χαρακτηριστική λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα και φορτία έλικας για αιώρηση.	101
Σχήμα 4.18.	Γενικό διάγραμμα ροής προβλήματος βελτιστοποίησης.	101
Σχήμα 4.19.	Διάγραμμα ροής της αναλυτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης για τους 8 συνδυασμούς γωνιών.	105
Σχήμα 4.20.	Αντιπροσωπευτικές τιμές γωνιών ar, ap, ay μήτρας περιστροφής \mathbf{Q}	106
Σχήμα 4.21.	Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.53kg.	109
Σχήμα 4.22.	Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.73kg.	109
Σχήμα 4.23.	Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.08kg.	110
Σχήμα 4.24.	Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.23kg.	110
Σχήμα 4.25.	KST DS215MG Miniature Digital servo [28].	111
Σχήμα 4.26.	GENING D90 High Speed Digital Servo [29].	112
Σχήμα 4.27.	Επάρκεια σερβοκινητήρων για μάζα 1.73kg.	113
Σχήμα 4.28.	Επάρκεια σερβοκινητήρων για μάζα 2.08kg.	113
Σχήμα 4.29.	AXI 2814/10 GOLD LINE Brushless Outrunner Motor [18].	114
Σχήμα 4.30.	JETI ADVANCE 40 Pro opto ESC [23].	115
Σχήμα 4.31.	Yellow RC LiPo 4000mAh Battery [30].	117
Σχήμα 4.32.	APC LP10030(1) propeller [25].	118
Σχήμα 4.33.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.58kg.	119

Σχήμα 4.34.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.58kg και έλικα με μεγάλο λόγο p / D_p .	120
Σχήμα 4.35.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.73kg.	121
Σχήμα 4.36.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.88kg.	121
Σχήμα 4.37.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.08kg.	122
Σχήμα 4.38.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.28kg.	122
Σχήμα 4.39.	Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.44kg.	123
Σχήμα 4.40.	Επάρκεια των σερβοκινητήρων για πραγματική μάζα 1.88kg.	124
Σχήμα 4.41.	Επάρκεια των σερβοκινητήρων για πραγματική μάζα 2.28kg.	124
Σχήμα 5.1.	Rotary Optical Encoder.	128
Σχήμα 5.2.	Hall-Sensing Encoder.	129
Σχήμα 5.3.	Magneto-resistive sensor.	129
Σχήμα 5.4.	Inductive Magnetic Encoder.	129
Σχήμα 5.5.	Περιστροφική παλμογεννήτρια της εταιρείας AVAGO [31].	130
Σχήμα 5.6.	Διάταξη encoder με μαγνητικό δακτύλιο και αισθητήρα της εταιρείας RLS [32].	130
Σχήμα 5.7.	Διάταξη encoder με κυλινδρικό μαγνητάκι και αισθητήρα της εταιρείας RLS [32].	131
Σχήμα 5.8.	Βασική δομή ενός τυπικού δακτυλίου ολίσθησης (slip ring).	132
Σχήμα 5.9.	Ανθρακόψηκτες με σύστημα πίεσης από δράπανο BOSCH.	132
Σχήμα 5.10.	Through Bore Slip Ring της εταιρείας MOFLON [34].	133
Σχήμα 5.11.	Miniature Slip Ring της εταιρείας KEYO [35].	133
Σχήμα 5.12.	Όχημα ως σύστημα σωμάτων.	134
Σχήμα 5.13.	Λεπτομερής και τελική μορφή Σώματος A.	135
Σχήμα 5.14.	Συναρμολόγημα ελικοφόρου ηλεκτροκινητήρα, προσαρμογέα έλικας και τεμαχίου έδρασης τους.	136
Σχήμα 5.15.	Συναρμολόγημα κάτω άξονα, ρουλεμάν, δακτυλίου ασφάλειας, κοπλέρ και δευτέρου σερβοκινητήρα.	137
Σχήμα 5.16.	Τρίτο κύριο υποσύστημα Σώματος A.	138
Σχήμα 5.17.	Τεμάχιο A1 στο οποίο εδράζεται ο ελικοφόρος ηλεκτροκινητήρας.	138
Σχήμα 5.18.	Φωτογραφία κατασκευασμένου τεμαχίου A1 για τη φιλοξενία του ηλεκτροκινητήρα.	139
Σχήμα 5.19.	Φορτία, πακτώσεις και ισοδύναμη τάση von Mises για το τεμάχιο A1.	140
Σχήμα 5.20.	Collet Type Propeller Adapter A2.	140
Σχήμα 5.21.	ελικοφόρος ηλεκτροκινητήρας, προσαρμογέας έλικας και τεμαχίου έδρασης τους.	141
Σχήμα 5.22.	Κάτω άξονας A3 με το ρουλεμάν A4 και το δακτύλιο ασφάλειας A5.	141
Σχήμα 5.23.	STWN10 δακτύλιος ασφάλειας A5 της εταιρείας Misumi [36].	142
Σχήμα 5.24.	C-SFL6700ZZ ρουλεμάν A4 της εταιρείας Misumi [36].	142
Σχήμα 5.25.	Ροή φορτίων από το τεμάχιο A1 στον κάτω άξονα A3 χωρισμένη σε δύο περιπτώσεις.	143
Σχήμα 5.26.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω άξονα A3 για την πρώτη περίπτωση φόρτισης.	143
Σχήμα 5.27.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω άξονα A3 για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.	144
Σχήμα 5.28.	Πάνω άξονας A9 με το ρουλεμάν A10 και το δακτύλιο σύσφιξης A11.	144
Σχήμα 5.29.	Rigid Type coupling της εταιρείας Misumi [36].	145
Σχήμα 5.30.	Κόπλερ A6 από ντουραλουμίνιο 2030.	145

Σχήμα 5.31.	Φορτίο, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κόπλερ A6 για την μία πλευρά.	146
Σχήμα 5.32.	Φορτίο, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κόπλερ A6 για την άλλη πλευρά.	146
Σχήμα 5.33.	Έδραση A7 κάτω άξονα.....	147
Σχήμα 5.34.	Φορτία έδρασης για δυο περιπτώσεις.....	148
Σχήμα 5.35.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της έδρασης του κάτω άξονα για την πρώτη περίπτωση φόρτισης.....	148
Σχήμα 5.36.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της έδρασης του κάτω άξονα για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.....	149
Σχήμα 5.37.	Τεμάχιο A7 για τη στήριξη του δεύτερου σερβοκινητήρα.....	149
Σχήμα 5.38.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του τεμαχίου στήριξης του δεύτερου σερβοκινητήρα.....	150
Σχήμα 5.39.	Δεύτερο κύριο υποσύστημα Σώματος A πριν την τελική συναρμολόγηση.....	150
Σχήμα 5.40.	Σύστημα πάνω έδρασης.....	151
Σχήμα 5.41.	Χάλκινοι αγωγοί και μονώσεις στον πάνω άξονα A9.....	153
Σχήμα 5.42.	Χάλκινα ελάσματα A17 με σύστημα πίεσης για το δακτύλιο ολίσθησης.....	154
Σχήμα 5.43.	Στροφικό ελατήριο 33-0320 της εταιρείας Misumi [36].....	155
Σχήμα 5.44.	RM08 SUPER SMALL NON-CONTACT ROTARY ENCODER της εταιρείας RLS [32].	155
Σχήμα 5.45.	Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος πάνω έδρασης ή αντίβαρο.....	156
Σχήμα 5.46.	Τρίτο κύριο υποσύστημα Σώματος A πριν την τελική συναρμολόγηση.....	157
Σχήμα 5.47.	Κέντρα μάζας σωμάτων σύμφωνα με τον πολυσωματικό ελεγκτή.....	158
Σχήμα 5.48.	Κυλινδράκι ως αντίβαρο για το σώμα (b) του Σχ. 5.47.....	159
Σχήμα 5.49.	Τελική λεπτομερής μορφή Σώματος B.....	160
Σχήμα 5.50.	Στεφάνη B1 Σώματος B.....	161
Σχήμα 5.51.	Φορτία στεφάνης για δύο περιπτώσεις.....	162
Σχήμα 5.52.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της στεφάνης B1 κατά την πρώτη περίπτωση φόρτισης.....	163
Σχήμα 5.53.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της στεφάνης B1 κατά τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.....	163
Σχήμα 5.54.	Φλάντα σύνδεσης B2 στεφάνης και ποδιού.....	164
Σχήμα 5.55.	Δυσμενέστερη δυνατή φόρτιση της φλάντζας B2 για δύο ελέγχους αντοχής.....	164
Σχήμα 5.56.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για τον πρώτο έλεγχο της φλάντζας B2 κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση.....	165
Σχήμα 5.57.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για το δεύτερο έλεγχο της φλάντζας B2 κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση.....	165
Σχήμα 5.58.	Πόδι-άξονας πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής B3 μαζί με τα ρουλεμάν B4 και τους δακτυλίους ασφάλειας B5.....	166
Σχήμα 5.59.	C-SFL6702ZZ ρουλεμάν της εταιρείας Misumi [36].....	166
Σχήμα 5.60.	STWN15 δακτύλιος ασφάλειας της εταιρείας Misumi [36].....	167
Σχήμα 5.61.	Δυσμενέστερα φορτία του ποδιού B3.....	167
Σχήμα 5.62.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για το πόδι B3 κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση.....	168
Σχήμα 5.63.	Σύστημα έδρασης ποδιού B6.....	168
Σχήμα 5.64.	Φορτίσεις έδρασης ποδιού B6 για τις δύο δυσμενέστερες περιπτώσεις.....	170

Σχήμα 5.65.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises έδρασης ποδιού B6 για την πρώτη περίπτωση φόρτισης.....	170
Σχήμα 5.66.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises έδρασης ποδιού B6 για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.....	171
Σχήμα 5.67.	Κόπλερ σύζευξης ποδιού με πρώτο σερβοκινητήρα.....	171
Σχήμα 5.68.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για φορτία στην μία πλευρά του κόπλερ σύζευξης του πρώτου σερβοκινητήρα.....	172
Σχήμα 5.69.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για φορτία στην άλλη πλευρά του κόπλερ σύζευξης του πρώτου σερβοκινητήρα.....	172
Σχήμα 5.70.	Συνιστώσες των slip rings μαζί με το σύστημα έδρασης ποδιού.	174
Σχήμα 5.71.	B15 Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος έδρασης ποδιού.....	175
Σχήμα 5.72.	Μερικώς τελική μορφή του Σώματος Β πριν την τελική συναρμολόγηση.....	176
Σχήμα 5.73.	Συναρμολόγηση για την παλμογεννήτρια του ποδιού.	177
Σχήμα 5.74.	Δείγμα πλαστικού οδοντωτού τροχού για την παλμογεννήτρια.	178
Σχήμα 5.75.	Backlash συνεργαζόμενων μετωπικών οδοντωτών τροχών.	178
Σχήμα 5.76.	Τελική λεπτομερής μορφή Σώματος Γ.....	180
Σχήμα 5.77.	Γ1 Σκελετός της βάσης.	181
Σχήμα 5.78.	Φορτίσεις σκελετού της βάσης για τις δύο δυσμενέστερες περιπτώσεις.....	181
Σχήμα 5.79.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του σκελετού της βάσης Γ1 για την πρώτη περίπτωση.....	182
Σχήμα 5.80.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του σκελετού της βάσης Γ1 για τη δεύτερη περίπτωση.....	182
Σχήμα 5.81.	Γ2 έρεισμα σερβοκινητήρα πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.....	183
Σχήμα 5.82.	Εντατική κατάσταση ερείσματος Γ2.....	183
Σχήμα 5.83.	Απλοποιημένη απεικόνιση και συνδεσιμότητα των ηλεκτρονικών Γ3 σε συνεργασία με τον Υ.Δ Μ.Ραμπ.	184
Σχήμα 5.84.	οCam: 5MP USB 3.0 Camera.	185
Σχήμα 5.85.	Μερικώς τελική μορφή του Σώματος Γ πριν την τελική συναρμολόγηση.	186
Σχήμα 5.86.	Το ένα πόδι προσγείωσης Γ4 του ρομπότ (εκ των τριών).....	187
Σχήμα 5.87.	Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κύριου σώματος του ποδιού προσγείωσης Γ4.....	187
Σχήμα 5.88.	Τελική πραγματική μορφή του ρομπότ.....	188
Σχήμα 5.89	(Συνέχεια) Τελική πραγματική μορφή του ρομπότ.	188
Σχήμα 5.90.	Μέτρηση μάζας καλωδίου Φ2.5 και μήκους 29cm	189
Σχήμα 5.91.	Μέτρηση μάζας καλωδίου Φ0.9 και μήκους 29cm	190
Σχήμα 5.92.	Επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων για το τελικό πραγματικό όχημα και τις δυνατότητες του.	191
Σχήμα 5.93.	Επάρκεια των σερβοκινητήρων για το τελικό πραγματικό όχημα για μια ρεαλιστική τροχιά του ρομπότ.....	192
Σχήμα 5.94.	Απαιτήσεις ρεαλιστικής τροχιάς σε σχέση με τα προαναφερθέντα για τις δυνατότητες του ρομπότ.....	193
Σχήμα Β.1.	Απεικόνιση στεφάνης για προσδιορισμό των $I_{XX,hoop}$, $I_{YY,hoop}$, $I_{ZZ,hoop}$ και d_{cm}	204
Σχήμα Β.2.	Ροπή αδράνειας $I_{XX,hoop}$ συναρτήσει μήκους στεφάνης και εξίσωση παρεμβολής...205	
Σχήμα Β.3.	Ροπή αδράνειας $I_{YY,hoop}$ συναρτήσει μήκους στεφάνης και εξίσωση παρεμβολής. ...206	

Σχήμα Β.4.	Ροπή αδράνειας $I_{ZZ,hoop}$ συναρτήσει μήκους στεφάνης και εξίσωση παρεμβολής.....	206
Σχήμα Γ.5.	Πάνω άξονας του άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.	210
Σχήμα Γ.6.	Κόπλερ σύζευξης άξονα με δεύτερο σερβοκινητήρα.	210
Σχήμα Γ.7	Έδραση κάτω άξονα.....	211
Σχήμα Γ.8.	Πλαίσιο στήριξης δεύτερου σερβοκινητήρα.	211
Σχήμα Γ.9.	Έδραση πάνω άξονα.....	212
Σχήμα Γ.10.	ABS πλαστικό της πάνω έδρασης.	212
Σχήμα Γ.11.	Χάλκινος δακτύλιος του πάνω άξονα για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.....	213
Σχήμα Γ.12.	Μονωτικός δακτύλιος πάνω άξονα.....	213
Σχήμα Γ.13.	ABS άξονας μεταξύ πάνω άξονα και δακτυλίων.	214
Σχήμα Γ.14.	Χάλκινο έλασμα του πάνω άξονα για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.....	214
Σχήμα Γ.15.	33-03230 στροφικό ελατήριο.	215
Σχήμα Γ.16.	Πείρος στήριξης των χάλκινων ελασμάτων και ελατηρίων.	215
Σχήμα Γ.17.	Μονώσεις μεταξύ των χάλκινων ελασμάτων.	215
Σχήμα Γ.18.	Παλμογεννήτρια RM08.	216
Σχήμα Γ.19.	Μαγνητάκι παλμογεννήτριας.....	216
Σχήμα Γ.20.	Προστατευτικό πλαστικό κάλυμμα-αντίβαρο.	216
Σχήμα Γ.21.	Κύλινδρος-αντίβαρο εσωτερικά του κάτω άξονα.....	217
Σχήμα Γ.22.	Στεφάνη.	217
Σχήμα Γ.23.	Φλάντζα σύνδεσης στεφάνης με πόδι.	218
Σχήμα Γ.24.	C-SFL6702ZZ ρουλεμάν.....	218
Σχήμα Γ.25.	STWN15 δακτύλιος σύσφιγξης.	218
Σχήμα Γ.26.	Πόδι του ρομπότ.....	219
Σχήμα Γ.27.	Μισό τεμάχιο συστήματος έδρασης του ποδιού.....	219
Σχήμα Γ.28.	Κόπλερ σύζευξης ποδιού με σερβοκινητήρα.	220
Σχήμα Γ.29.	Χάλκινος δακτύλιος του ποδιού για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.	220
Σχήμα Γ.30.	Μονωτικοί δακτύλιοι του ποδιού.	220
Σχήμα Γ.31.	Χάλκινο έλασμα του ποδιού για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.	221
Σχήμα Γ.32	Πείρος στήριξης ελασμάτων του ηλεκτροκινητήρα.....	221
Σχήμα Γ.33.	Χάλκινος δακτύλιος του ποδιού για τα καλώδια της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα.	222
Σχήμα Γ.34.	Χάλκινο έλασμα του ποδιού για τα καλώδια της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα.	222
Σχήμα Γ.35.	Μονωτικός δακτύλιος για τα ελάσματα της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα.	222
Σχήμα Γ.36.	ABS άξονας μεταξύ ποδιού και δακτυλίων.	223
Σχήμα Γ.37.	Πείρος στήριξης ελασμάτων για την παλμογεννήτρια και το σερβοκινητήρα.	223
Σχήμα Γ.38.	Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος έδρασης ποδιού.	224
Σχήμα Γ.39.	κεραμικό έδρανο κύλισης MSM 0610-02.....	224
Σχήμα Γ.40.	Πλαστικός άξονας ως σώμα με το μαγνητάκι.	225
Σχήμα Γ.41.	Γρανάζι του πλαστικού άξονα.	225
Σχήμα Γ.42.	Γρανάζι ποδιού.....	225
Σχήμα Γ.43.	Πλαστικό τεμάχιο στήριξης συστήματος παλμογεννήτριας.....	226

Σχήμα Γ.44.	Πάνω κυκλικό τμήμα σκελετού βάσης.....	226
Σχήμα Γ.45.	Κάτω κυκλικό τμήμα σκελετού βάσης.....	227
Σχήμα Γ.46.	Κολώνες σκελετού βάσης.....	227
Σχήμα Γ.47.	Έρεισμα σερβοκινητήρα πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.....	228
Σχήμα Γ.48.	Κύριο σώμα ποδιών προσγείωσης.....	228
Σχήμα Γ.49.	Πλαστικό μέρος ποδιών προσγείωσης.....	229

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Τελικός πίνακας σύγκρισης μηχανισμών.....	55
Πίνακας 3-1. Αποτελέσματα συνάρτησης βελτιστοποίησης.....	73
Πίνακας 3-2. Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης για 5m άνω όριο μήκους ποδιού	73
Πίνακας 4-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά LiPo μπαταριών της εταιρείας Kokam.....	95
Πίνακας 4-2. (Συνέχεια) Τεχνικά χαρακτηριστικά LiPo μπαταριών της εταιρείας Kokam	95
Πίνακας 4-3. Μεταβλητές οι οποίες εμφανίζονται στις εξισώσεις και στην αντικειμενική συνάρτηση	102
Πίνακας 4-4. Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης.....	107
Πίνακας 4-5. (Συνέχεια) Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης.....	107
Πίνακας 4-6. Συνιστώσες του οχήματος σύμφωνα με αναλυτικές σχέσεις.....	107
Πίνακας 4-7. Δυνατότητες οχήματος συναρτήσει της μάζας του.....	108
Πίνακας 4-8. Χαρακτηριστικά του KST DS215MG Miniature Digital servo.....	111
Πίνακας 4-9. Χαρακτηριστικά του GENING D90 High Speed Digital Servo.....	112
Πίνακας 4-10. Χαρακτηριστικά πραγματικού Brushless DC Motor.....	115
Πίνακας 4-11. Χαρακτηριστικά πραγματικού ESC.....	115
Πίνακας 4-12. Χαρακτηριστικά μπαταρίας Kokam.....	116
Πίνακας 4-13. Χαρακτηριστικά πραγματικής τελικής LiPo μπαταρίας.....	117
Πίνακας 4-14. Χαρακτηριστικά πραγματικής έλικας.....	118
Πίνακας 4-15. Δυνατότητες πραγματικού οχήματος συναρτήσει της μάζας του.....	119
Πίνακας Β-1. Τιμές αδρανειών στεφάνης για διάφορες τιμές της ακτίνας της όπως λήφθηκαν από το Solidworks.....	205

Κατάλογος Συντμήσεων

β.ε.	βαθμός(-οί) ελευθερίας
βλ.	βλέπε
Εξ.	Εξίσωση
ΙΣΗΕ	Ισοδύναμο Σύστημα Ηλεκτροκινητήρα-Έλικας
Κεφ.	Κεφάλαιο
Παρ.	Παράγραφος
Πίν.	Πίνακας
Σχ.	Σχήμα
D.O.F.	Degrees Of Freedom
ESC	Electronic Speed Controller
LiPo	Lithium – Polymer batteries
MRAV	Multi Rotor Aerial Vehicle
RUAV	Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Κατάλογος Συμβόλων

Συμβολισμός διανυσμάτων

${}^b(\cdot)_i$	Διάνυσμα που αναφέρεται στο στοιχείο i και είναι εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης-κυρίου σώματος b .
${}^m(\cdot)_i$	Διάνυσμα που αναφέρεται στο στοιχείο i και είναι εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα του ΙΣΗΕ m .

Κατάλογος Συμβόλων Ελληνικών Χαρακτήρων

$A_{w,m}^{\min}$	Ελάχιστη απαιτούμενη διατομή για την αγωγή ρεύματος του ηλεκτροκινητήρα.
$A_{w,s2}$	Ελάχιστη απαιτούμενη διατομή για την αγωγή ρεύματος του δεύτερου σερβοκινητήρα.
θ_{i1}	Γωνία στροφής (roll) του i ΙΣΗΕ ως προς το σωματόδετο άξονα X της βάσης.
θ_{i2}	Γωνία στροφής (pitch) του i ΙΣΗΕ ως προς τον σωματόδετο άξονα Y της βάσης.
K_T	Σταθερά μετατροπής ρεύματος ηλεκτροκινητήρα σε ροπή.
ρ_{mot}^{lin}	Γραμμική πυκνότητα του κάθε καλωδίου του ηλεκτροκινητήρα.
ρ_{servo2}^{lin}	Γραμμική πυκνότητα του κάθε καλωδίου του δεύτερου σερβοκινητήρα.
σ_{\max}	Μέγιστη ιδιάζουσα τιμή.
σ_{\min}	Ελάχιστη ιδιάζουσα τιμή.
φ	Γωνία εκτροπής-διαταραχής του οχήματος.
${}^b\omega$	Διάνυσμα γωνιακών ταχυτήτων της βάσης ως προς το αδρανειακό σύστημα.
${}^b\dot{\omega}$	Διάνυσμα γωνιακών επιταχύνσεων της βάσης ως προς το αδρανειακό σύστημα.
${}^m\omega_i$	Διάνυσμα γωνιακών ταχυτήτων του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο του ΙΣΗΕ.
${}^m\dot{\omega}_i$	Διάνυσμα γωνιακών επιταχύνσεων του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο του ΙΣΗΕ.
ω_{\max}	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα ηλεκτροκινητήρα.
$\omega_{\max,s1}$	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα πρώτου σερβοκινητήρα.
$\omega_{\max,s2}$	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα δεύτερου σερβοκινητήρα.

Κατάλογος Συμβόλων Λατινικών Χαρακτήρων

a	Ακτίνα της στεφάνης.
ap	Γωνία περιστροφής της βάσης (pitch) γύρω από το αδρανειακό σύστημα.
ar	Γωνία περιστροφής της βάσης (roll) γύρω από το αδρανειακό σύστημα.
ay	Γωνία περιστροφής της βάσης (yaw) γύρω από το αδρανειακό σύστημα.
\mathbf{B}	Μητρώο αντιστοίχισης διανύσματος \mathbf{J} με \mathbf{F} .

\mathbf{B}^*	Αδιαστατοποιημένο \mathbf{B} .
\mathbf{b}	Διάνυσμα σχεδιασμού αλγορίθμου βελτιστοποίησης.
b	Συντελεστής μετατροπής δύναμης ώσης σε ροπή αντίστασης της έλικας.
C_{bat}	Χωρητικότητα της μπαταρίας.
C_T	Συντελεστής δύναμης ώσης.
C_{sc}	Χωρητικότητα του κάθε στοιχείου της μπαταρίας.
D_p	Διάμετρος της έλικας.
${}^b \mathbf{d}_i$	Διάνυσμα του κέντρου μάζας του i ΙΣΗΕ με αρχή το σωματόδετο σύστημα του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
d	Απόσταση των κέντρων μάζας του ΙΣΗΕ από την άκρη των ποδιών του ρομπότ.
d_T	Καθ' ύψος απόσταση σημείου εφαρμογής δύναμης ώσης από την άκρη του ποδιού.
d_v	Σταθερά αδιαστατοποίησης μητρώου \mathbf{B} .
$d_{w,m}$	Διάμετρος ρευματοφόρου αγωγού ηλεκτροκινητήρα.
$d_{w,s2}$	Διάμετρος ρευματοφόρου αγωγού δεύτερου σερβοκινητήρα.
E_{bat}	Ενέργεια μπαταρίας.
E_{ESC}	Ενέργεια που καταναλώνουν οι ESC.
E_{mot}	Ενέργεια που καταναλώνουν οι ηλεκτροκινητήρες.
E_{sc}	Ενέργεια του κάθε στοιχείου της μπαταρίας.
E_{s1}	Ενέργεια που καταναλώνουν οι σερβοκινητήρες της πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.
E_{s2}	Ενέργεια που καταναλώνουν οι σερβοκινητήρες της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.
\mathbf{F}	Διάνυσμα δυνάμεων και ροπών που ασκούνται στο κύριο σώμα της βάσης, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
\mathbf{F}^*	Αδιαστατοποιημένο \mathbf{F} .
${}^b \mathbf{F}_{c,i}$	Διάνυσμα δύναμης λόγω της ώσης f_i ασκούμενο από τη βάση, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
${}^b \mathbf{F}_D$	Διάνυσμα δυνάμεων οφειλόμενο στις διαταραχές του ανέμου.
${}^b \mathbf{F}_{p,i}$	Διάνυσμα δύναμης λόγω της ώσης f_i στο i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
f	Δείκτης κατάστασης μητρώου \mathbf{B}^* .
f_i	Δύναμη ώσης στο i ΙΣΗΕ.
f_{\max}	Μέγιστη δύναμη ώσης για τον έλεγχο της αντοχής.
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας.
g_b	Διάνυσμα βάρους της βάσης, εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα.
g_p	Διάνυσμα βάρους του κάθε ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα.
\mathbf{I}	Μοναδιαίος πίνακας 3x3.
i_{ESC}	Ρεύμα συνεχούς λειτουργίας του κάθε ESC.
i_{\max}	Μέγιστο ρεύμα του κάθε ηλεκτροκινητήρα.
\mathbf{J}	Διάνυσμα δυνάμεων ώσης εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης (Κεφ. 3), μήτρα αδράνειας του συστήματος της βάσης (Κεφ. 4).

\mathbf{J}_p	Μήτρα ροπών αδράνειας του κάθε ΙΣΗΕ.
\mathbf{J}_{real}	Μήτρα αδράνειας του ρομπότ μετά το λεπτομερή σχεδιασμό.
L	Μήκος ποδιών του ρομπότ.
L_{mot}	Μήκος ηλεκτροκινητήρα.
L_z	Κάθετη απόσταση της άκρης του ποδιού του ρομπότ από το οριζόντιο επίπεδο.
${}^b\mathbf{I}_i$	Διάνυσμα της άκρης του ποδιού i ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης.
l_{ESC}	Ισοδύναμο χαρακτηριστικό μήκος του ESC.
l_{eq}	Σταθερά μετατροπής γωνιακών επιταχύνσεων σε γραμμικές.
l_{mot}	Ισοδύναμο χαρακτηριστικό μήκος του ηλεκτροκινητήρα.
$\mathbf{M}_{\phi X}$	Διάνυσμα ροπών (μετά από διαταραχή γύρω από τον άξονα X) λόγω των βαρυτικών δυνάμεων των ΙΣΗΕ ως προς το ολικό κέντρο μάζας του οχήματος και εκφρασμένες ως προς το αδρανειακό-απόλυτο σύστημα.
$\mathbf{M}_{\phi Y}$	Διάνυσμα ροπών (μετά από διαταραχή γύρω από τον άξονα Y).
$\mathbf{M}_{\phi Z}$	Διάνυσμα ροπών (μετά από διαταραχή γύρω από τον άξονα Z).
${}^b\mathbf{M}_{c,i}$	Διάνυσμα ροπής αντίστασης λόγω της ώσης f_i ασκούμενο από τη βάση, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
${}^b\mathbf{M}_D$	Διάνυσμα ροπών οφειλόμενο στις διαταραχές του ανέμου.
${}^m\mathbf{M}d_i$	Διάνυσμα ροπών αντίστασης έλικας στο i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο του ΙΣΗΕ.
${}^b\mathbf{M}_{p,i}$	Διάνυσμα ροπής αντίστασης λόγω της ώσης f_i στο i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
M	Μάζα της βάσης-κυρίου σώματος.
M_o	Ροπή σε κενό του ηλεκτροκινητήρα.
M_d	Ροπή αντίστασης της έλικας.
M_{max}	Μέγιστη ροπή εκκίνησης ηλεκτροκινητήρα.
$M_{max, s1}$	Μέγιστη ροπή εκκίνησης πρώτου σερβοκινητήρα.
$M_{max, s2}$	Μέγιστη ροπή εκκίνησης δεύτερου σερβοκινητήρα.
m	Module πλαστικών οδοντώσεων.
m_A	Μάζα σώματος Α.
m_B	Μάζα σώματος Β.
m_T	Μάζα σώματος Γ.
m_δ	Μάζα κυκλικού δίσκου.
m_{ad}	Payload-Ωφέλιμο φορτίο.
m_b	Μάζα συστήματος βάσης-κυρίου σώματος.
m_{bat}	Μάζα μπαταρίας.
m_{ESC}	Μάζα του κάθε ESC.
m_{electr}	Μάζα ηλεκτρονικών, αισθητήρων κ.λπ.
m_h	Μάζα στεφάνης.
m_i	Μάζα του i ΙΣΗΕ.
m_L	Μάζα ποδιού.
m_{mot}	Μάζα ηλεκτροκινητήρα.

m_p	Μάζα του κάθε ΙΣΗΕ.
m_{prop}	Μάζα έλικας.
m_{robot}	Μάζα του ρομπότ μετά το λεπτομερή σχεδιασμό.
$m_{robot\&wires}$	Μάζα του ρομπότ μετά το λεπτομερή σχεδιασμό μαζί με τα καλώδια.
m_s	Μάζα άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.
m_{s1}	Μάζα σερβοκινητήρα πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.
m_{s2}	Μάζα σερβοκινητήρα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.
m_w	Μάζα αντίβαρου.
m_{wires}	Συνολική μάζα που προσθέτουν τα καλώδια σημαντικού μήκους.
n_c	Αριθμός στοιχείων μπαταρίας συνδεδεμένα σε σειρά.
n_p	Αριθμός στοιχείων μπαταρίας συνδεδεμένα παράλληλα.
${}^b \mathbf{p}_i$	Διάνυσμα που συνδέει σωματόδετο σύστημα της βάσης με το i σωματόδετο του ΙΣΗΕ.
${}^m \mathbf{p}$	Διάνυσμα που συνδέει το i σωματόδετο του ΙΣΗΕ με το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης.
p	Γεωμετρικό βήμα της έλικας.
\mathbf{Q}	Μήτρα περιστροφής σωματόδετου συστήματος της βάσης στο αδρανειακό.
\mathbf{R}_X	Κύρια μήτρα περιστροφής γύρω από τον άξονα X .
\mathbf{R}_Y	Κύρια μήτρα περιστροφής γύρω από τον άξονα Y .
\mathbf{R}_Z	Κύρια μήτρα περιστροφής γύρω από τον άξονα Z .
\mathbf{R}_i	Μήτρα σύνδεσης i σωματόδετου συστήματος ΙΣΗΕ με το σωματόδετο σύστημα της βάσης.
R_δ	Ακτίνα βάσης-κυκλικού δίσκου.
R_{ESC}	Τιμή ηλεκτρικής αντίστασης του κάθε ESC.
R_{mot}	Ακτίνα ηλεκτροκινητήρα.
${}^b \mathbf{r}_{cm}$	Διάνυσμα ολικού κέντρου μάζας οχήματος ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης.
${}^b \mathbf{r}_i$	Διάνυσμα με αρχή το ολικό κέντρο μάζας του οχήματος, πέρας το κέντρο μάζας του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης.
r_{ih}	Εσωτερική ακτίνα διατομής στεφάνης.
r_{iL}	Εσωτερική ακτίνα διατομής ποδιού.
r_{is}	Εσωτερική ακτίνα διατομής άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.
r_{oh}	Εξωτερική ακτίνα διατομής στεφάνης.
r_{oL}	Εξωτερική ακτίνα διατομής ποδιού.
r_{os}	Εξωτερική ακτίνα διατομής άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.
\mathbf{S}	Πίνακας μετασχηματισμού εξωτερικού γινόμενου διανυσμάτων σε μητρική μορφή.
S_f	Συντελεστής ασφάλειας για τον έλεγχο της αντοχής.
${}^m \mathbf{T}_i$	Διάνυσμα δυνάμεων ώσης του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο του ΙΣΗΕ.
t_δ	Πάχος βάσης-κυκλικού δίσκου.
t_λ	Χρόνος πτήσης του ρομπότ.
t_λ^*	Τελικός χρόνος πτήσης του ρομπότ.

${}^m \mathbf{u}_i$	Διάνυσμα ροπών του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο του ΙΣΗΕ.
u_d	Ροπή αντίστασης της έλικας για τον έλεγχο της αντοχής.
u_1	Ροπή του πρώτου σερβοκινητήρα για τον έλεγχο της αντοχής.
u_2	Ροπή του δεύτερου σερβοκινητήρα για τον έλεγχο της αντοχής.
V_b	Τάση μπαταρίας.
V_{bat}	Ισοδύναμος χαρακτηριστικός όγκος της μπαταρίας.
${}^b \mathbf{v}_i$	Διάνυσμα ταχύτητας του κέντρου μάζας του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.
$\dot{\mathbf{v}}$	Διάνυσμα γραμμικών επιταχύνσεων της βάσης εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα.
\mathbf{x}	Διάνυσμα σύνδεσης αδρανειακού συστήματος με τα σωματόδετο σύστημα της βάσης.
${}^b \mathbf{x}_i$	Διάνυσμα θέσης του κέντρου μάζας του i ΙΣΗΕ, εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης.

1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα πολλών στροφείων και σχετικοί στοιχειώδεις ορισμοί. Αναφέρονται οι κύριες κατηγορίες τους, ο βασικός τρόπος λειτουργίας τους και τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Γίνεται μνεία σε μια συγκεκριμένη κατηγορία αυτών, τα ολόνομα ιπτάμενα οχήματα, τα οποία αποτελούν πεδίο εντατικής έρευνας. Τέλος, αναφέρεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας και η δομή της.

1.1 Εισαγωγή στα rotorcrafts

Η πιο γενική κατηγορία των ιπτάμενων μη επανδρωμένων οχημάτων είναι τα rotorcrafts (στροφειόπτερα). Αυτά, χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα περιστρεφόμενα περύγια, συναλλάσσουν ενέργεια με τον αέρα παράγοντας την απαιτούμενη δύναμη άνωσης (Lift), η οποία τα ανυψώνει. Η σύντηξη για τέτοια οχήματα σύμφωνα με τη διεθνή ορολογία είναι RUAV-Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle [2]. Να σημειωθεί επίσης ότι στα RUAV τα στροφεία τα οποία συναλλάσσουν ενέργεια με τον αέρα δεν αποτελούνται από πτερύγια μεταβλητού βήματος όπως τα ελικόπτερα. Στην ουσία είναι έλικες όπως αυτές των αεροσκαφών με σταθερό γεωμετρικό βήμα.

Τα RUAV κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το μέγεθός τους (βλ. Σχ. 1.1) σε πλήρους κλίμακας (βλ. Class I), σε μεσαίας κλίμακας με ωφέλιμο φορτίο πάνω από 10kg (βλ. Class II), σε μικρής κλίμακας με ωφέλιμο φορτίο από 2-10kg (βλ. Class III), σε mini RUAV ωφέλιμου φορτίου κάτω των 2 kg (βλ. Class IV), και τέλος τα Micro Aerial Vehicles (MAV) ωφέλιμου φορτίου έως 100gr(βλ. Class V).



Σχήμα 1.1. Κατηγοριοποίηση RUAV σύμφωνα με το μέγεθος τους [2].

Για την πληρότητα ακόμη σημειώνεται ότι τα προαναφερθέντα οχήματα συχνά καλούνται και Unmanned Aerial Vehicle (UAV), που είναι η ευρύτερη κατηγορία όλων των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ιπτάμενα οχήματα πολλών στροφείων είναι ευρέως γνωστά με την ονομασία Multi-Rotor Aerial Vehicle (MRAV) ή multirotors ή multicopters, τα οποία στην πραγματικότητα αποτελούν μια υποκατηγορία των RUAV και άρα των UAV με το

χαρακτηριστικό ότι φέρουν παραπάνω από δύο έλικες. Αυτά μπορεί να έχουν τρεις έλικες (trirotor-tricopter), τέσσερις έλικες (quadrotor-quadcopter), έξι έλικες (hexarotor-hexacopter), οχτώ έλικες (octorotor-octocopter) ή και περισσότερες έλικες όπως το επανδρωμένο που φαίνεται στο Σχ. 1.2 μαζί με τις υπόλοιπες διατάξεις.



Σχήμα 1.2. Κατηγοριοποίηση multirotors σύμφωνα με τον αριθμό των ελίκων.

1.2 Περιγραφή των multirotors και αρχή λειτουργίας τους

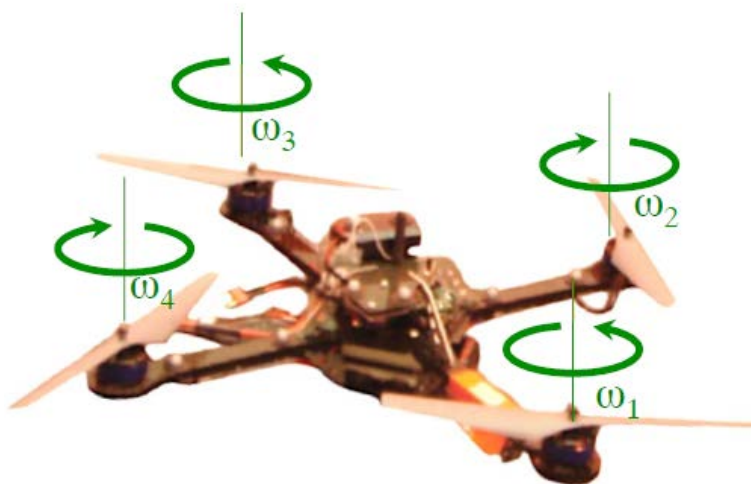
Η κύρια δομή ενός multirotor παρουσιάζεται στο Σχ. 1.3. Συγκεκριμένα, αποτελείται από τις έλικες οι οποίες περιστρέφονται μέσω ηλεκτροκινητήρων. Το σύστημα αυτό ηλεκτροκινητήρα και έλικας στηρίζεται στο κάθε πόδι του οχήματος (βλ. Σχ. 1.3), το οποίο στην πλειοψηφία των multirotors είναι ένα σώμα με το σκελετό του οχήματος (frame-airframe). Σημειώνεται επίσης ότι τα πόδια αυτά και άρα οι ηλεκτροκινητήρες είναι τοποθετημένοι συμμετρικά μεταξύ τους πάνω σε έναν νοητό κύκλο ο οποίος περιλαμβάνει το κύριο σώμα της βάσης. Τις συνιστώσες αυτές συμπληρώνουν η μπαταρία, οι οδηγήσεις των ηλεκτροκινητήρων (ESC) και το ωφέλιμο φορτίο (payload) το οποίο αντιπροσωπεύει κυρίως τα ηλεκτρονικά όπως για παράδειγμα τους αισθητήρες, την κάμερα, τα ηλεκτρονικά ελέγχου αλλά και οτιδήποτε άλλο είναι αναγκαίο.



Σχήμα 1.3. Κύρια δομή ενός multirotor.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα multirotors με άρτιο αριθμό ελικών έχουν στην πλειοψηφία τους σταθερή και πακτωμένη τη θέση του ηλεκτροκινητήρα και της έλικας ως προς το κύριο σώμα το οποίο φιλοξενεί τα ηλεκτρονικά, την κάμερα κλπ. Συνεπώς, οι άξονες των ηλεκτροκινητήρων είναι μόνιμα παράλληλοι μεταξύ τους. Τα οχήματα με αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται και μη επανδρωμένα οχήματα σταθερής πτέρυγας (fixed-wing) και το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η μηχανική τους απλότητα. Από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε σε αυτά με την ονομασία συμβατικά ιπτάμενα οχήματα ή συμβατικά ιπτάμενα ρομπότ.

Η αρχή λειτουργίας αυτών βασίζεται αποκλειστικά στη μεταβολή των γωνιακών ταχυτήτων των ελικών [3] (βλ. Σχ. 1.4). Έτσι, όταν όλες οι έλικες κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα και άρα παράγουν την ίδια δύναμη ώσης, το όχημα κινείται κατακόρυφα χωρίς να περιστρέφεται ούτε γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (yaw) αλλά ούτε γύρω από τους άλλους δύο άξονες (roll και pitch). Η μη περιστροφή κατά roll και pitch εξασφαλίζεται από τη συμμετρία των ποδιών, η οποία αλληλοεξουδετερώνει τις ροπές (λόγω της δύναμης ώσης) που ασκούνται στο κέντρο μάζας του ρομπότ. Η μη περιστροφή κατά yaw εξασφαλίζεται από τον άρτιο αριθμό των ελικών. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των ελικών οι μισές περιστρέφονται ωρολογιακά και οι άλλες μισές αντίθετα της ωρολογιακής κατεύθυνσης (βλ. Σχ. 1.4). Έτσι, επειδή οι έλικες αυτές έχουν αντίθετα γεωμετρικά βήματα μεταξύ τους, παράγουν τις ίδιες δυνάμεις ώσης, διαφορετικές όμως ροπές λόγω των αντίροπων γωνιακών ταχυτήτων τους. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο αλληλοεξουδετερώνονται και οι προκύπτουσες ροπές γύρω από τον κατακόρυφο άξονα και δεν έχουμε περιστροφή κατά yaw.

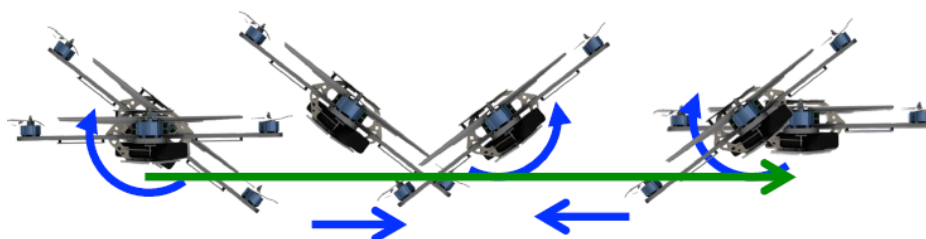


Σχήμα 1.4. Quadrotor με αντίροπες γωνιακές ταχύτητες ανά δύο έλικες [3].

Η περιστροφή yaw αυτών των οχημάτων επιτυγχάνεται με την αυξομείωση των ταχυτήτων ενός ζεύγους ομοίως περιστρεφόμενων κινητήρων (βλ. Σχ.1.4). Επίσης, η μετατόπιση ενός συμβατικού ιπτάμενου ρομπότ κατά την οριζόντια διεύθυνση απαιτεί το όχημα να στραφεί κατά μια γωνία roll ή pitch ώστε πλέον οι δυνάμεις ώσης να έχουν κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Έτσι, η οριζόντια συνιστώσα των δυνάμεων αυτών ωθεί το ρομπότ να κινηθεί οριζόντια ενώ η κατακόρυφη εξουδετερώνει το βάρος και επιτρέπει στο όχημα να

ισορροπεί κατά την κατακόρυφη έννοια. Συνεπώς, ένα τέτοιο ρομπότ προκειμένου να ακολουθήσει μια ευθεία οριζόντια τροχιά έως ένα τελικό σημείο, απαιτείται να στραφεί πρώτα μια φορά ώστε να παράγει την απαραίτητη γραμμική επιτάχυνση για να ακολουθήσει την τροχιά αλλά και στο τέλος της να στραφεί μία δεύτερη φορά ώστε να μπορέσει να επιβραδύνει και να σταματήσει στο τελικό επιθυμητό σημείο (βλ. Σχ. 1.5)

Translation



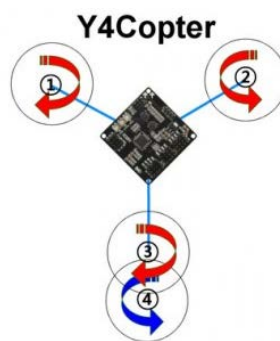
Σχήμα 1.5. Οριζόντια μετατόπιση ενός συμβατικού quadrotor [3].

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η συμπεριφορά των συμβατικών UAVs είναι περιορισμένη, με τους περιορισμούς να πηγάζουν από την τοποθέτηση των ηλεκτροκινητήρων. Έτσι, τα συμβατικά ιπτάμενα οχήματα είναι εν γένει μη ολόνομα, μη έχοντας τη δυνατότητα έτσι να ακολουθήσουν οιαδήποτε τροχιά διατηρώντας παράλληλα τον επιθυμητό προσανατολισμό του σώματος τους.

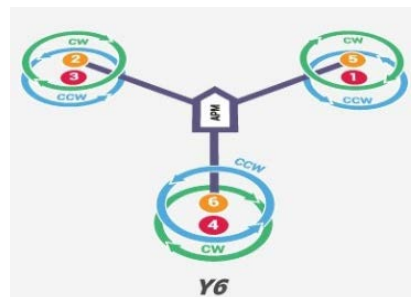
Επιπρόσθετα, σε ο,τι αφορά τα trirotors, τα οποία έχουν τον ελάχιστο αριθμό κινητήρων (βλ. Σχ. 1.2), αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά στρέφονται συνεχώς με μία γωνία yaw γύρω από τον κατακόρυφο άξονα λόγω του περιττού αριθμού των ηλεκτροκινητήρων τους. Επομένως, τέτοια οχήματα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε εφαρμογές που σημασία έχει η θέση του οχήματος και όχι ο αυστηρός προσανατολισμός του. Σε αντίθετη περίπτωση χρειάζονται περαιτέρω τροποποιήσεις, όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση ενός ηλεκτρικού σερβοκινητήρα (rc servomotor), ο οποίος περιστρέφει τη βάση στήριξης ενός ή περισσότερων ηλεκτροκινητήρων κατά μια γωνία (tilt) προκειμένου η οριζόντια συνιστώσα της κεκλιμένης δύναμης ώσης πλέον να εξουδετερώνει τις ροπές λόγω των γωνιακών ταχυτήτων των ελίκων. Ένας τέτοιος μηχανισμός για παράδειγμα φαίνεται στο Σχ. 1.6. Εναλλακτικά, τοποθετείται ένας επιπρόσθετος ηλεκτροκινητήρας κάτω από τον ένα ηλεκτρικό κινητήρα του trirotor ο οποίος στρέφεται αντίρροπα με αυτόν και εξουδετερώνει τη ροπή που οφείλεται σε αυτόν. Αυτή η διάταξη ονομάζεται Y4 copter και απεικονίζεται στο Σχ. 1.7. Υπάρχει και η Y6 copter διάταξη του Σχ. 1.8 στην οποία έχουμε στην ουσία ένα όχημα αποτελούμενο από 3 ζεύγη ομοαξονικών (coaxial) αντίρροπα στρεφόμενων στροφείων.



Σχήμα 1.6. Tilting του ηλεκτροκινητήρα μέσω ενός rc servo.



Σχήμα 1.7. Y4 copter διάταξη.



Σχήμα 1.8. Y6 copter διάταξη.

1.3 Ολόνομα ιπτάμενα οχήματα

Μια υποκατηγορία των multirotors η οποία αποτελεί πεδίο εντατικής έρευνας των τελευταίων χρόνων είναι τα ολόνομα ιπτάμενα οχήματα. Η φιλοσοφία των οχημάτων αυτών απαιτεί η θέση και ο προσανατολισμός τους να μπορεί να αλλάζει ανεξάρτητα και με οποιοδήποτε τρόπο μέσα στον τρισδιάστατο χώρο. Δηλαδή, τα οχήματα αυτά αποσκοπούν στη σύσταση ενός ρομποτικού συστήματος έξι πραγματικών βαθμών ελευθερίας, σε αντίθεση με τα υποεπενεργούμενα συμβατικά οχήματα τα οποία αναφέρθηκαν στην Παρ. 1.2.

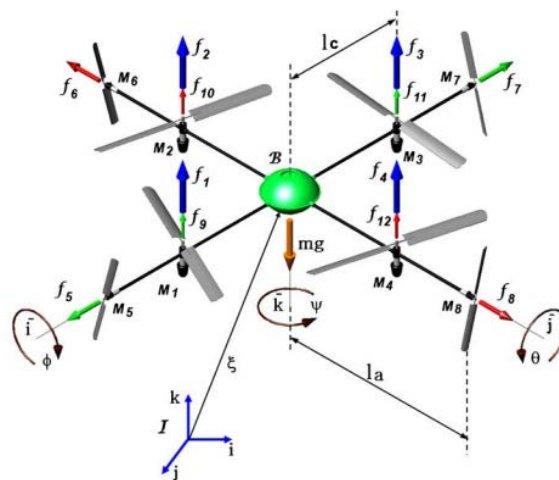
Η υψηλή σημασία του ολόνομου χαρακτήρα των οχημάτων αυτών φαίνεται μέσα από το εύρος αλλά και από το είδος των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και

στις οποίες τα συμβατικά ιπτάμενα οχήματα είτε εμφανίζουν σημαντικές δυσκολίες, είτε είναι ανεπαρκή. Συγκεκριμένα, έστω ότι η εφαρμογή του multirotor είναι η επιθεώρηση ή η παρακολούθηση κάποιου στόχου μέσω κάμερας. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, προκειμένου να μεταδοθεί η εικόνα ανεπηρέαστη στον χειριστή χρειάζεται ένα επιπρόσθετο και εκλεπτυσμένο σύστημα έδρασης της κάμερας, το οποίο μάλιστα να είναι επενεργούμενο και να ελέγχεται. Επιπρόσθετα, για έναν τέτοιο σκοπό εισάγεται επιπλέον πολυπλοκότητα και ανάγκη για εκλεπτυσμένους αλγορίθμους σχεδίασης τροχιών (path planning).

Μια άλλη εφαρμογή στην οποία είναι σχεδόν ανεπαρκή τα υποεπενεργούμενα ιπτάμενα οχήματα είναι στην αλληλεπίδραση τους με το περιβάλλον μέσω δυνάμεων/ροτμών σε ορισδήποτε δυνατές κατευθύνσεις. Ισοδύναμα, σε πιθανές εφαρμογές όπου χρειαστεί το ρομπότ να επιτελέσει κάποια επισκευή, κάποια συναρμολόγηση κ.λπ., τα συμβατικά οχήματα παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες.

Ακόμη, σε δύσβατα περιβάλλοντα με άγνωστους χώρους εργασίας και παρεμβολές εμποδίων, ο μη ολόνομος χαρακτήρας των συμβατικών ρομπότ δεν επιτρέπει σε αυτά να έχουν κάθε στιγμή τον προσανατολισμό που απαιτείται και έτσι η πλοήγησή τους είναι αβέβαιη και μη ασφαλής. Τέτοια περιβάλλοντα εργασίας μπορεί να είναι για παράδειγμα χώροι με ερείπια έπειτα από φυσικές καταστροφές, χώροι σε καταστάσεις εκτάκτης ανάγκης όπως πυρκαγιές κ.λπ.

Σύμφωνα με όλα τα προαναφερθέντα λοιπόν τα ιπτάμενα οχήματα ολόνομου χαρακτήρα έχουν συγκεντρώσει υψηλό ενδιαφέρον. Μεταξύ αρκετών προσπαθειών μοντελοποίησης και σχεδιασμού τέτοιων οχημάτων μια αξιοσημείωτη είναι αυτή του [4]. Το ρομπότ αυτό αποτελείται από 8 έλικες, οι τέσσερις εκ των οποίων είναι πλευρικές και αναλαμβάνουν την πλευρική μετατόπιση του UAV. Σκοπός του οχήματος αυτός προς χάριν της ολόνομη συμπεριφοράς του οχήματος ήταν η πλήρης αποσύζευξη της δυναμικής που αφορά τον προσανατολισμό με τη δυναμική της θέσης/μετατόπισης, κάτι το οποίο φάνηκε τελικά ότι ισχύει για μία στενή περιοχή όλων των προσανατολισμών του οχήματος. Το ρομπότ αυτό φαίνεται στο Σχ. 1.9.



Σχήμα 1.9. Multirotor 8 ελίκων με τις 4 να αναλαμβάνουν τις πλευρικές μετατοπίσεις [4].

Μια άλλη αξιόλογη προσπάθεια ήταν αυτή του [5] στην οποία μελετάται ένα hexrotoρ αποτελούμενο από έλικες μεταβλητού γεωμετρικού βήματος, τοποθετημένες σε κεκλιμένα επίπεδα. Σημειώνεται ότι το ρομπότ αυτό, σε ορισμένους προσανατολισμούς παρουσιάζει αρκετά χαμηλές δυνατότητες, κυρίως λόγω της σταθερής αυτής κλίσης των ελίκων. Το όχημα αυτό απεικονίζεται στο Σχ. 1.10.



Σχήμα 1.10. Hexrotoρ αποτελούμενο από έλικες τοποθετημένες σε κεκλιμένα επίπεδα [5].

Επίσης αξιοσημείωτο είναι το όχημα τύπου quadrotoρ [6] στο οποίο το κάθε πόδι του (πάνω στο οποίο είναι πακτωμένος ο κάθε ηλεκτροκινητήρας) έχει τη δυνατότητα tilting με τη χρήση ηλεκτρικών σερβοκινητήρων (rc servos). Το όχημα αυτό φαίνεται στο Σχ. 1.11.



Σχήμα 1.11. Quadrotoρ με δυνατότητα tilting στο κάθε πόδι του [6].

Τέλος, παρουσιάζεται στο Σχ. 1.12 ένα καινοτόμο quadrotoρ [7], το οποίο αποτελείται από δύο fixed-wing πόδια και δύο πόδια τα οποία εκτός της δυνατότητας για περιστροφή-tilting έχουν τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από έναν δεύτερο ανεξάρτητο άξονα περιστροφής. Έτσι, η κάθε έλικα από τις δύο τελευταίες έχει τη δυνατότητα να κατευθύνει το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης. Για τη δημιουργία των δύο αυτών ανεξάρτητων περιστροφών για το κάθε πόδι ευθύνονται δύο ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες (rc servomotors).

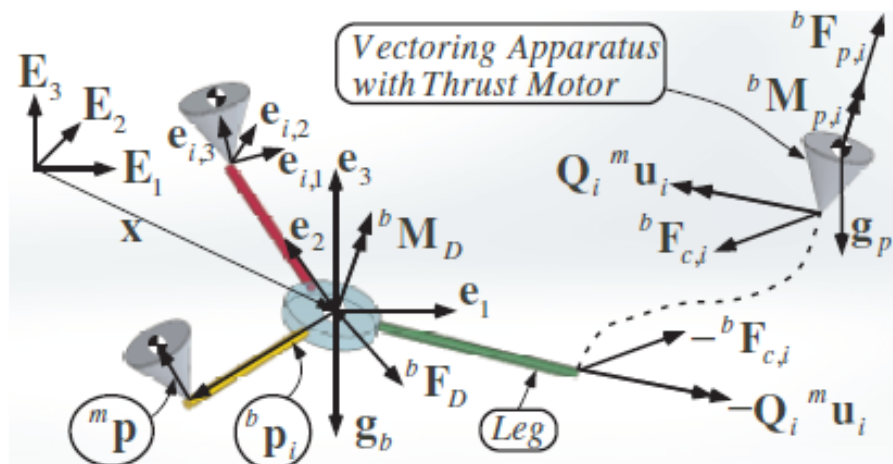


Σχήμα 1.12. Quadrotor με δύο έλικες κατευθυνόμενες στο χώρο [7].

Λαμβάνοντας υπόψιν το υψηλό ενδιαφέρον που παρουσιάζουν τα ολόνομα ιπτάμενα οχήματα, στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ, έχει δοθεί έμφαση σε ένα όχημα το οποίο κατά τη γνώμη μας αποτελεί τη βέλτιστη λύση για ολόνομη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, είναι ένα mini RUAV (βλ. Σχ. 1.1) και μάλιστα ένα MRAV-multirotor. Επιλέχθηκε να είναι ένα tricopter (βλ. Σχ. 1.2) λόγω της απλότητας του οχήματος αυτού τόσο από μηχανικής άποψης αλλά και από την άποψη της ελαχιστοποίησης της απαιτούμενης ενέργειας (στην πλειοψηφία των εφαρμογών) και του βάρους αφού ο αριθμός των ηλεκτροκινητήρων είναι ο ελάχιστος δυνατός (τρία).

Η ανάγκη για την άρση του προβλήματος με την περιστροφή κατά γωνία yaw για τα trirotors καθώς και το γενικότερο πρόβλημα των multirotors με τη μη ολόνομη συμπεριφορά τους, οδήγησε στην μοντελοποίηση και στην κατάστρωση ενός ευσταθούς γεωμετρικού ελεγκτή για τη συγκεκριμένη δομή ενός ολόνομου tricopter 15 β.ε [1]. Η ολόνομη ιδιότητα αυτού του οχήματος αποδίδεται από το γεγονός ότι προσανατολισμός και θέση είναι πλήρως αποσυζευγμένα. Συνοπτικά, το μοντέλο αυτό περιγράφει εκείνο το ρομπότ, το οποίο στην άκρη του έχει τρία συστήματα ώσης, τα οποία μέσω δύο ανεξάρτητων γωνιακών περιστροφών μπορούν να έχουν οιοδήποτε προσανατολισμό μέσα στη μοναδιαία τρισδιάστατη σφαίρα (βλ. Σχ. 1.13).

Μέσω του συγκεκριμένου μοντέλου έχει αποδειχθεί η θεωρητική δυνατότητα υλοποίησης τέτοιας δομής και έτσι το ενδιαφέρον πλέον έχει στραφεί στη διερεύνηση της πειραματικής υλοποίησης αυτής.



Σχήμα 1.13. Διάγραμμα Ελευθέρου σώματος του ολόνομου tricopter 15β.ε [1].

1.4 Σκοπός - Δομή εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η συστηματική ανάλυση και ο βέλτιστος σχεδιασμός του tricopter που περιγράφουν μαθηματικά οι δυναμικές εξισώσεις οι οποίες αναπτύχθηκαν στο [1].

Στο Κεφάλαιο 1 που είναι και το παρόν, παρατίθενται οι κύριες κατηγορίες των ιπτάμενων οχημάτων, δίνονται κάποιοι βασικοί ορισμοί και παρουσιάζεται ο στοιχειώδης τρόπος λειτουργίας τους. Τέλος, γίνεται ειδική μνεία στην κατηγορία των ολόνομων ιπτάμενων ρομπότ τα οποία συγκεντρώνουν υψηλό ενδιαφέρον.

Το Κεφάλαιο 2 αποσκοπεί στον προσδιορισμό του μηχανισμού ο οποίος μπορεί για το κάθε σύστημα ποδιού του tricopter να επιτύχει την πλοήγηση του συστήματος ώσης οπουδήποτε μέσα στο μοναδιαίο τρισδιάστατο χώρο. Μετά από την παρουσίαση και την τελική σύγκριση ποικίλων μηχανισμών, προκύπτει ο τέλικος βέλτιστος μηχανισμός σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία είναι το εύρος κίνησης, η θέση του κέντρου μάζας, το βάρος, η αδράνεια, η απλότητα, η ευκολία κατασκευής, η ευρωστία και το κόστος.

Στο Κεφάλαιο 3 ασχολούμαστε με τον προκαταρκτικό καθορισμό κάποιων θεμελιωδών μεγεθών του ρομπότ όπως το μήκος του ποδιού του, η κλίση του σχετικά με το ουδέτερο επίπεδο, η θέση των κέντρων μάζας καθώς και η θέση εφαρμογής των δυνάμεων ώσης. Για τον καθορισμό αυτών εξετάζονται κριτήρια είτε πιο απλά, είτε πιο μαθηματικοποιημένα, τα οποία είναι καθαρά κινηματικά και στόχο τους έχουν την ομαλή συμπεριφορά του οχήματος. Σημειώνεται ότι τα κριτήρια αυτά είναι ανεξάρτητα από το μηχανισμό που προέκυψε στο Κεφ. 2.

Το Κεφάλαιο 4 θεωρεί δεδομένα τα συμπεράσματα των Κεφ. 2, 3 και αποσκοπεί στο βέλτιστο προσδιορισμό όλων των συνιστωσών που απαρτίζουν ένα ιπτάμενο ρομπότ όπως τη μπαταρία, τους επενεργητές, τις οδηγήσεις των ηλεκτροκινητήρων, τις έλικες καθώς και τα γεωμετρικά του μεγέθη. Το βέλτιστο διάνυσμα των μεγεθών αυτών προκύπτει απλοποιώντας τις εξισώσεις του [1] και επιβάλλοντας σε αυτές ορισμένες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, απαιτείται το όχημα να μπορεί να αιωρείται καθώς και να περιστρέφεται και να μετατοπίζεται στο χώρο με ευκολία έχοντας ως ωφέλιμο φορτίο-payload μία μάζα 300gr,

με το χρόνο πτήσης να είναι τουλάχιστον 10 min. Όλη αυτή η διαδικασία έχει προγραμματισθεί σε Matlab και παράγει τα αποτελέσματα κυρίως με τη χρήση της αιτιοκρατικής συνάρτησης βελτιστοποίησης “fmincon”. Τέλος, παρατίθενται διαγράμματα επάρκειας των επενεργητών, τα οποία περιγράφουν εκτός των άλλων τις δυνατότητες του ρομπότ.

Στο Κεφ. 5 αφού πλέον έχουμε προσδιορίσει επ’ακριβώς όλα τα μεγέθη του ρομπότ, ασχολούμαστε με το λεπτομερή σχεδιασμό του. Σκοπός είναι με το πέρας του Κεφαλαίου αυτού να προκύψει ένα υλοποιήσιμο και κατασκευάσιμο ρομπότ με πλήρη λεπτομέρεια ως προς την κάθε συνιστώσα που το απαρτίζει. Επιπρόσθετα, γίνεται ένας βασικός έλεγχος αντοχής για το κάθε δομικό κομμάτι που απαρτίζει το όχημα μέσω του περιβάλλοντος Solidworks. Τέλος, παρουσιάζεται η πλήρης τελική πραγματική μορφή του ρομπότ συνοδευόμενη από διαγράμματα επάρκειας των επενεργητών του, τα οποία οπτικοποιούν τις τελικές πραγματικές δυνατότητες που αναμένεται να έχει το όχημα αυτό. Τα διαγράμματα αυτά και οι τελικές δυνατότητες του πραγματικού ρομπότ αντιστοιχίζονται με μία ρεαλιστική τροχιά, ώστε να υπάρχει μια απτή εικόνα για το τι πραγματικά σημαίνουν αυτές οι δυνατότητες του τελικού πραγματικού ρομπότ.

2 Επιλογή Μηχανισμού

2.1 Εισαγωγή

Το πρώτο στάδιο της εργασίας αυτής αφορά τον σχεδιασμό και την επιλογή ενός μηχανισμού ικανού να κατευθύνει την έλικα και άρα το σύστημα πρόωσης σε οποιοδήποτε σημείο στον τρισδιάστατο χώρο. Η κύρια ιδέα πίσω από αυτόν τον μηχανισμό ήταν να βρεθεί ένας τρόπος να μπορούν να παράγονται ανεξάρτητες πλήρεις περιστροφές γύρω από δύο κάθετους άξονες. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα πλοήγησης του συστήματος έλικας-ηλεκτροκινητήρα οπουδήποτε μέσα σε μια νοητή σφαίρα ή έναν τρισδιάστατο χώρο.

Βασικά κριτήρια για το σχεδιασμό και την επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού είναι τα εξής:

- Εύρος κίνησης (αν δηλαδή η έλικα μπορεί να πάρει οιονδήποτε προανατολισμό)
- Θέση του κέντρου μάζας (δυνατότητα ρύθμισης του κέντρου μάζας στην επιθυμητή ουδέτερη θέση)
- Βάρος μηχανισμού
- Αδράνεια μηχανισμού (κυρίως μέσω της μάζας μακριά από τη βάση-κύριο σώμα)
- Απλότητα μηχανισμού (κυρίως μέσω του αριθμού των στοιχείων μηχανών)
- Ευκολία κατασκευής
- Ευρωστία (συμπεριφορά του μηχανισμού σε εξωτερικές διαταραχές και αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον)
- Κόστος

Σημειώνεται επίσης ότι παρότι το στάδιο αυτό είναι πολύ αρχικό, στον κάθε μηχανισμό που εξετάστηκε λήφθηκαν υπόψιν πιο συγκεκριμένες παράμετροι όπως οι απαιτούμενες εδράσεις για την στήριξη και ισορροπία των αξόνων καθώς λήφθηκε υπόψιν και η ιδέα της εύρυθμης μεταφοράς των περιστρεφόμενων πλέον καλωδίων των διάφορων επενεργητών, πίσω στα ακίνητα τμήματα του μηχανισμού. Αυτό έγινε για να αποδοθεί μια πιο καθολική αντιμετώπιση στο πρόβλημα και τέλος να επιλεγεί ο κατάλληλος μηχανισμός με πιο λεπτομερειακά και πλήρη κριτήρια.

Οι επενεργητές που εξετάστηκαν ως μέρος του μηχανισμού και ως υπεύθυνοι για την παραγωγή των προαναφερθέντων ανεξάρτητων περιστροφών ήταν υδραυλικοί και ηλεκτρικοί. Πνευματικοί δεν εξετάστηκαν διότι λόγω της συμπιεστότητας του εργαζόμενου μέσου υπεισέρχονται δυσκολίες στον έλεγχο τους. Η οδήγηση της έλικας γίνεται αυστηρά από ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) χωρίς ψήκτρες (brushless) και περιστρεφόμενου κελύφους (outrunner) λόγω της υψηλής ειδικής ισχύος τους (W/kg) και της υψηλής ροπής (αντίστοιχα) που εμφανίζουν σε χαμηλές στροφές και άρα είναι ιδανικοί στην οδήγηση φορτίων (στην εφαρμογή αυτή οδήγηση της έλικας) απευθείας, χωρίς την ανάγκη μειωτήρων.

Ως μια αρχική γενική σύγκριση αποκλειστικά μεταξύ των επενεργητών [8] για την παραγωγή των ανεξάρτητων περιστροφών, σημειώνεται ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι οικονομικοί, έχουν μεγάλη ποικιλία και διαθεσιμότητα, είναι εύκολοι στη συντήρηση,

κατάλληλοι για έλεγχο και δεν είναι ρυπογόνοι. Ένα αρνητικό τους είναι ότι σε εύφλεκτα περιβάλλοντα χρειάζονται ειδική προστασία και αυτό σημειώνεται διότι το συγκεκριμένο ρομπότ λόγω του ολόνομου χαρακτήρα του στοχεύει να χρησιμοποιηθεί ως ρομπότ το οποίο επισκευάζει και γενικότερα λειτουργεί σε ιδιόμορφα και δύσβατα περιβάλλοντα με ακραίες συνθήκες. Επίσης, συνήθως με τους ηλεκτρικούς επενεργητές υπεισέρχεται και η ανάγκη για μειωτήρες για τη μείωση και αύξηση στροφών και ροπής αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι μειωτήρες, ειδικά αυτοί με μεγάλους λόγους μείωσης είναι απαραίτητοι διότι απλοποιούν σημαντικά τη δυναμική του συστήματος με την έννοια ότι πλέον κυρίαρχο ρόλο παίζει η αδράνεια και η τριβή του επενεργητή καθώς η αδράνεια και οι τριβές του φορτίου θεωρούνται μη σημαντικές ως πολύ μικρές. Βέβαια, οι μειωτήρες εισάγουν επιπλέον βάρος αλλά και ανεπιθύμητη χάρη (backlash) και ελαστικότητα μεταξύ επενεργητή και φορτίου.

Τέλος, σημειώνεται ότι οι πιο δημοφιλείς και συνήθεις ηλεκτρικοί επενεργητές για τέτοιου είδους απαιτήσεις ειδικά σε ιπτάμενες εφαρμογές είναι οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες (rc servomotors), λόγω του πολύ χαμηλού βάρους τους και της υψηλής ροπής που παρέχουν σε χαμηλές στροφές και άρα έτσι αποφεύγεται η χρήση εξωτερικών μειωτήρων.

Από την άλλη, οι υδραυλικοί επενεργητές δε χρειάζονται μειωτήρες διότι το χαρακτηριστικό τους είναι να παράγουν μεγάλες ροπές σε χαμηλές στροφές. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτών είναι ότι είναι ασφαλείς σε επικίνδυνα περιβάλλοντα. Σημειώνουν όμως αρκετά μειονεκτήματα όπως το πολύ μεγάλο βάρος και κόστος κυρίως λόγω του ρευστού που διακινούν αλλά και λόγω της ανάγκης για αντλίες ανακυκλοφορίας και ίσως μικρές δεξαμενές αποθήκευσης του ρευστού. Σημειώνεται βέβαια ότι υπάρχουν κλειστά κυκλώματα με micro-fluids τα οποία αίρουν αυτό το σημαντικό μειονεκτήμα του βάρους. Έτσι, παρά το πάρα πολύ μεγάλο κόστος αυτών των κυκλωμάτων μελετήθηκε και ένας μηχανισμός που έχει ως εργαζόμενο μέσο ασυμπύεστο ρευστό. Επίσης, η διαθεσιμότητα τους είναι περιορισμένη συγκριτικά με τους ηλεκτρικούς ειδικά για μικρά μεγέθη και απαιτήσεις όπως της συγκεκριμένης εργασίας.

Καποια σημεία που λαμβάνονται ως δεδομένα και μάλιστα εμφανίζονται αναλλοίωτα σε κάθε multirotor (βλ. Σχ. 1.3) είναι τα εξής. Ο μηχανισμός αποτελείται από το κύριο σώμα-βάση στο οποίο συγκλίνουν όλα τα φορτία και φιλοξενεί τις εδράσεις, τα ηλεκτρονικά, τη μπαταρία, τις οδηγήσεις (drives) και τους επενεργητές για τη μία ανεξάρτητη περιστροφή (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων) που συνήθως είναι το tilt.

Ακόμη, βασική προδιαγραφή είναι το κύριο σώμα του οχήματος που θα σχεδιασθεί να συνδέεται μέσω τριών ποδιών με τα ισοδύναμα συστήματα του ηλεκτροκινητήρα-έλικας ΙΣΗΕ, τα οποία είναι τοποθετημένα απολύτως συμμετρικά κατά τα αναφερθέντα στο Κεφ.1. Το κάθε ΙΣΗΕ φιλοξενεί τους ηλεκτροκινητήρες, τις έλικες, τους επενεργητές της άλλης ανεξάρτητης περιστροφής (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων), τις εδράσεις και οποιοδήποτε άλλο στοιχείο σχετικά με αυτά.

2.2 Παρουσίαση και περιγραφή μηχανισμών

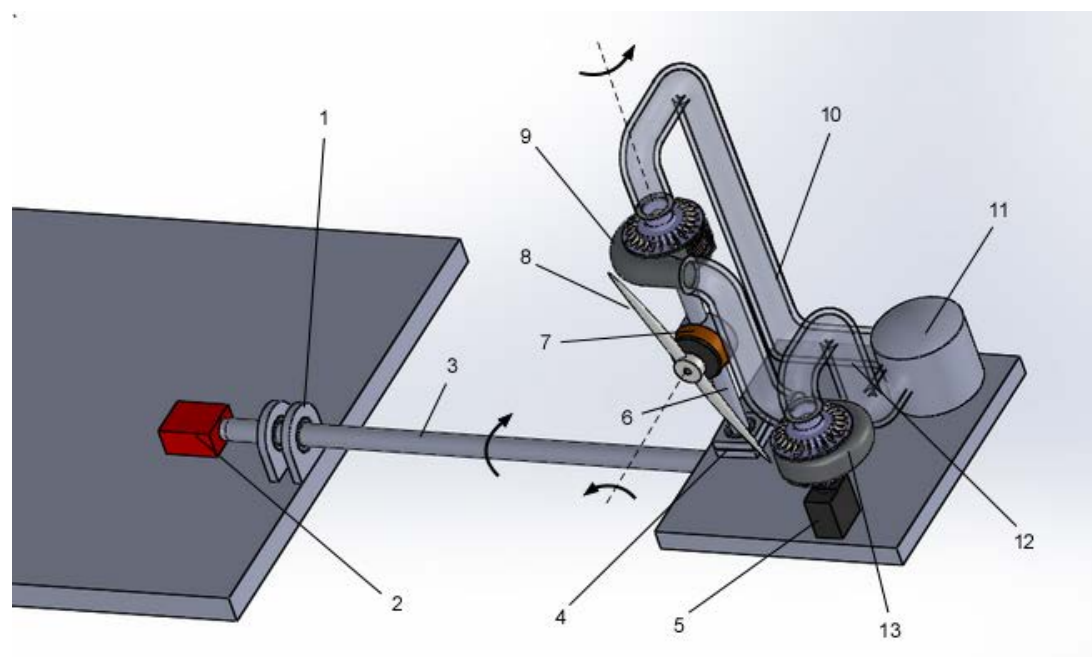
Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν παρουσιάζονται οι ακόλουθοι προτεινόμενοι δυνατοί μηχανισμοί με την περιγραφή τους. Δεδομένου ότι το όχημα απαιτείται να είναι πλήρως

συμμετρικό εξετάζεται και παρουσιάζεται η δομή της βάσης-κυρίου σώματος με το ένα μόνο εκ των τριών ποδιών και των ΙΣΗΕ.

2.2.1 Υβριδικό σύστημα

Περιγραφή

Ο μηχανισμός αυτός (βλ. Σχ. 2.1) υλοποιεί ακριβώς τη λογική που προαναφέρθηκε με τις ανεξάρτητες περιστροφές γύρω από δύο κάθετους άξονες. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένας περιστρεφόμενος άξονας 3 ο οποίος παράγει την πρώτη απαιτούμενη περιστροφή. Ο άξονας αυτός είναι το πόδι του ρομπότ και παίρνει κίνηση από έναν ηλεκτρικό σερβοκινητήρα 2 ο οποίος εδράζεται στη βάση του οχήματος. Ένας δεύτερος περιστρεφόμενος άξονας 6 πάνω στον οποίο είναι τοποθετημένα ο ηλεκτροκινητήρας 7 και η έλικα 8, παίρνει κίνηση από μια πτερωτή 9 η οποία τροφοδοτείται από ασυμπίεστο ρευστό υψηλής ενέργειας. Η πτερωτή επιλέχθηκε αντί ενός υδραυλικού κινητήρα λόγω της δυνατότητας συνεχούς ροής του ρευστού και της άμεσης μετατροπής σε περιστροφική κίνηση χωρίς να χρειάζονται συστήματα ατέρμωνων κοχλιών ή ζεύγη οδοντωτών τροχών για μετατροπή κίνησης από γραμμική σε περιστροφική. Το ρευστό αυτό διακινείται από μια αντλία 13 τοποθετημένη στη βάση του ΙΣΗΕ η οποία παίρνει ισχύ από ένα δεύτερο ηλεκτρικό σερβοκινητήρα 5. Το ρευστό έχοντας πλέον δώσει την ενέργεια του στην πτερωτή και άρα στο δεύτερο περιστρεφόμενο άξονα οδηγείται σε μία μικρή δεξαμενή 11 από την οποία το αναρροφά με την σειρά της η αντλία. Τέλος, για την πληρότητα σημειώνεται ότι αν θεωρήσουμε τα μήκη των δύο περιστρεφόμενων αξόνων ικανά ώστε να απαιτούν δύο εδράσεις ο καθένας 1 και 4, ο μηχανισμός αυτός απαιτεί τουλάχιστον τέσσερις εδράσεις. Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα ο αριθμός των εδράσεων αφού τόσο ο σωλήνας προσρόφησης 10 και αναρρόφησης 12 όσο και οι δύο πτερωτές απαιτούν ειδικά συστήματα έδρασης.



Σχήμα 2.1. Μηχανισμός υβριδικού συστήματος.

Σύνοψη-Αξιολόγηση

Το σύστημα αυτό δίνει τη δυνατότητα στην έλικα να έχει οιονδήποτε επιθυμητό προσανατολισμό μέσω των δύο ανεξάρτητων περιστροφών, δεν περιλαμβάνει καθόλου συστήματα μείωσης όπως οδοντωτούς τροχούς άρα αποφεύγονται ανεπιθύμητες χάρες (backlash) και ελαστικότητες που υπεισέρχονται μέσω αυτών και επίσης περιορίζεται από αυτήν την μεριά η πολυπλοκότητα του μηχανισμού. Επίσης, οι επενεργητές αυτοί ελέγχονται ικανοποιητικά λόγω της μη συμπίεστότητας του εργαζόμενου μέσου για τον ένα άξονα και λόγω της χρήσης ηλεκτρικού σερβοκινητήρα για τον άλλον κινούμενο άξονα-πόδι. Τέλος, λόγω των πτερωτών συνεχούς ροής επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στο πεδίο γωνιών του δεύτερου ανεξάρτητου άξονα κίνησης.

Από την άλλη, εκτιμάται ότι το βάρος και το κόστος δεν είναι παραδεκτό. Αν συνοψίσουμε, χρειάζονται ένας σερβοκινητήρας για την αντλία, ένας σερβοκινητήρας για τον κύριο άξονα-πόδι, τον ηλεκτροκινητήρα της έλικας καθώς και ένα ζεύγος αντλίας-πτερωτής. Σε αυτά συμπληρώνονται και οι εδράσεις των αξόνων, τα οποία μαζί με τους σωλήνες, τις εδράσεις αυτών και τη δεξαμενή βαραίνουν και περιπλέκουν αρκετά τον μηχανισμό. Όπως έχει αναφερθεί βέβαια με χρήση κλειστών κυκλωμάτων μικρο κλίμακας (micro fluids) θα μπορούσαμε να άρουμε το πρόβλημα του βάρους, το κόστος όμως θα ήταν μη παραδεκτό. Η θέση του κέντρου μάζας του ΙΣΗΕ σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο είναι εν γένει προβληματική λόγω του ότι οριζόντιος άξονας-πόδι υποχρεώνει το ΙΣΗΕ να βρίσκεται μόνιμα σε κάθετη απόσταση από αυτό. Αναμένονται επίσης και μεγάλες ροπές αδράνειας και άρα μειωμένη δυναμική συμπεριφορά ως προς τις γωνιακές επιταχύνσεις του οχήματος λόγω του ότι είναι επιβαρυμένο αρκετά το απομακρυσμένο από τη βάση ΙΣΗΕ.

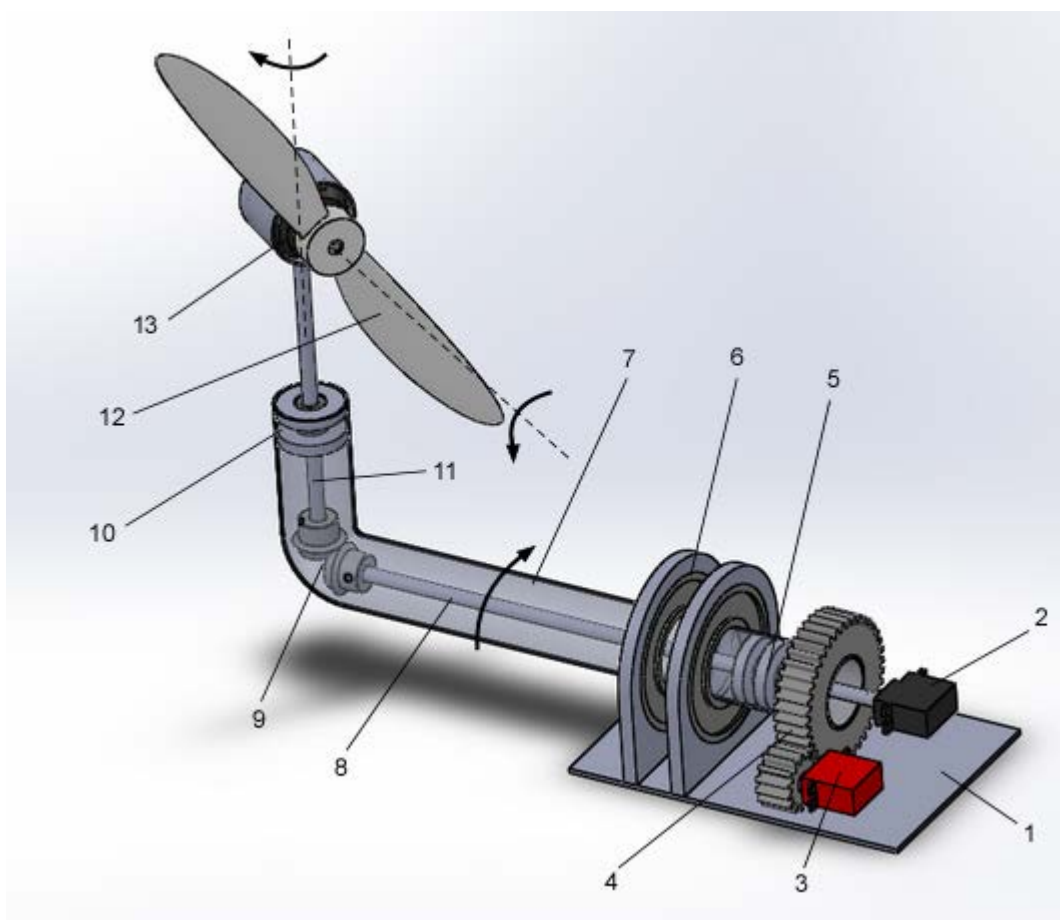
Σε ο,τι αφορά την ευκολία της κατασκευής, συζεύξεις μεταξύ πτερωτών, αξόνων, σωλήνων και δεξαμενής καθώς και οι στηρίξεις αυτών εισάγουν πολλές δυσκολίες. Τέλος, η ευρωστία του μηχανισμού αυτού σε ανώμαλες συνθήκες και διαταραχές φαίνεται ικανοποιητική με την έννοια ότι είναι ένας στιβαρός κλειστός μηχανισμός που δεν αλληλεπιδρά με το εξωτερικό περιβάλλον. Το μόνο πρόβλημα ευρωστίας που ελλοχεύει πηγάζει από το γεγονός ότι για την περιστροφή του δεύτερου άξονα έχουμε ρευστό ως εργαζόμενο μέσο το οποίο κυκλοφορεί σε ένα κλειστό κύκλωμα. Έτσι, σε απότομους ελιγμούς και επιταχύνσεις του ρομπότ οι αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις στο ρευστό ενδέχεται να οδηγούν σε μη εύρυθμη λειτουργία όπως αλλαγή κατεύθυνσης του ρευστού η γενικότερα διαταραχή της ροής του και του κύκλου που ακολουθεί.

2.2.2 Μηχανικό σύστημα με επενεργητές στη βάση

Περιγραφή

Ο μηχανισμός αυτός (βλ. Σχ. 2.2) είναι καθαρά μηχανικός. Είναι στην ίδια βάση φιλοσοφίας με τον πιο πάνω όπου η έλικα μπορεί να λάβει οιονδήποτε επιθυμητό προσανατολισμό μέσω δύο ανεξάρτητων περιστροφών. Το χαρακτηριστικό εδώ είναι ότι οι επενεργητές των δύο αξόνων μελετήθηκαν να βρίσκονται στη βάση 1 του ρομπότ ώστε να ανακουφιστεί κατά το δυνατότερο το ΙΣΗΕ και έτσι να έχουμε μικρότερες αδράνεις. Έτσι, πάλι ένας ηλεκτρικός σερβοκινητήρας 3 κινεί τον κύριο άξονα-πόδι 7 του οχήματος μέσω ενός ζεύγους οδοντώσεων 4 ώστε να βρίσκεται έκκεντρα σε σχέση με αυτόν. Ο άξονας αυτός είναι κοίλος

και μέσα σε αυτόν είναι τοποθετημένος ένας οριζόντιος εσωτερικός άξονας 8 ο οποίος παίρνει ισχύ από ένα δεύτερο ηλεκτρικό σερβοκινητήρα 2. Ο εσωτερικός άξονας 8 με ένα ζεύγος κωνικών οδοντωτών τροχών 9 μεταδίδει κίνηση σε έναν άλλον εσωτερικό άξονα 11, κάθετο προς αυτόν ο οποίος αποτελεί στην ουσία και τον δεύτερο κύριο άξονα κίνησης πάνω στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτροκινητήρας 13 με την έλικα 12 κάθετα τοποθετημένοι προς αυτόν. Πλέον έχουμε τρεις βασικούς άξονες και άμα θεωρήσουμε ότι ο κάθενας απαιτεί δύο έδρανα 5,6 και 10, ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός εδράσεων είναι έξι. Φαίνεται επομένως ότι το ΙΣΗΕ είναι αρκετά απλοποιημένο πλέον ως ένας άξονας με τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικά του, με την πολυπλοκότητα να αφορά πλέον τη βάση του ρομπότ και το εσωτερικό μέρος του ποδιού.



Σχήμα 2.2. Μηχανισμός μηχανικού συστήματος με επενεργητές στη βάση.

Σύνοψη-Αξιολόγηση

Όπως προαναφέρθηκε, η έλικα μπορεί να λάβει όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς πλέον και η αδράνεια του οχήματος έχει μειωθεί σημαντικά με την απλοποίηση του ΙΣΗΕ. Οι ενεργειακές περιοχές είναι περιορισμένες σε ηλεκτρική και μηχανική κάτι που κάνει τον έλεγχο των επενεργητών και του συστήματος εύκολο. Οι επενεργητές είναι οι ελάχιστοι δυνατοί δηλαδή δύο σερβοκινητήρες και τον ηλεκτροκινητήρα της έλικας και έτσι από αυτή την άποψη είναι περιορισμένο το κόστος και το βάρος.

Ένα σημαντικό αρνητικό σημείο είναι η πολυπλοκότητα του υπόλοιπου μέρους της κατασκευής και η δυσκολία κατασκευής του. Ο κύριος άξονας πρέπει να είναι κοίλος με αλλαγή γεωμετρίας στην άκρη του για την έδραση του δεύτερου άξονα πάνω στον οποίο είναι τοποθετημένη η έλικα. Επίσης, εσωτερικά πρέπει να γίνουν ειδικές διαμορφώσεις για τα έδρανα στήριξης του εσωτερικού οριζόντιου άξονα αλλά και προσεκτική τοποθέτηση των κωνικών οδοντωτών τροχών. Επιπλέον διαμορφώσεις και πολυπλοκότητα υπεισέρχονται αν ληφθούν υπόψιν και οι διαδρομές που πρέπει να ακολουθήσουν τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα μέχρι τη βάση. Όλα αυτά συνιστούν έναν πολύπλοκο μηχανισμό με δυσκολίες κατασκευής.

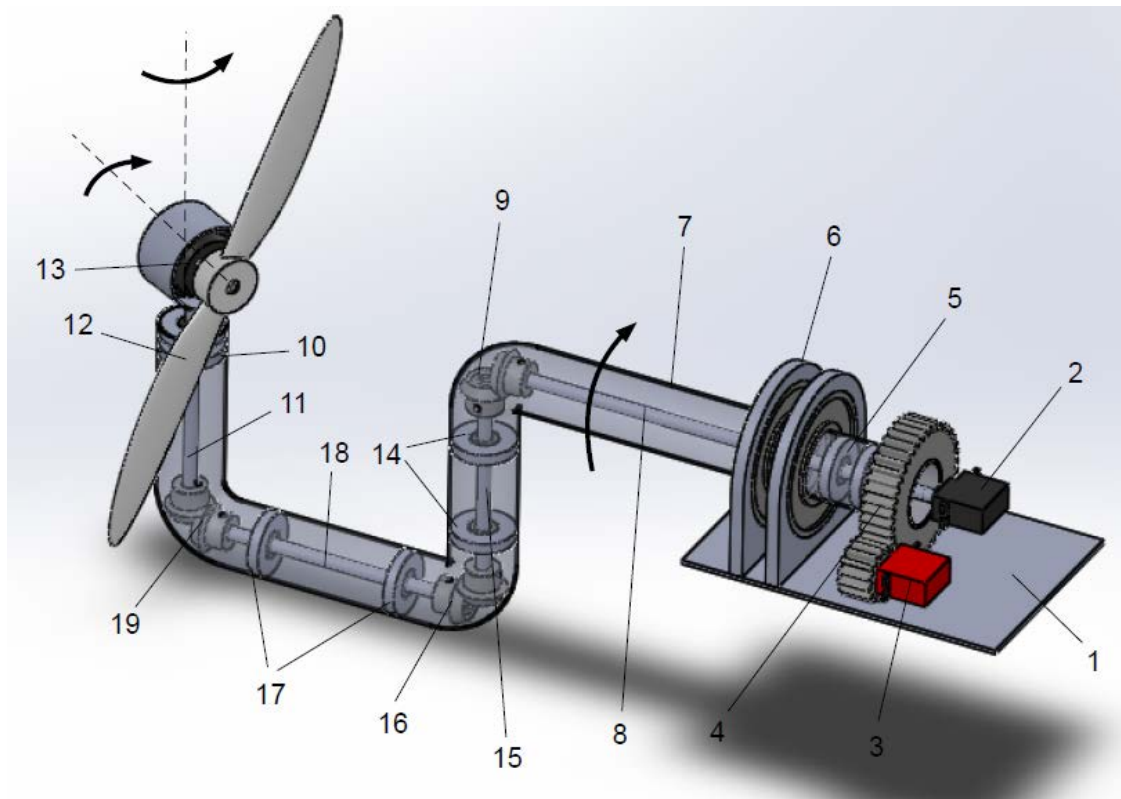
Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι τέτοιου είδους διαμορφώσεις έχουν ως αποτέλεσμα ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις τάσης όπως για παράδειγμα στην αλλαγή γεωμετρίας του κύριου οριζόντιου άξονα. Επίσης, λόγω των παραπάνω, αυξάνεται το βάρος του μηχανισμού. Σημειώνεται ακόμη ότι λόγω της χρήσης των οδοντώσεων υπεισέρχεται μια χάρη (backlash) στη συνεργασία μεταξύ του εσωτερικού οριζόντιου άξονα και του κάθετου άξονα καθώς και μεταξύ του σερβοκινητήρα της πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής και του ποδιού και άρα κάποια ανεπιθύμητα σφάλματα και στους δύο βαθμούς ελευθερίας.

Σε ο,τι αφορά το κέντρο μάζας του μηχανισμού, αυτό είναι εν γένει προβληματικό, διότι οι αυστηρά οριζόντιοι άξονες υποχρεώνουν το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ να βρίσκεται εκτός του οριζόντιου-ουδέτερου επιπέδου. Τέλος, όπως φαίνεται αυτός είναι ένας εύρωστος μηχανισμός με ομοιόμορφη και ομοιογενή συμπεριφορά, ανεξάρτητος από ανεπιθύμητες καταστάσεις και διαταραχές κυρίως του εξωτερικού περιβάλλοντος.

2.2.3 Μηχανικό σύστημα με επιθυμητό κέντρο μάζας

Περιγραφή

Ο μηχανισμός αυτός (βλ. Σχ. 2.3) ομοιάζει πλήρως με τον προηγούμενο με τη σημαντική διαφορά ότι εδώ έγινε προσπάθεια να αρθεί το πρόβλημα του κέντρου μάζας. Έτσι, ο οριζόντιος άξονας-πόδι 7 του μηχανισμού έχει διπλή αλλαγή γεωμετρίας όπως φαίνεται στο σχήμα. Η πρώτη, φτάνει σε τέτοιο μήκος κάτω από το οριζόντιο επίπεδο ώστε το συνολικό σύστημα να δίνει το κέντρο μάζας στην επιθυμητή θέση. Η δεύτερη αλλαγή γεωμετρίας είναι καθαρά για την έδραση και την τοποθέτηση του δεύτερου κατακόρυφου άξονα κίνησης 11, πάνω στον οποίο είναι προσδεμένη η έλικα 12 με τον ηλεκτροκινητήρα 13. Με αυτήν την αλλαγή είναι φανερό ότι για να έχουμε μετάδοση κίνησης από τον επενεργητή 2 για τον δεύτερο βαθμό ελευθερίας στον άξονα 11 της έλικας χρειάζονται εσωτερικά του κοίλου άξονα-ποδιού τρία ζεύγη κωνικών οδοντωτών τροχών 9, 16, 19 και τρεις άξονες 8, 15, 18. Άμα θεωρήσουμε ότι οι άξονες αυτοί έχουν σημαντικό μήκος απαιτούνται δύο έδρανα για τον καθένα και τελικά για όλους τους αξονές του μηχανισμού είναι αναγκαία η ύπαρξη δέκα εδράνων κύλισης 5, 6, 10, 14, 17.



Σχήμα 2.3. Μηχανισμός μηχανικού συστήματος με επιθυμητό κέντρο μάζας.

Σύνοψη-Αξιολόγηση

Όπως ακριβώς και στην πάνω περίπτωση η έλικα έχει τη δυνατότητα πλοήγησης οπουδήποτε σε μια νοητή σφαίρα, ο ο αριθμός των επενεργητών είναι όπως και πάνω τρία δηλαδή ο ελάχιστος δυνατός και έτσι το βάρος και κόστος λόγω αυτών είναι παραδεκτό. Επιπρόσθετα, ο έλεγχος των επενεργητών λόγω της ηλεκτρικής φύσης τους είναι εύκολος.

Όπως επισημάνθηκε, ο μηχανισμός αυτός προτάθηκε λόγω της δυνατότητας που δίνει για τη ρύθμιση του κέντρου μάζας ενώ παράλληλα ανακουφίζει από άποψη πολυπλοκότητας το ΙΣΗΕ. Εισάγει όμως όπως φαίνεται πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα και βάρος στο συνολικό σύστημα καθώς πλέον τα στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται όπως άξονες μετάδοσης κίνησης, οδοντωτοί τροχοί και ρουλεμάν είναι πολυάριθμα αλλά και στην περίπτωση της χρήσης καλωδίων για την επικοινωνία βάσης και ηλεκτροκινητήρα ο τρόπος μεταφοράς τους μέσα από τα περιστρεφόμενα μέρη είναι πολύπλοκος. Τα τελευταία εκτός των άλλων εισάγουν και αύξηση του βάρους καθώς και του κόστους της κατασκευής.

Επιπλέον, όπως και στον μηχανισμό της Παρ. 2.2.2 η δυσκολία κατασκευής είναι αξιοσημειώτη κυρίως λόγω των εσωτερικών διαμορφώσεων εσωτερικά του ποδιού για την τοποθέτηση των εδράνων, των συστημάτων μετάδοσης και των αξόνων. Τις κυριότερες δυσκολίες κατασκευής στην πραγματικότητα εισάγουν αυτές οι απαιτούμενες αλλαγές γεωμετρίας του ποδιού, οι οποίες για να επιτευχθούν στην πράξη σημαίνει ότι πρέπει να έχουμε τέσσερα διακριτά σώματα-κοίλους άξονες και φλάντζες σύνδεσης μεταξύ τους. Αν θελήσουμε να έχουμε έναν φορέα ο οποίος θα καμφθεί κατάλληλα ώστε να παραχθεί αυτή η απαιτούμενη γεωμετρία γλιτώνουμε αυτήν την πολυπλοκότητα εισάγουμε όμως

αβεβαιότητες στην ακριβή τοποθέτηση του κέντρου μάζας λόγω ενδεχόμενων κατασκευαστικών ανακρίβειών ή σφαλμάτων. Ακόμη, όπως και στον μηχανισμό της Παρ. 2.2.2 με αυτές τις αλλαγές γεωμετρίας και οπές για τις διαμορφώσεις, η συγκέντρωση τάσεων είναι αναπόφευκτη σε πολλά σημεία του μηχανισμού. Ακόμη, όπως και στο σύστημα της Παρ. 2.2.2, ελλοχεύουν σφάλματα κυρίως στην δεύτερη ανεξάρτητη περιστροφή λόγω της συνολικής χάρης που εισάγουν τα τρία απαιτούμενα ζεύγη οδοντώσεων και δευτερευόντως στην πρώτη ανεξάρτητη περιστροφή λόγω του ζεύγους οδοντώσεων σύζευξης ποδιού και ηλεκτρικού σερβοκινητήρα.

Τέλος, ως προς την ευρωστία σε εξωτερικές διαταραχές και αλληλεπιδράσεις είναι ικανοποιητικός ο μηχανισμός αυτός, χειρότερος όμως από την προηγούμενη περίπτωση κυρίως λόγω της αύξησης των χρησιμοποιηθέντων στοιχείων μηχανών.

Για την πληρότητα σημειώνεται ότι η σύζευξη μεταξύ των εσωτερικών αξόνων θα μπορούσε να γίνει με τη χρήση ιμάντων και τροχαλιών ξεφεύγοντας έτσι από τη χρήση κωνικών τροχών συνεργασίας. Αυτό, δεν επιφέρει καμία ουσιαστική αλλαγή και ισχύουν ακριβώς τα προαναφερθέντα τόσο για το βάρος, κόστος, πολυπλοκότητα και ευκολία κατασκευής όσο και για την ευρωστία.

