

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδίαση και Ανάπτυξη Ρομποτικής Άρθρωσης για την Προσομοίωση της Ανθρώπινης Κίνησης Περπατήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φοιτητής: Ξενίδης Απόστολος
Αριθμός Μητρώου: ΤΜ20052
Επιβλέπων Καθηγητής: Παναγιώτης Πολυγερινός

Ηράκλειο © 2025



HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Design and Development of a Robotic Joint for Simulating Human Walking Motion

DIPLOMA THESIS

Student: Xenidis Apostolos
Registration Number: TM20052
Supervisor: Panagiotis Polygerinos

Ηράκλειο © 2025

Υπεύθυνη Δήλωση : Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Ηράκλειο © 2025

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη σχεδίαση, ανάπτυξη, κατασκευή και ανάλυση μιας ρομποτικής άρθρωσης που προσομοιώνει την ανθρώπινη κίνηση βάδισης. Η εξέλιξη της ρομποτικής τεχνολογίας είχε πάντα την προσοχή και το ενδιαφέρον του κόσμου όσον αναφορά την κίνηση του ανθρώπου, καθώς βρίσκουν εφαρμογή σε ανθρωποειδή ρομπότ, εξωσκελετούς υποστήριξης και ιατρικές διατάξεις αποκατάστασης. Η αποτελεσματική προσομοίωση του φυσικού βαδίσματος αποτελεί πρόκληση λόγω της πολυπλοκότητας των βιολογικών αρθρώσεων και των αλληλεπιδράσεών τους με το περιβάλλον.

Στόχος της μελέτης είναι η ανάπτυξη μιας βιομηχανικής άρθρωσης που συνδυάζει προηγμένες κινηματικές και δυναμικές αρχές με βιομιμητικές στρατηγικές σχεδίασης. Η ανάλυση περιλαμβάνει τον μηχανικό σχεδιασμό της άρθρωσης, τη βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της, καθώς και την επιλογή κατάλληλων υλικών που διασφαλίζουν αντοχή, χαμηλό βάρος και ομαλή λειτουργία. Παράλληλα, εφαρμόζονται προηγμένες μέθοδοι ελέγχου, όπως PID και προσαρμοστικοί αλγόριθμοι, που σε συνδυασμό με αισθητήρες και μικροελεγκτές (Esp32, Encoders, IMU) επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση της κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη εξωτερικές διαταραχές και μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Η μεθοδολογία της εργασίας περιλαμβάνει τη θεωρητική ανάλυση της κίνησης της άρθρωσης, τη δημιουργία προσομοιώσεων για την αξιολόγηση της κινηματικής και δυναμικής της συμπεριφοράς, καθώς και την κατασκευή ενός φυσικού πρωτοτύπου. Οι πειραματικές δοκιμές θα επικεντρωθούν στη σύγκριση της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα με αυτήν μιας ανθρώπινης άρθρωσης, αξιολογώντας παραμέτρους όπως η ομαλότητα, η σταθερότητα και η ενεργειακή απόδοση.

Η καινοτομία της συγκεκριμένης μελέτης έγκειται στη βελτίωση του ελέγχου και της κινηματικής συμπεριφοράς της ρομποτικής άρθρωσης, επιτρέποντας την ανάπτυξη μηχανισμών που μπορούν να ενσωματωθούν σε προχωρημένα μηχατρονικά συστήματα καθώς και ως πειραματικό μοντέλο προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας αναμένεται να δείξουν ότι μια καλά σχεδιασμένη άρθρωση, με κατάλληλη δυναμική και έξυπνη ελεγκτική στρατηγική, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη φυσικότητα της ρομποτικής βάδισης καθώς και να βοηθήσει σε τυχόν πειράματα που ενδέχεται να χρειάζονται έναν τέτοιο μηχανισμό. Μέσω αυτής της εργασίας, επιδιώκεται η συμβολή στην εξέλιξη της ρομποτικής τεχνολογίας, διευρύνοντας τις δυνατότητες ανάπτυξης ρομποτικών συστημάτων που προσομοιώνουν με ακρίβεια την ανθρώπινη κίνηση.

Λέξεις Κλειδιά: Σχεδίαση-ανάπτυξη-κατασκευή- ανάλυση Ρομποτικής άρθρωσης, Προσομοίωση φυσικού βαδίσματος, Βιομιμητικές, Μέθοδοι Ελέγχου, Κινηματική και Δυναμική Συμπεριφορά

Ηράκλειο © 2025

Abstract

This thesis concerns the design, development, construction and analysis of a robotic joint that simulates human walking motion. The evolution of robotic technology has always had the attention and interest of the world regarding human movement, as they find application in humanoid robots, exoskeletons and medical rehabilitation devices. Effective simulation of natural walking is a challenge due to the complexity of biological joints and their interactions with the environment.

The aim of the study is to develop a joint that combines advanced kinematic and dynamic principles with biomimetic design strategies. The analysis includes the mechanical design of the joint, the optimization of its geometric characteristics, as well as the selection of appropriate materials that ensure strength, low weight and smooth operation. At the same time, advanced control methods are applied, such as PID and adaptive algorithms, which in combination with sensors and microcontrollers (Esp32, Encoders, IMU) allow for precise regulation of the movement, considering external disturbances and changing conditions.

The methodology of the work includes the theoretical analysis of the joint movement, the creation of simulations to evaluate its kinematic and dynamic behavior, as well as the construction of a physical prototype. Experimental tests will focus on comparing the movement of the robotic arm with that of a human joint, evaluating parameters such as smoothness, stability and energy efficiency.

The innovative element of this study lies in the improvement of the control and kinematic behavior of the robotic joint, allowing the development of mechanisms that can be integrated into advanced mechatronic systems as well as an experimental simulation model. The results of the research are expected to show that a well-designed joint, with appropriate dynamics and intelligent control strategy, can significantly improve the naturalness of robotic walking as well as help in any experiments that may require such a mechanism. Through this work, the contribution to the evolution of robotic technology is sought, expanding the possibilities of developing robotic systems that accurately simulate human movement.

Keywords: Design-development-fabrication-analysis of Robotic joints, Natural gait simulation, Biomimetics, Control methods, Kinematics and Dynamic Behavior

Ηράκλειο © 2025

Ευχαριστίες

Με το πέρας της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και συνέβαλλαν στην πραγματοποίηση της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Πολυγερινό Παναγιώτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, την καθοδήγηση και το αμείωτο ενδιαφέρον του καθώς και την αφοσίωση και την υπομονή του για την εκμάθηση της ρομποτικής σε προσωπικό επίπεδο. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω και τον Σιμάτο Οδυσσέα, επιβλέπων της εργαστηριακής μου πορείας όσον αναφορά την συγκεκριμένη εργασία καθώς και όλα τα παιδιά στο εργασιακό περιβάλλον της Bendabl που με βοήθησαν να αποκτήσω επιπλέον γνώσεις σε όλο το ηλεκτρομηχανολογικό φάσμα ακόμη και σε διαφορετικούς τομείς.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου συμπεριλαμβανομένων και των φίλων μου για την στήριξη, την συμπαράσταση, το χαμόγελο και την κατανόηση που μου προσφέρανε διάπλατα τόσο καιρό καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου αλλά και εκτός αυτών.

The work was supported by the European Union through the SWAG Project under Grant 101120408.

Ηράκλειο © 2025

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **1**

ABSTRACT **2**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ **3**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ **4**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΙ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΠΟΜΠΩΝ **6**

Κατάλογος Εικονων 6
Κατάλογος Πινακων 11

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **13**

1.1 Στοχος Διπλωματικης Εργασιας 13
1.2 Συνοπτικη Βιβλιογραφικη Ανασκοπηση 13
1.2.1 Προσεγγίσεις Ανθρώπινης Κίνησης σε Ρομποτικά Συστήματα *13*
1.2.2 Πειραματικά Δεδομένα και Βάδιση *14*
1.2.3 Soft Επενεργητές για Υποβοήθηση Κίνησης *15*
1.2.6 Συμπεράσματα *23*
1.3 Δομη Εργασιας 23

2. ΘΕΩΡΙΑ **24**

2.1 Εισαγωγη στην Ανθρωπινη Βαδιση και την Βιο-Εμπνευσμενη Μηχανικη 24
2.1.1 Ανθρώπινη Βάδιση *25*
2.1.2 Βίο-εμπνευσμένη Μηχανική *26*
2.1.3 Ανάλυση και Υπολογισμοί με Σκοπό την Εύρεση Προδιαγραφών του Συστήματος *27*
2.1.4 Γραφικές Παραστάσεις και Δημιουργία Τροχιάς *30*

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΆΡΘΡΩΣΗΣ **34**

3.1 Κινηματικες Εξισωσεις 34
3.1.1 Ευθύ Κινηματικό *35*
3.1.2 Αντίστροφο Κινηματικό *36*
3.2 Δυναμικες Εξισωσεις 36
3.3 Κινηματικες και Δυναμικες Εξισωσεις του Συστηματος 39
3.4 Νομος Ελεγχου 40
3.4.1 Αισθητήριο Όργανο Ανάδρασης *42*

4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ **44**

4.1 Σχεδιαστικες Απαιτησεις και Περιορισμοι 44
4.2 Πρωταρχικα Σχεδια και Ιδεες Μηχανισμων 45
4.3 Σχεδιαση σε Τρισδιαστατο Περιβαλλον 47
4.3.1 Πρωτότυπα Σχέδια σε Τρισδιάστατο Περιβάλλον *50*
4.3.2 Σχεδίαση Τελικών Εξαρτημάτων *53*
4.4 Διαγραμμα Ελευθερου Σωματος και Προσομοιωσεις Συστηματος Βραχιονα 61
4.4.2 Προσομοίωση Βραχίονα σε Καταπονήσεις μέσα σε Προγραμματιστικό Περιβάλλον *64*
4.4.3 Επιλογή Κινητήρα *74*
4.4.4 Μηχανικό Υποσύστημα *76*
4.4.5 Ηλεκτρονικό Υποσύστημα *82*

5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΆΡΘΡΩΣΗΣ (ΠΟΔΙΟΥ) **89**

5.1 Εξοπλισμος και Κατεργασιες 89
5.1.1 Τρισδιάστατη Εκτύπωση *89*
5.1.2 Τόρνευση *91*
5.1.3 Κοπή με Laser *92*

Ηράκλειο © 2025

4.2 Κατασκευη και Συναρμολογηση 93

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 95

6.1 Μεμονωμενος Έλεγχος και Βαθμονομηση Εξαρτηματων 95
6.1.1 Ανάπτυξη Κώδικα Λειτουργίας IMU και Έλεγχος Ακρίβειας 95
6.1.2 Έλεγχος Λειτουργίας Βηματικού Κινητήρα 98
6.2 Αναπτυξη Ολοκληρωμενου Συστηματος Ελεγχου 98
6.2.1 Αρχιτεκτονική Ελέγχου με FreeRTOS 98
6.2.2 Υλοποίηση Ελεγκτή PID με Προτροφοδότηση (Feedforward) 99
6.2.3 Πειραματική Ρύθμιση μέσω Διαδραστικών Ρυθμίσεων και Γραφημάτων 99
5.2.4 Ανάπτυξη Κώδικα Python για Ρύθμιση Όρων Ελέγχου σε Προκαθορισμένα Τριγωνικά και Ημιτονοειδή Μονοπάτια 102
6.3 Προσομοιωση Ανθρωπινης Βαδισης 105
6.3.1 Εκτέλεση Προκαθορισμένου Μονοπατιού Κίνησης 105
6.3.2 Ανθρώπινη Βάδιση με Άσκηση Δύναμης Εξωτερικών Παραγόντων 108
6.3.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων 110