2.2.4 Μηχανικό συνδυασμένο σύστημα

Περιγραφή

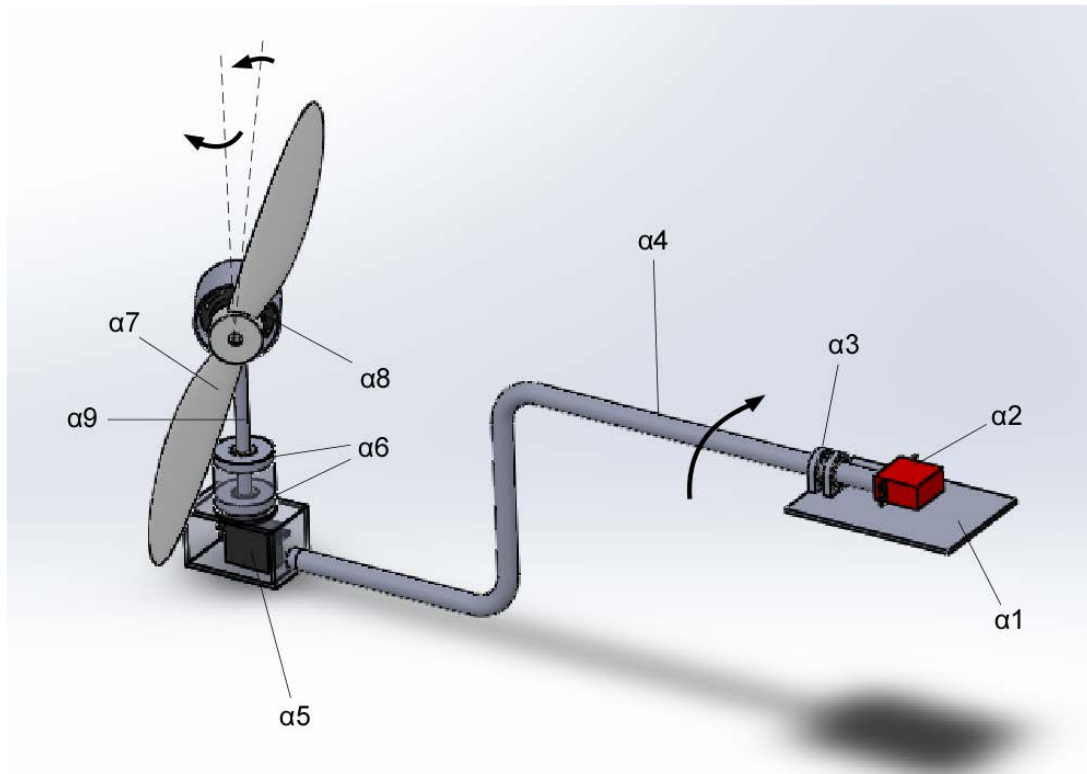
Ο μηχανισμός αυτός είναι ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο παραπάνω με κύριο σκοπό τη δυνατότητα ρύθμισης του κέντρου μάζας του ΙΣΗΕ, κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την ομαλή συμπεριφορά του ρομπότ όπως θα φανεί και παρακάτω, ενώ παράλληλα επιδιώκεται ο μηχανισμός να παραμείνει ο απλούστερος δυνατός. Αυτό προσεγγίζεται με την επιβάρυνση του ΙΣΗΕ με τον ηλεκτρικό σερβοκινητήρα που δημιουργεί τη δεύτερη ανεξάρτητη περιστροφή και την τοποθέτηση του ακριβώς κάτω από τον δεύτερο κύριο άξονα, ώστε να είναι άμεση η οδήγηση του (direct drive). Έτσι, ο αριθμός των επενεργητών παραμένει ο ελάχιστος δυνατός, τα έδρανα κύλισης είναι τέσσερα πλέον και αντιστοιχούν στους δύο κύριους άξονες και δεν υπάρχουν πρόσθετα συστήματα μετάδοσης με τις χάρες και ελαστικότητες που εισάγουν αυτές.

Παρουσιάζονται δύο μηχανισμοί ακριβώς αυτής της λογικής οι οποίοι ουσιαστικά διαφέρουν μόνο στη φιλοσοφία τοποθέτησης του κέντρου μάζας στο επιθυμητό σημείο.

Παραλλαγή 1

Στην πρώτη παραλλαγή (βλ. Σχ. 2.4), τη δυνατότητα ρύθμισης του κέντρου μάζας τη χειρίζεται ο οριζόντιος άξονας-πόδι α4, ο οποίος με την αλλαγή της γεωμετρίας του φτάνει κάτω από το ουδέτερο επίπεδο της βάσης όπως και στο μηχανισμό της Παρ. 2.2.3. Ο αριθμός των απαιτούμενων εδράσεων είναι δύο για το πόδι α3 και άλλες δύο α6 για τον κάθετο άξονα-άξονα της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής α9. Σημειώνεται για την πληρότητα ότι το πόδι κατά τα γνωστά παίρνει κίνηση από το σερβοκινητήρα α2 ο οποίος εδράζεται στο κύριο σώμα α1. Ο κατακόρυφος άξονας α9 οδηγείται από το σερβοκινητήρα α5 και σε αυτόν είναι κάθετα τοποθετημένα ο ηλεκτροκινητήρας α8 και η έλικα α7. Στην

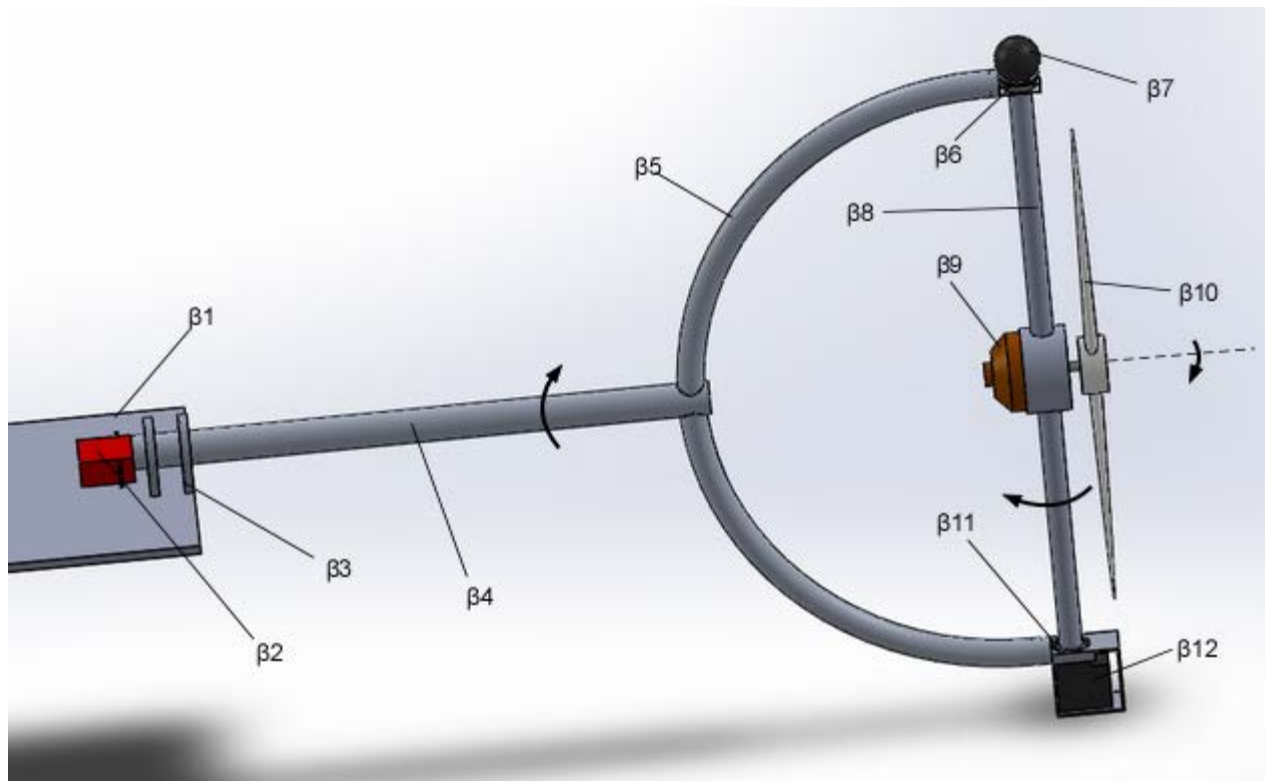
ουσία δηλαδή η παραλλαγή αυτή ήταν μια απόπειρα για το βέλτιστο συνδυασμό των μηχανισμών των Παρ. 2.2.2 και 2.2.3.



Σχήμα 2.4. Μηχανισμός παραλλαγής 1 μηχανικού συνδυασμένου συστήματος.

Παραλλαγή 2

Η δεύτερη παραλλαγή (βλ. Σχ. 2.5) έχει ως πόδι έναν καθαρά οριζόντιο άξονα β4, ο οποίος καταλήγει σε μία στεφάνη β5 στην οποία είναι τοποθετημένος ο δεύτερος κύριος άξονας β8 με τον ηλεκτροκινητήρα β9 και την έλικα β10. Το πόδι κατά τα γνωστά παίρνει κίνηση από τον ηλεκτρικό σερβοκινητήρα β2 και μέσω δύο εδράσεων β3 στηρίζεται στο κύριο σώμα β1. Ο άξονας β8, ως αμφιέριστος στη στεφάνη απαιτεί δύο εδράσεις β6, β11. Η θέση του επενεργητή που δημιουργεί την δεύτερη ανεξάρτητη περιστροφή β12 είναι ακριβώς κάτω από τον άξονα β8 (direct drive) και συμμετρικά ως προς τον ηλεκτροκινητήρα είναι τοποθετημένο ένα αντίβαρο β7 ίσης μάζας με τον ηλεκτρικό σερβοκινητήρα β12. Όπως φαίνεται δηλαδή ο ρυθμιστής του κέντρου μάζας στην παραλλαγή αυτή είναι το β7 αντίβαρο μαζί με τη συμμετρική γεωμετρία της στεφάνης β5.



Σχήμα 2.5. Μηχανισμός παραλλαγής 2 μηχανικού συνδυασμένου συστήματος.

Σύνοψη-Αξιολόγηση

Ικανοποιώντας τον αρχικό σκοπό αυτού του συνδυασμένου συστήματος, η πολυπλοκότητα μαζί με το βάρος και το κόστος έχουν μειωθεί και το κέντρο μάζας πλέον ρυθμίζεται στο επιθυμητό επίπεδο και στις δύο περιπτώσεις. Ακόμη, το εύρος κίνησης και η ευκολία ελέγχου παραμένουν αναλλοίωτα κατά τα προαναφερθέντα. Σε ό,τι αφορά την ευρωστία σε εξωτερικές διαταραχές και μεταβολές, και οι δύο παραλλαγές είναι πολύ ικανοποιητικές αφού έχουμε να κάνουμε με κλειστούς μηχανισμούς ελαχιστοποιημένους ως προς την πολυπλοκότητα.

Κάποια σημεία στα οποία διαφέρουν οι δύο παραλλαγές είναι τα εξής. Αρχικά, η κατανομή των τάσεων στον φορέα της στεφάνης β5 είναι πολύ πιο ομοιόμορφη από τον φορέα-πόδι α4 της πρώτης παραλλαγής με τις απότομες αλλαγές γεωμετρίας. Ακόμη, κατά τα προαναφερθέντα, αυτές οι απαιτούμενες αλλαγές γεωμετρίας του ποδιού εισάγουν αρκετές κατασκευαστικές δυσκολίες και πολυπλοκότητα, αφού στην πραγματικότητα ένας τέτοιος φορέας πρέπει να προκύψει ως επαλληλία τεσσάρων σωμάτων-αξόνων μέσω φλαντζών σύνδεσης. Είναι δυνατή και η κάμψη του βέβαια σε δύο σημεία ώστε να προκύψει αυτή η γεωμετρία, όμως έτσι το αποτέλεσμα θα είναι αβέβαιο ως προς την τελική αυστηρή τοποθέτηση του κέντρου μάζας.

Επιπρόσθετα, ο μηχανισμός της δεύτερης περίπτωσης είναι πολύ πιο στιβαρός με την έννοια ότι ο κατακόρυφος άξονας β8 στη δεύτερη παραλλαγή είναι αμφιέριστος στα δύο άκρα της στεφάνης β5 ενώ στην πρώτη παραλλαγή το ένα άκρο παραμορφώνεται ελεύθερα αφού ο άξονας α9 στηρίζεται αποκλειστικά στο κάτω μέρος του. Αυτή η μηχανική υπεροχή

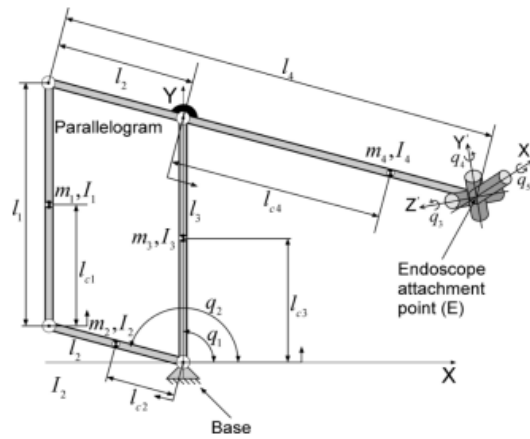
της δεύτερης παραλλαγής έχει ένα μικρό κόστος βέβαια στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος με την έννοια των μεγαλύτερων ροπών αδράνειας. Τόσο η ανάγκη ύπαρξης αντιβάρου όσο και το μισό τμήμα του ημικυκλίου που συνδέει αντίβαρο και πόδι αυξάνουν τη μάζα μακριά από το κύριο σώμα-βάση και άρα και τις αδράνεις. Σημειώνεται όμως ότι οι απαιτήσεις ροπών για το σερβοκινητήρα β12 της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής είναι μικρές οπότε σερβοκινητήρας και αντίβαρο αναμένονται να είναι πολύ μικρής μάζας και άρα να μην επιβαρύνουν σημαντικά τις αδράνεις του συστήματος.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι η εξής. Οι δύο παραλλαγές διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο ρυθμίζεται το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το κέντρο μάζας. Καθώς θα αλλάζει το βάρος του ΙΣΗΕ για οποιονδήποτε λόγο θα πρέπει ανάλογα να αλλάζει και ο ρυθμιστής του κέντρου μάζας. Έτσι αν για παράδειγμα μελλοντικά αντικατασταθεί ο σερβοκινητήρας α5 ή β12 της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής με έναν άλλον λόγω αύξησης των απαιτήσεων ή αν υπάρξουν κατασκευαστικά σφάλματα και ανακρίβειες, τότε επηρεάζεται άμεσα η θέση του κέντρου μάζας. Αυτό για τη δεύτερη παραλλαγή δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς απαιτείται απλά η χρήση αντίβαρου κατάλληλης μάζας. Η πρώτη παραλλαγή όμως είναι προβληματική σε τέτοιες αλλαγές αφού θα απαιτείται η εκ νέου κατασκευή του ποδιού-φορέα μεταβλητής γεωμετρίας α4. Μία πιο απλή λύση για την πρώτη παραλλαγή θα ήταν η υιοθέτηση μιας ανάλογης λογικής αντιβάρου, η οποία όμως ως μη προδιαγεγραμμένη θα αύξανε την πολυπλοκότητα και θα δημιουργούσε κατασκευαστικά ζητήματα καθώς και θα έβγαινε πλέον από την αυστηρή λογική που ακολουθεί το συνδυασμένο αυτό σύστημα στην πρώτη του παραλλαγή.

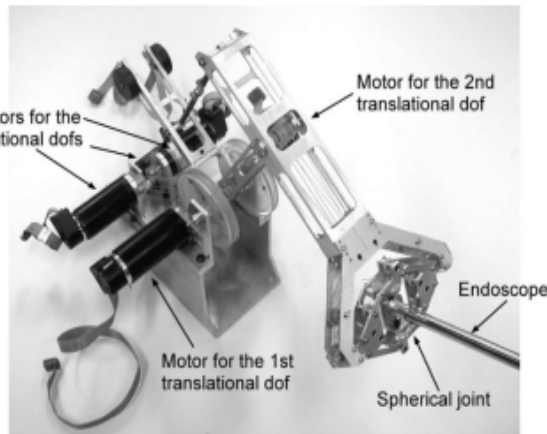
2.2.5 Σφαιρική άρθρωση μηχανισμού απτικής διεπαφής

Περιγραφή

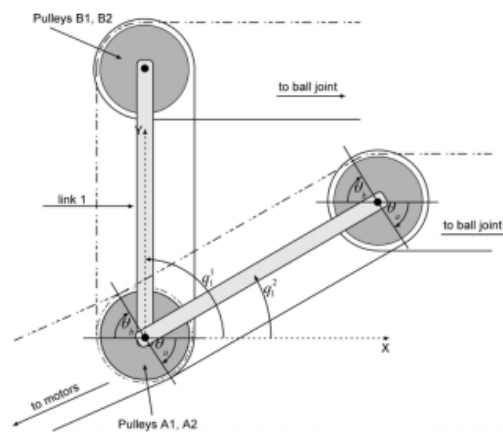
Ο μηχανισμός αυτός είναι εμπνευσμένος από τον εξομοιωτή δυνάμεων απτικής διεπαφής ο οποίος αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής [9]. Λόγω της φύσης της εφαρμογής του έχει ελαχιστοποιημένα δυναμικά χαρακτηριστικά όπως αδράνεια, μάζα και τριβές κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Ο εξομοιωτής αυτός είναι ένας μηχανισμός πέντε ράβδων 2 β.ε., ο οποίος καταλήγει σε μια σφαιρική άρθρωση τριών βαθμών ελευθερίας 3 β.ε. (βλ. Σχ. 2.6) και (βλ. Σχ. 2.7). Επειδή ο μηχανισμός αυτός προορίζεται για χειρουργικές επεμβάσεις συγκεκριμένης τροχιάς και μήκους εμπεριέχει μέρη που δεν χρειάζονται στη δική μας εφαρμογή. Συγκεκριμένα, το σύνολο των πέντε ράβδων που ευθύνεται για τους μεταφορικούς β.ε. αφαιρείται εντελώς. Έτσι έχουμε απαλλαγεί και από περιττό βάρος αλλά και από την πολυπλοκότητα του μηχανισμού των πέντε ράβδων, ο οποίος εκτός των άλλων είχε ειδική σχεδίαση (βλ. Σχ. 2.8) ώστε οι μεταφορικοί β.ε. να μην επηρεάζουν τα μήκη των νημάτων και άρα τις γωνιακές μετατοπίσεις της σφαιρικής άρθρωσης. Σημειώνεται ότι αυτή η αποσύμπλεξη μεταξύ μεταφορικών και περιστροφικών β.ε. μας δίνει τη δυνατότητα πλέον να μπορούμε να αξιοποιήσουμε την σφαιρική άρθρωση μόνη της και ανεξάρτητα (βλ. Σχ. 2.9).



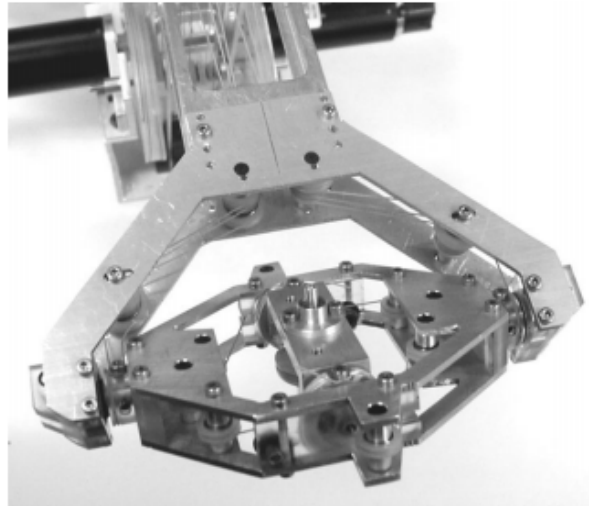
Σχήμα 2.6. Σχηματική απεικόνιση του απτικού μηχανισμού 5 β.ε. [9].



Σχήμα 2.7. Φωτογραφία του πραγματικού απτικού μηχανισμού 5 β.ε. [9].

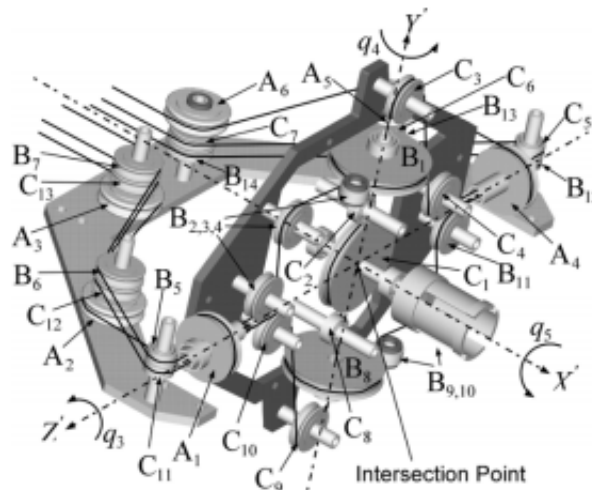


Σχήμα 2.8. Διαδρομή μικρονημάτων ώστε να μην επηρεάζονται τα μήκη τους κατά τις μεταφορικές κινήσεις [9].



Σχήμα 2.9. Σφαιρική άρθρωση [9].

Η σφαιρική άρθρωση υλοποιείται με τη χρήση τριών συστημάτων τροχαλιών A, B, C που ευθύνονται για τους βαθμούς ελευθερίας q_3 , q_4 , q_5 αντίστοιχα (βλ. Σχ. 2.10). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από μικροτροχαλίες και μικρονήματα τα οποία μεταφέρουν τις ροπές όχι εξαιτίας των τριβών με τις τροχαλίες αλλά με τη μέθοδο των τενόντων, δηλαδή τα νήματα λειτουργούν ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η προαναφερθείσα ελαχιστοποίηση των τριβών στη σφαιρική αυτή άρθρωση.



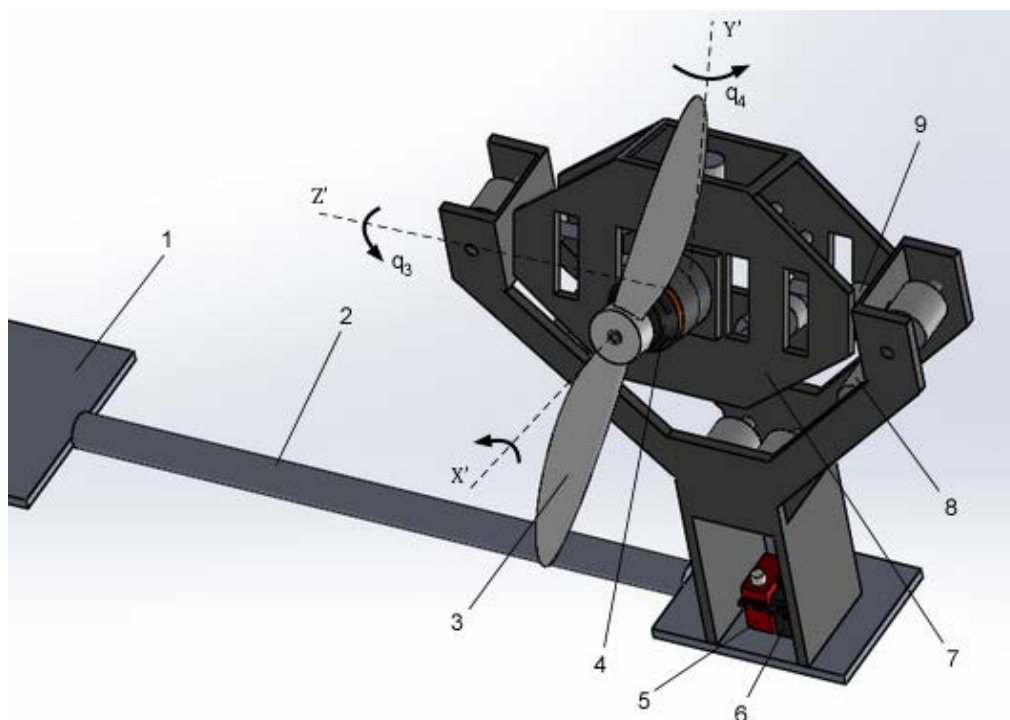
Σχήμα 2.10. Σφαιρική άρθρωση 3 β.ε με τα συστήματα τροχαλιών A, B, C [9].

Η σφαιρική άρθρωση για την εφαρμογή μας τροποποιείται ως εξής. Δεδομένου ότι η παρούσα εφαρμογή απαιτεί δύο ανεξάρτητες περιστροφές γύρω από δύο άξονες για την τοποθέτηση της έλικας οπουδήποτε στο χώρο και μία ακόμη, αυτή της ιδιοπεριστροφής της έλικας, αφαιρείται το σύστημα C των δεκατριών τροχαλιών, δηλαδή αφαιρούμε τον βαθμό ελευθερίας q_5 γύρω από τον άξονα X' . Αυτό γίνεται διότι μετά από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν μετά την κατασκευή του εξομοιωτή αυτού διαπιστώθηκε ότι το δυνατό εύρος κίνησης της σφαιρικής άρθρωσης γύρω από τον άξονα X' είναι $\pm 270^\circ$ και μάλιστα

μετά την τοποθέτηση του ενδοσκοπίου μειώνεται περαιτέρω. Έτσι, το σύστημα C δε θα μπορούσε να οδηγήσει τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικα σε καμία περίπτωση αφού αυτά απαιτούν πλήρεις περιστροφές $\pm 360^\circ$ και με πολύ μεγάλες ταχύτητες. Οι ταχύτητες αυτές ήταν ένας ακόμη λόγος για τον οποίο αφαιρέθηκε το σύστημα C καθώς το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για λεπτές χειρουργικές κινήσεις μικρών ταχυτήτων και αδρανειακών φορτίων και όχι για τις απαιτήσεις που υπεισέρχονται με τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικα ως φορτίο πλέον.

Έτσι, για τη δική μας εφαρμογή (βλ. Σχ. 2.11) τα δύο συστήματα A, B τροχαλιών με τον αριθμό 8 και 9 αντίστοιχα, μέσω των μικρονημάτων παράγουν τις απαιτούμενες ροπές στο μηχανισμό για την τοποθέτηση του προωστήρα οπουδήποτε μέσα σε μια νοητή σφαίρα. Αυτά αποτελούν στην ουσία τα συστήματα μετάδοσης κίνησης από δύο ηλεκτρικούς σερβοκινητήρες 5, 6 οι οποίοι βρίσκονται στη βάση 1 του ΙΣΗΕ. Στο κέντρο του μηχανισμού αυτού και κατά μήκος του άξονα X' τοποθετείται ο ηλεκτροκινητήρας 4 με την έλικα 3 αφού προηγηθεί ειδική διαμόρφωση. Ένα δύσκολο σημείο εδώ το οποίο πρέπει να αναφερθεί είναι η τοποθέτηση των καλωδίων από τα οποία τροφοδοτείται ο ηλεκτροκινητήρας. Επειδή αυτή η σφαιρική άρθρωση 7 είναι πολύ μικρού μεγέθους, έχει συγκεκριμένη γεωμετρία και άρα περιορισμένο χώρο η μεταφορά των καλωδίων ώστε να υπάρχει ανταλλαγή ισχύος και σήματος κάθε στιγμή σε κάθε γωνιακή μετατόπιση του σφαιρικού συνδέσμου αποτελεί μια πρόκληση από την άποψη σχεδίασης και κατασκευής.

Πιο πάνω έγινε μνεία αποκλειστικά στο ΙΣΗΕ του μηχανισμού του ρομπότ. Ο συνολικός μηχανισμός όμως αποτελείται όπως και στις πιο πάνω περιπτώσεις από την βάση-κύριο σώμα 1 του οχήματος και το πόδι του ρομπότ 2 το οποίο πλέον είναι ακίνητο και συνδέει τη βάση με το ΙΣΗΕ.



Σχήμα 2.11. Μηχανισμός σφαιρικής άρθρωσης μηχανισμού απτικής διεπαφής.

Σύνοψη-Αξιολόγηση

Η σφαιρική αυτή άρθρωση 7 είναι ιδιαίτερα ελαφριά και βελτιστοποιημένη-ελαχιστοποιημένη ως προς τη δυναμική της δεδομένου ότι προορίζεται για ουρολογικές επεμβάσεις και έτσι μπορεί να αποτελέσει μία συνιστώσα ενός ιπτάμενου οχήματος. Επιπρόσθετα, οι επενεργητές που χρησιμοποιούνται είναι οι ελάχιστοι δυνατοί, δύο για τα συστήματα τροχαλιών 8,9 και ένα ηλεκτροκινητήρα 4 που οδηγεί την έλικα 3. Έτσι από την άποψη των επενεργητών η πολυπλοκότητα και το βάρος είναι περιορισμένα. Τέλος, η χρήση καθαρά ηλεκτρικών επενεργητών καθιστά τον έλεγχο του μηχανισμού εύκολο.

Από την άλλη, εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα. Αρχικά, ως προς το εύρος κίνησης σημειώνεται ότι αυτός ο σφαιρικός σύνδεσμος δεν μπορεί να λάβει οποιονδήποτε προσανατολισμό. Συγκεκριμένα, μετά από πειράματα [9] προέκυψε ότι το εύρος του βαθμού ελευθερίας q_3 του συστήματος τροχαλιών A γύρω από τον άξονα Z' ισούται με $\pm 270^\circ$ ενώ του βαθμού ελευθερίας q_4 του συστήματος B γύρω από τον άξονα Y' είναι μόλις $\pm 90^\circ$ τιμές οι οποίες μειώνονται ακόμα περισσότερο με την προσθήκη φορτίου στον σύνδεσμο αυτό.

Επιπρόσθετα, η πολυπλοκότητα του μηχανισμού αυτού είναι πολύ μεγάλη αφού μπορεί το πόδι 2 να είναι ένας απλός άξονας, το ΙΣΗΕ όμως αποτελείται από έξι μικροτροχαλίες 8 του συστήματος A, δεκατρείς τροχαλίες 9 του B καθώς και μικρονήματα. Ακόμη, την πολυπλοκότητα αυτή πολλαπλασιάζουν οι δακτύλιοι ολίσθησης και οι επιπλέον διαμορφώσεις που είναι αναγκαίες για την μεταφορά των καλωδίων στη βάση. Η κατασκευή του μηχανισμού αυτού είναι αρκετά σύνθετη τόσο όσο προς τα μηχανικά μέρη όσο και ως προς τις απαιτούμενες διαμορφώσεις για την μεταφορά των καλωδίων.

Σε ο,τι αφορά την τοποθέτηση του κέντρου μάζας ο μηχανισμός αυτός είναι εν γένει προβληματικός. Αυτό θα μπορούσε να αρθεί μιμούμενοι τα παραπάνω είτε με χρήση αντιβάρου είτε με επιτηδευμένη αλλαγή γεωμετρίας στον άξονα, αυτό όμως περιπλέκει ακόμα πιο πολύ τον μηχανισμό. Ένα ακόμα σημείο που πρέπει να τονισθεί είναι ότι ενδέχεται τα συστήματα αυτών των τροχαλιών να έχουν κακή συμπεριφορά σε απότομες επιταχύνσεις και μεγάλες ταχύτητες, αφού είναι προδιαγεγραμμένα για χειρουργικές κινήσεις ακριβείας. Ακόμη, επειδή είναι επιβαρυνμένο αρκετά το ΙΣΗΕ με τους επενεργητές και όλα τα απαραίτητα στοιχεία μηχανών και μηχανισμών αναμένεται μεγάλη αδράνεια του οχήματος αυτού τόσο λόγω της γεωμετρίας όσο και λόγω της μεγάλης μάζας μακριά από τη βάση-κύριο σώμα. Τέλος, σημειώνεται ότι το σύστημα αυτό είναι παθολογικό ως προς την ευρωστία του σε διαταραχές και εξωτερικές συνθήκες αν αναλογισθεί κανείς τον αριθμό των μικροτροχαλιών και των μικρονημάτων και την μεγάλη πιθανότητα αστοχίας ή διαταραχής σε μία εξ'αυτών.

2.2.6 Ηλεκτροκινητήρας και έλικα τοποθετημένοι σε κινούμενη σφαίρα

Περιγραφή

Ο μηχανισμός αυτός (βλ. Σχ. 2.13) διαφοροποιείται της πλειοψηφίας των παραπάνω με την εξής έννοια. Ο απαιτούμενος χώρος πλοήγησης του προωστήρα, δηλαδή μια νοητή σφαίρα επιδιώκεται να καλυφθεί με την πρόσδεση του ηλεκτροκινητήρα 16 και της έλικας 15 σε μια πραγματική σφαίρα 17. Αυτή έχει δύο β.ε. για τους οποίους υπεύθυνοι είναι δύο ηλεκτρικοί επενεργητές 6,9 τοποθετημένοι στη βάση του ΙΣΗΕ. Λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας

της σφαίρας η μετάδοση κίνησης προς αυτήν γίνεται μέσω χρήσης omni-directional τροχών (βλ. Σχ. 2.12).

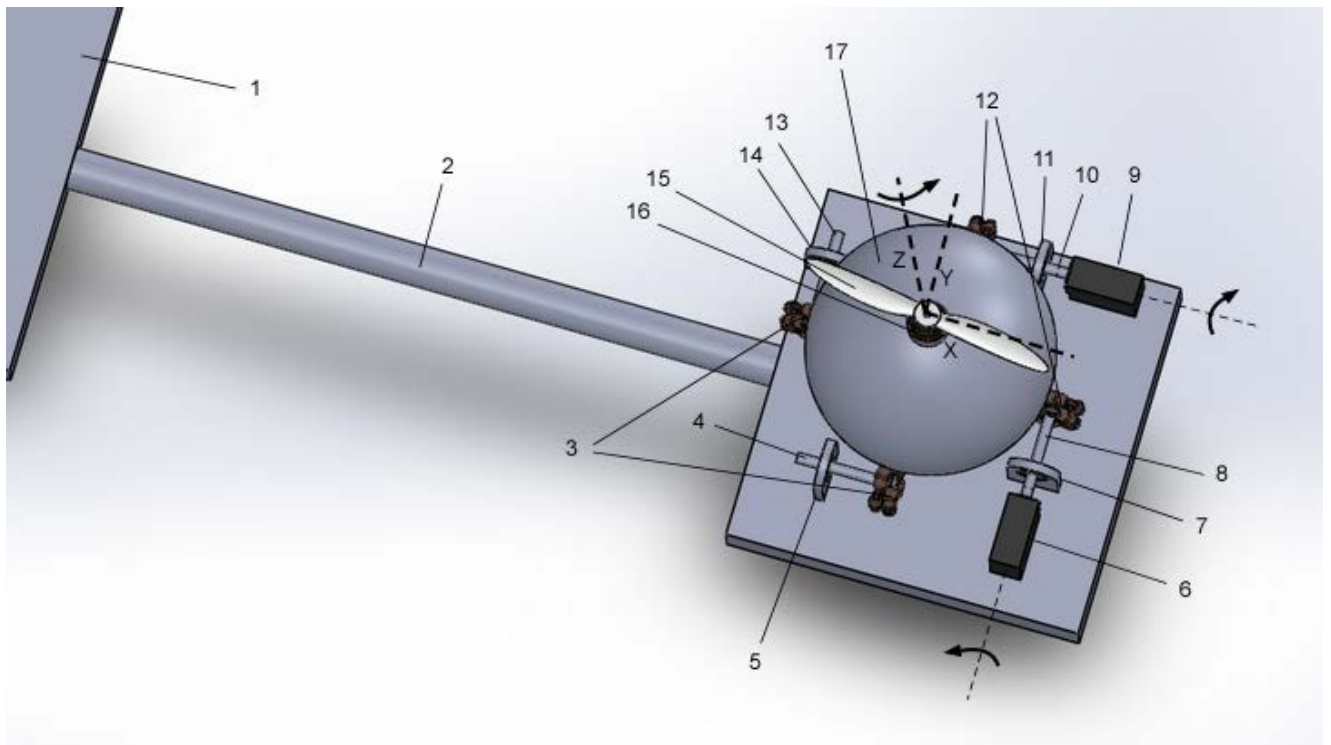


Σχήμα 2.12. Omni-directional wheel.

Συγκεκριμένα, αν χωρίσουμε κατά το επίπεδο κάθετο στον άξονα Z τη σφαίρα σε τέσσερις περιοχές, οι δύο, συμμετρικές ως προς τον άξονα X αποτελούνται αντίστοιχα από δύο omni-directional τροχούς με τον άξονα συμμετρίας τους παράλληλο στον άξονα X. Ο 12 παίρνει κίνηση από τον πρώτο ηλεκτρικό επενεργητή 9 ώστε να δώσει τον πρώτο απαιτούμενο βαθμό ελευθερίας στη σφαίρα ενώ ο άλλος τροχός 3 είναι ακίνητος και στην ουσία στηρίζει τη σφαίρα και της επιτρέπει να κυλιέται σε αυτόν. Αντίστοιχα, οι άλλες δύο περιοχές, συμμετρικές ως προς τον άξονα Y αποτελούνται από άλλους δύο omni-directional τροχούς 3, 12 με τον άξονα συμμετρίας τους τώρα παράλληλο στον άξονα Y ώστε να προκύψει ο δεύτερος απαιτούμενος βαθμός ελευθερίας της σφαίρας από τον δεύτερο επενεργητή. Σημειώνεται ότι οι τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν επιλεχθηκαν ως omni-directional ώστε να παραμένουν εντελώς ανεξάρτητοι οι βαθμοί ελευθερίας και κυρίως για να είναι ομαλή η κίνηση της σφαίρας και για τους δύο βαθμούς, δηλαδή, αυτή να μην εμποδίζεται από τους τροχούς με άξονες συμμετρίας παράλληλους στους άξονες Y, X όταν η περιστροφή γίνεται γύρω από τους άξονες X, Y αντίστοιχα.

Τέλος, ο αριθμός των απαιτούμενων εδράσεων για τον μηχανισμό αυτό είναι τέσσερα. Δύο με τον αριθμό 7 και 11 για τους άξονες των σερβοκινητήρων και των τροχών κίνησης 8, 10 που μεταδίδουν την ισχύ και τις 5 και 14 για τους άξονες 4 και 13 των τροχών στήριξης και κύλισης.

Τα παραπάνω αφορούν το ΙΣΗΕ το οποίο εδράζεται σε μία βάση. Ο συνολικός μηχανισμός αποτελείται κατά τα προαναφερθέντα από τη βάση-κύριο σώμα 1, το ακίνητο πόδι 2, το οποίο συνδέει το ΙΣΗΕ με τη βάση και αντίστροφα.



Σχήμα 2.13. Μηχανισμός προωστήρα τοποθετημένου σε κινούμενη σφαίρα

Σύνοψη-Αξιολόγηση

Ο μηχανισμός αυτός προτάθηκε κυρίως για την ελαχιστοποίηση κινούμενων τμημάτων-αξόνων και αντικατάσταση της ύπαρξης δύο μεγάλων κύριων αξόνων με ένα κύριο σώμα (στην ίδια φιλοσοφία με τη σφαιρική άρθρωση του μηχανισμού της Παρ. 2.2.5). Έτσι, από αυτήν την άποψη η πολυπλοκότητα και το βάρος έχουν ελαχιστοποιηθεί. Είναι ένας μηχανισμός ο οποίος προτάθηκε σε επίπεδο ιδέας πιο πολύ ώστε να διαφοροποιείται από την πλειοψηφία των παραπάνω που είναι πιο συμβατικοί. Για τον αριθμό των επενεργητών και στοιχείων μηχανών, μπορούμε να πούμε ότι είναι ένα απλό και ελαφρύ σύστημα δεδομένου ότι οι απαιτούμενοι ηλεκτρικοί επενεργητές για το κάθε ΙΣΗΕ είναι δύο δηλαδή οι ελάχιστοι δυνατοί και ότι πλέον δεν υπάρχουν κινούμενοι άξονες μεγάλου μήκος παρά μόνο τα τέσσερα αξονάκια 4, 8, 10 και 13 στα οποία βρίσκονται οι omni-directional τροχοί 3 και 12.

Σε ο,τι αφορά τον απαιτούμενο χώρο στον οποίο μπορεί να πλοηγείται η έλικα, αυτός δεν καλύπτεται πλήρως από τον παρόντα μηχανισμό. Όπως είναι αντιληπτό, υπάρχουν γεωμετρικοί περιορισμοί λόγω της κατασκευής οι οποίοι απαγορεύουν την πλήρη σάρωση του από την έλικα. Τέτοιοι περιορισμοί για παράδειγμα προκύπτουν από το ότι απαιτείται η αποφυγή σύγκρουσης της έλικας 15 και του ηλεκτροκινητήρα 16 με τους τροχούς 3 και 12, τα αξονάκια αυτών 4, 8, 10, 13 και τους επενεργητές 6, 9 που τους οδηγούν.

Ακόμη, η πρόσδεση του ηλεκτροκινητήρα και της έλικας στη σφαίρα 17 δημιουργούν αρκετές πολυπλοκότητες στην κατασκευή. Στην πολυπλοκότητα αυτή προστίθενται και οι απαιτούμενες διαμορφώσεις ώστε να μεταφέρονται εύρυθμα τα καλώδια στη βάση των δύο επενεργητών αλλά κυρίως του ηλεκτροκινητήρα το οποίο είναι συσσωματωμένο με τη

σφαίρα. Σε ό,τι αφορά το κέντρο μάζας και την αδράνεια του μηχανισμού αυτού ισχύουν ακριβώς αυτά που αναφέρθηκαν για τους μηχανισμούς των Παρ. 2.2.1 και 2.2.5.

Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι για την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του προσανατολισμού της σφαίρας και της έλικας, χρειάζεται πολύ προσεκτική μοντελοποίηση και γνώση παραμέτρων όπως της τριβής μεταξύ σφαίρας και τροχών και των δυναμικών χαρακτηριστικών συστήματος σφαίρας και ηλεκτροκινητήρα-έλικας. Αυτό, όπως γίνεται αντιληπτό εισάγει αρκετές αβεβαιότητες τόσο ως προς τις τελικές απαιτήσεις που θα κληθούν να καλύψουν οι επενεργητές όσο και ως προς το τελικό αποτέλεσμα πλοήγησης του προωστήρα.

Τέλος, πολύ σημαντική και καθοριστική είναι η μη ευρωστία του συστήματος αυτού. Η στήριξη της σφαίρας γίνεται αποκλειστικά μέσω των ακίνητων τροχών και έτσι σε απότομες επιταχύνσεις ή σε προσανατολισμούς του οχήματος μακριά από την οριζόντια θέση, το ΙΣΗΕ είναι στην ουσία στον αέρα. Το γεγονός αυτό απαιτεί πιο λεπτομερή και πιο προσεκτική σχεδίαση αποκλειστικά και μόνο για τη στήριξη και την καθολική λειτουργικότητα του συστήματος όπως για παράδειγμα την τοποθέτηση ενός συστήματος τεσσάρων τροχών μέσα σε κάποιο στέγαστρο για παράδειγμα (δεν απεικονίζονται στο Σχ. 2.13) όμοιων με τους προαναφερθέντες αλλά τοποθετημένους τώρα ακριβώς πάνω από τη σφαίρα κάτι όμως που καθιστά τελικά τον μηχανισμό εξαιρετικά πολύπλοκο αλλά και δύσκολο ως προς την κατασκευή του.

2.3 Τελικός πίνακας σύγκρισης και επιλογή μηχανισμού

Υπενθυμίζεται ότι τα κριτήρια αξιολόγησης είναι οχτώ (εύρος κίνησης, θέση του κέντρου μάζας, βάρος, αδράνεια, απλότητα, ευκολία κατασκευής, ευρωστία, κόστος).

Η σύγκριση έχει οργανωθεί ως εξής. Κάθε ένας από τους εξετασθέντες μηχανισμούς βαθμολογείται ως προς κάθε κριτήριο σε μία κλίμακα 0-5 με ακέραια διακριτότητα. Έτσι για παράδειγμα 5/5 εύρος κίνησης σημαίνει ότι ο προωστήρας καλύπτει πλήρως το μοναδιαίο τρισδιάστατο χώρο ενώ αδράνεια 5/5 σημαίνει ότι ο μηχανισμός είναι βέλτιστος από την άποψη αδράνειας. Δηλαδή, όσο πιο υψηλός ο βαθμός, τόσο πιο ικανοποιητική η συμπεριφορά του μηχανισμού ως προς εκείνο το κριτήριο. Η τελική βαθμολογία του κάθε μηχανισμού προκύπτει από μια απλή άθροιση όλων των κριτηρίων, δηλαδή θεωρούνται ισότιμα όλα τα κριτήρια και δεν έχουν δοθεί βάρη.

Στον τελικό πίνακα σύγκρισης (βλ. Πίν. 2-1) ανά γραμμές παρουσιάζονται οι μηχανισμοί και ανά στήλες τα κριτήρια αξιολόγησης. Η τελευταία στήλη περιλαμβάνει την τελική βαθμολογία κάθε μηχανισμού με μέγιστο το 40 (δεδομένου ότι έχουμε οχτώ κριτήρια και κλίμακα βαθμολογίας 0-5).

Τελικά, φαίνεται ότι οι μηχανισμοί των Παρ. 2.2.1 και 2.2.6 είναι οι λιγότεροι ικανοποιητικοί κυρίως λόγω της κακής τοποθέτησης του κέντρου μάζας, της υψηλής αδράνειας, της πολυπλοκότητας, της δυσκολίας κατασκευής και της ευρωστίας. Συγκεκριμένα για το μηχανισμό της Παρ. 2.2.1 το βάρος και το κόστος παίζουν έναν επιπλέον ρόλο. Σημειώνεται επίσης ότι ο μηχανισμός της Παρ. 2.2.6 δεν μπορεί να είναι καν υλοποιήσιμος και λειτουργικός σε αυτήν του τη μορφή λόγω του ότι το κύριο σώμα του οχήματος θα βρίσκεται σε διάφορους προσανατολισμούς συγκριτικά με το οριζόντιο επίπεδο

και έτσι όλο αυτό το σύστημα με τους τροχούς θα βρίσκεται στην ουσία στον αέρα. Όπως προαναφέρθηκε όμως, παρατέθηκε κυρίως ως ιδέα και για πληρότητα αφού αποκλίνει από τις συμβατικές και συνήθεις λύσεις.

Πίνακας 2-1. Τελικός πίνακας σύγκρισης μηχανισμών.

Μηχανισμός (Παρ.)	Εύρος κίνησης	Θέση κέντρου μάζας	Βάρος	Αδράνεια	Απλότητα	Ευκολία κατασκευής	Ευρωστία	Κόστος	Σύνολο
(2.2.1)	5/5	0/5	0/5	0/5	1/5	0/5	3/5	1/5	10/40
(2.2.2)	5/5	1/5	3/5	2/5	3/5	2/5	4/5	4/5	24/40
(2.2.3)	5/5	4/5	1/5	3/5	2/5	1/5	3/5	3/5	22/40
(2.2.4) παραλλαγή 1	5/5	4/5	5/5	4/5	5/5	4/5	5/5	5/5	37/40
(2.2.4) παραλλαγή 2	5/5	5/5	4/5	3/5	5/5	5/5	5/5	5/5	37/40
(2.2.5)	2/5	0/5	5/5	2/5	0/5	0/5	2/5	3/5	14/40
(2.2.6)	1/5	0/5	4/5	2/5	1/5	0/5	0/5	2/5	10/40

Ο μηχανισμός της Παρ. 2.2.5 φαίνεται να είναι ο αμέσως χειρότερος κυρίως λόγω της προβληματικής θέσης του κέντρου μάζας, της μη απλότητας του καθώς και της δυσκολίας κατασκευής του, με τα τελευταία δύο συμπεράσματα να πηγάζουν από τον μεγάλο αριθμό μικροτροχαλιών και νημάτων.

Οι μηχανισμοί των Παρ. 2.2.2 και 2.2.3 είναι σχεδόν ισοδύναμοι και ικανοποιούν τα κριτήρια σε έναν μέτριο βαθμό. Και οι δύο παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά με κύριο πρόβλημα και των δυο τη δυσκολία κατασκευής. Επίσης, από τη μία το σύστημα της Παρ. 2.2.2 έχει μικρό βάρος αλλά κακή τοποθέτηση κέντρου μάζας, ενώ από την άλλη το σύστημα της Παρ. 2.2.3 είναι λειτουργικό ως προς το κέντρο μάζας, προβληματικό όμως ως προς το βάρος, λόγω των επιπρόσθετων εσωτερικών αξόνων και κωνικών τροχών.

Οι δύο ιδανικότεροι μηχανισμοί που προκύπτουν είναι οι παραλλαγές 1 και 2 της Παρ. 2.2.4. Η παραλλαγή 1 δεν ικανοποιεί στον απόλυτο βαθμό κάποια κριτήρια (θέση κέντρου μάζας και ευκολία κατασκευής) κυρίως λόγω αυτής της διπλής αλλαγής γεωμετρίας που απαιτείται και στην οποία έγινε μνεία και παραπάνω. Αν το πόδι ως ένας άξονας καμφθεί σε δύο σημεία για τις δύο αλλαγές γεωμετρίας ίσως να έχουμε μια πολύ απλή κατασκευή αλλά έτσι υπάρχουν σοβαρές αβεβαιότητες για το τελικό αποτέλεσμα της θέσης του κέντρου μάζας. Από την άλλη, αν προσομοιωθεί ο φορέας αυτός με τέσσερις διακριτούς άξονες και φλάντζες σύνδεσης μεταξύ τους, το αποτέλεσμα είναι πιο σίγουρο ως προς το κέντρο μάζας, αυξάνεται σημαντικά όμως η πολυπλοκότητα του μηχανισμού και η δυσκολία κατασκευής. Η παραλλαγή 2 υστερεί ως προς το απόλυτο σύστημα βαθμολογίας αλλά και ως προς την παραλλαγή 1 μόνο κατά την αδράνεια και την μάζα και αυτό λόγω του ότι η ρύθμιση του κέντρου μάζας γίνεται με αντίβαρο και έτσι έχουμε κάποια επιπρόσθετη μάζα έστω και μικρή μακριά από τη βάση-κύριο σώμα.

Οι παραλλαγές 1 και 2 είναι ισοδύναμες σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια. Η τελική επιλογή όμως βασίστηκε σε δύο ακόμη παραμέτρους που έχουν αναφερθεί στην Παρ. 2.2.4. Στην παραλλαγή 2 η αμφιέριστη στήριξη που έχει ο περιστρεφόμενος άξονας της δεύτερης

ανεξάρτητης περιστροφής καθώς και το γεγονός ότι η γεωμετρία της στεφάνης επιτρέπει μια πιο ομοιογενή και ομοιόμορφη κατανομή τάσεων σε αυτήν, μας εξασφαλίζουν έναν πιο στιβαρό μηχανισμό και λειτουργικό από στατικής και μηχανικής πλευράς. Επιπρόσθετα, όπως θα φανεί και παρακάτω η σωστή τοποθέτηση του κέντρου μάζας είναι μεγάλης σημασίας για την ομαλή συμπεριφορά του οχήματος. Έτσι, η ευελιξία που παρέχει η παραλλαγή 2 για την ακριβή ρύθμιση του κέντρου μάζας με τη χρήση του κατάλληλου αντιβάρου είναι η δεύτερη παράμετρος η οποία εκτός των άλλων συνέβαλε στην επιλογή της παραλλαγής 2 του μηχανισμού της Παρ. 2.2.4 (βλ. Σχήμα 2.5) ως την τελική η οποία θα μελετηθεί, θα βελτιστοποιηθεί, και θα σχεδιασθεί.

Τέλος, για την πληρότητα σημειώνεται ότι στα παραπάνω έγινε η υπόθεση ότι οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες (rc servo motors) είχαν τη δυνατότητα πλήρους και συνεχόμενης περιστροφής σαν τους συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Συγκεκριμένα ένα μηχανικό στοπ και το ποτενσιόμετρο το οποίο ελέγχει τη γωνιακή θέση του επενεργητή αυτού το περιορίζουν σε περιστροφές σε ένα συγκεκριμένο εύρος γωνιών. Επειδή η εφαρμογή αυτή όμως απαιτεί πλήρεις και συνεχόμενες περιστροφές σκοπεύεται να αφαιρεθούν εσωτερικά τα τμήματα αυτά και πλέον η ανατροφοδότηση θα γίνεται εξωτερικά από παλμογεννήτριες (encoders). Έτσι, θα έχουμε τη δυνατότητα πλήρων περιστροφών ενώ οι υπεύθυνοι επενεργητές για την κατεύθυνση της έλικας θα είναι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες οι οποίοι είναι οι ελαφρύτεροι δυνατοί.

3 Βελτιστοποίηση ιπτάμενου ρομπότ ως προς τις βασικές γεωμετρικές παραμέτρους

Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου ρομπότ ως προς τα θεμελιώδη γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

Στην Παρ. 3.1 μελετάται πως επηρεάζει η απόσταση των ΙΣΗΕ από την ουδέτερη θέση. Σκοπός είναι να διερευνηθεί για ποιο πεδίο τιμών αυτού του μεγέθους η συμπεριφορά του οχήματος είναι η βέλτιστη δυνατή. Το κριτήριο το οποίο θα αποφανθεί για αυτό προσομοιώνει τα πλοία, τα οποία είναι εσωτερικά ευσταθή και ισορροπούν για κάθε δυνατή διαταραχή λόγω του ζεύγους των δυνάμεων άνωσης και βάρους.

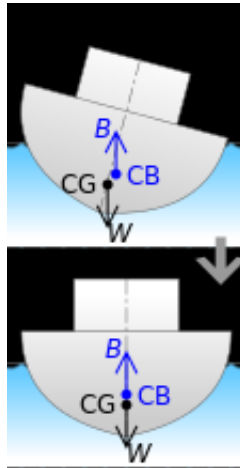
Στην επόμενη παράγραφο ένα πιο μαθηματικοποιημένο κριτήριο και καθαρά κινηματικό, θα αποφανθεί για το ποια είναι η βέλτιστη σχέση που πρέπει να τηρούν το μήκος των ποδιών, η κλίση αυτών ως προς το οριζόντιο επίπεδο και η θέση εφαρμογής της δύναμης ώσης συγκριτικά με την άκρη του ποδιού.

3.1 Θέση τοποθέτησης του κέντρου μάζας στο ΙΣΗΕ

Στο Κεφ. 2 αναφέρθηκε πολλές φορές η ιδέα της σωστής τοποθέτησης του κέντρου μάζας του ΙΣΗΕ και μάλιστα της τοποθέτησής του στο ουδέτερο επίπεδο που ορίζει η βάση. Αυτή η υπόθεση έγινε στα πολύ αρχικά στάδια του σχεδιασμού όπου εξετάζονταν διάφοροι πιθανοί κατάλληλοι μηχανισμοί του οχήματος και βασίστηκε σε έναν συνδυασμό διαίσθησης, εμπειρίας, γνώσης Δυναμικής καθώς και σε ήδη σχεδιασμένα συμβατικά ιπτάμενα ρομπότ. Δεδομένου όμως ότι το συγκεκριμένο όχημα δεν είναι σαν τα συμβατικά μη ολόνομα οχήματα τα οποία έχουν στην άκρη του ποδιού τους σε μία σταθερή θέση τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικα και άρα το κέντρο μάζας του συστήματος αυτού, γεννάται το ερώτημα ποια είναι η κατάλληλη απόσταση από το επίπεδο του ποδιού στην οποία πρέπει να τοποθετηθεί το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ.

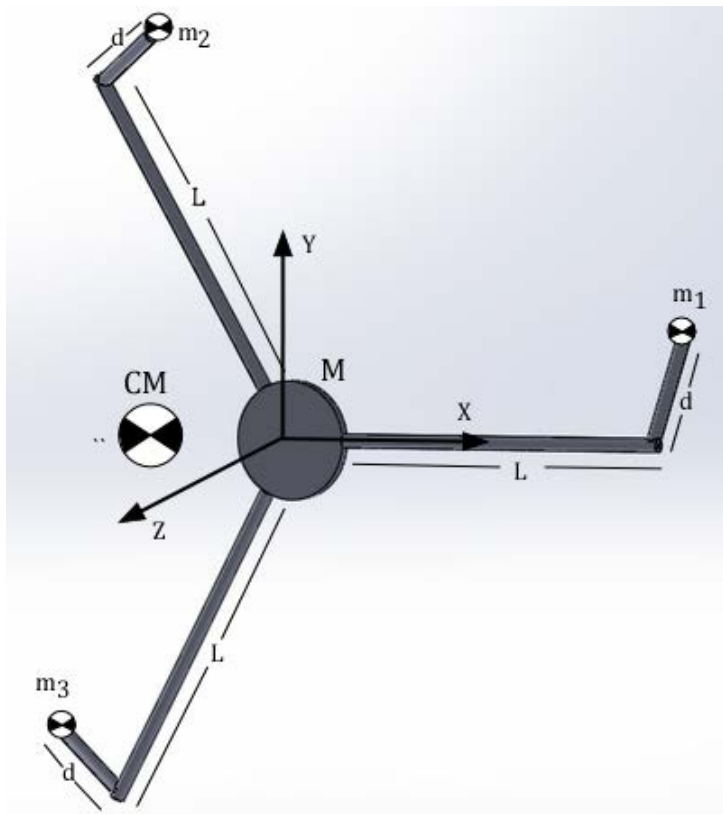
Έτσι ακολουθεί μια βασική ανάλυση που σκοπό έχει να εξετάσει την υπόθεση που ακολουθήθηκε πιστά καθ' όλο το Κεφ. 2. Επηρεασμένοι από το ζεύγος ευστάθειας βάρους και άνωσης στα πλοία (βλ. Σχ. 3.1), το οποίο ακυρώνει οποιαδήποτε διαταραχή-εκτροπή τους από την ουδέτερη θέση και εξασφαλίζει την ευστάθειά τους, έγινε μια διερεύνηση για το αν θα μπορούσε να επιτευχθεί κάτι αντίστοιχο για το δικό μας όχημα.

Διερευνάται λοιπόν αν και πως επηρεάζει η απόσταση του κέντρου μάζας από το επίπεδο των ποδιών ώστε σε διάφορες διαταραχές-γωνίες εκτροπής του ρομπότ από την ουδέτερη θέση, να προκύπτουν διορθωτικές ροπές κατά την αντίθετη κατεύθυνση και έτσι να εξασφαλιστεί ευστάθεια στο όχημα οφειλόμενη καθαρά στη δυναμική του.



Σχήμα 3.1. Ροπή ευστάθειας στο πλοίο.

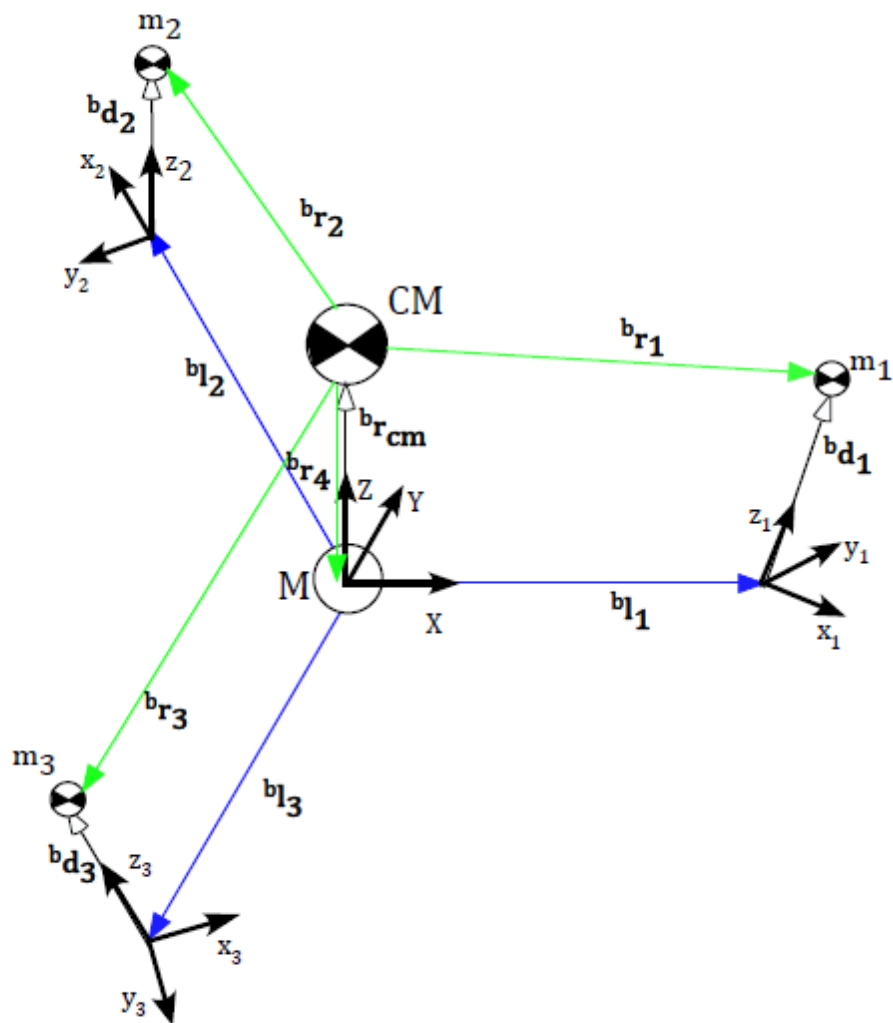
Το Σχ. 3.2 είναι αντιπροσωπευτικό όλων των προαναφερθέντων μηχανισμών και απεικονίζει ένα ρομπότ με μήκος ποδιών L , στην άκρη του οποίου υπάρχει το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ και απέχει απόσταση d από αυτό. Να σημειωθεί ότι αυτή η απόσταση d δεν είναι σταθερή στο χώρο αλλά ένα διάνυσμα μεταβλητό μέσα σε μια νοητή σφαίρα, όπως απαιτεί η φύση αυτού του ιπτάμενου οχήματος. Οι μάζες m_1 , m_2 , m_3 και M είναι οι μάζες των ΙΣΗΕ και της βάσης αντίστοιχα. Με CM συμβολίζεται το κέντρο μάζας όλου του οχήματος.



Σχήμα 3.2. Τρισδιάστατη απεικόνιση του οχήματος με τα κέντρα μάζας του.

Προκειμένου να μπορέσουμε να αναλύσουμε το σύστημα αυτό (βλ. Σχ. 3.2) το απεικονίζουμε ισοδύναμα και διανυσματικά στο Σχ. 3.3. Στην ουσία πλέον τα ακίνητα πόδια

αναπαρίστανται από τα διανύσματα ${}^b\mathbf{l}_i$. Αυτά είναι εκφρασμένα ως προς το σωματόδετο σύστημα (X, Y, Z) της βάσης-κύριου σώματος M και το συνδέουν με τα υπό-συστήματα (x_i, y_i, z_i) . Το κάθε ένα από αυτά τα υπο-συστήματα είναι σωματόδετο στα κέντρα μάζας των ΙΣΗΕ. Έτσι, αυτή η ιδιότητα το d να αλλάζει στον χώρο, ικανοποιείται από το ότι τα υπό-συστήματα (x_i, y_i, z_i) στρέφονται γύρω από τους άξονες X, Y με γωνίες θ_{i1} και θ_{i2} αντίστοιχα. Τα διανύσματα ${}^b\mathbf{d}_i$ είναι και αυτά εκφρασμένα ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης (X, Y, Z) και συνδέουν τα σωματόδετα (x_i, y_i, z_i) με τα κέντρα μάζας των ΙΣΗΕ m_i . Ακόμη, σημειώνεται ότι τα διανύσματα των μαζών m_i έχουν την κατεύθυνση των αξόνων z_i . Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{r}_{cm}$ είναι το διάνυσμα του κέντρου μάζας όλου του οχήματος CM και είναι εκφρασμένο ως προς το σωματόδετο σύστημα (X, Y, Z) . Μέσω αυτού έχουμε τα διανύσματα ${}^b\mathbf{r}_i$, $i=1, 2, 3$ και ${}^b\mathbf{r}_4$ τα οποία συνδέουν τα κέντρα μάζας των ΙΣΗΕ i και τη μάζα του κύριου σώματος-βάσης αντίστοιχα με το ολικό κέντρο μάζας CM . Σημειώνεται ότι ο συμβολισμός ${}^b(\cdot)$ για κάθε διάνυσμα, δείχνει ότι αυτό είναι εκφρασμένο ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης, κυρίου σώματος.



Σχήμα 3.3. Διανύσματα της θέσης μαζών για όχημα στην οριζόντια θέση.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα λοιπόν και το Σχ. 3.3:

Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{l}_1$ είναι:

$${}^b\mathbf{l}_1 = [L \quad 0 \quad 0]^T \quad (3-1)$$

Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{d}_1$ είναι:

$${}^b\mathbf{d}_1 = \mathbf{R}_X(\theta_{11})\mathbf{R}_Y(\theta_{12})[0 \quad 0 \quad d]^T \quad (3-2)$$

Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{l}_2$ είναι:

$${}^b\mathbf{l}_2 = [-L \cos 60^\circ \quad L \sin 60^\circ \quad 0]^T \quad (3-3)$$

Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{d}_2$ είναι:

$${}^b\mathbf{d}_2 = \mathbf{R}_X(\theta_{21})\mathbf{R}_Y(\theta_{22})[0 \quad 0 \quad d]^T \quad (3-4)$$

Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{l}_3$ είναι:

$${}^b\mathbf{l}_3 = [-L \cos 60^\circ \quad -L \sin 60^\circ \quad 0]^T \quad (3-5)$$

Το διάνυσμα ${}^b\mathbf{d}_3$ είναι:

$${}^b\mathbf{d}_3 = \mathbf{R}_X(\theta_{31})\mathbf{R}_Y(\theta_{32})[0 \quad 0 \quad d]^T \quad (3-6)$$

όπου τα μητρώα $\mathbf{R}_X(\theta_{i1})$ και $\mathbf{R}_Y(\theta_{i2})$ αντικατοπτρίζουν αυτή την περιστροφή κατά θ_{i1} και θ_{i2} των σωματόδετων υποσυστημάτων (x_i, y_i, z_i) γύρω από τους άξονες X, Y αντίστοιχα. Η σχέση ορισμού αυτών φαίνεται στο Παράρτημα Α, Παρ. Α.1.

Το διάνυσμα του κέντρου μάζας του οχήματος CM ως προς το αδρανειακό σύστημα (X, Y, Z) προκύπτει από τη σχέση:

$${}^b\mathbf{r}_{cm} = \frac{m_1({}^b\mathbf{l}_1 + {}^b\mathbf{d}_1) + m_2({}^b\mathbf{l}_2 + {}^b\mathbf{d}_2) + m_3({}^b\mathbf{l}_3 + {}^b\mathbf{d}_3)}{m_1 + m_2 + m_3 + M} \quad (3-7)$$

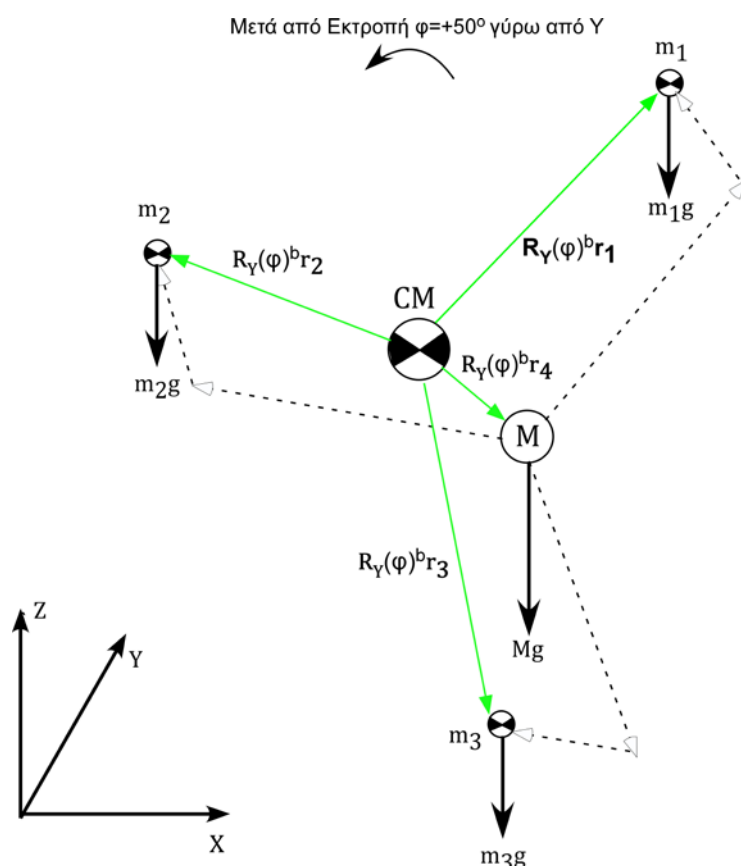
Συνεπώς πλέον τα διανύσματα που συνδέουν τα κέντρα μάζας των ΙΣΗΕ συστημάτων m_i με το κέντρο μάζας του οχήματος CM είναι:

$${}^b\mathbf{r}_i = ({}^b\mathbf{l}_i + {}^b\mathbf{d}_i) - {}^b\mathbf{r}_{cm} \quad (3-8)$$

όπου $i = 1, 2, 3$. Το διάνυσμα που συνδέει την μάζα του κύριου σώματος-βάσης M με το κέντρο μάζας CM είναι:

$${}^b\mathbf{r}_4 = -{}^b\mathbf{r}_{cm} \quad (3-9)$$

Έχοντας λοιπόν σε πλήρη εικόνα το ρομπότ με τη μορφή διανυσμάτων, προκειμένου να διαπιστώσουμε αν προκύπτουν διορθωτικές ροπές κατά τη διαταραχή-εκτροπή του και πως το επηρεάζει αυτό η παράμετρος d , ακολουθούμε τα εξής. Εκτρέπουμε το όχημα κατά μια γωνία φ γύρω από το αδρανειακό σύστημα (X, Y, Z) . Αυτό μεταφράζεται σε μία περιστροφή και άρα πολλαπλασιασμό των διανυσμάτων ${}^b\mathbf{r}_1, {}^b\mathbf{r}_2, {}^b\mathbf{r}_3, {}^b\mathbf{r}_4$ με τις κύριες μήτρες περιστροφής $\mathbf{R}_X(\cdot), \mathbf{R}_Y(\cdot)$ και $\mathbf{R}_Z(\cdot)$. Αυτά απεικονίζονται στο Σχ. 3.4 μαζί με τα βάρη των συγκεντρωμένων μαζών μετά από μια ενδεικτική εκτροπή $+50^\circ$ του οχήματος γύρω από τον άξονα Y .



Σχήμα 3.4. Διανύσματα και δυνάμεις για εκτροπή του οχήματος $+50^\circ$ γύρω από τον άξονα Y .

Άρα, οι ροπές που ασκούνται στο κέντρο μάζας του οχήματος CM , λόγω του βάρους των m_i και M , εκφρασμένες στο αδρανειακό-απόλυτο σύστημα είναι:

- κατά την εκτροπή του οχήματος κατά γωνία φ γύρω από τον αδρανειακό άξονα X :

$$\mathbf{M}_{\varphi X} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{R}_X(\varphi) {}^b\mathbf{r}_i \times [0 \ 0 \ -m_i g] + \mathbf{R}_X(\varphi) {}^b\mathbf{r}_4 \times [0 \ 0 \ -Mg] \quad (3-10)$$

- κατά την εκτροπή του οχήματος κατά γωνία φ γύρω από τον αδρανειακό άξονα Y :

$$\mathbf{M}_{\varphi Y} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{R}_Y(\varphi) {}^b\mathbf{r}_i \times [0 \ 0 \ -m_i g] + \mathbf{R}_Y(\varphi) {}^b\mathbf{r}_4 \times [0 \ 0 \ -Mg] \quad (3-11)$$

- κατά την εκτροπή του οχήματος κατά γωνία φ γύρω από τον αδρανειακό άξονα Z :

$$\mathbf{M}_{\varphi Z} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{R}_Z(\varphi)^b \mathbf{r}_i \times [0 \quad 0 \quad -m_i g] + \mathbf{R}_Z(\varphi)^b \mathbf{r}_4 \times [0 \quad 0 \quad -Mg] \quad (3-12)$$

Με χρήση του προγράμματος Mathematica για συμβολικούς υπολογισμούς και δεδομένου ότι τα τρία ΙΣΗΕ είναι πανομοιότυπα για την πλήρη συμμετρία του οχήματος και άρα $m_1 = m_2 = m_3 = m$ οι Εξ. (3-10), (3-11) και (3-12) παίρνουν την εξής αναλυτική μορφή:

$$\mathbf{M}_{\varphi X} = \begin{bmatrix} \frac{-Mdmg(A_X + B_X)}{(M+3m)} \\ \frac{2Mdmg(\sin\theta_{12} + \sin\theta_{22} + \sin\theta_{32})}{(M+3m)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

όπου:

$$A_X = \cos\theta_{12} \sin\theta_{11} + \cos\theta_{22} \sin\theta_{21} + \cos\varphi(\cos\theta_{22} \sin\theta_{21} + \cos\theta_{32} \sin\theta_{31} + \cos\theta_{12} \sin\theta_{11}) \quad (3-14)$$

$$B_X = \sin\varphi(\cos\theta_{21} \cos\theta_{22} + \cos\theta_{31} \cos\theta_{32} + \cos\theta_{11} \cos\theta_{12}) + \cos\theta_{32} \sin\theta_{31} \quad (3-15)$$

Επίσης:

$$\mathbf{M}_{\varphi Y} = \begin{bmatrix} \frac{2Mdmg(\cos\theta_{12} \sin\theta_{11} + \cos\theta_{22} \sin\theta_{21} + \cos\theta_{32} \sin\theta_{31})}{M+3m} \\ \frac{Mdmg(A_Y + B_Y)}{(M+3m)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

όπου:

$$A_Y = \sin\theta_{12} + \sin\theta_{22} + \sin\theta_{32} + \cos\varphi(\sin\theta_{12} + \sin\theta_{22} + \sin\theta_{32}) \quad (3-17)$$

$$B_Y = \sin\varphi(\cos\theta_{11} \cos\theta_{12} + \cos\theta_{21} \cos\theta_{22} + \cos\theta_{31} \cos\theta_{32}) \quad (3-18)$$

και τέλος:

$$\mathbf{M}_{\varphi Z} = \begin{bmatrix} \frac{-Mdmg(A_Z + B_Z)}{2(M+3m)} \\ \frac{-Mdmg((\cos\varphi+1)(\sin\theta_{12} + \sin\theta_{22} + \sin\theta_{32}) + \sin\varphi(\cos\theta_{12} \sin\theta_{11} + \cos\theta_{22} \sin\theta_{21} + \cos\theta_{32} \sin\theta_{31}))}{2(M+3m)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

όπου:

$$A_Z = \cos\varphi(\cos\theta_{12} \sin\theta_{11} + \cos\theta_{22} \sin\theta_{21} + \cos\theta_{32} \sin\theta_{31}) + \cos\theta_{12} \sin\theta_{11} \quad (3-20)$$

$$B_Z = -\sin\varphi(\sin\theta_{12} + \sin\theta_{22} + \sin\theta_{32}) + \cos\theta_{22} \sin\theta_{21} + \cos\theta_{32} \sin\theta_{31} \quad (3-21)$$

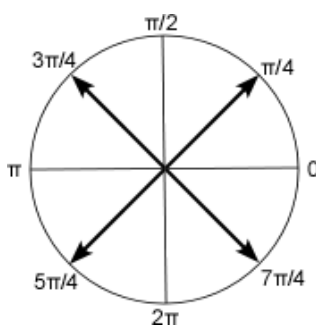
Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση στις προκύπτουσες σχέσεις των ροπών λόγω βάρους (3-13), (3-16) και (3-19) είναι ότι απλοποιείται κατά τις πράξεις το μήκος L των ποδιών. Αυτό

ήταν κάτι αναμενόμενο και λογικό διαισθητικά αφού το όχημα μας είναι πλήρως συμμετρικό και έτσι περιμένουμε οι ροπές από τις μάζες m_1, m_2, m_3 που οφείλονται καθαρά στις σταθερές αποστάσεις L των ποδιών να αλληλοεξουδετερώνονται. Έτσι, φαίνεται καθαρά ότι ο λόγος ύπαρξης των παραπάνω ροπών είναι η παράμετρος d . Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι το d είναι παράγοντας σε όλες αυτές τις εκφράσεις, κάτι το οποίο σημαίνει ότι τις επηρεάζει άμεσα και μάλιστα γραμμικά.

Αυτό που μας ενδιαφέρει εδώ είναι να δούμε τη συμπεριφορά των παραπάνω ροπών για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς γωνιών θ_{i1}, θ_{i2} καθώς και το πώς η παράμετρος d διαμορφώνει αυτές και άρα τη συμπεριφορά του συνολικού συστήματος. Στην ανάλυση αυτή, το μέτρο των ροπών δεν παίζει κάποιο ρόλο αφού αυτό που μας ενδιαφέρει είναι το πρόσημο των ροπών και μάλιστα να είναι ετερόσημο των γωνιών εκτροπής. Έτσι, αναφερόμενοι στο Σχ. 3.4 για παράδειγμα επιθυμούμε η συνολική ροπή που προκύπτει να έχει ωρολογιακή φορά.

Εδώ σημειώνονται οι εξής παραδοχές που έγιναν ώστε να είναι δυνατή η οπτικοποίηση των παραπάνω. Η μάζα του κυρίως σώματος λαμβάνεται τέσσερις φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ενός εκ των τριών ΙΣΗΕ ($M = 4m$) και οι σχέσεις (3-13), (3-16), (3-19) αδιαστατοποιούνται ως προς το γινόμενο dmg , το οποίο συμβάλλει μόνο ως προς το μέτρο των ροπών.

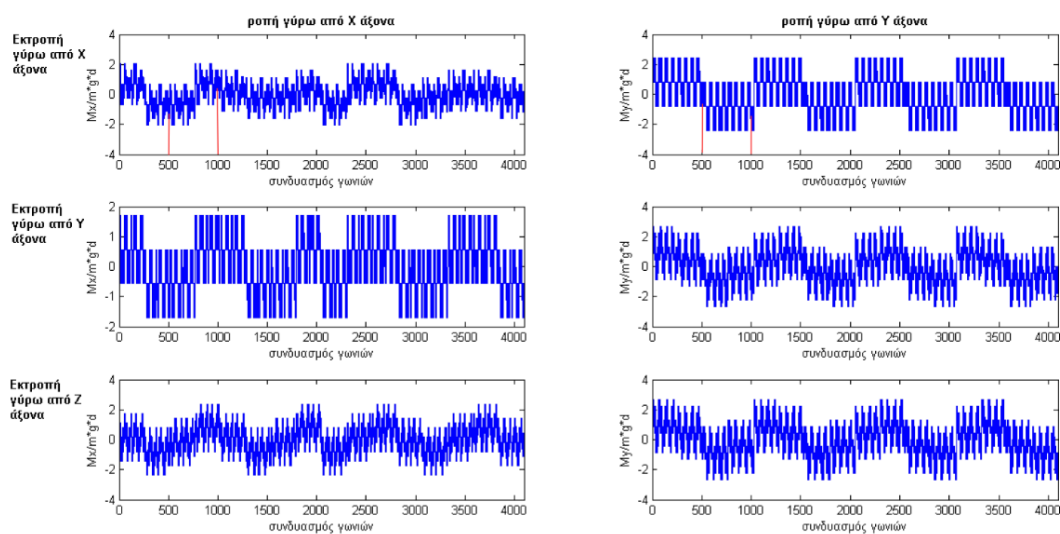
Για τη γωνία φ διακρίνονται δύο ενδεικτικές περιπτώσεις μία στην οποία η τιμή της είναι $+50^\circ$, δηλαδή οι εκτροπές είναι κατά τη θετική έννοια των αξόνων και μια δεύτερη στην οποία η τιμή της γωνίας εκτροπής είναι -50° , δηλαδή έχουμε εκτροπή κατά την αρνητική έννοια των αξόνων. Τέλος, για την κάθε γωνία $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32}$ χωρίζουμε τον τριγωνομετρικό κύκλο σε τέσσερα αντιπροσωπευτικά τεταρτημόρια και συγκεκριμένα στις γωνίες $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ (βλ. Σχ. 3.5). Έτσι, όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των γωνιών είναι $4^6 = 4096$ συνδυασμοί με τον πρώτο να αντιστοιχεί σε $(\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32})$ ίσο με $(\pi/4, \pi/4, \pi/4, \pi/4, \pi/4, \pi/4)$ το δεύτερο σε $(\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32})$ ίσο με $(\pi/4, 3\pi/4, \pi/4, \pi/4, \pi/4, \pi/4)$ κ.ο.κ.



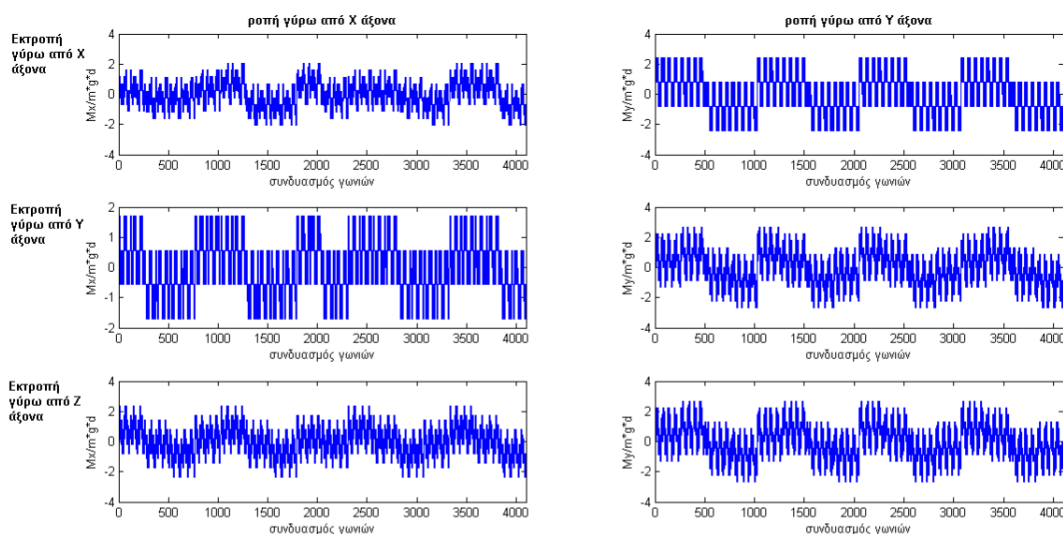
Σχήμα 3.5 Αντιπροσωπευτικές διακριτές τιμές των γωνιών θ_{i1}, θ_{i2} .

Έτσι, για όλες τις δυνατές καταστάσεις του ρομπότ και ισοδύναμα όλους τους 4096 συνδυασμούς προκύπτουν τα Σχ. 3.6 και 3.7. Σε αυτά, απεικονίζονται οι τιμές των ροπών για θετικές και αρνητικές εκτροπές του οχήματος αντίστοιχα. Η πρώτη στήλη διαγραμμάτων αφορά τις αδιαστατοποιημένες ροπές που προκύπτουν γύρω από τον άξονα X συναρτήσει του συνδυασμού γωνιών ενώ η δεύτερη στήλη αφορά τις ροπές γύρω από τον άξονα Y . Η

πρώτη γραμμή διαγραμμάτων αντιπροσωπεύει την εκτροπή του οχήματος γύρω από τον X άξονα, η δεύτερη γύρω από τον Y και η τρίτη γύρω από τον Z .



Σχήμα 3.6. Συμπεριφορά των αδιάστατων ροπών γύρω από άξονα X και Y για θετικές εκτροπές οχήματος.



Σχήμα 3.7. Συμπεριφορά των αδιάστατων ροπών γύρω από άξονα X και Y για αρνητικές εκτροπές οχήματος.

Αν μιλήσουμε για το Σχ. 3.6 και την εκτροπή γύρω από τον X άξονα, στο συνδυασμό 500 (βλ. κόκκινη γραμμή), η ροπή γύρω από τον άξονα X έχει αρνητικό πρόσημο όπως επιθυμούμε και άρα αντίθετη κατεύθυνση από τη θετική γωνία διαταραχής. Από την άλλη όμως παρατηρείται ότι εμφανίζεται μια ανεπιθύμητη ροπή αρνητικής κατεύθυνσης γύρω από τον άξονα Y . Επιπρόσθετα, στο συνδυασμό 1000 (βλ. κόκκινη γραμμή), η ροπή που μας ενδιαφέρει γύρω από το X άξονα είναι θετική και ομόροτη με τη γωνία εκτροπής

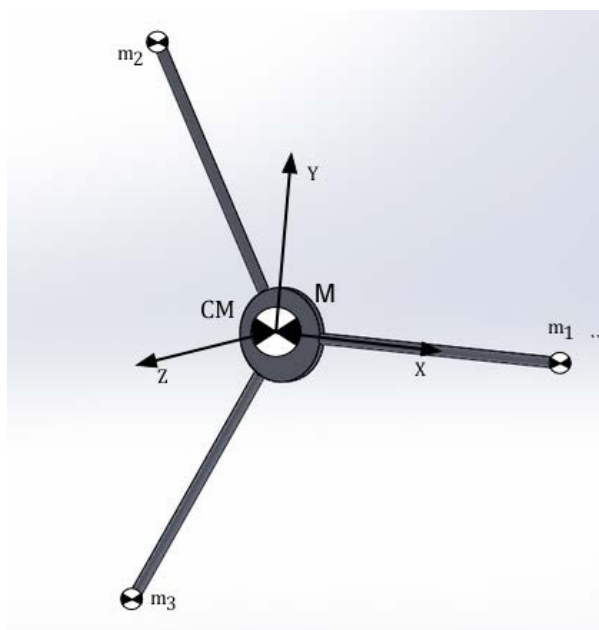
οδηγώντας το όχημα σε ακόμα δυσμενέστερη κατάσταση. Σε αυτό φυσικά προστίθεται και η προκύπτουσα ανεπιθύμητη ροπή αρνητικής φοράς γύρω από τον άξονα Y .

Γενικεύοντας για τα Σχ. 3.6 και 3.7, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για θετικές εκτροπές κατά κάποιον άξονα, ροπές αντίθετης φοράς εμφανίζονται μόνο σε συγκεκριμένους συνδυασμούς γωνιών. Επίσης, μετά από κάθε εκτροπή πάντα εμφανίζεται μια ανεπιθύμητη ροπή γύρω από έναν άλλο άξονα. Έτσι, ακόμη και σε εκείνο το συνδυασμό που εμφανίζεται ροπή αντίρροπη της γωνίας εκτροπής, δημιουργείται μια άλλη ανεπιθύμητη ροπή γύρω από έναν άλλο άξονα. Σε αυτά προστίθεται το γεγονός ότι κάποια διαταραχή λόγω της εκτροπής του οχήματος γύρω από τον άξονα Z δεν μπορεί να εξαιρεθεί σε καμία περίπτωση αφού τα διανύσματα των ροπών στον άξονα Z λόγω του κατακόρυφου βάρους είναι εν γένει μηδενικά.

Υπενθυμίζεται ότι εμείς επιθυμούμε να μιμηθούμε τη συμπεριφορά του πλοίου και μέσω της σωστής τοποθέτησης των κέντρων μάζας να εξασφαλίσουμε ευστάθεια του οχήματος οφειλόμενη στη δυναμική του. Αυτό όμως όπως φάνηκε δεν μπορεί να συμβεί και μάλιστα η παρουσία της παραμέτρου d κάνει απότομο και ανώμαλο το σύστημα, ειδικά σε συγκεκριμένους συνδυασμούς γωνιών.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως επειδή έχουμε να κάνουμε με ένα όχημα πολλών βαθμών ελευθερίας το οποίο μπορεί να πάρει οιοσδήποτε προσανατολισμούς στο χώρο, σε αντίθεση με το πλοίο που έχει έναν συγκεκριμένο προσανατολισμό. Έτσι, δεν μπορεί να υπάρχει ένας εσωτερικός σχεδιασμός ο οποίος να προβλέπει και να εξαλείφει καθολικά όλες τις εκτροπές-διαταραχές.

Συμπερασματικά λοιπόν, προκειμένου να επιτύχουμε συνολικά (καθ'όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς) μια ομαλή συμπεριφορά του οχήματος απαιτείται να μηδενίσουμε την απόσταση d και άρα τις προκύπτουσες ροπές (βλ. εξ. (3-13), (3-16) και (3-19) όπου το d εμφανίζεται ως παράγοντας παντού) και άρα ο σχεδιασμός του οχήματος να γίνει αυστηρά ώστε τα κέντρα μάζας των ΙΣΗΕ να βρίσκονται στο επίπεδο των ποδιών (βλ. Σχ. 3.8).



Σχήμα 3.8. Τελική τρισδιάστατη απεικόνιση οχήματος με τα κέντρα μάζας του.

3.2 Προσδιορισμός θεμελιωδών γεωμετρικών μεγεθών του οχήματος και θέση εφαρμογής της δύναμης ώσης

Τα συμβατικά ιπτάμενα οχήματα μη ολόνομου χαρακτήρα έχουν ως χαρακτηριστικό ένα πολύ απλό ΙΣΗΕ (βλ. Σχ. 1.3). Συγκεκριμένα, αυτό αποτελείται από τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικα και άρα το κέντρο μάζας αυτών ταυτίζεται με το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης. Στο δικό μας όχημα λόγω της φύσης του μηχανισμού θα εξετασθεί λεπτομερώς που ακριβώς πρέπει να βρίσκεται η δύναμη ώσης σχετικά με το κύριο σώμα-βάση και αν τελικά πρέπει να συμπίπτει με το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ και να βρίσκεται στο ουδέτερο επίπεδο (βλ. Σχ. 3.8). Ακόμη, θα διερευνηθεί η δομή του οχήματος γενικότερα ως προς τα κύρια γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

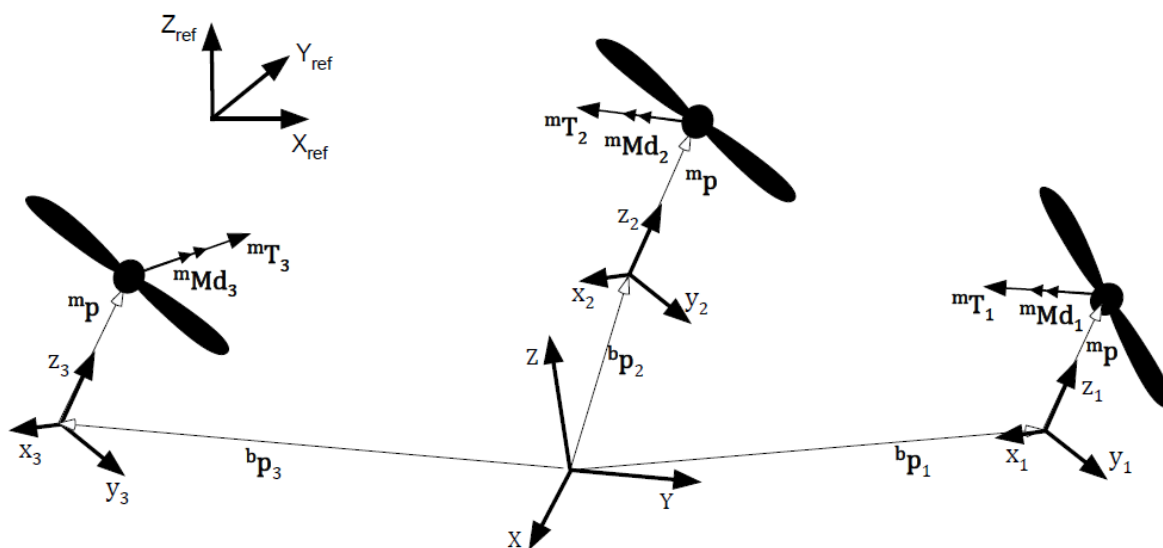
Η ανάλυση που ακολουθεί στηρίζεται στα αποτελέσματα της Παρ. 3.1, τα οποία μας επιτρέπουν πλέον να αμελήσουμε τις μάζες των ΙΣΗΕ αφού όπως αποδείχθηκε οι ροπές που προκύπτουν λόγω των βαρών τους αποκλειστικά, αλληλοεξουδετερώνονται και έχουν μηδενική συνεισφορά στην τελική συμπεριφορά του οχήματος. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή μπορεί να είναι και πλήρως ανεξάρτητη των αποτελεσμάτων της Παρ. 3.1, αφού πλέον τον κύριο ρόλο παίζουν οι δυνάμεις ώσης στο κάθε ΙΣΗΕ οι οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερες των μικρών βαρυτικών δυνάμεων αυτών και άρα οι τελευταίες μπορούν να αμεληθούν.

3.2.1 Κατάστρωση εξισώσεων

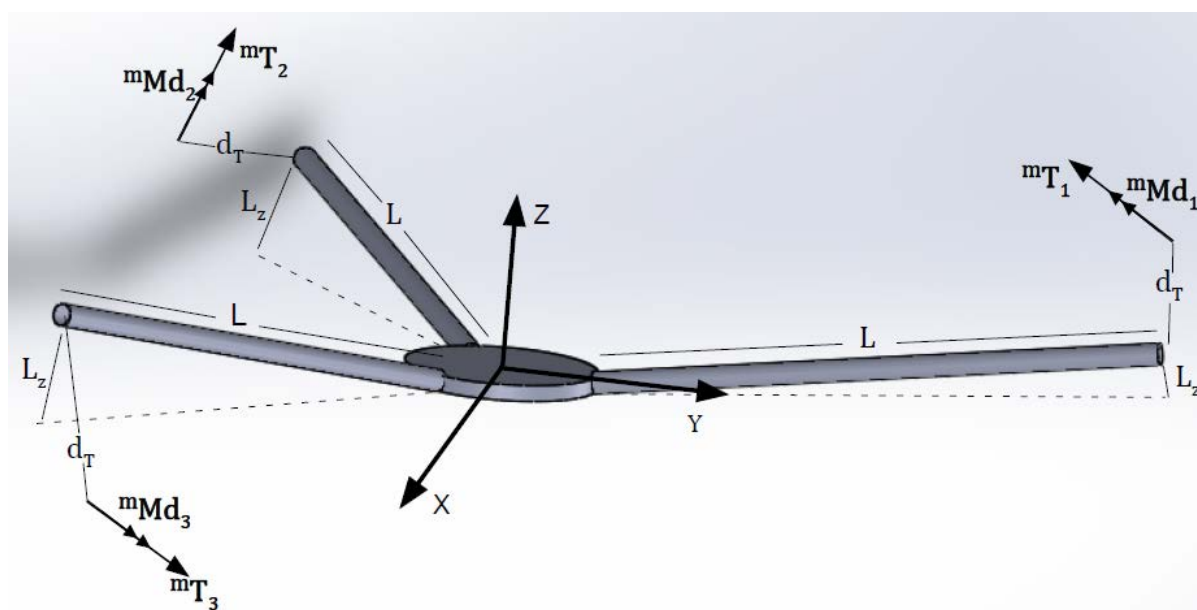
Στο Σχ. 3.9 απεικονίζεται διανυσματικά το όχημα. Συγκεκριμένα, το σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) είναι το σωματόδετο σύστημα στη βάση-κύριο σώμα. Το σύστημα συντεταγμένων (x_i, y_i, z_i) είναι το σωματόδετο σύστημα i στο i ΙΣΗΕ. Το κάθε σύστημα από αυτά στρέφεται γύρω από τον άξονα X, Y μέσω των γωνιών θ_{i1} (roll) και θ_{i2} (pitch) αντίστοιχα. Έτσι, μέσω αυτών των γωνιών στροφής έχει αποδοθεί πλήρως η δυνατότητα πλοήγησης της έλικας στον τρισδιάστατο χώρο. Με ${}^m\mathbf{T}_i$ και ${}^m\mathbf{M}d_i$ συμβολίζονται το διάνυσμα ώσης και ροπής αντίστασης αντίστοιχα για το i ΙΣΗΕ, τα διανύσματα δηλαδή που προκύπτουν από τη συναλλαγή ενέργειας της έλικας με τον αέρα και ασκούνται σε αυτήν. Αυτά είναι εκφρασμένα στα σωματόδετα συστήματα (x_i, y_i, z_i) . Το σωματόδετο σύστημα της βάσης-κύριου σώματος (X, Y, Z) συνδέεται με τα συστήματα συντεταγμένων (x_i, y_i, z_i) μέσω των διανυσμάτων ${}^b\mathbf{p}_i$, τα οποία είναι εκφρασμένα ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης. Τέλος, το διάνυσμα ${}^m\mathbf{p}$ συνδέει το κάθε σωματόδετο σύστημα (x_i, y_i, z_i) με το σημείο εφαρμογής της ώσης από την έλικα. Σημειώνεται ότι λήφθηκε συγγραμικό με τον άξονα z_i . Για όλα τα παραπάνω ισχύει $i = 1, 2, 3$.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10, τα γεωμετρικά μεγέθη τα οποία υπάρχουν στα διανύσματα ${}^b\mathbf{p}_i$, ${}^m\mathbf{p}$ και κατ' επέκταση στο Σχ. 3.9 είναι τα εξής. Το πρώτο είναι το μήκος του ποδιού που συνδέει το κύριο σώμα-βάση με τα ΙΣΗΕ, το οποίο συμβολίζεται με L ακολουθώντας το συμβολισμό της Παρ. 3.1. Το δεύτερο είναι το μέγεθος L_z και συμβολίζει την κάθετη απόσταση της άκρης του ποδιού από το οριζόντιο επίπεδο ή ισοδύναμα από το επίπεδο που ορίζει το κύριο σώμα-βάση. Είναι ένα μέγεθος το οποίο σε μερικά ιπτάμενα συμβατικά οχήματα ισούται με μηδέν. Ωστόσο, λόγω της φύσης της εφαρμογής μας και λόγω του ότι υπάρχουν και πολλά εμπορικά οχήματα με μη μηδενικό L_z όπως για παράδειγμα το Inspire

1 της εταιρείας DJI [10] (βλ. Σχ. 3.11), υπεισέρχεται και αυτό το γεωμετρικό χαρακτηριστικό ως μεταβλητή στη διερεύνηση μας. Τέλος, το μέγεθος το οποίο έχει άμεση σχέση με την τοποθέτηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης ώσης είναι το d_T και δείχνει την καθ' ύψος απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης ώσης με την άκρη του ποδιού ή ισοδύναμα με το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων στο κάθε i ΙΣΗΕ.



Σχήμα 3.9. Διανυσματική απεικόνιση οχήματος για τον προσδιορισμό των θεμελιωδών γεωμετρικών του μεγεθών.



Σχήμα 3.10. Απεικόνιση των γεωμετρικών μεγεθών προς διερεύνηση.



Σχήμα 3.11. Το Inspire 1 της εταιρείας DJI [10].

Σύμφωνα λοιπόν με τα προαναφερθέντα και το Σχ. (3.9) ισχύουν τα εξής. Τα διανύσματα που συνδέουν το σωματόδετο σύστημα της βάσης (X, Y, Z) με τα σωματόδετα συστήματα των ΙΣΗΕ είναι τα εξής.

Για το πόδι 1 και το ΙΣΗΕ 1:

$${}^b \mathbf{p}_1 = [0 \quad L \quad L_z]^T \quad (3-22)$$

Για το πόδι 2 και το ΙΣΗΕ 2:

$${}^b \mathbf{p}_2 = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}L \quad -\frac{L}{2} \quad L_z \right]^T \quad (3-23)$$

Για το πόδι 3 και το ΙΣΗΕ 3:

$${}^b \mathbf{p}_3 = \left[\frac{\sqrt{3}}{2}L \quad -\frac{L}{2} \quad L_z \right]^T \quad (3-24)$$

Το διάνυσμα που συνδέει το σωματόδετο σύστημα του i ΙΣΗΕ ($i = 1, 2, 3$) με τη δύναμη ώσης, είναι:

$${}^m \mathbf{p} = [0 \quad 0 \quad d_T]^T \quad (3-25)$$

Σημειώνεται ότι ο συμβολισμός ${}^b(\cdot)$ για κάθε διάνυσμα, δείχνει ότι αυτό είναι εκφρασμένο ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης- κυρίου σώματος, ενώ ο συμβολισμός ${}^m(\cdot)$ δείχνει ότι το κάθε διάνυσμα είναι εκφρασμένο ως προς το κάθε σωματόδετο σύστημα του ΙΣΗΕ.

Όπως προαναφέρθηκε, τα σωματόδετα συστήματα στρέφονται γύρω από το σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) μέσω των γωνιών θ_{i1} και θ_{i2} . Αν οι κύριες μήτρες περιστροφής

για το i σωματόδετο σύστημα είναι $\mathbf{R}_X(\theta_{i1})$, $\mathbf{R}_Y(\theta_{i2})$, τότε η μήτρα η οποία συνδέει το i σωματόδετο σύστημα με το σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) είναι:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_X(\theta_{i1})\mathbf{R}_Y(\theta_{i2}) \quad \text{όπου } i = 1, 2, 3 \quad (3-26)$$

Έτσι πλέον το διάνυσμα δύναμης εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης αποκλειστικά λόγω των δυνάμεων ώσης ${}^m\mathbf{T}_i$ είναι:

$$\mathbf{J} = \left[(\mathbf{R}_1 {}^m\mathbf{T}_1)^T \quad (\mathbf{R}_2 {}^m\mathbf{T}_2)^T \quad (\mathbf{R}_3 {}^m\mathbf{T}_3)^T \right]^T \quad (3-27)$$

Συμβολίζουμε με F_X , F_Y , F_Z τις δυνάμεις και με M_X , M_Y , M_Z τις ροπές που ασκούνται στο κέντρο μάζας του οχήματος-βάση οι οποίες στην ουσία προκύπτουν λόγω της εφαρμογής των δυνάμεων ώσης ${}^m\mathbf{T}_i$ και κατ'επέκταση των ροπών αντίστασης ${}^m\mathbf{M}\mathbf{d}_i$ στις άκρες του, τότε το διάνυσμα ροπών και δυνάμεων που ασκείται στο κέντρο μάζας του οχήματος είναι:

$$\mathbf{F} = [F_X \quad F_Y \quad F_Z \quad M_X \quad M_Y \quad M_Z]^T \quad (3-28)$$

Η σχέση που συνδέει το διάνυσμα \mathbf{J} με το διάνυσμα \mathbf{F} της βάσης είναι:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}\mathbf{J} \quad (3-29)$$

Το μητρώο \mathbf{B} έχει διάσταση 6x9 και λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα προαναφερθέντα έχει την ακόλουθη μητρική μορφή:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ b\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{S}(\mathbf{R}_1 {}^m\mathbf{p} + {}^b\mathbf{p}_1) & b\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{S}(\mathbf{R}_2 {}^m\mathbf{p} + {}^b\mathbf{p}_2) & b\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{S}(\mathbf{R}_3 {}^m\mathbf{p} + {}^b\mathbf{p}_3) \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

όπου $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ είναι ο μοναδιαίος πίνακας διάστασης τρία, b η σταθερά μετατροπής της δύναμης ώσης ${}^m\mathbf{T}_i$ σε ροπή αντίστασης ${}^m\mathbf{M}\mathbf{d}_i$ (βλ. [11]) που παράγεται στην έλικα και τέλος $\mathbf{S}(\cdot)$ είναι ο αντισυμμετρικός πίνακας των διανυσμάτων $\mathbf{R}_i {}^m\mathbf{p} + {}^b\mathbf{p}_i$ ο οποίος στην ουσία μετασχηματίζει το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων $\mathbf{R}_i {}^m\mathbf{p} + {}^b\mathbf{p}_i$ με το διάνυσμα της δύναμης ώσης ${}^m\mathbf{T}_i$ που ασκείται στην άκρη του οχήματος, σε μητρική μορφή (βλ. Παράρτημα Α, Παρ. Α.2.)

Το μητρώο \mathbf{B} παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι μεταφέρει το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων ώσης \mathbf{J} στο κέντρο μάζας του οχήματος και μάλιστα το αντιστοιχεί με το διάνυσμα \mathbf{F} το οποίο είναι το καθοριστικό για τη συμπεριφορά του οχήματος αφού αυτό τελικά θα κληθεί να καλύψει όλες τις δυναμικές απαιτήσεις σε έναν ελιγμό ή τροχιά. Επιπρόσθετα, αν εξαιρέσουμε τη σταθερά μετατροπής b και τις γωνίες roll και pitch για το κάθε i ΙΣΗΕ το μητρώο αυτό είναι κατάλληλο για να μελετηθεί επειδή είναι συνάρτηση των θεμελιώδων χαρακτηριστικών μεγεθών του οχήματος L , L_z , d_T (βλ. Εξ. (3-22), (3-23), (3-24), (3-25)).

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε μια ομαλή συμπεριφορά του οχήματος απαιτείται οι εξωτερικές δυνάμεις-δυνάμεις ώσης ${}^m\mathbf{T}_i$ να μεταφέρονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στη βάση. Αυτό, σύμφωνα και με το [12], μπορεί μαθηματικά να μεταφραστεί ως την απαίτηση ο δείκτης κατάστασης του μητρώου \mathbf{B} να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Ο δείκτης κατάστασης ενός μητρώου ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης δια την ελάχιστη ιδιάζουσα τιμή του:

$$\Delta\epsilon\acute{\iota}\kappa\tau\eta\varsigma_κατάστασης(\mathbf{B}) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

Ο δείκτης αυτός είναι αυστηρά μεγαλύτερος της μονάδας με την εκφυλισμένη περίπτωση της τιμής 1 όταν ο πίνακας \mathbf{B} είναι ο μοναδιαίος.

Στη δικιά μας περίπτωση, ένας χαμηλός δείκτης κατάστασης έχει πολλές ερμηνείες. Πρώτον, έτσι εξασφαλίζουμε ότι μια μεταβολή στο διάνυσμα \mathbf{J} θα επιφέρει σχετικά ομοιόμορφη μεταβολή στο διάνυσμα \mathbf{F} . Έτσι για παράδειγμα αν μεταβληθεί το διάνυσμα \mathbf{J} είτε μέσω του μλετρου του, είτε μέσω του προσανατολισμού του (βλ. Εξ. 3-27), αν έχουμε έναν υψηλό δείκτη κατάστασης του μητρώου \mathbf{B} τότε οι συνιστώσες του διανύσματος \mathbf{F} θα μεταβληθούν με μη ομογενή τρόπο.

Μια άλλη πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι ένας κακός δείκτης κατάστασης μπορεί να σημαίνει για μία πολύ μεγάλη μεταβολή στο μέτρο του διανύσματος \mathbf{J} μία πολύ μικρή μεταβολή στο διάνυσμα \mathbf{F} κάτι το οποίο επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του οχήματος από ενεργειακή άποψη για παράδειγμα.

Τέλος, σημειώνεται ότι ένας μικρός δείκτης κατάστασης σημαίνει ομοιόμορφη διανομή δυνάμεων ώσης στα τρία ΙΣΗΕ και έτσι έχουμε ισοκατανεμημένες απαιτήσεις από το κάθε σύστημα ώσης (ηλεκτροκινητήρας και έλικα) που βρίσκεται μακριά από το κύριο σώμα-βάση.

Προκειμένου να μελετηθεί το μητρώο \mathbf{B} ως προς το δείκτη κατάστασης του, πρέπει πρώτα να αδιαστατοποιηθεί. Λόγω του ότι το διάνυσμα \mathbf{F} περιέχει τόσο δυνάμεις όσο και ροπές (βλ. εξίσωση 3-28) πρέπει να διαιρεθούν οι ροπές με ένα ισοδύναμο μήκος d_v , το οποίο θα καλείται σταθερά αδιαστατοποίησης. Αυτή επιλέγεται ως:

$$d_v = \sigma(L + L_z + d_T) \quad (3-31)$$

Όπως φαίνεται είναι μια γραμμική συνάρτηση όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ώστε η μελέτη να είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητη του μεγέθους του οχήματος αλλά και του κάθε γεωμετρικού χαρακτηριστικού μεμονωμένα.

Η σταθερά σ θα εξηγηθεί στο τέλος της μελέτης αναλυτικά, σημειώνεται όμως ότι αυτή βρέθηκε να εξαρτάται από τη σταθερά μετατροπής b και έτσι λήφθηκε ως 0.87 ώστε να επιτύχουμε την ελάχιστη δυνατή τιμή του δείκτη κατάστασης για την πληρότητα της μελέτης, παρόλο που η τιμή του όπως θα φανεί δεν είναι τόσο ενδεικτική του τελικού αποτελέσματος.. Έτσι, η εξίσωση (3-29) γίνεται:

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{B}^* \mathbf{J} \quad (3-32)$$

όπου:

$$\mathbf{F}^* = [F_X \quad F_Y \quad F_Z \quad M_X/d_v \quad M_Y/d_v \quad M_Z/d_v]^T \quad (3-33)$$

και:

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \frac{b}{d_v} \mathbf{I}_{3 \times 3} + \frac{1}{d_v} \mathbf{S}(\mathbf{R}_i^m \mathbf{p} + {}^b \mathbf{p}_1) & \frac{b}{d_v} \mathbf{I}_{3 \times 3} + \frac{1}{d_v} \mathbf{S}(\mathbf{R}_i^m \mathbf{p} + {}^b \mathbf{p}_2) & \frac{b}{d_v} \mathbf{I}_{3 \times 3} + \frac{1}{d_v} \mathbf{S}(\mathbf{R}_i^m \mathbf{p} + {}^b \mathbf{p}_3) \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

3.2.2 Υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Το κριτήριο που μελετάμε είναι ο δείκτης κατάστασης του μητρώου \mathbf{B}^* πλέον. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι η εξής. Έχουμε ένα βαθμωτό κριτήριο το οποίο θέλουμε να ελαχιστοποιηθεί μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών L , L_z , d_T . Επομένως, επιδιώκεται στο τέλος αυτής της ανάλυσης να προκύψουν σχέσεις οι οποίες συσχετίζουν αυτά τα μεγέθη μεταξύ τους και δίνουν μια αρχική κατεύθυνση για το βέλτιστο σχεδιασμού του οχήματος.

Τα παραπάνω συνιστούν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο έχει ως αντικειμενική συνάρτηση την:

$$f = \min \{ \text{δείκτης}_{\text{-κατάστασης}}(\mathbf{B}^*) \} \quad (3-35)$$

και διάνυσμα απόφασης το:

$$\mathbf{x} = [L \quad L_z \quad d_T]^T \quad (3-36)$$

Το πεδίο τιμών των μεταβλητών λαμβάνεται ως:

$$0 \leq L \leq 0.5m \quad (3-37)$$

$$0 \leq L_z \leq 0.5m \quad (3-38)$$

$$0 \leq d_T \leq 0.5m \quad (3-39)$$

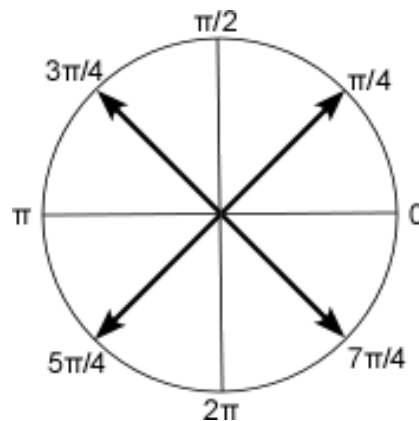
Τιμές μεγαλύτερες από τα $0.5m$ δεν αντικατοπτρίζουν ένα πραγματικό όχημα, με την τιμή 0.5 ήδη να είναι πολύ μακριά από τις αναμενόμενες και τις αντίστοιχες πραγματικές ιπτάμενων οχημάτων μικρού μεγέθους.

Για τη λύση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης καλείται η συνάρτηση "fmincon" που παρέχει το προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab. Σημειώνεται ότι είναι μια αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης ενός στόχου, η οποία βασίζεται στις παραγώγους πρώτης ή και δεύτερης τάξης της αντικειμενικής συνάρτησης και μεταβάλλει σε κάθε βήμα βελτιστοποίησης το διάνυσμα απόφασης κατά αυτήν την παράγωγο.

Το μητρώο \mathbf{B}^* εκτός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών περιέχει και τις μήτρες περιστροφής \mathbf{R}_i οι οποίες περιλαμβάνουν τις γωνίες στροφής θ_{i1} , θ_{i2} των ΙΣΗΕ καθώς και την τιμή της παραμέτρου b η οποία λαμβάνεται ως $0.01Nm/N$ (μια τυπική τιμή ενός

κατάλληλου εύρους τιμών), κάτι το οποίο θα εξηγηθεί στη συνέχεια μαζί με την αιτιολόγηση της χρήσης του συντέλεστη σ στη σταθερά αδιαστατοποίησης d_v (βλ. Εξ. (3-31)).

Οι γωνίες θ_{i1} , θ_{i2} των ΙΣΗΕ δε λαμβάνονται ως μεταβλητές της διαδικασίας βελτιστοποίησης φυσικά αλλά υπεισέρχονται ως σταθερές με μια λογική ανάλογη με αυτήν που ακολουθήσαμε στην Παρ. 3.1. Συγκεκριμένα, επειδή κάθε μία από αυτές μπορεί να πάρει όλες τις δυνατές τιμές στον τριγωνομετρικό κύκλο, διακριτοποιούμε τον κύκλο σε τέσσερις αντιπροσωπευτικές γωνίες κάθε τεταρτημορίου του. Οι γωνίες αυτές είναι οι $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ και $7\pi/4$ (Σχήμα 3.12). Έτσι, δεδομένου ότι έχουμε έξι γωνίες ο συνολικός αριθμός των συνδυασμών των γωνιών roll και pitch για το κάθε ΙΣΗΕ είναι $4^6 = 4096$.



Σχήμα 3.12. Διακριτοποίηση του τριγωνομετρικού κύκλου για τις γωνίες roll και pitch

Επομένως, καλείται η συνάρτηση “fmincon” 4096 φορές ώστε να δώσει το βέλτιστο διάνυσμα απόφασης που ελαχιστοποιεί την Εξ. (3-35). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίν. 3-1.

Από τον Πίν. 3-1 πηγάζουν τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, όπως φαίνεται ο συνδυασμός των γωνιών δεν παίζει κανένα ρόλο στη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f καθώς και στο βέλτιστο διάνυσμα απόφασης που προκύπτει. Έτσι, η βέλτιστη σχέση που πρέπει να τηρούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οχήματος θα είναι η ίδια για τον κάθε συνδυασμό γωνιών.

Παρατηρώντας τον Πίν. 3-1 η σχέση αυτή είναι ξεκάθαρη, χωρίς να απαιτείται η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Η ελαχιστοποίηση του δείκτη κατάστασης απαιτεί η απόσταση L_z μεταξύ της άκρης των ποδιών και της βάσης του οχήματος καθώς και η απόσταση d_T της εφαρμογής της δύναμης ώσης με την άκρη του ποδιού να είναι μηδενικές (βλ. Σχ. 3.10). Ακόμη, φαίνεται η βέλτιστη τιμή του μεγέθους L να βρίσκεται στο μέγιστο όριο που της έχει δοθεί και συγκεκριμένα στην τιμή 0.5 m. Προτού βγει το τελικό συμπεράσμα ότι το βέλτιστο διάνυσμα απόφασης απαιτεί $[L \ L_z \ d_T]^T$ ίσο με $[\infty \ 0 \ 0]^T$ γίνονται άλλες 4096 εκτελέσεις της συνάρτησης βελτιστοποίησης αυξάνοντας το πάνω όριο της μεταβλητής απόφασης L ώστε να αποφανθούμε με σιγουριά ότι το αποτέλεσμα αυτής διαδικασίας που ακολουθήθηκε, απαιτεί $L \rightarrow \infty$ αλλά και μηδενικές τιμές των L_z και d_T ανεξάρτητα από την τιμή του L .

Έτσι, για τα νέα όρια του γεωμετρικού μεγέθους L :

$$0 \leq L \leq 5m \quad (3-40)$$

ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δίνει τα εξής αποτελέσματα (βλ. Πίν. 3-2) :

Πίνακας 3-1. Αποτελέσματα συνάρτησης βελτιστοποίησης

Συνδυασμός γωνιών	f	$L(m)$	$L_z(m)$	$d_T(m)$
1	1.41546438	0.4999	8.14E-08	6.34E-08
2	1.415464386	0.4999	8.86E-08	7.42E-08
3	1.415464493	0.4999	9.42E-08	2.71E-10
4	1.415464493	0.4999	9.42E-08	2.71E-10
5	1.415464385	0.4999	8.88E-08	7.23E-08
6	1.415464391	0.4999	9.97E-08	8.14E-08
7	1.415464493	0.4999	9.43E-08	2.71E-10
8	1.415464493	0.4999	9.42E-08	2.71E-10
9	1.415464493	0.4999	9.42E-08	2.71E-10
10	1.415464493	0.4999	9.43E-08	2.71E-10
11	1.415464493	0.4999	9.43E-08	2.71E-10
12	1.415464493	0.4999	9.42E-08	2.71E-10
.
.
.
.
.
4096	1.415464493	0.4999	9.42E-08	2.71E-10

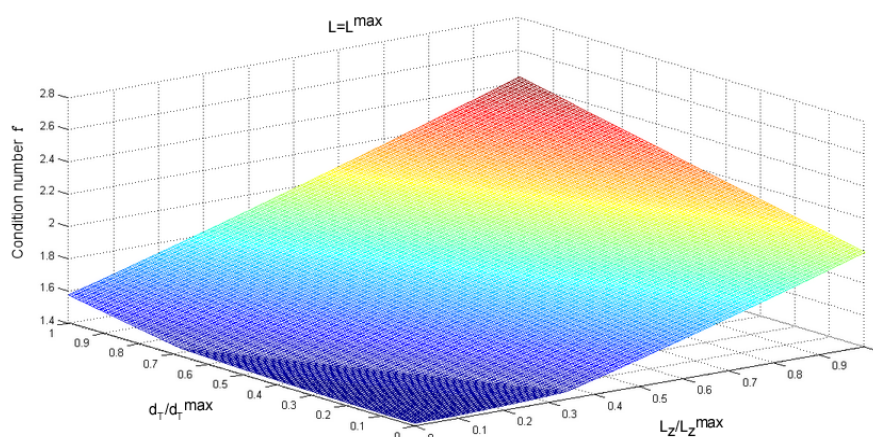
Πίνακας 3-2. Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης για 5m άνω όριο μήκους ποδιού

Συνδυασμός γωνιών	f	$L(m)$	$L_z(m)$	$d_T(m)$
1	1.41422671	4.990	1.01e-07	7.58e-07
2	1.41422671	4.990	1.11e-07	9.07e-07
3	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.35e-09
4	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.34e-09
5	1.41422671	4.990	1.11e-07	8.80e-07
6	1.41422624	4.996	6.42e-08	5.10e-07
7	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.35e-09
8	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.35e-09
9	1.41422687	4.992	1.18e-07	3.35e-09
10	1.41422687	4.992	1.18e-07	3.35e-09
11	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.35e-09
12	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.35e-09
.
.
.
.
.
4096	1.41422687	4.990	1.18e-07	3.35e-09

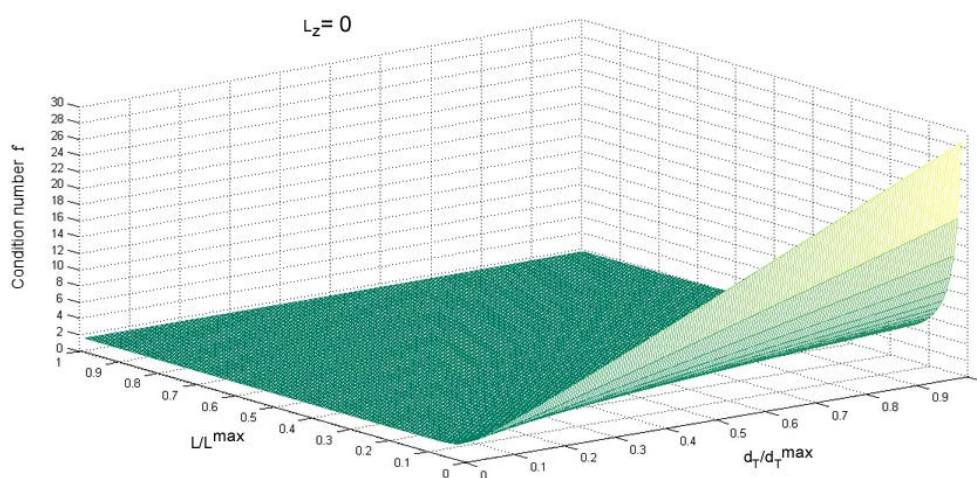
Η εικόνα του Πιν. 3-2 παραμένει η ίδια με τον Πιν. 3-1 και μπορούμε να αποφανθούμε πλέον με σιγουρία ότι το μήκος L πρέπει να είναι το μεγαλύτερο δυνατό ενώ ανεξάρτητα από αυτό τα L_z και d_T πρέπει να είναι μηδενικά. Έτσι, το τελικό βέλτιστο διάνυσμα απόφασης είναι το $[L \ L_z \ d_T]^T$ ίσο με $[\infty \ 0 \ 0]^T$, όπου ως ∞ συμβολίζεται η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να πάρει το L .

Για την καλύτερη οπτικοποίηση αυτών των αποτελεσμάτων χαράσσονται διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν πως μεταβάλλεται ο δείκτης κατάστασης του μητρώου \mathbf{B}^* συναρτήσει δύο μεταβλητών απόφασης όταν η τρίτη παραμένει σταθερή και ίση με τη βέλτιστη τιμή που έδειξαν ο Πίν. 3-1 και ο Πίν. 3-2.

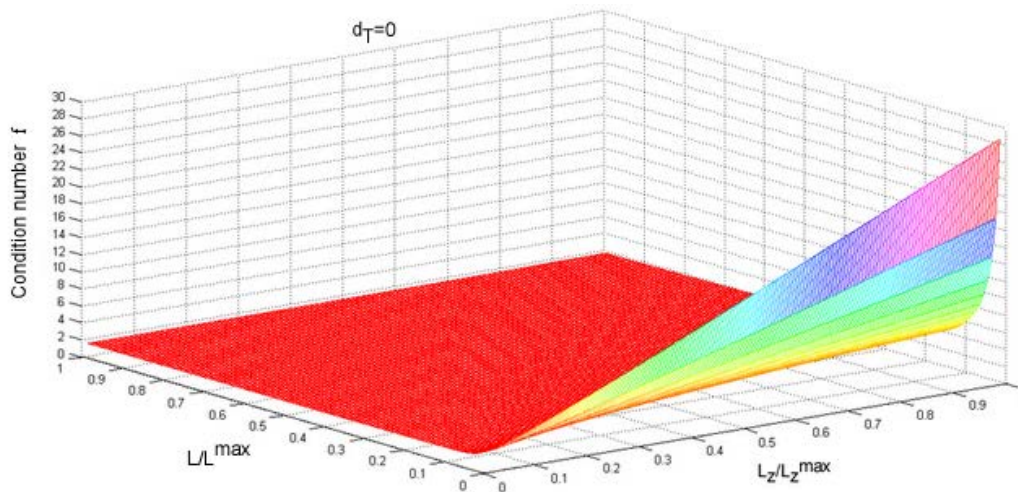
Συγκεκριμένα, στο Σχ. 3.13 παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη κατάστασης συναρτήσει των μεταβλητών L_z και d_T όταν η μεταβλητή απόφασης L έχει μία πολύ μεγάλη τιμή. Στο Σχ. 3.14 ο δείκτης κατάστασης μεταβάλλεται συναρτήσει των μεταβλητών L και d_T ενώ το L_z είναι μηδενικό και τέλος στο Σχ. 3.15 η αντικειμενική συνάρτηση φαίνεται πως μεταβάλλεται συναρτήσει των L και L_z ενώ το μέγεθος d_T παραμένει σταθερό και μηδενικό. Οι τιμές όλων των μεταβλητών απεικονίζονται αδιάστατες ως διαιρεμένες με τη μέγιστη τιμή τους. Σημειώνεται ακόμη, ότι αυτά τα διαγράμματα προέκυψαν ενδεικτικά για μηδενικές γωνίες roll και pitch των ΙΣΗΕ.



Σχήμα 3.13. Δείκτης κατάστασης συναρτήσει αδιάστατων d_T και L_z .



Σχήμα 3.14. Δείκτης κατάστασης συναρτήσει αδιάστατων L και d_T .



Σχήμα 3.15. Δείκτης κατάστασης συναρτήσει αδιάστατων L και L_z .

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα μέσω της οπτικοποίησης που παρέχουν αυτά τα σχήματα παραμένουν αναλλοίωτα με την αντικειμενική συνάρτηση να παρουσιάζει ολικό ελάχιστο στο $[1 \ 0 \ 0]$ με τιμή 1.41.

Μία επιπλέον παρατήρηση η οποία μπορεί να γίνει στο Σχ. 3.13, Σχ. 3.14 και Σχ. 3.15 η οποία δε φάνηκε στα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι ότι είναι πιο έντονη η επιρροή της μεταβλητής L_z στην τιμή του δείκτη κατάστασης του μητρώου \mathbf{B}^* , πράγμα που σημαίνει ότι τα πόδια θα πρέπει πολύ αυστηρά να μην έχουν καμία κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο όπως για παράδειγμα το όχημα Inspire 1 της εταιρείας DJI (βλ. Σχ. 3.11).

Επεξήγηση των τιμών της σταθεράς b και του όρου σ στην σταθερά αδιαστατοποίησης

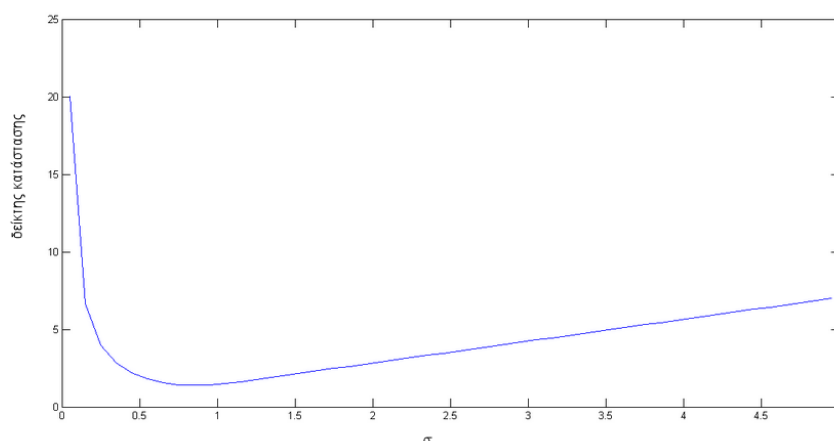
Λόγω του ότι στις εξισώσεις μας υπεισέρχεται ο όρος b ο οποίος πολλαπλασιάζει τη δύναμη ώσης ${}^m\mathbf{T}_i$ και προκύπτει η ροπή αντίστασης ${}^m\mathbf{M}\mathbf{d}_i$ (βλ. Σχ. 3.9), το μητρώο \mathbf{B} (Εξ. 3-30) και ισοδύναμα το μητρώο \mathbf{B}^* (Εξ. 3-34) δεν είναι αυστηρά εξαρτημένα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Έτσι αναμένουμε η τιμή που θα έχει η σταθερά b να επηρεάζει την τιμή του δείκτη κατάστασης του μητρώου \mathbf{B}^* χωρίς όμως να παίζει κάποιον ουσιαστικό ρόλο στην ανάλυση που προηγήθηκε αφού η σταθερά αυτή δεν έχει καμία σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία βελτιστοποιούνται.

Να σημειωθεί για την πληρότητα ότι στην πραγματικότητα το μέγεθος αυτό δεν είναι ένα μέγεθος σταθερό αλλά μία συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας της έλικας, των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών όπως της διαμέτρου και το γεωμετρικού της βήματος (pitch) και άλλων χαρακτηριστικών που αναλύονται διεξοδικά στο [13]. Ωστόσο όμως διερευνήθηκε ο ρόλος που παίζει αυτή (ως μία σταθερά) στην τιμή του δείκτη κατάστασης πρώτον για να έχουμε μια ακριβή έκφραση για τη σταθερά αδιαστατοποίησης d_v (βλ. Εξ. 3-31) και δεύτερον για να διαπιστώσουμε ακριβώς την ελάχιστη τιμή στην οποία μπορεί να συγκλίνει ο δείκτης κατάστασης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής. Αρχικά σημειώνεται ότι τόσο η τιμή b όσο και η σταθερά αδιαστατοποίησης επηρεάζουν μόνο το μέτρο του δείκτη κατάστασης και όχι το βέλτιστο διάνυσμα το οποίο ελαχιστοποιεί αυτό. Έτσι, για έναν οποιοδήποτε συνδυασμό γωνιών εξετάζεται για ένα εύρος τιμών του μεγέθους b ποιος είναι ο συντελεστής σ και άρα ποιά η σταθερά αδιαστατοποίησης d_v ώστε να επιτύχουμε την ελάχιστη δυνατή τιμή του δείκτη κατάστασης.

Προέκυψε λοιπόν ότι όταν $b \in [10^{-4} - 0.1](Nm/N)$, η τιμή που πρέπει να έχει το σ είναι η 0.87 ώστε να επιτύχουμε την ελάχιστη δυνατή τιμή του δείκτη κατάστασης που φαίνεται και παραπάνω και είναι το 1.41. Σημειώνεται ότι αυτό το εύρος είναι ένα υπερσύνολο του εύρους τιμών που μπορεί να πάρει αυτή η σταθερά για πραγματικές έλικες διαστάσεων και απαιτήσεων αντίστοιχων με αυτές του δικού μας οχήματος.

Για του λόγου το αληθές, φαίνεται στο Σχ. 3.16 για αυτό το εύρος των τιμών του μεγέθους b πως μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη κατάστασης συναρτήσει του σ . Το διάγραμμα αυτό προέκυψε για τη βέλτιστη σχέση που βρέθηκε ότι πρέπει να τηρούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οχήματος και για έναν αντιπροσωπευτικό συνδυασμό γωνιών.



Σχήμα 3.16. Δείκτης κατάστασης συναρτήσει του όρου σ .

Είναι φανερό λοιπόν από το Σχ. 3.16 ότι ο δείκτης κατάστασης παρουσιάζει ολικό ελάχιστο στην τιμή 0.87 που προαναφέρθηκε. Για την πληρότητα, σημειώνεται ότι όταν η τιμή b είναι έξω από το εύρος $[10^{-4} - 0.1](Nm/N)$ η τιμή του δείκτη κατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερη από 1.41 για οποιαδήποτε τιμή του όρου σ .

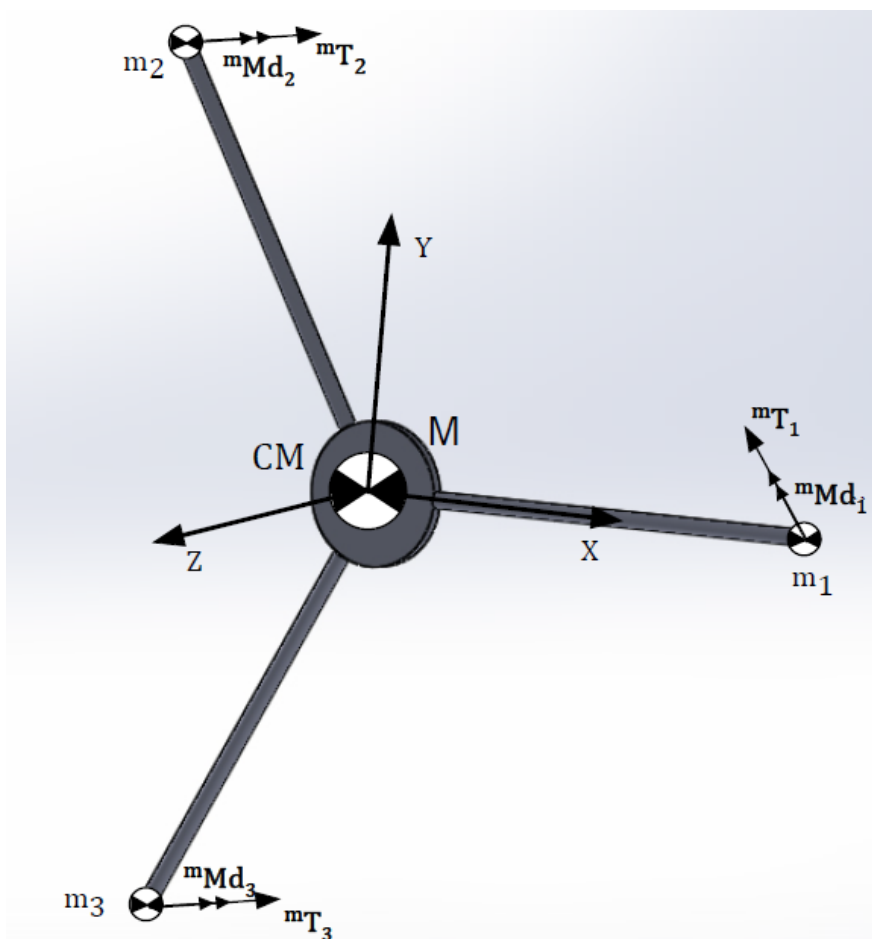
Όπως φάνηκε, ο δείκτης κατάστασης δεν μπορεί να πέσει κάτω από την τιμή 1.41. Αυτό οφείλεται στο ότι η μήτρα \mathbf{B}^* δεν μπορεί να γίνει μοναδιαία λόγω της δομής που έχει (βλ. Εξ. (3-34)) και άρα να δώσει τον ελάχιστο επιτρεπόμενο δείκτη κατάστασης όπως ορίζεται ότι ισούται με 1.

Συνοψίζοντας λοιπόν, η προαναφερθείσα μελέτη απαιτεί ένα όχημα το οποίο θα έχει μορφή όμοια με την πλειοψηφία των συμβατικών ιπτάμενων οχημάτων, όπου απαιτείται το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης να συμπέφτει με το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ. Ακόμη, πρέπει τα πόδια να έχουν μηδενική κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Το αποτέλεσμα

που προέκυψε για το μήκος του ποδιού να απαιτείται να είναι το μέγιστο δυνατό είναι λογικό και αναμενόμενο αν αναλογισθεί κανείς το είδος της ανάλυσης που προηγήθηκε και ότι μεγάλο μήκος ποδιού ισοδυναμεί με μεγάλες ροπές λόγω της δύναμης ώσης.

Σημειώνεται ακόμη ότι ο παραπάνω αλγόριθμος απαιτεί το μήκος του ποδιού να είναι το μέγιστο δυνατό διότι δεν εισάγαμε καθόλου την έννοια της αδράνειας στην προηγηθείσα ανάλυση. Έτσι, για το μήκος του ποδιού απαιτείται πιο λεπτομερειακή διερεύνηση (η οποία θα διεξαχθεί στη συνέχεια) διότι στην πραγματικότητα άπειρο μήκος ποδιού σημαίνει και άπειρη αδράνεια καθώς και άπειρη μάζα. Είναι μια σημαντική κατεύθυνση όμως για τη συνέχεια της μελέτης του οχήματος, η οποία πρακτικά σηματοδοτεί ότι για την ομαλή μεταφορά των δυνάμεων ώσης και ροπών αντίστασης στο κύριο σώμα-βάση απαιτείται ένα μεγάλο μήκος ποδιού.

Συνδυάζοντας λοιπόν τα συμπεράσματα αυτής της Παρ. και της Παρ. 3.1, ο συνδυασμός του Σχ. 3.8 και του Σχ. 3.10 δίνει την κατάσταση που φαίνεται στο Σχ. 3.17, η οποία θα ληφθεί υπόψιν στη συνέχεια του σχεδιασμού και της μελέτης του οχήματος.



Σχήμα 3.17. Τρισδιάστατη απεικόνιση οχήματος μετά τα συμπεράσματα των Παρ. 3.1 και 3.2.

4 Βέλτιστη επιλογή συνιστωσών και γεωμετρικών μεγεθών του ρομπότ

4.1 Εισαγωγή

Πλέον απαιτείται ο λεπτομερειακός καθορισμός και η ακριβής διαστασιολόγηση της Παραλλαγής 2 της Παρ. 2.2.4 (βλ. Σχ. 2.5), σεβόμενοι παράλληλα τα αποτελέσματα του Κεφ. 3 που θέλουν το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης και το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ να βρίσκονται στο επίπεδο της βάσης (βλ. Σχ. 3.17).

Η ανάλυση που ακολουθεί αποσκοπεί αρχικά στον πλήρη προσδιορισμό των θεμελιωδών συνιστωσών ισχύος του οχήματος δηλαδή του ηλεκτροκινητήρα ο οποίος είναι ένας brushless outrunner κινητήρας κατά τα αναφερθέντα στο Κεφ. 2, της μπαταρίας η οποία επιλέγεται να είναι τύπου Lithium-Polymer (LiPo) λόγω της μεγάλης πυκνότητας ενέργειας (Wh/kg) που διαθέτουν αυτού του τύπου οι μπαταρίες, αλλά και των επενεργητών, οι οποίοι επιλέγονται ως ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες κατά τα προαναφερθέντα. Επιπρόσθετα, μέσω της κατάλληλης επιλογής των ηλεκτροκινητήρων προσδιορίζονται οι οδηγήσεις τους οι οποίες είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που ονομάζονται brushless ESC (Electronic Speed Controller) και μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο (όταν έχουμε brushless motors), με το οποίο τελικά τροφοδοτούν τις τρεις φάσεις των ηλεκτροκινητήρων. Ακόμη, μαζί με τον ηλεκτροκινητήρα καθορίζεται και η έλικα (διάμετρος και γεωμετρικό βήμα), η οποία είναι ίδιου τύπου με τις έλικες του εμπορίου που χρησιμοποιούνται στα τηλεκατευθυνόμενα. Σημειώνεται ότι σε τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται έλικες δύο ή τριών πτερυγίων. Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό η έλικα θα είναι δύο πτερυγίων δεδομένου ότι για αυτές έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν καλύτερη αεροδυναμική απόδοση [14]. Τέλος, προσδιορίζονται τα γεωμετρικά μεγέθη του ρομπότ και συγκεκριμένα το μήκος του ποδιού, το μήκος του κατακόρυφου άξονα της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής και η ακτίνα της στεφάνης (βλ. Σχ. 2.5), κατασκευασμένα από ντουραλουμίνιο (duraluminium), μια ομάδα κραμάτων αλουμινίου, χαλκού, μαγγανίου και μαγνησιού, η οποία έχει πολύ αυξημένη αντοχή και καλές μηχανικές ιδιότητες με πυκνότητα ίση με αυτή του αλουμινίου, καθιστώντας το έτσι ιδανικό για πτητικές εφαρμογές.

Σημειώνεται ότι για τον προσδιορισμό των προαναφερθέντων έγινε προσπάθεια να υπάρχει μία αναλυτική διαδικασία η οποία να καθορίζει με βέλτιστο τρόπο όλα τα παραπάνω μεγέθη. Ένα απλοποιημένο μοντέλο λοιπόν, το οποίο προκύπτει από το πλήρες δυναμικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στο [1] και περιγράφει μαθηματικά το υπό μελέτη ολόνομο ιπτάμενο όχημα, προσδιορίζει όλες τις συνιστώσες του ρομπότ μας. Σημειώνεται ότι το μοντέλο αυτό παραμετροποιήθηκε μέσω αναλυτικών σχέσεων παρεμβολής που έχουν εξαχθεί στο [15] για όλες τις συνιστώσες που μας ενδιαφέρουν και βασίζονται σε τεχνικές προδιαγραφές των εταιρειών που τις κατασκευάζουν και τις διαθέτουν καθώς και σε πειραματικές μετρήσεις.

4.2 Δυναμικό μοντέλο και αντίστοιχες εξισώσεις προς επεξεργασία

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά ενός ολόνομου ιπτάμενου οχήματος 15 β.ε όπως αυτές αναπτύχθηκαν στο [1], οι οποίες θα τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να παραχθεί μια αναλυτική διαδικασία ικανή να προσδιορίσει όλες τις συνιστώσες και κατ' επέκταση την πλήρη μορφή του υπο μελέτη ολόνομου ιπτάμενου οχήματος. Να σημειωθεί ότι ενώ κανείς αναμένει ένα τέτοιο μοντέλο να έχει 12 β.ε (δηλαδή τους έξι β.ε. της βάσης και τους άλλους έξι από τις ανεξάρτητες περιστροφές που παράγονται στα ΙΣΗΕ), η προσθήκη τριών επιπλέον β.ε από τις ιδιοπεριστροφές των ηλεκτροκινητήρων για μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια, συνιστούν τελικά ένα δυναμικό μοντέλο 15 β.ε, με τις θέσεις των ηλεκτροκινητήρων φυσικά να μην παίζουν κάποιο ρόλο στη δυναμική του οχήματος.

Για την πληρότητα, αρχικά παρουσιάζονται οι Newton-Euler εξισώσεις που περιγράφουν ένα τέτοιο όχημα σύμφωνα με το [1] και είναι οι εξής.

Η δυναμική του i ($i = 1, 2, 3$) ΙΣΗΕ (βλ. Σχ. 4.1) περιγράφεται από τα ακόλουθα:

$$m_p {}^b \dot{\mathbf{v}}_i = {}^b \mathbf{F}_{p,i} + {}^b \mathbf{F}_{c,i} + \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_p \quad (4-1)$$

$$\mathbf{J}_p {}^m \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^m \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_p {}^m \boldsymbol{\omega}_i = {}^m \mathbf{u}_i + \mathbf{Q}_i^T ({}^b \mathbf{M}_{c,i} + {}^b \mathbf{M}_{p,i}) \quad (4-2)$$

$$\dot{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{Q}_i \mathbf{S}({}^m \boldsymbol{\omega}_i) \quad (4-3)$$

Σημειώνεται ότι:

$${}^b \mathbf{v}_i = {}^b \dot{\mathbf{x}}_i \quad (4-4)$$

όπου:

$${}^b \mathbf{x}_i = \mathbf{Q}^T (\mathbf{x} + \mathbf{Q} ({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p})) \quad (4-5)$$

Η δυναμική της βάσης (βλ. Σχ. 4.1) περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$m_b \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{g}_b + \mathbf{Q} ({}^b \mathbf{F}_D - \sum_{i=1}^3 {}^b \mathbf{F}_{c,i}) \quad (4-6)$$

$$\mathbf{J}^b \dot{\boldsymbol{\omega}} = \sum_{i=1}^3 (-\mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{u}_i + {}^b \mathbf{p}_i \times (-{}^b \mathbf{F}_{c,i})) + {}^b \mathbf{M}_D - {}^b \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}^b \boldsymbol{\omega} \quad (4-7)$$

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q} \mathbf{S}({}^b \boldsymbol{\omega}) \quad (4-8)$$

όπου:

$${}^b \mathbf{F}_{p,i} = \mathbf{Q}_i (f_i \mathbf{e}_{i,3}) = \mathbf{Q}_i [0; 0; f_i] \quad (4-9)$$

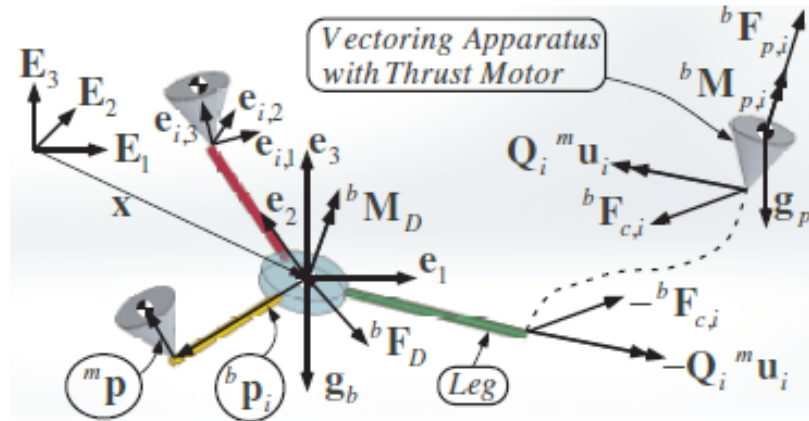
$${}^b \mathbf{M}_{p,i} = {}^b \mathbf{F}_{p,i} \quad (4-10)$$

$${}^b \mathbf{M}_{c,i} = [\mathbf{Q}_i (-{}^m \mathbf{p})] \times {}^b \mathbf{F}_{c,i} \quad (4-11)$$

$${}^m \mathbf{p} = d \mathbf{e}_{i,3} = [0 \quad 0 \quad d]^T \quad (4-12)$$

Σημειώνεται ότι ο συμβολισμός ${}^b (\cdot)$ για κάθε διάνυσμα, δείχνει ότι αυτό είναι εκφρασμένο ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης-κυρίου σώματος, ενώ ο συμβολισμός

$^m(\cdot)$ δείχνει ότι το κάθε διάνυσμα είναι εκφρασμένο ως προς το κάθε σωματόδετο σύστημα του ΙΣΗΕ. Το κάθε μέγεθος από αυτά που εμφανίζεται παραπάνω επεξηγείται στη συνέχεια. Το Σχ. 4.1 αναπαριστά διανυσματικά το όχημα τόσο ως προς τις θέσεις όσο και ως προς τις δυνάμεις του.



Σχήμα 4.1. Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το ιπτάμενο όχημα 15 β.ε [1].

Σημειώνεται ότι m_p , \mathbf{J}_p και m_b , \mathbf{J} είναι η μάζα, αδράνεια του ΙΣΗΕ συστήματος και του συστήματος της βάσης αντίστοιχα. Με ${}^b\mathbf{F}_{p,i}$ και ${}^b\mathbf{M}_{p,i}$ συμβολίζονται τα διανύσματα δύναμης και ροπής που ασκούνται λόγω της ώσης f_i και της ροπής αντίστασης της έλικας στο i ΙΣΗΕ και είναι εκφρασμένα ως προς το $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$. Ενώ, ${}^b\mathbf{F}_{c,i}$ και ${}^b\mathbf{M}_{c,i}$ είναι τα διανύσματα δύναμης και ροπής που ασκούνται στο i ΙΣΗΕ από τη βάση. Οι \mathbf{Q}_i είναι οι μήτρες περιστροφής των σωματόδετων i συστημάτων $(\mathbf{e}_{i,1}, \mathbf{e}_{i,2}, \mathbf{e}_{i,3})$ στο σωματόδετο σύστημα της βάσης $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$. Από το σωματόδετο σύστημα της βάσης μεταβαίνουμε στο αδρανειακό $(\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3)$ μέσω της μήτρας περιστροφής \mathbf{Q} . Τα διανύσματα \mathbf{g}_p και \mathbf{g}_b είναι τα διανύσματα βάρους των ΙΣΗΕ και της βάσης αντίστοιχα, εκφρασμένα στο αδρανειακό σύστημα. Με ${}^m\mathbf{u}_i$, ${}^m\boldsymbol{\omega}_i$, ${}^m\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ συμβολίζονται τα διανύσματα ροπών, γωνιακών ταχυτήτων και γωνιακών επιταχύνσεων των ΙΣΗΕ εκφρασμένα στο i σωματόδετο σύστημα $(\mathbf{e}_{i,1}, \mathbf{e}_{i,2}, \mathbf{e}_{i,3})$. Κατά το Παράρτημα Α.2 με $\mathbf{S}(\cdot)$ συμβολίζεται ο αντισυμμετρικός πίνακας ισοδύναμος του εξωτερικού γινομένου. Το διανύσματα θέσης και ταχύτητας του κέντρου μάζας του ΙΣΗΕ εκφρασμένα στο σωματόδετο σύστημα της βάσης συμβολίζονται με ${}^b\mathbf{v}_i$ και ${}^b\mathbf{x}_i$. Μέσω ενός διανύσματος \mathbf{x} συνδέεται το αδρανειακό σύστημα με το σωματόδετο της βάσης. Τα μεγέθη $\dot{\mathbf{v}}$, ${}^b\boldsymbol{\omega}$, ${}^b\dot{\boldsymbol{\omega}}$ συμβολίζουν τη γραμμική επιτάχυνση και γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση της βάσης αντίστοιχα. Μέσω του ${}^b\mathbf{p}_i$ συνδέεται το σωματόδετο σύστημα της βάσης με την άκρη του i ποδιού ενώ μέσω του ${}^m\mathbf{p}$ συνδέεται το σωματόδετο σύστημα $(\mathbf{e}_{i,1}, \mathbf{e}_{i,2}, \mathbf{e}_{i,3})$ με το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης. Με ${}^b\mathbf{F}_D$ και ${}^b\mathbf{M}_D$ συμβολίζονται οι δυνάμεις και ροπές οφειλόμενες σε διαταραχές λόγω του ανέμου. Οι παράμετροι b και d έχουν αναφερθεί στο Κεφ. 3 και είναι η σταθερά μετατροπής της δύναμης ώσης σε ροπή αντίστασης και απόσταση του κέντρου μάζας του ΙΣΗΕ με την άκρη του ποδιού. Σημειώνεται ότι στη μοντελοποίηση που αναπτύχθηκε στο [1], το κέντρο μάζας του ΙΣΗΕ και το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης ταυτίζονται. Άρα κατά τα προαναφερθέντα στο Κεφ. 3 ισχύει ότι $d = d_T = 0$.

Στη συνέχεια, σε συνεργασία με τον Υ.Δ Μιχάλη Ραμπ οι Εξ. (4-1)–(4-12) μετασχηματίζονται στην παρακάτω συμπαγή μητρωική μορφή (Closed Matrix-Form Dynamic Equations) :

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ {}^m \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \\ {}^m \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \\ {}^m \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\Pi} = \mathbf{U} \quad (4-13)$$

όπου:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} (m_b + 3m_p)\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{t} & \boldsymbol{\alpha}_1 & \boldsymbol{\alpha}_2 & \boldsymbol{\alpha}_3 \\ \sum_{i=1}^3 m_p \mathbf{S}({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p}) \mathbf{Q}^T & \mathbf{J} + \sum_{i=1}^3 \mathbf{N}_i & -m_p \boldsymbol{\beta}_1 & -m_p \boldsymbol{\beta}_2 & -m_p \boldsymbol{\beta}_3 \\ \boldsymbol{\gamma}_1 & m_p \mathbf{Q}_1^T \boldsymbol{\theta}_1 & \mathbf{J}_p + \boldsymbol{\varepsilon}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \boldsymbol{\gamma}_2 & m_p \mathbf{Q}_2^T \boldsymbol{\theta}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_p + \boldsymbol{\varepsilon}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \boldsymbol{\gamma}_3 & m_p \mathbf{Q}_3^T \boldsymbol{\theta}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_p + \boldsymbol{\varepsilon}_3 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

με:

$$\boldsymbol{\Pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \sum_{i=1}^3 (m_p \boldsymbol{\Phi}_i - {}^b \mathbf{F}_{p,i}) - \mathbf{Q}^b \mathbf{F}_D - (\mathbf{g}_b + 3\mathbf{g}_p) \\ {}^b \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}^b \boldsymbol{\omega} - {}^b \mathbf{M}_D + \sum_{i=1}^3 {}^b \mathbf{p}_i \times (m_p \boldsymbol{\Phi}_i) - \sum_{i=1}^3 {}^b \mathbf{p}_i \times ({}^b \mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_p) \\ \mathbf{B}_1 - m_p \mathbf{Q}_1^T \mathbf{S}(\mathbf{Q}_1 (-{}^m \mathbf{p})) \boldsymbol{\Phi}_1 \\ \mathbf{B}_2 - m_p \mathbf{Q}_2^T \mathbf{S}(\mathbf{Q}_2 (-{}^m \mathbf{p})) \boldsymbol{\Phi}_2 \\ \mathbf{B}_3 - m_p \mathbf{Q}_3^T \mathbf{S}(\mathbf{Q}_3 (-{}^m \mathbf{p})) \boldsymbol{\Phi}_3 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

και:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \sum_{i=1}^3 (-\mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{u}_i) \\ {}^m \mathbf{u}_1 \\ {}^m \mathbf{u}_2 \\ {}^m \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

Σημειώνεται ότι:

$$\boldsymbol{\alpha}_i = m_p (-\mathbf{Q} \mathbf{Q}_i \mathbf{S}({}^m \mathbf{p})) \quad (4-17)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_i = -m_p \mathbf{Q}_i^T \mathbf{S}(\mathbf{Q}_i (-{}^m \mathbf{p})) \mathbf{Q}^T \quad (4-18)$$

$$\mathbf{t} = \sum_{i=1}^3 m_p (-\mathbf{Q}\mathbf{S}({}^b\mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m\mathbf{p})) \quad (4-19)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = m_p \mathbf{Q}_i^T \bar{\boldsymbol{\zeta}}_i \quad (4-20)$$

Οι εκφράσεις των διανυσμάτων \mathbf{N}_i , $\boldsymbol{\beta}_i$, $\boldsymbol{\theta}_i$, $\boldsymbol{\Phi}_i$, \mathbf{B}_i και $\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i$ δίνονται στο Παράρτημα Β, Παρ. Β.1.1.

Βασισμένοι στην παρατήρηση του Κεφ. 3 κατά την οποία $d = 0$ καθώς και στο γεγονός ότι το όχημα είναι πλήρως συμμετρικό άρα απαλείφονται οι όροι οι οποίοι περιέχουν το άθροισμα των ${}^b\mathbf{p}_i$, απλοποιείται σημαντικά η Εξ. (4-13) που περιγράφει το δυναμικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι οι εξισώσεις αυτές επιδιώκεται να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό του οχήματος επιλέγουμε να αμελήσουμε τους όρους που σχετίζονται με τις διαταραχές του ανέμου ${}^b\mathbf{F}_D$ και ${}^b\mathbf{M}_D$. Έτσι, η απλοποιημένη μορφή πλέον της Εξ. (4-13) είναι:

$$\mathbf{M}^* \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ {}^b\dot{\boldsymbol{\omega}} \\ {}^m\dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \\ {}^m\dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \\ {}^m\dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \end{bmatrix} + \mathbf{H}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \sum_{i=1}^3 (-\mathbf{Q}_i {}^m\mathbf{u}_i) \\ {}^m\mathbf{u}_1 \\ {}^m\mathbf{u}_2 \\ {}^m\mathbf{u}_3 \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

όπου:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} (m_b + 3m_p)\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} + \sum_{i=1}^3 \mathbf{N}_i^* & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_p \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

με το μητρώο \mathbf{N}_i^* να είναι το :

$$\mathbf{N}_i^* = m_p (({}^b\mathbf{p}_i^T {}^b\mathbf{p}_i)\mathbf{I} - {}^b\mathbf{p}_i {}^b\mathbf{p}_i^T) \quad (4-23)$$

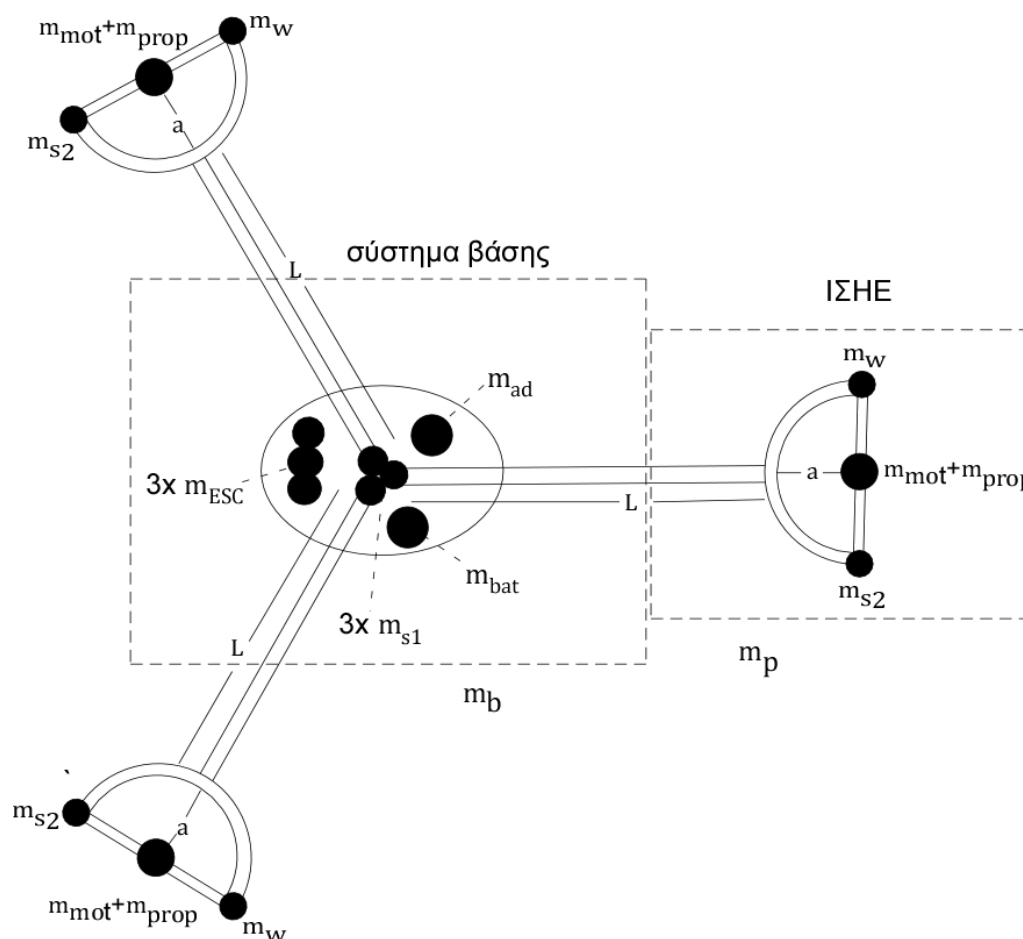
και τέλος:

$$\mathbf{H}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \sum_{i=1}^3 (m_p {}^b\boldsymbol{\omega} \times ({}^b\boldsymbol{\omega} \times {}^b\mathbf{p}_i) - {}^b\mathbf{F}_{p,i}) - (\mathbf{g}_b + 3\mathbf{g}_p) \\ {}^b\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} {}^b\boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^3 {}^b\mathbf{p}_i \times (m_p {}^b\boldsymbol{\omega} \times ({}^b\boldsymbol{\omega} \times {}^b\mathbf{p}_i)) - \sum_{i=1}^3 {}^b\mathbf{p}_i \times ({}^b\mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_p) \\ {}^m\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{J}_p {}^m\boldsymbol{\omega}_1 - \mathbf{Q}_1^T {}^b\mathbf{M}_{p,1} \\ {}^m\boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{J}_p {}^m\boldsymbol{\omega}_2 - \mathbf{Q}_2^T {}^b\mathbf{M}_{p,2} \\ {}^m\boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{J}_p {}^m\boldsymbol{\omega}_3 - \mathbf{Q}_3^T {}^b\mathbf{M}_{p,3} \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

Συνοψίζοντας λοιπόν, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, φέραμε τις εξισώσεις Newton-Euler σε μία συμπαγή μορφή, αυτή της Εξ. (4-13). Αυτή με τη σειρά της απλοποιήθηκε στην Εξ. (4-21) βασισμένη στα συμπεράσματα του Κεφ. 3. Έτσι, πλέον έχουμε ένα αρκετά απλοποιημένο σετ εξισώσεων σε συμπαγή μορφή, το οποίο θα παραμετροποιηθεί και με το οποίο θα εργασθούμε στη συνέχεια ώστε να προσδιορισθούν με αναλυτικό τρόπο οι βέλτιστες συνιστώσες και η γεωμετρία του οχήματος μας.

4.3 Παραμετροποίηση των εξισώσεων

Όπως φάνηκε στο Κεφ. 2, ο ιδανικός μηχανισμός που μπορεί να επιτύχει οποιοδήποτε προσανατολισμό της δύναμης ώσης είναι αυτός της Παραλλαγής 2 της Παρ. 2.2.4. Έτσι, η Εξ. (4-21) και όλη η μελέτη που ακολουθεί αναφέρεται σε ένα όχημα ακριβώς στη φιλοσοφία αυτού του μηχανισμού, το οποίο αποτελείται από το σύστημα της βάσης και από τα τρία ΙΣΗΕ, τοποθετημένα συμμετρικά (βλ. Σχ. 4.2).



Σχήμα 4.2. Απλοποιημένη απεικόνιση του οχήματος προς βελτιστοποίηση.

Συγκεκριμένα, η βάση θεωρείται ως ένας συμπαγής κυκλικός δίσκος από ντουραλουμίνιο (βλ. Σχ. 4.3) ακτίνας

$$R_s = 80mm \quad (4-25)$$

και πάχους

$$t_s = 2mm \quad (4-26)$$

Σε αυτήν (βλ. Σχ. 4.2) είναι τοποθετημένα μια μπαταρία της οποίας η μάζα θα συμβολίζεται με m_{bat} , τρεις μάζες των ESC για τους ηλεκτροκινητήρες m_{ESC} και οι τρεις ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες m_{sl} , οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την πρώτη ανεξάρτητη περιστροφή του κάθε ποδιού. Τα πόδια μήκους L παίρνουν κίνηση από τους ηλεκτρικούς σερβοκινητήρες της βάσης. Σημειώνεται ότι αυτά λαμβάνονται ως σωλήνες και κυλινδρικά. Αρχικά, η διατομή τους λήφθηκε ως κλειστή λόγω του ότι τέτοιες διατομές παρουσιάζουν πολύ υψηλές ιδιουσυχνότητες και είναι μακριά από κίνδυνο συντονισμού [16]. Το σχήμα τους επιλέχθηκε κυκλικό για πρακτικούς λόγους και συγκεκριμένα για να υπάρχει η δυνατότητα έδρασης τους σε έδρανα κύλισης. Στη διατομή της (βλ. Σχ. 4.4). δόθηκαν τυπικές τιμές εξωτερικής ακτίνας

$$r_{oL} = 7.5mm \quad (4-27)$$

και εσωτερικής

$$r_{iL} = 7mm \quad (4-28)$$

Οι τιμές αυτές είναι κοντά σε αντίστοιχες γεωμετρίες εμπορικών και γενικά οχημάτων συναφούς σχεδιασμού με του δικού μας [7]. Επίσης για τιμές αυτής της κλίμακας έχει αποδειχθεί ότι είναι αρκετά ικανοποιητική η αεροδυναμική απόδοση της έλικας [14]. Το σώμα της μισής στεφάνης ακτίνας a , έχει διατομή (βλ. Σχ. 4.5) με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα:

$$r_{oh} = 6mm \quad (4-29)$$

$$r_{ih} = 5.5mm \quad (4-30)$$

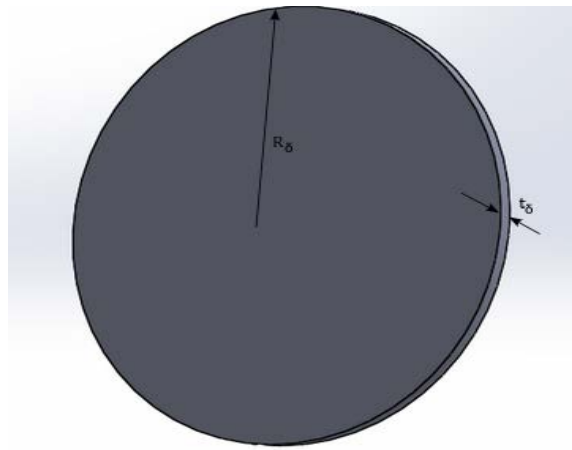
Σημειώνεται ότι λήφθηκε μικρότερη η εξωτερική της ακτίνα συγκριτικά με αυτής του ποδιού, διότι αναμένονται να είναι μικρότερες οι καταπονήσεις σε αυτόν το φορέα, δεδομένου ότι η στεφάνη είναι πιο κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης και έτσι αναπτύσσονται μικρότερες καμπτικές ροπές. Το τελευταίο γεωμετρικό κομμάτι του μοντέλου που θα βελτιστοποιηθεί είναι ο κάθετος άξονας στον οποίον εδράζεται ο ηλεκτροκινητήρας και η έλικα. Το μήκος του είναι δύο φορές η ακτίνα της στεφάνης $2a$ (βλ. Σχήμα 4.2) και η διατομή του (βλ. Σχ. 4.6) επιλέχθηκε για τους ίδιους λόγους με τα προαναφερθέντα ως:

$$r_{os} = 5mm \quad (4-31)$$

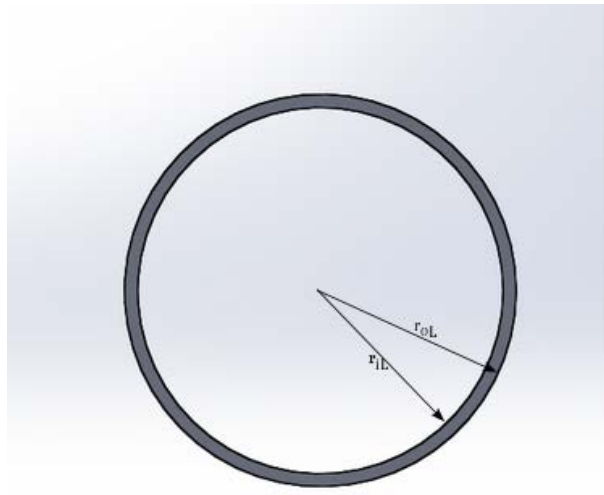
και

$$r_{is} = 4.5mm \quad (4-32)$$

Όπως και στον κυκλικό δίσκο τα υλικά των ποδιών, των στεφανών και των αξόνων είναι από ντουραλουμίνιο και έτσι η πυκνότητα τους είναι γνωστή και ίση με $2700kg / m^3$.



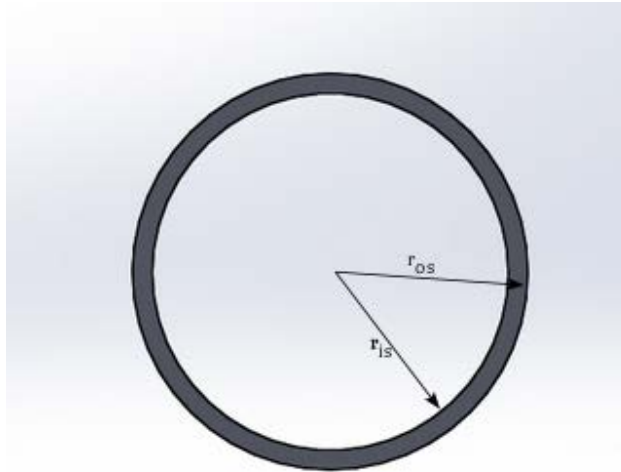
Σχήμα 4.3. Βάση ως κυκλικός δίσκος.



Σχήμα 4.4. Διατομή Ποδιού.



Σχήμα 4.5. Διατομή στεφάνης.



Σχήμα 4.6. Διατομή άξονα κάθετου στο πόδι.

Στα ΙΣΗΕ εμφανίζεται επιπλέον η μάζα του δεύτερου ηλεκτρικού σερβοκινητήρα, ο οποίος είναι στην ουσία υπεύθυνος για τη δημιουργία της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής. Η μάζα αυτού θα συμβολίζεται ως m_{s2} και τοποθετείται στο ένα άκρο της στεφάνης σε απόσταση a από το κέντρο της. Στο άλλο άκρο της στεφάνης και αντιδιαμετρικά τοποθετείται ένα αντίβαρο μάζας m_w , το οποίο ισούται με την m_{s2} ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση της Παρ. 3.1 για την τοποθέτηση του κέντρου μάζας στο επίπεδο των ποδιών και της βάσης. Τέλος, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα συμπεράσματα των Παρ. 3.1 και Παρ. 3.2, στο μέσο της απόστασης αυτών των μαζών m_w και m_{s2} τοποθετείται το σύστημα που παράγει την ώση (ηλεκτροκινητήρας και έλικα). Η μάζα αυτού θα συμβολίζεται ως $m_{mot} + m_{prop}$. Σημειώνεται ότι τα προαναφερθέντα φαίνονται στο Σχ. 4.2.

4.3.1 Μορφή δυναμικών εξισώσεων σύμφωνα με τη συγκεκριμένη γεωμετρία του ρομπότ

Το δυναμικό μοντέλο του [1] και κατ'επέκταση οι απλοποιημένες Εξ. (4-21), περιγράφουν το υπό μελέτη όχημα, το οποίο αποτελείται από τέσσερα συστήματα σωμάτων (βλ. Σχ. 4.1 και 4.2). Το πρώτο και κυριότερο είναι το σύστημα της βάσης το οποίο έχει μοντελοποιηθεί ως μία μάζα και αδράνεια m_b και \mathbf{J} . Τα άλλα τρία συστήματα σωμάτων είναι τα ΙΣΗΕ, τα οποία ισοδυναμούν με μία μάζα m_p και ένα μητρώο αδράνειας \mathbf{J}_p . Έτσι, αυτοί οι όροι είναι σημαντικό να παραμετροποιηθούν σύμφωνα με τη μορφή αυτού του ρομπότ και να πάρουν μια συγκεκριμένη αναλυτική έκφραση. Επιπρόσθετα, άλλοι όροι της Εξ. (4-21) οι οποίοι θα εκφραστούν ως αναλυτικές συναρτήσεις του πραγματικού μηχανισμού μας είναι τα διανύσματα ${}^b\mathbf{p}_i$ (μέσω του μήκους L) που συνδέουν τα συστήματα της βάσης και του ηλεκτροκινητήρα και το διανύσμα ${}^b\mathbf{M}_{p,i}$ (μέσω της σταθεράς b) το οποίο είναι η ροπή που ασκείται στη βάση λόγω της δύναμης ώσης.

Μάζα του συστήματος της βάσης m_b και του ΙΣΗΕ m_p

Η μάζα του συστήματος της βάσης (βλ. Σχ. 4.2) είναι κατά τα προαναφερθέντα ίση με το άθροισμα των τριών ηλεκτρικών σερβοκινητήρων υπεύθυνων για τη δημιουργία της πρώτης

ανεξάρτητης περιστροφής, των τριών ESC για την οδήγηση των ηλεκτροκινητήρων, της μπαταρίας τροφοδοσίας και της μάζας του κυκλικού δίσκου. Σε αυτά, προστίθεται η μισή μάζα του ποδιού, κάνοντας την εκτίμηση (για την περίπτωση της μάζας) ότι το πόδι ανήκει κατά το ήμισυ στο σύστημα της βάσης και κατά το άλλο ήμισυ στο ΙΣΗΕ. Τέλος, στη μάζα του συστήματος της βάσης προστίθεται και ο όρος m_{ad} ο οποίος είναι θεμελιώδης και καθοριστικός για τη διαστασιολόγηση του οχήματος μας και δείχνει στην ουσία το ωφέλιμο φορτίο-payload του οχήματος. Αυτό αντιπροσωπεύει ηλεκτρονικά, την κάμερα, συστήματα εδράσεων και στηρίξεων και γενικότερα στοιχεία μηχανών τα οποία αναμένεται να εισαχθούν αργότερα στο λεπτομερή σχεδιασμό του οχήματος. Έτσι:

$$m_b = 3m_{s1} + 3m_{ESC} + m_\delta + m_{bat} + 3\frac{m_L}{2} + m_{ad} \quad (4-33)$$

όπου:

$$m_\delta = 2700(\pi R_\delta^2)t_\delta \quad (4-34)$$

$$m_L = 2700\pi(r_{oL}^2 - r_{iL}^2)L \quad (4-35)$$

Η μάζα του ΙΣΗΕ (βλ. Σχ. 4.2) προκύπτει από το άθροισμα της μάζας του αντιβάρου, της μάζας του δεύτερου ηλεκτρικού σερβοκινητήρα, του συστήματος ηλεκτροκινητήρα-έλικας, του άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής, της στεφάνης και της μισής μάζας του ποδιού. Σημειώνεται το εξής. Οι μάζες στα άκρα της στεφάνης (βλ. Σχ. 4.2) είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη ροπή αδράνειας του οχήματος διότι βρίσκονται σε μακρινή απόσταση a από τον άξονα του ποδιού. Επομένως, στις μάζες m_{s2} και m_w προστίθεται μία αντιπροσωπευτική μάζα 10 γραμμαρίων, η οποία συμβολίζει προκαταρκτικά τις εδράσεις του κάθετου άξονα (βλ. Σχ. 2.5) και γενικότερα οποιαδήποτε πρόσθετη μάζα μπορεί στο λεπτομερή σχεδιασμό και στην κατασκευή να προκύψει, όπως για παράδειγμα κάποιος δακτύλιος ολίσθησης καλωδίων, η στήριξη για το σερβοκινητήρα κ.ο.κ. Έτσι:

$$m_p = (m_{s2} + 0.01) + (m_w + 0.01) + (m_{mot} + m_{prop}) + m_s + m_h + \frac{m_L}{2} \quad (4-36)$$

όπου:

$$m_s = 2700\pi(r_{os}^2 - r_{is}^2)2a \quad (4-37)$$

$$m_h = 2700\pi a(\pi(r_{oh}^2 - r_{ih}^2)) \quad (4-38)$$

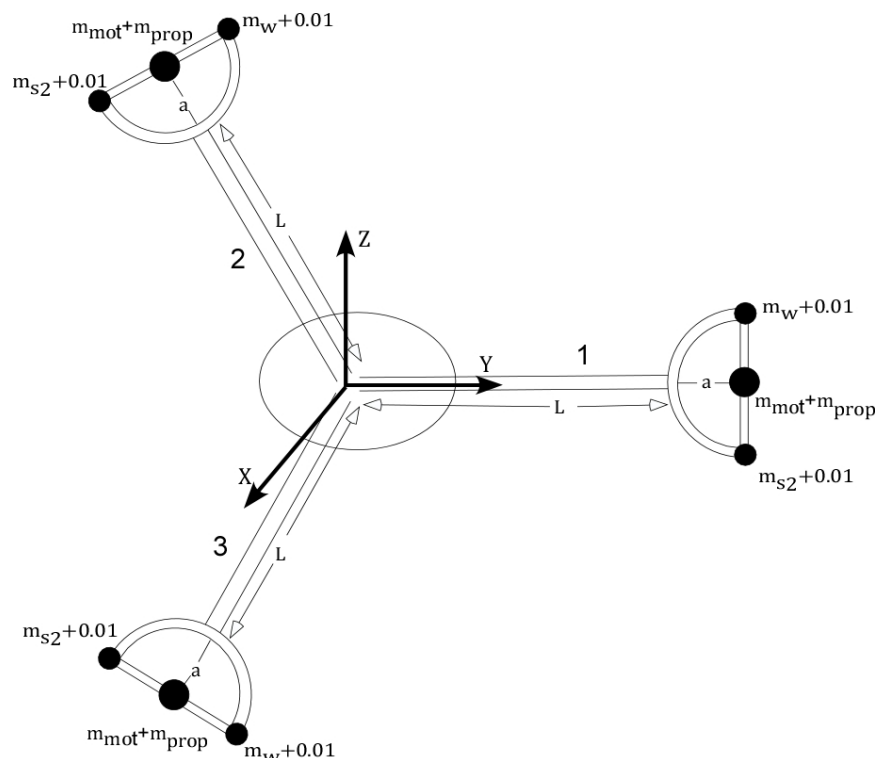
Ροπές αδράνειας της βάσης J και των ΙΣΗΕ J_p

Οι ροπές αδράνειας της βάσης εξάγονται σύμφωνα με την εξής διαδικασία. Αρχικά, οι αδράνεις των γεωμετρικών μεγεθών που εμφανίζονται στο μοντέλο όπως ο κυκλικός δίσκος, τα πόδια, οι στεφάνες και οι κάθετοι άξονες στα πόδια υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο $\int r^2 dm$ για συνεχή μέσα, σε συνδυασμό με τη χρήση του θεωρήματος Steiner όπου χρειάζεται. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με αυτά παραπέμπουμε στο [17].

Οποιοδήποτε άλλο μέγεθος θεωρείται ως σημειακή μάζα και συνεισφέρει στην τελική αδράνεια μόνο μέσω της απόστασης της από τον εκάστοτε άξονα. Δεδομένου ότι στις εξισώσεις το μητρώο \mathbf{J} είναι εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα της βάσης, οι υπολογισμοί γίνονται ως προς το σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) (βλ. Σχ. 4.7). Επίσης, το μητρώο \mathbf{J} λαμβάνεται ως πλήρως διαγώνιο και σταθερό, αποφεύγοντας έτσι πολύπλοκους υπολογισμούς και εκφράσεις. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με τη διαδικασία υπολογισμού αυτής της μήτρας που ακολουθήθηκε και φαίνεται στο Παράρτημα Β, στην Παρ. Β.2, αυτή η μήτρα μεταβάλλεται και εξαρτάται από τις τιμές των γωνιών των δύο ανεξάρτητων περιστροφών. Αυτό όμως δε λαμβάνεται υπόψιν αφού έχει αμελητέα επίδραση στα τελικά αποτελέσματα της μεθοδολογίας που ακολουθεί. Σύμφωνα με αυτά, το μητρώο αδράνειας της βάσης προκύπτει:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} I_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & I_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (4-39)$$

όπου τα μεγέθη I_{XX} , I_{YY} , I_{ZZ} και ο τρόπος με τον οποίον υπολογίσθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Β, Παρ. Β.2.

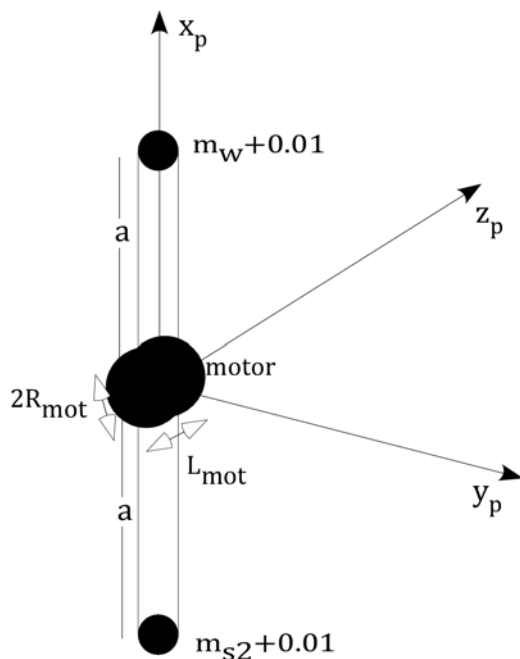


Σχήμα 4.7. Απεικόνιση του οχήματος για αδράνεια βάσης.

Για το μητρώο αδράνειας \mathbf{J}_p ισχύουν τα εξής. Λόγω της φύσης της μοντελοποίησης στο [1] η οποία αντιμετωπίζει στην ουσία το όχημα σαν τέσσερα συστήματα σωμάτων, γίνεται ο εξής διαχωρισμός. Θεωρείται αρχικά ότι στην αδράνεια του ΙΣΗΕ, συνεισφέρουν ο ηλεκτροκινητήρας και η έλικα και ο κάθετος στο πόδι άξονας. Επειδή θα υπήρχε τόσο ο

κίνδυνος υπερδιαστασιολόγησης αν εισάγονταν στα παραπάνω και η αδράνεια του μισού ποδιού, της στεφάνης και των μαζών στα άκρα της, όσο ο κίνδυνος υποδιαστασιολόγησης αν αμελούσαμε εντελώς τα τελευταία, επιλέγεται μια μέση λύση η οποία φαίνεται στο Σχ. 4.8 και περιλαμβάνει επιπρόσθετα το αντίβαρο και το δεύτερο σερβοκινητήρα ως σημειακές μάζες. Σε αυτές προστίθενται και οι δύο μάζες των 10 γραμμαριών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η αδράνεια λόγω του άξονα υπολογίζεται όπως και στη βάση μέσω της σχέσης $\int r^2 dm$. Με την ίδια σχέση υπολογίζεται και η ροπή αδράνειας του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος πλέον δεν είναι μια σημειακή μάζα αλλά ένας κύλινδρος μάζας $m_{mot} + m_{prop}$ σταθερής ακτίνας και μήκους R_{mot} και L_{mot} αντίστοιχα (βλ. Σχ. 4.8).

Το σύστημα ως προς το οποίο εκφράζονται αυτές είναι το (x_p, y_p, z_p) και βρίσκεται στο κέντρο μάζας του συστήματος ηλεκτροκινητήρα-έλικας, το οποίο αντιπροσωπεύει το κέντρο μάζας όλου του ΙΣΗΕ. Σημειώνεται τέλος ότι λόγω της γεωμετρίας της έλικας και του μη σταθερού προσανατολισμού της, το πραγματικό μητρώο αδράνειας αναμένεται να είναι μη διαγώνιο και μεταβλητό, κάτι που δε λαμβάνεται υπόψιν στην παρούσα μελέτη αφού έχει αμελητέα επίδραση στα τελικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.8. Συνιστώσες ΙΣΗΕ που συνεισφέρουν στο μητρώο αδράνειας \mathbf{J}_p .

Έτσι, έχουμε:

$$\mathbf{J}_p = \begin{bmatrix} I_{x_p} & 0 & 0 \\ 0 & I_{y_p} & 0 \\ 0 & 0 & I_{z_p} \end{bmatrix} \quad (4-40)$$

όπου:

$$I_{xyp} = \frac{m_s(r_{os}^2 + r_{is}^2)}{2} + (m_{mot} + m_{prop}) \frac{L_{mot}^2}{12} \quad (4-41)$$

$$I_{yyp} = \frac{m_s a^2}{3} + (m_w + m_{s2} + 0.02)a^2 + (m_{mot} + m_{prop}) \frac{L_{mot}^2}{12} \quad (4-42)$$

$$I_{zyp} = \frac{m_s a^2}{3} + (m_w + m_{s2} + 0.02)a^2 + (m_{mot} + m_{prop}) \frac{R_{mot}^2}{2} \quad (4-43)$$

Όροι ${}^b \mathbf{p}_i$ και ${}^b \mathbf{M}_{p,i}$

Το διάνυσμα ${}^b \mathbf{p}_i$ όπως έχει αναφερθεί και στην Παρ. 4.2 συνδέει το σύστημα της βάσης με το κάθε i ΙΣΗΕ. Έτσι για το δικό μας ρομπότ και τους συμβολισμούς του Σχ. 4.7 έχουμε:

$${}^b \mathbf{p}_1 = [0 \quad L \quad 0]^T \quad (4-44)$$

$${}^b \mathbf{p}_2 = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} L \quad L \quad 0 \right]^T \quad (4-45)$$

$${}^b \mathbf{p}_3 = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} L \quad L \quad 0 \right]^T \quad (4-46)$$

Το διάνυσμα ${}^b \mathbf{M}_{p,i}$ είναι η ροπή η οποία ασκείται στη βάση λόγω της δύναμης ώσης f_i και αν ακολουθήσουμε τους συμβολισμούς του Σχ. 4.1 ισχύει:

$${}^b \mathbf{M}_{p,i} = b [0 \quad 0 \quad f_i]^T \quad (4-47)$$

όπου η σταθερά b είναι κατά τα προαναφερθέντα η σταθερά μετατροπής της δύναμης ώσης σε ροπή αντίσταση της έλικας. Αυτή η σταθερά εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας που είναι η διάμετρος της D_p και το γεωμετρικό της βήμα p . Συνεπώς, έχουμε αναλυτική έκφραση και αυτού του όρου της Εξ. (4-21), συναρτήσει ενός μεγέθους που εξαρτάται από μια πραγματική συνιστώσα του μηχανισμού.

4.3.2 Παραμετροποίηση και εισαγωγή αναλυτικών σχέσεων για τις συνιστώσες του οχήματος

Στις παραπάνω εξισώσεις όπως φάνηκε εμφανίζονται εκτός των γεωμετρικών μεγεθών του ρομπότ οι μάζες των υπόλοιπων συνιστωσών που τις αποτελούν καθώς και μέσω της σταθεράς b τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας. Επιπρόσθετα, προκειμένου να καταστρωθεί μια αναλυτική διαδικασία η οποία μέσω της Εξ. (4-21) να υπολογίζει το βέλτιστο συνδυασμό των συνιστωσών του ρομπότ ώστε να ικανοποιούνται ορισμένες απαιτήσεις, πρέπει να υπάρχουν αναλυτικές εκφράσεις για τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των συνιστωσών αυτών. Έτσι, με τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων του [15] θα παραμετροποιηθούν όλα τα χαρακτηριστικά που χρειάζονται για τη συγκεκριμένη ανάλυση.

Ηλεκτροκινητήρες (Brushless Outrunner DC motor)

Οι ηλεκτροκινητήρες οι οποίοι παραμετροποιήθηκαν στο [15] είναι από την εταιρεία AXI [18]. Η εταιρεία αυτή είναι γνωστή για την ποιότητα και την αξιοπιστία των προϊόντων της και επιλέχθηκε κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας των τεχνικών χαρακτηριστικών των προϊόντων της. Σημειώνεται ότι εξίσου αξιόπιστες και ποιοτικές εταιρείες για Brushless Outrunner DC motors είναι η Scorpio [19], η Hacker [20] και η T-motors [21]. Παράδειγμα ενός ηλεκτροκινητήρα της εταιρείας AXI φαίνεται στο Σχ. 4.9.



Σχήμα 4.9. Brushless Outrunner DC motor της εταιρείας AXI [18].

Οι αναλυτικές εκφράσεις όλων των χαρακτηριστικών του ηλεκτροκινητήρα εξήχθησαν συναρτήσει ενός ισοδύναμου χαρακτηριστικού μήκους l_{mot} το οποίο ισούται με την κυβική ρίζα του πραγματικού όγκου του κάθε ηλεκτροκινητήρα.

Από όλες τις αναλυτικές εκφράσεις που έχουν εξαχθεί στο [15] για αυτούς τους ηλεκτροκινητήρες, εδώ θα παρουσιαστούν αυτές που περιλαμβάνουν τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Αυτά είναι η μέγιστη ροπή εκκίνησης του ηλεκτροκινητήρα M_{max} , η ροπή κενού-ροπή χωρίς φορτίο M_o , η μέγιστη γωνιακή του ταχύτητα ω_{max} και τέλος η σταθερά μετατροπής ρεύματος σε ροπή K_T . Η σταθερά K_T υπακούει στη σχέση:

$$M = K_T i + M_o \quad (4-48)$$

όπου i το ρεύμα που απαιτείται για ανάπτυξη ροπής M . Για την καλύτερη κατανόηση, τα μεγέθη αυτά φαίνονται στο Σχ. 4.10 και επίσης παραπέμπουμε στο [22] για εκτενείς πληροφορίες σχετικά με DC motors. Τέλος, είναι απαραίτητο να έχουμε αναλυτική έκφραση και για την μάζα του ηλεκτροκινητήρα m_{mot} . Έτσι, οι σχέσεις παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών των ηλεκτροκινητήρων και της μάζας τους είναι:

$$M_{max} = 4.5004 \cdot 10^5 l_{mot}^{4.222} \quad (4-49)$$

$$M_o = 5.7221 \cdot 10^2 l_{mot}^{3.1888} \quad (4-50)$$

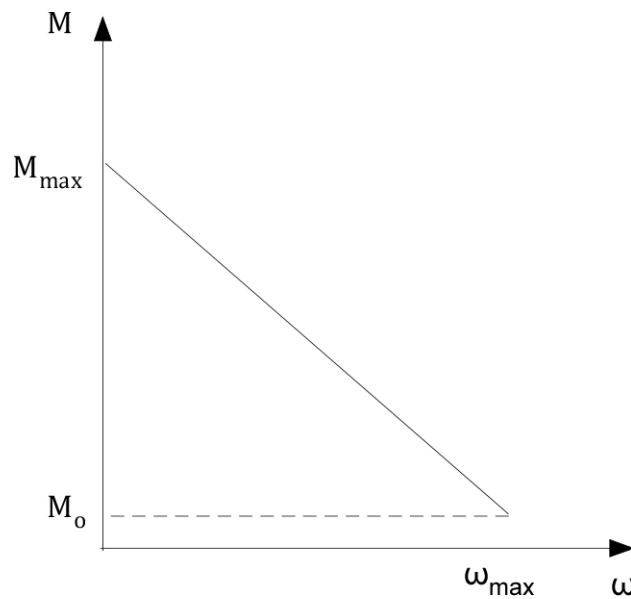
$$\omega_{max} = 853.467 \pi e^{-17.687 l_{mot}} \quad (4-51)$$

$$K_T = 6.61365 l_{mot}^{1.8801} \quad (4-52)$$

$$m_{mot} = 2942l_{mot}^3 \quad (4-53)$$

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω σχέσεις απαιτούν όλα τα μεγέθη να είναι εκφρασμένα στο σύστημα SI. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι Εξ. (4-49)-(4-53) ισχύουν για:

$$0.01 \leq l_{mot} \leq 0.08 \quad (m) \quad (4-54)$$



Σχήμα 4.10. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών για έναν DC motor.

Οδηγήσεις των ηλεκτροκινητήρων-ESC (Electronic Speed Controller)

Τα ESC τα οποία παραμετροποιήθηκαν στο [15] είναι της εταιρείας JETI [23] λόγω της αξιοπιστίας των προϊόντων της αλλά και της διαθεσιμότητας των τεχνικών χαρακτηριστικών της. Παράδειγμα τέτοιου προϊόντος φαίνεται στο Σχ. 4.11.

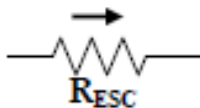


Σχήμα 4.11 Δείγμα ESC της εταιρείας JETI [23].

Σημειώνεται ότι στο [15] οι ESC έχουν μοντελοποιηθεί ως συνεχείς αντιστάσεις (βλ. Σχ. 4.12) με τιμή αντίστασης:

$$R_{ESC} = 0.015\Omega \quad (4-55)$$

τιμή η οποία ταυτίζεται με την αντίσταση πλήρους ανοικτής λειτουργίας των τρανζίστορ τους.



Σχήμα 4.12. ESC ως μια συνεχής αντίσταση.

Τα μεγέθη τα οποία μας ενδιαφέρουν εδώ, είναι το μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας (sustained current) του ESC, i_{ESC} και η μάζα του, m_{ESC} . Όπως και στην περίπτωση του ηλεκτροκινητήρα, τα μεγέθη αυτά εκφράζονται συναρτήσει ενός χαρακτηριστικού μήκους l_{ESC} . Έτσι, λαμβάνουμε από το [15]:

$$i_{ESC} = 8.4545 \cdot 10^6 l_{ESC}^{3.2451} \quad (4-56)$$

$$m_{ESC} = 2580 l_{ESC}^3 \quad (4-57)$$

Οι Εξ. (4-56) και (4-57) ικανοποιούνται όταν τα μεγέθη είναι εκφρασμένα στο S.I. και για το εξής εύρος του χαρακτηριστικού μήκους l_{ESC} :

$$0.005 \leq l_{ESC} \leq 0.05 \quad (m) \quad (4-58)$$

Μπαταρία (LiPo)

Δεδομένης της μεγάλης πυκνότητας ενέργειας τους (Wh/kg) όλα τα ιπτάμενα οχήματα χρησιμοποιούν μπαταρίες LiPo οι οποίες αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία (cells) συνδεδεμένα παράλληλα και σε σειρά. Το κάθε στοιχείο έχει ονομαστική τάση $3.7V$. Όταν είναι πλήρως φορτισμένο η τάση του φτάνει τα $4.2V$ ενώ για την αφόρτιστη κατάσταση είναι περίπου $2.7V$. Το πώς θα γίνει η σύνδεση εξαρτάται από την απαιτούμενη τάση τροφοδοσίας και την ενέργεια που απαιτείται να καλύψει η μπαταρία. Αν συμβολίσουμε με n_c τα στοιχεία της μπαταρίας που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και με n_p τα παράλληλα τότε ισχύει για την τάση της μπαταρίας:

$$V_b = n_c 3.7 \quad (4-59)$$

ενώ για την ενέργεια της μπαταρίας:

$$E_{bat} = n_c n_p E_{sc} \quad (4-60)$$

όπου E_{sc} η ενέργεια του κάθε στοιχείου της μπαταρίας.

Για την πληρότητα συμπληρώνεται ένα άλλο μέγεθος αυτών των μπαταριών με το οποίο είναι γνωστές στην αγορά και είναι ισοδύναμο του E_{sc} . Για ονομαστική τάση κάθε στοιχείου 3.7V ορίζεται ως χωρητικότητα ενός στοιχείου το μέγεθος C_{sc} για το οποίο ισχύει:

$$C_{sc} = E_{sc} / 3.7 \quad (4-61)$$

και οι μονάδες της είναι σε Ah . Σημειώνεται ότι η πιο συνήθης διάταξη των LiPo στοιχείων σε εφαρμογές ιπτάμενων ρομπότ είναι τρία σε σειρά. Γιαυτό το λόγο εμφανίζεται συχνά η τιμή τάσης 11.1V (βλ. Εξ. (4-59) και τα brushless outrunner dc motors σχεδιάζονται κατά κόρον για λειτουργία σε σύνδεση με μπαταρίες τριών στοιχείων και άρα για τάση 11.1V.

Στο [15] η παραμετροποίηση της μπαταρίας έγινε βασισμένη σε διαθέσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν ένα στοιχείο. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι η μπαταρία είναι ένα ισοδύναμο στοιχείο. Οι μπαταρίες για τις οποίες εξήχθησαν αναλυτικές εκφράσεις στο [15] είναι της εταιρείας Kokam λόγω της αξιοπιστίας τους αλλά και της διαθεσιμότητας των τεχνικών χαρακτηριστικών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη δε θα χρησιμοποιήσουμε αυτές τις αναλυτικές εκφράσεις διότι εξήχθησαν το 2012 με αποτέλεσμα να έχουν αλλάξει σε έναν μικρό βαθμό τα προϊόντα και τα χαρακτηριστικά αυτών. Ο κύριος λόγος όμως για τον οποίο θα γίνει εξαγωγή νέων αναλυτικών εκφράσεων είναι διότι στο [15] οι μπαταρίες οι οποίες έχουν παραμετροποιηθεί είναι μικρού μεγέθους (έως 3.6Ah).

Η παραμετροποίηση θα βασιστεί όπως και στο [15] στα τεχνικά χαρακτηριστικά της εταιρείας Kokam [24] για ένα μόνο στοιχείο. Παράδειγμα μιας μπαταρίας από αυτήν την εταιρεία δίνεται στο Σχ. 4.13, η οποία αποτελείται από τέσσερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά (βλ. 4S συμβολισμό στο Σχ. 4.13), κανένα παράλληλα (βλ. 1P στο Σχ. 4.13) και ενέργειας 5000mAh.



Σχήμα 4.13. Δείγμα μπαταρίας από την εταιρεία Kokam [24].

Εξάγουμε λοιπόν αναλυτικές εκφράσεις για όλα τα μεγέθη της μπαταρίας που μας ενδιαφέρουν συναρτήσει του όγκου της V_{bat} . Τα μεγέθη αυτά είναι η ενέργεια E_{bat} και η μάζα της m_{bat} . Στους Πίν. 4-1 και 4-2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά για ένα στοιχείο

(cell) όπως προκύπτουν από τους καταλόγους της εταιρείας Kokam, στα οποία θα γίνει παρεμβολή για να προκύψουν αναλυτικές σχέσεις για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν.

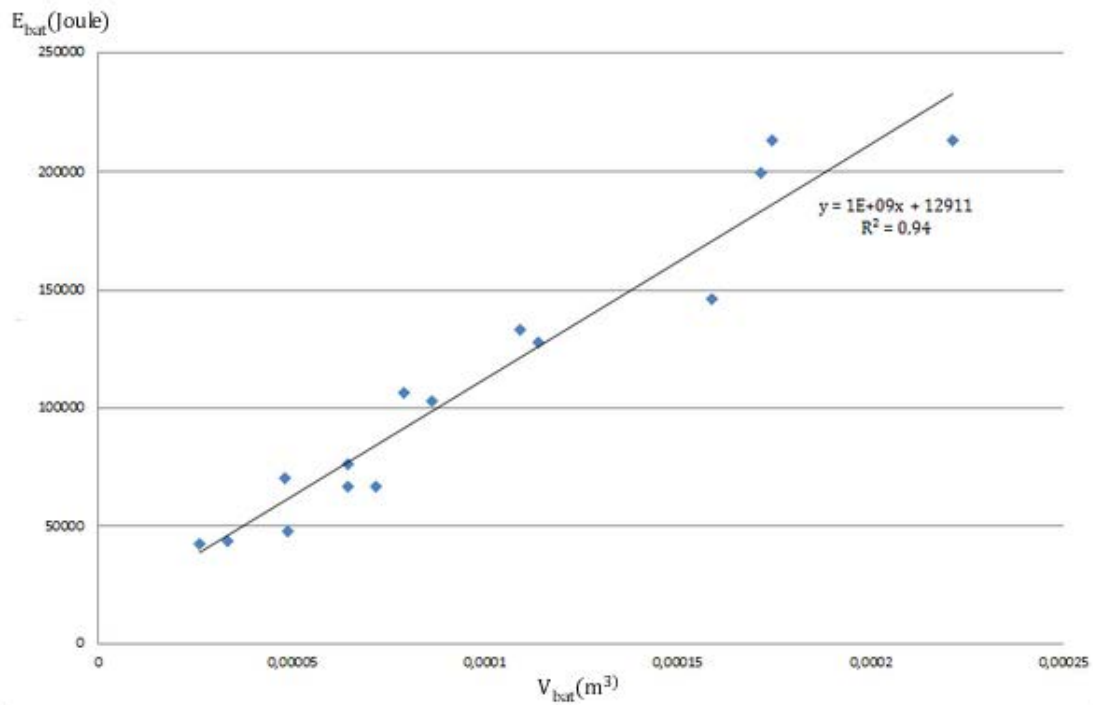
Πίνακας 4-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά LiPo μπαταριών της εταιρείας Kokam

Type	Model	Capacity (Ah)	W (mm)	L (mm)	T (mm)
3~5Ah	SLPB8043128H	3.2	43	128	4.7
	SLPB526495	3.3	64.5	95.5	5.4
	SLPB8643128H5	3.6	43	129	8.8
	SLPB11543140H5	5	43	142.5	11.7
	SLPB50106100	5	107	102	5.9
	SLPB0106100	5	107	102	5.9
5~10Ah	SLPB776495	5.3	64.5	95.5	7.8
	SLPB75106100	7.5	107	102	7.9
	SLPB68106100	8	107	102	7.25
	SLPB7570180	9.6	82	183	7.6
10~20Ah	SLPB98106100	10	107	102	10
	SLPB55205130H	11	207	137	5.6
	SLPB7570270	15	82	272	7.7
	SLPB75106205	16	107	209	7.8
	SLPB78205130H	16	207	137	7.8

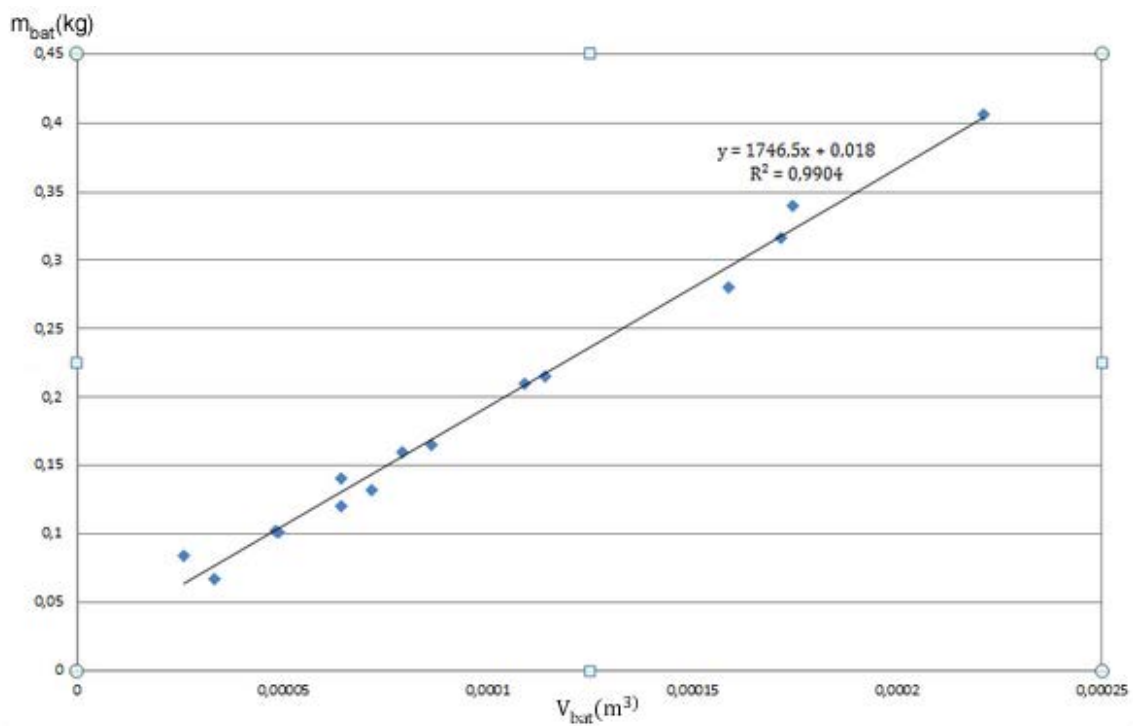
Πίνακας 4-2. (Συνέχεια) Τεχνικά χαρακτηριστικά LiPo μπαταριών της εταιρείας Kokam

Weight (g)	Energy density (Wh/kg)	Energy (Joule)	Volume (10^{-5} m^3)
84	141	42638.4	2.59
67	182	43898.4	3.33
101	132	47995.2	4.88
132	140	66528	7.17
120	154	66528	6.44
140	151	76104	6.44
102	192	70502.4	4.80
165	173	102762	8.62
160	185	106560	7.91
215	165	127710	11.40
210	176	133056	10.91
280	145	146160	15.88
317	175	199710	17.17
340	174	212976	17.44
406	146	213393.6	22.12

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα προκύπτουν τα Σχ. 4.14 και 4.15 στα οποία απεικονίζονται γραφικά η ενέργεια της μπαταρίας E_{bat} και η μάζα της m_{bat} συναρτήσεως του όγκου της V_{bat} αντίστοιχα. Επιπρόσθετα στα διαγράμματα αυτά φαίνεται η αναλυτική σχέση η οποία παρεμβάλλει τα σημεία αυτά καθώς και ο αντίστοιχος στατιστικός δείκτης R^2 .