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 112

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 117

8. ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ 120

9. ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ 121

Ηράκλειο © 2025

Κατάλογοι Εικόνων, Πινάκων και Παραπομπών

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Σύστημα καταγραφής κίνησης τύπου VICON 14
Εικόνα 2. Ρομποτικός Soft Επενεργητής ‘’Γάντι’’ υποβοήθησης χειρός [13], μέσω ειδικά διαμορφωμένων θηκών οι οποίες προσαρμόζονται σε κατάλληλη θέση εξωτερικά του χεριού ασκείται πίεση μέσω αέρα προκαλώντας έτσι την κίνηση του χεριού υπο συγκεκριμένη πορεία. 15
Εικόνα 3. (a) Soft επενεργητής χωρίς ασκούμενη πίεση αέρα στο εσωτερικό του),(b) πρόοψη με ασκούμενη πίεση αέρα στο εσωτερικό του και (c) αριστερή λοξή όψη με ασκούμενη πίεση αέρα στο εσωτερικό του 16
Εικόνα 4. Soft Επενεργητής Υποβοήθησης Υπό Τρείς Καταστάσεις Κίνησης και Ενεργοποίησης (a,b περιπτώσεις μη ενεργοποιημένου επενεργητή σε ευθεία και υπο γωνία θέση, c περίπτωση ενεργοποίησης επενεργητή) 17
Εικόνα 5. Υφασμάτινα ρευστομυΐκα φύλλα για εφαρμογές σε wearable και soft ρομποτική, στην εικόνα φαίνονται στα (A), (B), (C) οι τρόποι με τους οποίους δρούν οι επενεργητές ενώ στις (D), (E), (F), (G) οι διακρίνονται διαφορετικοί τρόποι που μπορεί να δράσει (εφελκυστικά, καμπτικά, πίεσης κοκ.) 18
Εικόνα 6. Τετράποοι ρομποτικοί μηχανισμοί (a) StarIETH [17] και (b) ANYmal-D [18] που αναπτύχθηκαν στο πανεπιστήμιο ETH Zurich 19
Εικόνα 7. (a) Σύστημα Fibre Jamming τα οποία λειτουργούν μέσω ειδικά διαμορφωμένων επενεργητών οι οποίοι είναι παρόμοιοι με αυτός του ανθρώπινου τένοντα [30], (b) Ανάλυση και ανάπτυξη μέλους τετράποδου ρομποτικού μηχανισμού [29] 20
Εικόνα 8. (a) Σύστημα ύδρο-υδραυλικών επενεργητών για την κίνηση ενός βραχίονα [23[, (b) Πρωτότυπο σχέδιο ιμάντα-τροχαλίας για την κίνηση μιας άρθρωσης άρα και του κάτω μέρους του ποδιού [26] 20
Εικόνα 9. Σύγκριση της απόκρισης ταχύτητας κινητήρα με έλεγχο PID και feedforward (προστιθέμενη πρόβλεψη) έναντι της επιθυμητής τροχιάς (step demand). Παρατηρείται η βελτιωμένη απόκριση και μείωση του σφάλματος όταν χρησιμοποιείται ο συνδυασμός PID + feedforward, σε σύγκριση με τον αποκλειστικά PID έλεγχο, ιδιαίτερα σε δυναμικές κινήσεις όπως η ρομποτική βάδιση. Τα δεδομένα προέρχονται από πειραματική μελέτη ελέγχου ρομποτικής άρθρωσης [37] 22
Εικόνα 10. Leonardo’s Robot [31] 24
Εικόνα 11. Εξέλιξη ανθρώπινου βαδίσματος -3- 25
Εικόνα 12. Πλήρης κύκλος ανθρώπινης βάδισης, περίοδος στήριξης (στην οποία εμπεριέχεται και η μονοποδική στήριξη), περίοδος αιώρησης [28] 25
Εικόνα 13. Μια από τις Πρώτες Ιστορικά Αναφορές Βίο-Μηχανικής [27] 26
Εικόνα 14. Κύκλος Βάδιση σε Σύγκριση με την Κίνηση Κάθε Άρθρωσης (Ισχίο/Γόνατο/Αστράγαλος) Σύμφωνα με τα Δεδομένα που Συλλέχτηκαν, Πράσινο Γράφημα (Ισχίο), Μώβ Γράφημα (Γόνατο), Γαλάζιο Γράφημα (Αστράγαλος)) 31
Εικόνα 15. Γωνία αρθρώσεων για ένα κύκλο βαδίσματος κατά την βάδιση σε διάδρομο κίνησης. 32

Εικόνα 16. Γραφικές παραστάσεις γωνίας/ταχύτητας/ροπής ανά δευτερόλεπτο κάθε άρθρωσης (Ισχίου/Γονάτου/Αστραγάλου) σε έναν κύκλο βαδίσματος , με σκοπό την σύγκριση τους 33
Εικόνα 17. Διάγραμμα Βραχίονα Ποδιού Τριών Βαθμών Ελευθερίας 35
Εικόνα 18. Function block diagram συστήματος ελέγχου 41
Εικόνα 19. Αρχή Λειτουργίας Αισθητήρων IMU 42
Εικόνα 20. Διαστάσεις πρωτότυπου Soft Επενεργητή υποβοήθησης, μέτρηση μήκους 190 mm και πλάτους 74 mm επενεργητή για τον καθορισμό των διαστάσεων του, επίσης φαίνονται τα ‘’straps’’ τα οποία χρειάζονται για την εφαρμογή στου Soft επενεργητή στο πόδι καθώς και ο σωλήνας εισόδου του αέρα 45
Εικόνα 21. Πλάγια όψη πρωτότυπων σχεδίων διαφόρων μηχανισμών, (a) Μηχανισμός σε μορφή ελευθέρου σώματος, (b) Μηχανισμός με σύστημα τροχαλίας και ιμάντα, (c) Μηχανισμός με σύστημα κινούμενων βραχιόνων με κινητήρα, (d) Μηχανισμός με σύστημα κινούμενων βραχιόνων με υδραυλικό επενεργητή 46
Εικόνα 22. Κάτοψη διαφορετικών συστημάτων με μηχανισμό Τροχαλίας-Ιμάντα, (a) ο ιμάντας Βρίσκεται στο εσωτερικό του βραχίονα, (b) ο ιμάντας βρίσκεται εξωτερικά του βραχίονα 47
Εικόνα 23. Συναρμολογημένο και ολοκληρωμένο σύστημα βραχίονα 48
Εικόνα 24.Αριθμημένα μέρη συστήματος 49
Εικόνα 25. Πρωτότυπο σχέδιο μηχανισμού έπειτα από πρόχειρα σκίτσα για καλύτερη κατανόηση του συστήματος και δημιουργίας μίας πρώτης ιδέας 50
Εικόνα 26.(α) Αρχική πρωτότυπη τρσιδιάστατη μοντελοποίηση ''a'' περίπτωσης Εικόνα 22 και Τομή στο μέσο της για φανέρωση του συστή ιμάντα τροχαλίας στην προκειμένη περίπτωση 50
Εικόνα 27. Συναρμοζόμενο Δοκιμαστικό τρισδιάστατο σχέδιο με ενδιάμεσο κενό κινούμενου μέλους ίσο με 66 mm, τομή σχεδίου και ένδειξη απόστασης κενού επενεργητή 128 mm σε ευθεία θέση πράγμα που το καθιστά κακή επιλογή για το αναπτυσσόμενο σύστημα 51
Εικόνα 28. Τελικό σχέδιο άκρου βραχίονα (κινούμενο μέλος και σταθερό μέλος), παρατηρείται πλέον πώς το διάκενο μειώνεται στα 38 mm και το κενό μεταξύ 52
Εικόνα 29. Πλάγιες όψεις ολοκληρωμένου βραχίονα για ακριβέστερη κατανόησημ, (πάνω φαίνεται η δεξιά πίσω πλάγια όψη και κάτω η αριστερή πίσωπλάγια όψη) 53
Εικόνα 30. Βάση συστήματος με υποδοχή κινητήρα ,μειωτήρα και μικροελεγκτή, Driver, τεντωτήρα, τροχαλία και ασφάλεια τροχαλίας με τον άξονα και ιμάντα σε πίσω δεξιά πλάγια όψη 54
Εικόνα 31. Κάτοψη ένωσης χελιδονούρας μεταξύ βάσης και σταθερού μέλους (κάτοψη), όψεις ένωσης 55
Εικόνα 32. Τεντωτήρας σκαλοπατιών, κάλυμμα ασφαλείας και σκαλοπάτια βάσης σε πίσω δεξιά πλάγια όψη 56
Εικόνα 33. Τομή στο Μέσο του Τεντωτήρα για την Ανάλυση Των Εξαρτημάτων του, στην τομή φαίνεται η θέση των ρουλεμάν, του άξονα και τα αρσενικά μέρη των σκαλοπατιών 56
Εικόνα 34. (a) Συνολικό σύστημα στήριξης σε πίσω αριστερή πλάγια όψη, (b) σημείο σταθεροποίησης ροπών σε πίσω αριστερή πλάγια όψη και (c) σημείο σταθεροποίησης θέσης σε πίσω δεξιά πλάγια όψη 57

Εικόνα 35. Σύστημα μετάδοσης κίνησης με τομή, η κίνηση μεταφέρεται από τον κινητήρα στον μειωτήρα 5:1, έπειτα συνεχίζει στην τροχαλία της βάσης και από εκεί μεταφέρεται μέσω του ιμάντα στην τροχαλία του κινούμενου μέλους 58
Εικόνα 36. Σταθερό μέλος ποδιού σε μπροστά δεξιά πλάγια όψη..... 59
Εικόνα 37. Σταθερό Μέλος Ποδιού σε μπροστά δεξιά και αριστερή πλάγια όψη καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτού (Εσοχή Ασφάλισης, Υποδοχές Άξονα Φ18 και Κουζινέτων, Ελεύθερη Επιφάνεια Soft Επενεργητή, Εσοχή Καλωδίων, Εσοχή Τεντωτήρα, Υποδοχές Ανανεωμένου Soft Επενεργητή, Υποδοχές Ένωσης με Βάση . 59
Εικόνα 38. Κινούμενο μέλος ποδιού σε πλάγια όψη 60
Εικόνα 39. Τομή κινούμενου μέλους στο μέσο και η εσωτερική ενίσχυση αυτού ... 61
Εικόνα 40. Υποδοχή IMU και καπάκι στο άκρο του κινούμενο μέλος 61
Εικόνα 41. Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος Βραχίονα..... 62
Εικόνα 42. Ανάλυση δυνάμεων στο κινούμενο μέλος του βραχίωνα, εδώ το κινούμενο μέλος παρουσιάζεται ως πακτωμένο με σκοπό την ανάλυση του ως προς τις δυνάμεις και τις ροπές που δέχεται 63
Εικόνα 43. Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος Σταθερού Μέλους Βραχίονα καθώς και Ανάλυση των Δυνάμεων ως προς την Βάση,..... 63
Εικόνα 44. Ασκούμενες Δυνάμεις ανά Τοποθέτηση Εκτύπωσης (Miguel Ángel Caminero [5]), (a) Σε Επίπεδη Θέση, (b) Σε Όρθια Θέση, (c) Σε πλάγια Θέση, Η Γαλάζια Γραμμή Αναπαριστά τις Αντοχές στο PLA..... 65
Εικόνα 45. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Βάσης Βραχίονα 67
Εικόνα 46. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Τεντωτήρα (a. Στα μέρη από PLA, b. Στον Χαλύβδινο Άξονα)..... 68
Εικόνα 47. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Βάσης Βραχίονα μέσω Τεντωτήρα..... 69
Εικόνα 48. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Σταθερού Μέλους Βραχίονα (a. η μέγιστη δύναμη διαρροής αποκλειστικά από τον επενεργητή, b. δυνάμεις λόγο δυνάμεων από τον άξονα)..... 70
Εικόνα 49. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Κύριου Άξονα Σταθερού Μέλους Βραχίονα..... 71
Εικόνα 50. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Πρώτης Έκδοσης Κινούμενου Μέλους Βραχίονα..... 72
Εικόνα 51. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Δεύτερης Έκδοσης με Ενίσχυση Τιτανίου 73
Εικόνα 52. Stepper Κινητήρας Nema 34..... 74
Εικόνα 53. Σχέση Ταχύτητας-Ροπής Κινητήρα Nema 34 75
Εικόνα 54. Ιμάντας Τύπου S8M 80
Εικόνα 55. Τομή Άξονα Άκρου με όλα τα Στοιχεία που τον Συμπληρώνουν (Τροχαλία, Ιμάντας, Κουζινέτα, Κινούμενο Μέλος Ποδιού, Άξονας Φ18, Αποστάτες, Σταθερό Μέλος Ποδιού, Καπάκι Ασφάλισης, Ασφάλεια άξονα 82
Εικόνα 56. Διάγραμμα Συνδεσμολογίας Μικροελεγκτή 84
Εικόνα 57. Αισθητήρας IMU 9 AXIS MPU-9250..... 85
Εικόνα 58. Stepper Driver (DM860T)..... 86
Εικόνα 59. Σχεδιάγραμμα Ηλεκτρολογικού Κυκλώματος Συστήματος..... 87