Σχήμα 4.14. Συσχέτιση ενέργειας μπαταρίας E_{bat} με τον όγκο της V_{bat} .



Σχήμα 4.15. Συσχέτιση μάζας μπαταρίας m_{bat} με τον όγκο της V_{bat} .

Συνεπώς, από τα Σχ. 4.14 και 4.15 παίρνουμε τις εξής αναλυτικές εκφράσεις για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν:

$$E_{bat} = 10^9 V_{bat} + 12911 \quad (4-62)$$

$$m_{bat} = 1746.5V_{bat} + 0.018 \quad (4-63)$$

Σημειώνεται ότι οι σχέσεις αυτές ικανοποιούνται όταν τα μεγέθη είναι εκφρασμένα στο SI και όταν η μεταβλητή V_{bat} ανήκει στο εύρος που ακολουθεί:

$$2.59 \cdot 10^{-5} \leq V_{bat} \leq 22.12 \cdot 10^{-5} \quad (m^3) \quad (4-64)$$

Έλικα

Στο [15] οι έλικες οι οποίες παραμετροποιήθηκαν επιλέχθηκαν να είναι της εταιρείας APC [25] λόγω της αξιοπιστίας της αλλά και της ύπαρξης πειραματικών δεδομένων για αυτές. Η παραμετροποίηση έγινε συναρτήσει της διαμέτρου της έλικας D_p και του γεωμετρικού της βήματος p . Παράδειγμα έλικας από αυτήν την εταιρεία φαίνεται στο Σχ. 4.16.



Σχήμα 4.16. Δείγμα έλικας της εταιρείας APC [25].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ώσης C_T (βλ. [11]) για τον οποίο ισχύει

$$f = C_T \omega^2 \quad (4-65)$$

(όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της έλικας και f η δύναμη ώσης) έχει αποδειχθεί στο [15] ότι εξαρτάται από το λόγο p/D_p , είναι συνάρτηση δηλαδή μόνο των γεωμετρικών μεγεθών της έλικας. Αυτό προέκυψε μέσω της υπόθεσης ότι το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση αιώρησης (hover) και άρα έχουμε μηδενικές ταχύτητες πτήσης. Έτσι, επισημαίνεται ότι οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν και αποδείχθηκαν στη συγκεκριμένη δημοσίευση ισχύουν για την έλικα όταν το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση αιώρησης.

Τονίζεται ακόμη ότι οι έλικες οι οποίες παραμετροποιήθηκαν είναι της κατηγορίας SPORT και έτσι οι σχέσεις που ακολουθούν ισχύουν αποκλειστικά για αυτές.

Από το σύνολο των αναλυτικών σχέσεων που αποδείχθηκαν στο [15] εδώ παρουσιάζονται μόνο αυτές που περιλαμβάνουν τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Αυτά είναι

η σταθερά μετατροπής της δύναμης ώσης σε ροπή αντίστασης b , ο συντελεστής ώσης C_T και η μάζα της έλικας m_{prop} . Έτσι, έχουμε:

$$b = (0.0723(\frac{P}{D_p})^{1.5} + 0.0213)D_p / (2\pi(0.0266(\frac{P}{D_p}) + 0.0793)) \quad (4-66)$$

$$C_T = D_p^4 (0.007315(\frac{P}{D_p}) + 0.0218075) / \pi^2 \quad (4-67)$$

$$m_{prop} = 0.97573D_p^{2.5741} \quad (4-68)$$

με τις εκφράσεις αυτές να ικανοποιούνται για όλα τα μεγέθη εκφρασμένα σε S.I. και όταν:

$$0.2 \leq \frac{P}{D_p} \leq 1.5 \quad (4-69)$$

$$0.05 \leq D_p \leq 0.5 \quad (m) \quad (4-70)$$

4.4 Κατάσρωση αναλυτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης των συνιστωσών και της γεωμετρίας του οχήματος

4.4.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Σκοπός είναι να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των συνιστωσών και της γεωμετρίας του ρομπότ ώστε αυτό να έχει μια ικανοποιητική συμπεριφορά. Αρχικά, η ελάχιστη και παράλληλα κεντρική απαίτηση είναι να μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση αιώρησης (hover). Επιπρόσθετα, αφού εξασφαλισθεί ότι ικανοποιείται επαρκώς η απαίτηση για αιώρηση, πρέπει το όχημα να έχει τη δυνατότητα να κινείται άνετα προς όλες τις κατευθύνσεις έστω X, Y, Z καθώς και να μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τους ίδιους άξονες. Δημιουργείται λοιπόν ένα πρόβλημα αντίστροφης δυναμικής στο οποίο πρέπει οι επενεργητές και οι ηλεκτροκινητήρες του οχήματος να μπορούν να καλύπτουν επαρκώς τις απαιτήσεις του οχήματος (τις οποίες επιβάλλουμε εμείς) σε ροπές και γωνιακές ταχύτητες σε οποιοδήποτε προσανατολισμό του οχήματος.

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι στην Παρ. 4.3.2 δεν έγινε κάποια παραμετροποίηση στους ηλεκτρικούς σερβοκινητήρες. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε θεωρεί τους σερβοκινητήρες ότι συνεισφέρουν στο σύστημα απλά ως μάζες m_{s1} και m_{s2} οι οποίες είναι γνωστές και σταθερές. Αφού προσδιορισθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ηλεκτροκινήρων, μπαταρίας, ESC, έλικας και γεωμετρικών μεγεθών του ρομπότ επιλέγουμε δύο πραγματικούς σερβοκινητήρες οι οποίοι φυσικά πρέπει να ελεγχθούν ότι ικανοποιούν τις απαιτήσεις-φορτία του ρομπότ.

Έτσι, τρέχει ο ελεγκτής [1] και η προσομοίωση που υλοποιεί αυτόν και έχει αναπτυχθεί από τον Υ.Δ Μιχάλη Ραμπ. Παράγονται λοιπόν οι απαιτήσεις σε ροπή και σε στροφές των σερβοκινητήρων και με αυτόν τον τρόπο ελέγχονται οι σερβοκινητήρες που επιλέχθηκαν ως προς την επάρκειά τους. Η λογική αυτή ακολουθείται κυρίως λόγω του γεγονότος ότι οι ηλεκτροκινητήρες παίζουν τον κεντρικό ρόλο στο σύστημα. Η ικανοποιητική συμπεριφορά

του συστήματος εξαρτάται άμεσα από τα μεγέθη M_{\max} και ω_{\max} των ηλεκτροκινητήρων και έμμεσα από τη σημαντική συνολική μάζα που εισάγουν αυτοί τόσο λόγω της ίδιας μάζας τους όσο και λόγω της μάζας της μπαταρίας, των ESC και της έλικας. Έτσι, η αυστηρή και ακριβής διαστασιολόγηση των ηλεκτροκινητήρων είναι θεμελιώδους σημασίας, συγκριτικά με της δευτερεύουσας σημασίας διαστασιολόγηση των σερβοκινητήρων. Υπενθυμίζεται άλλωστε ότι ο ρόλος των σερβοκινητήρων είναι να κατευθύνουν τους άξονες στις επιθυμητές γωνιακές θέσεις, οπότε τα ουσιαστικά φορτία τους είναι οι αδράνειες των φορτίων που οδηγούν και οι γυροσκοπικές ροπές λόγω της περιστροφής της έλικας (βλ. Σχ. 2.5).

Προκειμένου να προχωρήσουμε στην αναλυτική διαδικασία βελτιστοποίησης απαιτείται να γίνουν μερικές υποθέσεις και προσεγγίσεις για την περαιτέρω απλοποίηση των Εξ. (4-21). Να σημειωθεί ότι για τα διανύσματα που εκφράζουν τις γωνιακές επιταχύνσεις και ταχύτητες των ΙΣΗΕ ${}^m\dot{\omega}_i$ και ${}^m\omega_i$ αντίστοιχα, ισχύει:

$${}^m\dot{\omega}_i = \begin{bmatrix} {}^m\dot{\omega}_{i1} & {}^m\dot{\omega}_{i2} & {}^m\dot{\omega}_{i3} \end{bmatrix}^T \quad (4-71)$$

$${}^m\omega_i = \begin{bmatrix} {}^m\omega_{i1} & {}^m\omega_{i2} & {}^m\omega_{i3} \end{bmatrix}^T \quad (4-72)$$

όπου οι πρώτες δύο συνιστώσες των διανυσμάτων αυτών αφορούν στην ουσία τους δύο βαθμούς ελευθερίας οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την πλοήγηση της έλικας στο χώρο και άρα τους δύο σερβοκινητήρες. Οι τρίτες συνιστώσες στην ουσία αντιπροσωπεύουν τη γωνιακή επιτάχυνση και ταχύτητα της έλικας. Οι υποθέσεις που έγιναν είναι οι εξής:

- Οι σερβοκινητήρες θεωρείται ότι βρίσκονται στη μόνιμη κατάσταση (steady state) δηλαδή έχουν κατευθύνει την έλικα ακριβώς στο σημείο που απαιτείται και έτσι οι επιταχύνσεις τους είναι μηδενικές. Το ίδιο ισχύει για την έλικα η οποία θεωρούμε ότι δεν επιταχύνεται καθώς έχει πιάσει τις σταθερές απαιτούμενες στροφές για την παραγωγή της απαιτούμενη δύναμης ώσης. Αυτό μεταφράζεται σε:

$${}^m\dot{\omega}_i = 0 \quad (4-73)$$

- Η βάση θεωρείται ότι στιγμιαία είναι ακίνητη και άρα έχει μηδενική γωνιακή ταχύτητα. Το ίδιο θεωρήθηκε και για τις γωνιακές ταχύτητες που οφείλονται στους σερβοκινητήρες. Έτσι, έχουμε:

$${}^b\omega = 0 \quad (4-74)$$

$${}^m\omega_{i1} = {}^m\omega_{i2} = 0 \quad (4-75)$$

όπου για όλα τα παραπάνω ισχύει $i = 1, 2, 3$.

Σύμφωνα με αυτά λοιπόν οι Εξ. (4-21) παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$(m_b + 3m_p)\mathbf{I}_{3 \times 3} \dot{\mathbf{v}} - \mathbf{Q} \sum_{i=1}^3 {}^b\mathbf{F}_{p,i} - (\mathbf{g}_b + 3\mathbf{g}_p) = 0 \quad (4-76)$$

$$(\mathbf{J} + \sum_{i=1}^3 \mathbf{N}_i^*)^b \dot{\boldsymbol{\omega}} - \sum_{i=1}^3 {}^b \mathbf{p}_i \times ({}^b \mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_p) + \sum_{i=1}^3 \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{u}_i = 0 \quad (4-77)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & {}^m \omega_{1,3} \end{bmatrix}^T \times \mathbf{J}_p \begin{bmatrix} 0 & 0 & {}^m \omega_{1,3} \end{bmatrix}^T - \mathbf{Q}_1^T {}^b \mathbf{M}_{p1} - {}^m \mathbf{u}_1 = 0 \quad (4-78)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & {}^m \omega_{2,3} \end{bmatrix}^T \times \mathbf{J}_p \begin{bmatrix} 0 & 0 & {}^m \omega_{2,3} \end{bmatrix}^T - \mathbf{Q}_2^T {}^b \mathbf{M}_{p2} - {}^m \mathbf{u}_2 = 0 \quad (4-79)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & {}^m \omega_{3,3} \end{bmatrix}^T \times \mathbf{J}_p \begin{bmatrix} 0 & 0 & {}^m \omega_{3,3} \end{bmatrix}^T - \mathbf{Q}_3^T {}^b \mathbf{M}_{p3} - {}^m \mathbf{u}_3 = 0 \quad (4-80)$$

Επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων ως προς τις απαιτήσεις του συστήματος ουσιαστικά σημαίνει το εξής. Αν συμβολίσουμε με M_d^{\max} και ω_d^{\max} τη μέγιστη ροπή αντίστασης της έλικας (η οποία συνδέεται με τη δύναμη ώσης f μέσω της σταθεράς b) και τη μέγιστη γωνιακή της ταχύτητα αντίστοιχα, τότε πρέπει το ζεύγος $(\omega_d^{\max}, M_d^{\max})$ να ανήκει οριακά πάνω στην χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα (βλ. Σχ. 4.17). Βέβαια, αν το ζεύγος $(\omega_d^{\max}, M_d^{\max})$ προκύψει για την απαίτηση το όχημα οριακά να αιωρείται (hover) το να ανήκει πάνω στην χαρακτηριστική δε φτάνει. Αυτό θα σημαίνει στην ουσία ότι το όχημα δε θα έχει τη δυνατότητα μετακίνησης και περιστροφής στον χώρο αφού οριακά μπορεί να αιωρείται. Έτσι, απαιτείται το ζεύγος αυτό να βρίσκεται κάτω από αυτήν, δηλαδή στην κάτω περιοχή που ορίζει η χαρακτηριστική λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων (βλ. Σχ. 4.17). Δεδομένου ότι η εξίσωση της χαρακτηριστικής λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων είναι η:

$$M(\omega) = -\frac{M_{\max} - M_o}{\omega_{\max}} \omega + M_{\max} \quad (4-81)$$

τα προαναφερθέντα σημαίνουν ότι η επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων μεταφράζεται στην εξής σχέση:

$$M(\omega_d^{\max}) = 1.5M_d^{\max} \quad (4-82)$$

όπου ο συντελεστής 1.5 (50% δηλαδή πιο μεγάλη η ροπή του ηλεκτροκινητήρα) έχει αυτόν το ρόλο που προαναφέρθηκε να μετατοπίζει το σημείο $(\omega_d^{\max}, M_d^{\max})$ στην κάτω περιοχή που ορίζει η χαρακτηριστική λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων. Σημειώνεται ότι στην οριακή κατάσταση που ανήκει πάνω στην χαρακτηριστική ο συντελεστής αυτός θα ήταν ίσος με 1.

Επομένως, αν θεωρήσουμε τη διαδικασία αυτή ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που μεταβάλλει τις συνιστώσες του ρομπότ μέχρι να ικανοποιηθεί η Εξ. (4-82), η αντικειμενική συνάρτηση η οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι η:

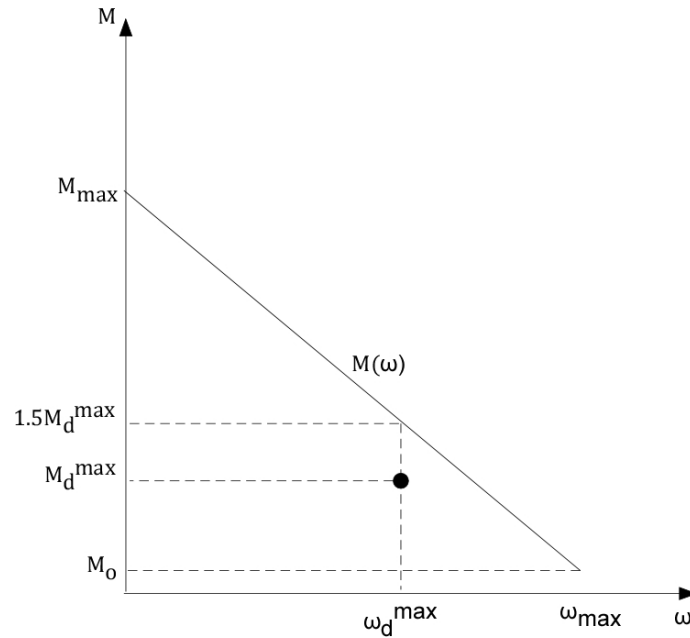
$$g = \min \left\{ (M(\omega_d^{\max}) - 1.5M_d^{\max})^2 \right\} \quad (4-83)$$

με τα μεγέθη ω_d^{\max} και M_d^{\max} να προκύπτουν από την επίλυση των Εξ. (4-76)-(4-80) με την επιπρόσθετη απαίτηση να ισχύει

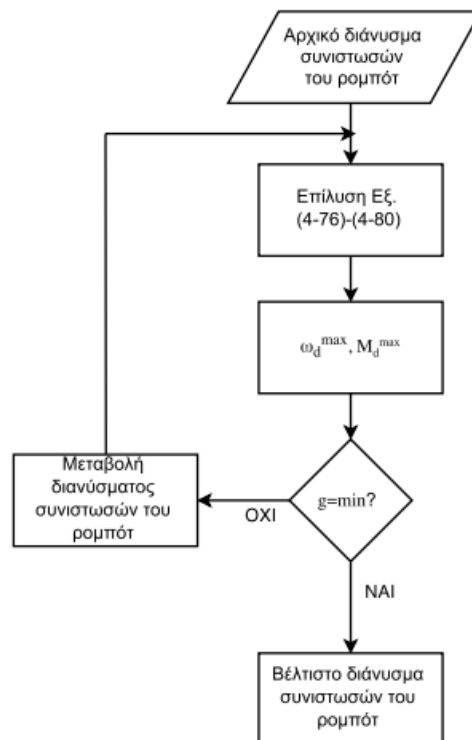
$$\dot{\mathbf{v}} = {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}} = 0 \quad (4-84)$$

αφού το όχημα θεωρείται ότι είναι στην κατάσταση αιώρησης οπότε οι γραμμικές και γωνιακές του επιταχύνσεις είναι μηδενικές.

Σε ένα πρώτο στάδιο λοιπόν, το πρόβλημα βελτιστοποίησης φαίνεται να έχει την μορφή του Σχ. 4.18.



Σχήμα 4.17. Χαρακτηριστική λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα και φορτία έλικας για αιώρηση.



Σχήμα 4.18. Γενικό διάγραμμα ροής προβλήματος βελτιστοποίησης.

4.4.2 Διάνυσμα σχεδιασμού

Τα μεγέθη τα οποία εμφανίζονται τόσο στην αντικειμενική συνάρτηση (4-83) όσο και στο σύστημα των Εξ. (4-76)–(4-80) μετά και την παραμετροποίηση κατά την Παρ. 4.3 συνοψίζεται ότι είναι τα εξής: $R_\delta, t_\delta, L, r_{oL}, r_{iL}, a, r_{oh}, r_{ih}, r_{os}, r_{is}, R_{mot}, L_{mot}$ και $l_{mot}, V_{bat}, l_{ESC}, D_p, p / D_p$. Επίσης, στις εξισώσεις αυτές εμφανίζονται επιπρόσθετα οι όροι $m_{ad}, m_{s1}, m_{s2}, m_w$. Ο Πιν 4-3 περιλαμβάνει συγκεντρωτικά όλες αυτές τις μεταβλητές καθώς και τον αριθμό των σχημάτων και των εξισώσεων στις οποίες εμφανίζονται αυτές.

Πίνακας 4-3. Μεταβλητές οι οποίες εμφανίζονται στις εξισώσεις και στην αντικειμενική συνάρτηση

Μεταβλητή	Σχήματα	Εξισώσεις
R_δ	4.3	(4-25), (4-34)
t_δ	4.3	(4-26), (4-34)
L	4.2	(4-35), (4-39), (4-44)-(4-46)
r_{oL}	4.4	(4-27), (4-35), (4-39)
r_{iL}	4.4	(4-28), (4-35), (4-39)
a	4.2	(4-36), (4-39), (4-40)
r_{oh}	4.5	(4-29), (4-38), (4-39)
r_{ih}	4.5	(4-30), (4-38), (4-39)
r_{os}	4.6	(4-31), (4-37), (4-39), (4-40)
r_{is}	4.6	(4-32), (4-37), (4-39), (4-40)
R_{mot}	4.8	(4-40), (4-88)
L_{mot}	4.8	(4-40), (4-89)
l_{mot}	-	(4-49)-(4-52)
V_{bat}	-	(4-62)-(4-63)
l_{ESC}	-	(4-56), (4-57)
D_p	-	(4-66)-(4-68)
p / D_p	-	(4-66), (4-67)
m_{ad}	4.2	(4-33)
m_{s1}	4.2	(4-33), (4-85)
m_{s2}	4.2	(4-36), (4-86)
m_w	4.2	(4-36), (4-87)

Από τους όρους $m_{ad}, m_{s1}, m_{s2}, m_w$ κανείς δεν μπορεί να θεωρηθεί μεταβλητή του συστήματος. Αρχικά, η μάζα m_{ad} όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 4.3.1 θα παίρνει σταθερές τιμές ώστε να προσομοιωθούν οποιοσδήποτε πιθανές προσθήκες μάζας, Επιπρόσθετα, όπως εξηγείται στην αρχή της Παρ. 4.4.1 οι σερβοκινητήρες εισάγονται στο σύστημα απλά ως μάζες. Τυπικές τιμές οι οποίες δίνονται αρχικά σε αυτές είναι:

$$m_{s1} = 25 \text{ gr} \quad (4-85)$$

$$m_{s2} = 10 \text{ gr} \quad (4-86)$$

Η μάζα του αντιβάρου είναι κατά τα γνωστά ίση με:

$$m_w = m_{s2} \quad (4-87)$$

Τα μεγέθη $R_\delta, t_\delta, r_{oL}, r_{iL}, r_{oh}, r_{ih}, r_{os}, r_{is}$ σε αυτή τη διαδικασία βελτιστοποίησης δε λαμβάνονται ως μεταβλητές αλλά είναι προκαθορισμένα και μάλιστα με τιμές οι οποίες φαίνονται στις Εξ. (4-25)-(4-32). Οι τιμές αυτές καθορίζουν κυρίως την αντοχή των αντίστοιχων σωμάτων και δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στη δυναμική του οχήματος. Έτσι, αφού προκύψουν οι συνιστώσες και η βασική γεωμετρία του ρομπότ, παράλληλα με το λεπτομερή σχεδιασμό του οχήματος θα γίνει και ένας βασικός έλεγχος αντοχής ο οποίος θα αποφανθεί για το πόσο και αν θα αλλάξουν οι τιμές αυτές. Τα μεγέθη R_{mot}, L_{mot} εμφανίζονται στην Εξ. (4-40) και θεωρούνται και αυτά σταθερά και ίσα με:

$$R_{mot} = 35mm \quad (4-88)$$

$$L_{mot} = 37mm \quad (4-89)$$

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να είναι πολύ κοντινές στις αντίστοιχες της πλειοψηφίας των ηλεκτροκινητήρων μεσαίου μεγέθους της εταιρείας AXI ώστε να προσομοιωθεί αρκετά ρεαλιστικά η αδράνεια του ΙΣΗΕ (βλ. Εξ. (4-40)). Τελικά λοιπόν, από τα σύνολο των γεωμετρικών μεγεθών $R_\delta, t_\delta, L, r_{oL}, r_{iL}, a, r_{oh}, r_{ih}, r_{os}, r_{is}, R_{mot}, L_{mot}$ τα μεγέθη τα οποία είναι μεταβλητές του συστήματος είναι μόνο το μήκος L του ποδιού και η ακτίνα a της στεφάνης. Ωστόσο όμως το μόνο ανεξάρτητο είναι το μέγεθος L αφού η ακτίνα a της στεφάνης θεωρείται ότι είναι ίση με την μισή διάμετρο της έλικας D_p .

Από τα μεγέθη $l_{mot}, V_{bat}, l_{ESC}, D_p, p/D_p$, τα οποία εισήχθησαν λόγω της παραμετροποίησης, αυτά που είναι ανεξάρτητα και άρα αποτελούν μεταβλητές του συστήματος είναι το ισοδύναμο χαρακτηριστικό μήκος του ηλεκτροκινητήρα l_{mot} και τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη της έλικας $D_p, p/D_p$. Συγκεκριμένα, το χαρακτηριστικό ισοδύναμο μήκος l_{ESC} καθορίζεται μέσω της Εξ. (4-56) η οποία δίνει το μέγιστο ρεύμα συνεχής λειτουργίας του ESC. Αν διαστασιολόγησουμε τους ESC με τέτοιο τρόπο ώστε το μέγιστο ρεύμα των ηλεκτροκινητήρων i_{max} να ισούται με το i_{ESC} , δηλαδή:

$$i_{ESC} = i_{max} \quad (4-90)$$

τότε μέσω της σχέσης:

$$i_{max} = \frac{M_{max} - M_o}{K_T} \quad (4-91)$$

και των αναλυτικών σχέσεων παρεμβολής για τα χαρακτηριστικά του ηλεκτροκινητήρα (βλ. Εξ.(4-49)-(4-52)), το l_{ESC} και l_{mot} είναι εξαρτημένα.

Σε ο.τι αφορά την μπαταρία, το μέγεθος V_{bat} καθορίζεται από τη σχέση παρεμβολής (4-62) η οποία δίνει την ενέργεια της μπαταρίας. Για τη διαστασιολόγηση της μπαταρίας λαμβάνουμε υπόψιν τα εξής για την ενέργεια που πρέπει να παρέχει. Τις μεγαλύτερες

απαιτήσεις σε ενέργεια τις έχουν οι ηλεκτροκινητήρες. Η ενέργεια για τρεις ηλεκτροκινητήρες είναι:

$$E_{mot} = 3 \frac{t_\lambda}{2} \left(\frac{M_{max} \omega_{max}}{4} + \frac{1}{2} \frac{M_{max} \omega_{max}}{4} \right) \quad (4-92)$$

όπου t_λ ο χρόνος που απαιτούμε να πετάει το ρομπότ και ισούται με δέκα λεπτά:

$$t_\lambda = 10 \text{ min} \quad (4-93)$$

Σημειώνεται ότι ο όρος $M_{max} \omega_{max} / 4$ στην Εξ. (4-92) είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ένας DC motor και έτσι η Εξ. (4-92) δείχνει ότι θεωρούμε το όχημα στο μισό χρόνο της πτήσης του να δίνει τη μέγιστη δυνατή ισχύ του και στο υπόλοιπο μισό να λειτουργεί στο μισό της μέγιστης ισχύος. Επιπρόσθετα, ο παράγοντας 3 δείχνει ότι αυτή είναι η συνολική απαίτηση σε ενέργεια και από τους τρεις ηλεκτροκινητήρες. Η επόμενη απαίτηση σε ενέργεια έρχεται από τους ESC. Δεδομένου ότι αυτοί έχουν μοντελοποιηθεί ως συνεχείς αντιστάσεις με τιμή αντίστασης $R_{ESC} = 0.015 \Omega$ (βλ. Εξ. (4-54)) η ενέργεια που καταναλώνουν και οι τρεις ESC είναι:

$$E_{ESC} = 3 i_{ESC}^2 0.015 t_\lambda \quad (4-94)$$

Σημειώνεται για την πληρότητα ότι στην πραγματικότητα ένα μικρό ποσό της ενέργειας της μπαταρίας θα καταναλώνεται και στους σερβοκινητήρες, φαινόμενο το οποίο αμελείται αφού όπως προαναφέρθηκε τους εισάγουμε στη διαδικασία ως απλές μάζες.

Έτσι λοιπόν, από την άθροιση των Εξ. (4-92) και (4-94) προκύπτει ότι η ολική ενέργεια που πρέπει να καλύψει η μπαταρία είναι:

$$E_{bat} = 3 \frac{t_\lambda}{2} \left(\frac{M_{max} \omega_{max}}{4} + \frac{1}{2} \frac{M_{max} \omega_{max}}{4} \right) + 3 R_{ESC} i_{ESC}^2 t_\lambda \quad (4-95)$$

Φαίνεται δηλαδή ότι πλέον και το μέγεθος V_{bat} εξαρτάται από το l_{mot} (δεδομένων των αναλυτικών σχέσεων για τα M_{max} και ω_{max} και της εξάρτησης του l_{ESC} από το l_{mot} (Εξ. (4-90)).

Τελικά λοιπόν, οι ανεξάρτητες μεταβλητές από τις οποίες συναρτώνται όλα τα μεγέθη και εμφανίζονται τόσο στις Εξ. (4-76)-(4-80) όσο και στην αντικειμενική συνάρτηση (4-83) είναι τα $L, p / D_p, D_p, l_{mot}$. Έτσι, προκύπτει ότι το διάνυσμα σχεδιασμού είναι το:

$$\mathbf{b} = \left[L \quad \frac{p}{D_p} \quad D_p \quad l_{mot} \right]^T \quad (4-96)$$

4.4.3 Περιγραφή αλγορίθμου βελτιστοποίησης και αναλυτικά αποτελέσματα

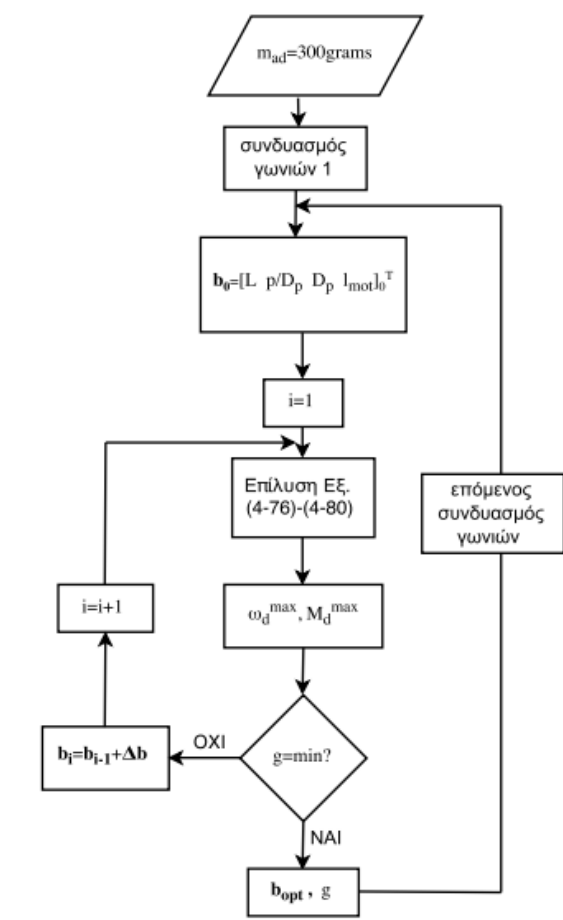
Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλούμαστε να λύσουμε συνίσταται από την αντικειμενική συνάρτηση της Εξ. (4-83) και το διάνυσμα σχεδιασμού της

Εξ. (4-96). Τα όρια των μεταβλητών απόφασης $p / D_p, D_p, l_{mot}$ λαμβάνονται ίδια με τα όρια τιμών για τα οποία ισχύουν οι σχέσεις παρεμβολής και προκύπτουν από τις Εξ. (4-68), (4-69), (4-54) αντίστοιχα. Η μεταβλητή L , η οποία αφορά το μήκος του ποδιού επιλέγεται να ανήκει σε ένα ρεαλιστικό εύρος τιμών:

$$0 \leq L \leq 0.5 \quad (m) \quad (4-97)$$

Σημειώνεται ότι αυτό πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου, οπότε η επίλυση του θα γίνει με τη χρήση της αιτιοκρατικής συνάρτησης “fmincon” της Matlab, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στο Κεφ. 3, Παρ. 3.2.

Η συνολική αυτή διαδικασία παρουσιάζεται μακροσκοπικά στο διάγραμμα ροής του Σχ. 4.19, τα βασικά σημεία της οποίας εξηγούνται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα ροής της αναλυτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης για τους 8 συνδυασμούς γωνιών.

Σε κάθε βήμα αυτής της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιλύονται οι Εξ. (4-75)-(4-79) όπου η γραμμική και γωνιακή επιτάχυνση \dot{v} και ${}^b\dot{\omega}$ της βάσης είναι μηδενικές αφού απαιτούμε να βρίσκεται στην κατάσταση αιώρησης (βλ. Εξ. (4-84)). Επίσης, υπογραμμίζεται ότι η πρόσθετη μάζα-ωφέλιμο φορτίο για το οποίο προκύπτει το διάλυμα σχεδιασμού είναι $m_{ad} = 300\text{grams}$ (βλ. Σχ. 4.19). Οι εξισώσεις αυτές λοιπόν, λύνονται ως προς τα μεγέθη ${}^b\mathbf{F}_{p,i}, {}^m\mathbf{u}_i, \mathbf{Q}_i, {}^m\omega_{i,3}$. Το διάλυμα δύναμης ${}^b\mathbf{F}_{p,i}$ λόγω της δύναμης ώσης σε συνδυασμό με

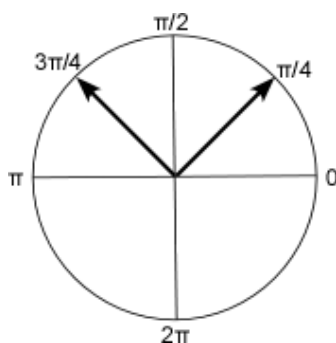
τη μήτρα περιστροφής Q_i (του κάθε ΙΣΗΕ ως προς το σωματόδετο σύστημα της βάσης), δίνουν τη δύναμη ώσης f_i που εμφανίζεται στο κάθε ΙΣΗΕ. Η μέγιστη από αυτές πολλαπλασιάζεται με τη σταθερά μετατροπής b (βλ. Εξ. (4-66)) και δίνει τη μέγιστη ροπή αντίστασης M_d^{\max} της έλικας με την οποία συγκρίνεται η ροπή των ηλεκτροκινητήρων στη γωνιακή ταχύτητα ω_d^{\max} (βλ. Εξ. (4-83) και Σχ. 4.19). Η ταχύτητα αυτή προσδιορίζεται μέσω της μέγιστης δύναμης ώσης f_i και της σταθεράς ώσης C_T (βλ. Εξ. (4-67)).

Εναλλακτικά και προσεγγιστικά, η M_d^{\max} μπορεί να υπολογιστεί από το μέγιστο της τρίτης συνιστώσας των διανυσμάτων ${}^m \mathbf{u}_i$. Υπενθυμίζεται ότι ${}^m \mathbf{u}_i$ είναι το διάνυσμα ροπών-εισόδων που ασκείται στο κάθε ένα εκ των τριών ΙΣΗΕ, με την τρίτη συνιστώσα του να μπορεί να θεωρηθεί με μικρό σφάλμα ότι ισούται με τη ροπή αντίστασης της έλικας. Στην ίδια λογική, το μέγεθος ω_d^{\max} μπορεί να προκύψει προσεγγιστικά από το μέγιστο των ${}^m \omega_{i,3}$, τιμές οι οποίες προκύπτουν μέσω των δυνάμεων και της σταθεράς ώσης f_i και C_T αντίστοιχα.

Τέλος, επισημαίνεται ότι στις Εξ. (4-76)-(4-80) υπεισέρχεται η μήτρα περιστροφής Q της βάσης από το σωματόδετο της στο αδρανειακό. Αυτή είναι ένα μέγεθος το οποίο επηρεάζει σε ένα μικρό βαθμό τις τιμές των M_d^{\max} , ω_d^{\max} αφού ανάλογα με τον προσανατολισμό της βάσης αλλάζουν οι μοχλοβραχίονες οι οποίοι πολλαπλασιάζουν τις δυνάμεις ώσης και άρα αλλάζει σε έναν βαθμό το μέτρο των δυνάμεων ώσης. Έχουμε:

$$Q = \begin{bmatrix} \cos ap \cos ay & \cos ay \sin ap \sin ar - \cos ar \sin ay & \sin ar \sin ay + \cos ar \cos ay \sin ap \\ \cos ap \sin ay & \cos ar \cos ay + \sin ap \sin ar \sin ay & \cos ar \sin ap \sin ay - \cos ay \sin ar \\ -\sin ap & \cos ap \sin ar & \cos ap \cos ar \end{bmatrix} \quad (4-98)$$

όπου ar, ap, ay οι γωνίες περιστροφής της βάσης γύρω από τους άξονες E_1, E_2, E_3 αντίστοιχα (βλ. Σχ. 4.1). Αν στην ίδια λογική με το Κεφ. 3 θεωρήσουμε ότι οι γωνίες αυτές ανήκουν στα πρώτα δύο τεταρτημόρια του τριγωνομετρικού κύκλου (βλ. Σχ. 4.20) και έτσι όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί τους είναι $2^3 = 8$, τότε αυτός ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης τρέχει 8 φορές (βλ. Σχ. 4.19) (για όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς της βάσης) και δίνει 8 διανύσματα σχεδιασμού με το πρώτο να αντιστοιχεί σε (ay, ap, ar) ίσο με $(\pi/4, \pi/4, \pi/4)$ το δεύτερο σε (ay, ap, ar) ίσο με $(\pi/4, \pi/4, 3\pi/4)$ κ.ο.κ. Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με τη διακριτοποίηση που έγινε στο Κεφ. 3 εδώ λήφθηκαν δύο αντιπροσωπευτικές γωνίες αντί για τέσσερις λόγω του χαρακτηριστικού που έχουν οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο [1] να μην παίζει ρόλο το πρόσημο των γωνιών.



Σχήμα 4.20. Αντιπροσωπευτικές τιμές γωνιών ar, ap, ay μήτρας περιστροφής Q .

Σύμφωνα με αυτά λοιπόν τρέχει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και τα αποτελέσματα του φαίνονται στους Πιν. 4-4 και 4-5 για κάθε έναν από τους οχτώ συνδυασμούς γωνιών, όπου στις πρώτες γραμμές φαίνονται οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού και στην τελευταία η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης g στην οποία αντιστοιχούν.

Πίνακας 4-4. Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Συνδυασμός	1	2	3	4
L	0.2519	0.2665	0.2473	0.2482
p / D_p	0.3128	0.3211	0.2922	0.2803
D_p	0.2331	0.247	0.2307	0.2415
l_{mot}	0.0326	0.0331	0.0333	0.0324
g	3.68e-06	1.44e-10	9.52e-08	7.34e-07

Πίνακας 4-5. (Συνέχεια) Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

5	6	7	8
0.2349	0.2612	0.2607	0.258
0.2985	0.302	0.31	0.298
0.252	0.241	0.24	0.244
0.0328	0.03301	0.0335	0.0329
4.52e-09	5.14e-10	1.32e-05	1.5e-11

Αρχικά, φαίνεται λόγω των μικρών τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης g ότι ο αλγόριθμος συνέκλινε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι λόγω αυτών που αναφέρθηκαν, ο προσανατολισμός της βάσης επηρεάζει σε έναν πολύ μικρό βαθμό το διάνυσμα σχεδιασμού. Αυτή η επίδραση δε λαμβάνεται υπόψιν και έτσι αποφαίνεται ως τελικό βέλτιστο διάνυσμα και αντιπροσωπευτικό όλων των παραπάνω το:

$$\mathbf{b}_{opt} = [0.26 \quad 0.3 \quad 0.24 \quad 0.033] \quad (4-99)$$

Σύμφωνα με το βέλτιστο αυτό διάνυσμα σχεδιασμού καθορίζονται πλήρως οι συνιστώσες του οχήματος με τα χαρακτηριστικά τους. Στον Πιν. 4-6 φαίνονται οι συνιστώσες (με τα χαρακτηριστικά τους) τις οποίες θα κληθούμε να αντιστοιχήσουμε με πραγματικές οι οποίες κυκλοφορούν στην αγορά αν αποδειχθεί ότι πλέον το ρομπότ έχει ικανοποιητικές δυνατότητες.

Πίνακας 4-6. Συνιστώσες του οχήματος σύμφωνα με αναλυτικές σχέσεις.

Ηλεκτροκινητήρας	Έλικα	Μπαταρία	ESC
$m_{mot} = 105.7 \text{ grams}$	$m_{prop} = 24.77 \text{ grams}$	$m_{bat} = 302 \text{ grams}$	$m_{ESC} = 17.8 \text{ grams}$
$M_{max} = 0.25 \text{ Nm}$	$D_p = 24 \text{ cm}$	$E_{bat} = 38.7 \text{ Wh}$	$i_{ESC} = 22 \text{ A}$
$\omega_{max} = 1495.7 \text{ rad / sec}$	$p / D_p = 0.3$	-	-
$i_{max} = 22 \text{ A}$	-	-	-

Σημειώνεται ότι η συνολική μάζα του οχήματος μαζί με την πρόσθετη μάζα-ωφέλιμο φορτίο $m_{ad} = 300\text{grams}$ είναι $m_{oz,αναλ} = 1.53\text{kg}$.

Για να εξασφαλισθεί η επάρκεια του οχήματος όμως δε φτάνουν τα παραπάνω αποτελέσματα. Πρέπει να διαπιστωθεί επιπρόσθετα ποιες είναι οι δυνατότητες του οχήματος με το βέλτιστο αυτό διάνυσμα πλέον. Ως δυνατότητες όπως έχει προαναφερθεί, ορίζονται η ικανοποιητική μετακίνηση και περιστροφή του οχήματος γύρω από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ακόμη, πρέπει οι κινήσεις αυτές να ελεγχθούν για διάφορες τιμές της παραμέτρου m_{ad} , αφού η πρόσθετη μάζα $m_{ad} = 300\text{grams}$ ίσως να μην είναι επαρκής και μετά το λεπτομερή σχεδιασμό να προκύψει δυσμενέστερη.

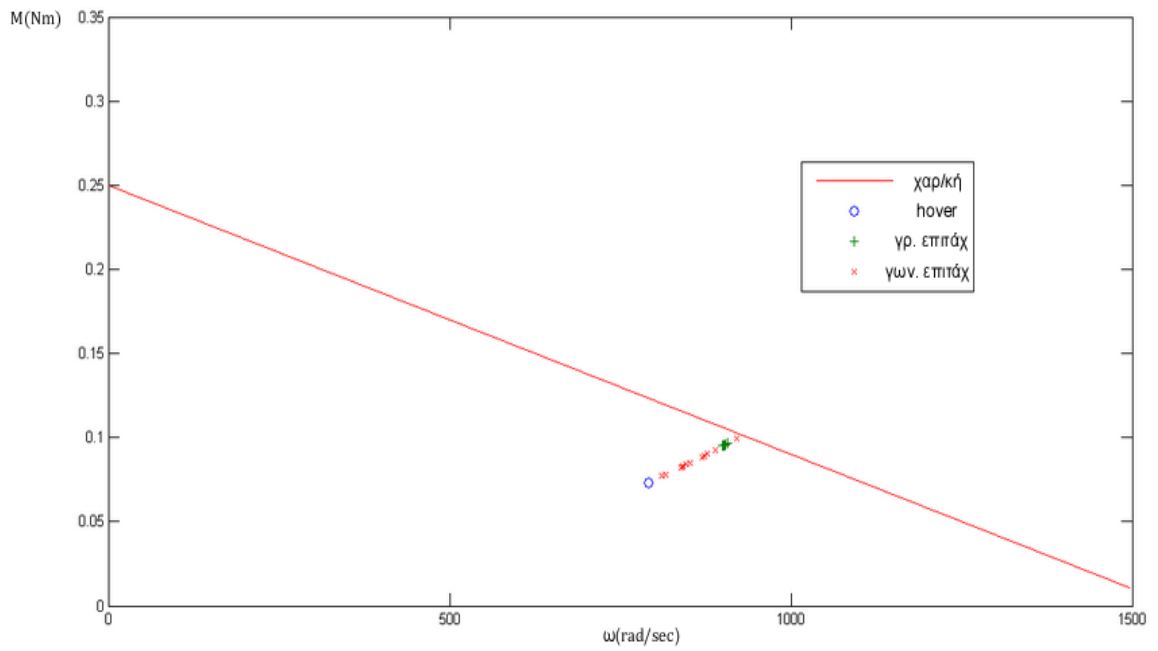
Έτσι, χαράσσονται διαγράμματα για διάφορες τιμές της παραμέτρου m_{ad} τα οποία εκτός της απαίτησης για αιώρηση οπτικοποιούν τις δυνατότητες του ρομπότ για μετακίνηση και περιστροφή. Αν θεωρήσουμε λοιπόν ένα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) με προσανατολισμό ίδιο με αυτό του Σχ. 4.7 για παράδειγμα, βλέπουμε τις τιμές των γραμμικών επιταχύνσεων (a_x, a_y, a_z) και των γωνιακών επιταχύνσεων $(\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ για όλους τους συνδυασμούς γωνιών $(\alpha_y, \alpha_p, \alpha_r)$ και για διάφορες μάζες m_{ad} . Τα διαγράμματα αυτά (Σχ. 4.21 - 4.24) αποτελούνται από την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων (κόκκινη ευθεία) και από τα σημεία που αντιπροσωπεύουν το ζεύγος $(\omega_d^{\max}, M_d^{\max})$ το οποίο προκύπτει από την επίλυση των Εξ. (4-76)-(4-80) για την κατάσταση αιώρησης (μπλε σημεία), μη μηδενικής γραμμικής επιτάχυνσης a_x, a_y, a_z (πράσινα σημεία) και μη μηδενικής γωνιακής επιτάχυνσης $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ (κόκκινα σημεία). Σημειώνεται ότι κάθε ομάδα από τις παραπάνω αποτελείται από 8 σημεία, όσοι δηλαδή και οι συνδυασμοί του προσανατολισμού της βάσης. Έτσι συνολικά απεικονίζονται 8 σημεία για αιώρηση 24 σημεία για τις a_x, a_y, a_z και άλλα 24 για τις $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$. Επισημαίνεται για την πληρότητα, ότι οι Εξ. (4-76)-(4-80) για την περίπτωση της γραμμικής επιτάχυνσης a_x έχουν μη μηδενικό και συγκεκριμένο το πρώτο στοιχείο του διανύσματος \dot{v} , για τη γωνιακή επιτάχυνση $\dot{\omega}_y$ το δεύτερο στοιχείο του διανύσματος ${}^b\dot{\omega}$ κ.ο.κ.

Οι τιμές των μεγεθών a_x, a_y, a_z θα εκφράζονται συναρτήσει της επιτάχυνσης της βαρύτητας $g = 9.81\text{m/s}^2$ και τα μεγέθη $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ συναρτήσει της επιτάχυνσης της βαρύτητας g διαιρεμένη με ένα ισοδύναμο μήκος $l_{eq} = 0.6366\text{m}$ το οποίο προέκυψε από παρατηρήσεις των γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων συμβατικών ιπτάμενων οχημάτων με πολύ επιθετική συμπεριφορά [26], [27].

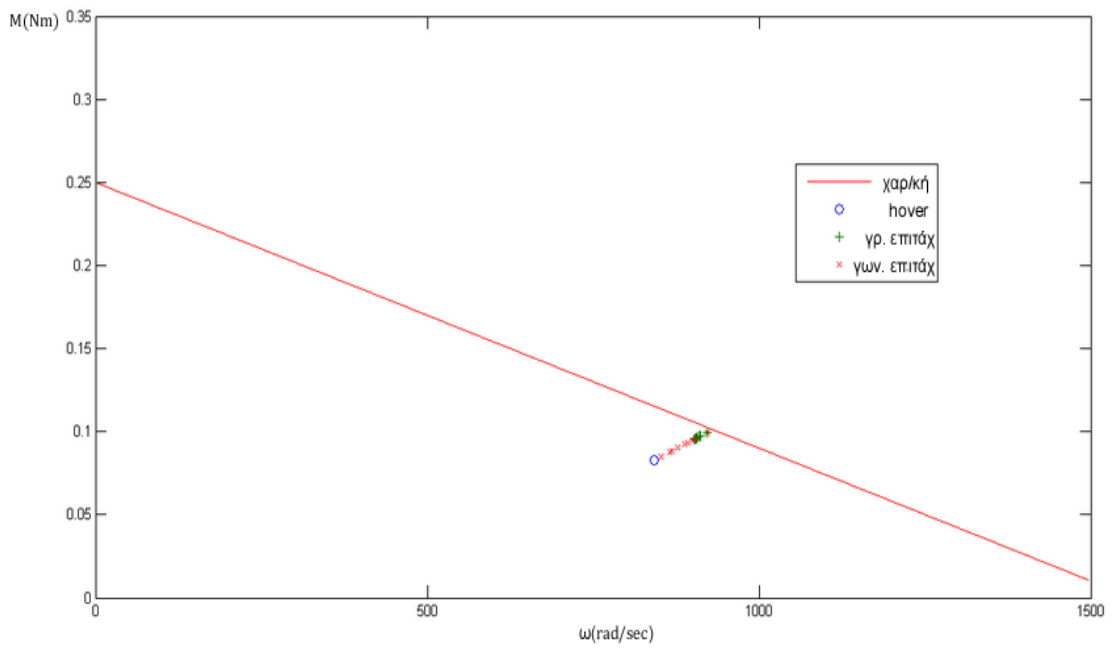
Οι τιμές της πρόσθετης και συνολικής μάζας του οχήματος, οι τιμές των γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων καθώς και σε ποιο διάγραμμα αντιστοιχούν φαίνεται στον Πιν. 4-7

Πίνακας 4-7. Δυνατότητες οχήματος συναρτήσει της μάζας του.

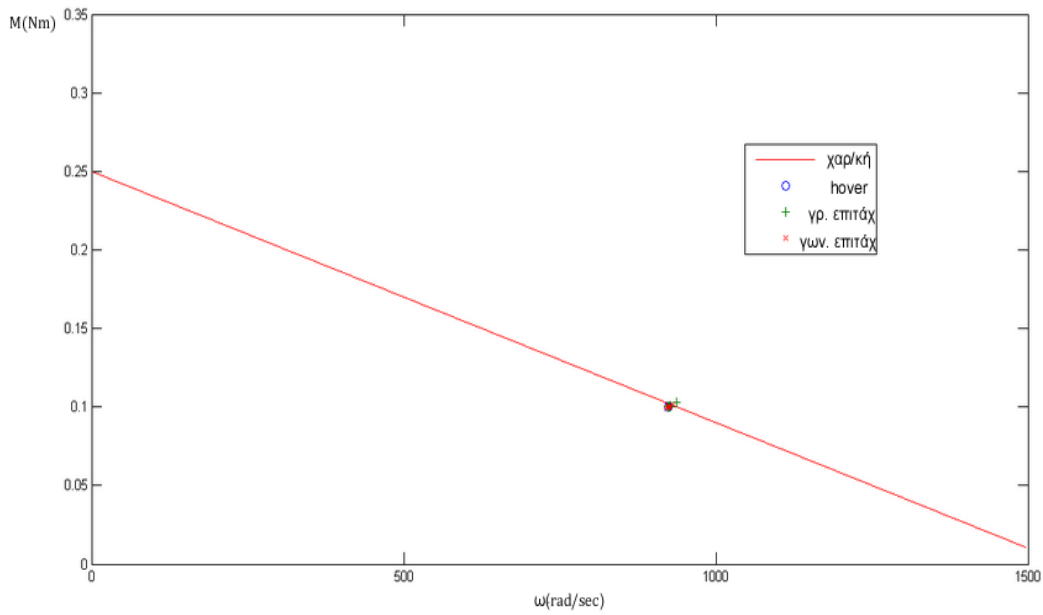
Σχήμα	4.21, 4.27	4.22	4.23, 4.28	4.24
Πρόσθετη μάζα	300grams	500grams	850grams	1000grams
Συνολική μάζα	1530grams	1730grams	2080grams	2230grams
a_x, a_y	1.1g	0.7g	0.1g	-
a_z	0.8g	0.5g	0.05g	-
$\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$	1.1g / l_{eq}	0.7g / l_{eq}	0.1g / l_{eq}	-



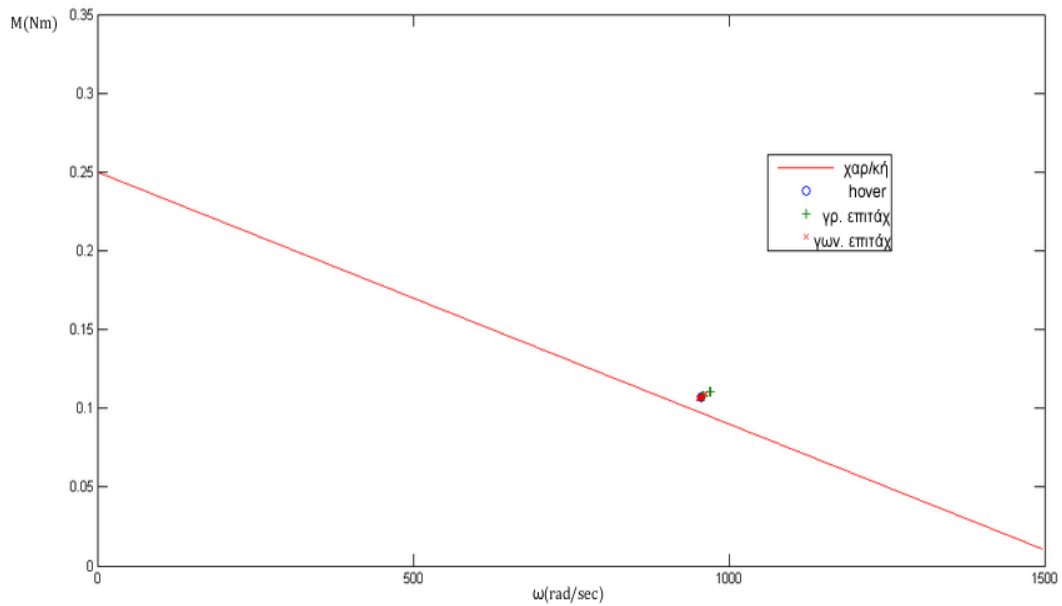
Σχήμα 4.21. Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.53kg.



Σχήμα 4.22. Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.73kg.



Σχήμα 4.23. Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.08kg.



Σχήμα 4.24. Επάρκεια ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.23kg.

Το Σχήμα 4.21 εκτός των άλλων αποτελεί και μια οπτικοποίηση του αποτελέσματος που έδειξε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Όπως φαίνεται και από τον Πιν. 4-7 το όχημα έχει πάρα πολύ υψηλές δυνατότητες για εκείνη την πρόσθετη μάζα. Όσο πηγαίνουμε προς στο Σχ. 4.24 παρατηρούμε ότι τα μπλέ σημεία (κατάσταση αιώρησης) πλησιάζουν τη χαρακτηριστική λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα με το Σχ. 4.23 να δείχνει ότι η οριακή συνολική μάζα που μπορεί να σηκώσει το όχημα είναι 2.08kg. Από αυτή τη μάζα και μετά οι

ηλεκτροκινητήρες του ρομπότ είναι μη επαρκή (βλ. Πιν 4-7 και Σχ. 4.24). Ωστόσο, για μάζα του οχήματος κοντά στα $1.7 - 1.8\text{kg}$ (βλ. Σχ. 4.22) το όχημα έχει πολύ καλή απόδοση κάτι το οποίο μας διασφαλίζει ότι το βέλτιστο διάνυσμα σχεδιασμού που προέκυψε είναι επαρκές και ικανοποιητικό ακόμα και για μια πρόσθετη μάζα κοντά στα $500 - 800\text{grams}$.

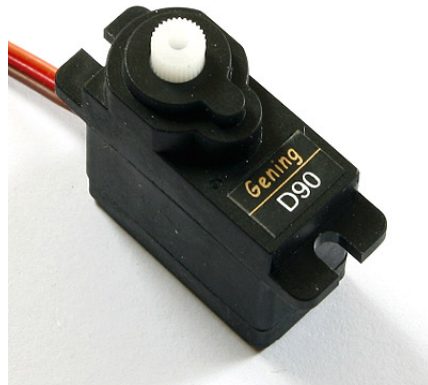
Αφού εξασφαλίσθηκε η επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων, τώρα πρέπει να ελεγχθούν οι σερβοκινητήρες οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή των δύο ανεξάρτητων περιστροφών. Το μόνο που γνωρίζουμε για τους σερβοκινητήρες είναι οι μάζες τους (βλ. Εξ. (4-85), (4-86)). Προκειμένου να γίνει και ο έλεγχος επάρκειας αυτών απαιτείται να ξέρουμε τα κύρια χαρακτηριστικά τους όπως και στην περίπτωση των ηλεκτροκινητήρων (βλ. Πιν. 4-6). Έτσι, με κριτήριο οι σερβοκινητήρες να έχουν μάζες κοντινές στις ήδη επιλεγμένες, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη μάζα του δεύτερου σερβοκινητήρα η οποία επηρεάζει σημαντικά την αδράνεια του οχήματος (βλ. Σχ. 4.7), έχουμε τα εξής. Έπειτα από εκτεταμένη έρευνα στην αγορά για τους αποδοτικότερους δυνατούς σερβοκινητήρες εκείνων των μαζών επιλέγουμε ο πρώτος να είναι ο DS215MG Miniature Digital Servo της εταιρείας KST [28] (βλ. Σχ. 4.25) τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πιν. 4-8. Ο δεύτερος (βλ. Σχ. 4.26) είναι ο D90 High Speed Digital Servo της εταιρείας Gening [29], τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πιν. 4-9.



Σχήμα 4.25. KST DS215MG Miniature Digital servo [28].

Πίνακας 4-8. Χαρακτηριστικά του KST DS215MG Miniature Digital servo.

Εταιρεία	KST
Όνομα προϊόντος	DS215MG
Μέγιστη ροπή (Nm)@7.4V	0.3628
Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα (rad/s)@7.4V	20.94
Μάζα (gr)	20
Διαστάσεις (mm)	23x12x27.5



Σχήμα 4.26. GENING D90 High Speed Digital Servo [29].

Πίνακας 4-9. Χαρακτηριστικά του GENING D90 High Speed Digital Servo.

Εταιρεία	Gening
Όνομα προϊόντος	D90
Μέγιστη ροπή (Nm)@6V	0.2157
Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα (rad/s)@6V	14.95
Μάζα (gr)	9.8
Διαστάσεις (mm)	23.6x11.8x22

Για τον πρώτο σερβοκινητήρα λαμβάνουμε λοιπόν από τον Πιν. 4-7:

$$M_{\max,s1} = 0.3628Nm \quad (4-100)$$

$$\omega_{\max,s1} = 20.94rad / sec \quad (4-101)$$

Για το δεύτερο σερβοκινητήρα παίρνουμε από τον Πιν. 4-8 :

$$M_{\max,s2} = 0.2157Nm \quad (4-102)$$

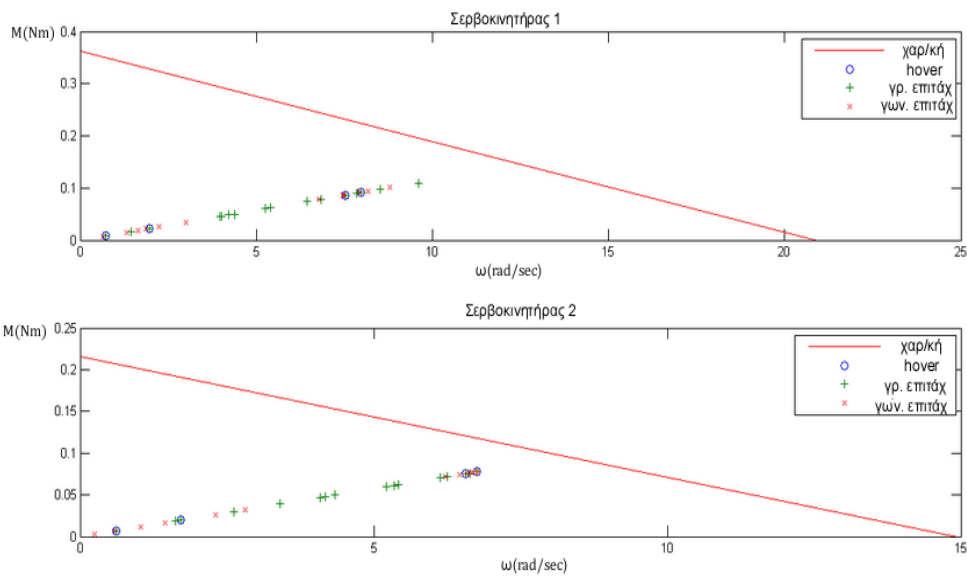
$$\omega_{\max,s2} = 14.95rad / sec \quad (4-103)$$

Έχοντας επιλέξει λοιπόν τους παραπάνω σερβοκινητήρες απαιτείται να έχουμε τα φορτία που αυτοί θα κληθούν να καλύψουν ώστε να αποφανθούμε για την επαρκειά τους.

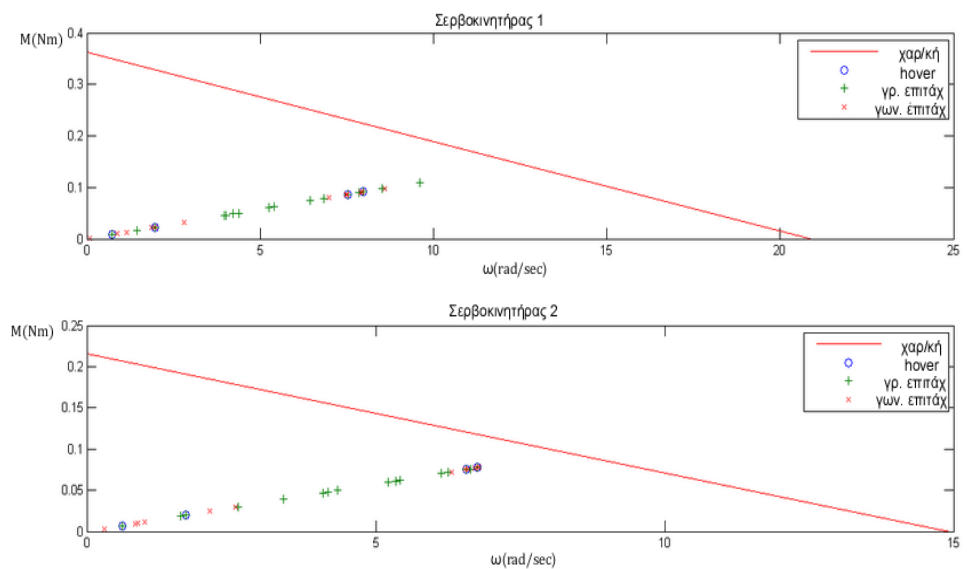
Από το σύστημα κλειστού βρόχου που έχει υλοποιηθεί στο [1], η προσομοίωση σε Matlab που το περιγράφει και έχει υλοποιηθεί από τον Υ.Δ Μ.Ραμπ, δίνει αποκρίσεις για τις ροπές ${}^m\mathbf{u}_i$ και ${}^m\boldsymbol{\omega}_i$ οι οποίες αφού προβληθούν στους πραγματικούς άξονες που βρίσκονται οι δύο σερβοκινητήρες δίνουν επακριβώς τις απαιτήσεις-φορτία των σερβοκινητήρων σε ροπή και στροφές. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση αυτή τρέχει για το βέλτιστο διάνυσμα \mathbf{b}_{opt} . Οι τύποι οι οποίοι προβάλλουν τα μεγέθη αυτά στους πραγματικούς άξονες εξαρτώνται εκτός των άλλων και από τα στοιχεία των μητρών περιστροφής \mathbf{Q}_i (βλ. Εξ. (4-76)-(4-80)). Έτσι, επειδή ο προσανατολισμός της βάσης και η συνολική μάζα του

οχήματος μεταβάλλουν τις κατευθύνσεις της μέγιστης δύναμης ώσης που πρέπει να αναπτυχθεί εκτός του μέτρου της, μεταβάλλονται και τα στοιχεία των μητρώων Q_i . Επομένως, προκειμένου να υπάρχει πληρότητα και συνέπεια τα διαγράμματα επάρκειας των σερβοκινητήρων είναι στην ίδια φιλοσοφία με τους ηλεκτροκινητήρες και χαράσσονται για όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς της βάσης και για διαφορετικές πρόσθετες μάζες m_{ad} .

Σύμφωνα με αυτά, στα Σχ. 4.27 και 4.28 φαίνονται τα φορτία των δύο σερβοκινητήρων με τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας τους (βλ. Εξ. (4-100)-(4-103)), με τις δυνατότητες και τη μάζα του οχήματος για το κάθε σχήμα να απεικονίζονται στον Πιν. 4-7 που αφορά και τα διαγράμματα των ηλεκτροκινητήρων.



Σχήμα 4.27. Επάρκεια σερβοκινητήρων για μάζα 1.73kg.



Σχήμα 4.28. Επάρκεια σερβοκινητήρων για μάζα 2.08kg.

Από τα Σχ. 4.27 και 4.28 φαίνεται λοιπόν ότι οι σερβοκινητήρες που επιλέχθηκαν, καλύπτουν τις απαιτήσεις ικανοποιητικά και άρα με αυτούς (βλ. Σχ. 4.25 και 4.26) θα πορευθούμε στη συνέχεια του σχεδιασμού του ρομπότ.

Συνεπώς, μπορούμε να προχωρήσουμε στην αντιστοίχιση των αναλυτικών συνιστωσών που προέκυψαν (βλ. Πιν. 4-6) με πραγματικές που κυκλοφορούν στην αγορά και να αρχίσει πλέον το όχημα να αποκτά πιο ρεαλιστικό χαρακτήρα.

4.4.4 Μετάβαση από αναλυτικές σε πραγματικές συνιστώσες του οχήματος και τελικά αποτελέσματα

Ηλεκτροκινητήρες

Η κυριότερη συνιστώσα του ρομπότ ως προς την τελική συμπεριφορά του είναι οι ηλεκτροκινητήρες. Έτσι, πρώτα αντιστοιχούμε τον ηλεκτροκινητήρα που προέκυψε από τους αναλυτικούς υπολογισμούς (βλ. Πιν. 4-6) με ρεαλιστικά της εταιρείας AXI που κυκλοφορούν στην αγορά. Με κριτήριο τα μεγέθη M_{max} και ω_{max} του αναλυτικού ηλεκτροκινητήρα αναζητούμε πραγματικό ηλεκτροκινητήρα της εταιρείας AXI. Έπειτα από αναζήτηση στους σχετικούς καταλόγους καταλήγουμε ότι ο πιο κοντινός ηλεκτροκινητήρας από άποψη στροφών και ροπής στο αναλυτικό είναι το AXI 2814/10 GOLD LINE (βλ. Σχ. 4.29) τα βασικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πιν. 4-10.



Σχήμα 4.29. AXI 2814/10 GOLD LINE Brushless Outrunner Motor [18].

Αναφορικά με τον Πιν. 4-10 σημειώνονται τα εξής. Αρχικά, οι μάζες τόσο του αναλυτικού ηλεκτροκινητήρα (βλ. Πιν. 4-6) όσο και του πραγματικού είναι σχεδόν ίδιες. Επίσης, η μέγιστη ροπή του πραγματικού ηλεκτροκινητήρα είναι ελαφρώς μικρότερη του αναλυτικού, κάτι που δε θα δημιουργήσει πρόβλημα λόγω της μεγαλύτερης γωνιακής ταχύτητας που παρέχει ο πραγματικός. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι για να επιτευχθεί η αναγραφόμενη γωνιακή ταχύτητα πρέπει τα στοιχεία της μπαταρίας που τροφοδοτεί ο ηλεκτροκινητήρας να είναι 3 και μάλιστα συνδεδεμένα σε σειρά (τάση 11.1V (βλ. Εξ. (4-59)). Τέλος, παρατηρείται ότι το μέγιστο ρεύμα ισούται με 40A άρα κατά πάσα πιθανότητα θα επιλεχθούν μεγαλύτερο ESC.

Πίνακας 4-10. Χαρακτηριστικά πραγματικού Brushless DC Motor.

Είδος	Brushless Outrunner Motor
Όνομα προϊόντος	AXI 2814/10 GOLD LINE
$m_{mot} (gr)$	106
$M_{max} (Nm)$	0.219517
$\omega_{max} (rad / sec)$	1891.703
Αριθμός στοιχείων (cells) σε σειρά μπαταρίας	3
Ονομαστική τάση (V)	11.1
$K_T (Nm / A)$	0.005823
$i_{max} (A)$	40
Διαστάσεις(mm^2)	$\Phi 35 \times 37$

ESC

Οι ESC πρέπει να παράσχουν το μέγιστο ρεύμα των 40A οπότε επιλέγονται βάσει αυτού. Έτσι, από την εταιρεία JETI επιλέγεται το Advance 40 Pro Opto (βλ. Σχ. 4.30) τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πιν. 4-11.

Advance 40 Pro opto

Art. No.: JA-40-P-P-O

EAN: 8595245902018



Weight [g]	35
Dimensions [mm]	53 x 26 x 9
Sustained current [A]	40
Telemetry	No
Operational temperature [°C]	-10 ... 85
Supply Voltage [V]	5 ... 25,2
Batteries NiXX	6 ... 16
Batteries LiXX	2 ... 6
Batteries LiFe	2 ... 7

Σχήμα 4.30. JETI ADVANCE 40 Pro opto ESC [23].

Πίνακας 4-11. Χαρακτηριστικά πραγματικού ESC.

Είδος	ESC
Όνομα	JETI ADVANCE 40 Pro opto
$m_{ESC} (gr)$	35
$i_{ESC} (A)$	40
Διαστάσεις(mm^3)	53x26x9

Μπαταρία

Η πραγματική μπαταρία επιλέγεται από την εταιρεία Kokam ως επαλληλία στοιχείων (cells) συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα. Συγκεκριμένα, πλέον λόγω του πραγματικού ηλεκτροκινητήρα και του ESC η ενέργεια που απαιτείται μέσω της Εξ. (4-95) είναι $E_{bat} = 50.93Wh$. Η Εξ. (4-95) όμως δεν προβλέπει την ενέργεια που καταλώνεται στους σερβοκινητήρες. Για την πληρότητα λοιπόν στην ενέργεια της μπαταρίας μπορούμε πλέον να συμπεριλάβουμε και τις καταναλώσεις των σερβοκινητήρων. Έτσι, έχουμε τα εξής.

Οι σερβοκινητήρες θεωρούμε ότι λειτουργούν και αυτοί για χρόνο $t_\lambda = 10\text{min}$ και μάλιστα όπως και στην περίπτωση των ηλεκτροκινητήρων, στο μισό αυτό χρόνο δουλεύουν στη μέγιστη ισχύ και στα υπόλοιπα πέντε λεπτά λειτουργούν στη μισή αυτής της ισχύος. Εφαρμόζοντας λοιπόν την Εξ. (4-92) για τη συμβολή και των τριών σερβοκινητήρων τόσο της μίας όσο και της άλλης ανεξάρτητης περιστροφής και μέσω των Εξ. (4-100)-(4-103) παίρνουμε:

$$E_{s1} = 0.7122Wh = 2564\text{Joule} \quad (4-104)$$

$$E_{s2} = 0.31Wh = 1110\text{Joule} \quad (4-105)$$

Άρα λοιπόν η πραγματική μπαταρία απαιτείται να έχει ενέργεια $E_{bat} = 51.95Wh$. Επιπρόσθετα, όπως φάνηκε από τον Πιν. 4-10 τα στοιχεία (cells) που απαιτείται να είναι συνδεδεμένα σε σειρά είναι τρία $n_c = 3$. Αν για αρχή θεωρήσουμε ότι δεν είναι συνδεδεμένα παράλληλα $n_p = 1$, τότε από την Εξ. (4-60) προκύπτει ότι η ενέργεια του κάθε στοιχείου απαιτείται να είναι: $E_{sc} = 17.65Wh$. Έτσι, αρκεί να βρεθεί από τον Πιν. 4-1 ένα στοιχείο με αυτήν την ενέργεια. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει, θα επιλεγεί και η λύση της παράλληλης σύνδεσης. Τελικά, από τον Πιν. 4-1 επιλέγεται το SLPB776495 στοιχείο, το οποίο σημειώνεται ότι έχει και την υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας (192 Wh/kg) του καταλόγου. Επομένως, αυτό το στοιχείο είναι επαρκές και έτσι τα χαρακτηριστικά της πραγματικής μπαταρίας φαίνονται στον Πιν. 4-12.

Πίνακας 4-12. Χαρακτηριστικά μπαταρίας Kokam.

Είδος	LiPo μπαταρία
Όνομα στοιχείου	SLPB776495
$m_{bat} (gr)$	306
$C_{bat} (Ah)$	5.3
$E_{bat} (Wh)$	58.75
n_c	3
Διαστάσεις (mm^3)	64.5x95.5x23.4

Έπειτα από επικοινωνία με την εταιρεία Kokam ενημερωθήκαμε ότι δεν αναλαμβάνουν να κάνουν συνδέσεις και συναρμολογήσεις σε στοιχεία για παραγγελίες μικρών ποσοτήτων (κάτω των 10 τεμαχίων) και έτσι έγινε αναζήτηση μιας LiPo μπαταρίας στην ευρύτερη αγορά.

Τελικά, αποφασίστηκε να επιλεγεί μια μπαταρία η οποία θα έχει κοντινή μάζα με αυτή που θα προέκυπτε από την Kokam θυσιάζοντας παράλληλα ένα ποσό από την ενέργεια της και άρα ένα μικρό ποσοστό του χρόνου πτήσης του οχήματος. Έτσι, επιλέγεται η μπαταρία LiPo 4000mAh της εταιρείας YELLOW RC [30] (βλ. Σχ. 4.31) λόγω της υψηλής ενέργειας πυκνότητας της ($149Wh/kg$), τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας βρίσκονται στον Πιν. 4-13.



Σχήμα 4.31. Yellow RC LiPo 4000mAh Battery [30].

Πίνακας 4-13. Χαρακτηριστικά πραγματικής τελικής LiPo μπαταρίας.

Είδος	LiPo μπαταρία
Όνομα	Yellow RC LiPo 4000mAh
m_{bat} (gr)	298
C_{bat} (Ah)	5.3
E_{bat} (Wh)	44.4
n_c	3
Διαστάσεις (mm^3)	44x137x25

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την επιλογή αυτής της μπαταρίας, η θυσία η οποία έγινε στο χρόνο πτήσης του οχήματος είναι μόνο της τάξεως του ενάμιση λεπτού και συγκεκριμένα πλέον η Εξ. (4-93) γίνεται:

$$t_{\lambda}^* = 8.5 \text{ min} \quad (4-106)$$

Έλικα

Για την επιλογή της έλικας κριτήριο αποτελεί κυρίως ο λόγος p/D_p και δευτερευόντως η διάμετρος D_p να είναι αρκετά κοντά στα αναλυτικά αποτελέσματα (βλ. Πιν. 4-6). Σημειώνεται ότι η επιλογή αυτών των κριτηρίων θα δικαιολογηθεί στη συνέχεια. Έτσι, μετά από αναζήτηση στους καταλόγους APC και αυστηρά στην κατηγορία SPORT (για την οποία έχουν διεξαχθεί πειράματα και υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις κατά τα αναφερθέντα στην

Παρ. 4.3.2) επιλέγεται η έλικα APC LP10030(1) (βλ. Σχ. 4.32), τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται στον Πιν. 4-14.



Σχήμα 4.32. APC LP10030(1) propeller [25].

Πίνακας 4-14. Χαρακτηριστικά πραγματικής έλικας.

Είδος	έλικα
Όνομα	APC LP10030(1)
m_{prop} (gr)	26
D_p (cm)	25.4
p / D_p	0.3

Παρατηρείται δηλαδή ότι η πραγματική έλικα έχει σχεδόν ίδια μάζα με την αναλυτική (βλ. Πιν. 4-6), λίγο μεγαλύτερη διάμετρο και αυστηρά ίδιο λόγο p / D_p , ο ρόλος του οποίου φαίνεται παρακάτω.

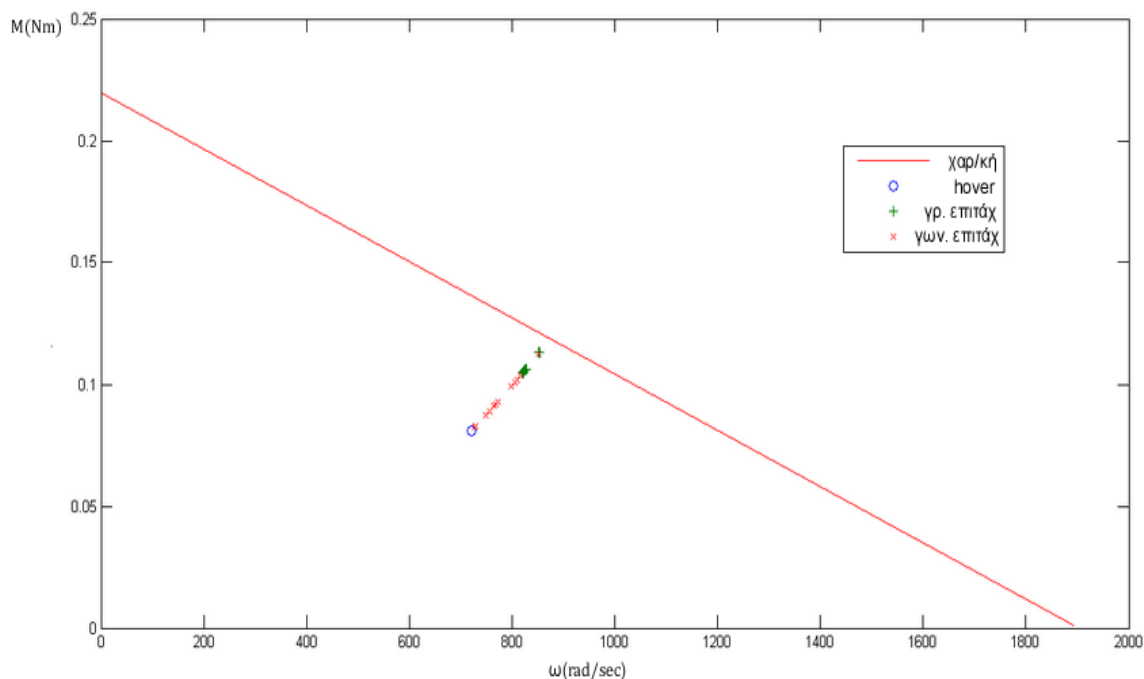
Έλεγχος επάρκειας των επενεργητών για τις πραγματικές πλέον συνιστώσες του ρομπότ

Μετά και τον προσδιορισμό όλων των πραγματικών συνιστωσών του οχήματος απαιτείται εκ νέου να γίνει ένας έλεγχος της επάρκειας των ηλεκτροκινητήρων και των σερβοκινητήρων, αφού όπως φάνηκε έχουν αλλάξει σε έναν μικρό βαθμό τόσο οι μάζες των επιμέρους συνιστωσών όσο και η χαρακτηριστική λειτουργία των ηλεκτροκινητήρων (βλ. Πιν. 4-10, 4-11, 4-13 και 4-14). Έτσι, θα έχουμε επιπλέον μια σαφή εικόνα για το ποιές είναι οι δυνατότητες και τα όρια του πραγματικού πλέον ρομπότ. Η οπτικοποίηση των δυνατοτήτων του πραγματικού ιπτάμενου οχήματος πλέον, γίνεται ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτή των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Έτσι, παρατίθεται ο Πιν. 4-15 (αντίστοιχος του 4-7) στον οποίο φαίνονται οι τιμές των γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων για μια συγκεκριμένη μάζα του οχήματος καθώς και τα σχήματα στα οποία αντιστοιχούν. Σημειώνεται ότι τα διαγράμματα τα οποία αντιστοιχούν στο πραγματικό όχημα (βλ. Σχ. 4.33, 4.35-4.39) και δείχνουν την επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων, θα γίνουν για στενότερη

διακριτοποίηση συνολικής μάζας ώστε να υπάρχει πιο λεπτομερής εικόνα για το τελικό ιπτάμενο όχημα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι πλέον η συνολική μάζα του οχήματος για ωφέλιμο φορτίο $m_{ad} = 300\text{grams}$ είναι 1.58kg , δηλαδή ελαφρώς πιο μεγάλη από αυτή του οχήματος που προέκυπτε από τα αναλυτικά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι επιλέχθηκαν μεγαλύτερα ESC και έλικα από αυτά που υποδείκνυε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με αυτά λοιπόν, έχουμε:

Πίνακας 4-15. Δυνατότητες πραγματικού οχήματος συναρτήσει της μάζας του.

Σχήμα	4.33, 4.34	4.35	4.36, 4.40	4.37	4.38, 4.41	4.39
Πρόσθετη μάζα	300gr	450gr	600gr	800gr	1000gr	1150gr
Συνολική μάζα	1580gr	1730gr	1880gr	2080gr	2280gr	2440gr
a_x, a_y	1.2g	0.95g	0.75g	0.55g	0.3g	-
a_z	0.85g	0.7g	0.5g	0.28g	0.1g	-
$\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$	1.2g / l_{eq}	0.95g / l_{eq}	0.75g / l_{eq}	0.55g / l_{eq}	0.3g / l_{eq}	-



Σχήμα 4.33. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.58kg.

Αναφορικά με το Σχ. 4.33 σε συνδυασμό με τον Πιν. 4-15 μπορεί να παρατηρηθεί ότι πλέον το όχημα έχει μεγαλύτερες δυνατότητες από ότι για τις αναλυτικές συνιστώσες για πρόσθετη μάζα $m_{ad} = 300\text{grams}$ (βλ. Πιν. 4-7 και Σχ. 4.21). Παρότι δηλαδή πλέον είναι ελαφρώς αυξημένη η συνολική μάζα του ρομπότ παρατηρείται ότι αυτό έχει μεγαλύτερες δυνατότητες

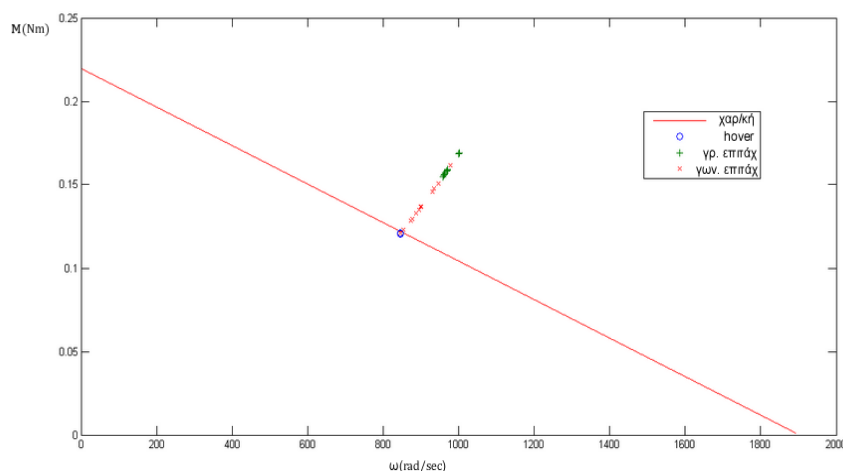
κάτι το οποίο οφείλεται κυρίως στην επιλογή του συγκεκριμένου ηλεκτροκινητήρα και μάλιστα στην υψηλή γωνιακή ταχύτητα που παρουσιάζει (βλ. Πιν. 4-10).

Σε αυτό το σημείο θα εξηγηθεί ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε το κριτήριο επιλογής της έλικας να είναι ο λόγος p/D_p . Έπειτα από μια διερεύνηση που έγινε φάνηκε ότι ο λόγος αυτός παίζει τεράστιο ρόλο στην τελική συμπεριφορά του ρομπότ. Για να μπορέσει να γίνει αυτό εύκολα αντιληπτό αυτό μπορεί κανείς να ανατρέξει στις Εξ. (4-64)-(4-66). Σύμφωνα με αυτές, η ροπή της έλικας M_d πλέον συνδέεται με τις στροφές με την εξής σχέση:

$$M_d = bC_T \omega_d^2 \quad (4-107)$$

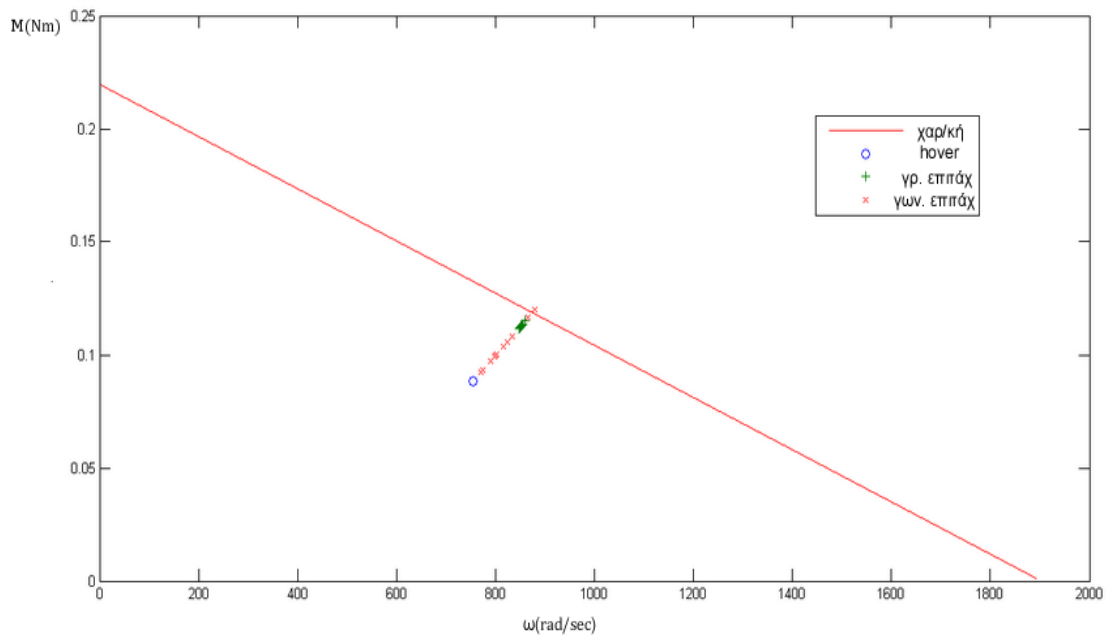
Έτσι, αν παρατηρηθούν οι αναλυτικές εκφράσεις των b (βλ. Εξ. (4-65)) και C_T (βλ. Εξ. (4-66)) μπορεί κανείς να πει χοντρικά ότι το γινόμενο bC_T είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση του λόγου p/D_p . Συνεπώς, ένας μεγάλος λόγος p/D_p σημαίνει μια πολύ απότομη παραβολή και άρα μια ανεπιθύμητη εικόνα ως προς την επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχ. 4.34 το οποίο προέκυψε για μία έλικα από την κατηγορία SPORT των καταλόγων της εταιρείας APC (LP09060(1)), η οποία έχει λόγο $p/D_p = 0.67$ και $D_p = 22.86cm$ και είναι η αμέσως κοντινότερη της αναλυτικής έλικας που προέκυψε (βλ. Πιν. 4-6) μετά από αυτήν που επιλέξαμε εμείς (βλ. Πιν. 4-14). Το Σχ. 4.34 περιλαμβάνει πανομοιότυπες παραμέτρους με αυτές του Σχ. 4.33 με τη διαφοροποίηση της έλικας μόνο. Όπως φαίνεται λοιπόν, η παραβολή πλέον έχει γίνει πολύ απότομη και οι ηλεκτροκινητήρες είναι μη επαρκείς για μία μάζα οχήματος μόλις $1.58kg$. Συγκρίνοντας το Σχ. 4.34 με το Σχ. 4.33 μπορεί να αποφανθεί κανείς πόσο σημαντική είναι η επιλογή του λόγου p/D_p για την ικανοποιητική συμπεριφορά του οχήματος και άρα το ότι αποτέλεσε κριτήριο επιλογής της πραγματικής έλικας ήταν κάτι εύλογο και δικαιολογημένο.

Επίσης, παρατηρώντας τα σημεία που αντιπροσωπεύουν το φορτίο (έλικα) σε όλα τα διαγράμματα επάρκειας των ηλεκτροκινητήρων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυτά δεν είναι ατακτα τοποθετημένα αλλά ακολουθούν μια παραβολή της οποίας μάλιστα η αναλυτική μορφή είναι αυτή της Εξ. (4-107).

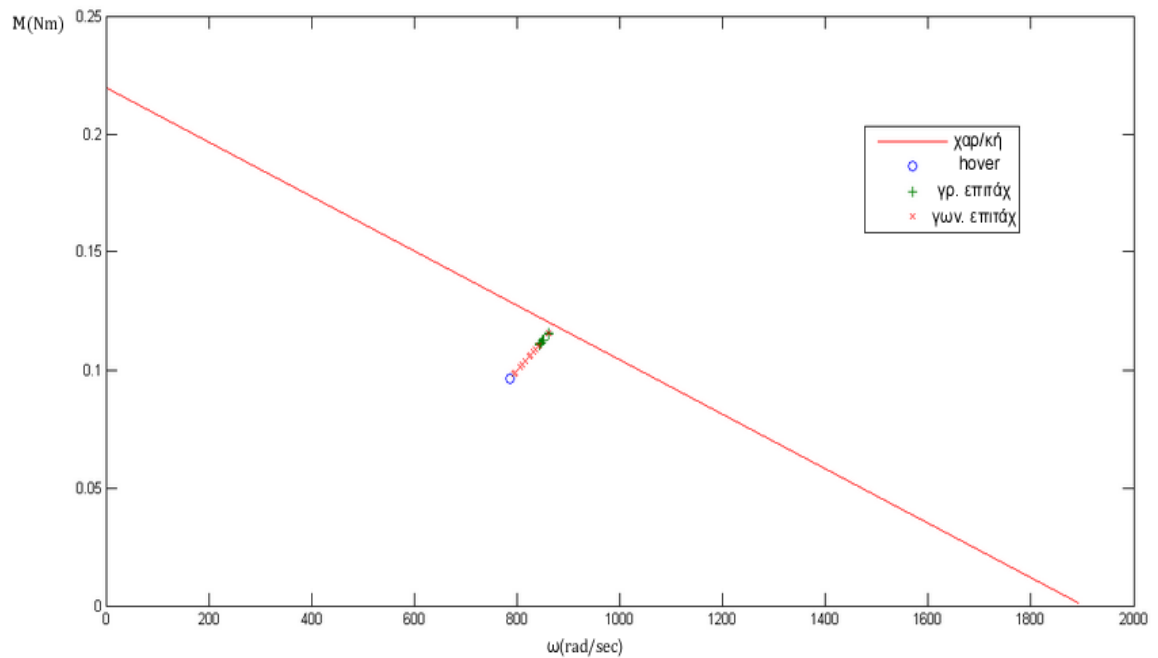


Σχήμα 4.34. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα $1.58kg$ και έλικα με μεγάλο λόγο p/D_p .

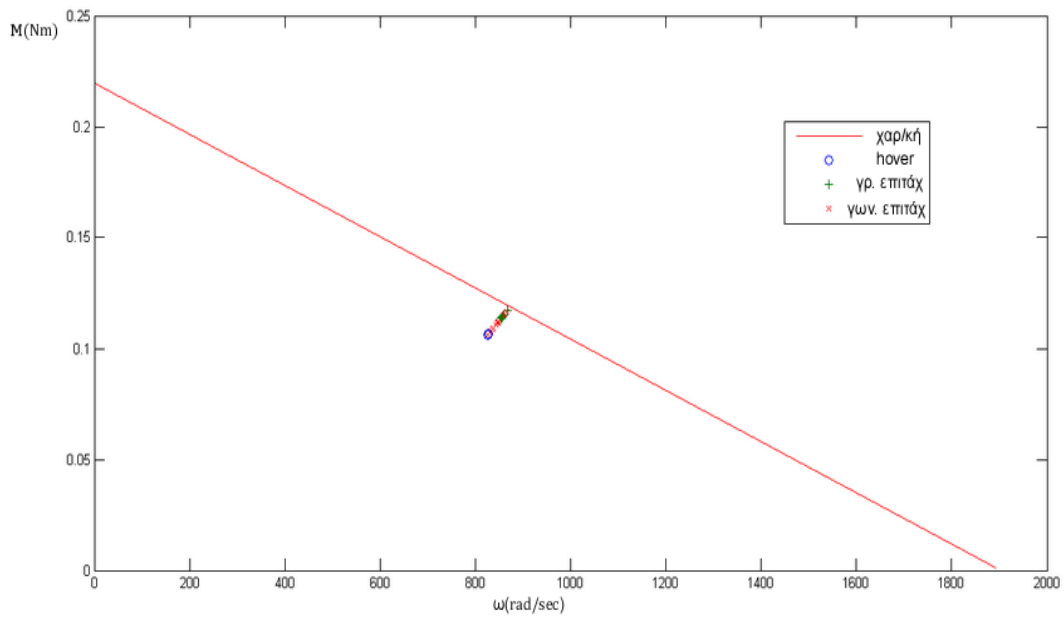
Παρακάτω παρουσιάζονται τα Σχ. 4.35-4.39 τα οποία υπενθυμίζεται ότι αντιστοιχούν στον Πιν. 4-15.



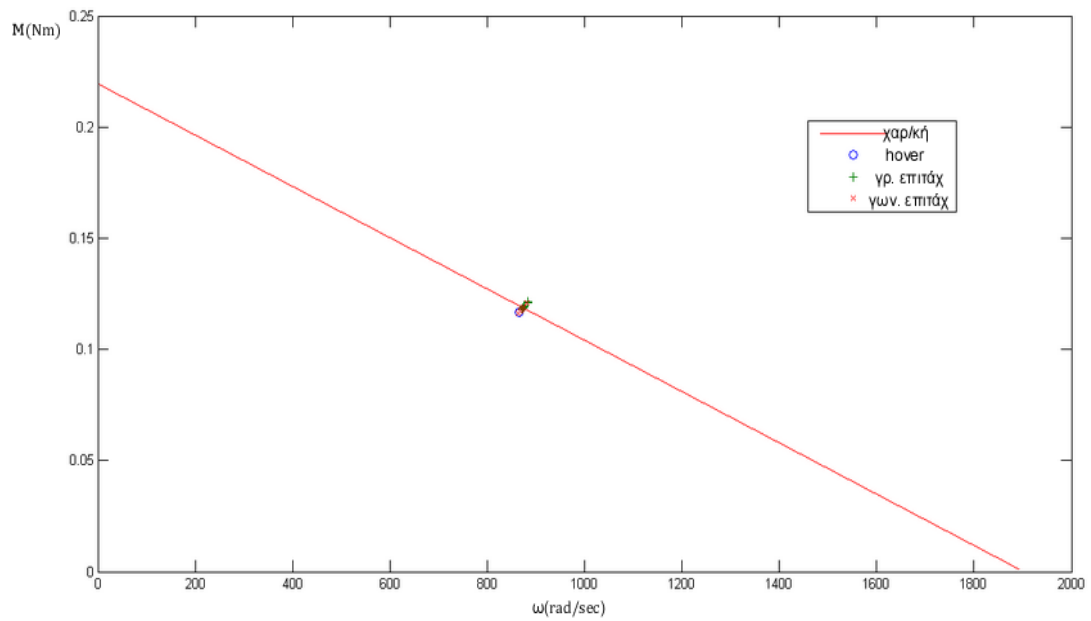
Σχήμα 4.35. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.73kg.



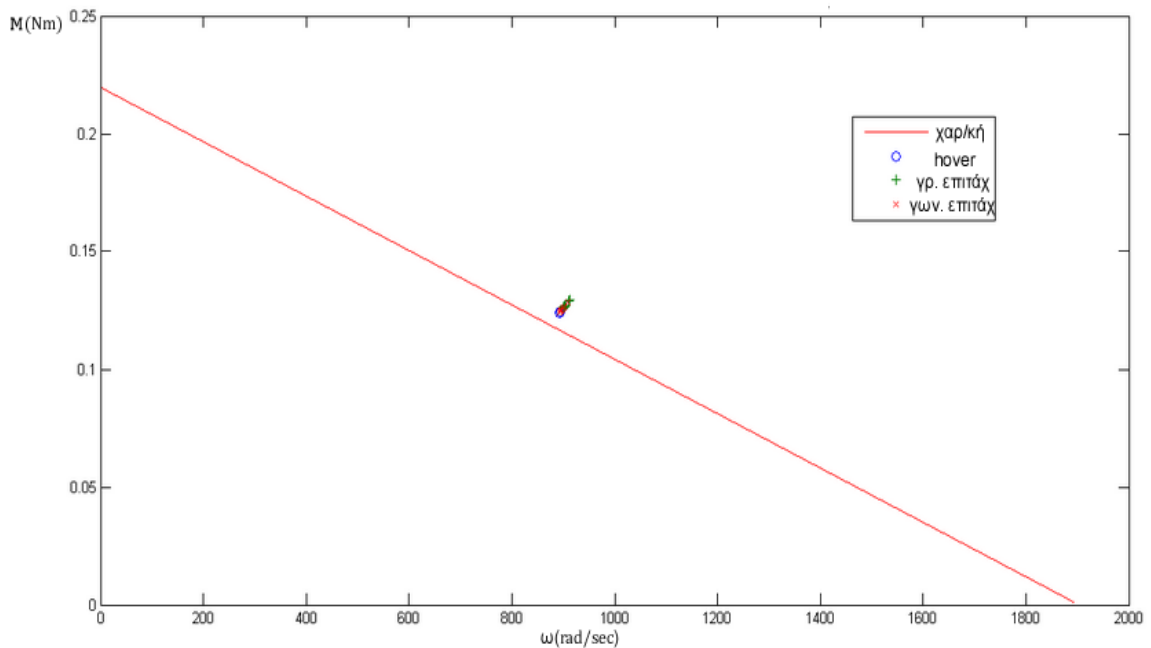
Σχήμα 4.36. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 1.88kg.



Σχήμα 4.37. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.08kg.



Σχήμα 4.38. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.28kg.



Σχήμα 4.39. Επάρκεια των πραγματικών ηλεκτροκινητήρων για μάζα 2.44kg.

Από τα Σχ. 4.33, 4.35-4.39 σε συνδυασμό με τον Πιν. 4-15 συμπεραίνουμε ότι το ρομπότ αναμένεται μέχρι μία πρόσθετη μάζα $m_{ad} = 800\text{grams}$ να έχει πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά. Στην περίπτωση που $m_{ad} = 1000\text{grams}$ αυτό φαίνεται να μπορεί οριακά να αιωρείται και να έχει πολύ χαμηλές δυνατότητες για γραμμικές και γωνιακές μετατοπίσεις. Από αυτήν την πρόσθετη μάζα και μετά λοιπόν, αναμένουμε οι συγκεκριμένοι ηλεκτροκινητήρες να μην είναι επαρκείς. Ωστόσο, επιπρόσθετη μάζα 1kg είναι δύσκολο να προκύψει κατά την προσθήκη ηλεκτρονικών, στοιχείων μηχανών και γενικότερα κατά την διάρκεια του λεπτομερούς σχεδιασμού του οχήματος, οπότε τα παραπάνω διαγράμματα μας εξασφαλίζουν με σιγουριά ότι το τελικό πραγματικό ρομπότ θα παρουσιάζει αρκετά ικανοποιητική συμπεριφορά και μάλιστα σε περίπτωση που η πρόσθετη προκύπτουσα μάζα είναι κάτω από $m_{ad} = 600\text{grams}$, αναμένεται να παρουσιάζει πολύ μεγάλες δυνατότητες με επιταχύνσεις κοντά στο $1g$.

Για την πληρότητα, ελέγχονται και οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες ως προς την επάρκεια τους για δύο αντιπροσωπευτικές μάζες οχήματος 1.88kg και 2.28kg . Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία με αυτήν για τις αναλυτικές συνιστώσες και έτσι προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα (βλ. Σχ. 4.40 και 4.41). Τα Σχ. 4.40 και 4.41 πιστοποιούν την επάρκεια των σερβοκινητήρων και έτσι, σε συνδυασμό με τα προηγούμενα συμπεράσματα οι δυνατότητες και τα όρια του πραγματικού πλέον οχήματος μας έχουν ποσοτικοποιηθεί και οπτικοποιηθεί.

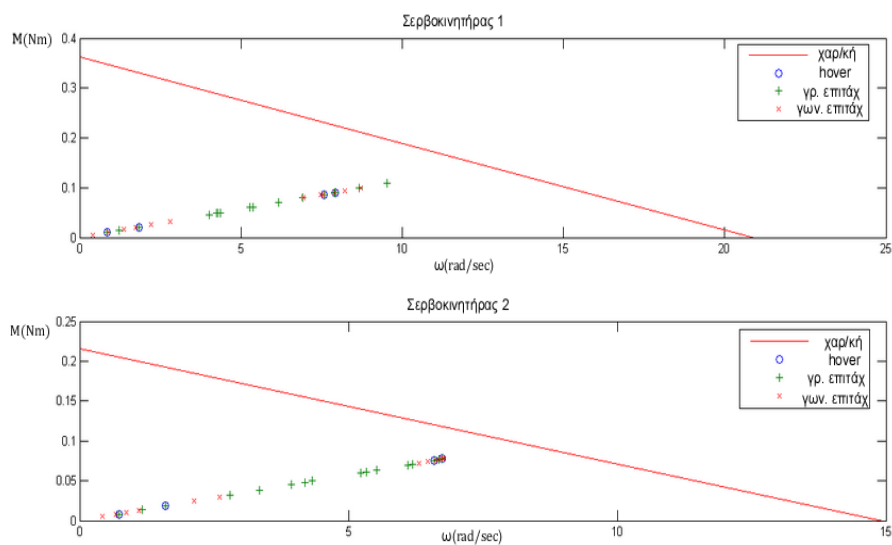
Συνοψίζοντας, το τελικό πραγματικό όχημα αποτελείται από τους ηλεκτρικούς σερβοκινητήρες των Πιν.4-8 και 4-9,. Τον ηλεκτροκινητήρα του Πιν. 4-10, το ESC του Πιν. 4-11, την μπαταρία του Πιν. 4-13 και τέλος την έλικα του Πιν. 4-14. Για τα γεωμετρικά μεγέθη του ρομπότ (βλ. Σχ. 4.7) ισχύει:

$$L = 26\text{cm} \quad (4-108)$$

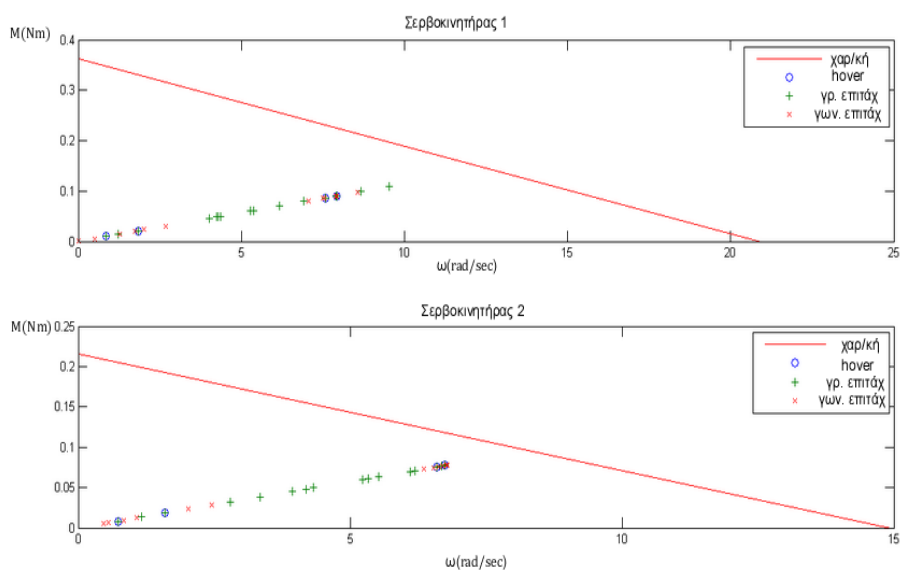
όπου υπενθυμίζεται ότι L είναι το μήκος του ποδιού με την τιμή 26cm να προκύπτει από το αναλυτικό βέλτιστο διάνυσμα σχεδιασμού \mathbf{b}_{opt} (βλ. Εξ. (4-99)). Ακόμη:

$$a = 12.7\text{cm} \quad (4-109)$$

όπου με a συμβολίζεται η ακτίνα της στεφάνης ή ισοδύναμα το μισό μήκος του άξονα και είναι ίσο με το μισό της διαμέτρου D_p της πραγματικής έλικας (βλ. Πιν. 4-14). Τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη που αφορούν κυρίως τις διατομές των φορέων και τα πάχη τους είναι συγκεκριμένα και σταθερά (βλ. Εξ.(4-25)-(4-32)), η τιμή των οποίων αναμένεται να μεταβληθεί μετά από έναν βασικό έλεγχο αντοχής.



Σχήμα 4.40. Επάρκεια των σερβοκινητήρων για πραγματική μάζα 1.88kg.



Σχήμα 4.41. Επάρκεια των σερβοκινητήρων για πραγματική μάζα 2.28kg.

Μια τελευταία παρατήρηση αφορά τη συμπεριφορά του οχήματος ως προς τις αεροδυναμικές παρεμβολές μεταξύ των ελίκων. Ένας γενικός κανόνας ώστε να ελαχιστοποιηθούν αυτές κατά το δυνατόν στο σχεδιασμό των συμβατικών ιπτάμενων οχημάτων είναι το μήκος του ποδιού ή ισοδύναμα η απόσταση της βάσης από την έλικα να είναι τουλάχιστον δύο φορές η ακτίνα της [16]. Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι οι μόνες αεροδυναμικές απώλειες του ρομπότ αυτού είναι της μορφής που εμφανίζονται και στα συμβατικά οχήματα με σταθερό τον προσανατολισμό των ελίκων τους, τότε ο παραπάνω κανόνας σημαίνει για το οχημά μας ότι πρέπει να ισχύει:

$$L + a \geq D_p \quad (4-110)$$

συνθήκη η οποία ικανοποιείται αφού σύμφωνα με τις Εξ. (4-108) και (4-109) :
 $L + a = 38.7cm$ ενώ $D_p = 25.4cm$.

4.5 Σύνοψη

Αφού επεξεργασθήκαμε τις εξισώσεις που περιγράφουν ένα ολόνομο ιπτάμενο όχημα 15 β.ε. από το [1], τις φέραμε στη μορφή (4-21) και τις παραμετροποιήσαμε. Στη συνέχεια, όλες οι συνιστώσες ισχύος παραμετροποιήθηκαν με τη σειρά τους και εξήχθησαν αναλυτικές σχέσεις για αυτές μέσω του [15]. Επομένως, έχοντας αναλυτικές σχέσεις για κάθε γεωμετρικό μέγεθος και γενικότερα για κάθε συνιστώσα που αποτελεί το ρομπότ μας, καταστρώθηκε ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε Matlab ο οποίος προσδιορίζει ένα βέλτιστο διάλυμα σχεδιασμού. Κριτήριο αυτού του αλγορίθμου ήταν να μπορεί να αιωρείται άνετα έχοντας μαζί του μια πρόσθετη μάζα-payload $m_{ad} = 300grams$ καθώς και να έχει περαιτέρω δυνατότητες για γραμμικές και γωνιακές μετατοπίσεις. Αφού προσδιορίστηκε το διάλυμα σχεδιασμού έχει καθοριστεί πλέον πλήρως το ρομπότ αποτελούμενο όμως από αναλυτικές-ιδανικές συνιστώσες. Η συμπεριφορά του και οι δυνατότητες του ελέγχονται περαιτέρω για μεγαλύτερες τιμές του payload m_{ad} ώστε να βρεθεί η οριακή μάζα την οποία μπορεί να σηκώσουν ικανοποιητικά οι ηλεκτροκινητήρες και οι επενεργητές και να εξασφαλισθεί με σιγουριά ότι το διάλυμα σχεδιασμού που προέκυψε είναι επαρκές.

Στη συνέχεια, αντιστοιχίσθηκαν τα αναλυτικά αποτελέσματα που προέκυψαν με πραγματικούς ηλεκτροκινητήρες, μπαταρία, επενεργητές, ESC και έλικες της αγοράς και έτσι το όχημα παίρνει μια ρεαλιστική μορφή. Ο ίδιος έλεγχος που έγινε για το αναλυτικό όχημα έγινε και για να διαπιστωθούν οι δυνατότητες και η οριακή μάζα που μπορεί να σηκώσει το πραγματικό πλέον ρομπότ. Έτσι, σύμφωνα με τις πραγματικές συνιστώσες και τη μορφή που προσδιορίστηκε, το πραγματικό τελικό ρομπότ αναμένεται να έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες (0.5g – 1.2g) μέχρι συνολική μάζα οχήματος 1.88kg και ικανοποιητικές (0.15g – 0.5g) μέχρι μάζα 2.1 – 2.15kg . Η μάζα των 2.28kg αποτελεί την οριακή μέγιστη μάζα που μπορεί να σηκώσει το πραγματικό ρομπότ με δυνατότητες πολύ μικρές. Υπενθυμίζεται ότι τα τελευταία φαίνονται στα Σχ. 4.33, 4.35-4.39 σε συνδυασμό με τον Πιν. 4-15.

Η συνέχεια της εργασίας πραγματεύεται τον πλήρη λεπτομερή σχεδιασμό αυτού του πραγματικού ρομπότ ώστε να είναι υλοποιήσιμο και να λάβει μια πλήρως πραγματική και τελική μορφή ώστε τελικά να κατασκευαστεί.

5 Λεπτομερής σχεδιασμός του ρομπότ

5.1 Εισαγωγή

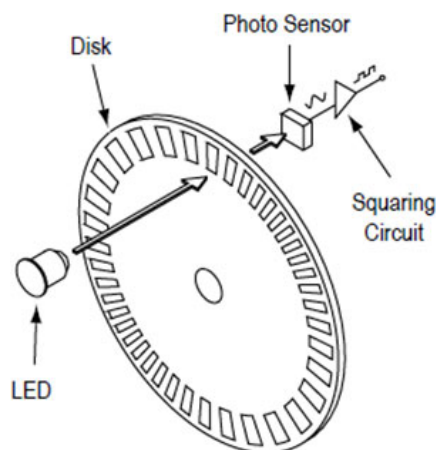
Το Κεφάλαιο αυτό σκοπό έχει να δώσει μια υλοποιήσιμη και τελική μορφή στο πραγματικό ρομπότ που προέκυψε στο Κεφ. 4. Αυτό προϋποθέτει το λεπτομερειακό καθορισμό των γεωμετρικών μεγεθών του οχήματος όπως το πόδι, τη στεφάνη, τον άξονα, τη βάση καθώς και τις απαιτούμενες συνδέσεις μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, θα φανούν με λεπτομέρεια οι απαιτούμενες εδράσεις του κάθε φορέα καθώς και η δομή της βάσης με τις στηρίξεις της ώστε να προκύψει ένας στοιβαγός σκελετός. Οποιαδήποτε άλλη συνιστώσα όπως οι ηλεκτροκινητήρες, οι έλικες, οι σερβοκινητήρες, τα ESC και η μπαταρία τοποθετούνται με ακρίβεια και με λεπτομέρεια ως προς τον τρόπο στήριξης τους. Παρουσιάζονται επίσης όλα τα απαραίτητα στοιχεία μηχανών τα οποία απαιτούνται για τη λειτουργικότητα και τη συνδεσιμότητα των επιμέρους συνιστωσών του ρομπότ.

Ακόμη, θα γίνει ενδελεχής παρουσίαση δύο συνιστωσών οι οποίες δεν έχουν συζητηθεί καθόλου στα προηγούμενα κεφάλαια. Αυτά είναι οι παλμογεννήτριες (encoders) και οι δακτύλιοι ολίσθησης (slip rings). Όλα τα παραπάνω φυσικά σέβονται απόλυτα την τελική μορφή του οχήματος που υπέδειξε το Κεφ. 4 και τους περιορισμούς για την τοποθέτηση του κέντρου μάζας και του σημείου εφαρμογής της δύναμης ώσης κατά το Κεφ. 3. Επιπρόσθετα, οποιοδήποτε στοιχείο δεν είναι τυποποιημένο αλλά προκύπτει από δικό μας σχεδιασμό ελέγχεται ως προς την αντοχή του με έναν συντελεστή ασφάλειας της τάξης του 2. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια η όποια λύση προτείνεται να έχει την ελάχιστη δυνατή μάζα. Για το λόγο αυτό τυποποιημένες και έτοιμες λύσεις από την αγορά με μη παραδεκτή μάζα, θα αποφευχθούν και θα αντικατασταθούν από αντίστοιχο δικό μας σχεδιασμό. Όπως θα γίνει για παράδειγμα στην περίπτωση των κόπλερ (couplings) και των δακτυλίων ολίσθησης (slip rings) της αγοράς.

Αναφορικά με τις παλμογεννήτριες επισημαίνονται τα εξής. Όπως έχει αναφερθεί στο τέλος του Κεφ. 1, οι σερβοκινητήρες λόγω ενός μηχανικού διακόπτη (mechanical stop) αλλά κυρίως λόγω του ποτενσιόμετρου που ανιχνεύει τη γωνιακή του θέση κάθε στιγμή, έχουν ένα συγκεκριμένο εύρος γωνιών στο οποίο εργάζονται. Εμείς, προκειμένου να το άρουμε αυτό και να προσομοιώσουμε ένα DC motor συνεχούς περιστροφής αφαιρούμε αυτά τα στοιχεία. Η αφαίρεση του ποτενσιόμετρου όμως εισάγει την ανάγκη για αισθητήρες ανίχνευσης γωνιακής θέσης προκειμένου να επιτευχθεί ο έλεγχος των κινητήρων αυτών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας ένα πιο λεπτομερές πολυσωματικό δυναμικό μοντέλο από αυτό που υπάρχει στο [1] αναπτύχθηκε από τον Υ.Δ Μ. Ράμπ και περιγράφει με μεγάλη λεπτομέρεια το ρομπότ μας. Αυτό το μοντέλο έχει ως απαραίτητη προϋπόθεση να υπάρχει γνώση της γωνιακής θέσης και των παραγώγων αυτής του ποδιού και του άξονα του ρομπότ. Αυτό, όμως ταυτίζεται με την ανάγκη για γνώση των γωνιακών θέσεων των αξόνων των σερβοκινητήρων. Έτσι, είναι απαραίτητο να εισαχθούν παλμογεννήτριες (encoders) που να ανιχνεύουν τις γωνίες των δύο ανεξάρτητων περιστροφών τόσο για το μεμονωμένο έλεγχο των σερβοκινητήρων όσο και για το νέο πολυσωματικό μοντέλο με το οποίο θα πετάξει το ρομπότ αυτό.

Οι παλμογεννήτριες (encoders) χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τις οπτικές και τις μαγνητικές. Η βασική δομή των πρώτων αποτελείται από τα εξής (βλ. Σχ. 5.1). Υπάρχει ένας υάλινος ή πλαστικός διαφανής δίσκος αποτελούμενος από ομόκεντρους κύκλους που ονομάζονται ίχνη. Στο κάθε ίχνη εκπέμπεται μία δέσμη φωτός LED η οποία καταλήγει σε μία φωτοδίοδο ή φωτοτρανζίστορ. Με τη σειρά τους οι οπτικοί encoders χωρίζονται σε απόλυτους (absolute) και σχετικούς (incremental). Ως προς τη δομή, οι δεύτεροι διαφέρουν των absolute με την έννοια ότι αποτελούνται από δύο ίχνη μόνο διαφορετικής αντίθεσης σε διάφορα φάσης 90° . Συνηθίζεται επίσης να υπάρχει και ένα τρίτο ίχνη το οποίο σηματοδοτεί την αναφορά (zero). Έτσι, η έξοδος των incremental encoders αποτελείται από δύο σήματα διαφοράς φάσης 90° και ένα τρίτο αναφοράς. Από την άλλη, οι absolute encoders ψηφιοποιούν το σήμα σε κωδικοποίηση Gray της οποίας η ανάλυση εξαρτάται από τον αριθμό των ίχνων. Όσο περισσότερα είναι τα ίχνη του υάλινου δίσκου δηλαδή, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακριτοποίηση των γωνιών. Τέλος, η ουσιαστική και καθοριστική διαφορά αυτών των δύο είναι ότι οι absolute encoders δίνουν πληροφορία για την πραγματική γωνιακή θέση του άξονα, ενώ οι incremental κάθε φορά που παίρνουν εντολή εκ νέου, αρχίζουν και μετρούν από τη μηδενική γωνία (αναφορά) αμελώντας το που είναι ο άξονας εκείνη τη στιγμή.

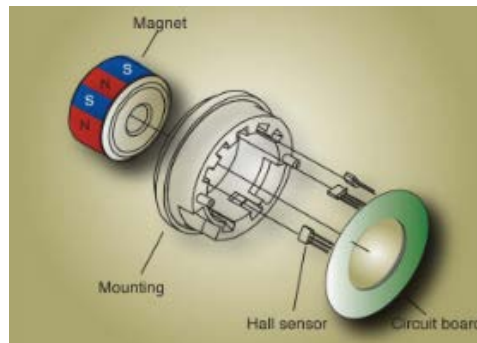


Σχήμα 5.1. Rotary Optical Encoder.

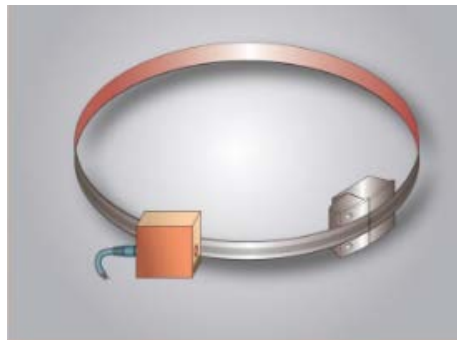
Η άλλη μεγάλη κατηγορία είναι οι μαγνητικές παλμογεννήτριες. Η λειτουργία αυτών βασίζεται στο Hall-Effect ή στη χρήση υλικών των οποίων η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης αλλάζει λόγω μεταβολών του μαγνητικού πεδίου (magnetoresistive materials). Εναλλακτικά, υπάρχουν και οι μαγνητικοί επαγωγικοί encoders. Στο Σχ. 5.2 απεικονίζεται η βασική δομή ενός encoder που βασίζεται στο Hall-Effect, η οποία αποτελείται από έναν τροχό αποτελούμενο περιμετρικά από ζεύγη βόρειων και νότιων πόλων, η εναλλαγή των οποίων ανιχνεύεται από αισθητήρες Hall (Hall Sensors) που συνδέονται σε ένα κύκλωμα (Circuit Board). Το Σχ. 5.3 απεικονίζει μια δομή ενός magnetoresistive encoder όπου ένας αισθητήρας μετατρέπει σε σήμα τις μαγνητικές μεταβολές λόγω της περιστροφής του δαχτυλιδιού το οποίο προσαρμόζεται σε έναν άξονα και έτσι υπάρχει πληροφορία για τη γωνιακή θέση του άξονα κάθε στιγμή. Στο Σχ. 5.4 υπάρχει η εικόνα ενός μαγνητικού επαγωγικού encoder ο οποίος ανιχνεύει το ρεύμα αντίδρασης μιας ή περισσότερων σπειρών

και έτσι παράγει το ανάλογο σήμα το οποίο δείχνει τη γωνιακή θέση του άξονα. Και οι τρεις μαγνητικοί encoders διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο της εξόδου τους σε incremental και absolute όπως οι οπτικοί.

Ένα βασικό στοιχείο αυτών των αισθητήρων είναι το ότι παραμένουν ανεπηρέαστοι από εξωτερικές διαταραχές όπως ταλαντώσεις, υψηλές θερμοκρασίες κ.λπ. και έτσι προτιμώνται από τους οπτικούς. Επίσης, παρότι και οι τρεις βασίζονται σε μαγνητικές μεταβολές για την παραγωγή σήματος, όταν ο σχεδιασμός τους είναι αξιόπιστος και γίνεται υπεύθυνα, αυτοί είναι ανεξάρτητοι μαγνητικών παρεμβολών και διαταραχών, δίνοντας έτσι πολύ ακριβή αποτελέσματα για την επιθυμητή γωνιακή θέση ενός περιστρεφόμενου άξονα.



Σχήμα 5.2. Hall-Sensing Encoder.



Σχήμα 5.3. Magnetoresistive sensor.



Σχήμα 5.4. Inductive Magnetic Encoder.

Τα παραπάνω αφορούν την εσωτερική δομή και τον βασικό τρόπο λειτουργίας των περιστροφικών παλμογεννητριών που κυκλοφορούν. Σε ο.τι αφορά την εξωτερική τους δομή αυτές συναντώνται στην πλειοψηφία τους στις εξής μορφές. Η πρώτη μορφή αποτελείται

στην ουσία από ένα σώμα όπου ο αισθητήρας και ο δίσκος με ίχνη ή το μαγνητικό υλικό (αναλόγως τον τύπο του encoder) βρίσκονται στο ίδιο περίβλημα. Στο Σχ. 5.5 απεικονίζεται ένας τέτοιος encoder της εταιρείας AVAGO [31], ο οποίος εφαρμόζει πάνω στον άξονα που περιστρέφεται και περιλαμβάνει μέσα στο περίβλημα του τον αισθητήρα και το δίσκο.



Σχήμα 5.5. Περιστροφική παλμογεννήτρια της εταιρείας AVAGO [31].

Μια άλλη συνήθης μορφή λόγω της ευελιξίας που προσφέρει, αποτελείται από τον αισθητήρα και τον δίσκο ή το μαγνητικό υλικό ως ξεχωριστά σώματα πλέον. Στο Σχ. 5.6 φαίνεται ένας αισθητήρας τέτοιου τύπου της εταιρείας RLS [32] όπου το μαγνητικό υλικό το οποίο προσαρμόζεται πάνω στον περιστρεφόμενο άξονα είναι ένα μαγνητικό δαχτυλίδι. Αυτό, ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα τοποθετημένο σε κατάλληλη απόσταση από αυτόν.



Σχήμα 5.6. Διάταξη encoder με μαγνητικό δαχτυλίδι και αισθητήρα της εταιρείας RLS [32].

Στο Σχ. 5.7 απεικονίζεται μια άλλη μεγάλη ομάδα encoders που κυκλοφορεί στην αγορά και ανήκει στην παραπάνω συνήθη μορφή όπου το μαγνητικό υλικό και ο αισθητήρας είναι ξεχωριστά σώματα. Το μαγνητικό υλικό είναι ένα κυλινδρικό μαγνητάκι το οποίο με κάποια διαμόρφωση μπορεί να προσαρμοστεί πάνω σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Το μαγνητάκι αυτό, ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα σε κατάλληλη απόσταση από αυτόν. Η παλμογεννήτρια η οποία απεικονίζεται είναι επίσης της εταιρείας RLS.



Σχήμα 5.7 Διάταξη encoder με κυλινδρικό μαγνητάκι και αισθητήρα της εταιρείας RLS [32].

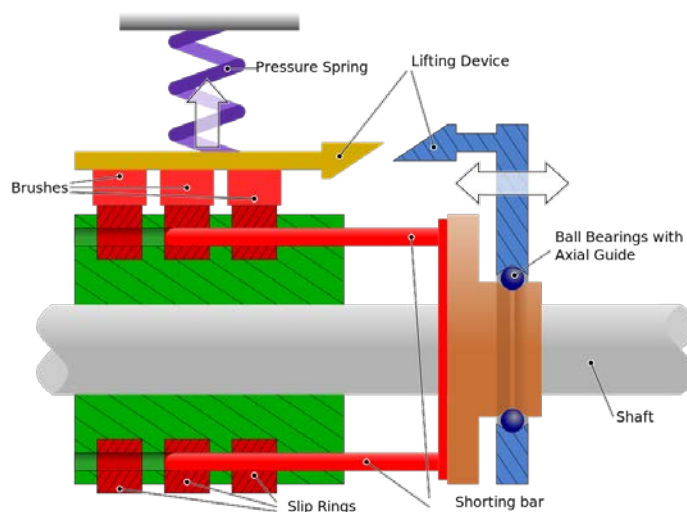
Για περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις παλμογεννήτριες παραπέμπουμε στο [33].

Σε εφαρμογές όπως αυτή του συγκεκριμένου ιπτάμενου οχήματος όπου έχουμε κινούμενα καλώδια είτε λόγω ιδιοπεριστροφής κινητήρων είτε λόγω της έδρασης αυτών σε περιστρεφόμενα μέρη όπως άξονες, βραχίονες κλπ, απαιτείται η χρήση δακτυλίων ολίσθησης. Η λογική αυτών φαίνεται στο Σχ. 5.8. Η κύρια δομή τους αποτελείται από ψήκτρες (brushes) οι οποίες βρίσκονται μόνιμα σε επαφή με ρευματοφόρους δακτύλιους (βλ. κομμάτι με πράσινο χρώμα στο Σχ. 5.8). Αυτοί, είναι ένα σώμα με το περιστρεφόμενο μέρος-άξονα ώστε να έχουν μηδενική σχετική ταχύτητα ως προς τους κινούμενους ρευματοφόρους αγωγούς (κόκκινο χρώμα). Οι ψήκτρες εδράζονται σε ένα ακίνητο σύστημα ως προς τον περιστρεφόμενο άξονα, στο οποίο μεταφέρουν το ρεύμα που τις διαρρέει λόγω της επαφής τους με τους ρευματοφόρους δακτυλίους.

Θεμελιώδες στοιχείο της δομής ενός δακτυλίου ολίσθησης είναι το σύστημα πίεσης. Κύριος ρόλος του είναι να στηρίζει τις ψήκτρες και να τις ασκεί την κατάλληλη πίεση ώστε να εξασφαλίζεται η μόνιμη επαφή με τους δακτυλίους και άρα η αγωγή ρεύματος. Το υλικό των ψηκτρών αυτών είναι από άνθρακα λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζει αλλά και της χαμηλής σκληρότητας ώστε να μην προκαλεί φθορές στους δακτυλίους. Σε πιο σπάνιες περιπτώσεις συναντώνται και ανθρακόψηκτρες με προσθήκη χαλκού, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αγωγής μεγαλύτερων ρευμάτων αλλά και για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες πτώσης τάσης όταν έχουμε να κάνουμε με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Αξίζει να σημειωθεί για την πληρότητα, ότι οι απλές ανθρακόψηκτρες επιτρέπουν αγωγή ρεύματος της τάξης των $15A/cm^2$ ενώ αυτές με την προσθήκη χαλκού φτάνουν τα $25A/cm^2$. Σε περίπτωση που εμφανίζονται μεγαλύτερες απαιτήσεις συνηθίζεται και η σύνδεση πολλών ψηκτρών παράλληλα. Τέλος, για συστήματα με μικρές διαταραχές και ταλαντώσεις συνίσταται για την ομαλή αγωγή του ρεύματος η ψήκτρα να ασκεί πίεση στους δακτυλίους και αντίστροφα 20 γραμμαρίων.

Στην αγορά η δομή του Σχ. 5.8 εμφανίζεται με μικρές παραλλαγές κυρίως ως προς το σύστημα πίεσης και τις ψήκτρες. Για παράδειγμα το σύστημα πίεσης μπορεί να είναι ένα πολύ απλό ελατήριο συνδεδεμένο στην άκρη του με έναν αγωγίμο ακροδέκτη για στήριξη και μεταφορά ρεύματος στο ακίνητο σύστημα έως μία ολόκληρη δομή αποτελούμενη από συστήματα ελατηρίων και στοιχείων μηχανών, με το τελευταίο να εμφανίζεται κατά κόρον σε ηλεκτρικές μηχανές πολύ μεγάλου μεγέθους. Παράδειγμα ενός απλού συστήματος πίεσης

μαζί με την ψήκτρα, φαίνεται στο Σχ.5.9. Σημειώνεται ότι τα συστήματα αυτά αναφέρονται σε ένα δράπανο της εταιρείας BOSCH.



Σχήμα 5.8. Βασική δομή ενός τυπικού δακτυλίου ολίσθησης (slip ring).



Σχήμα 5.9. Ανθρακόψηκτες με σύστημα πίεσης από δράπανο BOSCH.

Συγκεκριμένα, για πραγματικές εφαρμογές, η λύση με τις ψήκτρες, τους δακτυλίους και τα συστήματα πίεσης είναι διαθέσιμη ως εξάρτημα, παρεχόμενο κατά κύριο λόγο από κινέζικες εταιρείες. Ως προς την εξωτερική δομή και τον τρόπο τοποθέτησης, αυτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη φαίνεται στο Σχ. 5.10 και αφορά ένα slip ring το οποίο προσαρμόζεται στην άκρη του περιστρεφόμενου άξονα και τροφοδοτείται με τα κινούμενα καλώδια. Από την άλλη του πλευρά υπάρχουν τα ακίνητα καλώδια τα οποία μπορούν να οδηγηθούν πλέον σε ένα ακίνητο σύστημα. Σημειώνεται ότι συνήθως οι δακτύλιοι ολίσθησης αυτής της κατηγορίας έχουν σημαντική μάζα λόγω του ότι ο όγκος τους εξαρτάται από τον άξονα στον οποίο εδράζονται αλλά κυρίως λόγω του ότι το περίβλημά τους είναι μεταλλικό. Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία αφορά slip rings τα οποία δέχονται από την μία μεριά κινούμενα καλώδια και μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε ανεξάρτητα του άξονα. Αυτά, κατά κόρον έχουν πολύ χαμηλές μάζες ωστόσο άγουν πολύ χαμηλές τιμές ρευμάτων. Ένας δακτύλιος ολίσθησης τέτοιου τύπου απεικονίζεται στο Σχ. 5.11.



Σχήμα 5.10. Through Bore Slip Ring της εταιρείας MOFLON [34].



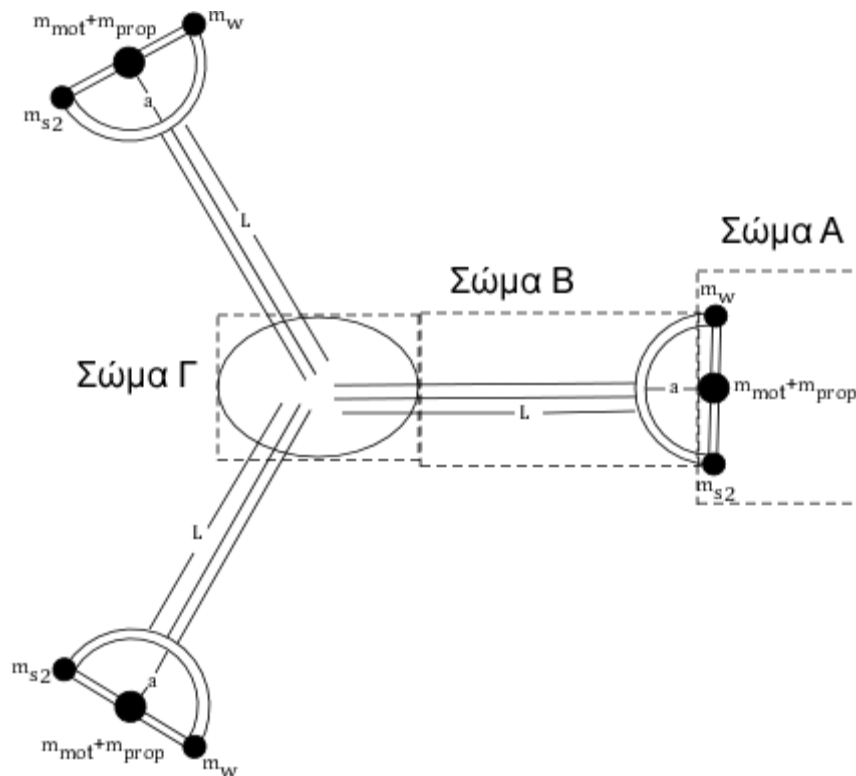
Σχήμα 5.11. Miniature Slip Ring της εταιρείας KEYO [35].

5.2 Λεπτομερειακός σχεδιασμός του ρομπότ και έλεγχος της αντοχής των μηχανικών μερών του

Ο λεπτομερειακός σχεδιασμός του οχήματος μας και ο έλεγχος της αντοχής του θα γίνει σταδιακά. Συγκεκριμένα, το ρομπότ χωρίζεται σε τρία συστήματα σωμάτων, (βλ. Σχ. 5.12). Το Σώμα Α συνίσταται από τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικα, το δεύτερο σερβοκινητήρα, το αντίβαρο και τον κάθετο άξονα της δεύτερης απαιτούμενης ανεξάρτητης περιστροφής μαζί με τις εδράσεις του. Ακόμη, το Σώμα Β είναι η επαλληλία του ποδιού, των εδράσεων αυτού και της στεφάνης. Τέλος, το Σώμα Γ αποτελείται κυρίως από το σκελετό της βάσης, την μπαταρία, τα τρία ESC, τους τρεις σερβοκινητήρες για την πρώτη ανεξάρτητη περιστροφή και τα ηλεκτρονικά. Σε όλα τα παραπάνω προστίθενται όπου χρειαστούν, οι παλμογεννήτριες, οι δακτύλιοι ολίσθησης (slip rings), τα στοιχεία μηχανών και γενικότερα οποιοδήποτε επιπρόσθετο κομμάτι απαιτείται για τη συνδεσιμότητα όλων των παραπάνω και τη λειτουργικότητα του οχήματος.

Για τον έλεγχο της αντοχής του κάθε τεμαχίου που απαρτίζει το ρομπότ αυτό σημειώνονται τα εξής. Τα φορτία τα οποία καταπονούν σχεδόν κάθε μέρος αυτού του οχήματος είναι πρωταρχικά η δύναμη ώσης που δημιουργείται από την περιστροφή της έλικας. Η τιμή αυτής της δύναμης λαμβάνεται:

$$f_{\max} = 12N \quad (5-1)$$



Σχήμα 5.12. Όχημα ως σύστημα σωμάτων.

Αν κοιτάξει κανείς τα διαγράμματα επάρκειας των ηλεκτροκινητήρων του πραγματικού οχήματος και συγκεκριμένα το Σχ. 4.38 για την οριακή συνολική μάζα $2.28kg$ του οχήματος φαίνεται ότι η μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται στην έλικα είναι περίπου ίση με $0.15Nm$. Επιπρόσθετα, η σταθερά b είναι ίση με $0.015368N/Nm$ και υπολογίστηκε από τη σχέση με την οποία ορίσθηκε (Εξ. (4-66)) σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της πραγματικής έλικας του ρομπότ (βλ. Πιν 4-14). Διαιρώντας λοιπόν τη μέγιστη ροπή της έλικας $0.15Nm$ με τη σταθερά b προκύπτει μια μέγιστη δύναμη ώσης $10N$. Έτσι, για ασφάλεια εμείς θεωρούμε ότι η μέγιστη δύναμη ώσης που καταπονεί το όχημα είναι $12N$ (βλ. Εξ. (5-1)).

Ένα δεύτερο φορτίο του οχήματος είναι η ροπή του ηλεκτροκινητήρα, η οποία στη μόνιμη λειτουργία του, ισούται με τη ροπή αντίστασης της έλικας. Η τιμή αυτή λαμβάνεται ίση με τη μέγιστη ροπή M_{max} (βλ. Πιν. 4-10) η οποία ασκείται στο όχημα κατά την εκκίνηση των ηλεκτροκινητήρων. Έτσι, αν συμβολίσουμε με u_d τη ροπή αυτή, ισχύει:

$$u_d = 0.2195Nm \quad (5-2)$$

Τα υπόλοιπα φορτία του οχήματος, τα οποία καταπονούν το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής είναι οι ροπές λόγω των ηλεκτρικών σερβοκινητήρων. Οι μέγιστες τιμές αυτών-ροπές εκκίνησης, σύμφωνα με τις Εξ. (4-100) και (4-102) είναι για τον πρώτο και δεύτερο σερβοκινητήρα αντίστοιχα:

$$u_1 = 0.3628Nm \quad (5-3)$$

$$u_2 = 0.2157Nm \quad (5-4)$$

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται για την ανάλυση της αντοχής εξετάζει το κάθε σώμα χωριστά. Ανάλογα με την περίπτωση, ασκούνται στο κάθε σώμα μερικά ή όλα από τα παραπάνω φορτία και επιπρόσθετα καμπτικές ροπές λόγω της δύναμης ώσης. Για τις στατικές αυτές τιμές εξετάζεται πόση είναι η ισοδύναμη τάση von Mises. Απαιτείται αυτή η ισοδύναμη τάση να είναι κοντά στις δύο φορές μικρότερη του όριου διαρροής (yield strength) του κάθε φορέα. Έτσι, οι τελικές διαστάσεις του κάθε στοιχείου ελαχιστοποιούνται κατά το δυνατόν ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μάζα, μέχρι ο συντελεστής ασφάλειας να είναι κοντά στο 2:

$$S_f = 2 \quad (5-5)$$

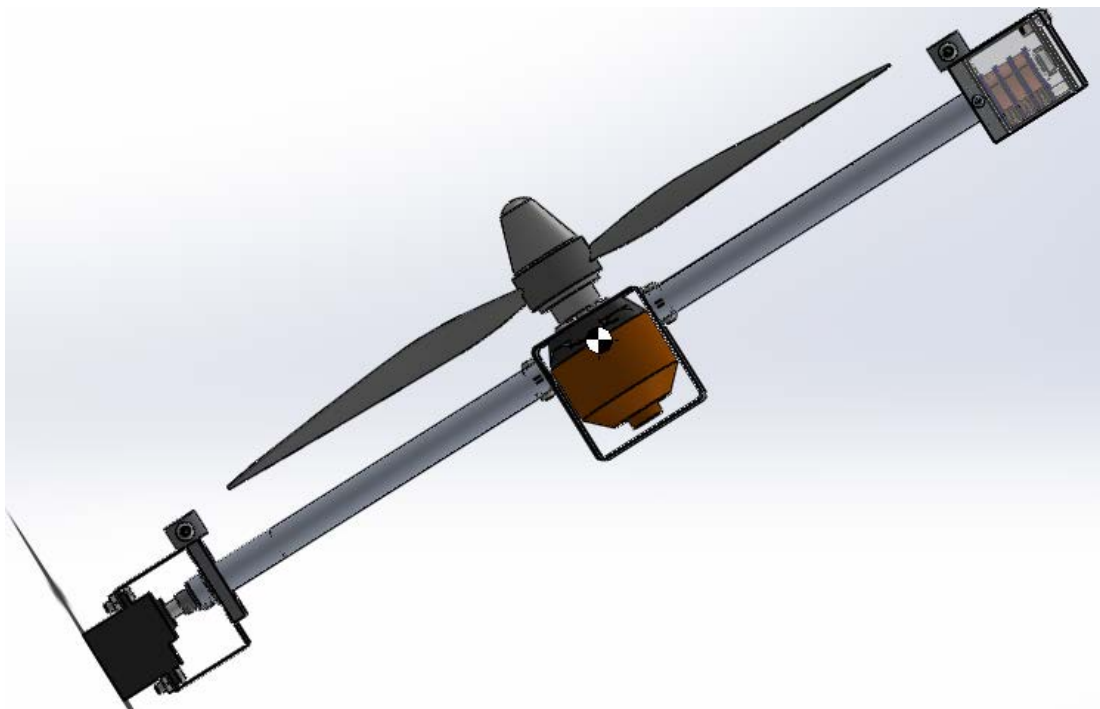
Να σημειωθεί ότι όλα τα σώματα θεωρούνται ότι είναι πακτωμένα στα σημεία σύνδεσης με τα υπόλοιπα σώματα και έτσι πλέον έχουμε για τον κάθε φορέα ένα πλήρως ορισμένο πρόβλημα συνοριακών τιμών το οποίο καλείται να μας λύσει το Solidworks Simulation και να δώσει αυτή την ισοδύναμη τάση.

Ξεκινώντας την μελέτη της αντοχής από το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης, ελέγχουμε σταδιακά-αλυσιδωτά το κάθε σώμα ως προς την αντοχή του μέχρι να φτάσουμε στη βάση του ρομπότ, στην οποία συγκλίνουν τελικά όλα τα φορτία.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω λοιπόν παρουσιάζεται ο λεπτομερής σχεδιασμός των συστημάτων σωμάτων Α, Β, Γ, ο οποίος στην ουσία αφορά την υλοποίηση και τον εμπλουτισμό του τελικού μηχανισμού που επιλέχθηκε και παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2 ως ιδέα (βλ. Σχ. 2.5), πάντα σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα των Κεφ. 3 και 4.

5.2.1 Λεπτομερής Σχεδιασμός Σώματος Α

Η λεπτομερής και τελική μορφή του Σώματος Α όπως προέκυψε, απεικονίζεται στο Σχ. 5.13



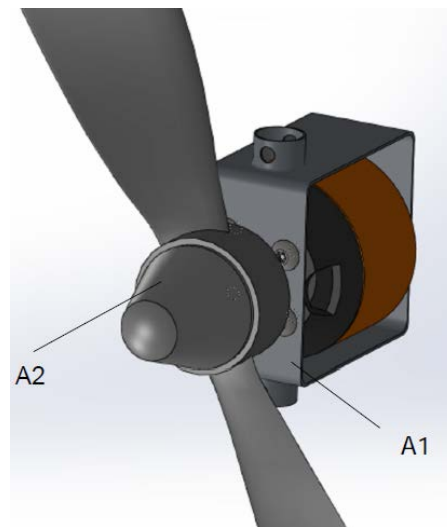
Σχήμα 5.13. Λεπτομερής και τελική μορφή Σώματος Α

Συναρμολόγημα ηλεκτροκινητήρα, έλικας και τεμαχίου στήριξης του

Από τα κυριότερα υποσυστήματα του Σώματος A (βλ. Σχ. 5.13) είναι αυτό του Σχ. 5.14 με τις ονομασίες των τεμαχίων που το απαρτίζουν να παρουσιάζονται στον Πιν. 5-1. Σε αυτά συμπληρώνονται ο ηλεκτροκινητήρας και η έλικα όπως προέκυψαν από το Κεφ. 4 (βλ. Σχ. 4.29) και (4.32) αντίστοιχα.

Πίνακας 5-1. Τεμάχια που απαρτίζουν το ένα κύριο υποσύστημα του Σώματος A

Συμβολισμός	Ονομασία
A1	Προσαρμογέας έλικας
A2	Τεμάχιο έδρασης ελικοφόρου ηλεκτροκινητήρα



Σχήμα 5.14. Συναρμολόγημα ελικοφόρου ηλεκτροκινητήρα, προσαρμογέα έλικας και τεμαχίου έδρασης τους

Συναρμολόγημα κάτω άξονα, ρουλεμάν, δακτυλίου ασφάλειας, κοπλέρ και δεύτερου σερβοκινητήρα

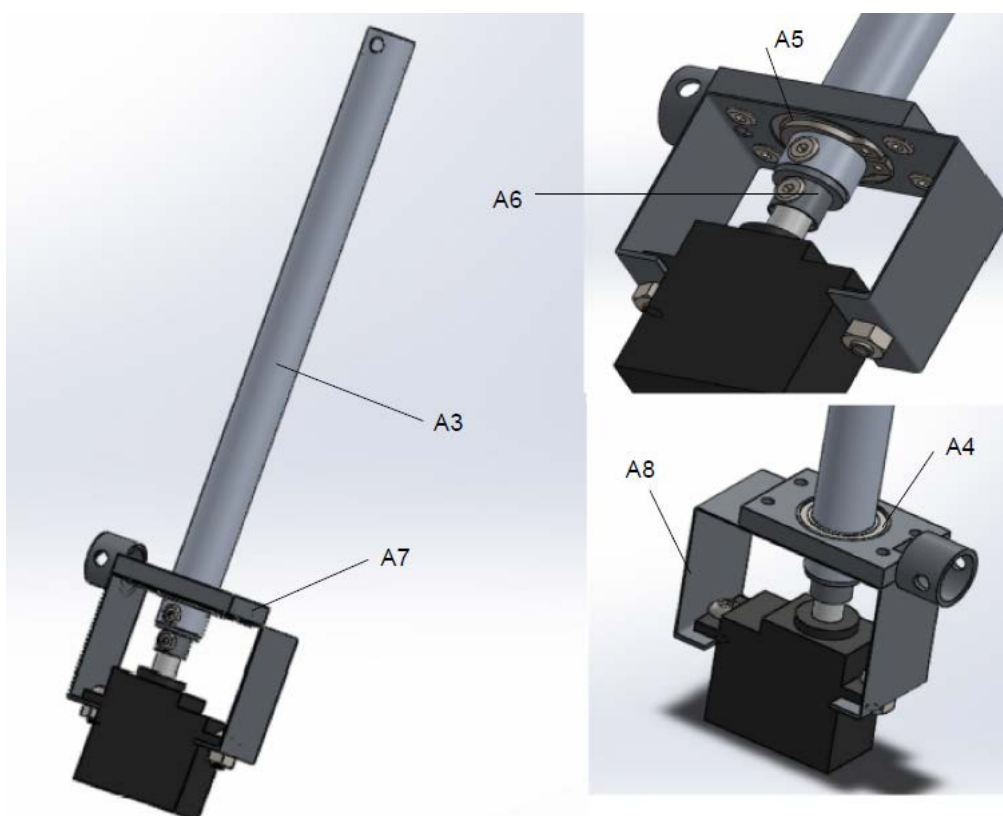
Το δεύτερο κύριο υποσύστημα του Σώματος A (βλ. Σχ. 5.13) απεικονίζεται στο Σχ. 5.15. Οι ονομασίες των τεμαχίων που το απαρτίζουν παρουσιάζονται στον Πιν. 5-2 εκτός από το σερβοκινητήρα της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής ο οποίος επιλέχθηκε στο Κεφ. 4 (βλ. Σχ.4.26).

Συναρμολόγημα πάνω υποσυστήματος Σώματος A

Το τρίτο και τελευταίο υποσύστημα του Σώματος A φαίνεται στο Σχ. 5.16, με τις ονομασίες των τεμαχίων που το απαρτίζουν να παρουσιάζονται στον Πιν. 5-3. Σημειώνεται για την πληρότητα ότι το ρουλεμάν και ο δακτύλιος ασφάλειας του πάνω άξονα (βλ. Σχ. 5.16 και Πιν 5-3) είναι πανομοιότυπα με αυτά του Σχ. 5.15 και έτσι διατηρείται ο συμβολισμός του Σχ. 5.15 και του Πιν. 5-2.

Πίνακας 5-2. Τεμάχια που απαρτίζουν το δεύτερο κύριο υποσύστημα του Σώματος A

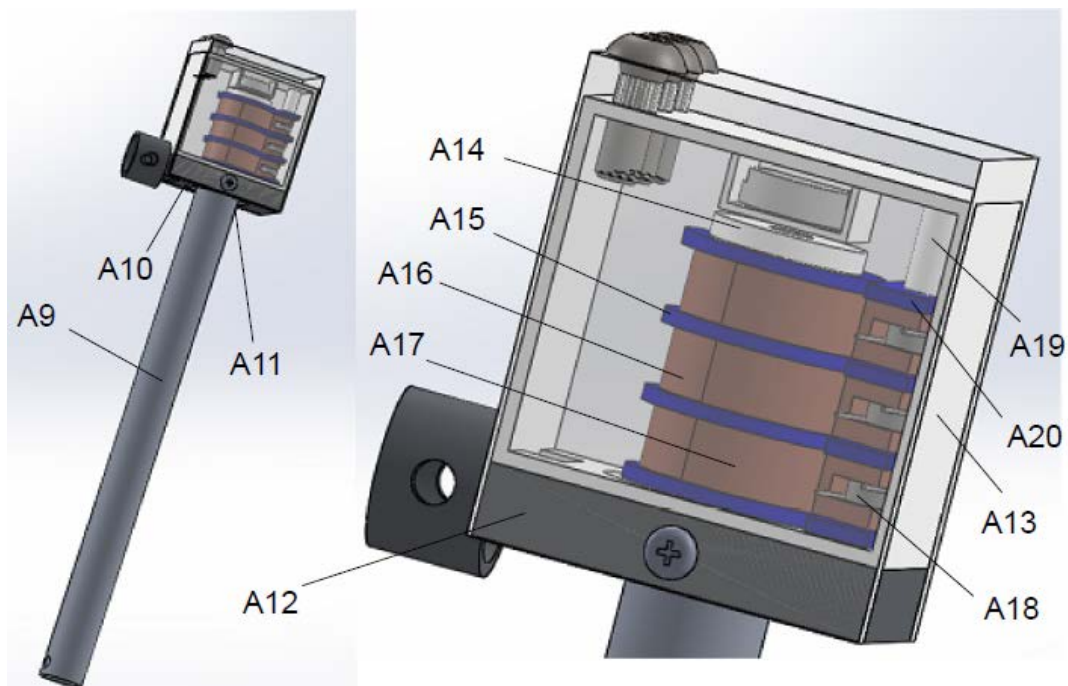
Συμβολισμός	Ονομασία
A3	Κάτω άξονας
A4	Ρουλεμάν Σώματος A
A5	Δακτύλιος ασφάλειας Σώματος A
A6	Κόπλερ δευτέρου σερβοκινητήρα και κάτω άξονα
A7	Έδραση κάτω άξονα
A8	Τεμάχιο στήριξης δευτέρου σερβοκινητήρα



Σχήμα 5.15. Συναρμολόγημα κάτω άξονα, ρουλεμάν, δακτυλίου ασφάλειας, κοπλέρ και δευτέρου σερβοκινητήρα

Πίνακας 5-3. Τεμάχια που απαρτίζουν το τρίτο κύριο υποσύστημα του Σώματος A

Συμβολισμός	Ονομασία
A9	Πάνω άξονας
A10	Ρουλεμάν Σώματος A
A11	Δακτύλιος ασφάλειας Σώματος A
A12	Πάνω έδραση
A13	Πλαστικό τεμάχιο έδρασης slip ring
A14	Πλαστικός ABS σωλήνας
A15	Πλαστικός μονωτικός δακτύλιος
A16	Χάλκινος δακτύλιος
A17	Χάλκινο έλασμα
A18	Στροφικό ελατήριο πίεσης
A19	Πείρος στήριξης ελασμάτων, ελατηρίων και μονώσεων
A20	Πλαστικό μονωτικό τεμάχιο

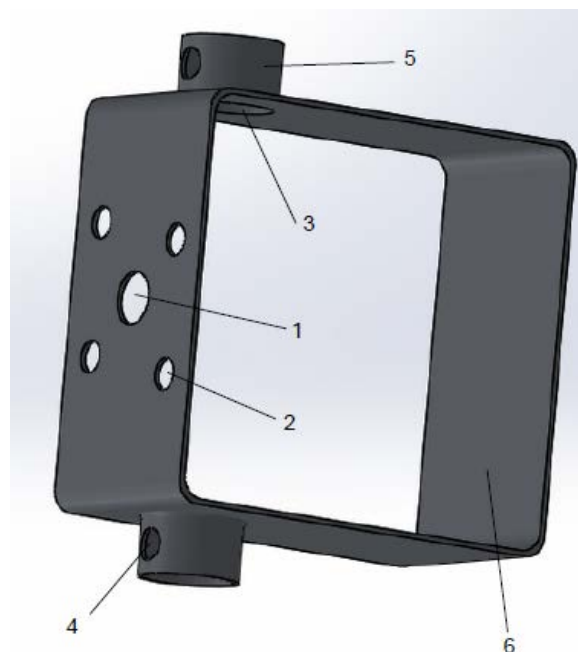


Σχήμα 5.16. Τρίτο κύριο υποσύστημα Σώματος Α

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και περιγράφεται με λεπτομέρεια κάθε συνιστώσα που απαρτίζει τα τρία κύρια υποσυστήματα του Σώματος Α.

Τεμάχιο Α1 στήριξης του ηλεκτροκινητήρα και της έλικας

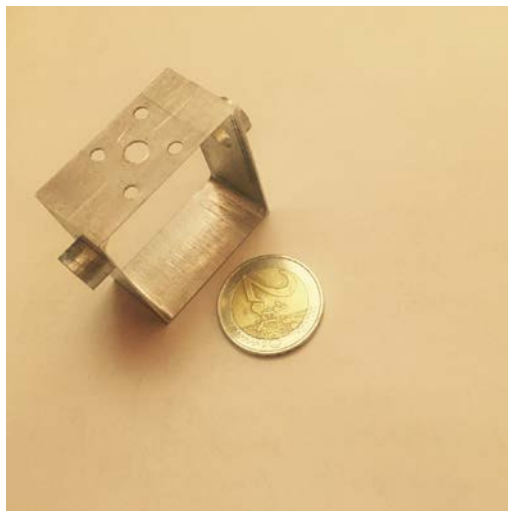
Το τεμάχιο Α1, το οποίο φιλοξενεί τον ηλεκτροκινητήρα και την έλικα, απεικονίζεται στο Σχ. 5.17.



Σχήμα 5.17. Τεμάχιο Α1 στο οποίο εδράζεται ο ελικοφόρος ηλεκτροκινητήρας.

Το υλικό του είναι από ντουραλουμίνιο της σειράς 2 και συγκεκριμένα το 2030. Η πρώτη οπή με τον αριθμό 1 είναι $\Phi 5$ και ο ρόλος της είναι για να περνάει ο κινούμενος άξονας του ηλεκτροκινητήρα (βλ. Σχ. 4.29). Οι οπές με τον αριθμό 2 υπάρχουν ώστε να περαστούν βίδες M3 και έτσι να μπορεί να συνδεθεί ο ηλεκτροκινητήρας στο τεμάχιο αυτό. Η διάταξη τους σχετικά με την κεντρική οπή δεν είναι τυχαία και προέκυψε ώστε να υπάρχει το ελάχιστο δυνατό υλικό κατά την οριζόντια έννοια. Με τον αριθμό 3 συμβολίζεται η οπή από την οποία περνάνε τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα ώστε να κατευθυνθούν σταδιακά προς τη βάση. Οι οπές με τον αριθμό 4 χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του τεμαχίου αυτού με τους άξονες A3 και A9 μέσω κοχλιών M3. Με τον αριθμό 5 συμβολίζονται τα δύο κυλινδράκια τα οποία εφαρμόζουν στους άξονες αυτούς και αναμένεται να συνδεθούν με αυτούς (εκτός των κοχλιών) με ειδική κόλλα. Τέλος, το 6 είναι το κύριο σώμα και στην ουσία το τεμάχιο A1. Σημειώνεται ότι οι ακριβείς διαστάσεις αυτού του τεμαχίου βρίσκονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.1.

Το τεμάχιο αυτό κατασκευάστηκε ώστε να υπάρχει ένα πρώτο δείγμα και ένα εχέγγυο για το ότι αυτό είναι πράγματι κατασκευάσιμο και παρουσιάζεται στο Σχ. 5.18, ώστε μεταξύ άλλων, να οπτικοποιήσει στον αναγνώστη την τάξη μεγεθών αυτού του σχεδιασμού.

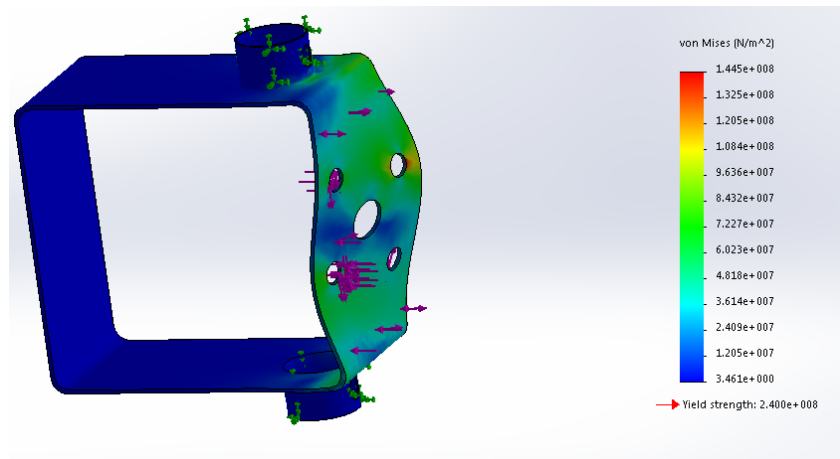


Σχήμα 5.18. Φωτογραφία κατασκευασμένου τεμαχίου A1 για τη φιλοξενία του ηλεκτροκινητήρα.

Για τον έλεγχο της αντοχής του τεμαχίου A1, μοιράζεται η δύναμη ώσης f_{\max} και η ροπή αντίστασης της έλικας u_d στις τέσσερις οπές με τον αριθμό 2. Επίσης, στην μπροστά επιφάνεια του τεμαχίου ασκούμε τις ροπές u_1 και u_2 . Αυτό είναι πακτωμένο στις δύο επιφάνειες επαφής 5 με τα υπόλοιπα σώματα και στις οπές 4 στις οποίες θα υπάρχουν κοχλίες.

Να σημειωθεί ότι τα όρια διαρροής για το υλικό 2030 είναι $240MPa$. Στο Σχ. 5.19 απεικονίζονται με μωβ χρώμα τα φορτία αυτά και με πράσινο οι πακτώσεις. Επιπρόσθετα, φαίνεται η ισοδύναμη τάση von Mises με κόκκινο χρώμα. Κάτω από την μπάρα χρωμάτων της εντατικής κατάστασης υπάρχει το όριο διαρροής (yield strength) του τεμαχίου αυτού.

Παρατηρείται από το σχήμα αυτό ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι σχεδόν ίσος με 2 όπως απαιτούμε.. Να σημειωθεί ότι η μάζα αυτού του τεμαχίου είναι $4.39gr$



Σχήμα 5.19. Φορτία, πακτώσεις και ισοδύναμη τάση von Mises για το τεμάχιο A1.

Προσαρμογέας έλικας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο τεμάχιο A1 (βλ. Σχ. 5.17 και 5.18) στηρίζεται με κοχλίες ο ηλεκτροκινητήρας μαζί με την έλικα που επιλέχθηκαν (βλ. Σχ. 4.29 και 4.32). Η σύνδεση της έλικας πάνω στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα γίνεται με το τεμάχιο A1 που φαίνεται στο Σχ. 5.20.

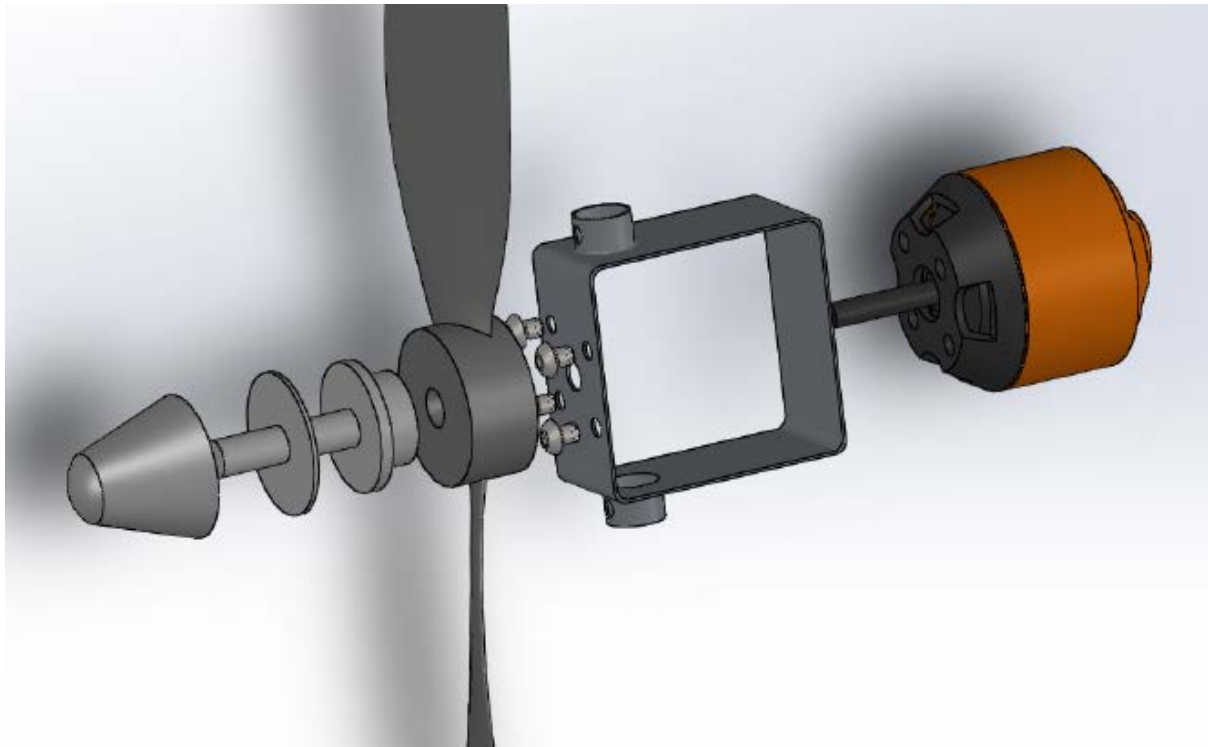


Σχήμα 5.20. Collet Type Propeller Adapter A2.

Αυτά τα τεμάχια στην αγορά καλούνται ως propeller adapters (προσαρμογείς ελίκων). Το συγκεκριμένο είναι collet type και εφαρμόζει σφιχτά πάνω στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα μέσω του τεμαχίου 1. Το τεμάχιο 2 είναι η ροδέλα που παρεμβάλλεται μεταξύ της έλικας και του 1 για την προστασία της πρώτης. Το 3 είναι ένα αρκετά σημαντικό τεμάχιο. Πρόκειται για ένα περικόχλιο το οποίο βιδώνεται στον άξονα του προσαρμογέα (ο οποίος δε φαίνεται στο Σχ.5.20). Μέσω της επαφής και της εφαρμογής πίεσης από το 3, τα ανοίγματα του 1 κουμπώνουν σφιχτά στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα. Να σημειωθεί ότι αυτό ζυγίζει 14.2gr .

Σύμφωνα με αυτά λοιπόν, στο Σχ. 5.21 φαίνεται ένα σχέδιο αντίστοιχο του Σχ. 5.14 το οποίο όμως τώρα είναι ένα στάδιο πριν την τελική συναρμολόγηση και περιλαμβάνει το

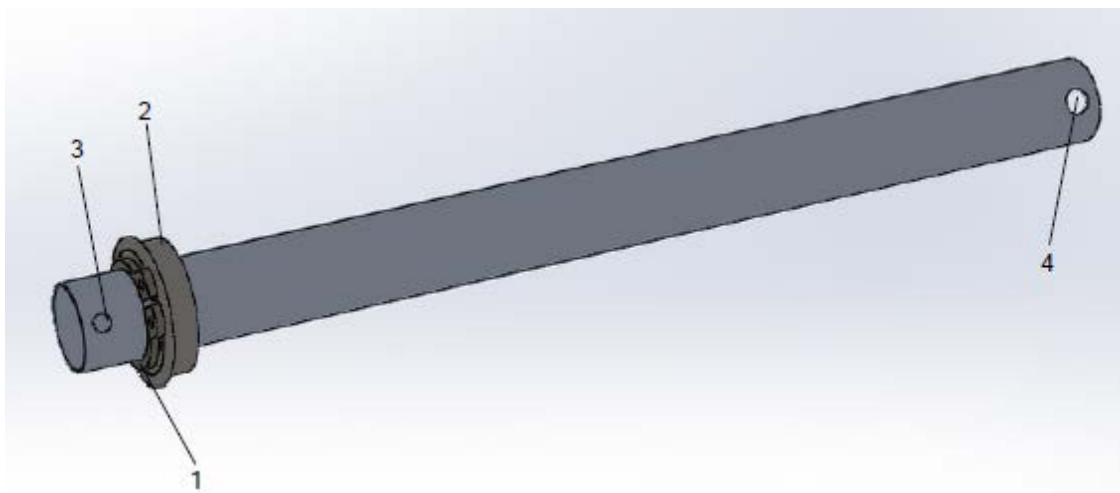
τεμάχιο A1 μαζί με το σύστημα ηλεκτροκινητήρα, έλικας και προσαρμογέα A2 καθώς και όλους τους απαραίτητους κοχλιές.



Σχήμα 5.21. ελικοφόρος ηλεκτροκινητήρας, προσαρμογέας έλικας και τεμάχιο έδρασης τους.

Κάτω άξονας A3 με ρουλεμάν A4 και δακτύλιο ασφάλειας A5

Ο κάτω άξονας A3 συνδέεται με το δεύτερο σερβοκινητήρα (βλ. Σχ. 2.5). Ο κύριος ρόλος του είναι να παίρνει κίνηση από το σερβοκινητήρα αυτόν και να τη μεταδίδει στο κάτω κυλινδράκι 5 του Σχ. 5.17. Το Σχ. 5.20 απεικονίζει τον εν λόγω φορέα.



Σχήμα 5.22. Κάτω άξονας A3 με το ρουλεμάν A4 και το δακτύλιο ασφάλειας A5.

Το υλικό αυτού του φορέα είναι ντουραλουμίνιο της σειράς 2 και συγκεκριμένα το 2024-T3 το οποίο παρουσιάζει λίγο υψηλότερη αντοχή από το 2030 που χρησιμοποιήθηκε στο τεμάχιο A2 και πολύ μεγάλη σταθερά ελαστικότητας. Με τον αριθμό 1 συμβολίζεται ο δακτύλιος ασφάλειας A5 του ρουλεμάν A4. Αυτό λαμβάνεται τυποποιημένο με κωδική ονομασία STWN10 από την εταιρεία Misumi [36] και απεικονίζεται στο Σχ. 5.23.



Σχήμα 5.23. STWN10 δακτύλιος ασφάλειας A5 της εταιρείας Misumi [36].

Το έδρανο κύλισης (ρουλεμάν) A10 που συμβολίζεται με τον αριθμό 2 λαμβάνεται και αυτό τυποποιημένο με κωδική ονομασία C-SFL6700ZZ της εταιρείας Misumi και απεικονίζεται στο Σχ. 5.24.



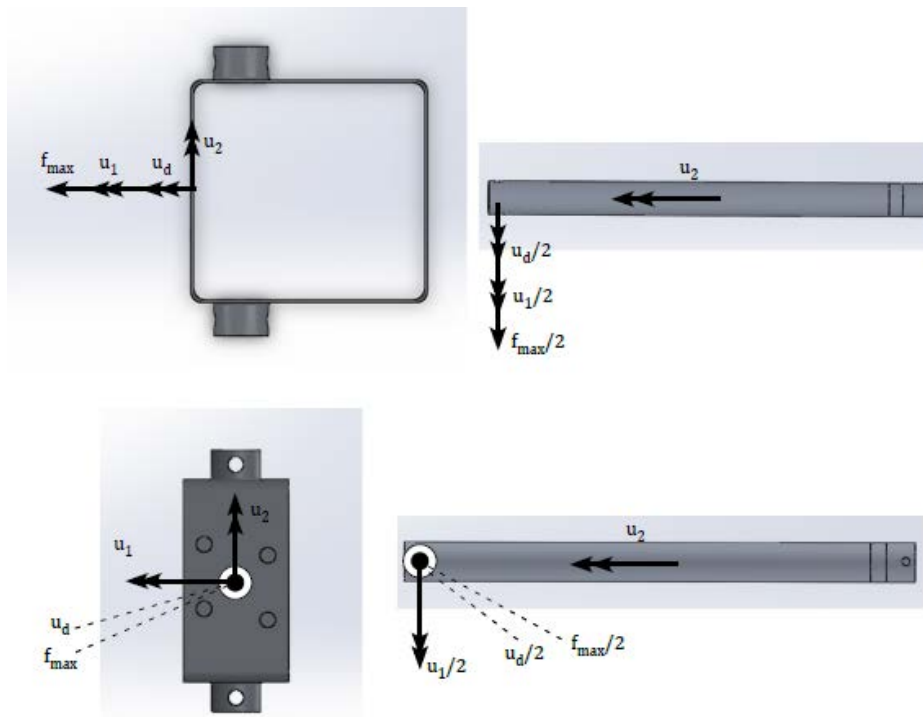
Σχήμα 5.24. C-SFL6700ZZ ρουλεμάν A4 της εταιρείας Misumi [36].

Σημειώνεται ότι οι ακριβείς διαστάσεις του δακτυλίου σύσφιξης A5 και του ρουλεμάν A4 υπάρχουν στο Παράρτημα Γ, στα Σχ. Γ.2 και Γ.3 αντίστοιχα.

Για να επανέλθουμε στο Σχ. 5.22, με τον αριθμό 3 απεικονίζεται μια οπή από την οποία σκοπεύει να περάσει κοχλίας $M2$ για να συνδέσει τον άξονα αυτόν με το κόπλερ (coupling) A6, μέσω του οποίου θα γίνει σύζευξη με το δεύτερο σερβοκινητήρα. Με τον αριθμό 4 απεικονίζονται οι οπές οι οποίες στην τελική συναρμολόγηση είναι ομόκεντρες με αυτές του αριθμού 4 του Σχ. 5.17 του τεμαχίου A1 και από τις οποίες θα περάσουν οι κοχλίες $M3$ ώστε να συνδεθούν τα δύο αυτά τεμάχια μεταξύ τους.

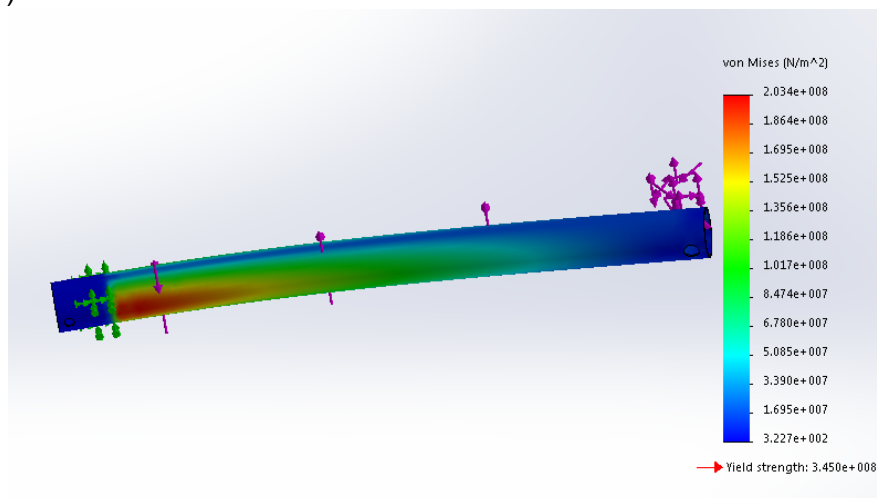
Προκειμένου να ελεγχθεί ο κάτω άξονας A3 ως προς την αντοχή του, ασκούμε τα φορτία του στις οπές 4 του Σχ. 5.22 και στο αντίστοιχο τμήμα το οποίο είναι σε επαφή με το κυλινδράκι 5 του Σχ. 5.17. Η πάκτωση αυτού του φορέα λαμβάνεται στο τμήμα του άξονα στο οποίο είναι προσαρμοσμένο σφιχτά το ρουλεμάν A10. Σημειώνεται ότι τα φορτία τα οποία καταπονούν αυτόν τον άξονα φαίνονται στο Σχ. 5.25 και στην ουσία είναι τα μισά από αυτά που ασκούνται στο τεμάχιο A1 (λόγω του ότι μοιράζονται πάνω και κάτω) με τη μόνη εξαίρεση την ροπή u_2 η οποία καταπονεί ολόκληρη αυτόν το φορέα. Τονίζεται επίσης ότι

διακρίνονται δύο περιπτώσεις φόρτισης όπως φαίνεται στο Σχ. 5.25. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται λόγω της δυνατότητας περιστροφής που έχει ο κατακόρυφος άξονας (άξονες A3 και A9) και έτσι στην πρώτη οριακή περίπτωση η ροπή αντίστασης u_d της έλικας ταυίζεται κατά κατεύθυνση με τη ροπή u_1 του πρώτου σερβοκινητήρα ενώ στη δεύτερη αυτές είναι σε ανεξάρτητους άξονες.

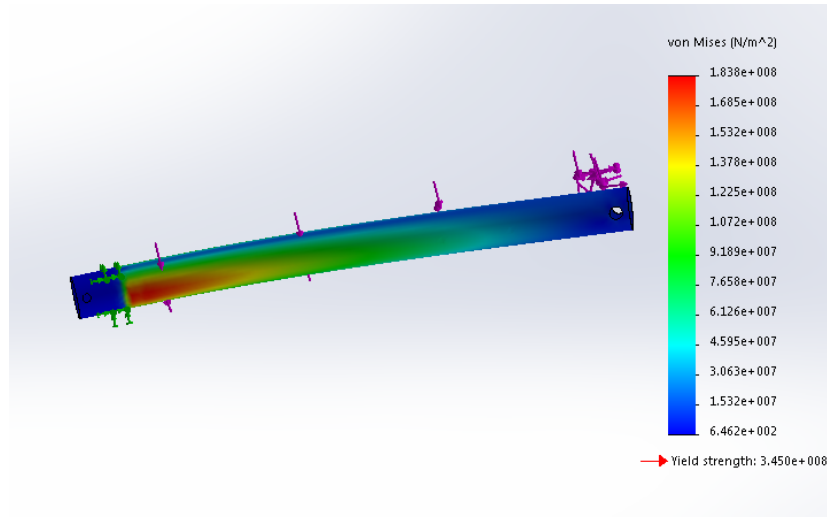


Σχήμα 5.25. Ροή φορτίων από το τεμάχιο A1 στον κάτω άξονα A3 χωρισμένη σε δύο περιπτώσεις.

Με τη βοήθεια του Solidworks λοιπόν παίρνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχ. 5.26 και 5.27 με το πρώτο να αντιστοιχεί στην πρώτη περίπτωση φόρτισης. Να σημειωθεί ότι το όριο διαρροής του 2024-T3 είναι $345MPa$ (κάτι το οποίο φαίνεται και στα σχήματα που ακολουθούν).



Σχήμα 5.26. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω άξονα A3 για την πρώτη περίπτωση φόρτισης.



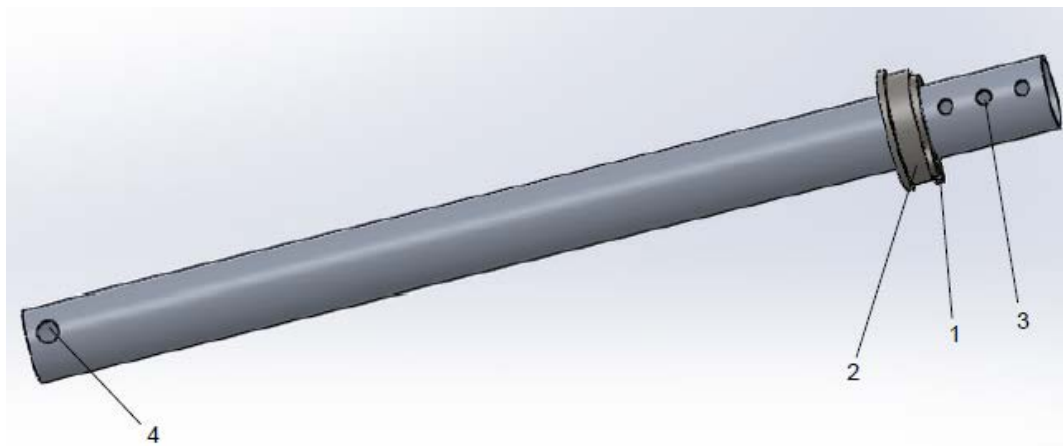
Σχήμα 5.27. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω άξονα A3 για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφάλειας και για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης είναι κοντά στο 2 με δυσμενέστερη την πρώτη περίπτωση φόρτισης όπου οι ροπές u_1 και u_d είναι συγγραμικές.

Σημειώνεται ότι οι ακριβείς διαστάσεις αυτού του φορέα απεικονίζονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.4. Ακόμη, η μάζα του είναι 3.25gr .

Πάνω άξονας A9 με ρουλεμάν A10 και δακτύλιο ασφάλειας A11

Ο πάνω άξονας A9 συνδέεται μέσω δύο κοχλιών M3 και με ειδική κόλλα με το πάνω κυλινδράκι 5 του Σχ. 5.17. Αυτός απεικονίζεται στο Σχ. 5.28.



Σχήμα 5.28. Πάνω άξονας A9 με το ρουλεμάν A10 και το δακτύλιο σύσφιξης A11.

Όπως και ο κάτω άξονας A3, αυτός ο φορέας είναι από ντουραλουμίνιο 2024-T3. Με τον αριθμό 4 συμβολίζονται οι οπές από τις οποίες θα περάσουν οι κοχλίες M3 για τη σύνδεση του με το τεμάχιο A1. Με τους αριθμούς 1 και 2 συμβολίζονται ο δακτύλιος ασφάλειας A11 και το ρουλεμάν A10 αντίστοιχα. Αυτά λήφθηκαν τυποποιημένα από τη Misumi και είναι τα ίδια με αυτά που θα χρησιμοποιηθούν και στον κάτω άξονα (βλ. Σχ. 5.23 και 5.24). Σε ό,τι

αφορά τις τρεις οπές με τον αριθμό 3, από αυτές θα εξέρχονται τα τρία καλώδια του ηλεκτροκινητήρα, ώστε με τον κατάλληλο σχεδιασμό δακτυλίων ολίσθησης που θα αναφερθεί στη συνέχεια να οδηγηθούν σταδιακά προς τη βάση.

Οι διαστάσεις της διατομής αυτού του φορέα λαμβάνονται ίδιες με τον κάτω άξονα A3 για συμμετρία και ευκολία κατασκευής. Να σημειωθεί ότι η αντοχή αυτού του φορέα εξασφαλίζεται από τα αποτελέσματα των Σχ. 5.26 και 5.27. Για την πληρότητα απλά αναφέρεται ότι οι καταπονήσεις αυτού του φορέα αναμένονται να είναι μικρότερες καθώς τα φορτία που τον καταπονούν είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά του κάτω άξονα A3 (βλ. Σχ. 5.25) πλην της ροπής u_2 . Οι πλήρεις διαστάσεις αυτού του τεμαχίου φαίνονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.5 και σημειώνεται επίσης ότι η μάζα του είναι 3.55grams .

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα υπόλοιπα μέρη τα οποία απαρτίζουν το Σώμα A και συνδέονται με τις παραπάνω συνιστώσες και πιο συγκεκριμένα με τους άξονες A3 και A9.

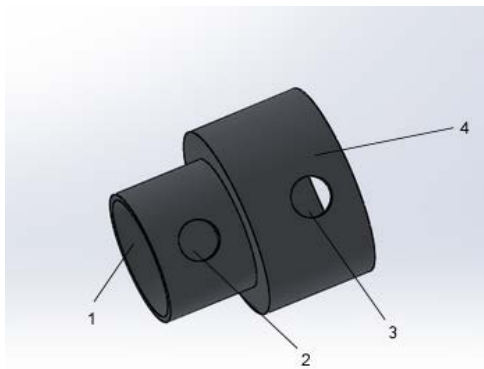
Κόπλερ A6 για το δεύτερο σερβοκινητήρα

Ο κάτω άξονας A3 (βλ. Σχ. 5.22) μέσω ενός κόπλερ παίρνει κίνηση από το δεύτερο σερβοκινητήρα (βλ. Πιν.4-9 και Σχ. 4.26). Κόπλερ της αγοράς όπως αναφέρθηκε και στην Παρ. 5.1 απορρίφθηκαν διότι ήταν πολύ βαριά είτε λόγω του ότι η πλειοψηφία αυτών είναι από χάλυβα είτε επειδή είχαν προδιαγραφές για αυστηρή ζυγοστάθμιση μεταξύ των συνδεόμενων αξόνων. Ένα τέτοιο κόπλερ (rigid type) της εταιρείας Misumi φαίνεται για παράδειγμα στο Σχ. 5.29.



Σχήμα 5.29. Rigid Type coupling της εταιρείας Misumi [36].

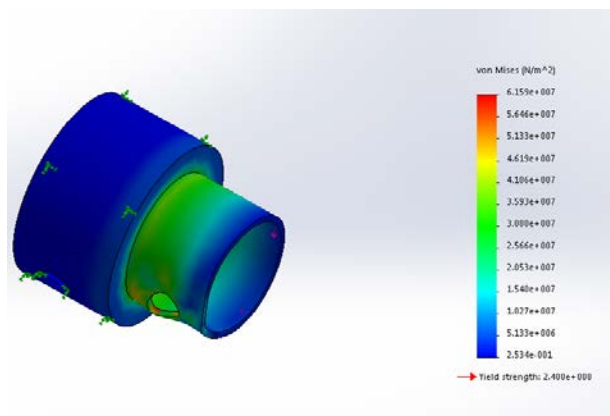
Έτσι, τα κόπλερ A6 για σύζευξη των δεύτερων σερβοκινητήρων που χρησιμοποιήσαμε σχεδιάζονται από εμάς. Το υλικό τους είναι από ντουραλουμίνιο 2030 και απεικονίζονται στο Σχ. 5.30.



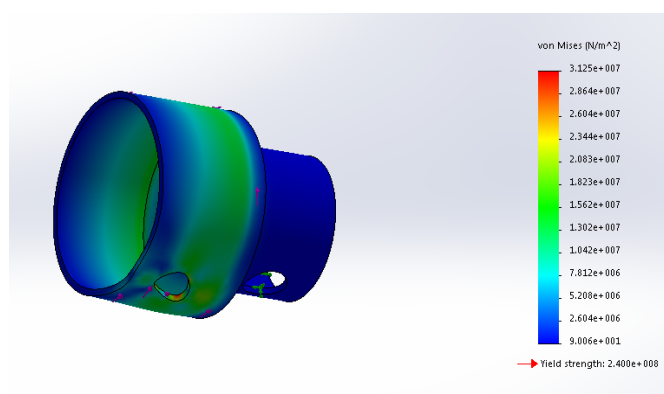
Σχήμα 5.30. Κόπλερ A6 από ντουραλουμίνιο 2030.

Με τον αριθμό 1 συμβολίζεται η επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή ο κάτω άξονας A3 του δευτέρου σερβοκινητήρα και με την οποία θα κολληθεί. Ακόμη, τη σύνδεση του σερβοκινητήρα με το κόπλερ A6 θα συμπληρώσει ένας κοχλίας *M2* ο οποίος περνάει από την οπή 2. Από την άλλη μεριά, το τμήμα 4 θα κολληθεί με το εσωτερικό του κάτω άξονα A3. Από την οπή 3 θα περάσει άλλη μία βίδα *M2* για την ενίσχυση της σύνδεσης κόπλερ A6 και κάτω άξονα A3. Σημειώνεται ότι οι ακριβείς διαστάσεις αυτού του τεμαχίου βρίσκονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.6.

Σε ο.τι αφορά την αντοχή αυτού του τεμαχίου A6 αρκεί να μπορεί να περνάει η ροπή u_2 του δευτέρου σερβοκινητήρα από τα τμήματα 1 και 4. Για τη διαστασιολόγηση και των δύο πλευρών γίνεται έλεγχος αντοχής δύο φορές. Την μία η ροπή ασκείται στο τμήμα 1 και στην οπή 2 ενώ το κόπλερ A6 είναι πακτωμένο στην οπή 3 και το τμήμα 4 (βλ. Σχ. 5.31). Ο δεύτερος έλεγχος αντοχής θεωρεί τα φορτία στα 3 και 4 ενώ τις πακτώσεις στα 1 και 2 (βλ. Σχ. 5.32).



Σχήμα 5.31. Φορτίο, πάκτωση και ισοδύναμη ταση von Mises του κόπλερ A6 για την μία πλευρά.



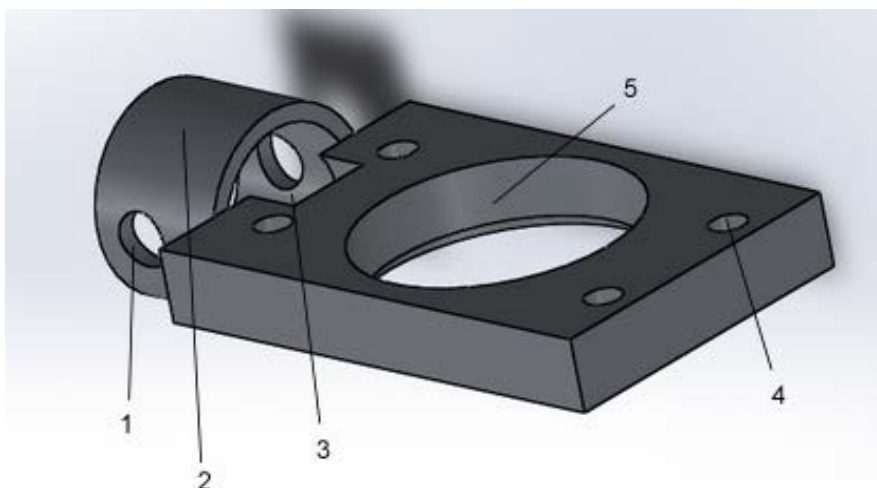
Σχήμα 5.32. Φορτίο, πάκτωση και ισοδύναμη ταση von Mises του κόπλερ A6 για την άλλη πλευρά.

Παρατηρείται ότι στη δυσμενέστερη καταπόνηση του Σχ. 5.31 ο συντελεστής ασφάλειας είναι σχεδόν 4. Περαιτέρω μείωση των παχών όμως δεν έχει ουσιαστική συνεισφορά στην

ελαχιστοποίηση της μάζας αφού το κόπλερ αυτό ζυγίζει ήδη 0.37 gr . Επίσης, το πάχος αυτό απαιτείται να είναι τουλάχιστον 0.3 mm ώστε να μπορεί να υφίσταται το λιγότερο ένα βήμα σπειρώματος στις οπές 2 και 3 (βλ. Σχ. 5.30).

Έδραση A7 κάτω άξονα

Το ρόλο της κάτω έδρασης A7 τον παίζουν το ρουλεμάν A4 με το δακτύλιο σύσφιγξης A5 σε συνδυασμό με το στέγασμα αυτών. Το τεμάχιο το οποίο φιλοξενεί αυτά απαιτείται να προβλέπει και για τη στήριξη του δεύτερου σερβοκινητήρα. Παρουσιάζεται λοιπόν στο Σχ. 5.33 το τεμάχιο το οποίο στεγάζει το ρουλεμάν και στην ουσία είναι αυτό που στηρίζει τον κάτω άξονα A3.



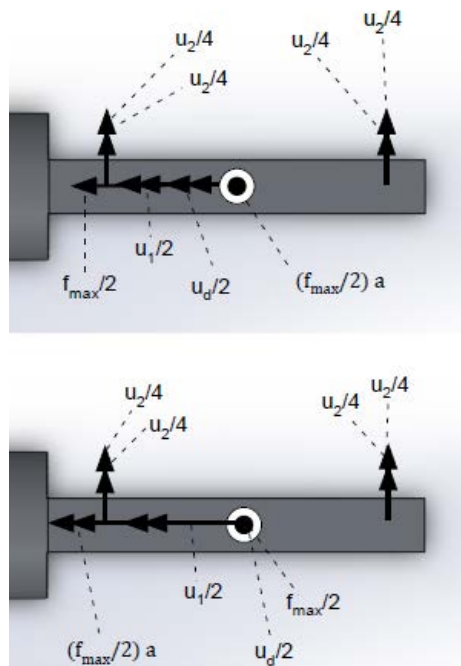
Σχήμα 5.33. Έδραση A7 κάτω άξονα.

Αρχικά, αναφέρεται ότι το υλικό αυτού του τεμαχίου είναι ντουραλουμίνιο 2030. Με τον αριθμό 1 συμβολίζονται οι δύο οπές από τις οποίες θα περάσουν $M3$ κοχλίες για να το συνδέσουν με τη στεφάνη του ρομπότ. Επιπλέον, η σύνδεση της στεφάνης με αυτό το τεμάχιο θα γίνει μέσω της επαφής με κόλλα του τμήματος 2 με το εσωτερικό της στεφάνης. Με τον αριθμό 3 συμβολίζεται το απαραίτητο κενό ώστε να οδηγηθούν τα καλώδια του δεύτερου σερβοκινητήρα στο εσωτερικό της στεφάνης. Οι οπές με τον αριθμό 4 υπάρχουν για τη σύνδεση αυτού του τεμαχίου με το ειδικό τεμάχιο το οποίο θα στηρίζει το δεύτερο σερβοκινητήρα και θα φανεί παρακάτω. Τελος, το τεμάχιο αυτό είναι ειδικά διαμορφωμένο στο τμήμα 5 ώστε να προσαρμόζεται σε αυτό το ρουλεμάν. Ακόμη, αναφέρεται ότι οι λεπτομερείς διαστάσεις αυτού του τεμαχίου βρίσκονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.7.

Για την αντοχή αυτού του τεμαχίου θεωρούμε ότι τα φορτία ασκούνται στην επιφάνεια 5 όπου προσαρμόζεται το ρουλεμάν A4. Εξαιρέση αποτελεί η ροπή u_2 η οποία ισομοιράζεται στις τέσσερις οπές 4 διότι όπως αναφέρθηκε μέσω αυτών θα γίνει σύνδεση με το τεμάχιο που στηρίζει το δεύτερο σερβοκινητήρα.

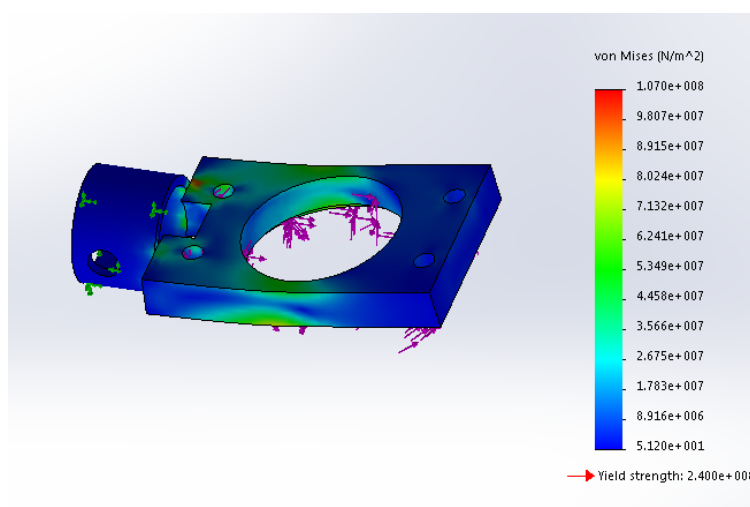
Οι φορτίσεις χωρίζονται σε δύο περιπτώσεις ως αποτέλεσμα της ροής των φορτίων του Σχ. 5.25 και φαίνονται στο Σχ. 5.34. Σημειώνεται επιπρόσθετα ότι εδώ εμφανίζεται ένα επιπρόσθετο φορτίο αυτό της καμπτικής ροπής λόγω της μισής δύναμης ώσης ($f_{\max} / 2$) a . Υπογραμμίζεται το εξής. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 5.12 αλλά και από τα αναφερθέντα

στα προηγούμενα κεφάλαια με a συμβολίζεται η ακτίνα της στεφάνης. Στους αναλυτικούς υπολογισμούς αυτή λήφθηκε ως μισή της διαμέτρου της έλικας D_p . Στην πραγματικότητα όμως το μέγεθος a λαμβάνεται μεγαλύτερο από το μισό του D_p ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση μεταξύ τους. Η ακριβής τιμή του φαίνεται στο σχετικό παράρτημα με τις ακριβείς διαστάσεις της στεφάνης η οποία θα παρουσιασθεί παρακάτω.

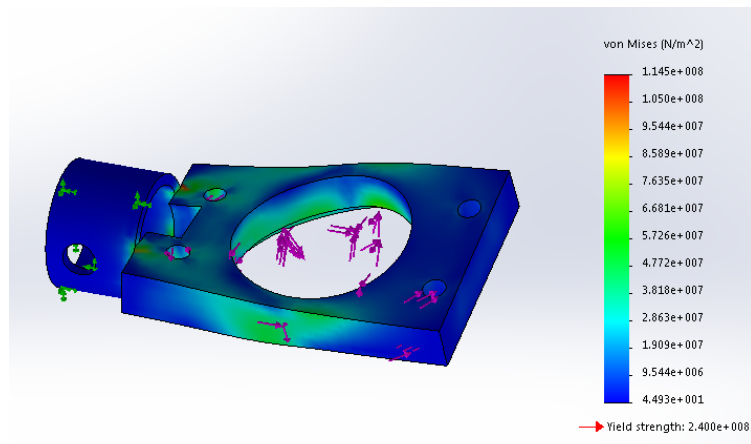


Σχήμα 5.34. Φορτία έδρασης για δυο περιπτώσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν από το Solidworks προκύπτουν τα Σχ. 5.35 και 5.36 τα οποία οπτικοποιούν την εντατική κατάσταση του τεμαχίου A7 για τις δύο περιπτώσεις φορτίσεων αντίστοιχα.



Σχήμα 5.35. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της έδρασης του κάτω άξονα για την πρώτη περίπτωση φόρτισης.

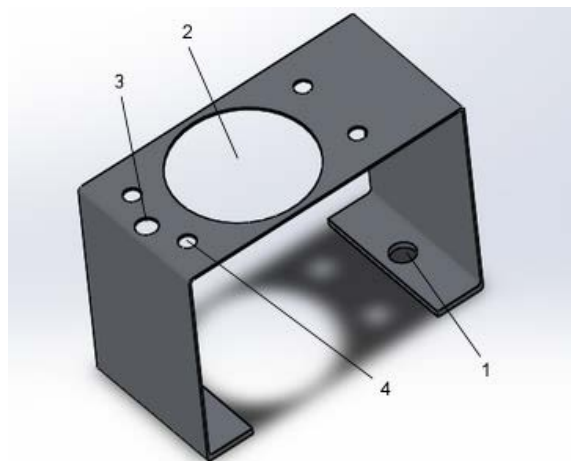


Σχήμα 5.36. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της έδρασης του κάτω άξονα για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.

Παρατηρείται ότι κατά τη δεύτερη περίπτωση όπου οι ροπές $u_1 / 2$ και $(f_{\max} / 2) a$ είναι συγγραμμικές, καταπονείται λίγο περισσότερο η κάτω έδραση. Χοντρικά όμως και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής ασφάλειας προκύπτει περίπου ίσος με 2. Σημειώνεται τέλος ότι η μάζα αυτού του τεμαχίου είναι 3.89 gr .

Πλαίσιο A8 στήριξης δεύτερου σερβοκινητήρα

Ο δεύτερος σερβοκινητήρας στηρίζεται στο τεμάχιο που απεικονίζεται στο Σχ. 5.37 και αυτό με τη σειρά του συνδέεται με την έδραση A7 του Σχ. 5.33.

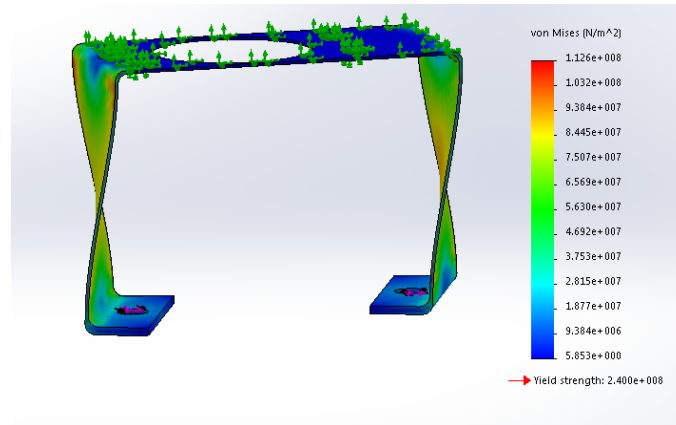


Σχήμα 5.37. Τεμάχιο A7 για τη στήριξη του δεύτερου σερβοκινητήρα.

Με τον αριθμο 1 απεικονίζονται οι δύο οπές από τις οποίες θα περάσουν κοχλίες $M3$ για τη σύνδεση του δεύτερου σερβοκινητήρα με το τεμάχιο αυτό. Με τον αριθμό 2 συμβολίζεται μια οπή ώστε να περνάει με ευκολία ο κάτω άξονας A3 για τη σύζευξη του με το σερβοκινητήρα. Ο αριθμός 3 αντιστοιχεί στο 3 του Σχ. 5.33 και είναι η απαιτούμενη οπή ώστε να περάσουν τα καλώδια του σερβοκινητήρα προς το εσωτερικό της στεφάνης. Τέλος, οι οπές 4 ταυτίζονται με τις οπές 4 του Σχ. 5.33 από τις οποίες θα περάσουν κοχλίες $M2$ για τη σύνδεση της κάτω έδρασης με αυτό το τεμάχιο. Σημειώνεται ακόμη ότι το υλικό αυτού του

τεμαχίου είναι ντουραλουμίνιο 2030. Οι ακριβείς του διαστάσεις υπάρχουν στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.8.