Ηράκλειο © 2025

Εικόνα 60. Πρωτότυπη Πλακέτα Ηλεκτρολογικού Συστήματος, (a) Μπροστά Όψη, (b) Πίσω Όψη 88
Εικόνα 61. Σύνολο Εκτηπωμένων Τεμαχίων του Συστήματος, Βάση-Κινούμενο Μέλος-Σταθερό Μέλος Βραχίονα, Στηρίγματα Βάσης, Ασφάλειες-Καπάκια Αξόνων, Ασφάλεια Τεντωτήρα 90
Εικόνα 62. Ρυθμίσεις Εκτύπωσης, (α) Περιμετρικές στρώσεις ενίσχυσης, (β) Γενικές περιμετρικές στρώσεις, (γ) Εσωτερική πλήρωση 20% και (δ) Εσωτερική πλήρωση 40% 90
Εικόνα 63. Ακατέργαστη Τροχαλία 91
Εικόνα 64. Δημιουργία καλουπιού τροχαλίας για την έπειτα κατεργασία στον τόρνο 91
Εικόνα 65. Διαδικασία ακτινομέτρησης τροχαλίας στον τόρνο, τοποθέτηση τροχαλίας, ακτινομέτρηση και κατεργασία 92
Εικόνα 66. Τελικό κατεργασμένο τεμάχιο τροχαλίας,, στην αριστερή εικόνα φαίνεται η εσοχή για άξονα έπειτα από κατεργασία ενώ στην δεξιά εικόνα διακρίνεται η εσοχή για την βίδα του άξονα με σκοπό τον περιορισμό της τροχαλίας σε αυτόν ... 92
Εικόνα 67. Ενίσχυση κινούμενου μέλους και σχέδιο μορφής DXF 93
Εικόνα 68. Αρχή κοπής λέιζερ 93
Εικόνα 69. Μέλη κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης 94
Εικόνα 70. Συναρμολογημένο σύστημα βραχίονα με σύστημα κίνησης, αισθητήρα και μικροελεγκτή 94
Εικόνα 71. Πρώτος Τρόπος Ελέγχου Ακρίβειας Αισθητήρα IMU μέσω Σειριακής και Μοιρογνωμονίου στον Άξονα 97
Εικόνα 72. Έλεγχος Ακεραιότητας IMU Μέσω του Προγράμματος Kinovea σε Διαφορετικές Γωνίες του Βραχίονα 97
Εικόνα 73. Ακολουθία τροχιάς βραχίονα Μόνο με PID όρους, στο πάνω γράφημα Γωνίας-Χρόνου εμφανίζεται με κόκκινη γραμμή η επιθυμητή γωνία και με μπλε η γωνία που βρίσκεται ο κινούμενο μέλος εκείνη την στιγμή, στο κάτω γράφημα Σφάλματος-Χρόνου με πράσινο εμφανίζεται το σφάλμα, το σύστημα είναι χωρίς προτροφοδότηση. έτσι είναι εμφανής η χρονοκαθυστέρηση και το μέγιστο σφάλμα στις ανέρχεται στις 10 Μοίρες, οι μπάρες κάτω ‘’sliders’’ είναι ρυθμιζόμενες για την κατάλληλη επιλογή των PID όρων 100
Εικόνα 74. Γράφημα Βραχίονα με Μηδενικό Ρεύμα στο σύστημα κίνησης. Εδώ αναδεικνύονται καλύτερα οι δύο γραμμές του Στόχου της Γωνίας (Target Angle, Διασπώμενη Κόκκινη Γραμμή) και η γωνία του Αισθητήρα την Δεδομένη Στιγμή (IMU Angle, Μπλέ Συνεχής Γραμμή) 101
Εικόνα 75. Πλήρες εύρος κίνησης βραχίονα από 135° έως και -135°, όταν ο κινητήρας περιστρέφεται δεξιόστροφα οι γωνίες είναι αρνητικές ενώ όταν κινείται αριστερόστροφα θετικές 101
Εικόνα 76. Κίνηση Βραχίονα με Ελάχιστη Προτροφοδότηση, Παρατηρείται Χαμηλή Ακολουθία του Μονοπατιού χωρίς να Υπάρχει Πιστότητα Κίνησης, το σφάλμα πλέον είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με την ποθητή τιμή και γι αυτό η γραμμή φεύγει εκτός του άξονα y 102
Εικόνα 77. Προσθήκη μεγαλύτερης προτροφοδότησης, πιστή ακολουθία μονοπατιού αλλά σε μεγαλύτερες γωνίες εκτός κανονικής τροχιάς, το σφάλμα εφόσων είναι μεγαλύτερο των 10 μοιρών δεν εμφανίζεται 103

Εικόνα 78. Πλήρως ρυθμισμένος PID έλεγχος με προτροφοδότηση σε ημιτονοειδές μονοπάτι..... 104
Εικόνα 79. Πλήρως ρυθμισμένος PID έλεγχος με προτροφοδότηση σε τριγωνοειδές τροχιά, σε αυτή την περίπτωση γίνονται πειραματισμοί στις απότομες αλλαγές γωνίας..... 105
Εικόνα 80. Ακολουθία Μονοπατιού Ισχίου Ρομποτικού Βραχίονα, παρατηρείται μέσος όρος σφάλματος 3 μοιρών ενώ σε συγκεκριμένα σημεία απότομων αλλαγών φαίνονται κάποια spikes 106
Εικόνα 81. Ακολουθία μονοπατιού γονάτου ρομποτικού βραχίονα, μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται κατά την διάρκεια της απότομης πτώσης της γωνίας όπου ο έλεγχος προσπαθεί να προλάβει την τροχιά 107
Εικόνα 82. Ακολουθία μονοπατιού αστραγάλου ρομποτικού βραχίονα, εδώ παρατηρούνται πολύ περισσότερες αστάθειες αφού το εύρος περιστροφής στην συγκεκριμένη τροχιά είναι πολύ μικρό οπότε οι 5 μοίρες διακρίνονται πιο εύκολα 107
Εικόνα 83. Εφαρμοσμένος Soft επενεργητής στον βραχίονα χωρίς να του ασκείται εσωτερική πίεση..... 108
Εικόνα 84.Εφαρμοσμένος Soft επενεργητής στον Βραχίονα με Άσκηση Πίεσης 109
Εικόνα 85. Γράφημα βραχίονα στο οποίο παρατηρείται η αντίδραση του συστήματος απο τον Soft επενεργητή όταν του ασκείται δύνμαμη πιέσεως 1 Bar, η αντίδραση φαίνεται κυκλωμένη με πράσινο χρώμα 109
Εικόνα 86. Αναβαθμισμένος κινητήρας μελλοντικής εργασίας, Servostepper DSY-1200RS..... 112
Εικόνα 87. Φλάντζα κινητήρα 1000W – μειωτήρα 113
Εικόνα 88. Μελλοντική εργασία ανάπτυξης συστήματος τριών βαθμών ελευθερίας 114

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Τελικές Τιμές Στιγμιαίας Ροπής, Μέγιστης Γωνίας και Μέγιστης Ροπής για την Δημιουργία Προδιαγραφών του Κινητήρα 29
Πίνακας 2. Μέγιστες Τιμές Ροπής/Γωνίας/Ταχύτητας Διαφορετικών Περιπτώσεων Κίνησης Αρθρώσεων 29
Πίνακας 3.Απαιτούμενες Τιμές και Περιορισμοί για την Επιλογή Κινητήρα 30
Πίνακας 4. Τελικές Απαιτούμενες Τιμές και Περιορισμοί για την Επιλογή Κινητήρα με Υποβοήθηση 30
Πίνακας 5. Αριθμημένα μέρη συστήματος 49
Πίνακας 6. Προδιαγραφές Συστήματος Μετάδοσης για την Λειτουργία του Βραχίονα 74
Πίνακας 7.Χαρακτηριστικά Stepper Nema 34 Χωρίς Προσθήκη Μειωτήρα 75
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά Stepper Nema 34 Με Προσθήκη Μειωτήρα 75
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά Μηχανής για την Εύρεση Ιμάντα 76
Πίνακας 10. Προδιαγραφές Απαιτούμενου Ιμάντα ως Αποτέλεσμα των Υπολογισμών 79
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά Κουζινέτων 80
Πίνακας 12.Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή 83
Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά IMU 9 AXIS MPU-9250 85
Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά Driver Βηματικού Κινητήρα 87
Πίνακας 15. Όροι Νόμου Ελέγχου Συστήματος Kp, Kd, Ki και Kv Έπειτα απο Πειραματισμούς σε Ημιτονοειδές Σήμα 103
Πίνακας 16. Όροι Νόμου Ελέγχου Συστήματος Kp, Kd, Ki και Kv Έπειτα απο Πειραματισμούς σε Τριγωνοειδές Σήμα 104
Πίνακας 17. Τελικοί Όροι Ελέγχου Kp, Kd, Ki και Kv Έπειτα απο Πειραματισμούς του Συστήματος 105
Πίνακας 18.Χαρακτηριστικά DSY-1200RS Χωρίς Προσθήκη μειωτήρα 112
Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά DSY-1200RS Με Προσθήκη Μειωτήρα 113

Κατάλογος Παραπομπών

Παραπομπή 1. Συντελεστής Διόρθωσης Service (Ko) 121
Παραπομπή 2. Παράγοντες Λόγου Μείωσης και Τεντωτήρα (Kr , Ki) 121
Παραπομπή 3. Επιλογή Τύπου Οδόντωσης Ιμάντα 122
Παραπομπή 4. Επιτρεπόμενος Αριθμός Οδοντώσεων ανά Τύπο Ιμάντα 122
Παραπομπή 5. Καθορισμένα Πλάτη Ιμάντα..... 122
Παραπομπή 6. Συντελεστής Διόρθωσης Οδοντώσεων σε Επαφή με την Τροχαλία 122
Παραπομπή 7. Βασική Εκτίμηση Ισχύος 123
Παραπομπή 8. Κατάλογος Ιμάντα Κατασκευαστή 123
Παραπομπή 9. Συντελεστής Διόρθωσης Πλάτους του Ιμάντα..... 124
Παραπομπή10.Επιλογή PV κουζινέτου τύπου PTFE 124
Παραπομπή 11. Κώδικας Μικροελεγκτή..... 124
Παραπομπή 12. Κώδικας Python Ανάγνωσης CSV και Εντολών στο Arduino IDE ... 129
Παραπομπή 13. Κώδικες Python για Επίτευξη Ημιτονοειδούς και Τριγωνοειδούς Μονοπατιού 136

1. Εισαγωγή

1.1 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάπτυξη και κατασκευή μιας προηγμένης ρομποτικής άρθρωσης, σχεδιασμένης ώστε να προσομοιώνει την ανθρώπινη κίνηση κατά το περπάτημα. Η άρθρωση θα καθοδηγείται από κατάλληλο ηλεκτρικό επενεργητή και θα επιδιώξει να μιμηθεί την φυσική κίνηση των βασικών αρθρώσεων του ποδιού (ισχίο, γόνατο, αστράγαλος).

Η εργασία περιλαμβάνει τη δημιουργία πλήρους CAD σχεδίου, την κατασκευή μηχανολογικού συστήματος, την ανάπτυξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καθώς και τον σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου, που θα επιτρέψει την ακριβή προσομοίωση των κινήσεων.

Επιπλέον, η ρομποτική διάταξη θα αξιοποιηθεί ως πειραματική πλατφόρμα για την αξιολόγηση εύκαμπτων επενεργητών (Soft Robots), οι οποίοι αναπτύσσονται για να επιτύχουν την διαδικασία υποβοήθησης της ανθρώπινης βάδισης.

Μέσω της διαδικασίας κατασκευής και αξιολόγησης του ρομποτικού αυτού συστήματος, η εργασία συμβάλλει στην έρευνα για την εξέλιξη ρομποτικών διατάξεων που προσομοιώνουν με ακρίβεια την ανθρώπινη κίνηση, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα τις ρομποτικές τεχνολογίες της επόμενης γενιάς.

1.2 Συνοπτική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η μελέτη της ανθρώπινης κίνησης και της εφαρμογής της σε ρομποτικά συστήματα έχει γνωρίσει αξιόλογη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, καθώς η ανάγκη για βιομιμητικά και ενεργειακά αποδοτικά ρομποτικά μέλη έχει αυξηθεί. Στην παρούσα εργασία, κατά την οποία αναπτύσσεται μια ρομποτική διάταξη για να χρησιμοποιηθεί ως πειραματική πλατφόρμα για την αξιολόγηση εύκαμπτων επενεργητών, η βιβλιογραφική ανασκόπηση επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς άξονες: στον σχεδιασμό ρομποτικών άκρων, στην ανθρωπόμορφη κίνηση τους και στις βασικές αρχές των soft robots.

1.2.1 Προσεγγίσεις Ανθρώπινης Κίνησης σε Ρομποτικά Συστήματα

Η πιο κλασική προσέγγιση για να αναπαραχθεί η ανθρώπινη κίνηση είναι μέσω της μελέτης της κινησιολογίας. Δηλαδή, να καταγραφούν οι γωνίες, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις των αρθρώσεων κατά τη διάρκεια της βάδισης, και στη συνέχεια να προγραμματιστούν αντίστοιχα οι ρομποτικές αρθρώσεις. Ωστόσο, πιο πρόσφατες μέθοδοι βασίζονται και σε machine learning τεχνικές.

Ο Yang και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ‘’ενισχυτική’’ μάθηση (deep reinforcement learning) για να εκπαιδεύσουν ρομποτικούς βραχίονες ώστε να

κινούνται με τρόπο παρόμοιο με ανθρώπινα άκρα, με την χρήση δεδομένων από το σύστημα VICON [2]. Αν και το έργο τους εστίαζε στο άνω άκρο, η βασική ιδέα είναι απόλυτα εφαρμόσιμη και στα πόδια: να δίνεται στο ρομπότ δηλαδή η δυνατότητα να μαθαίνει από πραγματικές κινήσεις.



Εικόνα 1. Σύστημα καταγραφής κίνησης τύπου VICON

Από την άλλη, ο Muscolo και ο Ceccarelli τόνισαν ότι η μηχανική σχεδίαση παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Δεν φτάνει δηλαδή μόνο να έχεις καλούς ελεγκτές· αν ο μηχανισμός δεν είναι μηχανικά αποδοτικός ή δεν έχει σωστή γεωμετρία, η κίνηση θα είναι αφύσικη και ενεργοβόρα [3]. Οπότε ο συνδυασμός μεταξύ σχεδίασης και ελέγχου είναι που κάνει τη διαφορά.

1.2.2 Πειραματικά Δεδομένα και Βάδιση

Η ανθρώπινη βάδιση και άλλες λειτουργικές κινήσεις του κάτω άκρου αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης, τόσο για την κατανόηση της βιομηχανικής λειτουργίας όσο και για την ανάπτυξη βιομιμητικών ρομποτικών συστημάτων. Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν καταγράψει αναλυτικά κινηματικά και δυναμικά δεδομένα, όπως τροχιές αρθρώσεων, ταχύτητες, ηλεκτρομυογραφίας EMG, καθώς και δυνάμεις αντίδρασης από το έδαφος μέσω αισθητήρων. Αυτά τα δεδομένα χρησιμεύουν στη δημιουργία προτύπων βάδισης, στον έλεγχο ρομποτικών ποδιών ή στην προσομοίωση της αποκατάστασης της κίνησης. Για παράδειγμα, ο van der Zee et al. [5] εστίασαν σε παραμέτρους βάδισης όπως η ταχύτητα, το μήκος και το πλάτος του βήματος, ενώ οι Zajac et al. [2] ανέλυσαν τις μυϊκές ροπές και τη συμβολή των επιμέρους μυών στην ισορροπία και τη σταθερότητα. Παράλληλα, οι Raffalt et al. [4] κατέγραψαν τις δυνάμεις αντίδρασης από το έδαφος κατά τη βάδιση, το τρέξιμο και τα άλματα, χρησιμοποιώντας φορητούς αισθητήρες πίεσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το δημοσιευμένο dataset "A human lower-limb biomechanics and wearable sensors dataset during cyclic and non-cyclic activities" του Scherpereel et al. [6], το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον πλήρη δημόσια διαθέσιμα σύνολα δεδομένων για το κάτω άκρο. Περιλαμβάνει μετρήσεις

από IMUs, EMG, οπτική παρακολούθηση, και δυναμοδάπεδα, κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων όπως βάδιση, άρση βάρους, καθίσματα καθώς και πολλά ακόμη. Το πλεονέκτημα του συνόλου αυτού είναι ότι προσφέρει ταυτόχρονα πληροφορία για τις γωνίες, τα φορτία και τη μυϊκή ενεργοποίηση, επιτρέποντας ρεαλιστική αναπαραγωγή της ανθρώπινης κίνησης στο ρομποτικό μοντέλο.

Συμπληρωματικά, εξετάστηκαν και άλλες βάσεις δεδομένων, όπως εκείνη των Mundinger και Kuo [21], που εστιάζει σε ελεύθερη βάδιση και ενεργειακή απόδοση σε διαφορετικές ταχύτητες, και η βάση των Dorschky et al. [22], που συνδυάζει κινηματικά και EMG δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Η αξιοποίηση τέτοιων πειραματικών δεδομένων αντί θεωρητικών ή μοντελοποιημένων τροχιών συμβάλλει στην κατασκευή ρομποτικών αρθρώσεων που μιμούνται ρεαλιστικά το ανθρώπινο πρότυπο, προσφέροντας ομαλότερη κίνηση και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στο περιβάλλον.

1.2.3 Soft Επενεργητές για Υποβοήθηση Κίνησης

Οι Soft Επενεργητές (soft actuators) έχουν αναδειχθεί σε μία από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες για υποβοηθούμενη κίνηση, κυρίως λόγω της προσαρμοστικότητας και της συμβατότητάς τους με το ανθρώπινο σώμα. Αντί να στηρίζονται σε άκαμπτα στοιχεία, βασίζονται σε υλικά όπως σιλικόνη, πολυμερή ή ακόμα και ύφασμα, τα οποία επιτρέπουν φυσική και ασφαλή συνεργασία με τις ανθρώπινες αρθρώσεις.

Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα στην κατηγορία αυτή είναι το έργο του Polygerinos et al. 2015, όπου ανέπτυξαν ένα μαλακό ρομποτικό γάντι για υποβοήθηση στην αποκατάσταση ασθενών με προβλήματα στα δάχτυλα και τον καρπό. Το σύστημα χρησιμοποιεί πνευματικούς επενεργητές ενσωματωμένους σε εύκαμπτες θήκες, οι οποίοι επιτρέπουν κάμψη και έκταση των δακτύλων με ασφαλή και φυσικό τρόπο [13].



Εικόνα 2. Ρομποτικός Soft Επενεργητής ‘’Γάντι’’ υποβοήθησης χειρός [13], μέσω ειδικά διαμορφωμένων θηκών οι οποίες προσαρμόζονται σε κατάλληλη θέση εξωτερικά του χεριού ασκείται πίεση μέσω αέρα προκαλώντας έτσι την κίνηση του χεριού υπό συγκεκριμένη πορεία.

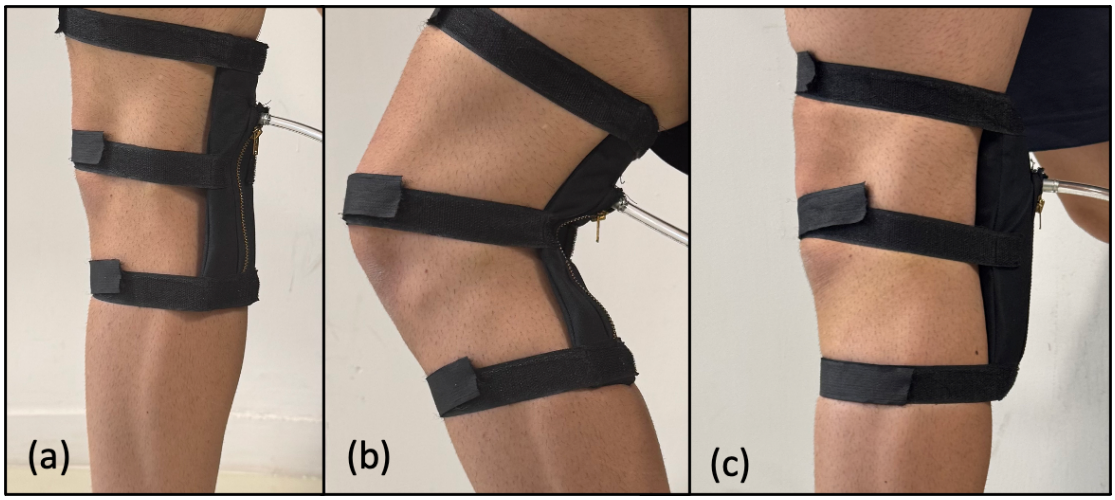
Ηράκλειο © 2025

Το σημαντικό στοιχείο σε αυτή την προσέγγιση είναι η εστίαση στην άνεση και την εργονομία. Οι επενεργητές σχεδιάστηκαν ώστε να ακολουθούν τη φυσική κίνηση των αρθρώσεων, αποφεύγοντας την επιβολή κίνησης. Παράλληλα, η χρήση πνευματικής πίεσης προσφέρει υψηλή δύναμη εξόδου με χαμηλό βάρος και ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Τέτοιες λύσεις δείχνουν πώς οι μαλακοί επενεργητές μπορούν να εφαρμοστούν και σε πιο σύνθετες ανθρώπινες αρθρώσεις πέρα από το γόνατο ή τον αστράγαλο.



Εικόνα 3. (a) Soft επενεργητής χωρίς ασκούμενη πίεση αέρα στο εσωτερικό του),(b) πρόοψη με ασκούμενη πίεση αέρα στο εσωτερικό του και (c) αριστερή λοξή όψη με ασκούμενη πίεση αέρα στο εσωτερικό του

Ο επενεργητής ο οποίος θα απασχολήσει την συγκεκριμένη εργασία πρόκειται για έναν μηχανισμό υποβοήθησης του ανθρώπου όπως στην Εικόνα 2. Όσο δεν εφαρμόζεται κάποια πίεση στο εσωτερικό του ο επενεργητής είναι εύκαμπτος και μπορεί να λυγίσει εύκολα χωρίς να ασκούνται κάποιου είδους δυνάμεις εξ' αυτού. Μέσω άσκησης πίεσης αέρα στο εσωτερικό του αυτός γίνεται όλο και πιο άκαμπτος με την φυσική του θέση να είναι σε ευθεία όπως φαίνεται και παραπάνω. Οπότε οποιαδήποτε δύναμη ασκηθεί επάνω του με διαφορετικό τρόπο αυτός δίνει την ανάλογη πίσω ως αντίδραση της πίεσης του αέρα στο εσωτερικό του αναπτύσσοντας την εκάστοτε ροπή. Τοποθετώντας τον σε αρθρώσεις και σημεία καταπόνησης του ανθρώπινου σώματος βοηθάει είτε κάνοντας μια εργασία πιο υποφερτή στην επαναλαμβανόμενη κίνηση είτε επιτρέποντας την ανύψωση αντικειμένων που διαφορετικά θα ήταν αδύνατο. Το μέρος το οποίο αναφέρθηκε είναι ένα ελάχιστο από αυτά που μπορεί να προσφέρει στην καθημερινότητα του ανθρώπου στο σύντομο μέλλον.