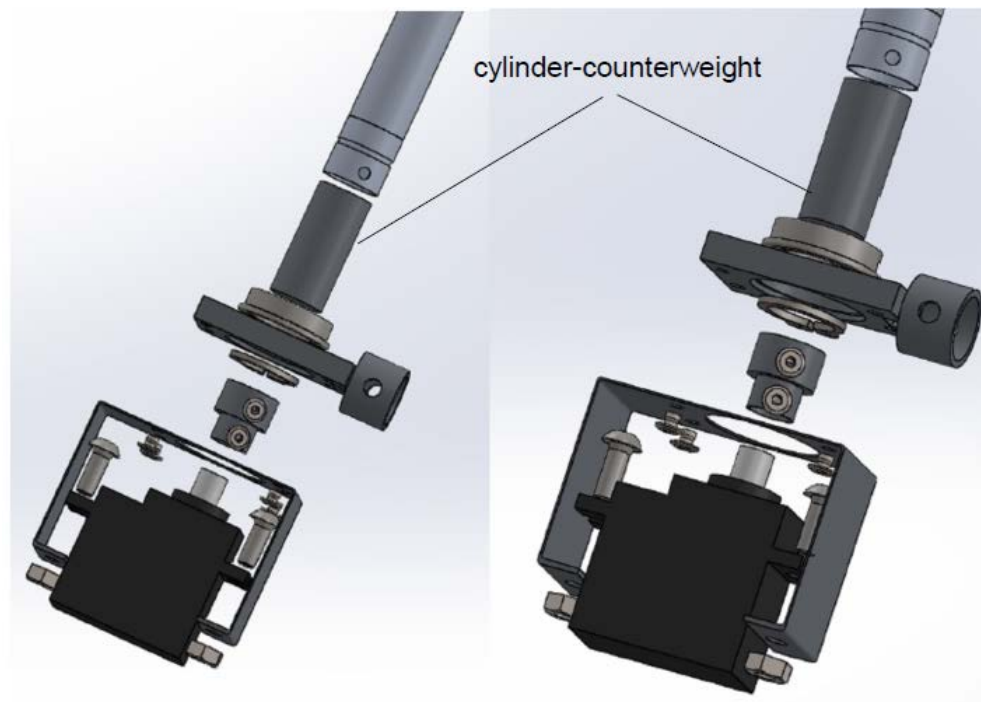
Ο έλεγχος της αντοχής του τεμαχίου αυτού απαιτεί η ροπή u_2 του δεύτερου σερβοκινητήρα να μοιράζεται στις δύο οπές 1 και η πάκτωση να είναι στις οπές 4 καθώς και στην πάνω επιφάνεια επαφής του τεμαχίου αυτού με την κάτω έδραση A7. Προκύπτει λοιπόν η εξής εντατική κατάσταση για το τεμάχιο αυτό στο Σχ. 5.38:



Σχήμα 5.38. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του τεμαχίου στήριξης του δεύτερου σερβοκινητήρα.

Παρατηρείται λοιπόν ένας συντελεστής ασφάλειας σχεδόν ίσος με 2. Να σημειωθεί επίσης ότι η μάζα αυτού του τεμαχίου είναι 1.60gr .

Σύμφωνα τα παραπάνω λοιπόν, στο Σχ. 5.39 φαίνεται ένα σχέδιο αντίστοιχο του Σχ. 5.15 το οποίο όμως τώρα είναι ένα στάδιο πριν την τελική συναρμολόγηση και περιλαμβάνει τα τεμάχια A3-A6, το δεύτερο σερβοκινητήρα και όλους τους απαραίτητους κοχλίες.

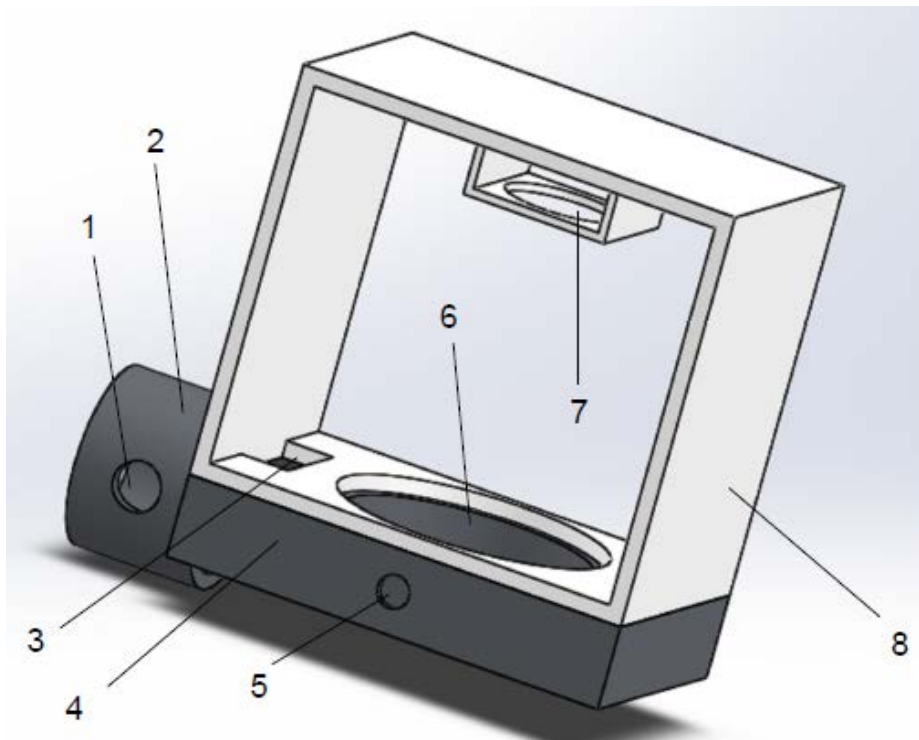


Σχήμα 5.39. Δεύτερο κύριο υποσύστημα Σώματος A πριν την τελική συναρμολόγηση.

Σημειώνεται ότι στο Σχ. 5.39 απεικονίζεται επιπλέον ένα κυλινδράκι-αντίβαρο, ο ρόλος του οποίου θα φανεί στη συνέχεια.

Σύστημα πάνω έδρασης A12

Αντίστοιχα με τα προαναφερθέντα απαιτείται ένα τεμάχιο για να στεγάσει το ρουλεμάν του πάνω άξονα (βλ. Σχ. 5.28) ώστε να έχουμε την έδραση A12 του πάνω άξονα A9. Ο ρόλος αυτής είναι στην ουσία να παραλαμβάνει κατά το ήμισυ τα φορτία του άξονα αυτού. Επιπρόσθετα, το τεμάχιο αυτό προβλέπεται να συνδεθεί και να στηρίξει τη δομή του απαιτούμενου δακτυλίου ολίσθησης που θα σχεδιασθεί και θα αναλυθεί στη συνέχεια. Τέλος, στο πάνω μέρος αυτής της έδρασης προβλέπεται και σχεδιασμός για τη στήριξη της παλμογεννήτριας (encoder) που θα επιλεγεί στη συνέχεια και θα διαβάσει τη γωνιακή θέση της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής. Η δομή αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 5.40.



Σχήμα 5.40. Σύστημα πάνω έδρασης.

Αρχικά, σημειώνεται ότι στην ουσία η πάνω έδραση A12 είναι το σώμα 4 (βλ. Σχ. 5.40). Αυτό απορροφά και μεταφέρει τα φορτία στη στεφάνη και σταδιακά προς τη βάση. Συγκεκριμένα, η διαμόρφωση με τον αριθμό 6 φιλοξενεί το πάνω ρουλεμάν A10 και παραλαμβάνει τα φορτία του. Το υλικό του τεμαχίου 4 είναι ντουραλουμίνιο 2030. Από τις οπές με τον αριθμό 1 περνάνε κοχλίες M3 ώστε να συνδεθεί το τεμάχιο αυτό με τη στεφάνη. Τη σύνδεση αυτή συμπληρώνει η σφιχτή εφαρμογή του τμήματος 2 με τη στεφάνη ίσως και με την προσθήκη κόλλας. Το κενό κομμάτι 3 υπάρχει για να περνάνε οι αγωγοί από το δακτύλιο ολίσθησης (ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω) πίσω στη βάση. Τέλος, οι οπές 5 υπάρχουν για τη σύνδεση με πλαστικούς κοχλίες του τεμαχίου 4 με ένα προστατευτικό πλαστικό κάλυμμα, το οποίο αναφέρεται παρακάτω.

Το τεμάχιο 8 είναι από πλαστικό ABS και είναι το τεμάχιο A13. Αυτό προκύπτει από τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing). Η σύνδεση του με το τεμάχιο 4 γίνεται με χρήση κόλλας. Ο ρόλος του είναι να εδράζει το δακτύλιο ολίσθησης (slip ring) που θα σχεδιασθεί και την παλμογεννήτρια (encoder) καθώς και να απομονώνει αυτά από το εξωτερικό περιβάλλον. Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε να είναι πλαστικό διότι εκεί μέσα θα κυκλοφορούν ρευματοφόροι αγωγοί και δακτύλιοι οπότε πρέπει να εξασφαλίζεται η μόνωση αυτού του τμήματος. Η διαμόρφωση με τον αριθμό 7 υπάρχει για να στηρίζει την παλμογεννήτρια η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

Ο έλεγχος της αντοχής του τεμαχίου 4 υπερκαλύπτεται από τα Σχ. 5.35 και 5.36 για την κάτω έδραση. Να σημειωθεί για πληρότητα ότι η καταπόνηση αυτού του τεμαχίου αναμένεται να είναι μικρότερη της κάτω έδρασης αφού τα φορτία του είναι αυτά που φαίνονται στο Σχ. 5.34 πλην της ροπής u_2 , στην ίδια λογική δηλαδή με την αντοχή του κάτω και πάνω άξονα A3 και A9 αντίστοιχα.

Οι ακριβείς διαστάσεις των τεμαχίων 4 και 8 φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στα Σχ. Γ.9 και Γ.10 αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η μάζα του συστήματος του Σχ. 5.40 είναι $6.26gr$.

Δακτύλιος ολίσθησης (slip ring) του ηλεκτροκινητήρα λόγω της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής

Από το Σχ. 2.5 αλλά και κατά τα αναφερθέντα στην Παρ. 5.1 φαίνεται ότι είναι η απαραίτητη η ανάγκη δακτυλίων ολίσθησης ώστε να οδηγηθούν τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα από τον κινούμενο άξονα της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής στην ακίνητη στεφάνη σχετικά με αυτόν. Οι εμπορικοί δακτύλιοι ολίσθησης (βλ. Σχ. 5.10 και 5.11) δεν μπορούν να αποτελούν επιλογή για το συγκεκριμένο όχημα αφού οι “through bore type” έχουν μη παραδεκτή μάζα ενώ τα “miniature slip rings” του Σχ. 5.11 από τη μία έχουν ικανοποιητική μάζα από την άλλη όμως η δυνατότητα να άγουν πολύ χαμηλά ρεύματα συγκριτικά με τα 40A που απαιτεί ο ηλεκτροκινητήρας μας (βλ. Πιν. 4-10) καθώς και το πολύ συγκεκριμένο τους σχήμα τα αποκλείουν ως επιλογές.

Έτσι, προχωρούμε εμείς στον σχεδιασμό τους εκ του μηδενός, μιμούμενοι τη λογική που περιγράφει την αρχή λειτουργίας τους (βλ. Σχ. 5.9).

Το πρώτο βήμα απαιτεί τον προσδιορισμό του υλικού και της διατομής από την οποία περνάει το ρεύμα των 40A . Από τα σχέδια του κατασκευαστή του συγκεκριμένου ηλεκτροκινητήρα (βλ. Πιν. 4-10) και από μετρήσεις της διατομής των καλωδίων αντιστοίχων ηλεκτροκινητήρων, καταλήξαμε ότι η εξωτερική διάμετρος των ρευματοφόρων αυτών αγωγών μαζί με τις μονώσεις είναι $\Phi 2.5$. Από μετρήσεις και παρατηρήσεις εμπορικών καλωδίων προκύπτει ότι η διάμετρος του ρευματοφόρου (γυμνού) αγωγού σε καλώδια $\Phi 2.5$ είναι $\Phi 1.7$. Για ασφάλεια λοιπόν εμείς θεωρούμε ότι η απαιτούμενη διάμετρος του ρευματοφόρου αγωγού που άγει τα 40A είναι:

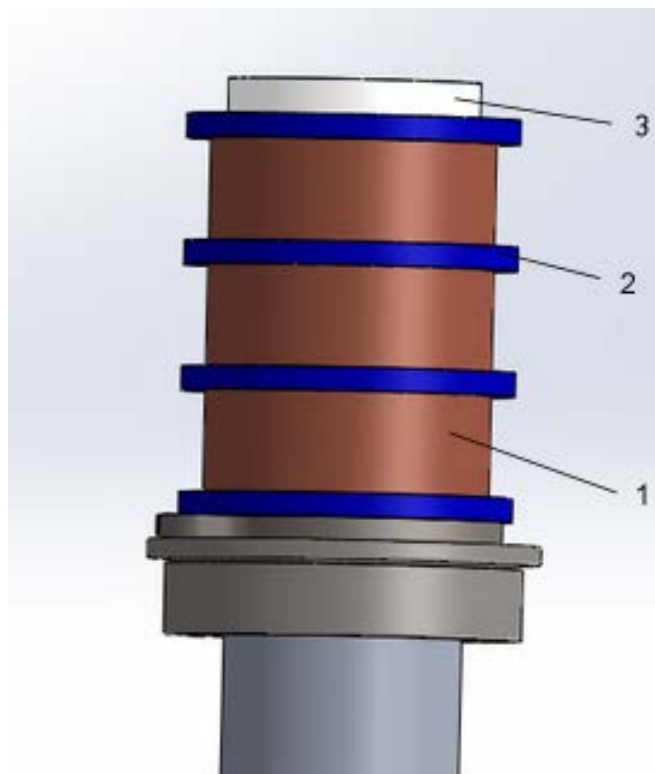
$$d_{w,m} = 2mm \quad (5-6)$$

Έτσι, δεδομένου ότι αυτοί είναι κυκλικής διατομής, υπολογίζεται η ελάχιστη διατομή η οποία μπορεί να άγει αυτό το ρεύμα:

$$A_{w,m}^{\min} \cong 3mm^2 \quad (5-7)$$

Σημειώνεται ακόμη ότι το υλικό των ρευματοφόρων αγωγών είναι χαλκός.

- Προχωρούμε λοιπόν στη σχεδίαση χάλκινων δακτυλίων οι οποίοι σε κάθε διατομή από την οποία διαπερνά ρεύμα ικανοποιούν την Εξ. (5-7). Αυτοί προσαρμόζονται στο τμήμα του πάνω άξονα A9 όπου υπάρχουν οι οπές 3 (βλ. Σχ. 5.28) ώστε να συνδεθούν με τα τρία καλώδια τα οποία έρχονται από τον ηλεκτροκινητήρα. Το σύστημα αυτό φαίνεται στο Σχ. 5.41

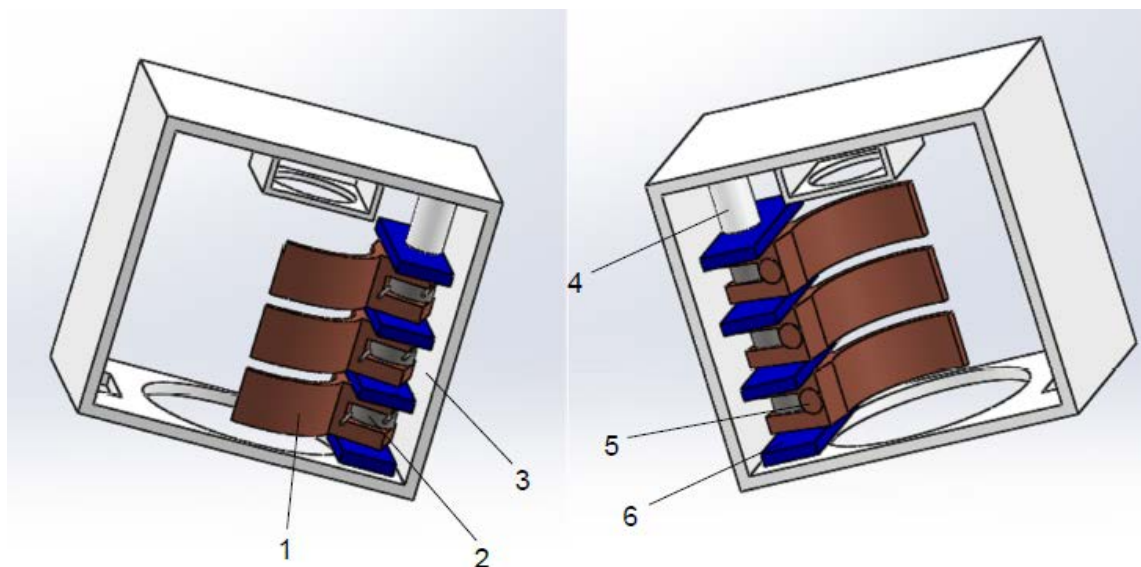


Σχήμα 5.41. Χάλκινοι αγωγοί και μονώσεις στον πάνω άξονα A9.

Με τον αριθμό 1 απεικονίζονται οι χάλκινοι δακτύλιοι A16, οι οποίοι σχεδιάστηκαν σε κάθε διατομή που τους διαρρέει ρεύμα να μπορούν να άγουν 40A. Οι δακτύλιοι 2 είναι μονώσεις από πλάστικο ABS A15 και παρεμβάλλονται μεταξύ των δακτυλίων 1. Τα πάχη τους έχουν ληφθεί στην ίδια τάξη αλλά μεγαλύτερης τιμής των παχών των εμπορικών καλωδίων ώστε να εξασφαλισθεί με ασφάλεια η μόνωση μεταξύ των δακτυλίων 1. Με τον αριθμό 3 απεικονίζεται ένας πλαστικός σωλήνας από ABS A14. Αυτός υπάρχει για μόνωση, διότι το υλικό του πάνω άξονα που είναι από ντουραλουμίνιο είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Οι ακριβείς διαστάσεις των 1, 2 και 3 βρίσκονται στο Παράρτημα Γ, στα Σχ. Γ.11,Γ.12 και Γ.13 αντίστοιχα. Σημειώνεται τέλος ότι η μάζα όλων των 1,2 και 3 συνολικά είναι 3.44grams.

- Προκειμένου να μεταφερθεί το ρεύμα από τους δακτυλίους 1 στην ακίνητη πάνω έδραση (βλ.Σχ. 5.40) και από εκεί στην ακίνητη στεφάνη, χρειάζεται ένα αγωγίμο υλικό το οποίο να βρίσκεται μόνιμα σε επαφή με τον κάθε δακτύλιο 1 και ένα απλό

σύστημα πίεσης κατά τα αναφερθέντα στην Εισαγωγή 5.1. Η πρώτη μας σκέψη ήταν να χρησιμοποιηθούν ανθρακόψηκτες σαν αυτή του Σχ. 5.9 με το ελατήριο και τον ακροδέκτη στην άκρη του. Έτοιμές λύσεις όπως αυτές του Σχ. 5.9 όμως απορρίφθηκαν διότι δεν είναι προδιαγεγραμμένες για ρεύματα της τάξης των 40Α. Έπειτα από επικοινωνία με διάφορες εταιρίες που ασχολούνται με τέτοιους σχεδιασμούς εκ του μηδενός προτάθηκαν κάποιες λύσεις σαν αυτή του Σχ. 5.9 οι οποίες όμως απαιτούν ανθρακόψηκτες με προσθήκη χαλκού (κατά τα προαναφερθέντα στην Εισαγωγή 5.1) και έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις από τις τυπικές εμπορικές. Η λύση αυτή όμως φάνηκε να μην είναι παραδεκτή διότι κάθε μία τέτοια ψήκτρα μόνο χωρίς το κατάλληλο σύστημα πίεσης και στήριξης υπολογιζόταν να ζυγίζει περίπου 6.5gr. Έτσι, αποφασίσθηκε η ψήκτρα να αντικατασταθεί από ένα απλό χάλκινο έλασμα A17 το οποίο θα βρίσκεται μόνιμα σε επαφή με τον κάθε περιστρεφόμενο χάλκινο δακτύλιο 1 του Σχ. 5.38. Αυτά τα χάλκινα ελάσματα καθώς και του απαιτούμενο σύστημα πίεσης και στήριξης αυτών φαίνεται στο Σχ. 5.42 σε συνδυασμό με το τεμάχιο 8 του Σχ. 5.40 το οποίο θα φιλοξενεί αυτά.



Σχήμα 5.42. Χάλκινα ελάσματα A17 με σύστημα πίεσης για το δακτύλιο ολίσθησης.

Με τον αριθμό 1 συμβολίζονται τα εν λόγω χάλκινα ελάσματα A17, τα οποία είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να αγκαλιάζουν ακριβώς τους χάλκινους δακτυλίους A16. Σε αυτά ασκείται πίεση από τα στροφικά ελατήρια A18 με τον αριθμό 2. Αυτά, λόγω του ότι δε βρίσκονται στην ουδέτερη γωνιακή θέση έχουν μία δύναμη προέντασης η οποία εξασφαλίζει μόνιμη επαφή των ελασμάτων 1 με τους χάλκινους δακτυλίους. Με τον αριθμό 3 συμβολίζεται η επιφάνεια στην οποία ασκεί δύναμη και αντίστροφα το ένα ποδαράκι του στροφικού ελατηρίου 2 ώστε να εξασφαλισθεί αυτή η προένταση. Ο πείρος A19 με τον αριθμό 4 από πλαστικό ABS περνάει μέσα από τα χάλκινα ελάσματα 1, τα ελατήρια 2 και τις μονώσεις A20 με τον αριθμό 6 και τα στηρίζει. Με τον αριθμό 5 έχει χαραχθεί ένα ιδεατό εξόγκωμα $\Phi 2$ από το οποίο θα έρχονται τα ακινητά καλώδια και θα οδηγούνται στη στεφάνη. Οι ακριβείς διαστάσεις των τεμαχίων 1, 2, 4, 6 φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στα Σχ.

Γ.14, Γ.15, Γ.16 και Γ.17 αντίστοιχα. Επίσης, η μάζα του συστήματος μονώσεων, ελασμάτων, πείρου και ελατηρίου είναι 3.20gr .

Σημειώνεται ακόμη ότι το ελατήριο A18 λαμβάνεται τυποποιημένο από την εταιρεία Misumi. Η κωδική του ονομασία είναι 33-0320 και απεικονίζεται στο Σχ. 5.43. Αυτό επιλέχθηκε με κριτήριο να μπορεί να ασκεί μία πίεση στο χάλκινο έλασμα αρκετά μεγαλύτερη των 20gr που απαιτεί μια τυπική ανθρακόψηκτρα ώστε να πετυχαίνει αγωγή ρεύματος, κατά τα αναφερθέντα στην Εισαγωγή 5.1.



Σχήμα 5.43 Στροφικό ελατήριο 33-0320 της εταιρείας Misumi [36].

Παλμογεννήτρια (encoder) για τη δεύτερη ανεξάρτητη περιστροφή

Κατά τα αναφερθέντα στην Εισαγωγή 5.1 και δεδομένου ότι αναμένονται ταλαντώσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων του οχήματος, οι παλμογεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι μαγνητικές. Ακόμη, για την ακριβή γνώση της απόλυτης θέσης τους κάθε φορά αυτές απαιτείται να είναι absolute. Βασικά κριτήρια για την επιλογή της παλμογεννήτριας ήταν η χαμηλή μάζα του και μια διάταξη μικρού όγκου η οποία μπορεί να προσαρμοσθεί εύκολα στο σχεδιασμό μας. Σύμφωνα με αυτά λοιπόν, από τα διάφορα είδη encoders (βλ. Σχ. 5.5, 5.6 και 5.7) που κυκλοφορούν στην αγορά, ως ιδανική λύση προκύπτει αυτή του Σχ. 5.7 με τον αισθητήρα και το περιστρεφόμενο μαγνητάκι να είναι διαφορετικά σώματα. Από την κατηγορία αυτή, η ελαφρύτερη δυνατή παλμογεννήτρια σε παραδεκτή τιμή που βρέθηκε στην αγορά είναι η RM08 SUPER SMALL NON-CONTACT ROTARY ENCODER της εταιρείας RLS που απεικονίζεται στο Σχ. 5.44.

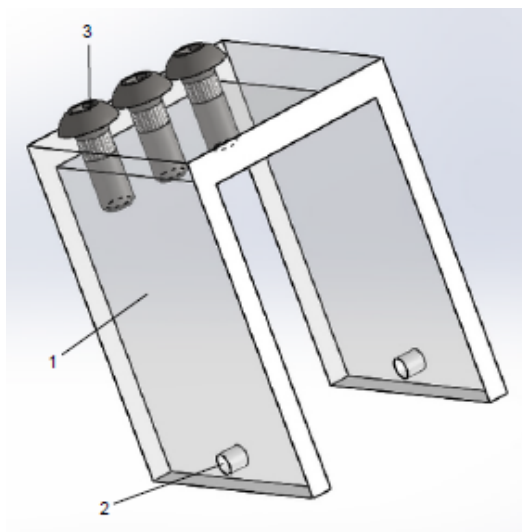


Σχήμα 5.44. RM08 SUPER SMALL NON-CONTACT ROTARY ENCODER της εταιρείας RLS [32].

Με τον αριθμό 1 συμβολίζεται το μαγνητάκι το οποίο προσαρμόζεται στον περιστρεφόμενο άξονα και ανιχνεύεται έτσι η γωνιακή θέση από το κύριο σώμα-αισθητήρα 2. Να σημειωθεί ότι στο δικό μας όχημα το μαγνητάκι 1 εφαρμόζει σε ειδική διαμόρφωση στο πάνω μέρος του πλαστικού ABS τεμαχίου 3 του Σχ. 5.41 με ειδική κόλλα. Ακριβώς πάνω από αυτό και σε αυστηρή απόσταση $0.5mm$ σύμφωνα με τον κατασκευαστή βρίσκεται ο αισθητήρας 2 ο οποίος στηρίζεται με ειδική κόλλα στη διαμόρφωση με τον αριθμό 7 του ακίνητου κομματιού 8 του Σχ. 5.40. Σχετικά με τον αριθμό 3 σημειώνεται ότι αυτά είναι τα καλώδια της παλμογεννήτριας και λόγω του absolute τύπου αυτής αλλά και της εξόδου της σε bits ο αριθμός τους είναι ίσος με τέσσερα. Τέλος, η μάζα του αισθητήρα 2 ισούται με $2gr$ και η μάζα του μαγνήτη 1 είναι δίχως σφάλμα αμελητέα. Οι λεπτομερείς διαστάσεις των τεμαχίων 1 και 2 φαίνονται στο Παράρτημα Γ, Παρ. Γ.18 και Γ.19 αντίστοιχα.

Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος πάνω έδρασης και αντίβαρο

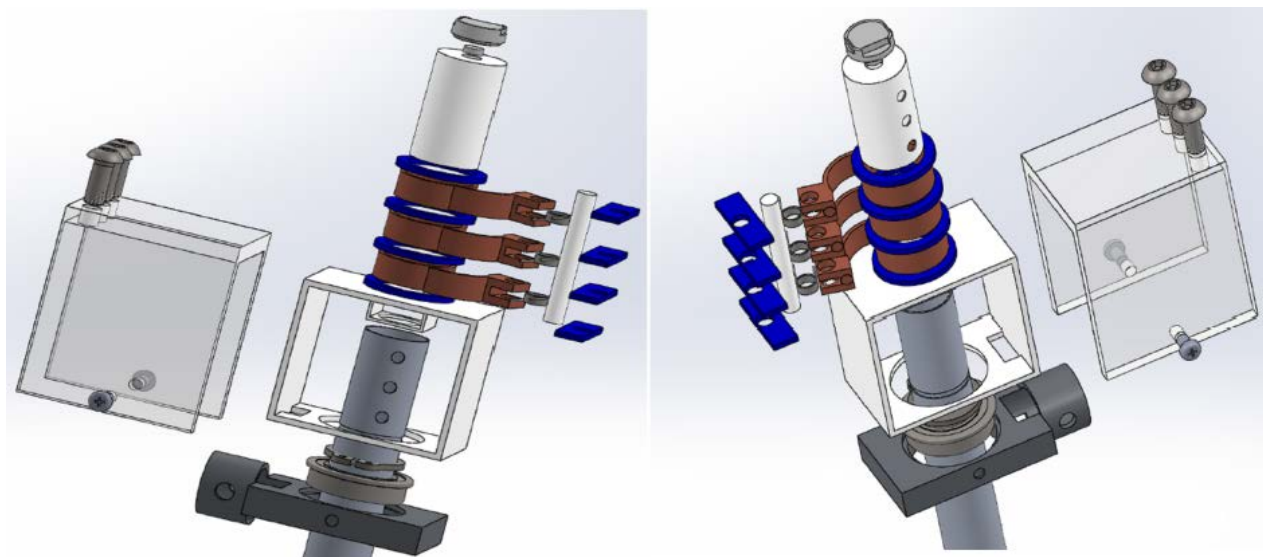
Όπως αναφέρθηκε και στο σύστημα της πάνω έδρασης, ένα προστατευτικό κάλυμμα από πλαστικό ABS ώστε να έχει και μονωτικό ρόλο κλείνει το Σχ. 5.40 από τα πλάγια και βιδώνεται με πλαστικούς κοχλίες $M3$ στις οπές 5 του ίδιου σχήματος. Αυτό, απεικονίζεται στο Σχ. 5.45 μαζί με 3 κοχλίες-αντίβαρο.



Σχήμα 5.45. Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος πάνω έδρασης ή αντίβαρο.

Με τον αριθμό 1 απεικονίζεται το εν λόγω προστατευτικό κάλυμμα. Σχετικά με τους κοχλίες 3, αυτοί στην ουσία μαζί με το προστατευτικό κάλυμμα, με το τεμάχιο 8 του Σχ. 5.40 και το Σχ. 5.42 συνιστούν το απαιτούμενο αντίβαρο (βλ. Σχ. 2.5 και 5.12) ώστε να έρθει το κέντρο μάζας στο επίπεδο των ποδιών. Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ένα κομμάτι του αντιβάρου να έχει τη δυνατότητα πρόσθεσης και αφαίρεσης με ευκολία όπως οι κοχλίες, ώστε στην πραγματική κατασκευή οποιαδήποτε απόκλιση να μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα. Οι συγκεκριμένοι κοχλίες που απεικονίζονται είναι $M3x8$. Η μάζα του προστατευτικού καλύμματος είναι $5.15gr$ και οι ακριβείς διαστάσεις του φαίνονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.20.

Έχοντας πλέον παρουσιάσει όλα τα τεμάχια που συνιστούν το πάνω μέρος του Σώματος A, προκύπτει το Σχ. 5.46 αντίστοιχο του Σχ. 5.16. Αυτό περιέχει όλα τα τεμάχια A9-A20, το πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα, την παλμογεννήτρια και τους απαραίτητους κοχλίες σύνδεσης.



Σχήμα 5.46. Τρίτο κύριο υποσύστημα Σώματος A πριν την τελική συναρμολόγηση.

Μετά και το σώμα του Σχ. 5.46, έχουν προσδιορισθεί πλήρως τα τρία κύρια συστήματα που συνιστούν το Σώμα A και έτσι έχουμε την τελική λεπτομερή μορφή του η οποία παρουσιάσθηκε πιο πάνω (βλ. Σχ. 5.13).

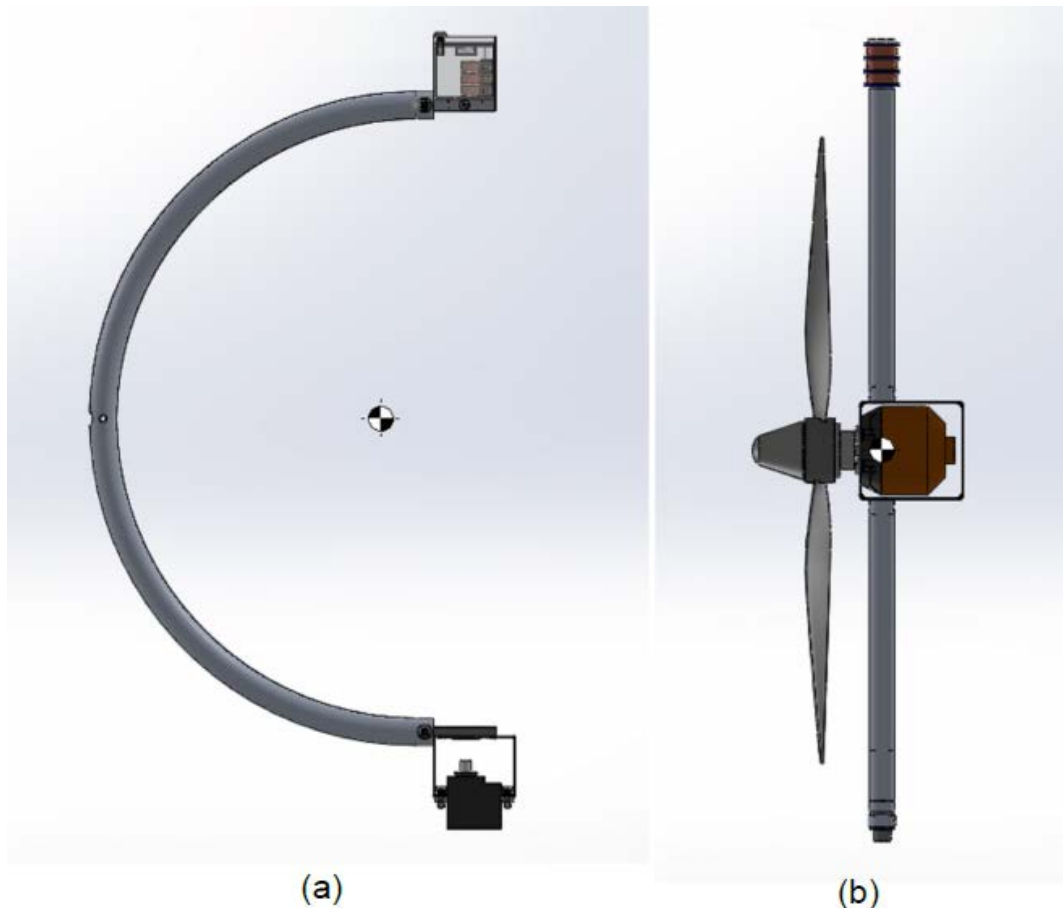
Επισημαίνεται για την πληρότητα ότι η συνολική μάζα του Σώματος A (Σχ. 5.44) είναι:

$$m_A = 214.96 \text{ gr} \quad (5-8)$$

Θέση κέντρων μάζας

Κεντρικό ζήτημα αυτού του σχεδιασμού για την ομαλή συμπεριφορά του οχήματος, είναι το συνολικό κεντρο μάζας του ΙΣΗΕ να βρίσκεται στο επίπεδο του ποδιού. Αυτό σύμφωνα με τα προαναφερθέντα και τις διαστάσεις που φαίνονται στο Παράρτημα Γ ρυθμίσθηκε και φαίνεται από το Σχ. 5.13 (το οποίο προέκυψε από το Solidworks) ότι ισχύει με μεγάλη ακρίβεια.

Πρέπει όμως σχετικά με το αποτέλεσμα αυτό να συμπληρωθεί το εξής. Σύμφωνα με τον τελικό πολυσωματικό ελεγκτή που ανέπτυξε ο Υ.Δ Μ.Ραμπι, με τον οποίο θα πετάξει αυτό το όχημα, ήταν ανάγκη, το σύστημα σωμάτων (a) το οποίο αποτελείται από το σώμα της στεφάνης μαζί με την πάνω και την κάτω έδραση (βλ. Σχ. 5.47), να έχει το κέντρο μάζας του στο επίπεδο του ποδιού. Επιπρόσθετα, ένα άλλο σύστημα σωμάτων (b) που στην ουσία είναι το μέρος του Σχ. 5.13 που οδηγεί ο δεύτερος σερβοκινητήρας (βλ. Σχ. 5.47), πρέπει να έχει το κέντρο μάζας του στο επίπεδο του ποδιού.

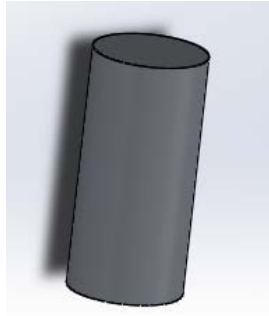


Σχήμα 5.47. Κέντρα μάζας σωμάτων σύμφωνα με τον πολυσωματικό ελεγκτή.

Αυτό για το δικό μας σχεδιασμό σημαίνει ότι έπρεπε να γίνουν δύο ανεξάρτητες ζυγοστάθμισεις. Η μία ζυγοστάθμιση αφορά το σώμα (a) του Σχ. 5.47 ενώ η άλλη το σώμα (b) του Σχ. 5.47. Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς ότι έτσι ικανοποιείται και η απαίτηση για το πολυσωματικό μοντέλο του Υ.Δ Μ. Ράμπ αλλά και το τελικό αποτέλεσμα εγγυάται την τοποθέτηση του κέντρου μάζας στο ουδέτερο επίπεδο. Συνεπώς, το κέντρο μάζας του Σχ. 5.13 που φαίνεται να είναι στο επίπεδο των ποδιών προέκυψε στην ουσία ως η συνισταμένη των δύο εικόνων ή ισοδύναμα των δύο σωμάτων του Σχ.5.47.

Σημειώνεται εδώ το εξής. Στα προαναφερθέντα στην ουσία έγινε μνεία μόνο για τη ρύθμιση του κέντρου μάζας της πρώτης εικόνας (a) (μέσω του συναρμολογήματος του πάνω μέρους Σώματος Α (βλ. Σχ. 5.46 και 5.16) και των κοχλιών $M3x8$ στο προστατευτικό κάλυμμα) και όχι για το κέντρο μάζας της δεύτερης εικόνας. Επομένως, προκειμένου να προκύψει η σωστή τοποθέτηση του κέντρου μάζας, η οποία φαίνεται στο Σχ. 5.13 προηγήθηκε και η ζυγοστάθμιση του σώματος (b) του Σχ. 5.47.

Αυτή εξασφαλίζεται ως εξής. Ένας μασίφ κύλινδρος από ντουραλουμίνιο 2030 κατάλληλων διαστάσεων ο οποίος φάνηκε προηγουμένως στο Σχ. 5.39, εφαρμόζει σφιχτά στο εσωτερικό μέρος του κάτω άξονα A3, εξισορροπεί την πρόσθετη μάζα του πάνω άξονα A9 λόγω των χαλκινων δακτυλίων και του μεγαλύτερου μήκους του και έτσι επιτυγχάνεται η απαραίτητη ζυγοστάθμιση. Ο κύλινδρος αυτός φαίνεται στο Σχ. 5.48.



Σχήμα 5.48. Κυλινδράκι ως αντίβαρο για το σώμα (b) του Σχ. 5.47.

Σημειώνεται ότι η μάζα αυτού είναι $3.91gr$ και οι ακριβείς διαστάσεις του φαίνονται στο Παράρτημα Γ, Παρ. Γ.21.

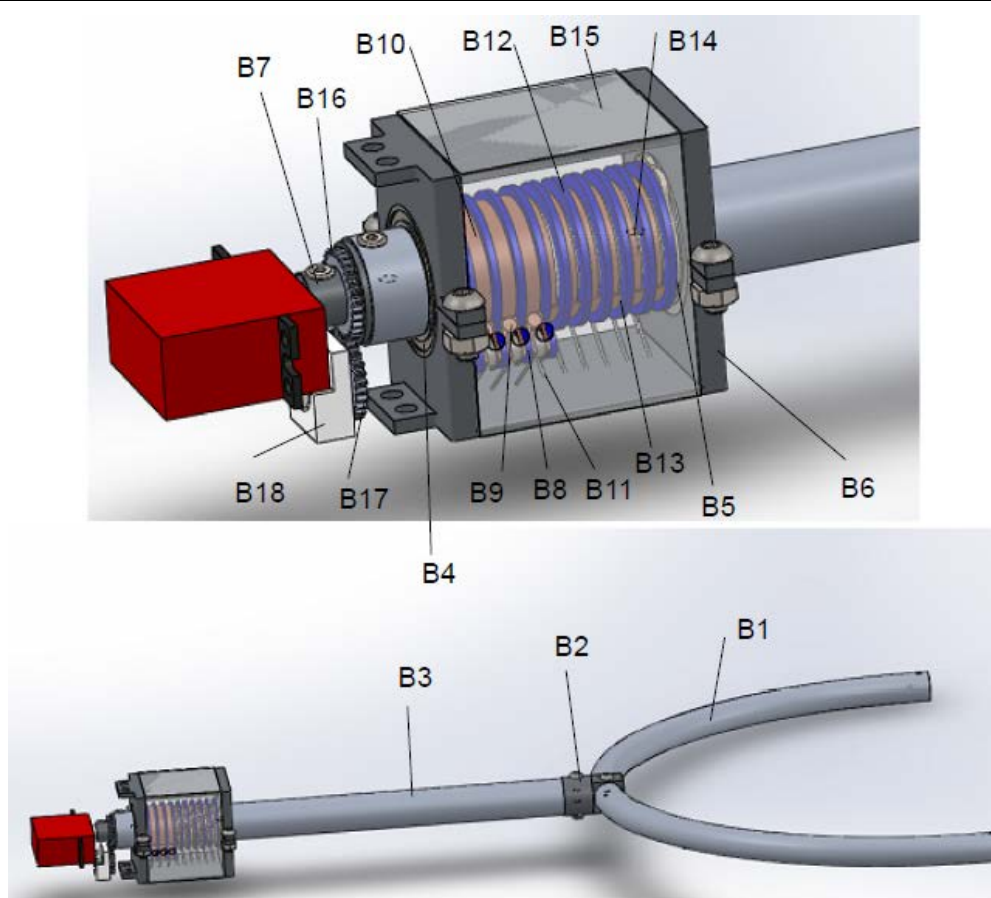
Μια άλλη σημαντική θέση του κέντρου μάζας για την οποία δεν έχει γίνει μνεία ακόμη, είναι η θέση του κέντρου μάζας της εικόνας (b) του Σχ. 5.47 ως προς την κατακόρυφο-άξονα συμμετρίας του δεύτερου άξονα ανεξάρτητης περιστροφής. Δεδομένου ότι η δεύτερη εικόνα είναι στην ουσία το φορτίο του δεύτερου σερβοκινητήρα και όλο αυτό στρέφεται σε σύστημα είναι σημαντικό το κέντρο μάζας αυτού του συστήματος να βρίσκεται πάνω στην κατακόρυφο. Έτσι, δεν έχουμε ανεπιθύμητες προκύπτουσες ροπές λόγω της αζυγοσταθμίας και άρα επιβάρυνση του δεύτερου ηλεκτρικού σερβοκινητήρα. Αυτό στην ουσία ρυθμίσθηκε στο σχεδιασμό που προηγήθηκε μέσω της έκκεντρης τοποθέτησης των μικρών κυλίνδρων 5 του Σχ. 5.17 (στους οποίους θα προσδεθούν ο πάνω και ο κάτω άξονας A9 και A3), ως προς το κέντρο συμμετρίας του τεμαχίου A1 (βλ. Σχ. 5.17). Έτσι, όπως φαίνεται από την εικόνα (b) του Σχ. 5.47 (που προέκυψε από το Solidworks) έχει εξασφαλιστεί και αυτή η απαίτηση ως προς το κέντρο μάζας του συγκεκριμένου σώματος.

5.2.2 Λεπτομερής Σχεδιασμός Σώματος B

Το Σώμα B του οχήματος (βλ. Σχ. 5.12) αποτελείται κυρίως από τη στεφάνη, το πόδι τη σύνδεση μεταξύ τους, τη δομή σύνδεσης μεταξύ της βάσης και του ποδιού και επιπρόσθετα στοιχεία όπως δακτυλίους ολίσθησης, ρουλεμάν κ.ο.κ. Η λεπτομερής και τελική μορφή του Σώματος B φαίνεται στο Σχ. 5.49. Οι συμβολισμοί και οι αντίστοιχες ονομασίες των συνιστωσών που το απαρτίζουν παρουσιάζονται στον Πιν. 5-4. Σημειώνεται ότι τόσο στον Πιν 5-4 όσο και στο Σχ. 5.49 δεν υπάρχουν κάποιες μικρές λεπτομέρειες-συνιστώσες του Σώματος B όπως για παράδειγμα οι πείροι στήριξης των συστημάτων πίεσης των δακτυλίων ολίσθησης ή η παλμογεννήτρια και ο μαγνήτης τον οποίο ανιχνεύει αυτή. Ωστόσο, κατά τη ροή της εργασίας αυτής θα φανούν και θα επεξηγηθούν με λεπτομέρεια όλες οι συνιστώσες που απαρτίζουν το Σώμα B.

Πίνακας 5-4. Τεμάχια που απαρτίζουν το Σώμα Β.

Συμβολισμός	Ονομασία
B1	Στεφάνη
B2	Φλάντζα σύνδεσης στεφάνης και ποδιού
B3	Πόδι
B4	Ρουλεμάν ποδιού
B5	Δακτύλιος ασφάλειας ποδιού
B6	Σύστημα έδρασης ποδιού
B7	Κόπλερ σύζευξης πρώτου σερβοκινητήρα με πόδι
B8	Πλαστικοί δακτύλιοι μόνωσης χάλκινων ελασμάτων του ηλεκτροκινητήρα
B9	Χάλκινα ελάσματα για ηλεκτροκινητήρα
B10	Χάλκινοι δακτύλιοι για ηλεκτροκινητήρα
B11	Στροφικά ελατήρια για το σύστημα πίεσης των δακτυλίων ολίσθησης
B12	Πλαστικοί δακτύλιοι μόνωσης των χάλκινων δακτυλίων
B13	Χάλκινα ελάσματα για δεύτερο σερβοκινητήρα και παλμογεννήτρια
B14	Χάλκινοι δακτύλιοι για δεύτερο σερβοκινητήρα και παλμογεννήτρια
B15	Προστατευτικό-μόνωτικό κάλυμμα συστήματος έδρασης ποδιού
B16	Πλαστικός οδοντωτός τροχός ποδιού
B17	Πλαστικός οδοντωτός τροχός μαγνήτη παλμογεννήτριας
B18	Πλαστικό τεμάχιο έδρασης παλμογεννήτριας

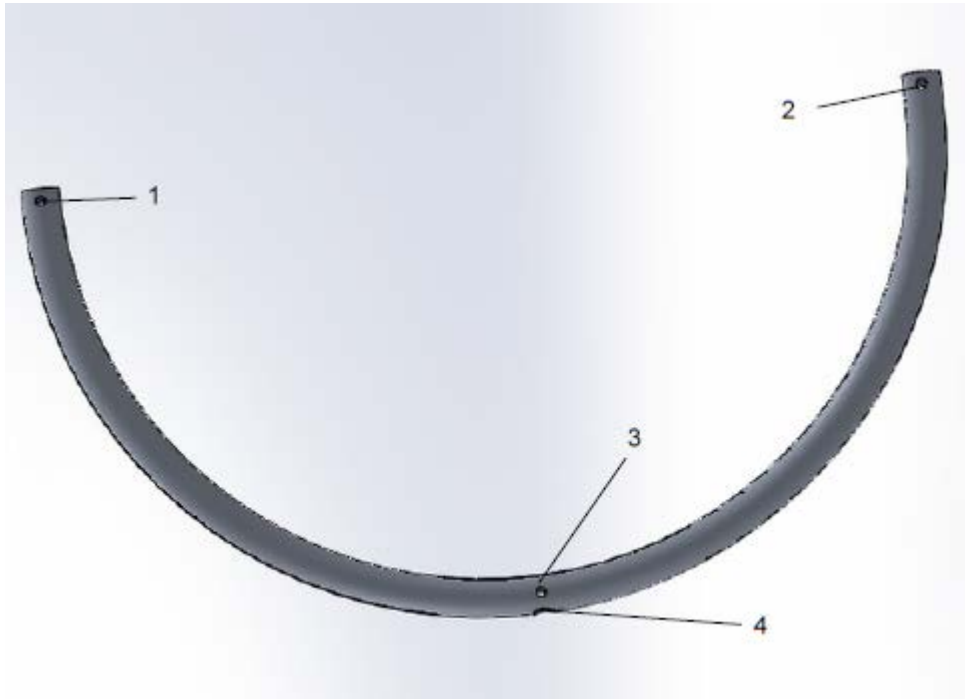


Σχήμα 5.49. Τελική λεπτομερής μορφή Σώματος Β.

Παρουσιάζονται λοιπόν και περιγράφονται όλες οι επιμέρους συνιστώσες που απαρτίζουν το Σώμα Β.

Στεφάνη Β1

Το σώμα αυτό συνδέει στην ουσία το πόδι με το πάνω και κάτω σύστημα έδρασης Α12 και Α7 αντίστοιχα, του Σώματος Α και φαίνεται στο Σχ. 5.50.



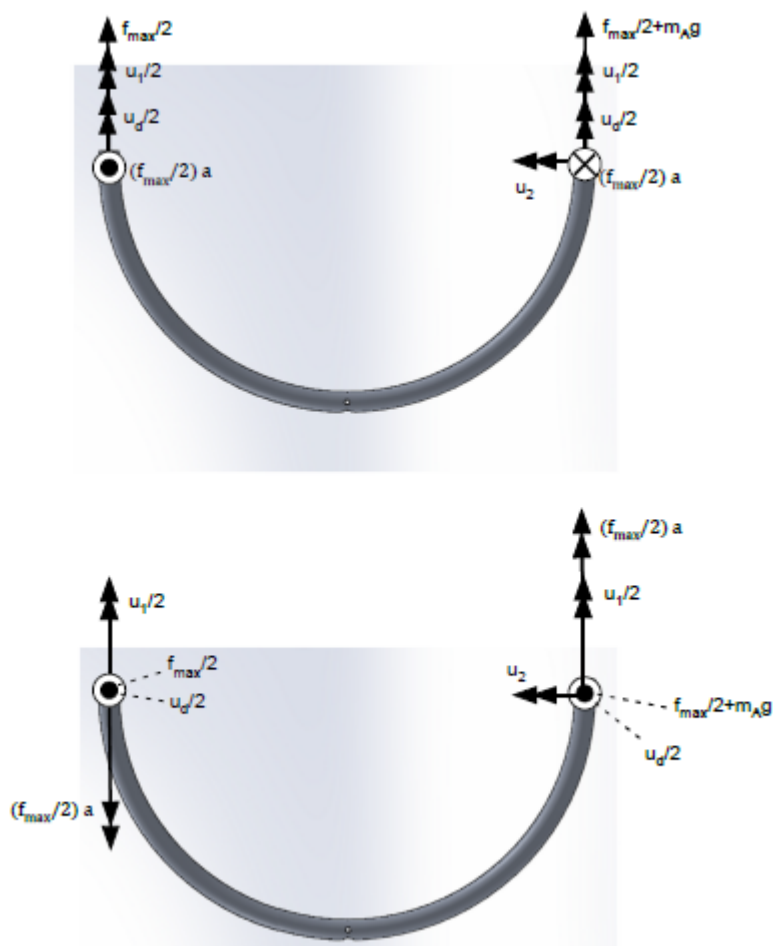
Σχήμα 5.50. Στεφάνη Β1 Σώματος Β.

Το υλικό του τεμαχίου αυτού είναι ντουραλουμίνιο 2024-T3. Με τον αριθμό 1 και 2 απεικονίζονται οι οπές από τις οποίες θα περάσουν κοχλίες $M3$ για τη σύνδεση με το Σώμα Α μέσω της πάνω και της κάτω έδρασης του Α12 και Α7. Με τον αριθμό 3 συμβολίζονται οι 2 οπές από τις οποίες θα περάσουν κοχλίες $M3$ για τη σύνδεση της στεφάνης Β1 με τη φλάντζα Β2, στην άλλη μεριά της οποίας είναι το πόδι. Η μεγάλη οπή με τον αριθμό 4 υπάρχει για να περνάνε τα καλώδια τόσο του ηλεκτροκινητήρα όσο και της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα μέσα από τη στεφάνη σταδιακά προς τη βάση.

Ο έλεγχος της αντοχής του τεμαχίου αυτού θα γίνει για δύο περιπτώσεις φορτίσεων (βλ. Σχ. 5.51) σε πλήρη αντιστοιχία με τα Σχ. 5.25 και 5.34. Αν θεωρήσουμε ότι η οπή 2 συνδέεται με την κάτω έδραση Α7, τότε τα φορτία της στεφάνης έχουν ως εξής. Στις οπές 2 καθώς και στο αντίστοιχο εσωτερικό τμήμα της στεφάνης το οποίο είναι κολλημένο με το κυλινδράκι 2 του Σχ. 5.33, μοιράζονται τα φορτία που απεικονίζονται και στο Σχ. 5.34 με τις κατευθύνσεις τους τέτοιες ώστε η καταπόνηση να είναι η δυσμενέστερη δυνατή. Η μοναδική προσθήκη εδώ είναι και η δύναμη λόγω της μάζας του σώματος Α (βλ. Εξ. (5-8)) η οποία θεωρείται για ασφάλεια ότι παραλαμβάνεται ολόκληρη από την κάτω έδραση στην οποία άλλωστε ασκείται ολόκληρη και η ροπή u_2 .

Να σημειωθεί ότι σε όλους τους προηγούμενους ελέγχους αντοχής οι μάζες αμελούνταν διότι η κάθε συνιστώσα μεμονωμένα είχε αμελητέα επίδραση στην κάθε καταπόνηση. Από

εδώ και στο εξής όμως επειδή οι μάζες είναι σημαντικές λόγω της ένωσης όλων των επιμέρους τεμαχίων, θα λαμβάνεται υπόψη και το βάρος το οποίο σημειώνεται ότι θα θεωρείται χωρίς σφάλμα να έχει την δυσμενέστερη κατεύθυνση από άποψη καταπόνησης. Στις οπές 1 και στο αντίστοιχο τμήμα επαφής της στεφάνης με την πάνω έδραση A12 του Σώματος A ασκούνται ακριβώς τα ίδια φορτία με τα προαναφερθέντα πλην της ροπής u_2 και του βάρους του σώματος A. Τέλος, η πάκτωση του φορέα αυτού λαμβάνεται στις οπές σύνδεσης 3 με τη φλάντζα καθώς και σε ένα μικρό τμήμα το οποίο είναι σε επαφή με το σώμα της φλάντζας.



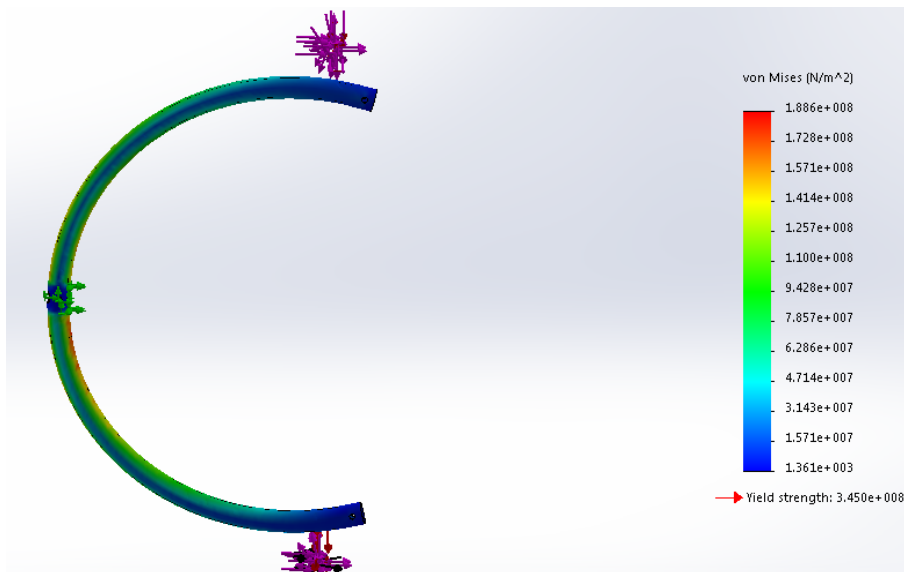
Σχήμα 5.51. Φορτία στεφάνης για δύο περιπτώσεις

Σύμφωνα με αυτά λοιπόν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Solidworks υπάρχουν στα Σχ. 5.52 και 5.53 για την κάθε περίπτωση αντίστοιχα. Από αυτά φαίνεται ότι στην πρώτη περίπτωση φόρτισης όπου η ροπή λόγω δύναμη ώσης $(f_{max} / 2) a$ κάμπτει το φορέα αυτόν αντί να το στρέφει έχουμε πιο δυσμενείς καταπονήσεις με το συντελεστή ασφάλειας για εκείνη την περίπτωση να είναι σχεδόν ίσος με 2.

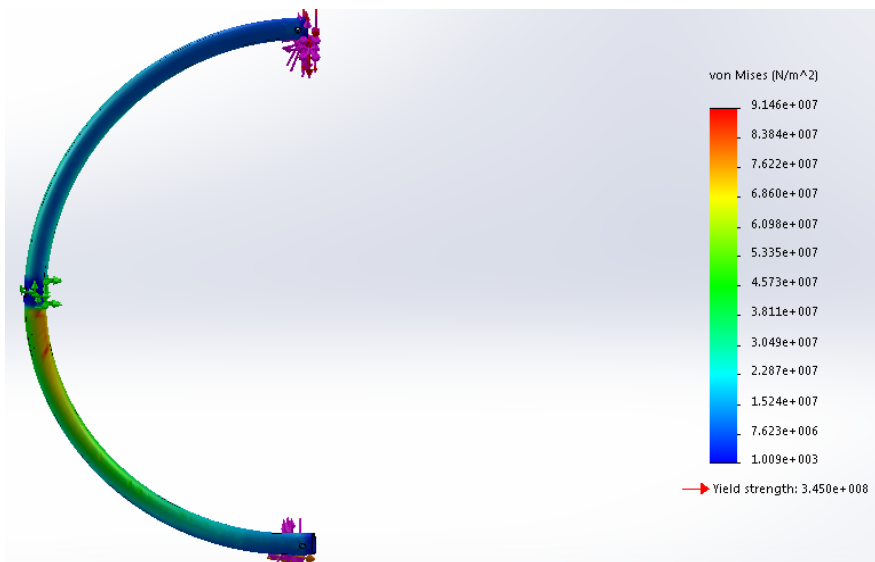
Σημειώνεται ότι η μάζα της στεφάνης είναι:

$$m_h = 24.51 \text{ grams} \quad (5-9)$$

και οι ακριβείς διαστάσεις της φαίνονται στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.22.



Σχήμα 5.52. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της στεφάνης B1 κατά την πρώτη περίπτωση φόρτισης.

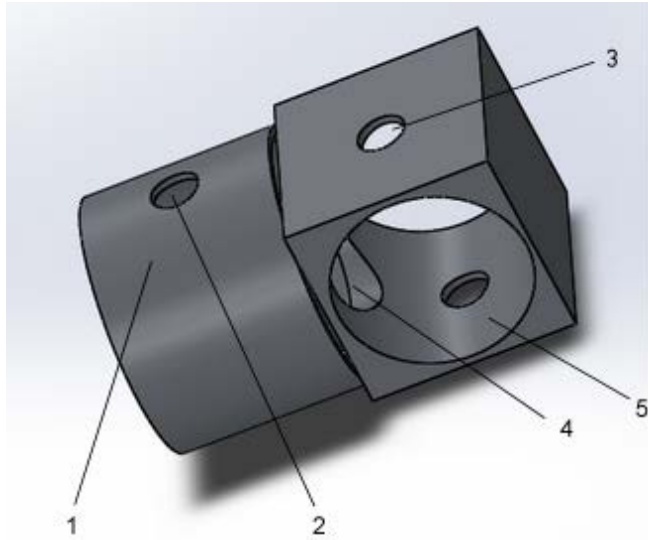


Σχήμα 5.53. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises της στεφάνης B1 κατά τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.

Φλάντζα σύνδεσης B2 της στεφάνης με το πόδι

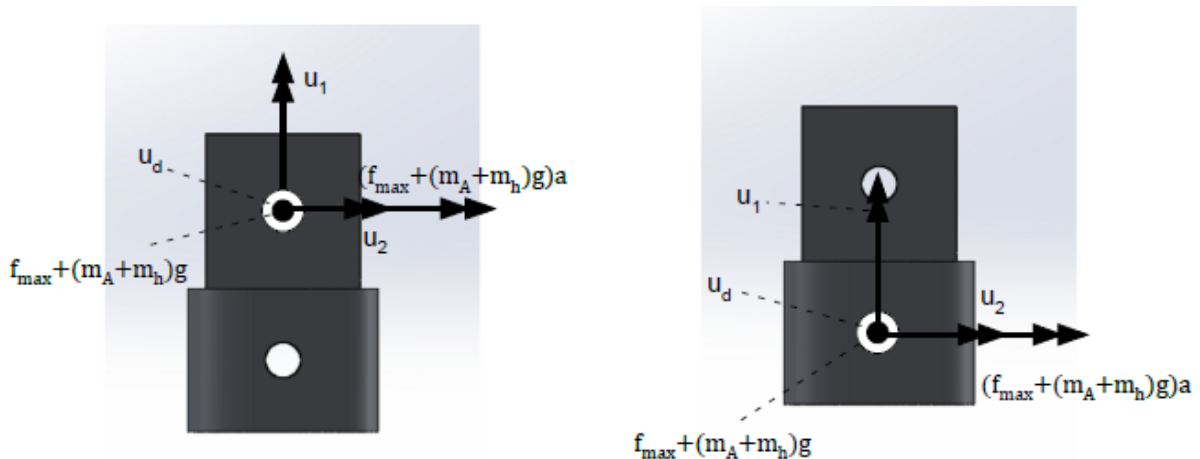
Ο ρόλος αυτής της φλάντζας B2 είναι να συνδέει τη στεφάνη B1 με το πόδι B3 και απεικονίζεται στο Σχ. 5.54.

Το υλικό αυτού του τεμαχίου είναι από ντουραλουμίνιο 2030. Με τον αριθμό 2 και 1 συμβολίζονται οι οπές και το τμήμα της φλάντζας B2 αντίστοιχα με τα οποία θα επιτευχθεί η σύνδεση με το πόδι B3. Αντίστοιχα η σύνδεση με τη στεφάνη B1 πραγματοποιείται μέσω των οπών 3 και του τμήματος 5. Τέλος, η μεγάλη οπή 4 υπάρχει για να οδηγούνται τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα, της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα από τη στεφάνη σταδιακά προς τη βάση.



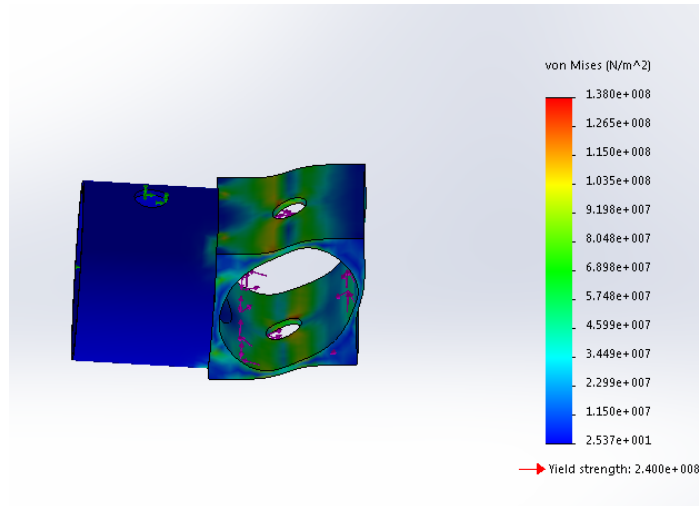
Σχήμα 5.54. Φλάντα σύνδεσης B2 στεφάνης και ποδιού.

Σε ό,τι αφορά τον έλεγχο της αντοχής αυτού του τεμαχίου εξετάζεται μόνο η δεύτερη περίπτωση φόρτισης που απεικονίζεται στο Σχ. 5.51 η οποία είναι και η πιο δυσμενής για το τεμάχιο αυτό αφού η δύναμη ώσης δεν είναι εφελκυστική αλλά δημιουργεί καμπτικές ροπές ως προς αυτό. Έτσι, οι φορτίσεις αυτού του τεμαχίου προκύπτουν σε πλήρη αντιστοιχία με τη δεύτερης εικόνας του Σχ. 5.51 με τη μόνη προσθήκη ότι πλέον συνυπολογίζεται και το βάρος της στεφάνης το οποίο θεωρείται για ασφάλεια ότι ασκείται στο ίδιο επίπεδο με το βάρος λόγω της μάζας m_A . Εδώ, για τα προκύπτοντα φορτία θα γίνουν δύο έλεγχοι για τις δύο πλευρές της φλάντζας. Έτσι, στον πρώτο έλεγχο τα φορτία ασκούνται στις οπές 3 και στο τμήμα 5 ενώ έχουμε πάκτωση στις οπές 2 και το τμήμα 1. Ο δεύτερος έλεγχος θεωρεί το ακριβώς αντίστροφο. Στο Σχ. 5.55 λοιπόν φαίνονται τα παραπάνω.

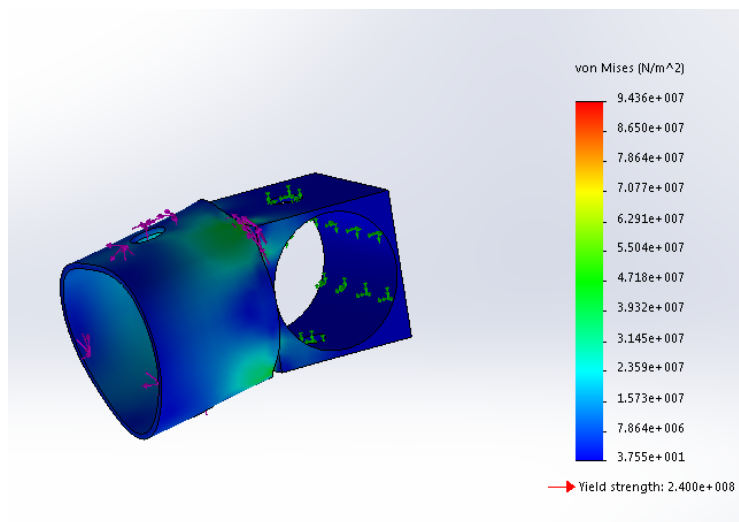


Σχήμα 5.55. Δυσμενέστερη δυνατή φόρτιση της φλάντζας B2 για δύο ελέγχους αντοχής.

Έτσι λοιπόν, προκύπτουν το Σχ. 5.56 και 5.57 για τις εντατικές καταστάσεις του πρώτου και δεύτερου ελέγχου αντίστοιχα.



Σχήμα 5.56. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για τον πρώτο έλεγχο της φλάντζας B2 κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση.

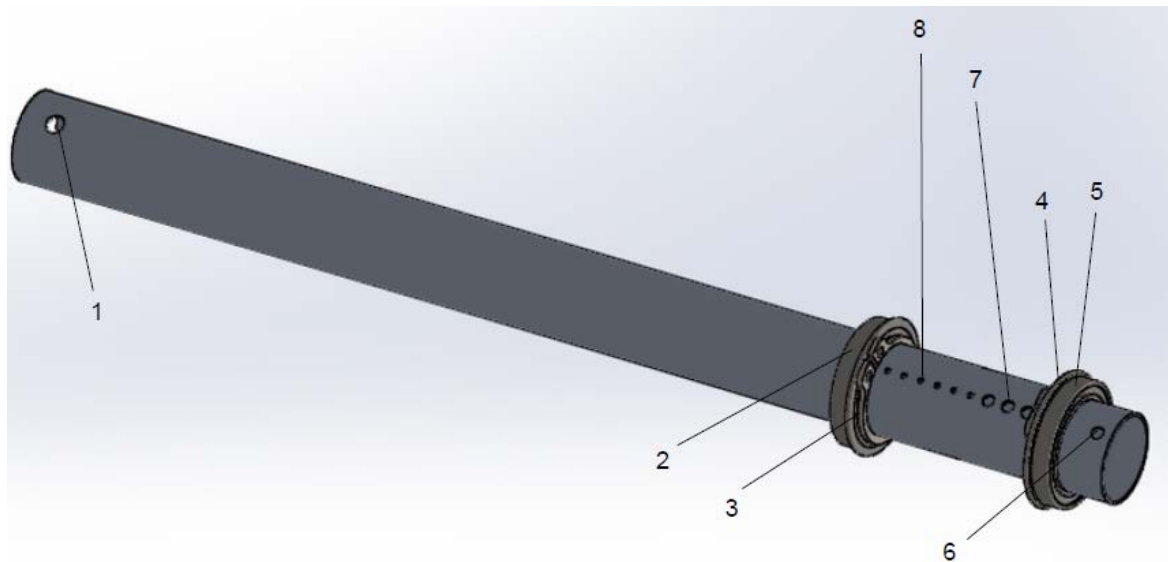


Σχήμα 5.57. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για το δεύτερο έλεγχο της φλάντζας B2 κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση.

Παρατηρείται λοιπόν ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι περίπου ίσος με 2 στον πρώτο-δυσμενέστερο έλεγχο. Σημειώνεται ακόμη ότι οι ακριβείς διαστάσεις αυτού του τεμαχίου βρίσκονται στο Παράρτημα Γ, Παρ. Γ.23 και ότι η συνολική του μάζα είναι 2.71gr .

Πόδι-άξονας πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής B3

Το κάθε πόδι B3 παίρνει κίνηση από τον πρώτο ηλεκτρικό σερβοκινητήρα (βλ. Σχ. 2.5) και δημιουργεί την πρώτη απαιτούμενη ανεξάρτητη περιστροφή στο ρομπότ. Αυτό, απεικονίζεται στο Σχ. 5.58 μαζί με τα ρουλεμάν B4 και τους δακτύλιους ασφάλειας B5 που απαιτούνται για την ασφαλή στήριξη του.



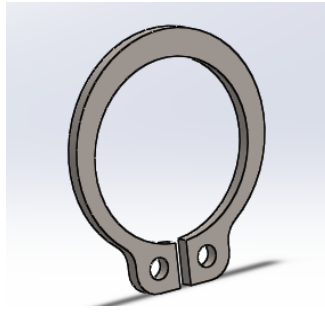
Σχήμα 5.58. Πόδι-άξονας πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής B3 μαζί με τα ρουλεμάν B4 και τους δακτύλιους ασφάλειας B5.

Το υλικό του φορέα αυτού είναι ντουραλουμίνιο 2024-T3. Με τον αριθμό 1 συμβολίζονται οι οπές από τις οποίες θα περάσουν κοχλίες $M3$ για τη σύνδεση του ποδιού B3 με τη φλάντζα B2 του Σχ. 5.54. Οι αριθμοί 2 και 5 είναι τα δύο έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) B4 τα οποία μαζί με τους δακτύλιους ασφάλειας B5 3 και 4 και τα κατάλληλα στεγάσματα αυτών αποτελούν τις δύο απαιτούμενες εδράσεις που πρέπει να έχει το πόδι. Οι οπές 8 είναι έξι στον αριθμό και υπάρχουν ώστε από αυτές να εξέρχονται τα καλώδια της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα. Υπενθυμίζεται ότι τα καλώδια της absolute παλμογεννήτριας που επιλέχθηκε είναι τέσσερα ενώ του δεύτερου σερβοκινητήρα δύο (δεδομένου ότι αφαιρέθηκε το ποτενσιόμετρο). Ακόμη, από τις μεγάλες οπές με τον αριθμό 7 εξέρχονται τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα. Τέλος, η οπή 6 υπάρχει για τη σύνδεση του ποδιού με το κόπλερ B7 μέσω του οποίου θα συνδεθεί με τον πρώτο σερβοκινητήρα. Σημειώνεται επίσης ότι η σύνδεση αυτών των δύο θα γίνει επιπρόσθετα με τη χρήση ειδικής κόλλας.

Σε ο.τι αφορά τα ρουλεμάν B4 2, 5 και τους δακτύλιους ασφάλειας B5 3,4 αυτοί λαμβάνονται τυποποιημένοι από την εταιρεία Misumi. Τα ρουλεμάν έχουν κωδική ονομασία C-SFL6702ZZ και απεικονίζονται στο Σχ. 5.59. Ακόμη, στο Σχ. 5.60 φαίνονται οι δακτύλιοι ασφάλειας, οι οποίοι έχουν κωδική ονομασία STWN15. Οι ακριβείς διαστάσεις και των δύο φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στις Παρ. Γ.24 και Γ.25 αντίστοιχα.

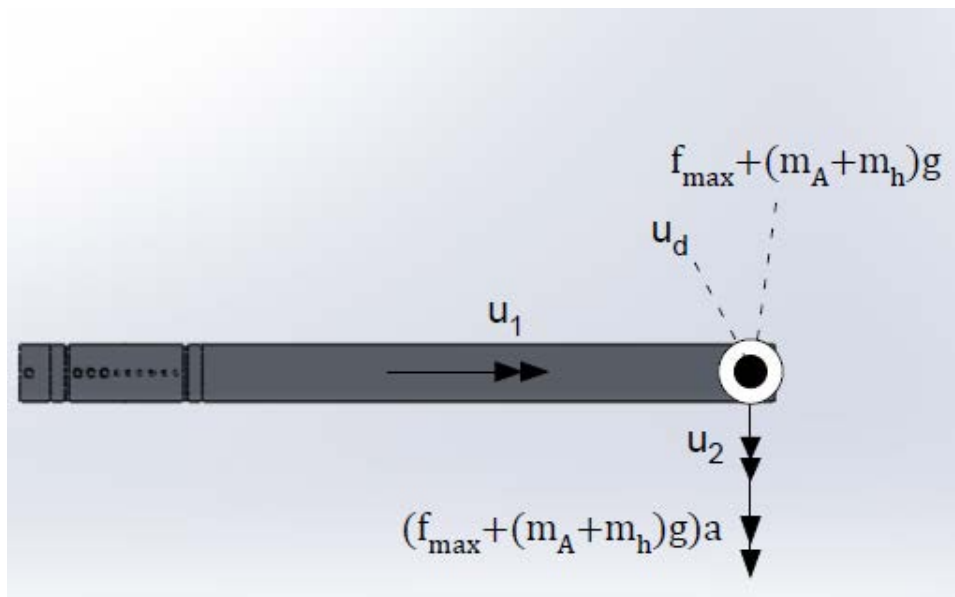


Σχήμα 5.59. C-SFL6702ZZ ρουλεμάν της εταιρείας Misumi [36].



Σχήμα 5.60. STWN15 δακτύλιος ασφάλειας της εταιρείας Misumi [36].

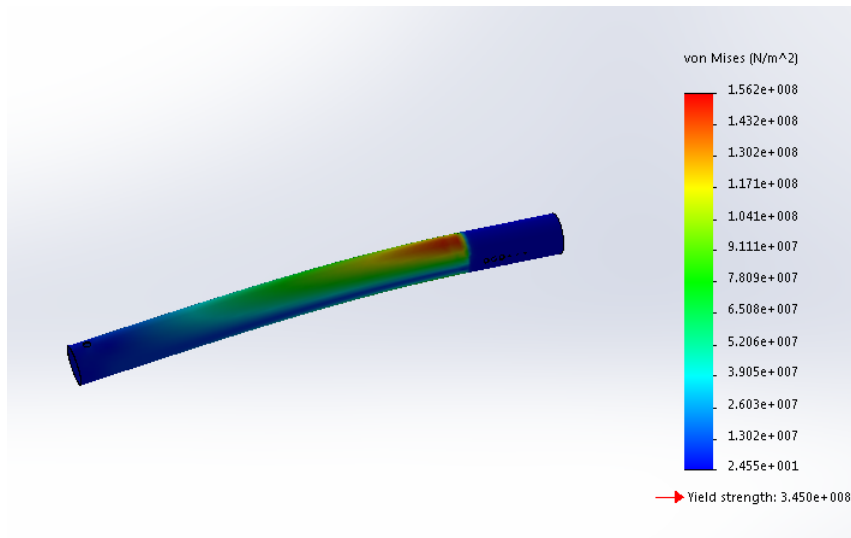
Για τον έλεγχο της αντοχής του ποδιού B3, θεωρούμε ότι τα φορτία που το καταπονούν είναι τα δυσμενέστερα δυνατά. Τα φορτία αυτά είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά του Σχ. 5.55 που καταπονούν τη φλάντζα B2 και ασκούνται στις οπές 1 και στο τμήμα επαφής του ποδιού με τη φλάντζα. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η ροπή u_1 η οποία ασκείται ομοιόμορφα πλέον σε όλον το φορέα ώστε να είναι πιο ρεαλιστική. Οι πακτώσεις αυτού του φορέα λαμβάνονται στις περιφερειακές επιφάνειες επαφής του ποδιού με τα ρουλεμάν B4 2 και 5. Όλα αυτά οπτικοποιούνται στο Σχ. 5.61.



Σχήμα 5.61. Δυσμενέστερα φορτία του ποδιού B3.

Έτσι, λαμβάνουμε από το Solidworks το Σχ. 5.62 για την εντατική κατάσταση του ποδιού. Παρατηρείται από το σχήμα αυτό ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι σχεδόν ίσος με 2. Σημειώνεται ότι η μάζα αυτού του τεμαχίου είναι 10.04gr και οι ακριβείς διαστάσεις του υπάρχουν στο Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.26.

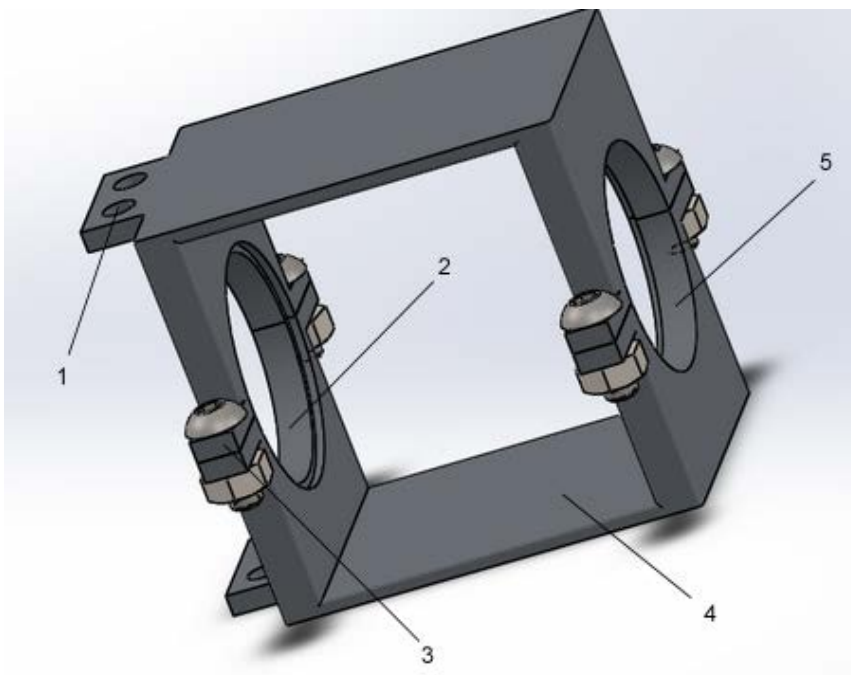
Αναφορικά με το μήκος L του ποδιού απλά επισημαίνεται ότι σε αντίθεση με τον αναλυτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης (ο οποίος θεωρούσε ότι η απόσταση του κέντρου μάζας της βάσης από την άκρη του ποδιού ταυτίζεται με το συνολικό μήκος του ποδιού), στο λεπτομερή σχεδιασμό εμείς σχεδιάζουμε το μήκος του ποδιού τόσο ώστε να φτάνει στην άκρη της βάσης και να παίρνει κίνηση από τον πρώτο σερβοκινητήρα.



Σχήμα 5.62. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για το πόδι B3 κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση.

Σύστημα έδρασης ποδιού B6

Ο ρόλος του τεμαχίου αυτού είναι να στεγάζει τα ρουλεμάν B4 καθώς και να φιλοξενεί τους δακτυλίους ολίσθησης των περιστρεφόμενων καλωδίων του ηλεκτροκινητήρα, της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα. Σημειώνεται δηλαδή ότι για να οδηγηθούν τα καλώδια αυτά μέσα από τον περιστρεφόμενο άξονα-πόδι B3 στην ακίνητη βάση ως προς αυτόν χρειάζεται άλλος ένας δακτύλιος ολίσθησης για τον ηλεκτροκινητήρα και η σχεδίαση δύο νέων για τα καλώδια παλμογεννήτριας και δεύτερου σερβοκινητήρα. Το σύστημα αυτό της έδρασης του ποδιού φαίνεται στο Σχ. 5.63.



Σχήμα 5.63. Σύστημα έδρασης ποδιού B6.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί αυτό είναι ένα “split design” αποτελούμενο από δύο πανομοιότυπα σώματα 4, η σύνδεση των οποίων γίνεται με τους κοχλίες και τα περικόχλια που απεικονίζονται και περνάνε μέσα από τις προεξοχές με τον αριθμό 3. Αυτός ο σχεδιασμός έγινε για να υπάρχει εύκολα πρόσβαση σε αυτό το κομμάτι του ποδιού, στο οποίο θα υπάρχουν χάλκινοι αγωγοί που θα παίρνουν ισχύ και σήμα από τα καλώδια που βγαίνουν από τις οπές 7 και 8 του Σχ. 5.58. Με τον αριθμό 2 και 5 συμβολίζονται οι απαραίτητες διαμορφώσεις για την τοποθέτηση των ρουλεμάν B4 του ποδιού 5 και 2 αντίστοιχα του Σχ. 5.58. Τέλος, οι τέσσερις οπές με τον αριθμό 1 υπάρχουν για τη σύνδεση του τεμαχίου αυτού με το σκελετό της βάσης, λεπτομέρεια η οποία θα φανεί πιο καθαρά παρακάτω. Σημειώνεται ότι το υλικό του κάθε τεμαχίου 4 από το οποίο αποτελείται αυτό το σύστημα εδράσης είναι ντουραλουμίνιο 2030.

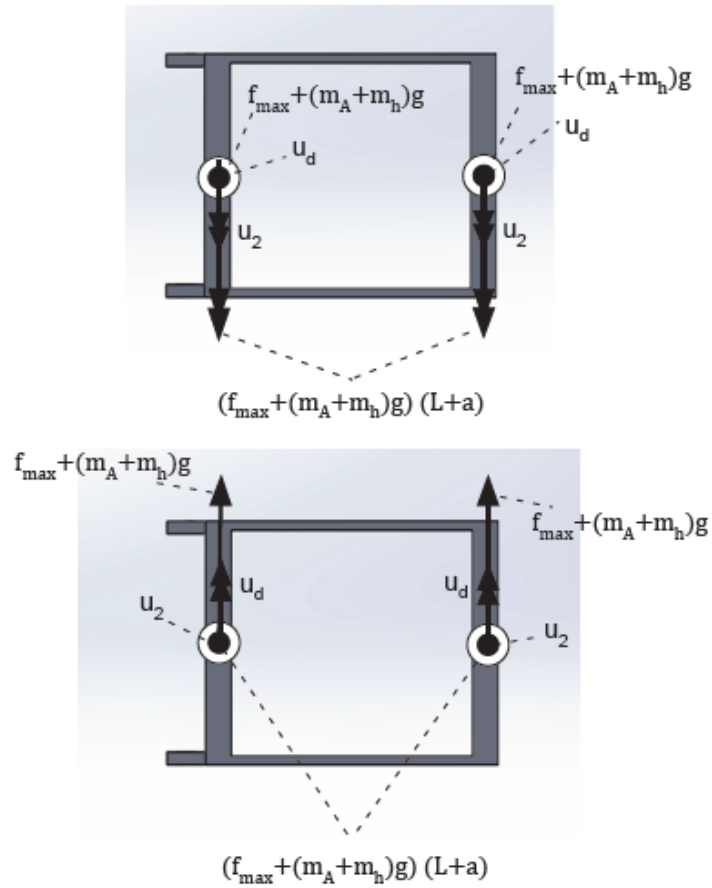
Για τον έλεγχο της αντοχής του Σχ. 5.63 θεωρούμε ότι αυτό είναι ένα σώμα με την υπόθεση ότι η σύνδεση από κοχλίες και περικόχλια είναι ικανοποιητική και ασφαλής. Το είδος της φόρτισης που εξετάζεται είναι το ίδιο με αυτό της φλάντζας B2 και του σώματος του ποδιού B3 με τις εξής αλλαγές. Αρχικά, δεδομένου ότι αυτή είναι μια έδραση και όχι μια αυστηρή πάκτωση, η ροπή M_1 δε λαμβάνεται ως φορτίο αφού οι εδράσεις δεν εμποδίζουν αυτόν τον βαθμό ελευθερίας.

Ακόμη, σε ό,τι αφορά τα υπόλοιπα φορτία του Σχ. 5.61, επειδή το σώμα αυτό είναι ακίνητο ως προς τον περιστρεφόμενο άξονα B3, η κατεύθυνση αυτών μεταβάλλεται σε έναν κύκλο. Συνεπώς, είναι ανάγκη να διακριθούν δύο περιπτώσεις φορτίσεων. Μία με τις κατευθύνσεις των φορτίων ακριβώς όπως απεικονίζονται στο Σχ. 5.61 και μία δεύτερη όπου αυτές βρίσκονται σε έναν άλλον οριακό προσανατολισμό με γωνία ενενήντα μοιρών ως προς αυτόν του Σχ. 5.61. Επισημαίνεται ακόμη ότι επειδή δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τι ποσοστό από τα φορτία απορροφάται από το τμήμα 2 και τι από το τμήμα 5 του Σχ. 5.63, θεωρούμε για ασφάλεια ότι τα φορτία αυτά ασκούνται ολόκληρα και στα δύο τμήματα. Ακόμη, το βάρος του ποδιού ως πολύ μικρό αμελείται.

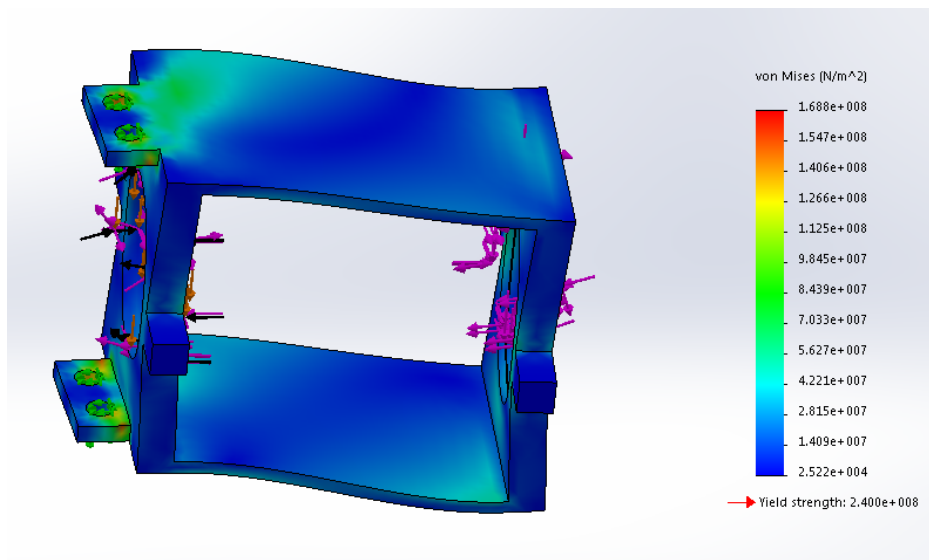
Επιπρόσθετα, εκτός των φορτίων του Σχ. 5.61 αναμένουμε και μία καμπτική ροπή λόγω των δυνάμεων στα άκρα του ποδιού B3 με μοχλοβραχίονα L , όπου L το πραγματικό μήκος του ποδιού κατά τον λεπτομερή σχεδιασμό (βλ. Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.26). Τέλος, για τον πλήρη ορισμό αυτού του προβλήματος αντοχής, σημειώνεται ότι οι πακτώσεις αυτού του σώματος λαμβάνονται στις οπές 1 του Σχ. 5.63. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχ. 5.64.

Στη συνέχεια και σύμφωνα με αυτά λαμβάνουμε από το Solidworks για την εντατική κατάσταση του τεμαχίου αυτού στις δύο περιπτώσεις φορτίσεων τα Σχ. 5.65 και 5.66. Παρατηρείται ότι η δεύτερη περίπτωση φόρτισης, όπου τη καμπτική ροπή λόγω της δύναμης ώσης καλούνται να την παραλάβουν οι 2 οριζόντιες επιφάνειες της έδρασης, είναι ελαφρώς δυσμενέστερη. Ο συντελεστής ασφάλειας είναι κοντά στο 1.5. Ωστόσο αυτό δεν είναι κάτι ανησυχητικό αφού ήδη έχει επιβαρυνθεί η μελέτη αντοχής θεωρώντας ότι και τα δύο τμήματα 2 και 5 του Σχ. 5.63 παραλαμβάνουν τα φορτία ολόκληρα (βλ. Σχ. 5.64).

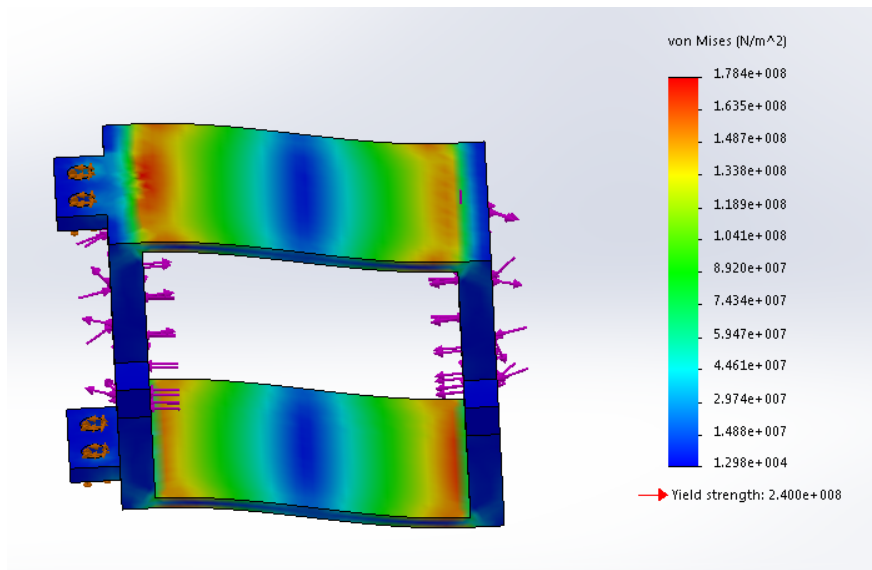
Οι ακριβείς διαστάσεις του τεμαχίου 4 του Σχ. 5.63 υπάρχουν στο Παράρτημα Γ, στο Σχ. Γ.27 και η μάζα του είναι 11.11gr .



Σχήμα 5.64. Φορτίσεις έδρασης ποδιού B6 για τις δύο δυσμενέστερες περιπτώσεις



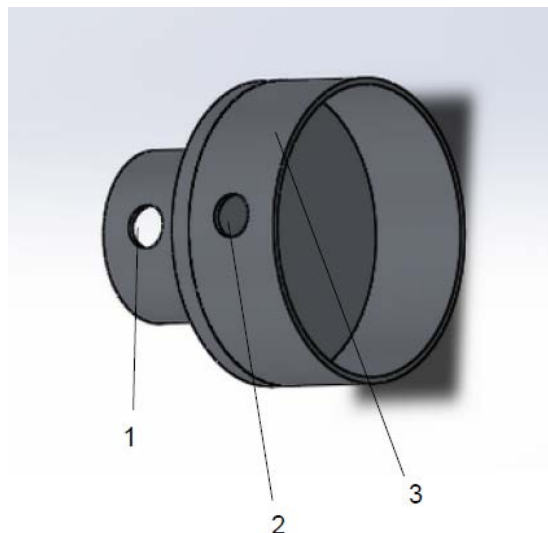
Σχήμα 5.65. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises έδρασης ποδιού B6 για την πρώτη περίπτωση φόρτισης.



Σχήμα 5.66. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises έδρασης ποδιού B6 για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης.

B7 Κόπλερ σύζευξης ποδιού και πρώτου σερβοκινητήρα

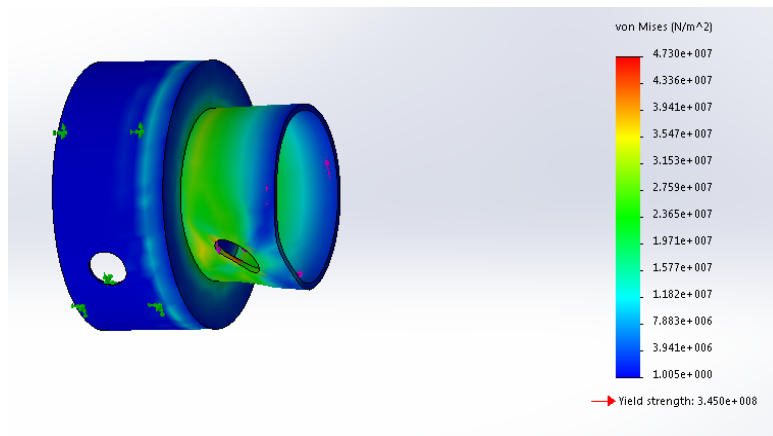
Το πόδι B3 παίρνει κίνηση από το σερβοκινητήρα μέσω ενός κόπλερ B7 που βιδώνεται σε αυτό μέσω της οπής 6 του Σχ. 5. 58. Από την άλλη μεριά του κοπλέρ υπάρχει μία ακόμα οπή για τη σύνδεση του με τον πρώτο σερβοκινητήρα (βλ. Σχ. 4.25). Το τεμάχιο αυτό φαίνεται στο Σχ. 5.67.



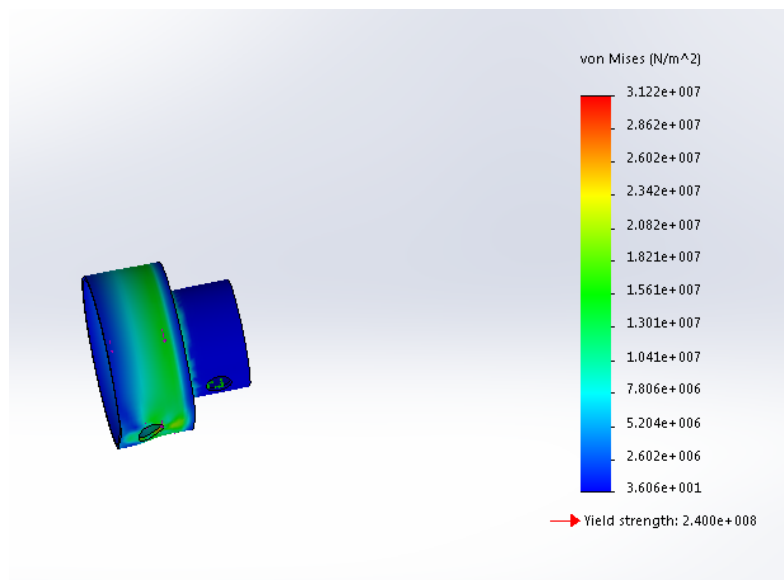
Σχήμα 5.67. Κόπλερ σύζευξης ποδιού με πρώτο σερβοκινητήρα.

Το υλικό αυτού του τεμαχίου είναι ντουραλουμίνιο 2030. Με τον αριθμό συμβολίζεται η οπή από την οποία θα περάσει ο κοχλίας σύνδεσης $M2$ για τη σύνδεση του τεμαχίου αυτού με τον πρώτο σερβοκινητήρα (βλ. Σχ.4.25). Η σύνδεση του κόπλερ B7 με το πόδι B3 θα γίνει με ειδική κόλλα μέσω της επαφής του τμήματος 3 και του ποδιού καθώς και με κοχλία $M2$ από την οπή 2.

Ο έλεγχος της αντοχής αυτού του τεμαχίου είναι πανομοιότυπος με την περίπτωση του κόπλερ για το δεύτερο σερβοκινητήρα και απαιτεί να μπορεί να περνάει η ροπή M_1 και από τις δύο πλευρές. Συνεπώς, λαμβάνουμε την εξής εντατική κατάσταση και για τις δύο πλευρές του κόπλερ B7 από τα Σχ. 5.68 και 5.69.



Σχήμα 5.68. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για φορτία στην μία πλευρά του κόπλερ σύζευξης του πρώτου σερβοκινητήρα.



Σχήμα 5.69. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises για φορτία στην άλλη πλευρά του κόπλερ σύζευξης του πρώτου σερβοκινητήρα.

Μπορεί να παρατηρηθεί ένας αρκετά μεγάλος συντελεστής ασφάλειας, ο οποίος δεν επιτεύχθηκε να πέσει παραπάνω για τους ίδιους λόγους με τους αναφερθέντες στο κόπλερ σύζευξης με το δεύτερο σερβοκινητήρα. Σημειώνεται τέλος ότι η μάζα αυτού του τεμαχίου είναι 0.75 gr με τις ακριβείς διαστάσεις του να φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στο Σχ. Γ.28.

Δακτύλιος ολίσθησης (slip ring) του ηλεκτροκινητήρα για την πρώτη ανεξάρτητη περιστροφή

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω για να μεταφερθούν τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα μέσα από το περιστρεφόμενο πόδι B3 στο ακίνητο σύστημα έδρασης B6 και από εκεί στη

βάση, χρειάζεται ένας ίδιος σχεδιασμός με αυτόν που περιγράφηκε στην Παρ. 5.2.1. Δεδομένου ότι πρέπει να τηρούνται οι Εξ. (5-6) και (5-7) για την ασφαλή αγωγή ρεύματος, γίνεται ο αντίστοιχος σχεδιασμός χάλκινων δακτυλίων B10, μονωτικών δακτυλίων B12, χάλκινων ελασμάτων B9 και μονώσεων B8 μεταξύ αυτών, καθώς και πλαστικών πείρων στήριξης. Όλα αυτά φαίνονται στο Σχ. 5.70. Οι ακριβείς διαστάσεις αυτών φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στα Σχ. Γ.29, Γ.30, Γ.31, Γ.32 και Γ.33 αντίστοιχα.

Δακτύλιος ολίσθησης (slip ring) του δεύτερου σερβοκινητήρα

Στην ίδια λογική με το slip ring του ηλεκτροκινητήρα, σχεδιάζεται ένας δακτύλιος ολίσθησης για το δεύτερο σερβοκινητήρα. Σε πλήρη αντιστοιχία με τις Εξ. (5-6) και (5-7) για τις επιτρεπόμενες διαστάσεις ώστε να διέρχεται ασφαλώς ρεύμα, προκύπτει έπειτα από μετρήσεις και από τα κατασκευαστικά σχέδια του δεύτερου σερβοκινητήρα ότι:

$$d_{w,s2} = 0.9mm \quad (5-10)$$

διάμετρος η οποία στην πραγματικότητα συμπεριλαμβάνει και τις μονώσεις του καλωδίου, οπότε είναι μεγαλύτερη αυτής του ρευματοφόρου αγωγού. Σημειώνεται όμως ότι λαμβάνονται ίδιες κυρίως για ασφάλεια αλλά και λόγω του ότι είναι αμελητέα η διαφορά αυτή στη μάζα.

$$A_{w,s2}^{\min} = 0.65mm^2 \quad (5-11)$$

Συνεπώς, στην ίδια λογική με τους δακτυλίους ολίσθησης του ηλεκτροκινητήρα, σχεδιάζονται χάλκινοι δακτύλιοι B14 οι οποίοι εφαρμόζουν στο πόδι πάνω έναν πλαστικό κύλινδρο ABS και βρίσκονται σε κατάλληλη απόσταση από αυτούς του ηλεκτροκινητήρα, χάλκινα ελάσματα B13 για την επαφή με αυτούς, μονώσεις μεταξύ αυτών και σύστημα πίεσης των ελασμάτων πάνω σε έναν πλαστικό πείρο ακριβώς στην ίδια φιλοσοφία με τους δακτυλίους ολίσθησης των ηλεκτροκινητήρων. Αυτά απεικονίζονται στο Σχ. 5.70. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις αυτών των χάλκινων δακτυλίων, των ελασμάτων, των μονώσεων μεταξύ τους, του πλαστικού ABS κυλίνδρου (ο οποίος βρίσκεται και κάτω από τους δακτυλίους για τον ηλεκτροκινητήρα) και του πλαστικού πείρου στήριξης φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στα Σχ. Γ.34, Γ.35, Γ.36, Γ.37 και Γ.38 αντίστοιχα.