Εικόνα 4. Soft Επενεργητής Υποβοήθησης Υπό Τρείς Καταστάσεις Κίνησης και Ενεργοποίησης (a,b περιπτώσεις μη ενεργοποιημένου επενεργητή σε ευθεία και υπό γωνία θέση, c περίπτωση ενεργοποίησης επενεργητή)

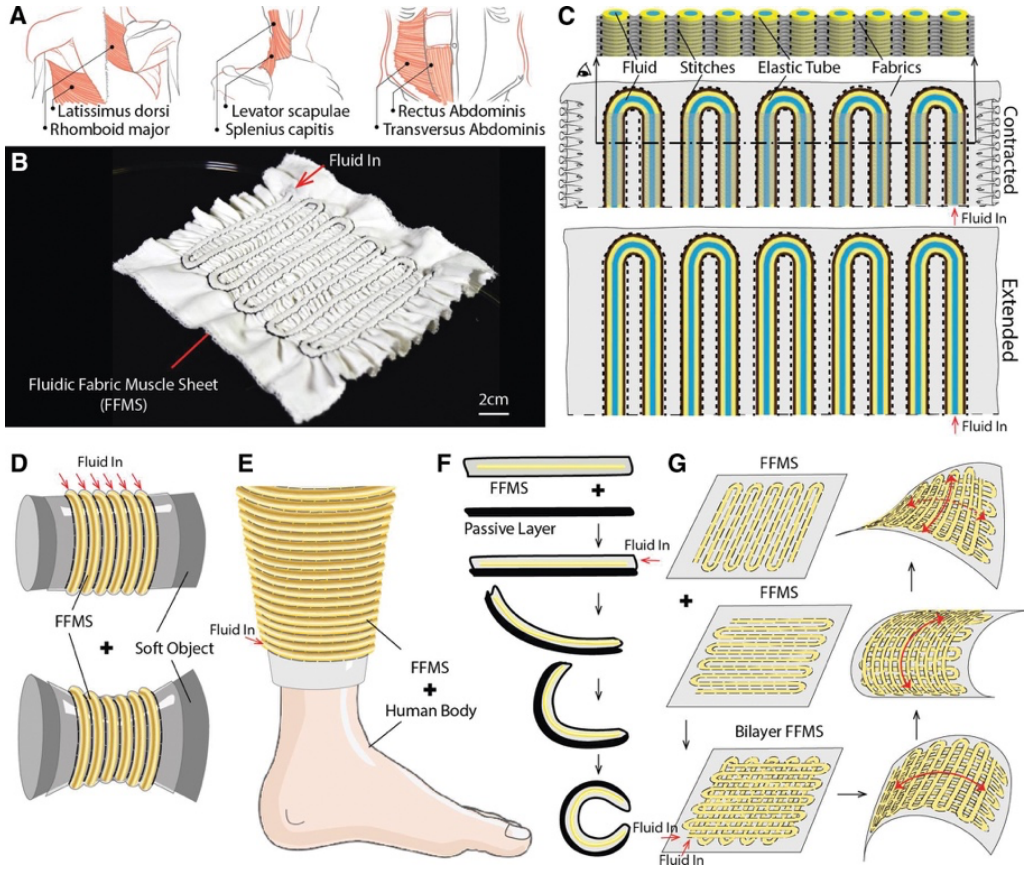
Στην Εικόνα 4 φαίνεται ο Soft επενεργητής όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως μέρος των αρθρώσεων. Στην πρώτη (a) και την δεύτερη (b) περίπτωση φαίνεται ο επενεργητής όσο αυτός βρίσκεται υπό μη ενεργή κατάσταση (Χωρίς Άσκηση Πιέσεως Αέρα) κατά την οποία είναι εύκαμπτος. Στην Τρίτη περίπτωση (c) ασκείται μία δύναμη πιέσεως αέρα της τάξεως των 1-2 bar κατά την οποία η κίνηση του ποδιού περιορίζεται και πλέον το πόδι παραμένει μόνο ευθεία σε ορθή θέση χωρίς να επιτρέπεται οποιαδήποτε κίνηση κάμψης του γονάτου μέσω ροπών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Υπό αυτές τις δυνάμεις και καθ' αυτό τον τρόπο θα ολοκληρωθούν παρόμοιες καταπονήσεις στην τεχνητή ρομποτική άρθρωση που πραγματοποιήθηκε.

Ωστόσο για να πραγματοποιηθεί η κίνηση των ρομποτικών αρθρώσεων και να γίνει η ανθρώπινη μίμηση όσο πιο πιστά γίνεται με αυτό του ανθρώπινου βαδίσματος θα πρέπει πρώτα να υπάρχουν τα κατάλληλα δεδομένα. Αυτά θα επιτρέψουν την δημιουργία διαδοχικών κύκλων κινήσεων με μετέπειτα σκοπό μία πλήρους τροχιάς η οποία θα ακολουθεί ο μηχανισμός για να "μιμείται" αυτό του ανθρώπινου περπατήματος με την καλύτερη δυνατή πιστότητα.

Τα δεδομένα αυτά πάρθηκαν από μια ήδη υπάρχουσα συλλογή [6] η οποία παρέχει τα κατάλληλα στοιχεία με όσο το δυνατόν πιο ορθά αποτελέσματα. Η διαδικασία συλλογής έγινε μέσω συνδυασμών αισθητήρων (IMU, EMG, κάμερες κίνησης κοκ.) οι οποίοι εφαρμόστηκαν σε διαφορετικούς ανθρώπους με ξεχωριστή διάπλαση. Οι δραστηριότητες τις οποίες πραγματοποίησαν οι συντελεστές είναι το περπάτημα με διαφορετικές ταχύτητες (1,2 m/s, 1,8 m/s) , καθίσματα, ανύψωση βάρους 12 kg, κίνηση ανύψωσης βάρους 0 kg, καθιστή προς όρθια θέση με ή χωρίς την βοήθεια χεριών καθώς και περπάτημα με προστιθέμενο βάρος 12 kg. Η πληθώρα αυτή των διαφορετικών περιπτώσεων παρήγαγε μια ολοκληρωμένη συλλογή δεδομένων καλύπτοντας όλες τις απαιτήσεις που μετέπειτα θα χρειαστούν για να εξακριβωθούν στοιχεία όπως οι μέγιστες και οι ελάχιστες ροπές, γωνίες και επιταχύνσεις.

Μια ιδιαίτερη υποκατηγορία των soft actuators είναι οι υφασμάτινοι επενεργητές. Εδώ η ιδέα είναι ότι μπορούμε να "κρύψουμε" μέσα στο ύφασμα σωληνάκια ή θήκες που φουσκώνουν με πίεση και δημιουργούν κίνηση. Δεν μιλάμε δηλαδή για εξωτερικά ογκώδη συστήματα, αλλά για ραφές και λεπτά υφάσματα που λειτουργούν σαν τεχνητοί μύες.

Οι Zhu et al. παρουσίασαν ένα τέτοιο σύστημα, το FFMS (Fluidic Fabric Muscle Sheets), το οποίο μπορεί να παράγει μεγάλα ποσοστά παραμόρφωσης (πάνω από 100%) και σημαντικές δυνάμεις [14]. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτά τα συστήματα λειτουργούν τόσο αποδοτικά που ξεπερνούν την ισχύ που χρειάζεται για βασικές καθημερινές κινήσεις. Και όλα αυτά μέσα από απλά υλικά που μπορείς να βρεις ακόμα και σε καταστήματα ραπτικής.



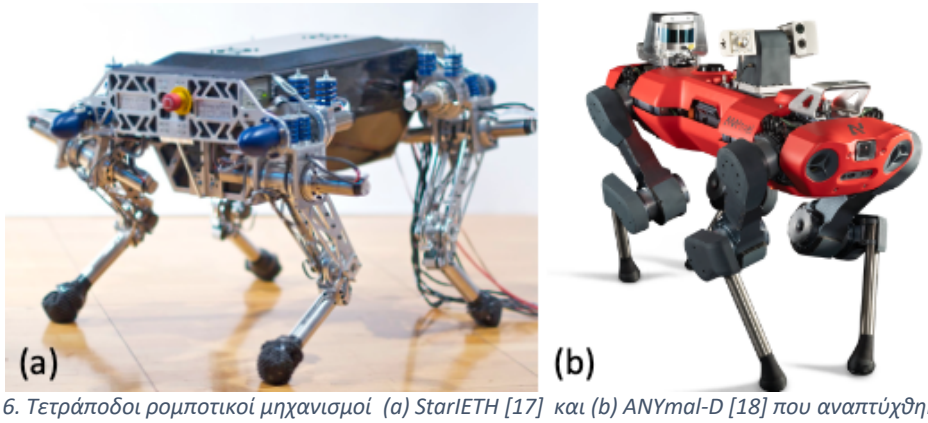
Εικόνα 5. Υφασμάτινα ρευστομυϊκα φύλλα για εφαρμογές σε wearable και soft ρομποτική, στην εικόνα φαίνονται στα (A), (B), (C) οι τρόποι με τους οποίους δρούν οι επενεργητές ενώ στις (D), (E), (F), (G) οι διακρίνονται διαφορετικοί τρόποι που μπορεί να δράσει (εφελκυστικά, καμπτικά, πίεσης κοκ.)

Ο Liu και ο Realmuto έφτιαξαν έναν υφασμάτινο επενεργητή ειδικά για το γόνατο. Το καινοτόμο είναι ότι αντί για rigid μηχανισμό, ο επενεργητής αποτελείται από υφασμάτινη "κάλτσα" που αγκαλιάζει την άρθρωση και κάμπτεται με πίεση [15]. Η εφαρμογή του σε καταστάσεις όπως το κάθισμα και η όρθωση δείχνει ότι τέτοιοι επενεργητές δεν είναι μόνο θεωρητικοί αλλά μπορούν να έχουν και πραγματική χρησιμότητα.

1.2.4 Σχεδιαστικές Ιδέες για την Ανάπτυξη Ρομποτικής Άρθρωσης (Ποδιού)

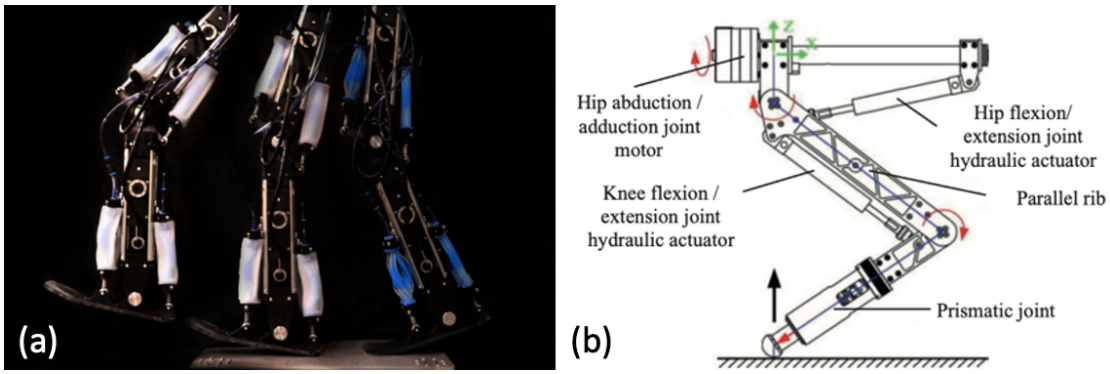
Η ανάπτυξη ρομποτικών αρθρώσεων για προσομοίωση ανθρώπινου περπατήματος ή άλλων μορφών κίνησης αποτελεί αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας. Έτσι προτού την έναρξη της σχεδίασης και της επιλογής του τρόπου με τον οποίο θα λειτουργεί το συγκεκριμένο σύστημα πραγματοποιήθηκε μια εκτενής έρευνα πάνω στα υπάρχουσα σχέδια και τους διαφορετικούς μηχανισμούς που τα ελέγχουν.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εξ' αυτών είναι το Electrohydraulic Musculoskeletal Robotic Leg, όπου η κίνηση επιτυγχάνεται μέσω ύδρο-υδραυλικών μυών (EHMs), προσομοιώνοντας με εντυπωσιακή ακρίβεια της ανθρώπινη μυοσκελετικής δομής. Το συγκεκριμένο έργο δείχνει ότι η αναπαραγωγή βιολογικών μηχανισμών μπορεί να οδηγήσει σε άκρα με υψηλή ενεργειακή απόδοση, ευκαμψία και ανθεκτικότητα, στοιχεία κρίσιμα για ρομποτική βάδιση σε φυσικό περιβάλλον [23]. Παρ' όλα αυτά εφόσον ο μηχανισμός που θα αναπτυχθεί δεν έχει ανάγκη από τέτοιου είδους χαρακτηριστικά, στο συγκεκριμένο έργο δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην τοποθέτηση των επενεργητών και στην λειτουργίας τους. Σε παρόμοιο πνεύμα, το StarlETH [17] και το μεταγενέστερο ANYmal-D που αναπτύχθηκαν στο ETH Zurich [18] αναδεικνύουν τη σημασία της εύκαμπτης/ευέλικτης μηχανικής (compliant mechanics), με δομές που αντεπεξέρχονται και προσαρμόζονται δυναμικά από εξωτερικούς παράγοντες μέσω εξελιγμένων αλγορίθμων ελέγχου ισορροπίας.



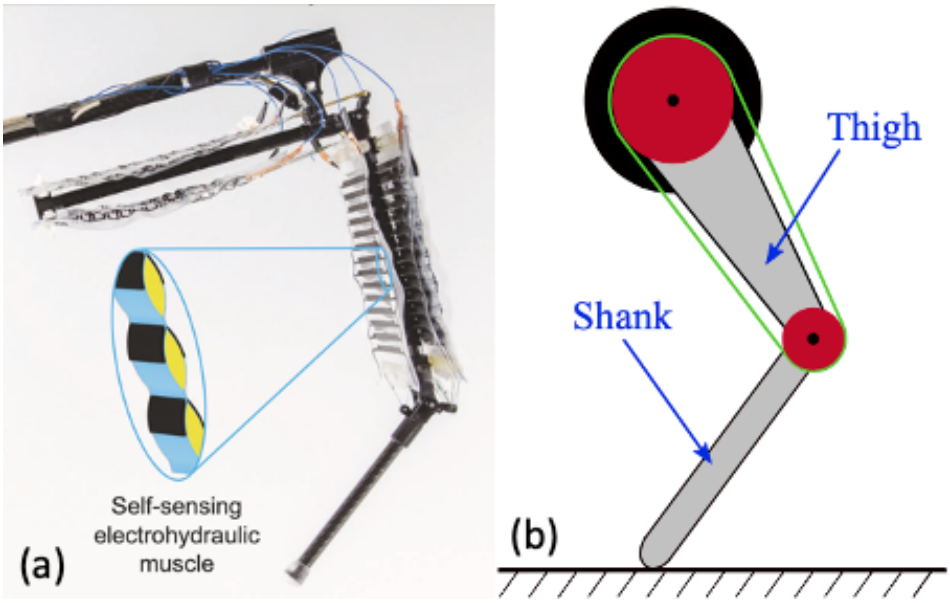
Εικόνα 6. Τετράποδοι ρομποτικοί μηχανισμοί (a) StarlETH [17] και (b) ANYmal-D [18] που αναπτύχθηκαν στο πανεπιστήμιο ETH Zurich

Από την άλλη, πιο ριζοσπαστικές ιδέες όπως τα tensegrity-inspired legs όπου μέσω της αρχής της προέντασης μπορεί να πραγματοποιείται κίνηση όπως αυτή ενός ποδιού [19] ή τα συστήματα βασισμένα σε fibre jamming τα οποία μέσω ενός επενεργητή ο οποίος λειτουργεί παρόμοια με τον ανθρώπινο τένοντα πραγματοποιούνται οι εκάστοτε κινήσεις [30] προσφέροντας έτσι νέες δυνατότητες. Όπως να ελαχιστοποιούν την πολυπλοκότητα των μηχανισμών, να προσδίδουν μεταβαλλόμενη ακαμψία καθώς και να ενισχύουν την ασφάλεια κατά την αλληλεπίδραση με ανθρώπους. Ενώ οι λύσεις αυτές δεν βρίσκονται ακόμη σε επίπεδο καθιερωμένης και στερεής τεχνολογίας, αναδεικνύουν τη στροφή της έρευνας σε πιο ευέλικτες, «μαλακές» κατασκευές που μπορούν να αποδώσουν σε απρόβλεπτα περιβάλλοντα.



Εικόνα 7. (a) Σύστημα Fibre Jamming τα οποία λειτουργούν μέσω ειδικά διαμορφωμένων επενεργητών οι οποίοι είναι παρόμοιοι με αυτός του ανθρώπινου τένοντα [30], (b) Ανάλυση και ανάπτυξη μέλους τετράποδου ρομποτικού μηχανισμού [29]

Πέρα από τις μεμονωμένες καινοτομίες, υπάρχουν και συστηματικές μελέτες που εξετάζουν την εξέλιξη των ποδιών σε τετράποδα ρομπότ [29] ή προτείνουν δομημένα πλαίσια σχεδίασης (constructive frameworks) για την ανάπτυξη ρομποτικών αρθρώσεων [26]. Αυτά τα έργα λειτουργούν ως "οδηγοί" για νέους ερευνητές, συγκεντρώνοντας αρχές που αφορούν τη μηχανική γεωμετρία, την επιλογή επενεργητών, την εργονομία και την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.



Εικόνα 8. (a) Σύστημα ύδρο-υδραυλικών επενεργητών για την κίνηση ενός βραχίονα [23[, (b) Πρωτότυπο σχέδιο ιμάντα-τροχαλίας για την κίνηση μιας άρθρωσης άρα και του κάτω μέρους του ποδιού [26]

Η ποικιλία αυτών πολλαπλών σχεδιασμών καταδεικνύει ότι δεν υπάρχει μία λύση για τη ρομποτική άρθρωση ποδιού, αλλά μάλλον ένα ολόκληρο φάσμα διαφορετικών επιλογών ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ταχύτητα, ευελιξία, ενεργειακή αποδοτικότητα και κατασκευαστική απλότητα. Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η παρούσα εργασία, η οποία προσεγγίζει το πρόβλημα με έναν διαφορετικό, πιο μηχανικά απλοποιημένο σχεδιασμό: τη χρήση ενός βηματικού κινητήρα (stepper motor) σε συνδυασμό με έναν αισθητήρα αδρανειακής μέτρησης (IMU) στο άκρο. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα είναι σε θέση να ακολουθεί μια προκαθορισμένη

τροχιά (π.χ. την τροχιά αστραγάλου κατά τη βάδιση) που παρέχεται μέσω αρχείου CSV, επιτυγχάνοντας έναν έλεγχο τροχιάς που συνδυάζει την ακρίβεια της κινηματικής με την ανατροφοδότηση από αισθητήρες. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ενδιάμεση λύση: ούτε τόσο βιομιμητική και περίπλοκη όσο οι υδροϋδραυλικοί μύες, ούτε τόσο «μαλακή» όσο οι ίνες jamming, αλλά εστιασμένη στη δημιουργία μιας πειραματικής πλατφόρμας άρθρωσης, πάνω στην οποία θα μπορούν να εφαρμοστούν και να αξιολογηθούν ‘’μαλακοί’’ επενεργητές (soft actuators), προσφέροντας ένα ελεγχόμενο και αξιόπιστο περιβάλλον δοκιμών.

1.2.5 Έλεγχος Ρομποτικής Άρθρωσης με PID και Feedforward

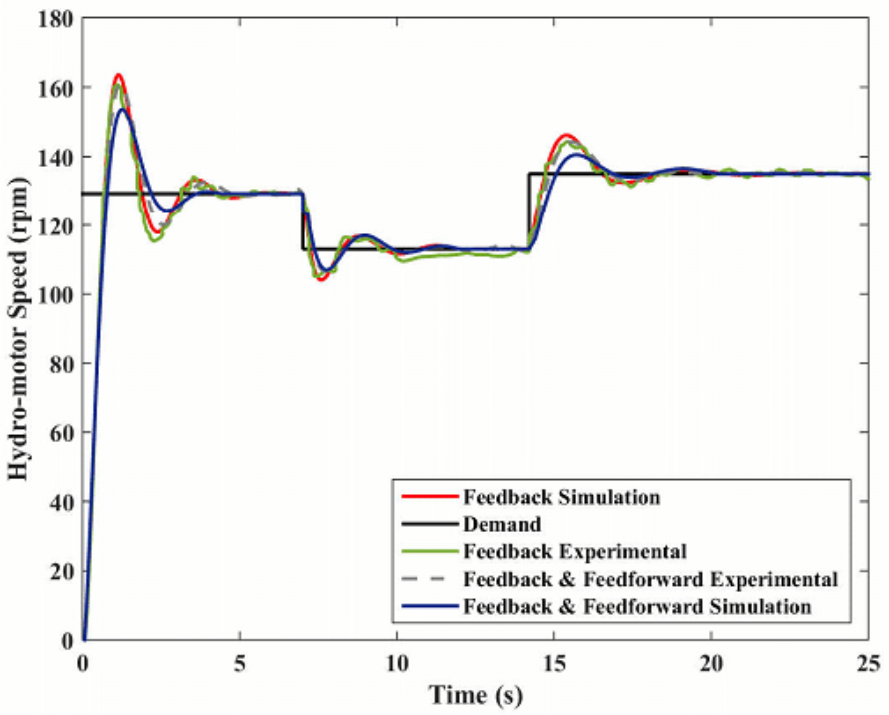
Η ανάγκη για ακριβή και σταθερό έλεγχο στις ρομποτικές αρθρώσεις είναι θεμελιώδης, ειδικά όταν το ζητούμενο είναι η αναπαραγωγή ανθρώπινων κινήσεων. Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους συστήματα είναι ο κλασικός PID (Proportional–Integral–Derivative), καθώς προσφέρει μια ισορροπία ανάμεσα στην απλότητα και την αποδοτικότητα. Ο PID μπορεί να ρυθμιστεί σχετικά εύκολα και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πληθώρα εφαρμογών, από βιομηχανικούς ρομποτικούς βραχίονες μέχρι εξωσκελετικούς μηχανισμούς [32].

Παρόλα αυτά, σε εφαρμογές όπου η κίνηση πρέπει να είναι γρήγορη, συνεχής και φυσική – όπως στην περίπτωση ενός ρομποτικού ποδιού – η αποκλειστική χρήση PID συχνά δεν επαρκεί. Αυτό συμβαίνει γιατί ο PID αντιδρά εκ των υστέρων, διορθώνοντας σφάλματα που ήδη έχουν εμφανιστεί. Εδώ εμφανίζεται η έννοια του feedforward ελέγχου, που λειτουργεί συμπληρωματικά. Ουσιαστικά, το feedforward προσθέτει στην έξοδο του ελεγκτή μια επιπλέον εντολή βασισμένη σε γνωστή ή προβλεπόμενη πληροφορία για την κίνηση. Έτσι, το σύστημα δεν περιμένει να εμφανιστεί σφάλμα για να αντιδράσει, αλλά «προλαβαίνει» τις αλλαγές, μειώνοντας την ανάγκη έντονης διόρθωσης από τον PID [33].

Η πρακτική αξία αυτής της προσέγγισης έχει φανεί σε αρκετές μελέτες. Ο Lee και οι συνεργάτες του (2017) δοκίμασαν έναν συνδυασμό PID και feedforward σε ρομποτικό γόνατο, δείχνοντας ότι η κίνηση γίνεται πιο ομαλή και πιο κοντά στη φυσική ανθρώπινη βάδιση [34]. Σε αντίστοιχη κατεύθυνση, οι Zhang et al. (2020) εφάρμοσαν feedforward όρους που υπολογίζονται από δεδομένα βάδισης σε εξωσκελετικούς μηχανισμούς, με αποτέλεσμα να μειώνεται η καθυστέρηση στην απόκριση και να αυξάνεται η ακρίβεια στην ακολούθηση της τροχιάς [35].

Σε μια άλλη μελέτη, οι Wang και συνεργάτες (2018) δοκίμασαν τη χρήση ενός PID ελεγκτή με όρους feedforward σε υδραυλικό σύστημα, συγκρίνοντάς τον άμεσα με τον κλασικό PID [36]. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, ο απλός PID είχε πιο αργή απόκριση και εμφάνιζε μόνιμο σφάλμα, ενώ με την προσθήκη feedforward το σύστημα ακολούθησε την τροχιά πολύ πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η συγκεκριμένη σύγκριση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, γιατί αναδεικνύει καθαρά τη διαφορά ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις και δίνει μια εικόνα που μπορεί εύκολα να αποτυπωθεί γραφικά.

Στην πράξη, η λογική του feedforward είναι η εξής: αν έχουμε μια επιθυμητή τροχιά – είτε αυτή έχει εξαχθεί από καταγραφή ανθρώπινης κίνησης είτε έχει σχεδιαστεί μαθηματικά – μπορούμε να υπολογίσουμε τις απαιτούμενες ταχύτητες ή και επιταχύνσεις που θα χρειαστούν στα επόμενα χρονικά βήματα. Αυτές οι τιμές στέλνονται κατευθείαν στον κινητήρα σαν «προβλεπόμενη» εντολή, ενώ ο PID αναλαμβάνει να διορθώσει τα μικρά σφάλματα που θα προκύψουν λόγω φορτίων, τριβών ή άλλων αβεβαιοτήτων [37].



Εικόνα 9. Σύγκριση της απόκρισης ταχύτητας κινητήρα με έλεγχο PID και feedforward (προστιθέμενη πρόβλεψη) έναντι της επιθυμητής τροχιάς (step demand). Παρατηρείται η βελτιωμένη απόκριση και μείωση του σφάλματος όταν χρησιμοποιείται ο συνδυασμός PID + feedforward, σε σύγκριση με τον αποκλειστικά PID έλεγχο, ιδιαίτερα σε δυναμικές κινήσεις όπως η ρομποτική βάδιση. Τα δεδομένα προέρχονται από πειραματική μελέτη ελέγχου ρομποτικής άρθρωσης [37]

Η προσέγγιση αυτή βρίσκει εφαρμογή και σε συστήματα όπου ο εξωτερικός χρήστης ή το περιβάλλον μπορεί να ασκήσει δυνάμεις πάνω στο ρομπότ. Ο Boris I. Prilutsky et al. έδειξαν ότι ο συνδυασμός feedforward και PID σε ρομποτικό βραχίονα όχι μόνο βελτιώνει την ακρίβεια της κίνησης, αλλά συμβάλλει και σε πιο φυσική και σταθερή συμπεριφορά του συστήματος, μειώνοντας τα σφάλματα και τις καθυστερήσεις. [24]. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις όπου το ρομπότ πρέπει να παραμένει στην τροχιά ακόμη και αν υπάρξουν εξωτερικές αντιστάσεις.

Συνολικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι ο συνδυασμός PID και feedforward είναι μια πρακτική και αποτελεσματική στρατηγική ελέγχου για ρομποτικά πόδια και αρθρώσεις. Χωρίς να απαιτείται η πολύπλοκη μοντελοποίηση των δυναμικών εξισώσεων του συστήματος, μπορεί να εξασφαλίσει γρήγορη απόκριση, αυξημένη ακρίβεια και σταθερότητα, ενώ ταυτόχρονα προσεγγίζει τη φυσικότητα της ανθρώπινης κίνησης.

1.2.6 Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η σύγκλιση βιομιμητικής μηχανικής, πραγματικών βιολογικών δεδομένων και διαφόρων τεχνικών ελέγχου αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την επιτυχή προσομοίωση της ανθρώπινης βάδισης μέσω ρομποτικών διατάξεων. Η συνεχής πρόοδος στον τομέα των Soft Επενεργητών και των ‘’Εφαρμοσμένων’’ τεχνολογιών ενισχύει τη δυναμική για ρομποτικά μέλη που δεν βασίζονται σε άκαμπτα μηχανικά συστήματα αλλά σε ευέλικτες, εργονομικές και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις.

Καθοριστικής σημασίας βρέθηκε να είναι η χρήση πειραματικών δεδομένων από πραγματικούς ανθρώπους, καθώς εξασφαλίζουν ότι οι μηχανισμοί μίμησης δεν βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα, αλλά προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη φυσική λειτουργία του ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος. Ιδιαίτερη αξία προσέφερε η αξιοποίηση δεδομένων κινηματικής και δυναμικής, όπως η ροπή και η ταχύτητα άρθρωσης, τα οποία αποτέλεσαν θεμέλιο τόσο για τον μηχανικό σχεδιασμό όσο και για την ανάπτυξη των συστημάτων ελέγχου.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση soft επενεργητών σε τέτοιου τύπου εφαρμογές φαίνεται να προσφέρει νέες προοπτικές, τόσο στη βοήθεια κινήσεων όσο και στην πειραματική αξιολόγηση ρομποτικών μοντέλων υπό εξωτερικές μεταβλητές. Οι τάσεις της σύγχρονης έρευνας δείχνουν σαφή στροφή προς ευφυή, προσαρμοστικά και ανθρωποκεντρικά ρομποτικά συστήματα, τα οποία είναι ικανά όχι μόνο να μιμούνται αλλά και να συνεργάζονται με τον ανθρώπινο οργανισμό.

Τέλος, καθώς ο έλεγχος αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ρομποτική είναι σημαντικό ο μηχανισμός να έχει τις κατάλληλες μεθόδους για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αυτό περιλαμβάνει τον μηχανισμό ανατροφοδότησης παρ’ όλα αυτά δεν είναι μόνος του αρκετός για να θεωρηθεί ένα σύστημα αρκετά αξιόπιστο και ακριβές. Γι’ αυτό επιπροσθέτως έρχεται ο όρος της προτροφοδότησης και πιο έμμεσα της πρόληψης των εκάστοτε ενεργειών. Έτσι ο μηχανισμός με έναν συνδυασμό αυτών μπορεί να ακολουθήσει τις απαιτούμενες τροχιές μειώνοντας το σφάλμα κατά ένα σημαντικό ποσοστό.

1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία είναι οργανωμένη έτσι ώστε να ακολουθεί μια φυσική ροή από τη θεωρία στην πράξη. Αρχικά, γίνεται μια παρουσίαση των βασικών εννοιών που σχετίζονται με τη βάδιση και τη βιομιμητική μηχανική. Στη συνέχεια, αναλύονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι μαθηματικοί υπολογισμοί που απαιτούνται για την προσομοίωση της κίνησης. Ακολουθεί η φάση της σχεδίασης του ρομποτικού ποδιού και η περιγραφή των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή. Τέλος, παρουσιάζονται τα πειράματα που έγιναν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, μαζί με κάποιες ιδέες για το πώς μπορεί να εξελιχθεί το σύστημα στο μέλλον.

Ηράκλειο © 2025

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Εισαγωγή στην Ανθρώπινη Βάδιση και την Βίο-Εμπνευσμένη Μηχανική

Τα ανθρωποειδή ρομπότ έχουν εδώ και καιρό καθιερώσει την θέση τους στον κόσμο της μηχανικής σημειώνοντας ραγδαία και συνεχόμενα ανοδική πορεία τον τελευταίο μισό αιώνα. Καθώς ενδιαφέρον σε αυτό τον τομέα έχει παρατηρηθεί από τα τέλη του 15^{ου} αιώνα (Leonardo's Robot) [31] σήμερα πρόκειται για ένα απόγειο ανάπτυξης τέτοιων μηχατρονικών σχεδιασμών.



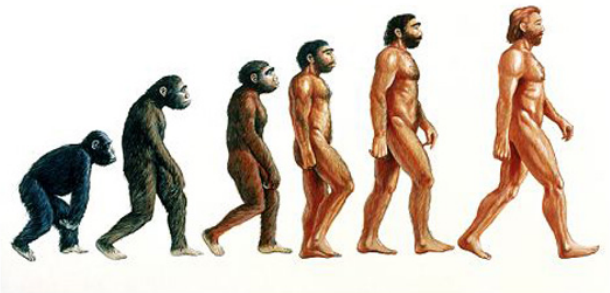
Εικόνα 10. Leonardo's Robot [31]

Ο μεγαλύτερος σκοπός όλων αυτών των προσπαθειών είναι η πραγματοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού μηχανισμού ο οποίος θα χαρακτηρίζεται από την αυτονομία, την σταθερότητα, τις επιδέξιες δυνατότητες καθώς και από την σωστή συνεργασία όπου θα μπορεί να αναπτύξει με τον άνθρωπο.

Τα ρομποτικά πόδια έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί επίσης ως μηχανισμοί προσθετικών μελών. Άνθρωποι με ατυχήματα και ιατρικά προβλήματα που οδηγούν σε ακρωτηριασμό χρησιμοποιούν τέτοιους μηχανισμούς ώστε η καθημερινότητα τους να επηρεάζεται στο ελάχιστο.

Το πόδι το οποίο έχει αναπτυχθεί και μελετηθεί παρακάτω πρόκειται για έναν μηχανισμό ο οποίος προσομοιώνει τις τρείς βασικές αρθρώσεις όπου περιλαμβάνονται στην κίνηση του ανθρώπινου ποδιού με σκοπό την πραγματοποίηση της κίνησης βαδίσματος. Όλη αυτή η διαδικασία στην συγκεκριμένη περίπτωση υλοποιείται με σκοπό την χρήση του για πειραματισμούς Soft Robot επενεργητών που ο εξωτερικός παράγοντας, ως τελικό στόχο, έχει έναν εξωσκελετό αποτελούμενο μόνο εξ αυτών.

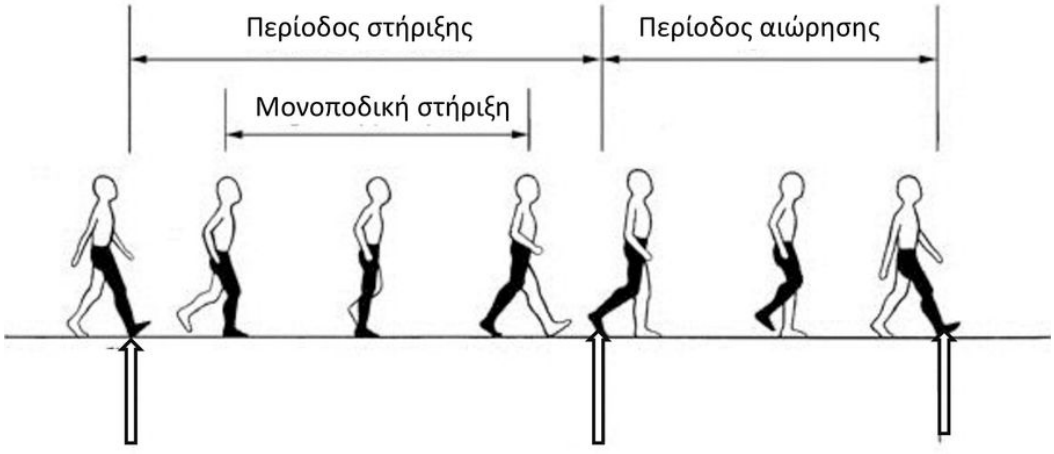
2.1.1 Ανθρώπινη Βάδιση



Εικόνα 11. Εξέλιξη ανθρώπινου βαδίσματος -3-

Στους ανθρώπους το βάδισμα είναι η πρωταρχική μέθοδος μετακίνησης. Το περπάτημα περιλαμβάνει όλες τις αρθρώσεις του κάτω άκρου και χαρακτηρίζεται από μια κίνηση σαν αυτή ενός αντίστροφου εκκρεμούς κατά την οποία το σώμα θωρακίζει πάνω από το μη κινούμενο άκρο.

Ο κύκλος βαδίσματος χωρίζεται σε δύο κύριες περιόδους. Στην περίοδο στήριξης όπου αντιπροσωπεύει το 40% της διαδικασίας του κύκλου και στην περίοδο αιώρησης όπου πρόκειται για το υπόλοιπο 60% της διαδικασίας. Αυτή η αναλογία ποικίλει ανάλογα την ταχύτητα του περπατήματος και την διαδικασία την οποία πραγματοποιείται (Τρέξιμο, Κουβάλημα επιπλέον βάρους κοκ.).



Εικόνα 12. Πλήρης κύκλος ανθρώπινης βάδισης, περίοδος στήριξης (στην οποία εμπεριέχεται και η μονοποδική στήριξη), περίοδος αιώρησης [28]

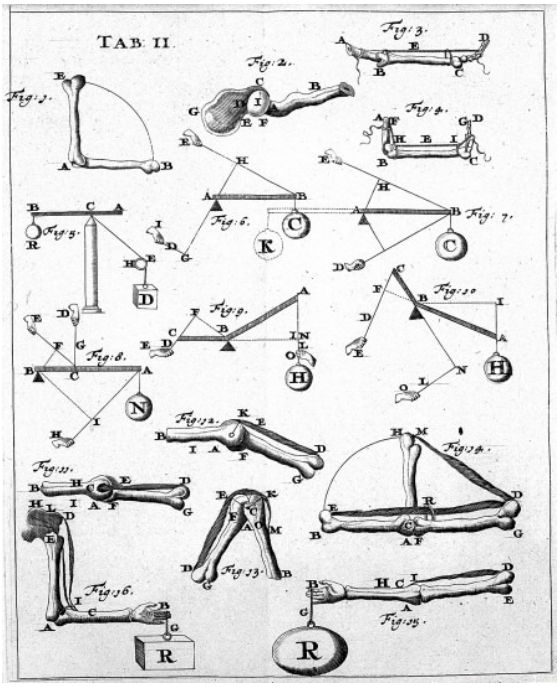
Η περίοδος στήριξης χωρίζεται σε επιπλέον τρία μέρη. Στο χτύπημα της φτέρνας, στην στήριξη και στην απομάκρυνση των δακτύλων. Στο στάδιο του χτυπήματος της φτέρνας, το πόδι χτυπά πρώτα τη φτέρνα στο έδαφος. Εμπλέκονται τρεις μύες/μυϊκά σύνολα, καθένα από τα οποία ενεργεί σε διαφορετική άρθρωση. Μετά το υπόλοιπο του μπροστινού ποδιού έρχεται σε επαφή με το έδαφος και οι μύες εργάζονται για

να αντιμετωπίσουν τη δύναμη που διέρχεται από το πόδι. Αυτό είναι γνωστό ως στάδιο υποστήριξης. Τέλος στη φάση της απομάκρυνσης των δακτύλων, το πόδι προετοιμάζει να αφήσει το έδαφος – με σειρά προτεραιότητας της φτέρνας κι έπειτα των δακτύλων.

Επίσης και η περίοδος αιώρησης χωρίζεται σε άλλα 2 μέρη, το σήκωμα του ποδιού από το έδαφος και την αιώρηση. Μόλις το πόδι φύγει από το έδαφος, το κάτω άκρο ανυψώνεται ως προετοιμασία για το στάδιο της αιώρησης. Κατά την διάρκεια αυτής, το ανασηκωμένο πόδι προωθείται προς τα εμπρός. Εδώ εμφανίζεται η προς τα εμπρός κίνηση της βάδισης.