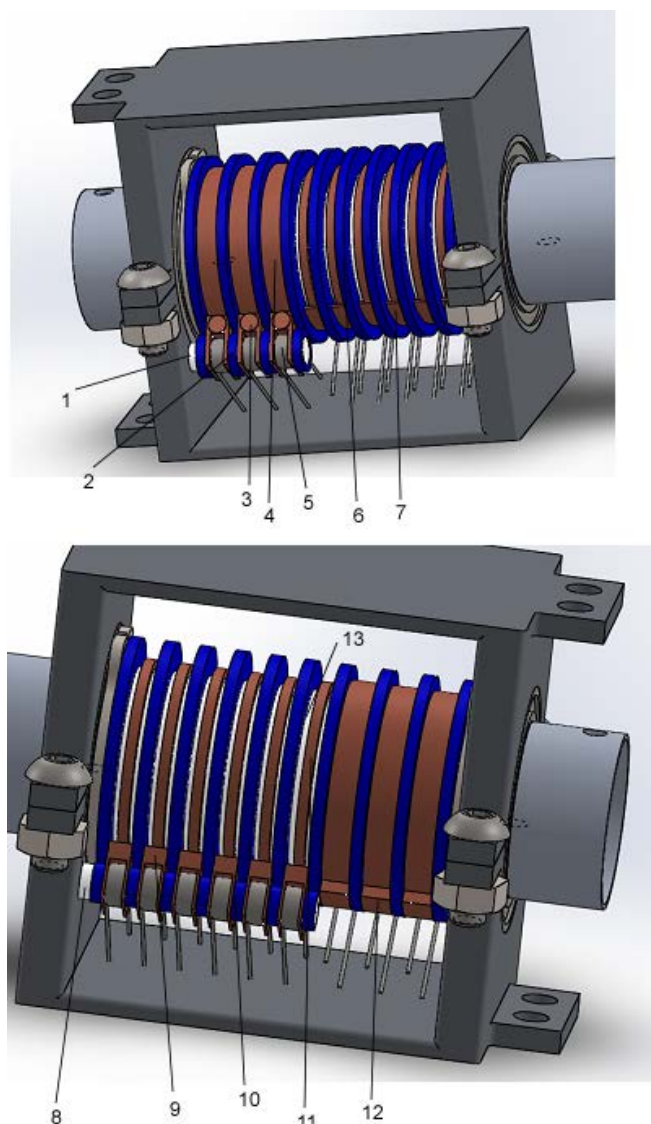
Δακτύλιος ολίσθησης (slip ring) της παλμογεννήτριας (encoder) της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής

Έπειτα από μετρήσεις και από τα κατασκευαστικά σχέδια της παλμογεννήτριας της δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής (βλ. Σχ. 5.44) φάνηκε ότι η διάμετρος των καλωδίων αυτής είναι ελαφρώς μικρότερη του σερβοκινητήρα (βλ. Εξ. 5-10), κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού απαιτεί σημαντικά μικρότερα ρεύματα. Ωστόσο, αποφασίσθηκε ο σχεδιασμός του δακτυλίου ολίσθησης για τα τέσσερα καλώδια της παλμογεννήτριας να είναι πανομοιότυπος με αυτόν του δεύτερου σερβοκινητήρα ώστε να ανακουφιστεί το στάδιο της κατασκευής από περιττές πολυπλοκότητες. Φυσικά, αυτό δεν επιβαρύνει το σχεδιασμό από την άποψη βάρους αφού

τα μεγέθη των Εξ. (5-10) και (5-11) είναι πολύ μικρά και άρα οι δακτύλιοι ολίσθησης που σχεδιάστηκαν σύμφωνα με αυτά είναι πολύ μικρής μάζας. Σημειώνεται ότι οι συνιστώσες του δακτυλίου ολίσθησης που αφορούν την παλμογεννήτρια φαίνονται και αυτές στο Σχ. 5.70.

Σε αυτό το σημείο παρατίθεται το Σχ. 5.70 το οποίο απεικονίζει το σχεδιασμό των δακτυλίων ολίσθησης του ηλεκτροκινητήρα, της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα σε συνδυασμό με το σύστημα της έδρασης του ποδιού (βλ. Σχ. 5.63) και το πόδι Β3 με τα ρουλεμάν Β4 και τους δακτυλίους ασφάλειας Β5 (βλ. Σχ. 5.58).

Τέλος, για το απαραίτητο σύστημα πίεσης τόσο του ηλεκτροκινητήρα όσο και της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα, σημειώνεται ότι τα στροφικά ελατήρια Β11 είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο Σώμα Α (βλ. Σχ. 5.43)



Σχήμα 5.70. Συνιστώσες των slip rings μαζί με το σύστημα έδρασης ποδιού.

Στο Σχ. 5.70 έχουμε:

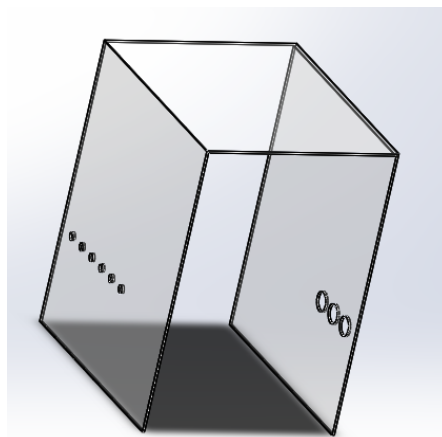
- με τον αριθμό 1 τον πλαστικό ABS πείρο για τη στήριξη των χάλκινων ελασμάτων Β9 και των μονώσεων Β8 του ηλεκτροκινητήρα

- με τον αριθμό 2 τους B8 πλαστικούς δακτυλίους ABS για τη μόνωση των B9 χάλκινων ελασμάτων του ηλεκτροκινητήρα
- με τον αριθμό 3 τα χάλκινα ελάσματα B9 (από τη μπροστά μεριά) του ηλεκτροκινητήρα
- με τον αριθμό 4 τους χάλκινους δακτυλίους B10 του ηλεκτροκινητήρα
- με τον αριθμό 5 τα στροφικά ελατήρια B11 ως σύστημα πίεσης του ηλεκτροκινητήρα, της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα
- με τον αριθμό 6 τους B12 πλαστικούς δακτυλίους ABS μεταξύ των χάλκινων δακτυλίων
- με τον αριθμό 7 τα χάλκινα ελάσματα B13 (από την πίσω μεριά) της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα
- με τον αριθμό 8 τον πλαστικό ABS πείρο για τη στήριξη των χάλκινων ελασμάτων B13 και των μονώσεων της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα
- με τον αριθμό 9 τα χάλκινα ελάσματα B13 (από τη μπροστά μεριά) της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα
- με τον αριθμό 10 τους πλαστικούς δακτυλίους ABS για τη μόνωση των χάλκινων ελασμάτων της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα
- με τον αριθμό 11 τους χάλκινους δακτυλίους B14 της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα
- με τον αριθμό 12 τα χάλκινα ελάσματα B9 (από την πίσω μεριά) του ηλεκτροκινητήρα
- με τον αριθμό 13 ο μονωτικός πλαστικός άξονας ABS που παρεμβάλλεται μεταξύ των δακτυλίων B10, B14 και του ποδιού B3.

Υπενθυμίζεται ότι οι ακριβείς διαστάσεις αυτών των συνιστωσών βρίσκονται στο Παράρτημα Γ και η μάζα αυτού του συστήματος των τριών δακτυλίων ολίσθησης στην ουσία είναι 12.06gr .

B15 Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος έδρασης ποδιού

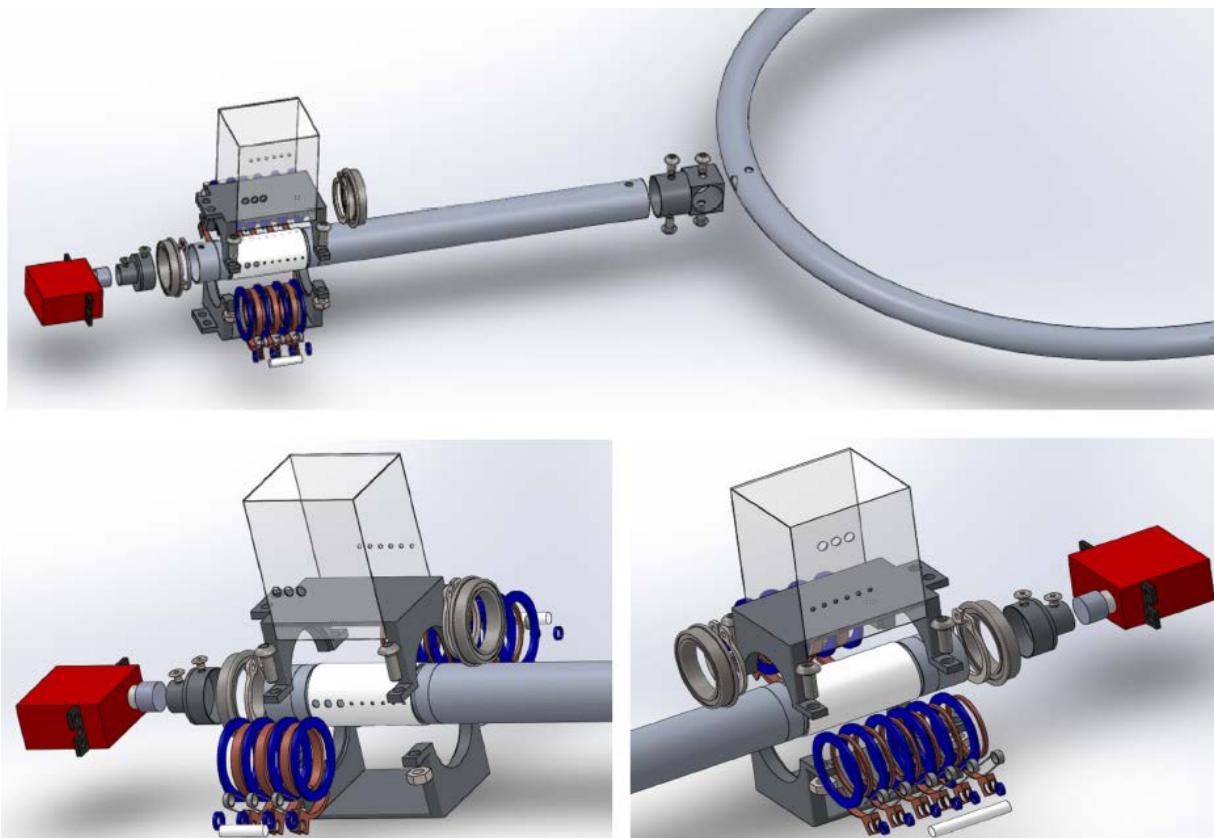
Για την απομόνωση του προαναφερθέντος συστήματος από το εξωτερικό περιβάλλον σχεδιάζεται ένα πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα B15 το οποίο φαίνεται στο Σχ. 5.71.



Σχήμα 5.71. B15 Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος έδρασης ποδιού.

Το υλικό αυτού του τεμαχίου είναι από πλαστικό ABS του 3-D Printer. Σημειώνεται ότι οι έξι μικρές οπές υπάρχουν για την οδήγηση των καλωδίων της παλμογεννήτριας και του σερβοκινητήρα προς τη βάση. Οι τρεις μεγάλες έχουν τον ίδιο ρόλο για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα πλέον. Οι ακριβείς διαστάσεις αυτού του τεμαχίου φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στην Παρ. Γ.1.39 και η μάζα του είναι 0.98gr .

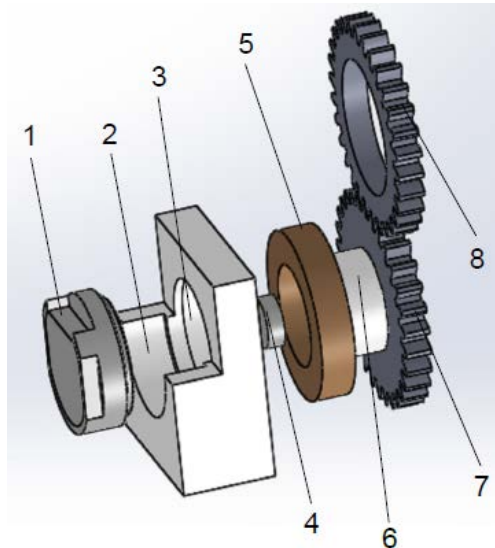
Όλα τα προαναφερθέντα έχουν δώσει τελική μορφή σχεδόν στο Σώμα Β. Η εικόνα όλων αυτών μαζί με τον πρώτο σερβοκινητήρα που οδηγεί το πόδι και τους απαιτούμενους κοχλίες, φαίνεται στο Σχ. 5.72. Σημειώνεται ότι η εικόνα του Σχ. 5.72 δείχνει στην ουσία την μερικώς τελική μορφή του Σώματος Β, ένα στάδιο πριν την τελική συναρμολόγηση.



Σχήμα 5.72. Μερικώς τελική μορφή του Σώματος Β πριν την τελική συναρμολόγηση.

Παλμογεννήτρια (encoder) για την πρώτη ανεξάρτητη περιστροφή

Ακολουθώντας τα προαναφερθέντα, οι πάγιες απαιτήσεις για τις παλμογεννήτριες μας είναι να είναι μαγνητικές και absolute type. Δεδομένης της γεωμετρίας του Σχ. 5.72, φαίνεται ότι μια παλμογεννήτρια σαν αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τη δεύτερη ανεξάρτητη περιστροφή είναι προβληματική από την άποψη τοποθέτησης, αφού το πόδι B3 στη μία μεριά του συνδέεται με τη στεφάνη B1 και στην άλλη με το σερβοκινητήρα. Κατάλληλες τόσο από άποψη τοποθέτησης όσο και από ελάχιστη μάζα βρέθηκαν παλμογεννήτριες του τύπου του Σχ. 5.6. Το πολύ βασικό αρνητικό όλων αυτών όμως ήταν ότι ήταν incremental. Έτσι, αποφασίσθηκε να ακολουθήσουμε για την καταμέτρηση και αυτής της ανεξάρτητης γωνιακής περιστροφής την παλμογεννήτρια του Σχ. 5.44, με κατάλληλες επιπρόσθετες διαμορφώσεις. Η ιδέα αυτή φαίνεται στο Σχ. 5.73.



Σχήμα 5.73. Συναρμολόγημα για την παλμογεννήτρια του ποδιού.

Προκειμένου να καταμετρηθεί από την παλμογεννήτρια η ακριβής γωνιακή θέση του ποδιού ή ισοδύναμα της πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής χρησιμοποιούμε ένα ζεύγος πλαστικών οδοντώσεων B16, B17. Ο πλαστικός οδοντωτός τροχός B16 με τον αριθμό 8 (βλ. Σχ. 5.73) εφαρμόζει σφιχτά στο πόδι B3 και συνεργάζεται με τον πλαστικό οδοντωτό τροχό B17 με τον αριθμό 7 (βλ. Σχ. 5.73) το οποίο έχει το ίδιο m (module) καθώς και ονομαστική διάμετρο με το 7. Ο τροχός αυτός εφαρμόζει σφιχτά σε έναν πλαστικό κοίλο ABS άξονα 6, ο οποίος εδράζεται μέσω ενός πολύ μικρού κεραμικού ρουλεμάν 5 στο πλαστικό τεμάχιο B18 που φέρει τις διαμορφώσεις 2 και 3 και είναι τοποθετημένο στη βάση του ρομπότ. Στη διαμόρφωση 3 εδράζεται το ρουλεμάν 5 ενώ στη διαμορφωση 2 με ειδική κόλλα εφαρμόζει ο αισθητήρας-παλμογεννήτρια 1. Αυτή διαβάζει και ανιχνεύει κάθε στιγμή τη γωνιακή θέση μέσω του μαγνήτη 4, ο οποίος είναι κολλημένος σε ειδική διαμόρφωση στο άκρο του άξονα 6.

Το τεμάχιο 5 λαμβάνεται τυποποιημένο από την εταιρεία Papadopoulos-Sa Polymer Bearings με κωδική ονομασία MSM-0610-02.

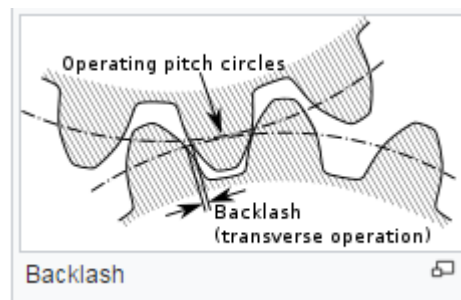
Οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί 7 και 8 επιλέχθηκαν με κριτήριο να έχουν την ελάχιστη δυνατή μάζα αφού οι αδράνειες και οι τριβές του Σχ. 5.73 είναι σχεδόν αμελητέες και έτσι δεν υπάρχει θέμα αντοχής των οδοντώσεων. Αυτά, επιλέγονται από ελληνικές εταιρίες μοντελισμού και το m (module) τους είναι 0.4. Μία πλαστική οδόντωση από αυτές φαίνεται στο Σχ. 5.74, το οποίο μεταξύ άλλων έχει σκοπό να δείξει και την τάξη μεγέθους του συναρμολογήματος του Σχ. 5.73. Σημειώνεται για τον πλαστικό οδοντωτό τροχό του Σχ. 5.74, ότι η εσωτερική του οπή ανοίχθηκε από εμάς για να διαπιστωθεί ότι είναι δυνατή η κατεργασία αυτού του υλικού χωρίς να λιώσει αλλά και να διαταραχθεί το κέντρο του.

Σε ό,τι αφορά τους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς, ένα κεντρικό θέμα και ένας λόγος για τον οποίο αποφεύγεται η χρήση τους είναι η χάρη-backlash-play που εισάγουν (βλ. Σχ. 5.75) και οφείλεται κυρίως σε κατασκευαστικές αστοχίες, πιθανές διαταραχές των κέντρων των συνεργαζόμενων οδόντων, σε αλλαγές στο πάχος των οδόντων κ.ο.κ. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα σε αλλαγές στη φορά περιστροφής λόγω του κενού χώρου που υπάρχει μεταξύ

των οδόντων να υπάρχει κάποια απώλεια επαφής. Αυτό εισάγει κάποιο σφάλμα μεταξύ της πραγματικής γωνιακή θέσης και του σήματος-εντολής που έχει δοθεί, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και έτσι πρέπει να διερευνηθεί το μέγεθος στο οποίο εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο.



Σχήμα 5.74. Δείγμα πλαστικού οδοντωτού τροχού για την παλμογεννήτρια.



Σχήμα 5.75. Backlash συνεργαζόμενων μετωπικών οδοντωτών τροχών.

Ένας εμπειρικός κανόνας που ισχύει για το backlash μετωπικών οδοντωτών τροχών σύμφωνα με το [37] και ακολουθείται στους σχεδιασμούς είναι ο εξής:

$$0.0011811 m \leq \text{backlash} \leq 0.0019685 m \quad (5-12)$$

όπου το backlash (χάρη των οδόντων) είναι εκφρασμένο σε mm ως μήκος και m είναι το module των οδοντώσεων. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι η πάνω σχέση δεν ισχύει για πολύ μικρά module. Συγκεκριμένα, όταν:

$$0.8 \leq m \leq 1.8 \quad (5-13)$$

τότε:

$$\text{backlash} = 0.0762mm \quad (5-14)$$

και όταν:

$$0.4 \leq m \leq 0.8 \quad (5-15)$$

τότε:

$$backlash = 0.0635mm \quad (5-16)$$

Έτσι, λοιπόν δεδομένου ότι οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί που έχουμε επιλέξει, έχουν $m = 0.4$, τότε αναμένουμε να έχουμε χάρη που προκύπτει από τη Σχ. 5-16. Αυτό, σύμφωνα με την ονομαστική ακτίνα των γραναζιών από το Παράρτημα Γ, Σχ. Γ.42 και Γ.43., μεταφράζεται σε σφάλμα στη γωνιακή θέση, της τάξης των 0.5° , τιμή η οποία σίγουρα δεν μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα. Έτσι, λοιπόν, η χάρη που θα εμφανισθεί είναι πάρα πολύ μικρή λόγω του πολύ μικρού αριθμού module αυτών των οδοντώσεων. Έτσι, το φαινόμενο αυτό αμελείται και μπορούμε να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό της ιδέας του Σχ. 5.73.

Τέλος, από το Σχ. 5.73, το κεραμικό έδρανο 5, ο πλαστικός ABS άξονας 6, οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί 7, 8 και το πλαστικό ABS με τις διαμορφώσεις 2 και 3 έχουν τις ακριβείς διαστάσεις τους στο Παράρτημα Γ, στις Παρ. Γ.40, Γ.41, Γ.42, Γ.43 και Γ.44 αντίστοιχα. Επίσης, η μάζα όλων αυτών των συνιστωσών, είναι $2.81gr$.

Έχοντας λοιπόν σχεδιάσει και αυτό το σύστημα έχουμε ορίσει πλήρως το Σώμα Β, το οποίο μαζί με τους απαιτούμενους κοχλίες σύνδεσης παρουσιάσθηκε στην αρχή της περιγραφής του Σώματος Β (βλ. Σχ. 5.49).

Τέλος, για την πληρότητα σημειώνεται ότι η μάζα του Σώματος Β του οχήματος είναι:

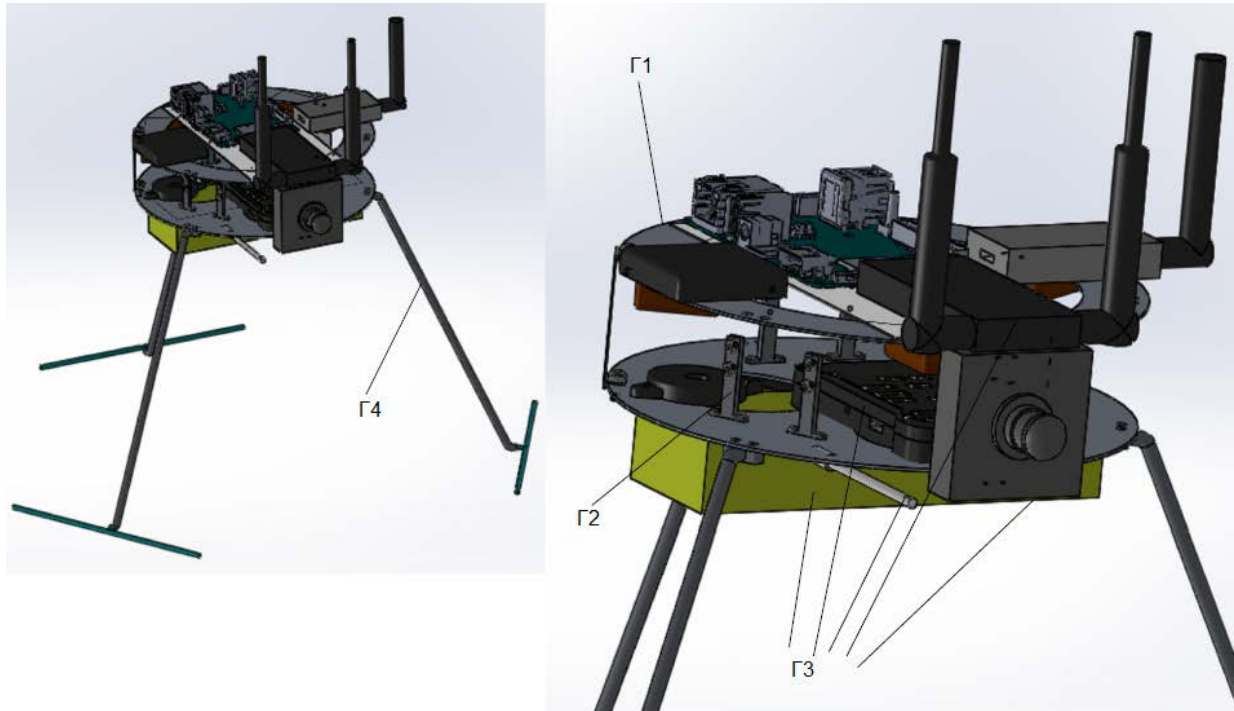
$$m_B = 111.49gr \quad (5-17)$$

5.2.3 Λεπτομερής Σχεδιασμός Σώματος Γ

Το σώμα αυτό στην ουσία είναι το κύριο σώμα του ρομπότ, στο οποίο συγκλίνουν όλα τα φορτία. Αποτελείται κυριώς από το σκελετό της βάσης, την μπαταρία, τα ESC, τα ερείσματα των πρώτων σερβοκινητήρων, τα ηλεκτρονικά και τα πόδια προσγείωσης του ρομπότ. Η τελική μορφή αυτού όπως προέκυψε απεικονίζεται στο Σχ. 5.76, με τα τεμάχια τα οποία το απαρτίζουν να παρουσιάζονται στον Πιν. 5- 5.

Πίνακας 5-5. Τεμάχια που απαρτίζουν το Σώμα Γ.

Συμβολισμός	Ονομασία
Γ1	Σκελετός της βάσης
Γ2	Ερείσματα σερβοκινητήρων
Γ3	Ηλεκτρονικά, αισθητήρες, μπαταρία κ.λπ
Γ4	Πόδια προσγείωσης



Σχήμα 5.76. Τελική λεπτομερής μορφή Σώματος Γ.

Στη συνέχεια αναλύεται και παρουσιάζεται με λεπτομέρεια κάθε τεμάχιο και συνιστώσα του Σώματος Γ.

Σκελετός της βάσης Γ1

Στο τεμάχιο αυτό συγκλίνουν όλα τα φορτία του ρομπότ και έτσι απαιτείται μια στιβαρή δομή. Αυτή θα αποτελείται από δύο κύρια κυκλικά πατώματα για τη φιλοξενία όλων των απαραίτητων ηλεκτρονικών, μπαταρίας, σερβοκινητήρων, παλμογεννητριών, οδηγήσεων κλπ, τα οποία όμως συνδέονται απαραίτητα μεταξύ τους με κολώνες για μηχανική στιβαρότητα. Ο σκελετός αυτός με όλες τις απαιτούμενες διαμορφώσεις απεικονίζεται στο Σχ. 5.77.

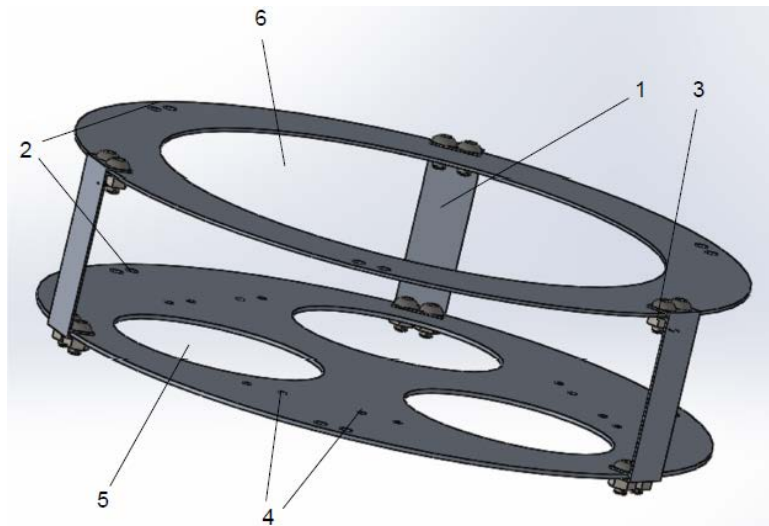
Με τον αριθμό 1 απεικονίζονται οι εν λόγω κολώνες οι οποίες συνιστούν ένα σύστημα-σκελετό με το άνω και κάτω κυκλικό τμήμα μέσω δύο ζευγαριών κοχλίων και περικοχλίων 3. Σημειώνεται ότι το υλικό των δύο κυκλικών πατωμάτων είναι ντουραλουμίνιο 2024-T3 ενώ αυτό των κολωνων ντουραλουμίνιο 2030. Με τον αριθμό 6 και 5 συμβολίζονται οι κυκλικές αφαιρέσεις υλικού που προτείνονται για την ελαχιστοποίηση της μάζας αυτού του συστήματος ενώ παράλληλα δεν παραβιάζεται η αντοχή του. Οι οπές 2 είναι ομόκεντρες με τις οπές 1 του Σχ. 5.63 και από αυτές περνάνε κοχλίες $M3$ για τη σύνδεση του συστήματος έδρασης του ποδιού B6 και του σκελετού Γ1. Οι οπές με τον αριθμό 4 υπάρχουν για τη στήριξη των ερεισμάτων Γ2 των σερβοκινητήρων της πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.

Ο έλεγχος της αντοχής αυτού του τεμαχίου αποτελείται από φορτία σε πλήρη αντιστοιχία με το Σχ. 5.64. Η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι πλέον υπάρχει και η ροπή u_1 , η οποία ισομοιράζεται για τον κάθε σερβοκινητήρα στις οπές 4. Όλα τα υπόλοιπα φορτία λόγω του κάθε συστήματος Σωμάτων A και B μοιράζονται στις οπές σύνδεσης 2 του σκελετού με το σύστημα της έδρασης των ποδιών. Η πάκτωση όλης αυτής της κατάστασης λαμβάνεται

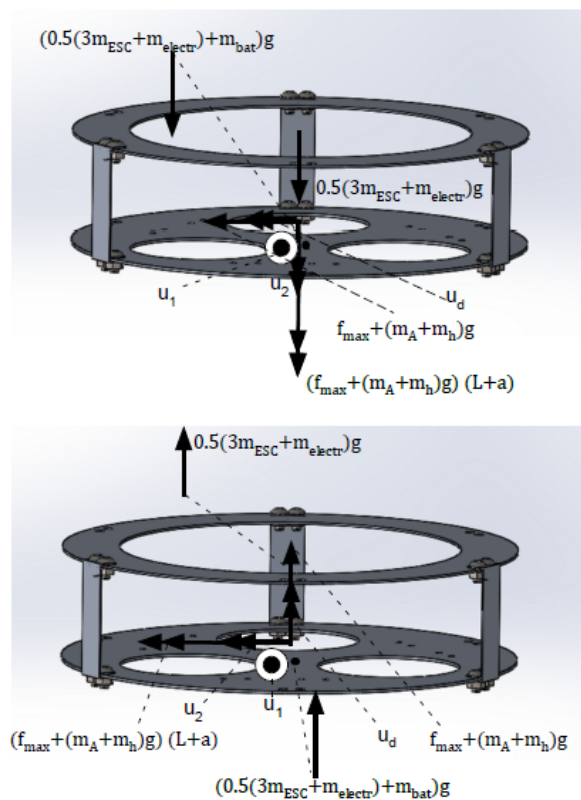
σε ένα σημείο στο κέντρο του κάτω κυκλικού τμήματος της βάσης. Στα παραπάνω φορτία συμπληρώνονται και το βάρος της μπαταρίας το οποίο ασκείται στο κάτω κυκλικό τμήμα καθώς και το μισό βάρος των ηλεκτρονικών και των τριών ESC, με το άλλο μισό να ασκείται στο πάνω κυκλικό τμήμα. Για τα ηλεκτρονικά έγινε η υπόθεση ότι:

$$m_{electr} = 300\text{grams} \quad (5-18)$$

Όπως και στο Σχ. 5.64 πάλι διακρίνονται δύο περιπτώσεις δυσμενέστερων φορτίσεων, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχ. 5.78.



Σχήμα 5.77. Γ1 Σκελετός της βάσης.

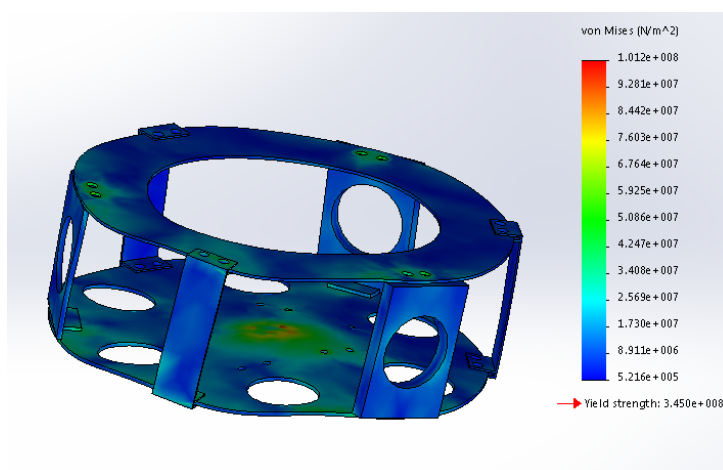


Σχήμα 5.78. Φορτίσεις σκελετού της βάσης για τις δύο δυσμενέστερες περιπτώσεις.

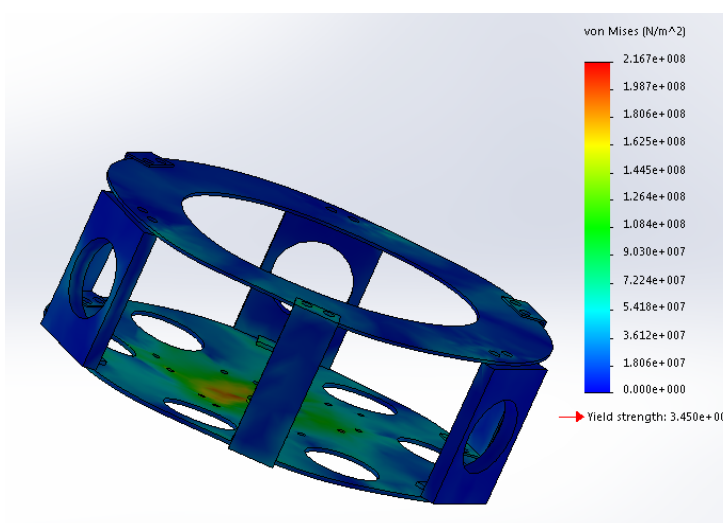
Σχετικά με το Σχ. 5.78 επισημαίνεται ότι εξαιρουμένων των βαρυτικών δυνάμεων της μπαταρίας, των ηλεκτρονικών και των ESC όλα τα υπόλοιπα φορτία ασκούνται άλλες δύο φορές λόγω των άλλων δύο συμμετρικών συστημάτων Σωμάτων Α και Β, κάτι το οποίο δεν φαίνεται χάριν απλότητας και καθαρότητας του σχήματος. Επίσης, όπως και σε όλες τις προηγηθείσες αναλύσεις αντοχής, οι κατευθύνσεις των δυνάμεων έχουν ληφθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι οι δυσμενέστερες δυνατές. Για παράδειγμα στη δεύτερη περίπτωση έχει ληφθεί η επιτάχυνση της βαρύτητας προς τα πάνω.

Σημειώνεται ότι για να ληφθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, για τον έλεγχο της αντοχής ο σκελετός της βάσης σχεδιάστηκε στο Solidworks επιπρόσθετα με τρεις ακόμα κολώνες, αυτές του συστήματος έδρασης της βάσης Β6, οι οποίες φιλοξενούν τη διαμόρφωση 2 (βλ. Σχ. 5.63) και παίζουν τελικά δομικό ρόλο και ως προς τη στιβαρότητα του σκελετού.

Έτσι, λαμβάνουμε τις εξής εντατικές καταστάσεις για την κάθε περίπτωση φόρτισης:



Σχήμα 5.79. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του σκελετού της βάσης Γ1 για την πρώτη περίπτωση.



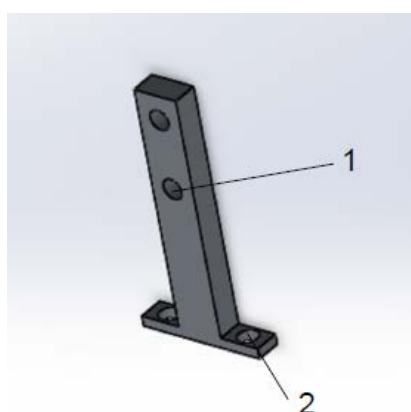
Σχήμα 5.80. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του σκελετού της βάσης Γ1 για τη δεύτερη περίπτωση.

Φαίνεται συνεπώς πιο δυσμενής η δεύτερη περίπτωση καταπόνησης, κατί που ήταν αναμενόμενο αφού οι ροπές λόγω της δύναμης ώσης κάμπτουν τα δύο κυκλικά τμήματα σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση όπου τα στρέφουν.

Οι ακριβείς διαστάσεις των δύο τμημάτων καθώς και της κάθε κολώνας του σκελετού της βάσης, φαίνονται στο Παράρτημα Γ, στα Σχ. Γ.45, Γ.46, Γ.47 αντίστοιχα. Η μάζα όλου αυτού του συστήματος-σκελετού της βάσης χωρίς τους απαιτούμενους κοχλίες και περικόχλια, είναι 62.59gr .

Γ2 ερείσματα σερβοκινητήρων πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής

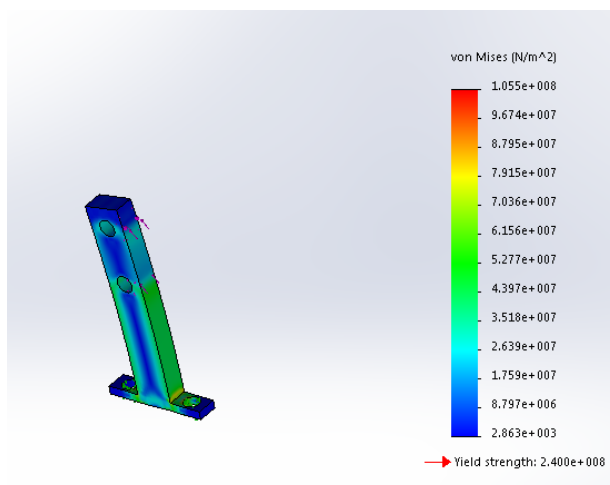
Για τη στήριξη του πρώτου σερβοκινητήρα στη βάση, χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πανομοιότυπων ερεισμάτων Γ2 το ένα εκ του οποίου απεικονίζεται στο Σχ. 5.81.



Σχήμα 5.81. Γ2 έρεισμα σερβοκινητήρα πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.

Το υλικό αυτού του τεμαχίου είναι ντουραλουμίνιο 2030. Με τον αριθμό 1 συμβολίζονται οι οπές από τις οποίες θα περάσουν κοχλίες $M2$ για τη σύνδεση του με το κάθε φτερό του σερβοκινητήρα (βλ. Σχ. 4.25). Μέσω των οπών 2 με τους ίδιους κοχλίες συνδέεται το τεμάχιο αυτό με το σκελετό της βάσης (βλ. Σχ. 5.77).

Για τον έλεγχο της αντοχής του, θεωρούμε ότι όλη η ροπή u_1 παραλαμβάνεται από το κάθε έρεισμα Γ2 και συγκεκριμένα μοιράζεται στις οπές 1 του Σχ. 5.81. Η πάκτωση λαμβάνεται στις οπές σύνδεσης με τη βάση 2. Έτσι, λαμβάνουμε το Σχ. 5.82.



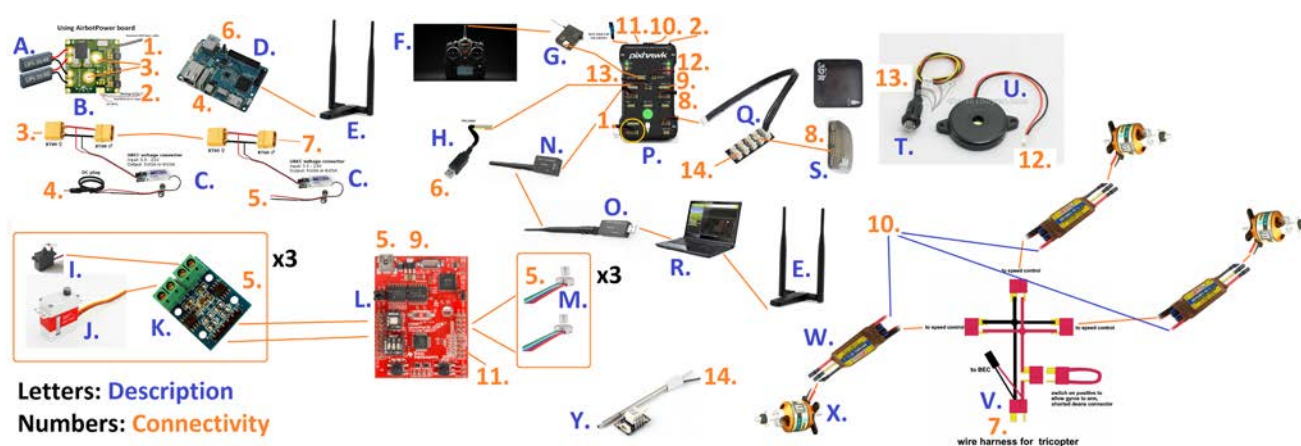
Σχήμα 5.82. Εντατική κατάσταση ερεισματος Γ2.

Παρατηρείται δηλαδή ένας συντελεστής ασφάλειας λίγο μεγαλύτερος του 2. Τέλος, σημειώνεται ότι η μάζα του κάθε τεμαχίου Γ2 είναι 0.79gr και οι ακριβείς διαστάσεις του υπάρχουν στο Παράρτημα Γ, στο Σχ. Γ.48.

Επιλογή ηλεκτρονικών Γ3

Η λεπτομερής επιλογή των ηλεκτρονικών, επιπρόσθετων αισθητήρων και η ακριβής συνδεσιμότητα αυτών δεν αποτελούν μέρος αυτής της εργασίας. Ωστόσο, ήταν ανάγκη να διασφαλισθεί ότι ο έλεγχος των σερβοκινητήρων μπορεί πράγματι να γίνει εξωτερικά μέσω της ανάδρασης των παλμογεννητριών και έτσι έπρεπε να υπάρχει μια βασική εικόνα-πλάνο για το ποια είναι τα ηλεκτρονικά που θα χρησιμοποιηθούν στο ρομπότ. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι σκοπός αυτής της εργασίας είναι ο πλήρης λεπτομερειακός σχεδιασμός ενός υλοποιήσιμου ρομπότ ήταν σημαντική μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρονικών τόσο για χωροταξικά θέματα του σκελετού της βάσης όσο και για την τελική μάζα του οχήματος. Έτσι, σε συνεργασία με τον Υ.Δ. Μ. Ράμπ προέκυψαν εν συντομία τα εξής.

Μια απλοποιημένη απεικόνιση όλων των ηλεκτρονικών (συμπεριλαμβανομένης της μπαταρίας των ESC και των επενεργητών) καθώς και της συνδεσιμότητάς τους φαίνεται στο Σχ. 5.83.



Σχήμα 5.83. Απλοποιημένη απεικόνιση και συνδεσιμότητα των ηλεκτρονικών Γ3 σε συνεργασία με τον Υ.Δ Μ.Ράμπ.

Οι νέες συνιστώσες οι οποίες συνιστούν το σύνολο των ηλεκτρονικών είναι:

- B. Airbot Power Board
- C. TURNIGY 3A UBEC w/ Noise Reduction
- D. Odroid XU4
- E. CSL 300Mbit USB WLAN Adapter with 2 high-performance antennas (dual band)
- F. Spektrum DX8
- G. Spektrum Satellite Receiver
- H. FTDI CABLE
- K. HG7881 (L9110) Dual Channel Motor Driver Module
- L. C2000 Piccolo F28027
- N. 433MHz (European) Telemetry Radio Set
- O. 433MHz (European) Telemetry Radio Set

- P. Pixhawk
- Q. I2C Splitter
- R. Laptop as a Ground station
- S. Pixhawk GPS
- T. Switch
- U. Buzzer
- V. Wire harness
- Y. Digital Airspeed Sensor

Στα παραπάνω προστίθεται η κάμερα:

Z. oCam: 5MP USB 3.0 Camera

η οποία απεικονίζεται στο Σχ. 5.84.



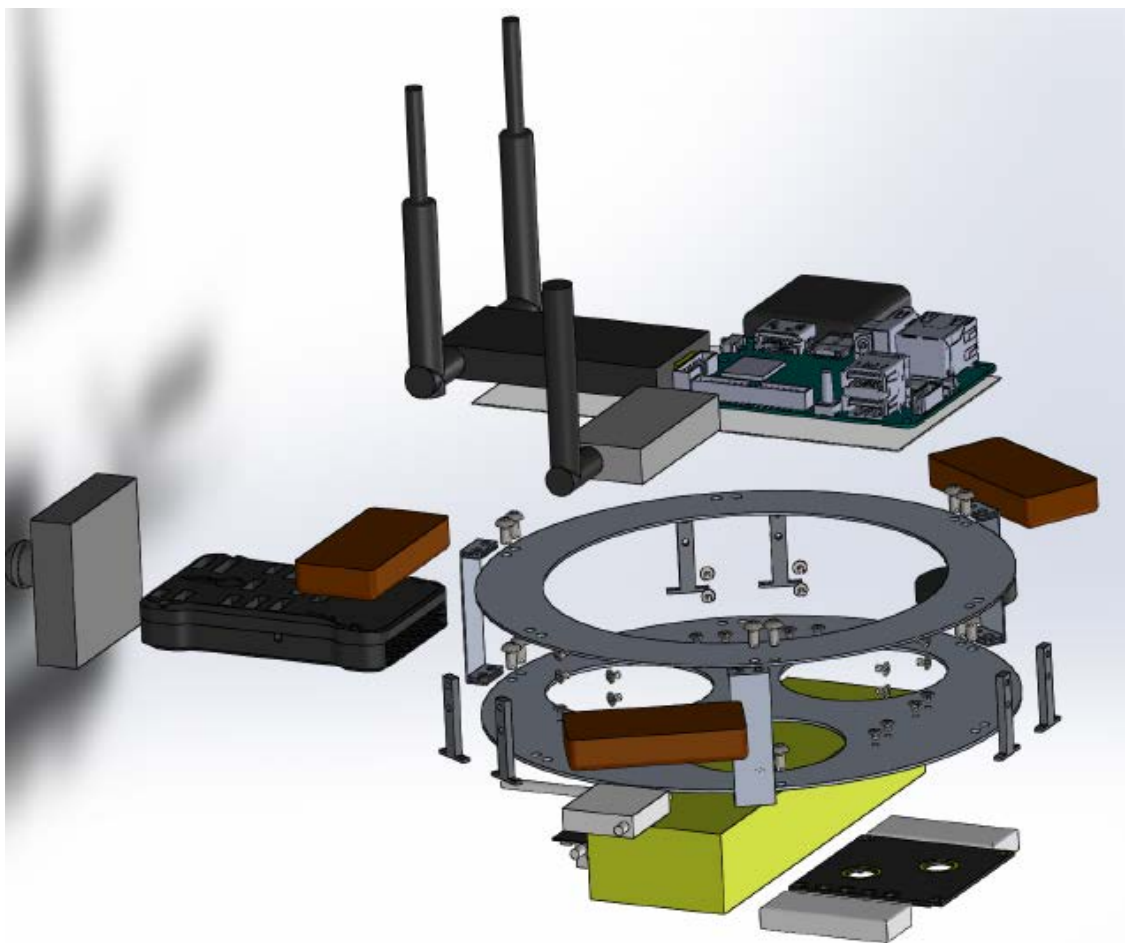
Σχήμα 5.84. oCam: 5MP USB 3.0 Camera.

Αφού έγινε ένας βασικός προσδιορισμός αυτών λοιπόν, βρέθηκαν οι ακριβείς διαστάσεις και η μάζα τους και προστέθηκαν στο σώμα της βάσης. Σε ο.τι αφορά την τοποθέτηση τους έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η συμμετρία της βάσης κατά το δυνατόν και να είναι κοντά σε πραγματικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα η κάμερα Z και ο αισθητήρας ανέμου Y να βρίσκονται στο μπροστά μέρος του ρομπότ, να αποφεύγονται παρεμβολές μεταξύ σημάτων των κεραιών κ.ο.κ.

Υπογραμμίζεται ότι η συνολική μάζα όλων αυτών προέκυψε $252.68gr$, μια αρκετά σημαντική μάζα. Άρα, ήταν εύλογο να ενσωματώσουμε στο σχεδιασμό μας και μία πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρονικών, αφού η μάζα που εισάγουν είναι σημαντική και έτσι μετά την ολοκλήρωση αυτού του σχεδιασμού θα είχαμε εσφαλμένη αντίληψη για τις πραγματικές δυνατότητες του ρομπότ χωρίς να συμπεριλάβουμε αυτήν.

Έτσι, πλέον το σώμα Γ έχει πάρει μία μερικώς τελική μορφή, αποτελούμενη από το σκελετό της βάσης, τα ερείσματα των σερβοκινητήρων και όλα τα ηλεκτρονικά-ηλεκτρικά μαζί φυσικά με την μπαταρία και τα ESC που έχουν επιλεγεί στο Κεφ. 4. Η μορφή αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 5.85. Στο σχήμα. αυτό υπάρχουν όλα τα παραπάνω εκτός των κομματιών Κ. τα οποία για χωροταξικούς λόγους τοποθετήθηκαν κάτω από το σύστημα έδρασης των ποδιών και φαίνονται στο τελικό Σώμα Γ (βλ. Σχ. 5.76). Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το σχήμα αυτό είναι στην ουσία ένα στάδιο πριν τη συναρμολόγηση της τελικής μερικής μορφής του Σώματος Γ.

Να σημειωθεί επίσης για την πληρότητα ότι η πλειοψηφία των τεμαχίων που συνιστούν τα ηλεκτρονικά προτείνεται να τοποθετηθεί με κολλητικές ταινίες διπλής όψης ή όπου χρειαστεί με πλαστικούς κοχλίες.



Σχήμα 5.85. Μερικώς τελική μορφή του Σώματος Γ πριν την τελική συναρμολόγηση.

Επισημαίνεται ότι το σύστημα του Σχ. 5.85 ως το κύριο σώμα του ρομπότ και άρα το βαρύτερο ζυγίζει 721.89 gr (συμπεριλαμβανομένων των κοχλιών και των περικοχλίων).

Πόδια προσγείωσης Γ4

Για τη στήριξη όλου του σώματος του ρομπότ κατά την ακινησία του και την ηρεμία του είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύστημα, το οποίο να κρατάει το ρομπότ σε συγκεκριμένη απόσταση από το έδαφος ώστε να προστατεύονται οι επιμέρους συνιστώσες του και φυσικά αντέχει το βάρος του. Έτσι, με κριτήριο πάντα την ελάχιστη μάζα επιλέγουμε το σύστημα αυτό να αποτελείται από τα τρία κομμάτια – πόδια προσγείωσης Γ4 που απεικονίζονται στο Σχ. 5.86.

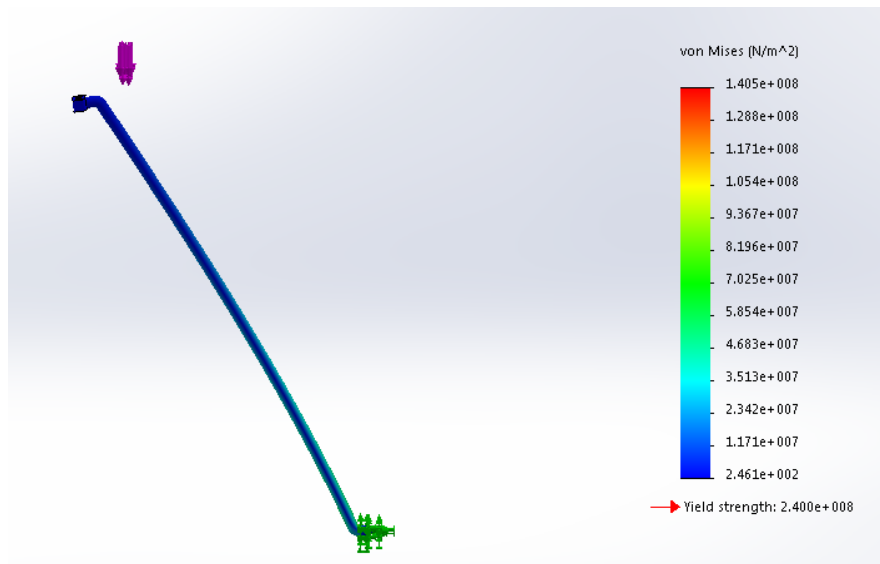
Με τον αριθμό 2 συμβολίζεται το κύριο σώμα του ποδιού προσγείωσης Γ4, το οποίο καλείται παραλάβει το ένα τρίτο του βάρους του συνολικού ρομπότ. Το υλικό του είναι ντουραλουμίνιο 2030. Με τον αριθμό 1 απεικονίζονται οι οπές από τις οποίες θα περάσουν

κοχλίες $M3$ για τη σύνδεση του κάθε ποδιού με το κάτω κυκλικό τμήμα του σκελετού της βάσης. Ένας κοίλος κύλινδρος από πλαστικό ABS ενώνεται με το κύριο σώμα 2 και ουσιαστικά μεσολαβεί για να πατάει με σιγουριά το πόδι στο έδαφος. Σημειώνεται ότι τα τρία αυτά πόδια προσγείωσης τοποθετούνται συμμετρικά και με τέτοιον τροπό ώστε οι οπές 1 να είναι ομόκεντρες με τις οπές 2 του Σχ. 5.77.



Σχήμα 5.86. Το ένα πόδι προσγείωσης Γ4 του ρομπότ (εκ των τριών).

Σε ό,τι αφορά τον έλεγχο της αντοχής αυτού του τεμαχίου, θεωρούμε ότι το συνολικό ρομπότ έχει την οριακή μάζα των $2.28kg$ (βλ. Σχ. 4.38) και έτσι το φορτίο του κάθε ποδιού προσγείωσης είναι το ένα τρίτο αυτής της βαρυτικής δύναμης. Αυτό, μοιράζεται στις οπές 1 του Σχ. 5.86. Η πάκτωση του λαμβάνεται στο κάτω τμήμα το οποίο έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Σύμφωνα με αυτά λοιπόν λαμβάνουμε την εξής εντατική κατάσταση:



Σχήμα 5.87. Φορτία, πάκτωση και ισοδύναμη τάση von Mises του κύριου σώματος του ποδιού προσγείωσης Γ4.

Φαίνεται επομένως ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι περίπου ίσος με 2.

Σημειώνεται ότι οι ακριβείς διαστάσεις του κύριου σώματος 2 και του 3 (βλ. Σχ. 5.86) υπάρχουν στο Παράρτημα Γ, στις Παρ. Γ.49 και Γ.50. Η μάζα του κάθε ποδιού προσγείωσης είναι $10.66gr$

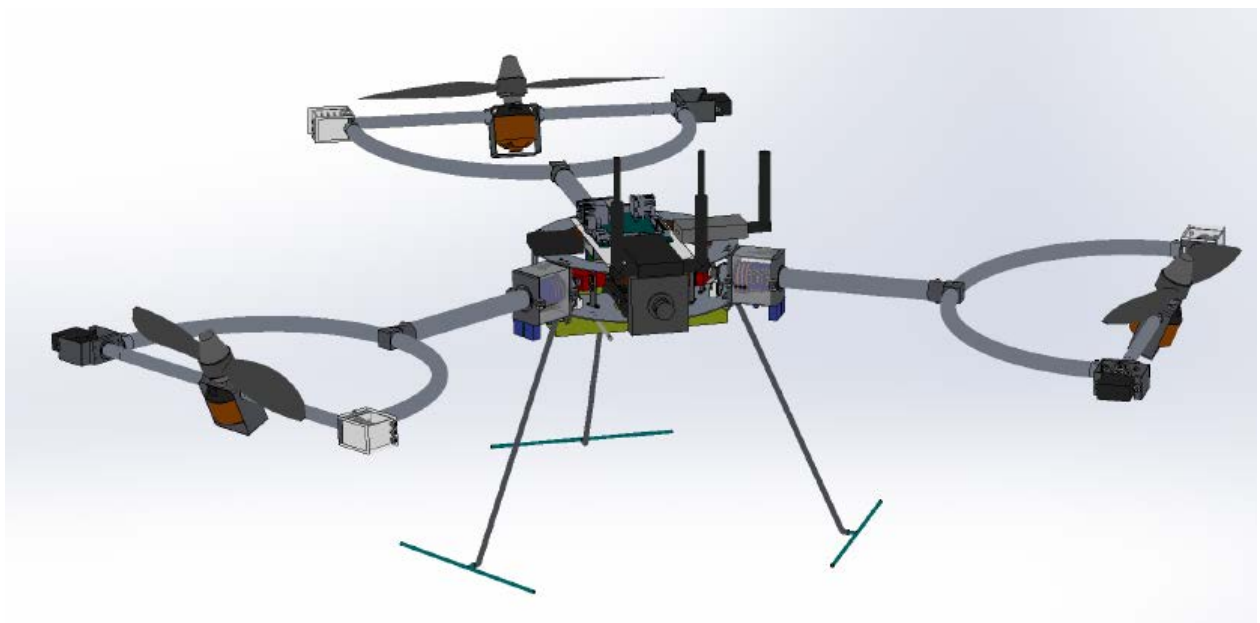
Συνεπώς πλέον έχουμε καθορίσει πλήρως το Σώμα Γ του οχήματος το οποίο υπενθυμίζεται ότι απεικονίζεται στην αρχή της παρουσίασης του στο Σχ. 5.76. Τέλος, αναφέρεται ότι η συνολική μάζα του Σώματος Γ είναι:

$$m_{\Gamma} = 753.88gr \quad (5-19)$$

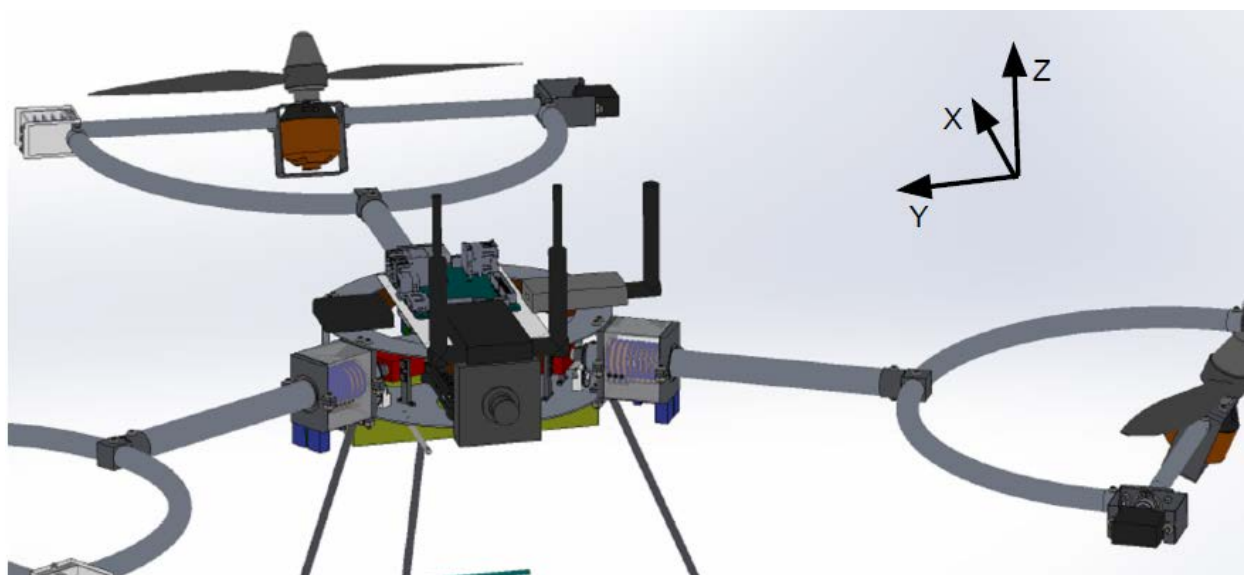
5.2.4 Τελικό όχημα και αναμενόμενες δυνατότητες του

Τελικό ρομπότ

Έχοντας πλέον προσδιορίσει πλήρως τα τρία σώματα Α, Β και το σώμα Γ (βλ. Σχ. 5.12) το όχημα έχει πάρει την τελική πραγματική του μορφή και απεικονίζεται στα Σχ. 5.88 και 5.89.



Σχήμα 5.88. Τελική πραγματική μορφή του ρομπότ.



Σχήμα 5.89 (Συνέχεια) Τελική πραγματική μορφή του ρομπότ.

Η συνολική μάζα του ρομπότ προκύπτει από την άθροιση των τριών σωμάτων A, B και του σώματος Γ μαζί με όλους τους επιπρόσθετους απαραίτητους κοχλίες και περικόχλια (τα οποία δε λήφθηκαν υπόψιν κατά τις Εξ. (5-8), (5-17), (5-19)) και είναι:

$$m_{robot} = 1774.36gr \quad (5-20)$$

Στη μάζα αυτή όμως είναι σημαντικό να συμπεριληφθεί και η μάζα των καλωδίων και συγκεκριμένα αυτών των καλωδίων που έχουν σημαντικό μήκος. Αυτά είναι τα καλώδια τα οποία έρχονται από τον ηλεκτροκινητήρα, την μία παλμογεννήτρια και το σερβοκινητήρα του κάθε Σώματος A προς τη βάση. Έτσι, με τη ζυγαριά ακριβείας του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου μετράμε καλώδια ίδιας διατομής με αυτής των ηλεκτροκινητήρων και των δεύτερων σερβοκινητήρων για συγκεκριμένα μήκη και εξάγουμε μια γραμμική πυκνότητα για αυτά.

Συγκεκριμένα, για ένα καλώδιο διαμέτρου $\Phi 2.5$ και μήκους $29cm$ η ζυγαριά δείχνει το εξής:



Σχήμα 5.90. Μέτρηση μάζας καλωδίου $\Phi 2.5$ και μήκους $29cm$.

Από το Σχ. 5.90 εξάγεται λοιπόν για τη γραμμική πυκνότητα του κάθε καλωδίου του ηλεκτροκινητήρα:

$$\rho_{mot}^{lin} = 0.128(gr / cm) \quad (5-21)$$

Για ένα καλώδιο $\Phi 0.9$ και μήκους $29cm$, αντίστοιχο αυτού των σερβοκινητήρων και των encoders έχουμε το Σχ. 5.91.

Έτσι λοιπόν, η γραμμική πυκνότητα του κάθε καλωδίου του δεύτερου σερβοκινητήρα και της παλμογεννήτριας είναι:

$$\rho_{servo2}^{lin} = 0.0207(gr / cm) \quad (5-22)$$

Συνεπώς, από την απαιτούμενη διαδρομή που έχουν να καλύψουν αυτά τα καλώδια (βλ. Σχ. 5.88 και 5.89) και τις σχετικές διαστάσεις του Παραρτήματος Γ, προκύπτει ότι η συνολική πρόσθετη μάζα λόγω των καλωδίων είναι:

$$m_{wires} = 80gr \quad (5-23)$$

Αρα από τις Εξ. (5-20) και (5-23) συμπεραίνουμε ότι η συνολική τελική μάζα που αναμένεται να έχει το ρομπότ είναι:

$$m_{robot\&wires} = 1854.36 \text{ gr} \quad (5-24)$$

Σημειώνεται ακόμη ότι η συνολική μήτρα αδράνειας του ρομπότ όπως προκύπτει από τον πλήρη σχεδιασμό του στο Solidworks και αντιστοιχεί στα Σχ. 5.88 και 5.89 είναι:

$$J_{real} = \begin{bmatrix} 0.066061 & 0.0000229 & 0.0000082 \\ 0.0000229 & 0.066072 & -0.0000719 \\ 0.0000082 & -0.0000719 & 0.1299 \end{bmatrix} \text{ kg m}^2 \quad (5-25)$$

και οι άξονες στους οποίους αντιστοιχεί φαίνονται στο Σχ. 5.89.



Σχήμα 5.91. Μέτρηση μάζας καλωδίου $\Phi 0.9$ και μήκους 29cm .

Τελικές αναμενόμενες δυνατότητες

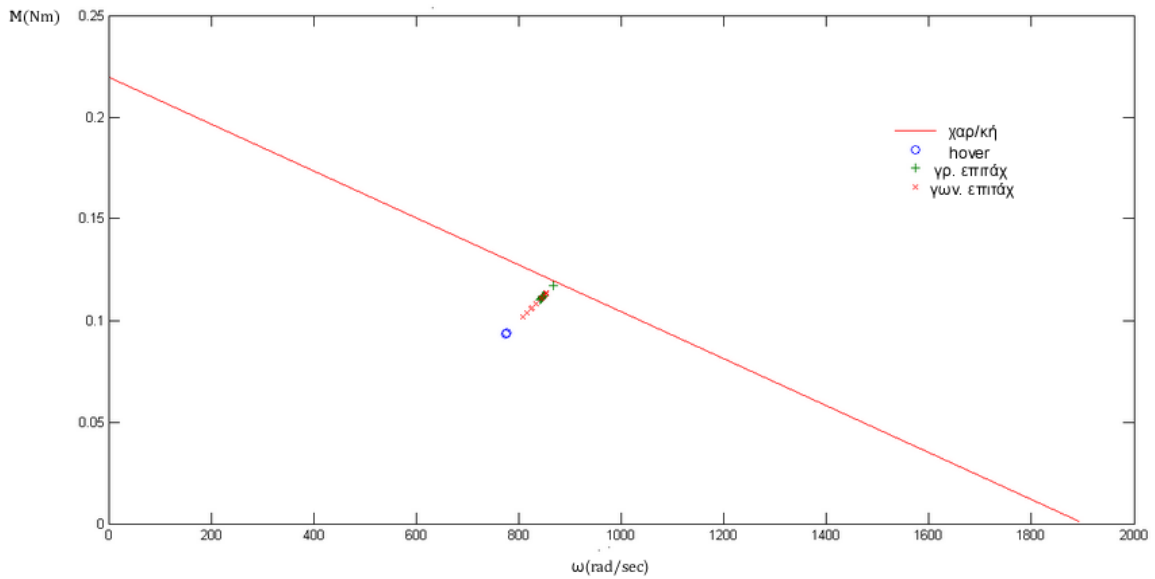
Η συμπεριφορά του ρομπότ σύμφωνα με τα προαναφερθέντα στο Κεφ. 4 αντιστοιχεί στο Σχ. 4.36 και στον Πιν. 4-15. Για την πληρότητα όμως, επειδή η τελική μάζα του ρομπότ (βλ. Εξ. 5-24) είναι ελαφρώς μικρότερη αυτής του Σχ. 4.36 αλλά και επειδή λόγω του λεπτομερειακού σχεδιασμού έχει αλλάξει σε έναν μικρό βαθμό η μήτρα αδράνειας του ρομπότ παρατίθεται αντίστοιχο διάγραμμα του Σχ. 4.36 για τις τελικές και πραγματικές παραμέτρους. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα αυτό προέκυψε για δυνατότητες του ρομπότ σε διάφορους προσανατολισμούς της βάσης, ίδιες με του Σχ. 4.36 (βλ. Πιν. 4-15), δηλαδή:

$$a_x = a_y = 0.75 \text{ g} \quad (5-26)$$

$$a_z = 0.5 \text{ g} / l_{eq} \quad (5-27)$$

$$\dot{\omega}_x = \dot{\omega}_y = \dot{\omega}_z = 0.75 \text{ g} / l_{eq} \quad (5-28)$$

οι οποίες είναι και οι τελικές αναμενόμενες δυνατότητες του ρομπότ.



Σχήμα 5.92. Επάρκεια των ηλεκτροκινητήρων για το τελικό πραγματικό όχημα και τις δυνατότητες του.

Σε ό,τι αφορά τον τελικό έλεγχο της επάρκειας των σερβοκινητήρων, αυτός θα γίνει με έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο από αυτόν του Κεφ. 4. Συγκεκριμένα, επειδή όπως έχει προαναφερθεί παράλληλα με το σχεδιασμό του συγκεκριμένου ρομπότ έχει αναπτυχθεί ένα πολυσωματικό μοντέλο από τον Υ.Δ Μ.Ράμπ, το οποίο το περιγράφει πιο ρεαλιστικά και λεπτομερώς από το [1], οι απαιτήσεις των σερβοκινητήρων θα εξαχθούν από εκεί.

Συγκεκριμένα, δίνοντας όλες τις απαραίτητες αδράνειες και διανύσματα των επιμέρους σωμάτων που αποτελούν το τελικό ρομπότ (βλ. Σχ. 5.88 και 5.89), το μοντέλο αυτό βγάζει επακριβώς τις αποκρίσεις των ροπών και των ταχυτήτων για τον κάθε σερβοκινητήρα του συστήματος. Από αυτές, επιλέγεται η μέγιστη τιμή των γωνιακών ταχυτήτων και ροπών που προκύπτουν και το ζεύγος αυτό χαράσσεται σε διάγραμμα ροπών και γωνιακής ταχύτητας κατά τα γνωστά μαζί με τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του κάθε σερβοκινητήρα.

Έτσι, για μια ρεαλιστική τροχιά που απαιτεί το ρομπότ να μεταβεί από το σημείο (0,0,0) του χώρου στο (1,1,1) και παράλληλα να περιστραφεί γύρω από τον άξονα Y κατά 90° σε χρόνο 2s, προκύπτουν οι εξής μέγιστες τιμές για τον κάθε σερβοκινητήρα:

$$u_{servo1}^{φορτίο} = 0.22Nm \quad (5-29)$$

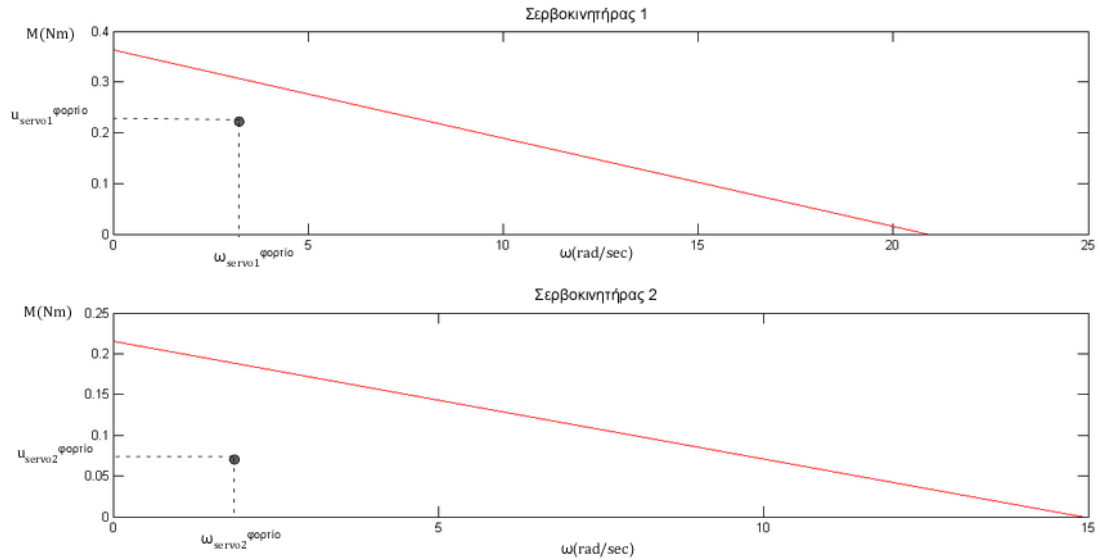
$$\omega_{servo1}^{φορτίο} = 3.25rad / sec \quad (5-30)$$

και:

$$u_{servo2}^{φορτίο} = 0.07Nm \quad (5-31)$$

$$\omega_{servo1}^{φορτίο} = 1.85rad / sec \quad (5-32)$$

Τα φορτία αυτά λοιπόν μαζί με τις χαρακτηριστικές των δύο σερβοκινητήρων μας απεικονίζονται στο Σχ. 5.93.



Σχήμα 5.93. Επάρκεια των σερβοκινητήρων για το τελικό πραγματικό όχημα για μια ρεαλιστική τροχιά του ρομπότ.

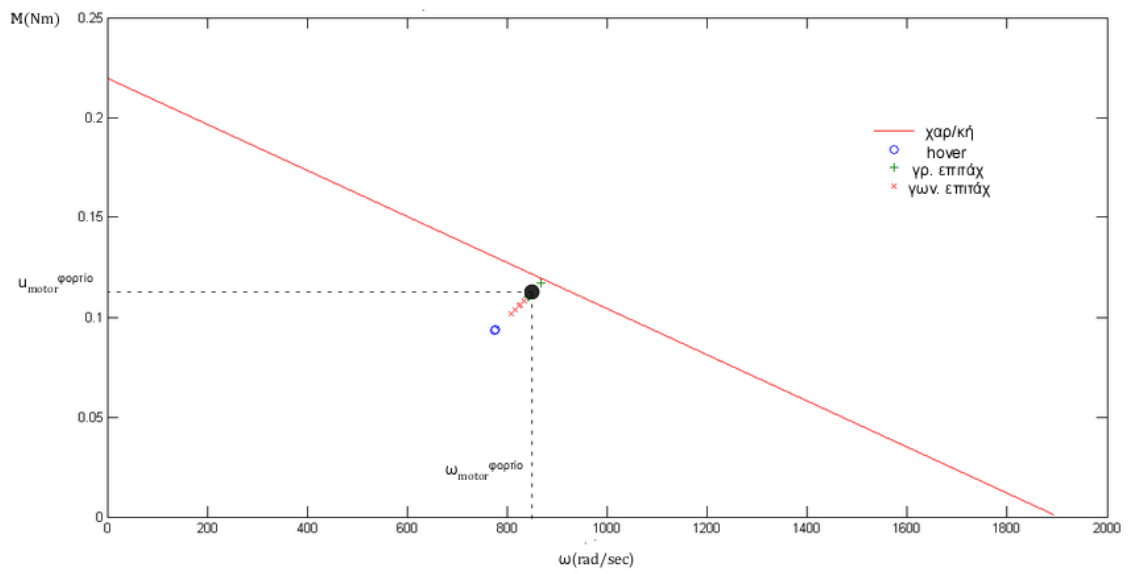
Τέλος, από τα αποτελέσματα του πολυσωματικού αυτού μοντέλου για τη συγκεκριμένη τροχιά, λαμβάνουμε και το μέγιστο φορτίο των ηλεκτροκινητήρων, το οποίο απεικονίζεται στο Σχ. 5.94 μαζί με την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων καθώς και τα σημεία τα οποία αντιστοιχούν στις δυνατότητες του ρομπότ (βλ. Εξ. (5-26)-(5-28)). Το φορτίο αυτό είναι:

$$u_{motor}^{\text{φορτίο}} = 0.12Nm \quad (5-33)$$

$$\omega_{motor}^{\text{φορτίο}} = 860rad / sec \quad (5-34)$$

Σημειώνεται ακόμη ότι το Σχ. 5.94 έχει ως κύριο σκοπό να πιστοποιήσει ότι το τελικό ρομπότ των Σχ. 5.88 και 5.89 μπορεί πράγματι να ακολουθήσει ικανοποιητικά ρεαλιστικές τροχιές σαν αυτή που δόθηκε στο πολυσωματικό δυναμικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, μέσω αυτού οπτικοποιείται καλύτερα στον αναγνώστη το πώς αυτές οι δυνατότητες του ρομπότ εκφρασμένες σε γραμμικές και γωνιακές επιταχύνσεις συνδέονται με τις απαιτήσεις που προκύπτουν για μια πραγματική τροχιά.

Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι οι απαιτήσεις αυτής της τροχιάς συμπίπτουν με τις δυνατότητες του ρομπότ που έχουν προβλεφθεί. Ίσως, λόγω του ότι το φορτίο είναι λίγο χαμηλότερα της χαρακτηριστικής του ηλεκτροκινητήρα, η τροχιά αυτή να μπορούσε να γίνει λίγο πιο απαιτητική. Όπως για παράδειγμα ο χρόνος εκτέλεσής της να ήταν λιγότερος από 2s ή στον ίδιο χρόνο η γωνία περιστροφής να είναι μεγαλύτερη από 90°. Ωστόσο, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι οι τελικές μέγιστες δυνατότητες του πραγματικού ρομπότ θα κυμαίνονται πάνω κάτω γύρω από τέτοιου είδους τροχιές.



Σχήμα 5.94. Απαιτήσεις ρεαλιστικής τροχιάς σε σχέση με τα προαναφερθέντα για τις δυνατότητες του ρομπότ.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή στην ουσία πραγματεύεται το σχεδιασμό ενός ιπτάμενου ολόνομου οχήματος με συστηματικό και μεθοδικό τρόπο σε αντίθεση με την πλειοψηφία τέτοιου είδους οχημάτων, η οποία ακολουθεί υποτυπώδεις διαδικασίες σχεδιασμού, δίνοντας την έμφαση στον έλεγχο.

Το πρώτο στάδιο αφορά τον προσδιορισμό του βέλτιστου μηχανισμού ο οποίος κατευθύνει τις ελικές παντού μέσα σε ένα μοναδιαίο τρισδιάστατο χώρο. Η ποιοτική σύγκριση ποικίλων μηχανισμών ως προς συγκεκριμένα κριτήρια μας υπέδειξε τη βασική μορφή ενός οχήματος, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι ομοιάζει αρκετά με αυτή του ολόνομου quadrotor του [7].

Στο δεύτερο στάδιο της εργασίας αυτής γίνεται μια προκαταρκτική βελτιστοποίηση των θεμελιωδών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ρομπότ με τα κριτήρια να είναι καθαρά κινηματικά.

Το πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε απαιτεί το κέντρο μάζας των ΙΣΗΕ, να ανήκει στο ουδέτερο επίπεδο-επίπεδο της βάσης. Αυτό ήταν κάτι το οποίο μπορούσε να γίνει αντιληπτό και διαισθητικά. Ωστόσο, δεδομένου ότι συγκεκριμένο ρομπότ είναι ένα καινοτόμο και αρκετά διαφορετικό σύστημα, αποφασίσθηκε να διερευνηθεί ενδελεχώς αυτό που μας έλεγε η διαίσθηση μας. Επιπρόσθετα, λόγω του ότι πρόκειται για ένα εντελώς νέο σύστημα με αρκετή πολυπλοκότητα λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας του, τέτοιου είδους αναλύσεις βοήθησαν αρκετά στην βαθιά κατανόηση της λειτουργίας και της κινηματικής συμπεριφοράς του.

Μέσω ενός πιο μαθηματικοποιημένου κριτηρίου, αυτό του δείκτη κατάστασης ενός μητρώου, το οποίο περιλαμβάνει τα θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού του ρομπότ, πηγάζουν τα εξής συμπεράσματα. Το μήκος του ποδιού ή καλύτερα η απόσταση της βάσης από το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης πρέπει να είναι σημαντική και χωρίς κλίση ως προς το ουδέτερο επίπεδο. Επίσης, η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης ώσης από την άκρη του ποδιού πρέπει να είναι μηδενική. Αυτό σε συνδυασμό με το συμπέρασμα για το κέντρο μάζας σημαίνει ότι εκτός των άλλων, το κέντρο μάζας και το σημείο εφαρμογής της δύναμης ώσης πρέπει να ταυτίζονται. Και αυτά τα συμπεράσματα λοιπόν έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τη διαίσθηση μας. Αυτό που υπογραμμίζεται ακόμη είναι ότι αυτά τα συμπεράσματα ταιριάζουν απόλυτα με το σχεδιασμό των διαφορετικών ως προς τη λειτουργία συμβατικών ιπτάμενων οχημάτων.

Το τρίτο και κύριο μέρος της εργασίας πραγματεύεται τον προσδιορισμό όλων των συνιστωσών από τις οποίες αποτελείται το ρομπότ.

Τόσο οι πλήρεις δυναμικές εξισώσεις του [1] όσο και οι αναλυτικές σχέσεις του [15] για όλες τις συνιστώσες που μας ενδιαφέρουν μας έδωσαν τη δυνατότητα να καταστρώσουμε μια πλήρως αναλυτική διαδικασία η οποία προσδιορίζει με βέλτιστο τρόπο όλα τα μεγέθη του ρομπότ όπως τους ηλεκτροκινητήρες, τα ESC, την μπαταρία, τις έλικες και όλα τα

γεωμετρικά μεγέθη. Έτσι, για μία πρόσθετη μάζα-payload 300gr και έναν χρόνο πτήσης 10min ευρίσκεται εκείνος ο συνδυασμός των συνιστωσών ο οποίος επιτρέπει στο όχημα να αιωρείται με άνεση καθώς και να παίρνει οιονδήποτε προσανατολισμό και θέση στο χώρο. Στη συνέχεια αυτές οι αναλυτικές συνιστώσες αντιστοιχίζονται με πραγματικές, και έτσι το όχημα πλέον έχει πάρει μια πιο ρεαλιστική μορφή, ελαφρώς διαφορετική από αυτή της αναλυτικής και με τον τελικό χρόνο πτήσης να είναι πλέον 8.5min αφού στην επιλογή της μπαταρίας είχε κεντρικό ρόλο η μάζα της.

Ένα ενδιαφέρον σημείο που παρατηρήθηκε από τη μετάβαση των αναλυτικών συνιστωσών στις πραγματικές αφορά το λόγο p/Dp της έλικας. Όπως φάνηκε, ο λόγος αυτός παίζει τεράστιο ρόλο στη συμπεριφορά και στις τελικές δυνατότητες του οχήματος. Έτσι, σε αντίστοιχες ιπτάμενες εφαρμογές και σχεδιασμούς θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη σωστή επιλογή της έλικας.

Στη συνέχεια, αφού πιστοποιήθηκε ότι το πιο ρεαλιστικό πλέον όχημα έχει ικανοποιητικές δυνατότητες της, προχωρήσαμε στο λεπτομερή σχεδιασμό ώστε να καταλήξουμε σε ένα υλοποιήσιμο και κατασκευάσιμο ρομπότ. Παράλληλα με το λεπτομερή σχεδιασμό έγινε και ένας βασικός έλεγχος αντοχής για τις δυσμενέστερες δυνατές στατικές φορτίσεις που μπορούν να εμφανισθούν στο ρομπότ ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μάζα κατά το δυνατόν.

Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση κατά το λεπτομερή σχεδιασμό του ρομπότ, αφορά τους δακτύλιους ολίσθησης (slip rings). Φάνηκε ότι για μικρορομποτικές εφαρμογές και γενικότερα για εφαρμογές όπου ο χώρος και η μάζα είναι κεντρικά ζητήματα, οι εμπορικοί δακτύλιοι ολίσθησης δεν μπορούν να αποτελέσουν λύση λόγω της ασύμφορης μάζας τους και του όγκου τους. Έτσι, σε μικροεφαρμογές οι οποίες απαιτούν τη χρήση slip rings, ο σχεδιασμός αυτών από την αρχή είναι αναπόφευκτος.

Ακόμη, τα δομικά στοιχεία όλου του ρομπότ σχεδιάστηκαν να είναι από κράματα αλουμινίου-duraluminium και συγκεκριμένα τα 2024-T3 και 2030 της σειράς 2. Η επιλογή αυτού του υλικού είναι ιδανική για τέτοιου είδους εφαρμογές αφού φάνηκε ότι η υψηλή αντοχή τους επιτρέπει πολύ μικρά πάχη διατομών και άρα πολύ χαμηλό βάρος. Αυτό συμπληρώνουν η υψηλή αντίσταση τους σε παραμορφώσεις, η κατεργασιμότητα, η μεγάλη διαθεσιμότητα σε ποικίλες διατομές και σχήματα και η χαμηλή τους τιμή.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι σε ένα τέτοιο όχημα πολύ σημαντικό ρόλο στο βάρος παίζουν όλα τα ηλεκτρονικά/ηλεκτρικά και αισθητήρες, αφού φάνηκε σε μια πρώτη εκτίμηση να προσθέτουν συνολικά μεγαλύτερη μάζα από ότι η μπαταρία.

Τέλος, η εργασία αυτή κλείνει με την τελική πραγματική μορφή του ρομπότ συμπεριλαμβανομένων και των παραμικρών κοχλιών και περικοχλίων καθώς και της μάζας των καλωδίων μεγάλων μηκών. Την τελική αυτή πραγματική μορφή συμπληρώνουν τα διαγράμματα επάρκειας των ηλεκτροκινητήρων συσχετισμένα μάλιστα με ένα ρεαλιστικό ελιγμό ώστε να οπτικοποιηθούν οι τελικές πραγματικές δυνατότητες αυτού του ρομπότ.

6.2 Μελλοντική εργασία

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι το τέλος αυτής της εργασίας ακολουθεί η κατασκευή του οχήματος αυτού και η διεξαγωγή πειραμάτων. Έτσι, αν τα αποτελέσματα και τα

συμπεράσματα είναι ικανοποιητικά θα μπορούσαν να γίνουν τα εξής σε έναν μελλοντικό σχεδιασμό αυτού του οχήματος.

Όπως φάνηκε οι τελικές δυνατότητες του συγκεκριμένου ρομπότ διασφαλίζουν μια ομαλή και ικανοποιητική συμπεριφορά αυτού με επιταχύνσεις της τάξης $0.5g - 1g$. Μετά και το λεπτομερή σχεδιασμό υπάρχει πλήρης γνώση για το κάθετι που μπορεί να προκύψει οπότε η αναλυτική διαδικασία που ακολουθήθηκε μπορεί πολύ εύκολα να τροποποιηθεί και να οδηγήσει στο σχεδιασμό ενός triotor με πολύ πιο επιθετική συμπεριφορά με τις δυνατότητες του να ξεπερνούν τα $2g$.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τις εξής δύο αλλαγές. Αρχικά, όπως φάνηκε η μάζα που εισάγουν τα ηλεκτρονικά είναι σημαντική και έτσι προτείνεται είτε ένα ποσοστό αυτής να ανήκει στη μάζα της βάσης ενώ το ωφέλιμο φορτίο παραμένει σταθερό και ίσο με $300gr$ είτε το ωφέλιμο φορτίο να είναι μεγαλύτερο των $300gr$. Η δεύτερη αλλαγή που προτείνεται είναι ακριβώς στην ίδια φιλοσοφία και αφορά τώρα τις επιπρόσθετες μάζες που μπορούν να προκύψουν είτε από απαραίτητα στοιχεία μηχανών είτε από καλώδια κλπ. Απαιτείται λοιπόν μια πρόβλεψη εκ των προτέρων αυτών των επιπρόσθετων μαζών (όπως έγινε για παράδειγμα με τις μάζες των $10gr$ στα άκρα της στεφάνης στο Κεφ. 4) ώστε το τελικό βέλτιστο διάνυσμα σχεδιασμού να υπολογίζεται στην ουσία πλέον προς χάριν των μεγάλων επιταχύνσεων και όχι ως προς τη τελική μάζα που ενδέχεται να προκύψει.

Ακόμη, ακολουθώντας επ'ακριβώς τη φιλοσοφία του Κεφ. 4 μπορεί κάποιος να ενσωματώσει όλη τη διαδικασία που περιγράφεται εκεί, όμως όχι στις απλοποιημένες δυναμικές εξισώσεις του [1] πλέον αλλά στο σύστημα κλειστού ελέγχου το οποίο περιγράφει αυτό. Έτσι, θα υπάρχει ένας πιο λεπτομερής βρόχος βελτιστοποίησης ο οποίος θα λαμβάνει υπόψιν άμεσα τις γυροσκοπικές ροπές όλων των σωμάτων που εμφανίζονται αλλά και θα προσομοιώνει πραγματικά φαινόμενα όπως διαταραχές. Επιπρόσθετα, το βέλτιστο διάνυσμα σχεδιασμού πλέον θα είναι δυνατόν να προκύπτει για ολόκληρες τροχιές και μανούβρες, έχοντας πλέον έτσι τη δυνατότητα ο σχεδιασμός να γίνει και για πιο εκλεπτυσμένα σενάρια και κριτήρια όπως η ελαχιστοποίηση της ενέργειας του οχήματος για κάποια συγκεκριμένη τροχιά για παράδειγμα.

Βιβλιογραφία

1. Ramp, M. and Papadopoulos, E., "On Modeling and Control of a Holonomic Vectoring Tricopter," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '15)*, Hamburg, Germany, September 28 - October 02, 2015
2. Kendoul, Farid. "Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems." *Journal of Field Robotics* 29.2 (2012): 315-378.
3. Kumar, V., *Robotics: Aerial Robotics*, University of Pennsylvania on Coursera, 2016.
4. Hugo, Romero, et al. "Modelling and real-time control stabilization of a new VTOL aircraft with eight rotors." *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2007.
5. Crowther, Bill, et al. "Kinematic analysis and control design for a nonplanar multirotor vehicle." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34.4 (2011): 1157-1171.
6. Ryll, Markus, Heinrich H. Bühlhoff, and Paolo Robuffo Giordano. "First flight tests for a quadrotor UAV with tilting propellers." *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013.
7. Fernandes, N., *Design and construction of a multi-rotor with various degrees of freedom*. 2011, MS Thesis, Technical Univ. of Lisboa.
8. Παπαδόπουλος, Ε., Κυριακόπουλος, Κ., *Σημειώσεις Ρομποτικής*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2004.
9. Vlachos, Kostas, Evangelos Papadopoulos, and Dionissios N. Mitropoulos. "Design and implementation of a haptic device for training in urological operations." *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19.5 (2003): 801-809.
10. DJI, <http://www.dji.com>.
11. Tayebi, A., and S. McGilvray. "Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot." *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on*. Vol. 2. Ieee, 2004.
12. Vlachos, Kostas, and Evangelos Papadopoulos. "Control design and allocation of an over-actuated triangular floating platform." *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010.
13. Leishman, G.J., *Principles of helicopter aerodynamics*. 2006: Cambridge university press.
14. Theys, Bart, et al. "Influence of propeller configuration on propulsion system efficiency of multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles." *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016.

15. Ampatis, Christos, and Evangelos Papadopoulos. "Parametric design and optimization of multi-rotor aerial vehicles." *Applications of Mathematics and Informatics in Science and Engineering*. Springer International Publishing, 2014. 1-25.
16. Phang, Swee King, et al. "Systematic Design Methodology and Construction of Micro Aerial Quadrotor Vehicles." *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Netherlands, 2015. 181-206.
17. Παπαδόπουλος, Γ., Α., Βαδαλούκα, Β., Γ., *ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ*. Αθήνα 2010.
18. AXI motors, <http://www.modelmotors.cz/>.
19. SCORPION motors, <http://www.scorpionsystem.com/>.
20. HACKER MOTORS, <http://www.hacker-moto-shop.com/>.
21. T-MOTOR motors, <http://rctigermotor.com>.
22. Παπαδόπουλος, Ε., *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*. Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα 2010.
23. JETI Electronic Speed Controllers, <http://www.jetimodel.com>.
24. Kokam batteries, <http://kokam.com/>.
25. APC propellers, <http://www.apcprop.com/>.
26. Aggressive Maneuvers for Autonomous Quadrotor Flight, <http://www.youtube.com/watch?v=MvRTALJp8DM>.
27. EVO H806 vs MJX X600 - Hexacopters, http://www.youtube.com/watch?v=gE_3V2Rxx60.
28. KST servos, <http://www.kstsz.com/>.
29. Gening Servos, <http://www.geningrc.com/>.
30. YELLOW RC, <http://www.yellowrc.com/batteries/>.
31. AVAGO encoders, www.avagotech.com.
32. RLS encoders, <http://www.rls.si>.
33. Colleen, T., D., Michelle, T., Orlosky, S., *Industrial Encoders for DUMMIES 2nd Edition*. BEI SENSORS.
34. MOFLON slip rings, <http://www.moflon.com/>.
35. KEYO slip rings, www.keyocn.com.
36. MISUMI, www.misumi-europe.com.
37. ENGINEERS EDGE, <http://www.engineersedge.com/>.

Παράρτημα Α

Σε αυτό το Παράρτημα δίνονται οι σχέσεις ορισμού των μητρών περιστροφής γύρω από κύριους άξονες και του αντισυμμετρικού πίνακα ως ισοδύναμου με το εξωτερικό γινόμενο.

A.1 Κύριες μήτρες περιστροφής

Από το [8] λαμβάνουμε ότι οι κύριες μήτρες περιστροφής για κάποια τυχαία γωνία θ για σύστημα αξόνων (x, y, z) είναι:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{A-1})$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{A-2})$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A-3})$$

A.2 Αντισυμμετρικός πίνακας

Από το [8] έχουμε ότι για δύο τυχαία διανύσματα $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ και $\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ b_3]^T$, το εξωτερικό γινόμενο $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ μπορεί να γραφτεί ως $\mathbf{S}(\mathbf{a})\mathbf{b}$ όπου:

$$\mathbf{S}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-4})$$

Παράρτημα Β

Εδώ παρουσιάζονται ορισμένο μακροσκελείς όροι των Εξ.(4-13)–(4-20) καθώς και ο τρόπος υπολογισμού της μήτρας αδράνειας της Εξ. (4-39).

Β.1 Παρουσίαση των όρων \mathbf{N}_i , $\boldsymbol{\beta}_i$, $\boldsymbol{\theta}_i$, $\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i$, $\boldsymbol{\Phi}_i$ και \mathbf{B}_i που εμφανίζονται στις Εξ. (4.13) - (4.20)

Το μητρώο \mathbf{N}_i το οποίο εμφανίζεται στην Εξ. (4.13) έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{N}_i = m_p ({}^b \mathbf{p}_i^T ({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p}) \mathbf{I} - ({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p}) {}^b \mathbf{p}_i^T) \quad (\text{B-1})$$

Επίσης:

$$\boldsymbol{\beta}_i = \begin{bmatrix} -{}^b p_i(3)r_{22}d + {}^b p_i(2)r_{32}d & -{}^b p_i(2)r_{31}d + {}^b p_i(3)r_{21}d & 0 \\ -{}^b p_i(1)r_{32}d + {}^b p_i(3)r_{12}d & -{}^b p_i(3)r_{11}d + {}^b p_i(1)r_{31}d & 0 \\ -{}^b p_i(2)r_{12}d + {}^b p_i(1)r_{22}d & -{}^b p_i(1)r_{21}d + {}^b p_i(2)r_{11}d & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B-2})$$

$$\boldsymbol{\theta}_i = -({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p})(\mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p}) + (\mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p})^T ({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p}) \mathbf{I} \quad (\text{B-3})$$

$$\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i = \begin{bmatrix} r_{33}d^2r_{22} - r_{23}d^2r_{32} & r_{23}d^2r_{31} - r_{33}d^2r_{21} & 0 \\ r_{13}d^2r_{32} - r_{33}d^2r_{12} & r_{33}d^2r_{11} - r_{13}d^2r_{31} & 0 \\ r_{23}d^2r_{12} - r_{13}d^2r_{22} & r_{13}d^2r_{21} - r_{23}d^2r_{11} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B-4})$$

Τέλος, στην Εξ. (4.15) εμφανίζονται οι όροι $\boldsymbol{\Phi}_i$, \mathbf{B}_i και είναι:

$$\boldsymbol{\Phi}_i = 2 {}^b \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{Q}_i ({}^m \boldsymbol{\omega}_1 \times {}^m \mathbf{p})) + \mathbf{Q}_i ({}^m \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^m \boldsymbol{\omega}_i \times {}^m \mathbf{p})) + {}^b \boldsymbol{\omega} \times ({}^b \boldsymbol{\omega} \times ({}^b \mathbf{p}_i + \mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p})) \quad (\text{B-5})$$

$$\mathbf{B}_i = {}^m \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_p {}^m \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{Q}_i^T {}^b \mathbf{M}_{p,i} - \mathbf{Q}_i^T \mathbf{S}(-\mathbf{Q}_i {}^m \mathbf{p})(-{}^b \mathbf{F}_{p,i} - \mathbf{Q}_i^T \mathbf{g}_p) \quad (\text{B-6})$$

Σημειώνεται ότι τα στοιχεία $r_{i,j}$ (όπου $i = 1, 2, 3$ και $j = 1, 2, 3$) είναι τα στοιχεία των μητρών περιστροφής \mathbf{Q}_i :

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{B-7})$$

Β.2 Υπολογισμός των όρων I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} του μητρώου αδράνειας της βάσης

Οι στεφάνες θεωρούνται ότι βρίσκονται στην κατάκορυφη θέση, δηλαδή παράλληλες στον άξονα Z (βλ. Σχ. 4.7). Για τον κάθε άξονα X , Y , Z υπολογίζονται οι ροπές αδράνειας που οφείλονται στα συστήματα 1, 2, 3 (βλ. Σχ. 4.7) καθώς και στη βάση.

- Οι ροπές αδράνειας κατά τον άξονα X είναι:
- από το σύστημα 1:

$$I_{XX1} = I_{XX1,geom} + I_{XX1,masses} \quad (B-8)$$

όπου $I_{XX1,geom}$ η συνεισφορά στο σύστημα 1 από τα γεωμετρικά στοιχεία (πόδι, στεφάνη και άξονας):

$$I_{XX1,geom} = \frac{m_L L^2}{3} + I_{XX,hoop} + m_h (L + a - d_{cm})^2 + m_s \left(\frac{a^2}{3} + (L + a)^2 \right) \quad (B-9)$$

και $I_{XX1,masses}$ η συνεισφορά από τις συγκεντρωμένες μάζες:

$$I_{XX1,masses} = (m_w + m_{s2})((L + a)^2 + a^2) + (m_{mot} + m_{prop})(L + a)^2 \quad (B-10)$$

- από το σύστημα 2:

$$I_{XX2} = I_{XX2,geom} + I_{XX2,masses} \quad (B-11)$$

όπου:

$$I_{XX2,geom} = m_L \cos^2 60^\circ \frac{L^2}{3} + I_{XX,hoop} + m_h (L + a - d_{cm})^2 \cos^2 60^\circ + m_s \left(\frac{a^2}{3} + (L + a)^2 \cos^2 60^\circ \right) \quad (B-12)$$

και:

$$I_{XX2,masses} = (m_{s2} + m_w)((L + a) \cos 60^\circ)^2 + a^2 + (m_{mot} + m_{prop})((L + a) \cos 60^\circ)^2 \quad (B-13)$$

- από το σύστημα 3:

$$I_{XX3} = I_{XX2} \quad (B-14)$$

- από τη βάση:

$$I_{XXb} = m_b \frac{R_\delta^2}{4} \quad (B-15)$$

- Οι ροπές αδράνειας κατά τον άξονα Y είναι:
- από το σύστημα 1:

$$I_{YY1} = I_{YY1,geom} + I_{YY1,masses} \quad (B-16)$$

όπου:

$$I_{YY1,geom} = m_L \frac{r_{oL}^2 + r_{iL}^2}{2} + I_{YY,hoop} + m_s \frac{a^2}{3} \quad (B-17)$$

και:

$$I_{YY1, masses} = (m_w + m_{s2})a^2 \quad (\text{B-18})$$

— από το σύστημα 2:

$$I_{YY2} = I_{YY2, geom} + I_{YY2, masses} \quad (\text{B-19})$$

όπου:

$$I_{YY2, geom} = m_L \frac{(L \sin 60^\circ)^2}{3} + I_{yy, hoop} + m_h (\sin 60^\circ (L + a - d_{cm}))^2 + m_s \left(\frac{a^2}{3} + ((L + a) \sin 60^\circ)^2 \right) \quad (\text{B-20})$$

και:

$$I_{YY2, masses} = (m_w + m_{s2})((L + a) \sin 60^\circ)^2 + a^2 + (m_{mot} + m_{prop})((L + a) \sin 60^\circ)^2 \quad (\text{B-21})$$

— από το σύστημα 3:

$$I_{YY3} = I_{YY2} \quad (\text{B-22})$$

— από τη βάση:

$$I_{YYb} = m_b \frac{R_\delta^2}{4} \quad (\text{B-23})$$

- Οι ροπές αδράνειας κατά τον άξονα Z είναι:
- από το σύστημα 1:

$$I_{ZZ1} = I_{ZZ1, geom} + I_{ZZ1, masses} \quad (\text{B-24})$$

όπου:

$$I_{ZZ1, geom} = m_L \frac{L^2}{3} + I_{ZZ, hoop} + m_h (L + a - d_{cm})^2 + m_s \left(\frac{r_{os}^2 + r_{is}^2}{2} + (L + a)^2 \right) \quad (\text{B-25})$$

και:

$$I_{ZZ1, masses} = (m_w + m_{s2} + m_{mot} + m_{prop})(L + a)^2 \quad (\text{B-26})$$

— από το σύστημα 2:

$$I_{ZZ2} = I_{ZZ1} \quad (\text{B-27})$$

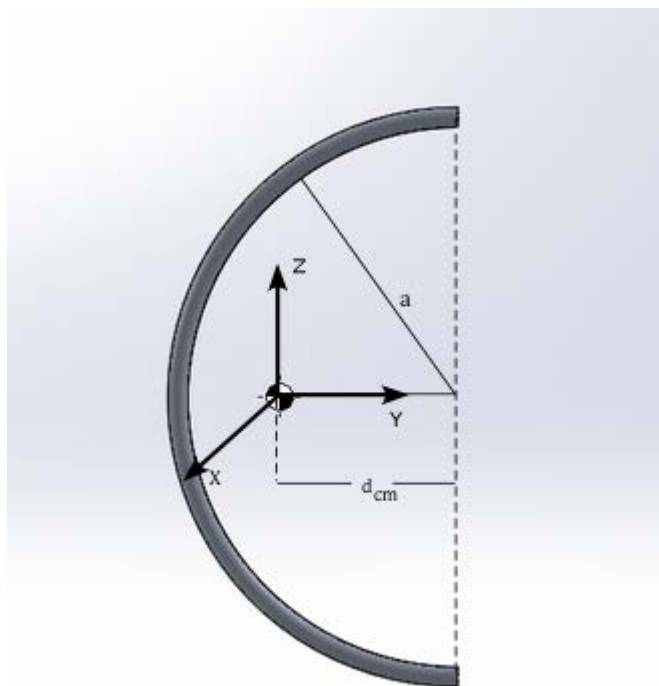
— από το σύστημα 3:

$$I_{ZZ3} = I_{ZZ2} \quad (\text{B-28})$$

— από τη βάση:

$$I_{ZZb} = m_b \frac{R_\delta^2}{2} \quad (\text{B-29})$$

Σημειώνεται ότι οι όροι $I_{XX,hoop}$, $I_{YY,hoop}$, $I_{ZZ,hoop}$ και d_{cm} αφορούν αποκλειστικά το σώμα της στεφάνης και συμβολίζουν τις ροπές αδράνειας της στεφάνης γύρω από τους άξονες X , Y , Z και την απόσταση του κέντρου μάζας της από το κέντρο της αντίστοιχα (βλ. Σχ. Β.1).



Σχήμα Β.1. Απεικόνιση στεφάνης για προσδιορισμό των $I_{XX,hoop}$, $I_{YY,hoop}$, $I_{ZZ,hoop}$ και d_{cm} .

Για τη μισή στεφάνη είναι γνωστή η θέση του κέντρου μάζας της σχετικά με το κέντρο του ημικυκλίου από τη Μηχανική και ισχύει:

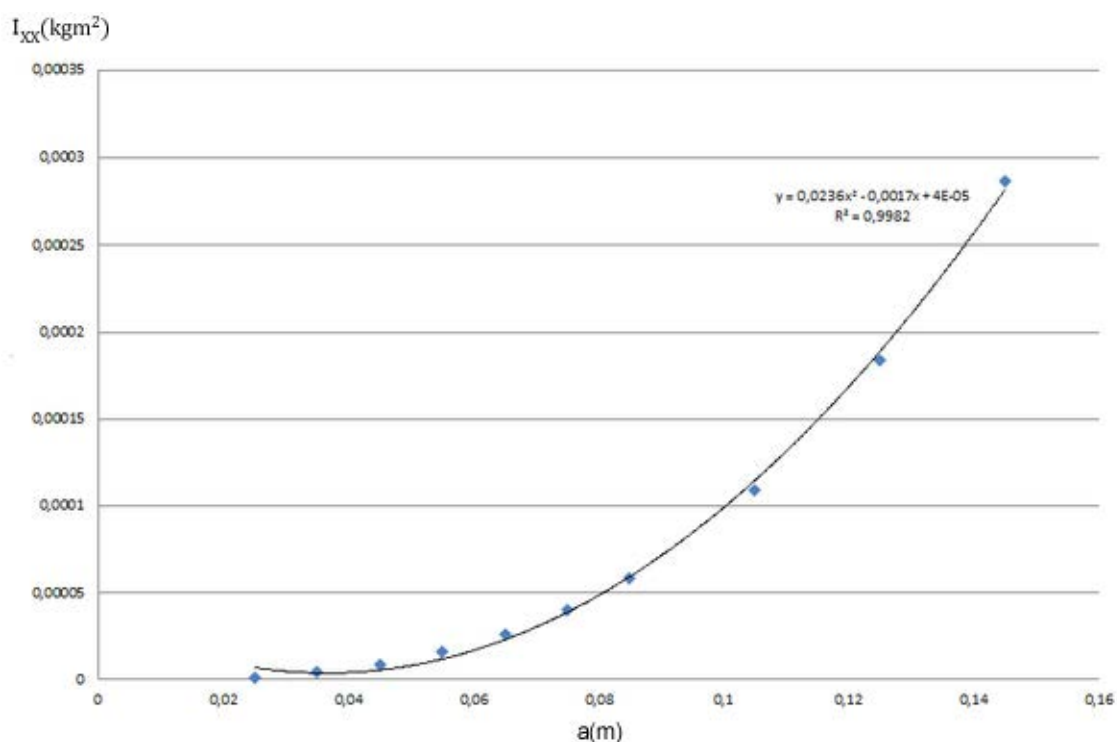
$$d_{cm} = 0.633a \quad (B-30)$$

Αναλυτικές σχέσεις για τις ροπές αδράνειας $I_{XX,hoop}$, $I_{YY,hoop}$, $I_{ZZ,hoop}$ προέκυψαν με τη βοήθεια του περιβάλλοντος Solidworks. Συγκεκριμένα, με δεδομένη τη διατομή της στεφάνης (βλ. Παρ. 4.3 και Σχ. 4.5) και του υλικού της (duraluminium), δόθηκαν διάφορες τιμές στην ακτίνα της a και ελήφθησαν οι αντίστοιχες τιμές των ροπών αδράνειας όπως προέκυψαν από το Solidworks (βλ. Πιν. Β-1).

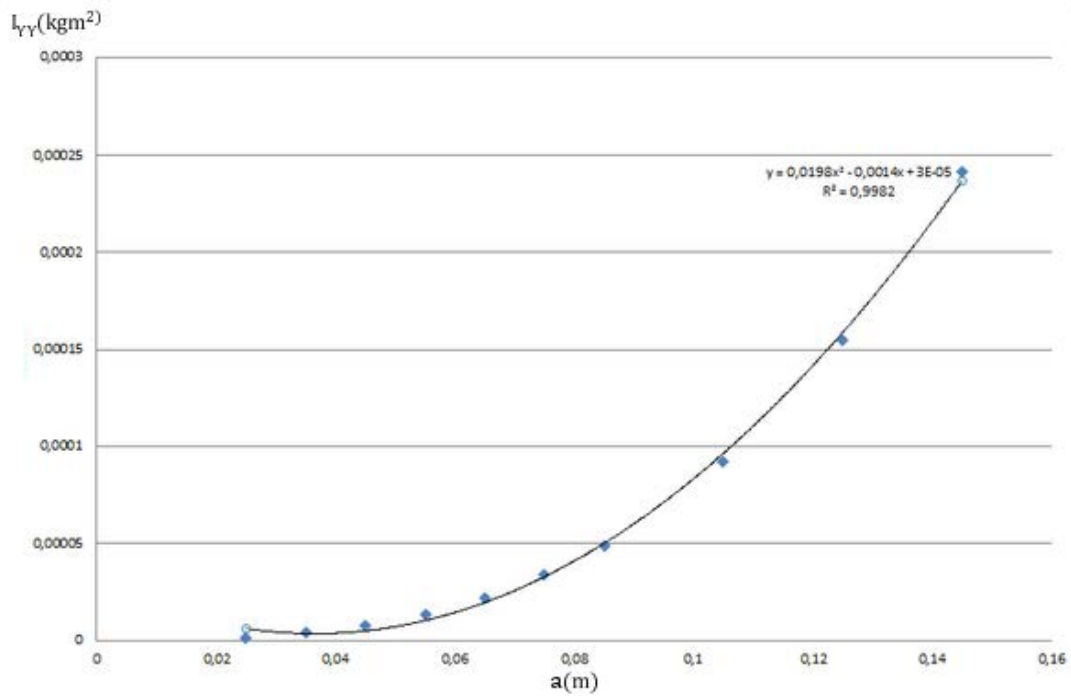
Πίνακας Β-1. Τιμές αδρανειών στεφάνης για διάφορες τιμές της ακτίνας της όπως λήφθηκαν από το Solidworks.

$a(m)$	$I_{XX,hoop} (gr\ mm^2)$	$I_{YY,hoop} (gr\ mm^2)$	$I_{ZZ,hoop} (gr\ mm^2)$
0.025	1608.35	1395.86	343.14
0.045	8806.90	7482.16	1559.93
0.065	26138.46	22087.80	4390.34
0.085	58106.74	48999.17	9551.78
0.105	109215.43	92002.63	17761.53
0.125	183968.16	154884.55	29736.85
0.145	286868.57	241431.33	46195.00

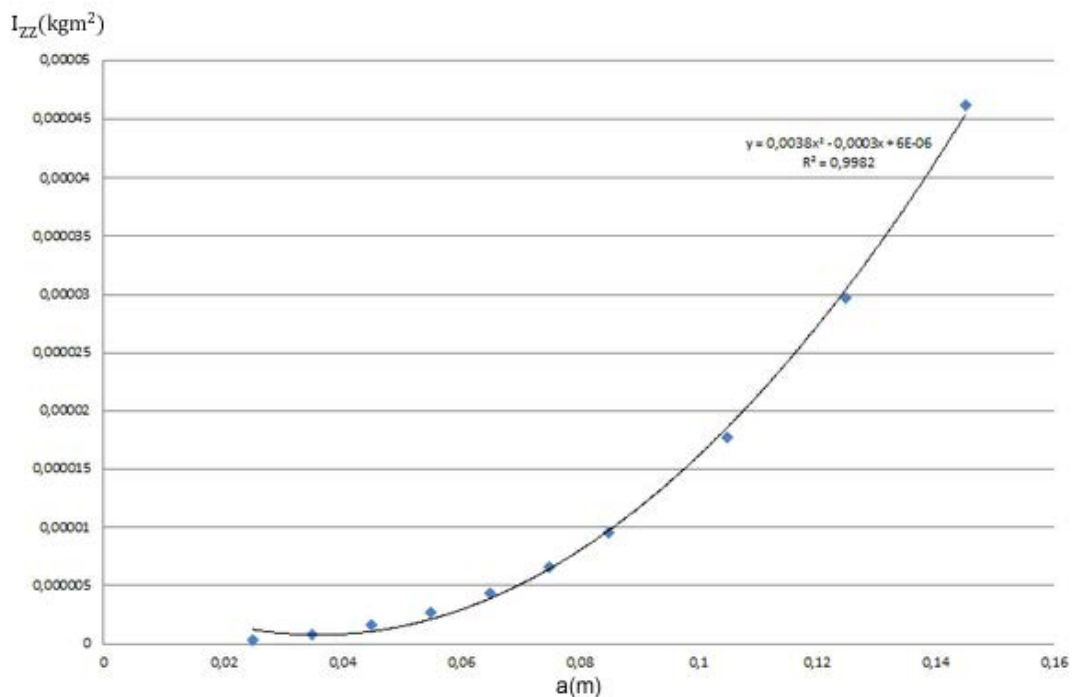
Στα δεδομένα αυτά έγινε παρεμβολή ώστε να προκύψουν αναλυτικές σχέσεις. Στο Σχ. Β.2, Β.3 και Β.4 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των μεγεθών $I_{XX,hoop}$, $I_{YY,hoop}$ και $I_{ZZ,hoop}$ συναρτήσεως της ακτίνας a της στεφάνης. Σε αυτά απεικονίζονται επίσης και οι εξισώσεις παρεμβολής με τους αντίστοιχους δείκτες R^2 που δείχνουν πόσο ικανοποιητικά προσεγγίστηκαν τα δεδομένα.



Σχήμα Β.2. Ροπή αδράνειας $I_{XX,hoop}$ συναρτήσεως μήκους στεφάνης και εξίσωση παρεμβολής.



Σχήμα Β.3. Ροπή αδράνειας $I_{yy,hoop}$ συναρτήσει μήκους στεφάνης και εξίσωση παρεμβολής.



Σχήμα Β.4. Ροπή αδράνειας $I_{zz,hoop}$ συναρτήσει μήκους στεφάνης και εξίσωση παρεμβολής.

Έτσι, προκύπτει:

$$I_{xx,hoop} = 0.0236a^2 - 0.0017a + 0.00004 \quad (B-31)$$

$$I_{YY,hoop} = 0.0198a^2 - 0.0014a + 0.00003 \quad (B-32)$$

$$I_{ZZ,hoop} = 0.0038a^2 - 0.0003a + 0.000006 \quad (B-33)$$

Τελικά πλέον από τις Εξ. (B-8)-(B-29) προσδιορίζονται τα κυρία στοιχεία της μήτρας αδράνειας **J**:

$$I_{XX} = I_{XX1} + I_{XX2} + I_{XX3} + I_{XXb} \quad (B-34)$$

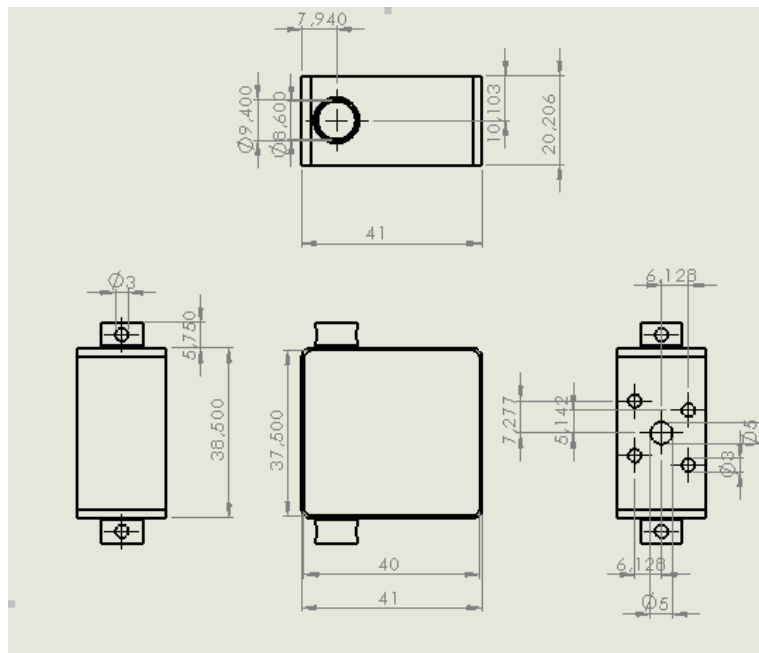
$$I_{YY} = I_{YY1} + I_{YY2} + I_{YY3} + I_{YYb} \quad (B-35)$$

$$I_{ZZ} = I_{ZZ1} + I_{ZZ2} + I_{ZZ3} + I_{ZZb} \quad (B-36)$$

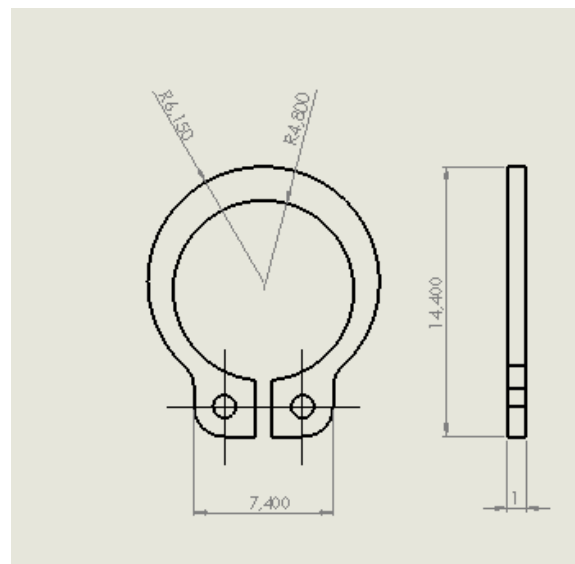
Παράρτημα Γ

Εδώ μπορεί κανείς να δει τις λεπτομερείς διαστάσεις όλων των συνιστωσών που απαρτίζουν το ρομπότ και περιγράφηκαν στο Κεφ. 5.

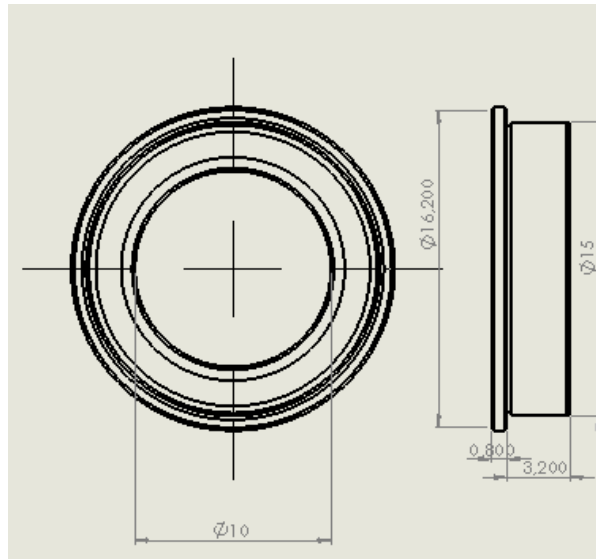
Γ.1. Διαστάσεις όλων των τεμαχίων που απαρτίζουν το ρομπότ και εμφανίζονται στο Κεφάλαιο 5.



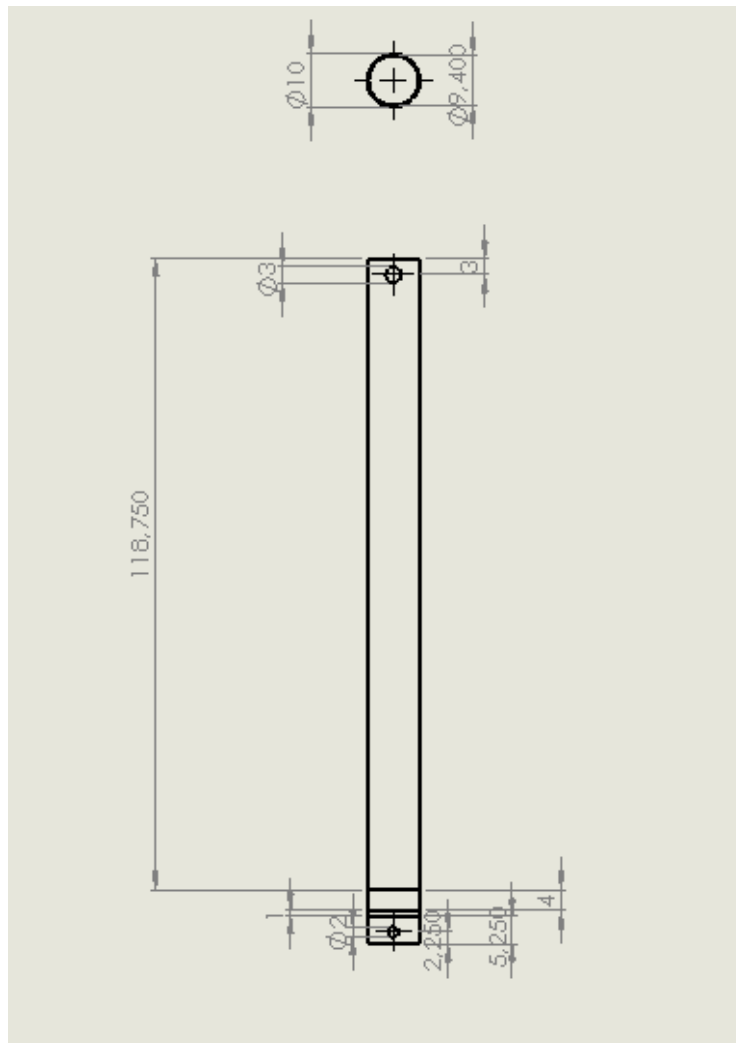
Σχήμα Γ.1. Τεμάχιο στήριξης του ηλεκτροκινητήρα.



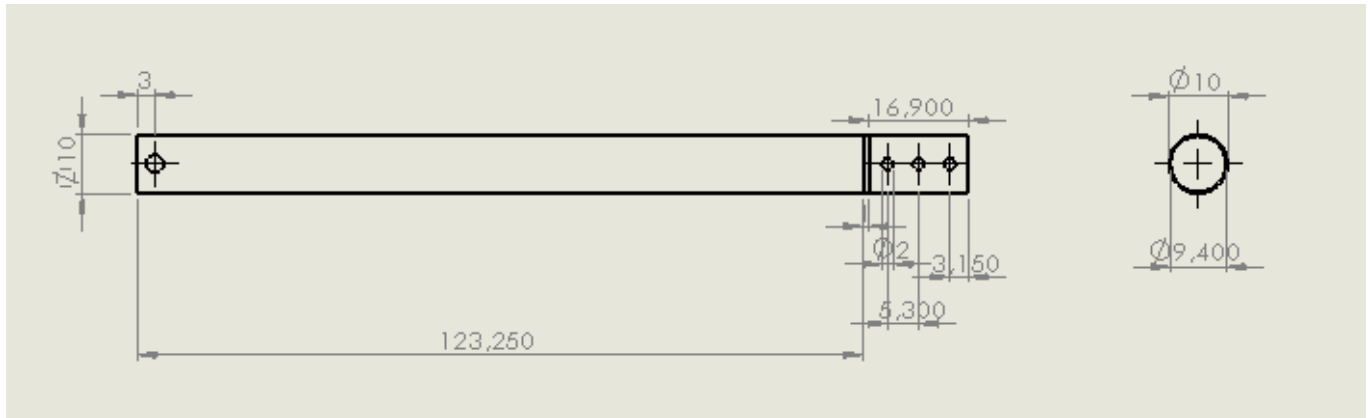
Σχήμα Γ.2. STWN10 δακτύλιος ασφάλειας.



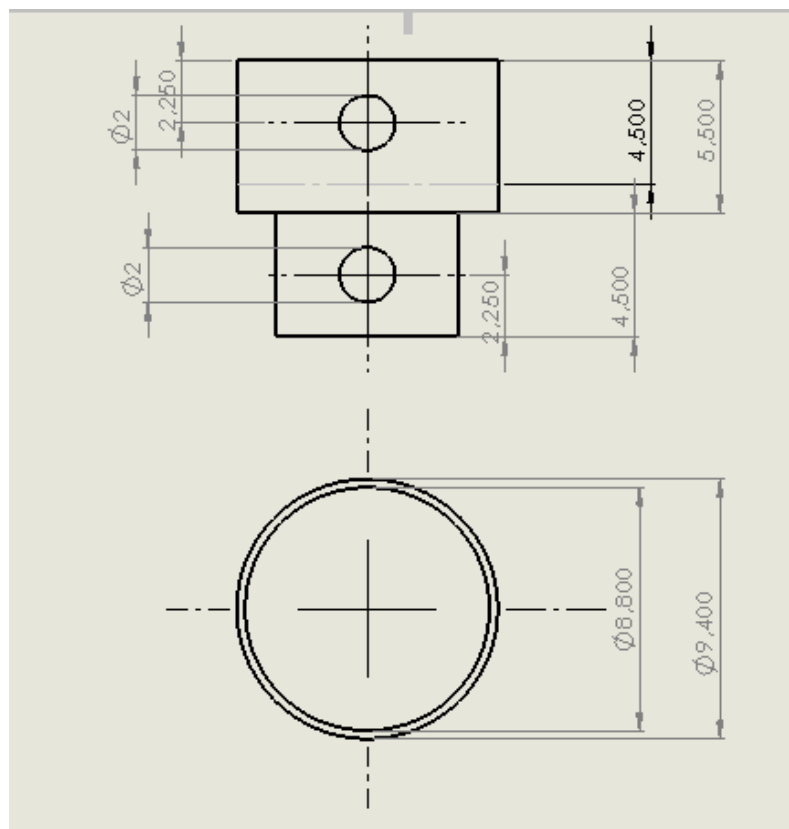
Σχήμα Γ.3. C-SFL6700ZZ ρουλεμάν.



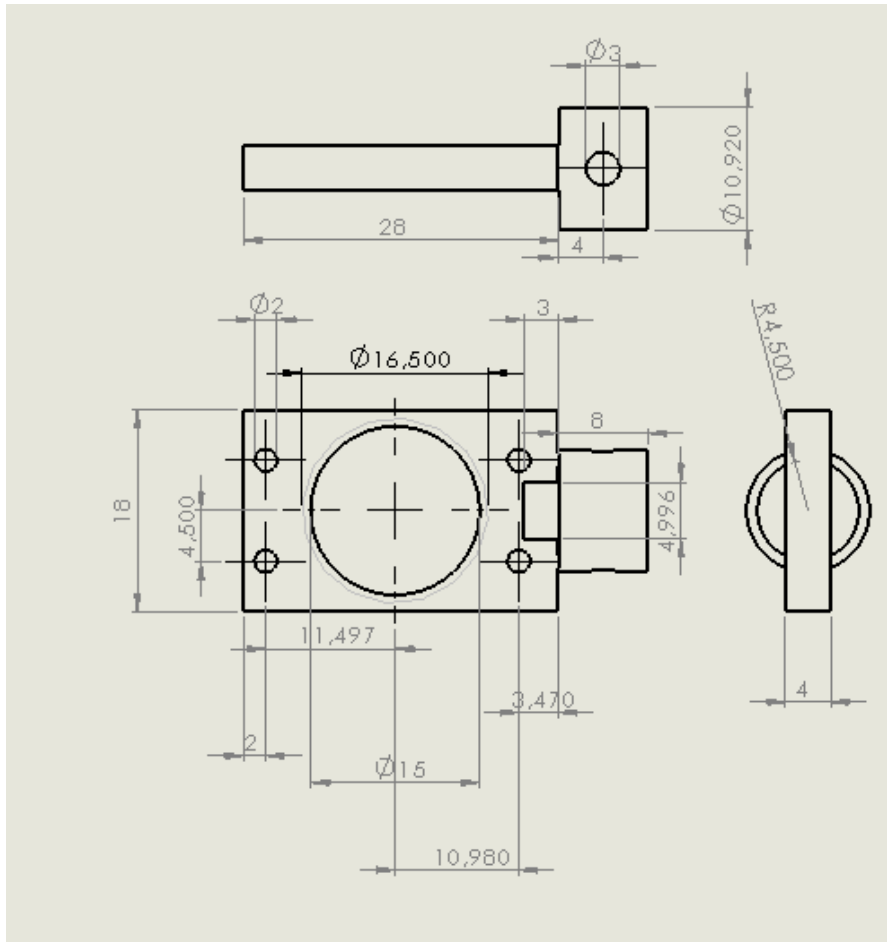
Σχήμα Γ.4. Κάτω άξονας του άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.



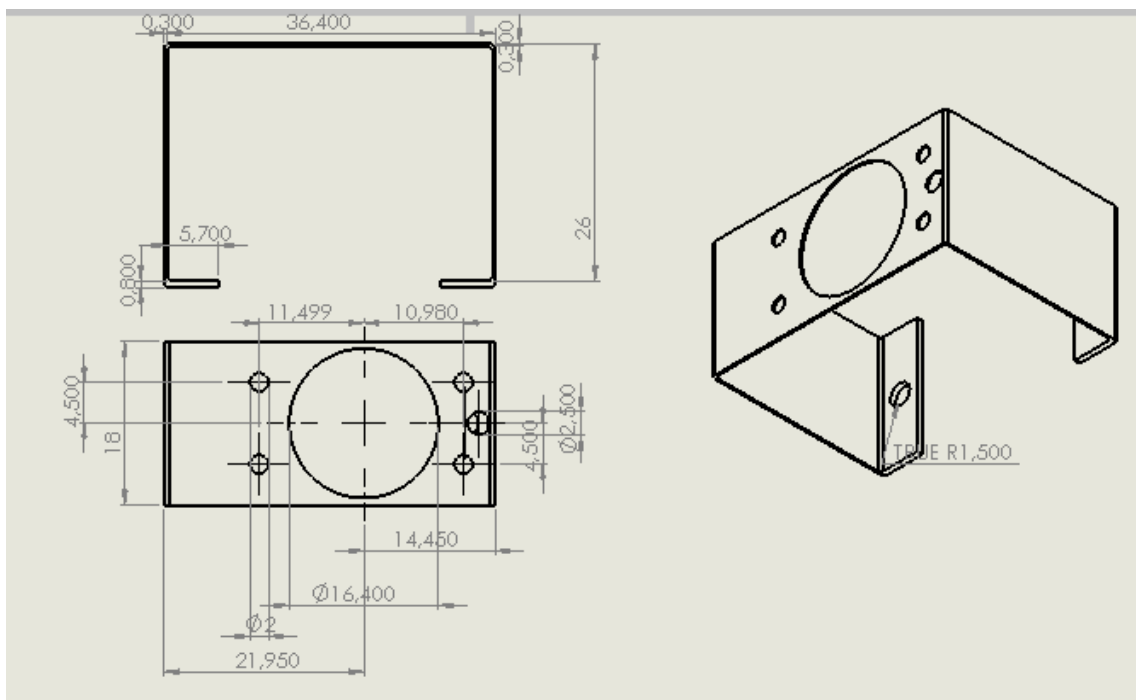
Σχήμα Γ.5. Πάνω άξονας του άξονα δεύτερης ανεξάρτητης περιστροφής.



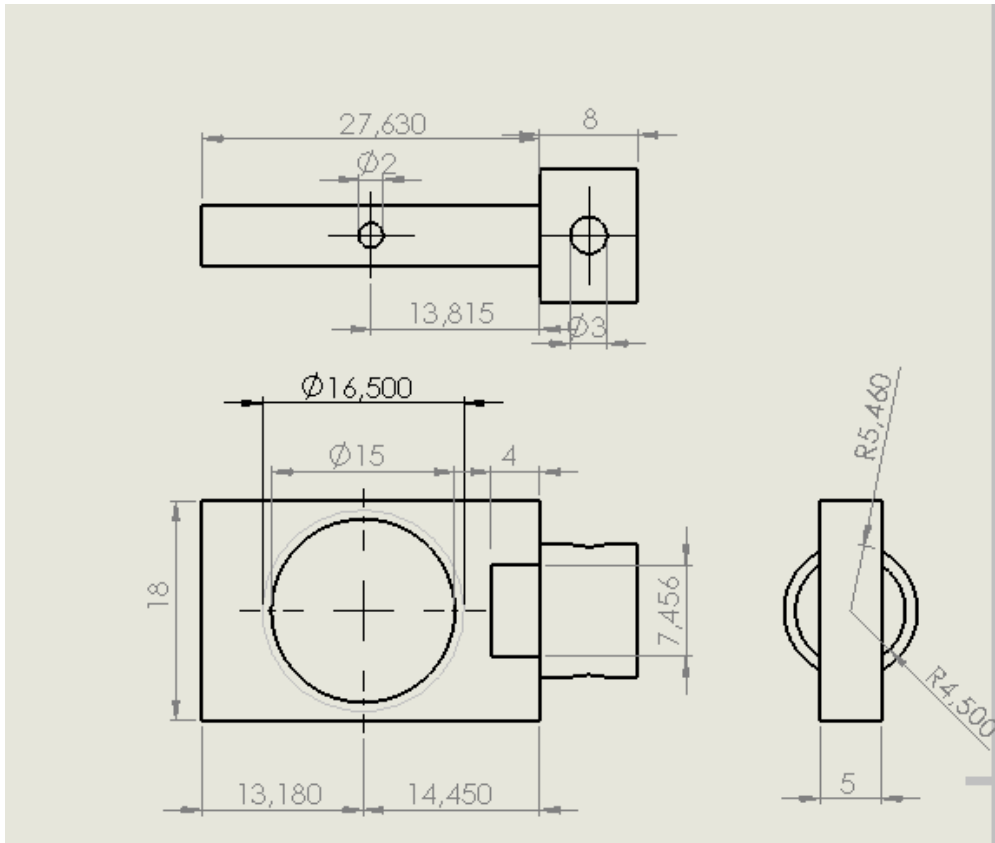
Σχήμα Γ.6. Κόπλερ σύζευξης άξονα με δεύτερο σερβοκινητήρα.



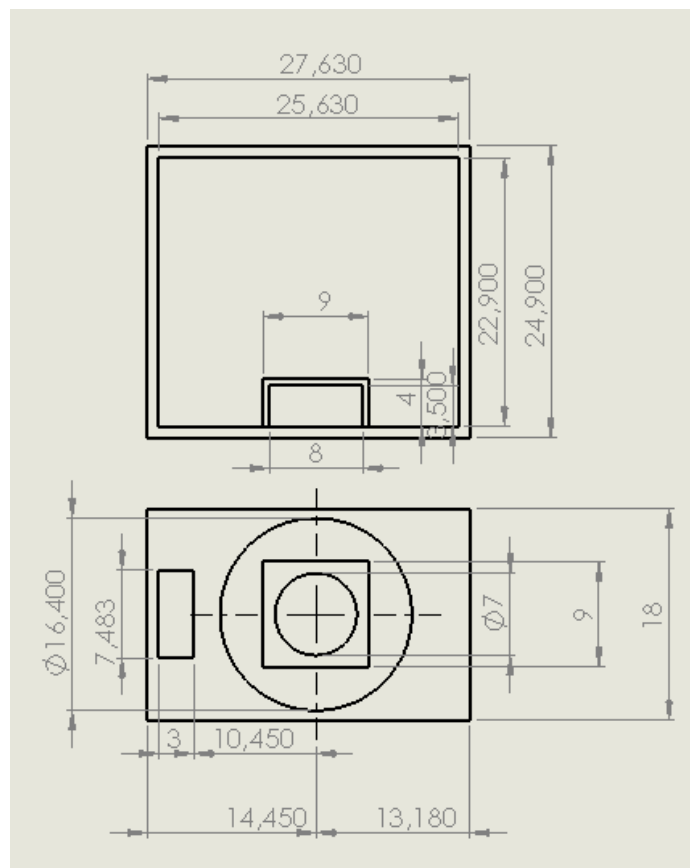
Σχήμα Γ.7 Έδραση κάτω άξονα.



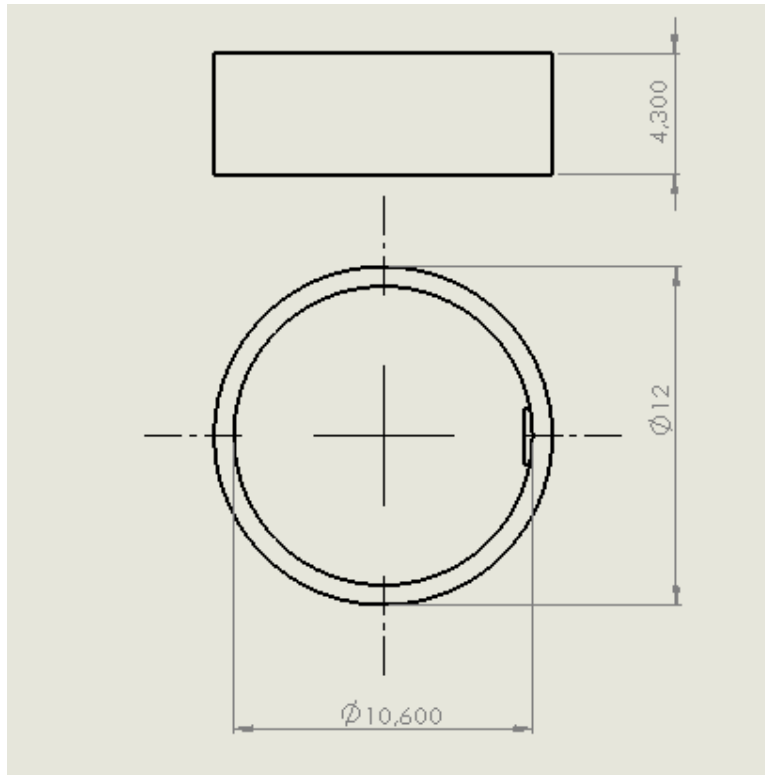
Σχήμα Γ.8. Πλαίσιο στήριξης δεύτερου σερβοκινητήρα.



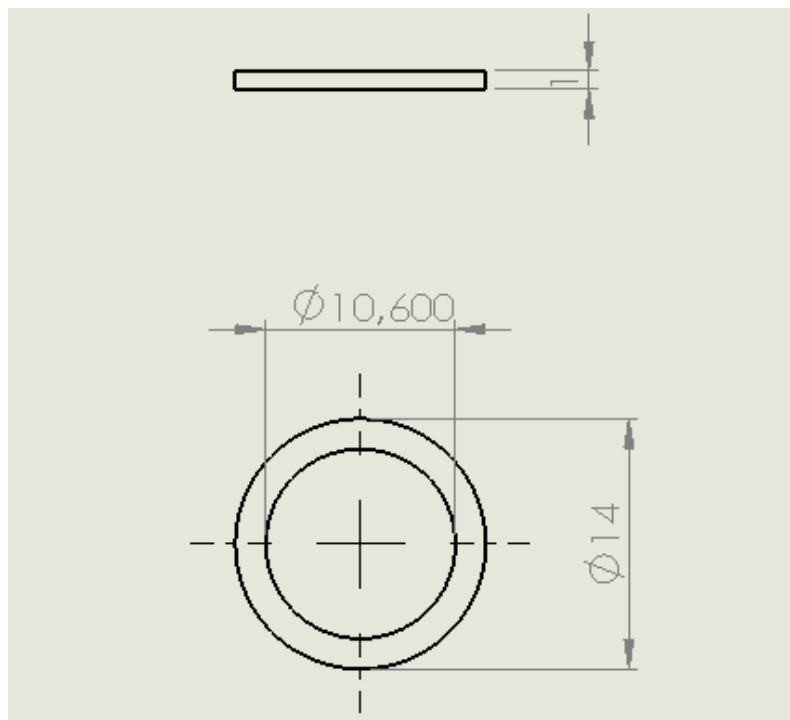
Σχήμα Γ.9. Έδραση πάνω άξονα.



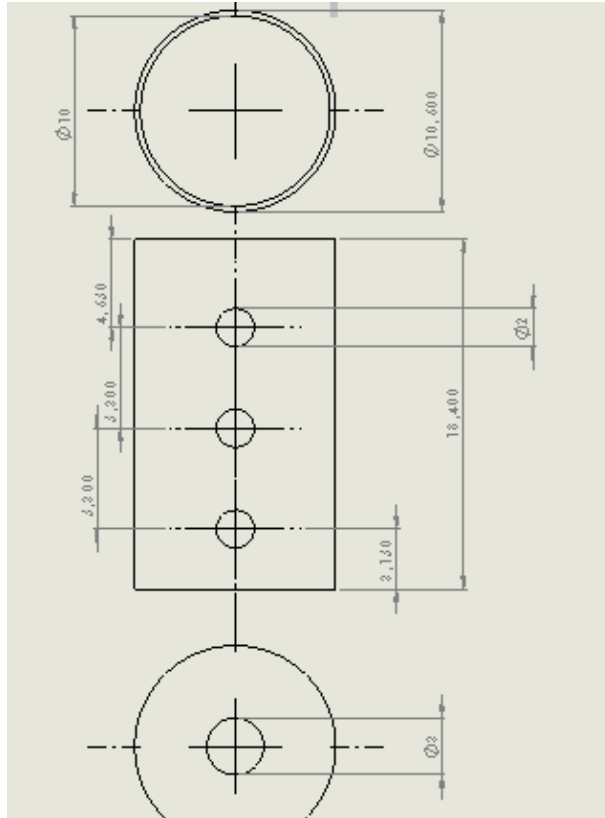
Σχήμα Γ.10. ABS πλαστικό της πάνω έδρασης.



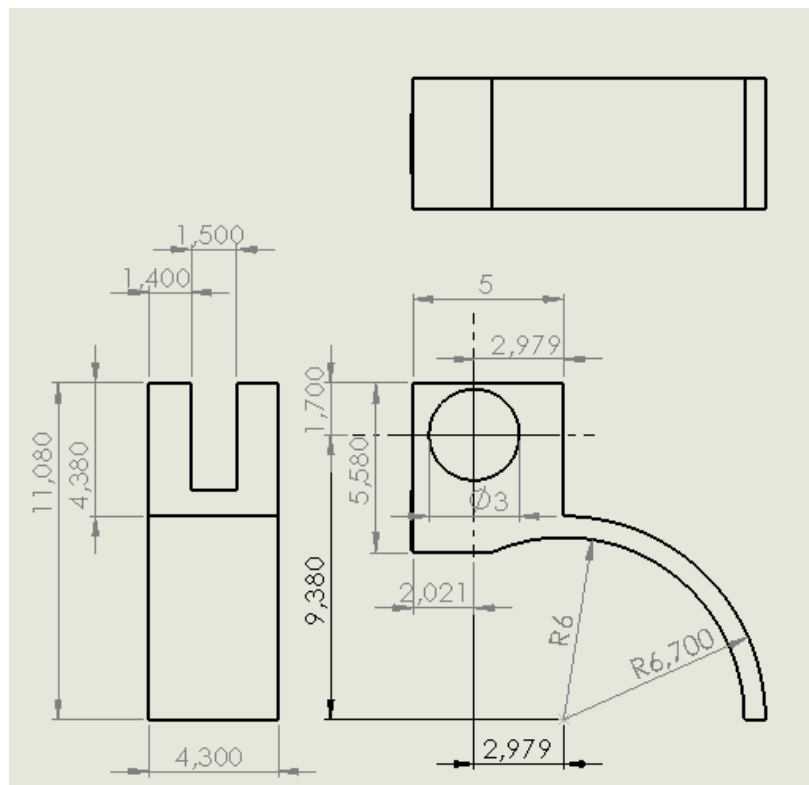
Σχήμα Γ.11. Χάλκινος δακτύλιος του πάνω άξονα για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.



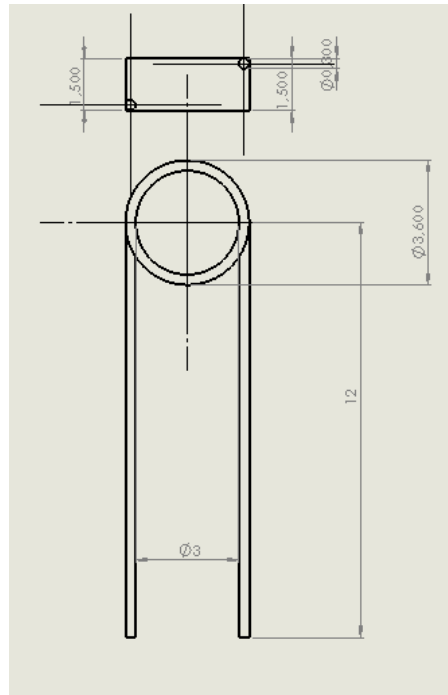
Σχήμα Γ.12. Μονωτικός δακτύλιος πάνω άξονα.



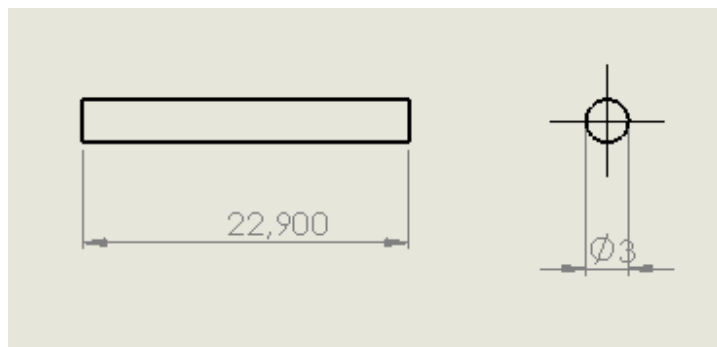
Σχήμα Γ.13. ABS άξονας μεταξύ πάνω άξονα και δακτυλίων.



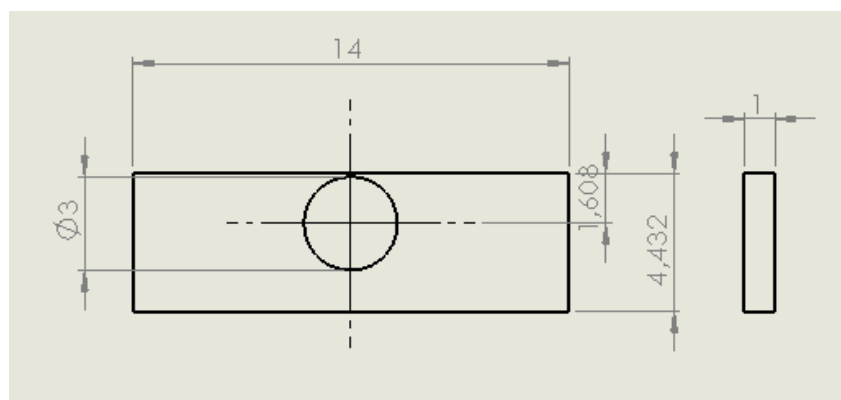
Σχήμα Γ.14. Χάλκινο έλασμα του πάνω άξονα για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα Γ.15. 33-03230 στροφικό ελατήριο.



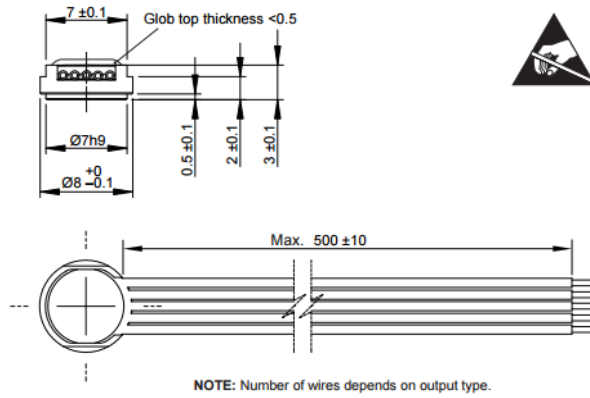
Σχήμα Γ.16. Πείρος στήριξης των χάλκινων ελασμάτων και ελατηρίων.



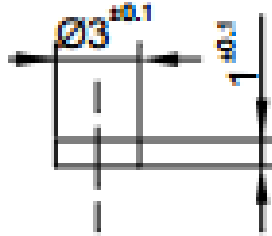
Σχήμα Γ.17. Μονώσεις μεταξύ των χάλκινων ελασμάτων.

RM08 dimensions

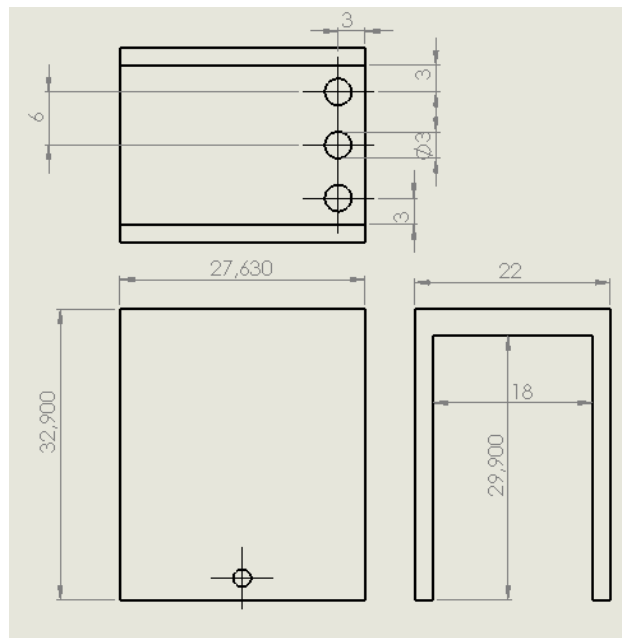
Dimensions and tolerance in mm.



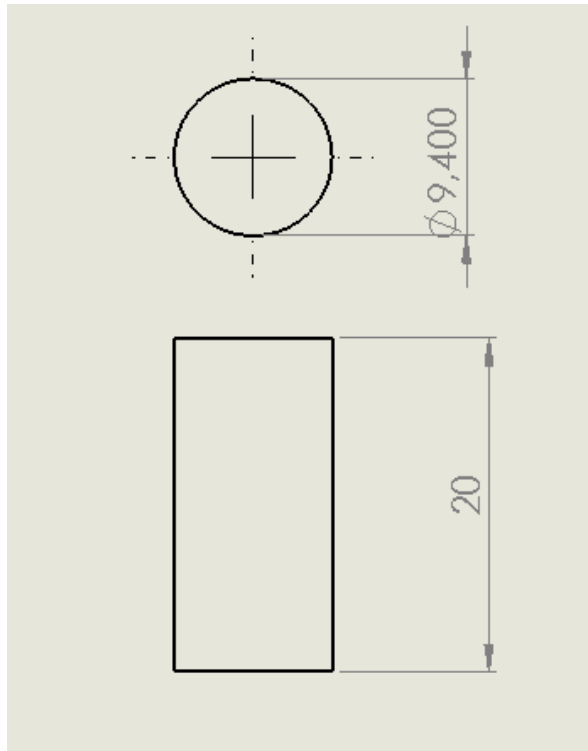
Σχήμα Γ.18. Παλμογεννήτρια RM08.



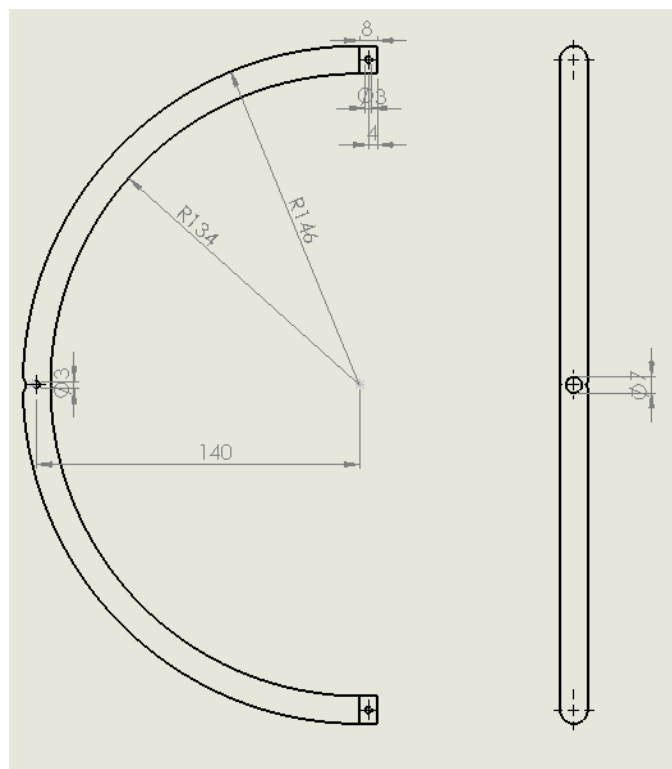
Σχήμα Γ.19. Μαγνητάκι παλμογεννήτριας.



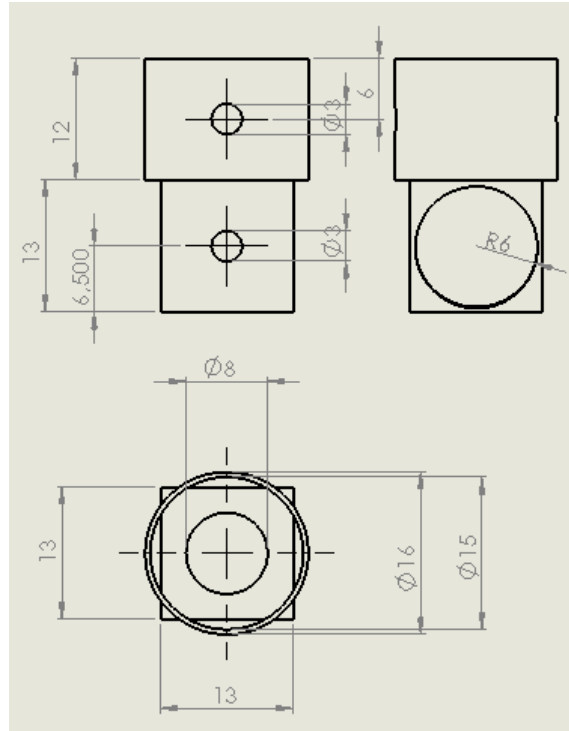
Σχήμα Γ.20. Προστατευτικό πλαστικό κάλυμμα-αντίβαρο.



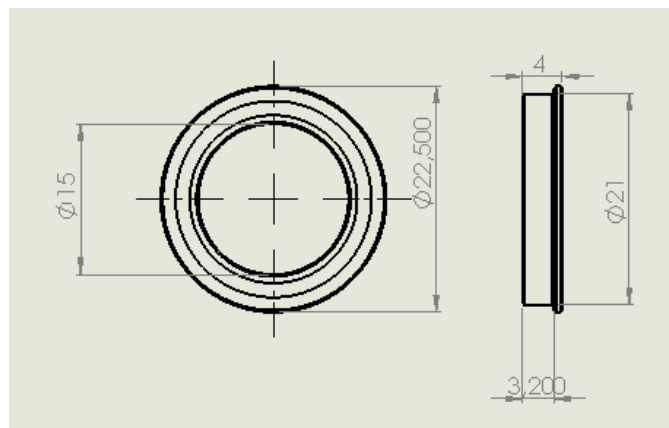
Σχήμα Γ.21. Κύλινδρος-αντίβαρο εσωτερικά του κάτω άξονα.



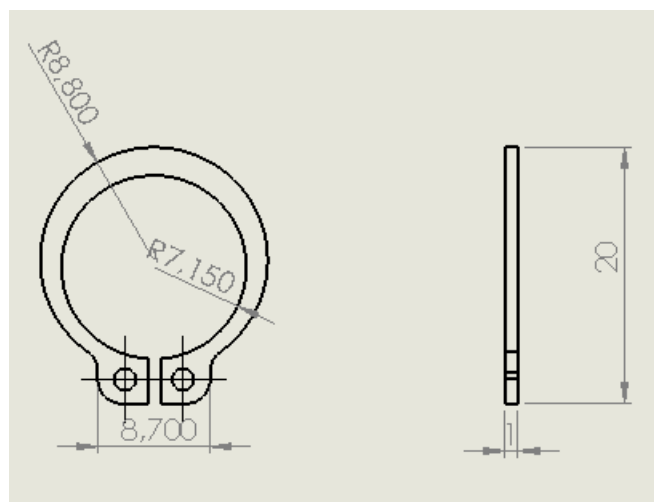
Σχήμα Γ.22. Στεφάνη.



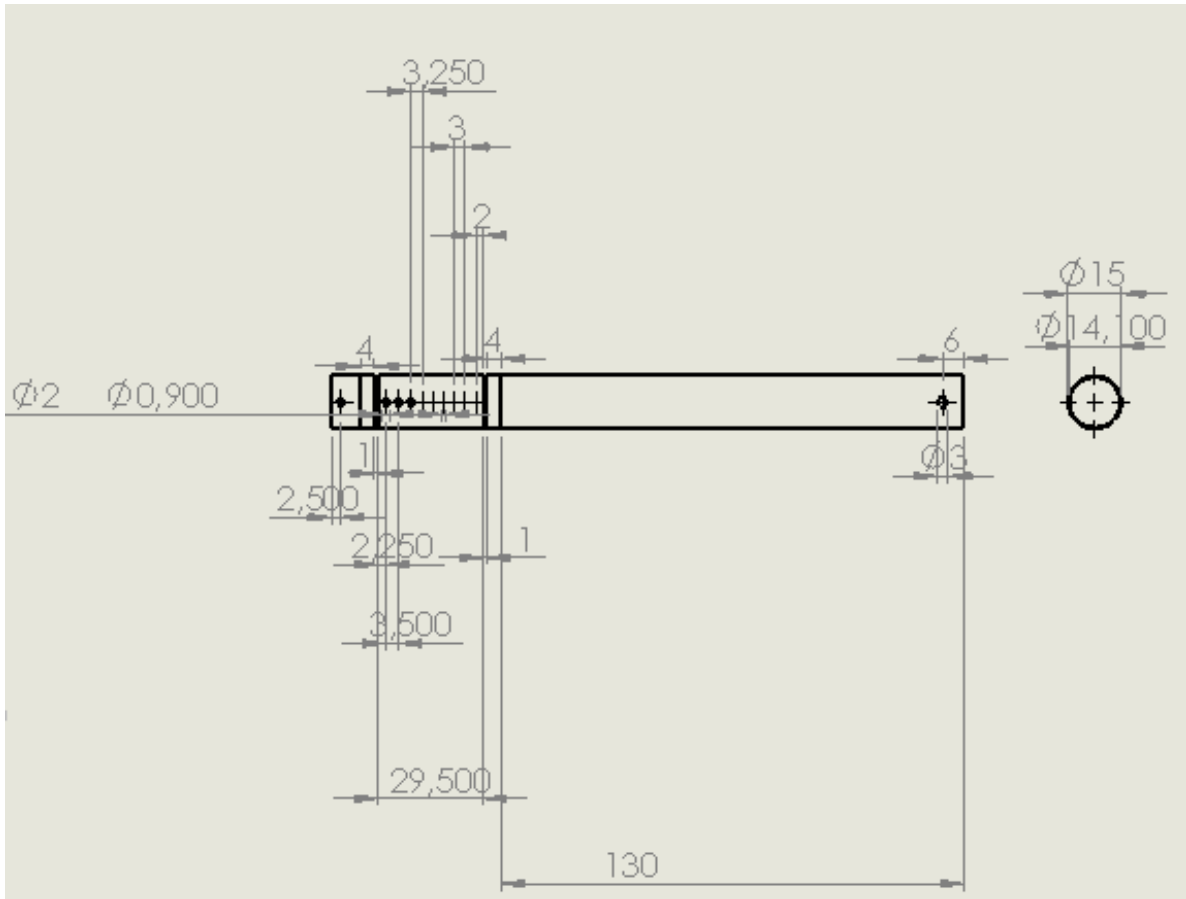
Σχήμα Γ.23. Φλάντζα σύνδεσης στεφάνης με πόδι.



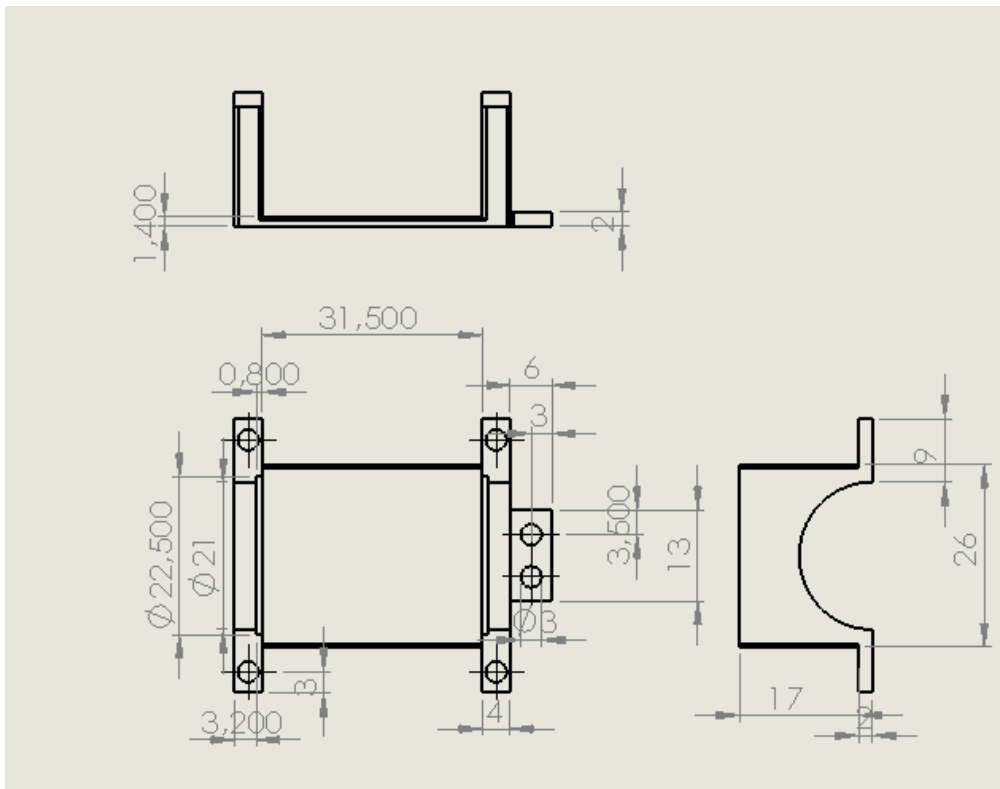
Σχήμα Γ.24. C-SFL6702ZZ ρουλεμάν.



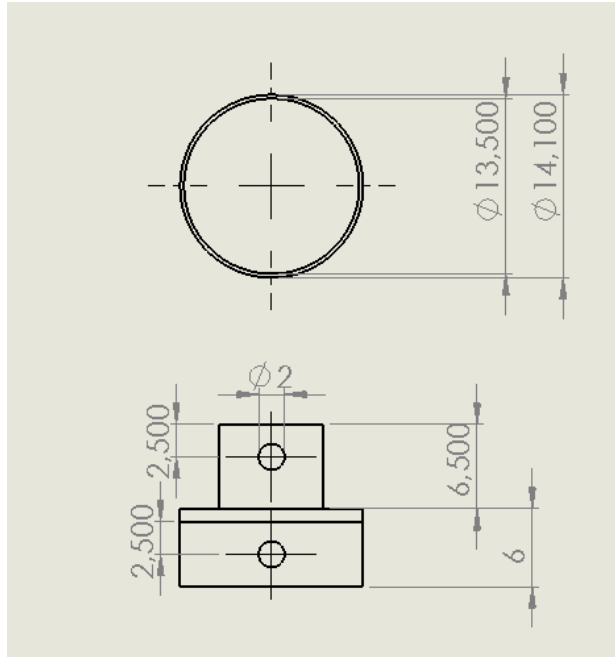
Σχήμα Γ.25. STWN15 δακτύλιος ασφάλειας.



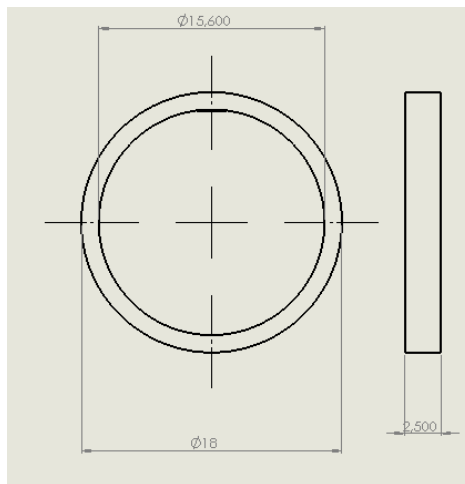
Σχήμα Γ.26. Πόδι του ρομπότ.



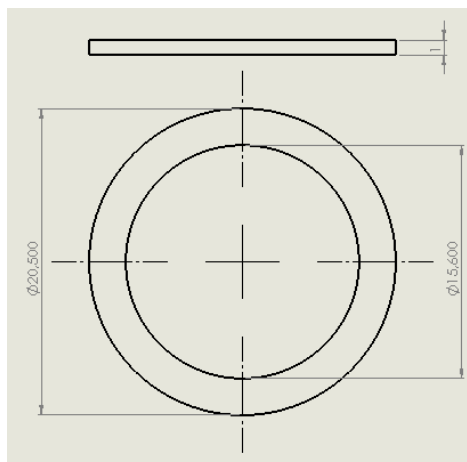
Σχήμα Γ.27. Μισό κομμάτι συστήματος έδρασης του ποδιού.



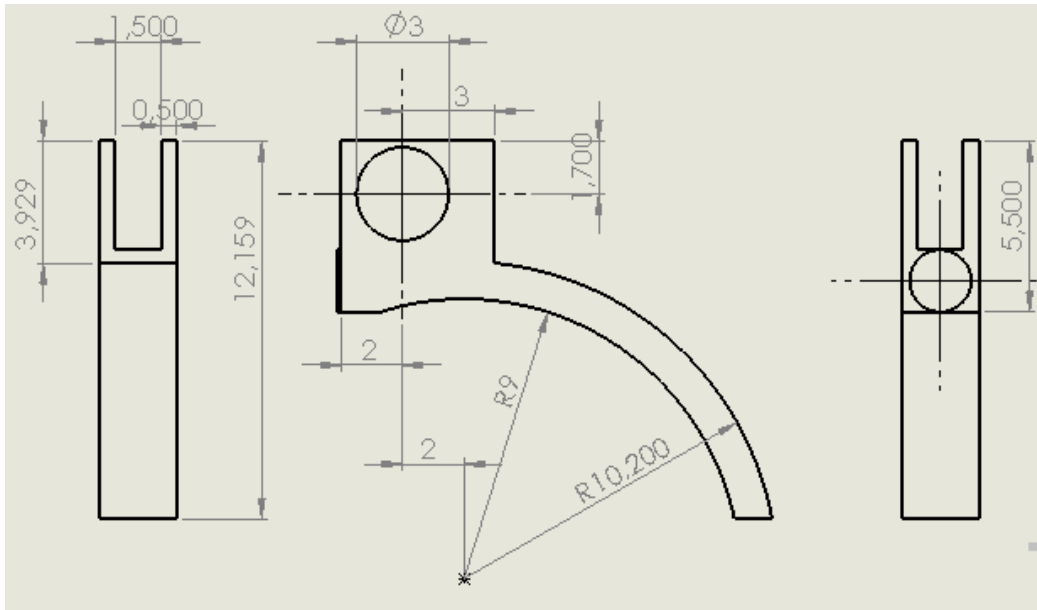
Σχήμα Γ.28. Κόπλερ σύζευξης ποδιού με σερβοκινητήρα.



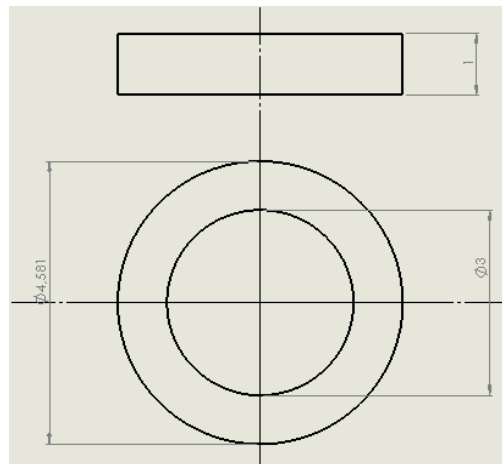
Σχήμα Γ.29. Χάλκινος δακτύλιος του ποδιού για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.



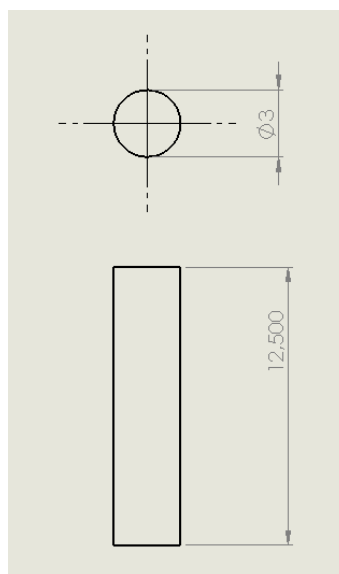
Σχήμα Γ.30. Μονωτικοί δακτύλιοι του ποδιού.



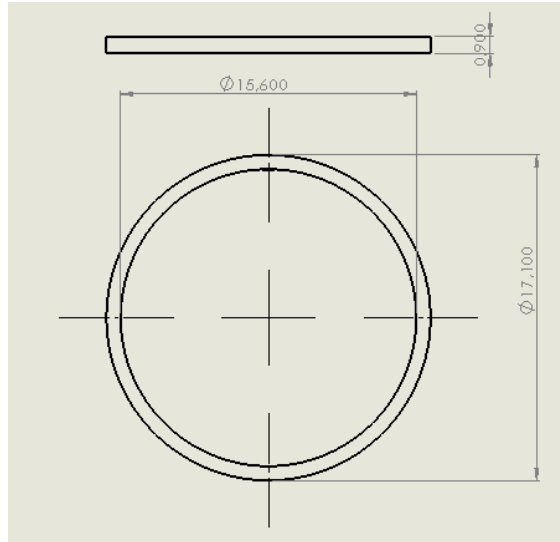
Σχήμα Γ.31. Χάλκινο έλασμα του ποδιού για τα καλώδια του ηλεκτροκινητήρα.



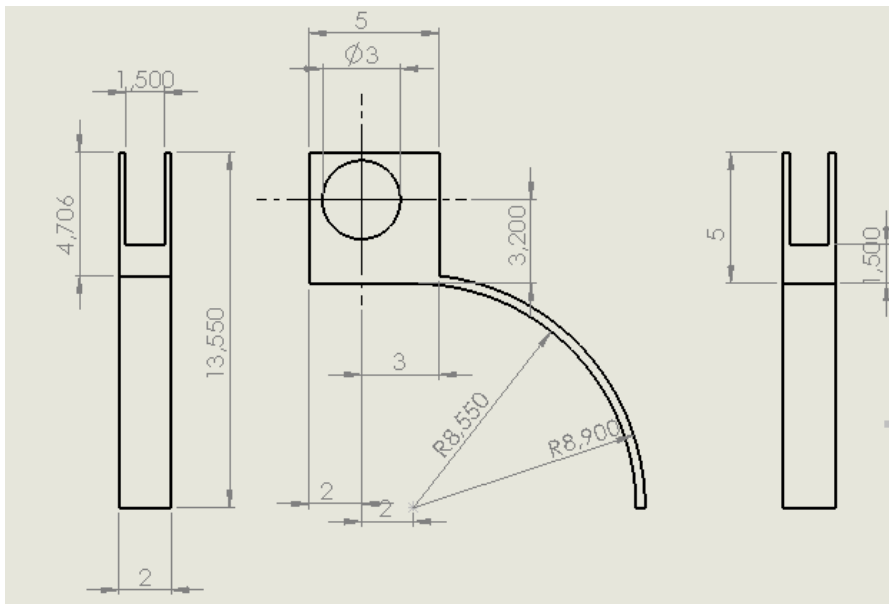
Σχήμα Γ.32 Μονωτικός δακτύλιος για τα ελάσματα του ηλεκτροκινητήρα.



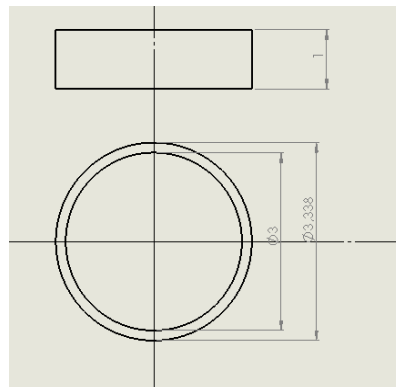
Σχήμα Γ.32 Πείρος στήριξης ελασμάτων του ηλεκτροκινητήρα.



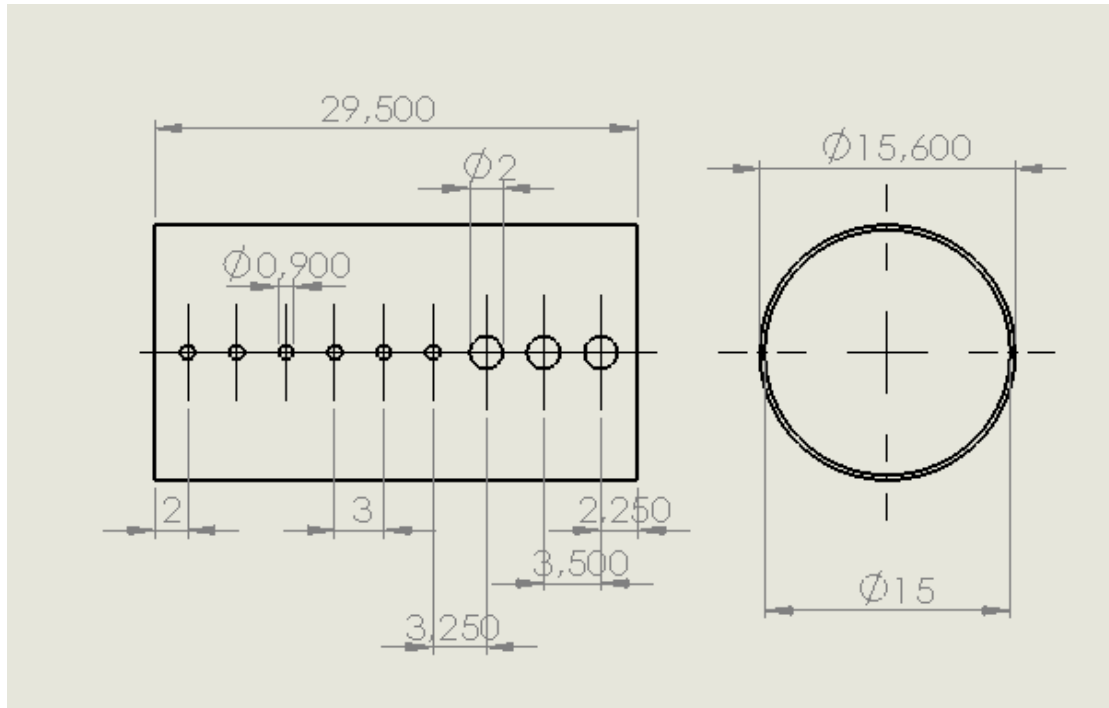
Σχήμα Γ.33. Χάλκινος δακτύλιος του ποδιού για τα καλώδια της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα.



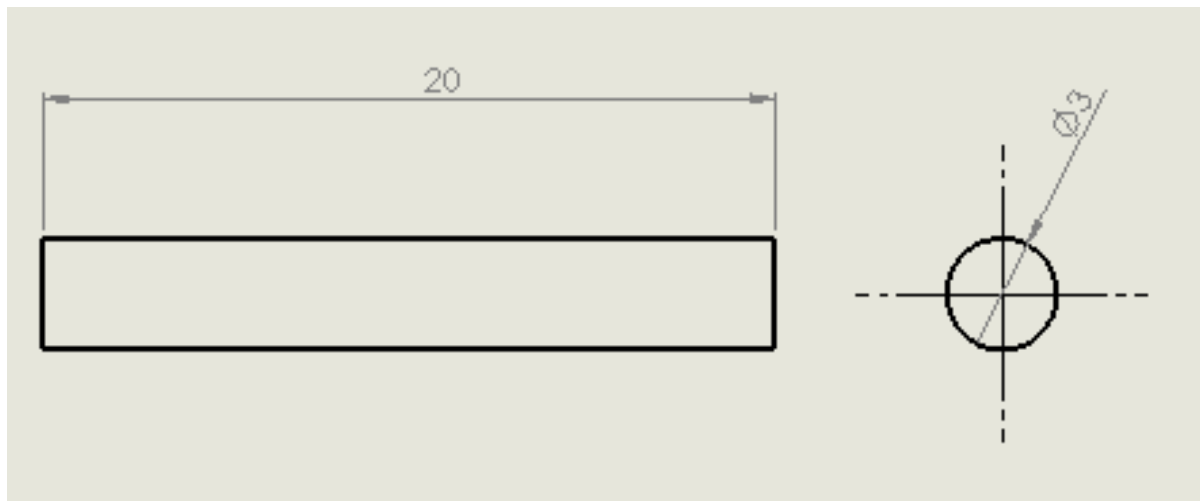
Σχήμα Γ.34. Χάλκινο έλασμα του ποδιού για τα καλώδια της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα.



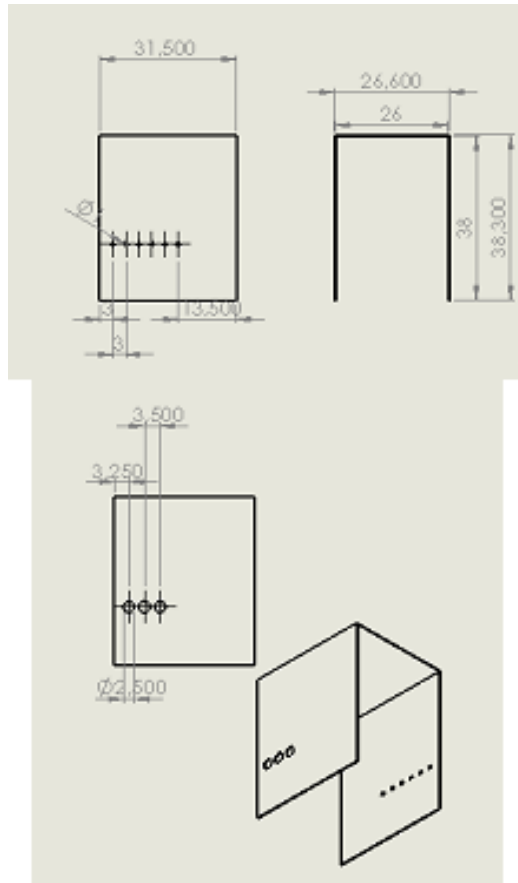
Σχήμα Γ.35. Μονωτικός δακτύλιος για τα ελάσματα της παλμογεννήτριας και του δεύτερου σερβοκινητήρα.



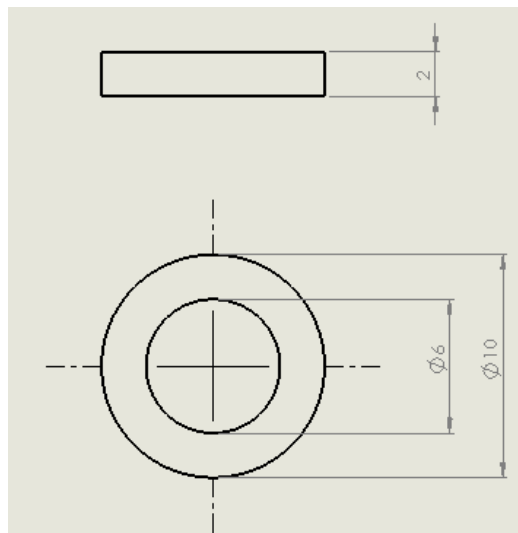
Σχήμα Γ.36. ABS άξονας μεταξύ ποδιού και δακτυλίων.



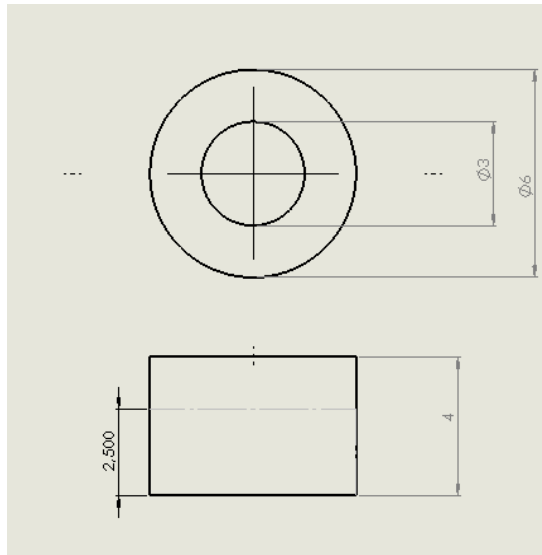
Σχήμα Γ.37. Πείρος στήριξης ελασμάτων για την παλμογεννήτρια και το σερβοκινητήρα.



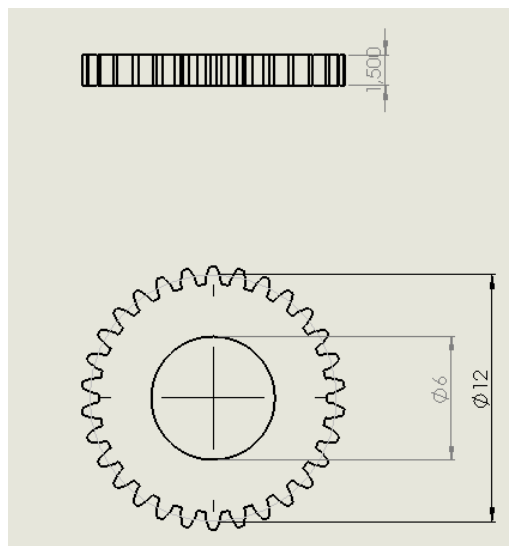
Σχήμα Γ.38. Προστατευτικό κάλυμμα συστήματος έδρασης ποδιού.



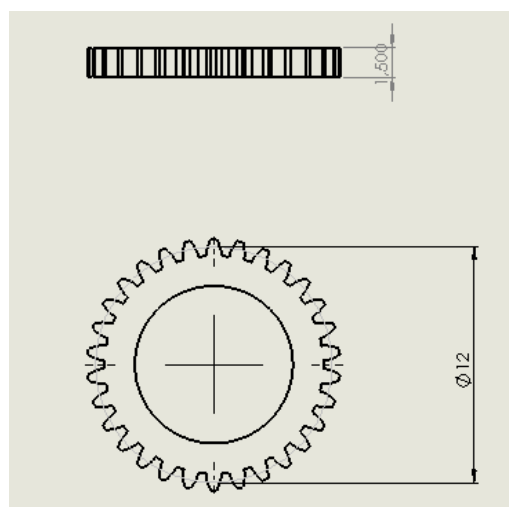
Σχήμα Γ.39. κεραμικό έδρανο κύλισης MSM 0610-02.



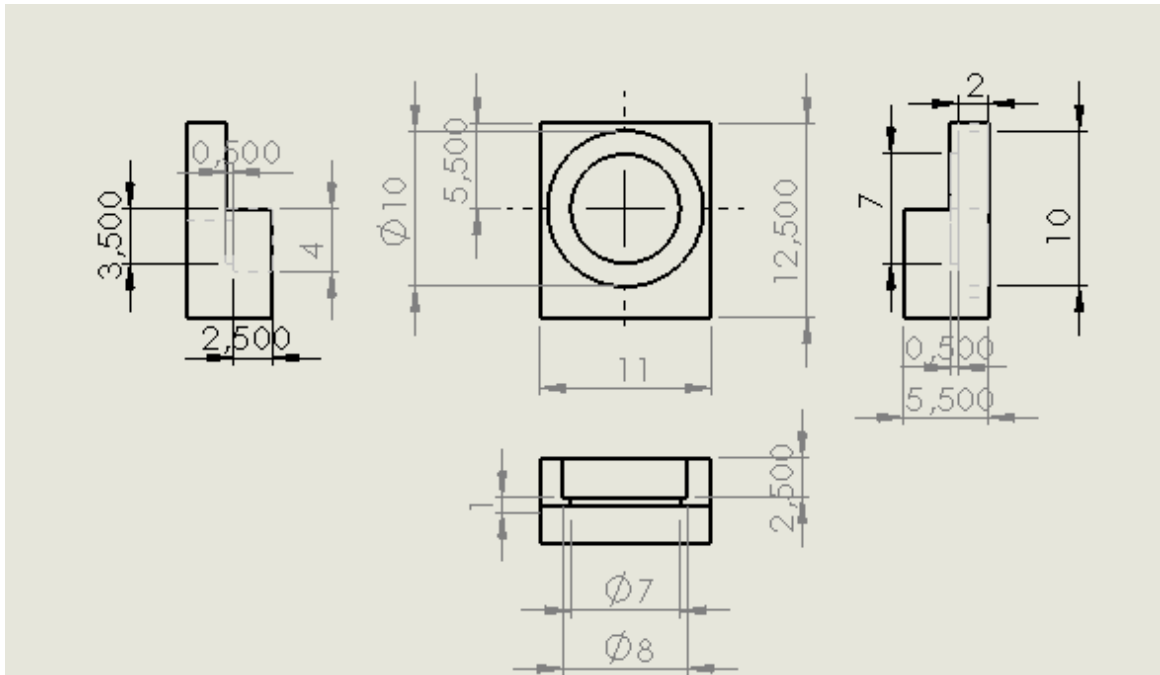
Σχήμα Γ.40. Πλαστικός άξονας ως σώμα με το μαγνητάκι.



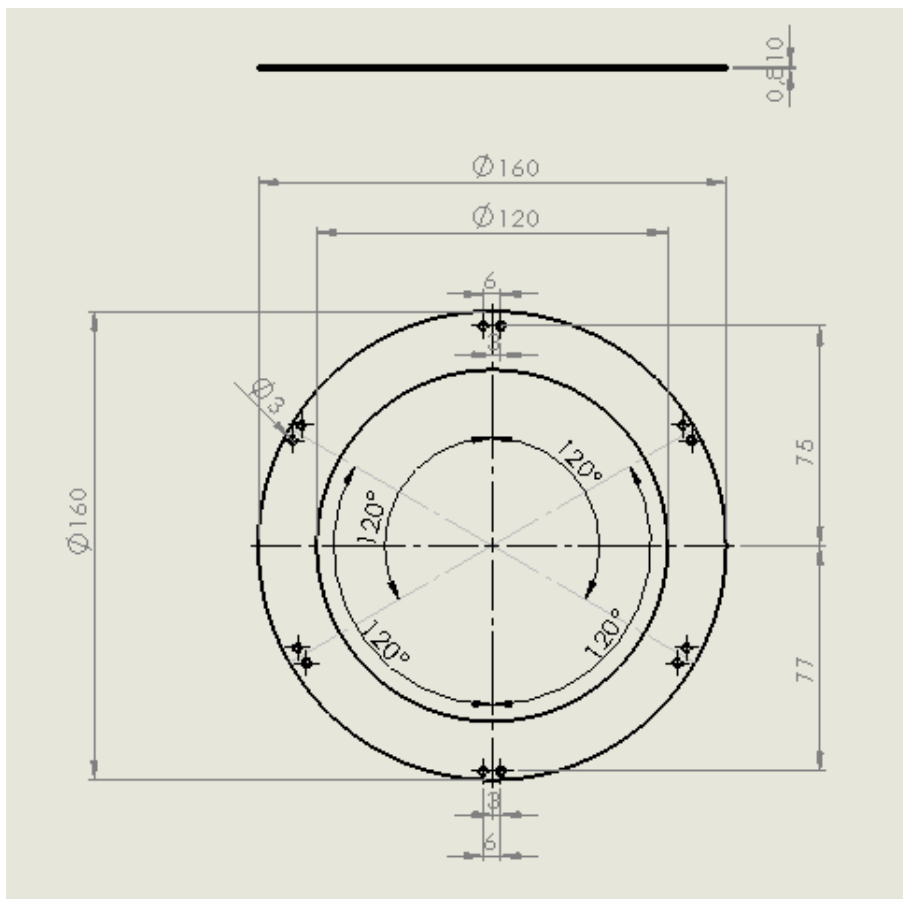
Σχήμα Γ.41. Οδοντωτός τροχός του πλαστικού άξονα.



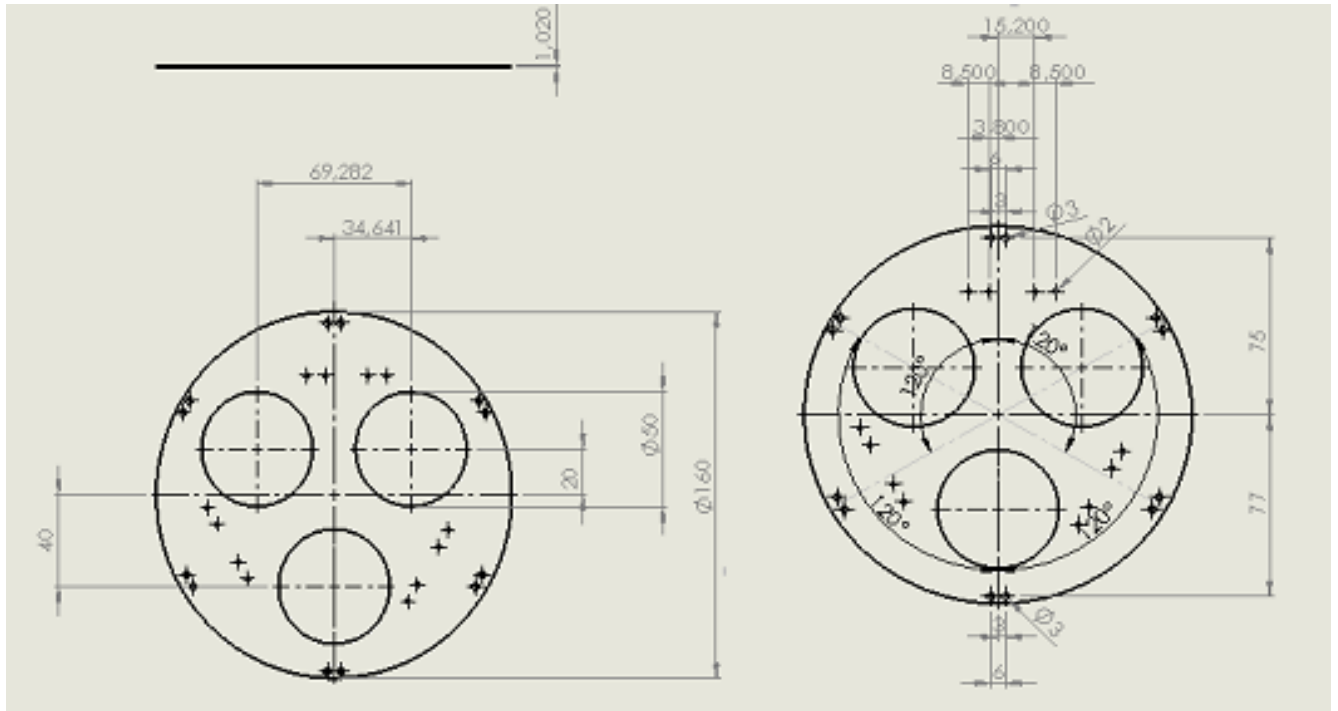
Σχήμα Γ.42. Οδοντωτός τροχός ποδιού.



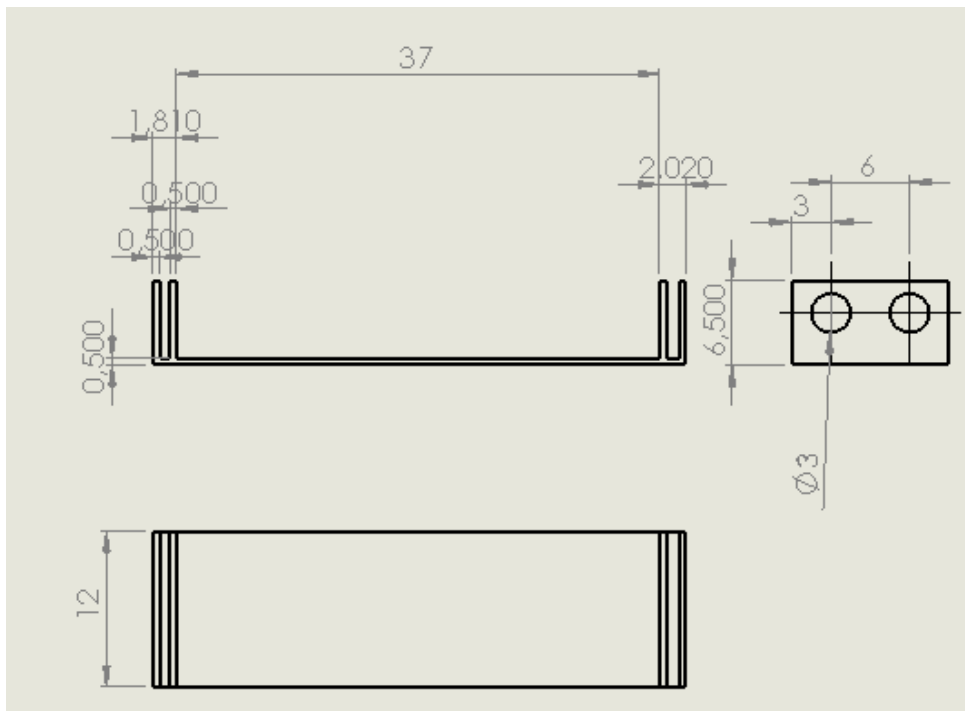
Σχήμα Γ.43. Πλαστικό τεμάχιο στήριξης συστήματος παλμογεννήτριας.



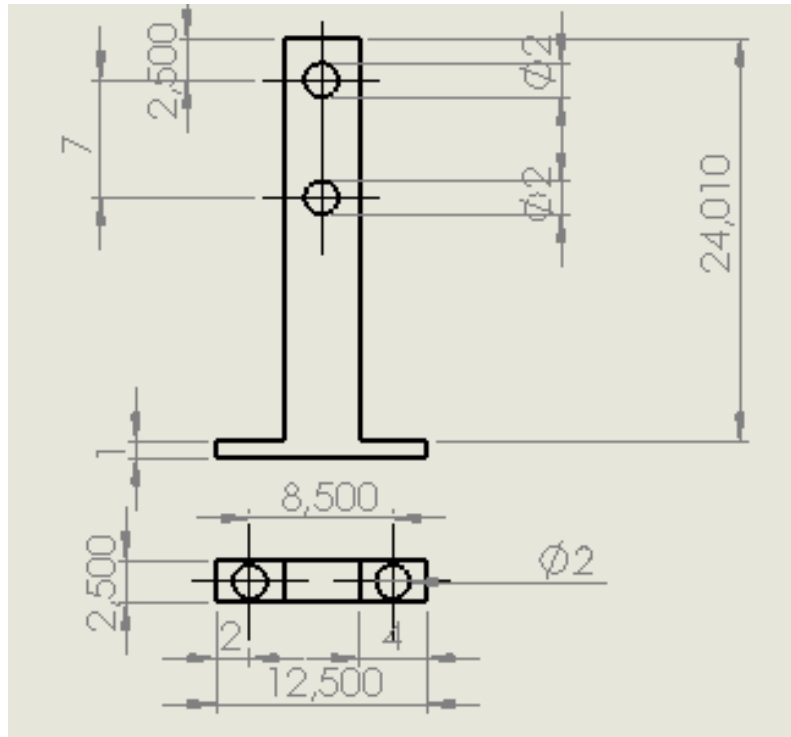
Σχήμα Γ.44. Πάνω κυκλικό τμήμα σκελετού βάσης.



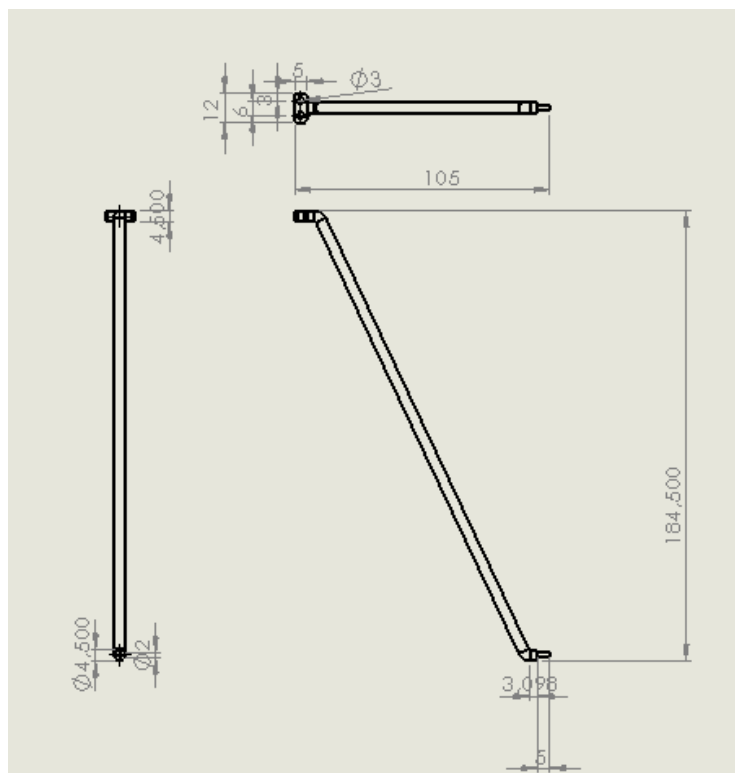
Σχήμα Γ.45. Κάτω κυκλικό τμήμα σκελετού βάσης.



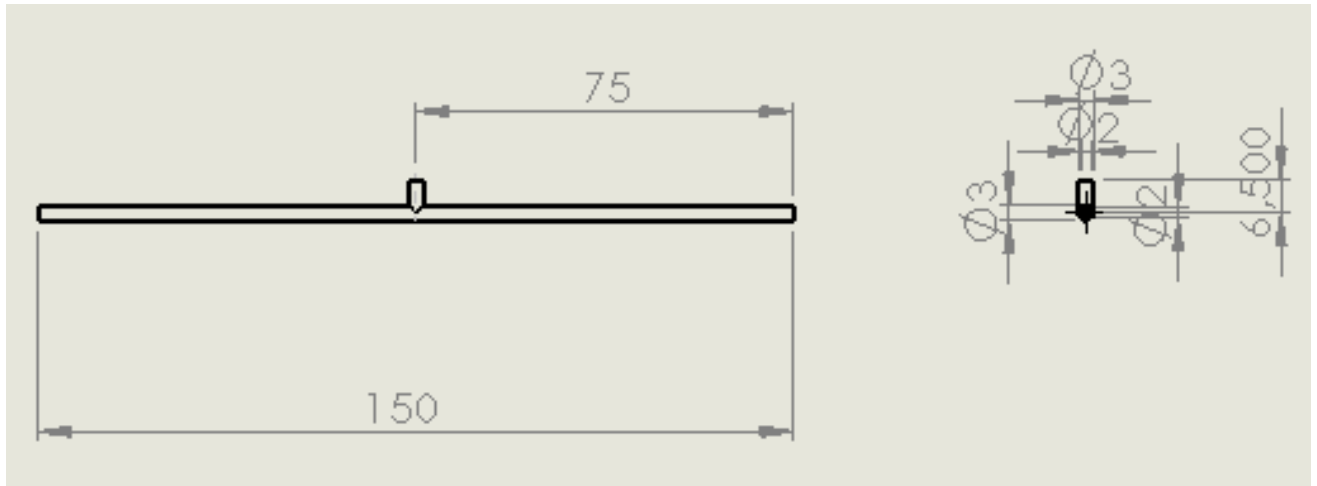
Σχήμα Γ.46. Κολώνες σκελετού βάσης.



Σχήμα Γ.47. Έρεισμα σερβοκινητήρα πρώτης ανεξάρτητης περιστροφής.



Σχήμα Γ.48. Κύριο σώμα ποδιών προσγείωσης.



Σχήμα Γ.49. Πλαστικό μέρος ποδιών προσγείωσης.