2.1.2 Βίο-εμπνευσμένη Μηχανική

Η Βίο-εμπνευσμένη Μηχανική (Biomechanics) είναι ο κλάδος της επιστήμης που μελετά τη μηχανική των ζωντανών οργανισμών, κυρίως του ανθρώπινου σώματος, αναλύοντας την κίνηση, τις δυνάμεις και τις μηχανικές ιδιότητες των ιστών και των αρθρώσεων. Η εφαρμογή της Βιομηχανικής είναι ευρεία και ποικίλει από την αθλητική επιστήμη και τη φυσικοθεραπεία μέχρι την ιατρική ρομποτική και τα βιο-πρόσθετα μέλη.



Εικόνα 13. Μια από τις Πρώτες Ιστορικά Αναφορές Βίο-Μηχανικής [27]

Η ανάλυση της βάδισης, ειδικά σε ρομποτικές διατάξεις που επιδιώκουν να μιμηθούν την ανθρώπινη κίνηση, απαιτεί βαθιά κατανόηση των βιομηχανικών αρχών. Η μηχανική αναλύει πώς οι δυνάμεις ενεργούν πάνω στα άκρα, πώς τα οστά, οι μύες και οι τένοντες συνεργάζονται, και πώς η σταθερότητα και η ισορροπία επιτυγχάνονται κατά την κίνηση.

Βασικά μεγέθη και οι έννοιες της Βίο-μηχανικής περιλαμβάνουν τη μέτρηση και την ανάλυση:

- Δυνάμεων (εξωτερικών και εσωτερικών) που ενεργούν στα άκρα και στις αρθρώσεις.
- Ροπών και ροπών αδράνειας στα κινούμενα τμήματα.
- Κινηματικών χαρακτηριστικών, όπως ταχύτητα, επιτάχυνση και τροχιά.
- Ιδιοτήτων των βιολογικών υλικών, όπως η ελαστικότητα, η αντοχή και η απορρόφηση κραδασμών.

Τα δεδομένα αυτά είναι κρίσιμα για την προσομοίωση της φυσικής κίνησης και τον σχεδιασμό ρομποτικών συστημάτων που αλληλεπιδρούν αρμονικά με το περιβάλλον.

Οι ανθρώπινες αρθρώσεις μπορούν να προσομοιωθούν μηχανικά ως συστήματα μοχλών, ελατηρίων και αποσβεστήρων. Κάθε κίνηση προέρχεται από την αλληλεπίδραση των δυνάμεων που ασκούν οι μύες πάνω στα οστά, μέσω των τενόντων. Έτσι για την συγκεκριμένη περίπτωση του ποδιού οι βασικές αρθρώσεις που μελετώνται στη βάδιση είναι:

- Ισχίο: Παρέχει την κύρια δύναμη προς τα εμπρός.
- Γόνατο: Απορροφά κραδασμούς και σταθεροποιεί το σώμα κατά τη διάρκεια της στήριξης.
- Αστράγαλος: Ρυθμίζει την επαφή με το έδαφος και συμβάλλει στην προωθητική κίνηση.

Κάθε μία από αυτές τις αρθρώσεις έχει συγκεκριμένες βιομηχανικές απαιτήσεις και χαρακτηριστικά φορτίσεων. Στην παρούσα εργασία, η Βιομηχανική αποτελεί το θεμέλιο για τον σχεδιασμό της ρομποτικής άρθρωσης. Η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, οι υπολογισμοί των απαιτούμενων ροπών και η ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου βασίστηκαν στις αρχές της Βιομηχανικής.

Με την υιοθέτηση βίο-μιμητικών στρατηγικών και την προσαρμογή σε πραγματικά δεδομένα βάδισης, το αναπτυσσόμενο σύστημα επιδιώκει να πετύχει ένα επίπεδο κίνησης που προσεγγίζει τον φυσικό τρόπο βάδισης του ανθρώπου, με ρεαλιστική δυναμική και σταθερότητα υπό διάφορες συνθήκες.

2.1.3 Ανάλυση και Υπολογισμοί με Σκοπό την Εύρεση Προδιαγραφών του Συστήματος

Η μελέτη της ανθρώπινης βάδισης απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστων και πολυδιάστατων δεδομένων, τα οποία αποτυπώνουν τη συμπεριφορά των κάτω άκρων κατά την εκτέλεση διαφόρων δραστηριοτήτων. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκαν ανοικτά σύνολα δεδομένων (datasets) τα οποία περιλαμβάνουν μετρήσεις από αδρανειακούς αισθητήρες (IMU), επιφανειακά

ηλεκτρομυογραφήματα (EMG), τροχιές αρθρώσεων, καθώς και δυνάμεις επαφής με το έδαφος. Η κύρια πηγή ήταν το δημοσιευμένο dataset του Scherpereel et al. [6], το οποίο παρέχει συνδυασμένη πληροφόρηση για κυκλικές και μη κυκλικές δραστηριότητες, καθιστώντας το ιδανικό για την εξαγωγή ρεαλιστικών προφίλ κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν αποτελούνται κυρίως από τις γωνίες περιστροφής, τις γωνιακές ταχύτητες και τις ροπές που αναπαράγονται στο ισχίο, το γόνατο και τον αστράγαλο ανά δεδομένη στιγμή στον χρόνο. Έχοντας πλέον οργανώσει τα δεδομένα πραγματοποιούνται με την σειρά τους οι κατάλληλοι υπολογισμοί για την δημιουργία και επεξεργασία καινούριων πινάκων της επιτάχυνσης και της στιγμιαίας ροπής που θα σχετίζονται πλέον με τις δυνατότητες που πρέπει να φέρει η μηχανική άρθρωση.

Αρχικά εφόσον η γωνιακή ταχύτητα δίνεται σε μοίρες ανά δευτερόλεπτο πρέπει να γίνει η μετατροπή σε RPM. Στην συνέχεια γνωρίζοντας την γωνία και έχοντας και την σωστή σε μονάδες γωνιακή ταχύτητα γίνεται ο υπολογισμός της επιτάχυνσης α. Αυτή θα χρειαστεί αργότερα για τον υπολογισμό όπως θα δούμε των Στιγμιαίων Ροπών i_s και είναι η εξής διαίρεση διαφορά χρόνου Δt και ταχύτητας V:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{1}$$

Όπου α, *είναι η γωνιακή επιτάχυνση, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας, σε (rad/s$^{2)}$* , V *είναι η γραμμική ταχύτητα του σώματος, σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (rad/sec) και* t *είναι ο χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση της κίνησης, σε δευτερόλεπτα (sec).*

Έπειτα ξεκινάει η διαδικασία υπολογισμού της στιγμιαίας ροπής. Αρχικά λοιπόν υπολογίζεται η ροπή αδράνειας. Ο μηχανισμός ενός ποδιού ως ένα ελεύθερο διάγραμμα αποτελείται από αρθρώσεις και δοκούς σε έναν δισδιάστατο χώρο. Για να υπολογιστούν οι ροπές ωστόσο για την ανάλυση των πολλαπλών αρθρώσεων και ράβδων το σύστημα μπορεί να απλοποιηθεί ανά τμήμα ως ένας μηχανισμός μιας δοκού στερεωμένης από το ένα άκρο και στο άλλο να ασκείται η εκάστοτε δύναμη. Ως αποτέλεσμα η δοκός θα έχει, μάζα m και μήκος r και σταθερά k που απαιτείται η οποία θα είναι ίση με 1/3 δηλαδή 0,33. Έτσι η ροπή αδράνειας I_A υπολογίζεται ως έχει:

$$I_A = k \cdot m \cdot r^2 \tag{2}$$

Όπου, I_A είναι η ροπή αδράνειας του σώματος, δηλαδή το μέτρο της αντίστασής του στην περιστροφή, σε (kg*m^2), m είναι η μάζα του κινούμενου σώματος, εκφρασμένη σε χιλιόγραμμα (Kg) και r είναι το μήκος της ράβδου από τον άξονα περιστροφής, σε μέτρα (m).

Ως επόμενο βρίσκεται η στιγμιαία ροπή T όπου αργότερα θα προστεθεί στον πίνακα ροπών όπου δίνεται έτοιμος για να έχουμε τις μέγιστες τιμές που χρειάζονται για την συμπλήρωση του πίνακα απαιτήσεων του κινητήρα. Έτσι οι ροπές λοιπόν υπολογίζονται με τον εξής τρόπο:

$$T = I_A \cdot \alpha \tag{3}$$

$Όπου, T$ είναι η ροπή που ασκείται, δηλαδή η δύναμη που προκαλεί περιστροφική κίνηση, σε (Nm).

Αφού αναπτύχθηκαν όλοι οι πίνακες με τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν χρησιμοποιήθηκαν μακροεντολές σε αυτά οι οποίες εντοπίζουν ανάμεσα σε όλα τα φύλλα τα μέγιστα και τα ελάχιστα των τιμών τους σε ροπές, γωνίες και ταχύτητες. Έτσι δημιουργήθηκαν οι παρακάτω πίνακες ως το κύριο υπολογιστικό φύλλο ανάλυσης και εντοπισμού των ακραίων τιμών όπου απαιτούνται για την δημιουργία ελάχιστων προδιαγραφών του κινητήρα.

Μέγιστη Στιγμιαία Ροπή	8,25 Nm
Μέγιστη Γωνία	135° (Μοίρες)
Μέγιστη Ταχύτητα	91,07 RPM

Πίνακας 1. Τελικές Τιμές Στιγμιαίας Ροπής, Μέγιστης Γωνίας και Μέγιστης Ροπής για την Δημιουργία Προδιαγραφών του Κινητήρα

Στην συνέχεια έχοντας ξεκαθαρίσει όλα τα στοιχεία όπου χρειάζονται δημιουργήθηκε ένας πίνακας προδιαγραφών των απαιτήσεων σε όλο το φάσμα των περιπτώσεων κίνησης των αρθρώσεων. Σε αυτόν βρίσκονται όλες οι ακραίες τιμές καθώς και σε ποια ακριβώς διαδικασία παρατηρείται η καθεμία (περπάτημα, καθίσματα κοκ.) όπου απαιτείται από τον κινητήρα για να πραγματοποιήσει ομαλά τα μονοπάτια που αργότερα θα ακολουθήσει.

	Βάδισμα 1,2 m/s	Βάδισμα 1,8 m/s	Καθίσματα	Ανύψωση Βάρους 12 kg	Ανύψωση Βάρους Κίνηση (0 kg)	Κ.σ.Ο.Θ. Βοήθεια Χεριών	Κ.σ.Ο.Θ. Χωρίς Βοήθεια	Πε/μα με 15 kg
Μέγιστη Ροπή (Nm)	167,09	226,65	183	270,93	161,51	118,66	126,74	162,11
Μέγιστη Γωνία (Μοίρες °)	76,02	77,13	135,38	103,58	104,53	92,64	109,15	75,57
Μέγιστη Ταχύτητα (Rpm)	83,69	91,07	42,17	36,17	32,56	33,6	35,49	73,39

Πίνακας 2. Μέγιστες Τιμές Ροπής/Γωνίας/Ταχύτητας Διαφορετικών Περιπτώσεων Κίνησης Αρθρώσεων

Ο παραπάνω Πίνακας 2 περιέχει ακραίες τιμές στις οποίες εμπεριέχονται περιπτώσεις διαφορετικών κιλών και ύψους όλου του φάσματος. Έτσι οι μέγιστες τιμές όπου απαιτούνται από τον κινητήρα θα είναι σαφώς μειωμένες σε μεμονωμένα παραδείγματα με κιλά που κυμαίνονται στον μέσο όρο των 75 kg όπως διατυπώνεται παρακάτω στις γραφικές παραστάσεις. Ως αποτέλεσμα η ροπή μειώνεται δραματικά και δεν αντιπροσωπεύει το γενικότερο πλαίσιο αλλά πιο επιβαρυμένες αρθρώσεις. Οπότε σύμφωνα με αυτά που ακολουθούν στην ανάλυση των γραφικών παραστάσεων οι ροπές θα μειωθούν αφήνοντας τα υπόλοιπα στοιχεία ακέραια αφού δεν επηρεάζονται κατά μεγάλο ποσοστό (βλ. Εικόνα 16). Άρα οι απαιτούμενες τιμές θα είναι:

Μέγιστη Ροπή	61 Nm
Μέγιστη Γωνία	135,38° (Μοίρες)
Μέγιστη Ταχύτητα	91,07 RPM

Πίνακας 3.Απαιτούμενες Τιμές και Περιορισμοί για την Επιλογή Κινητήρα

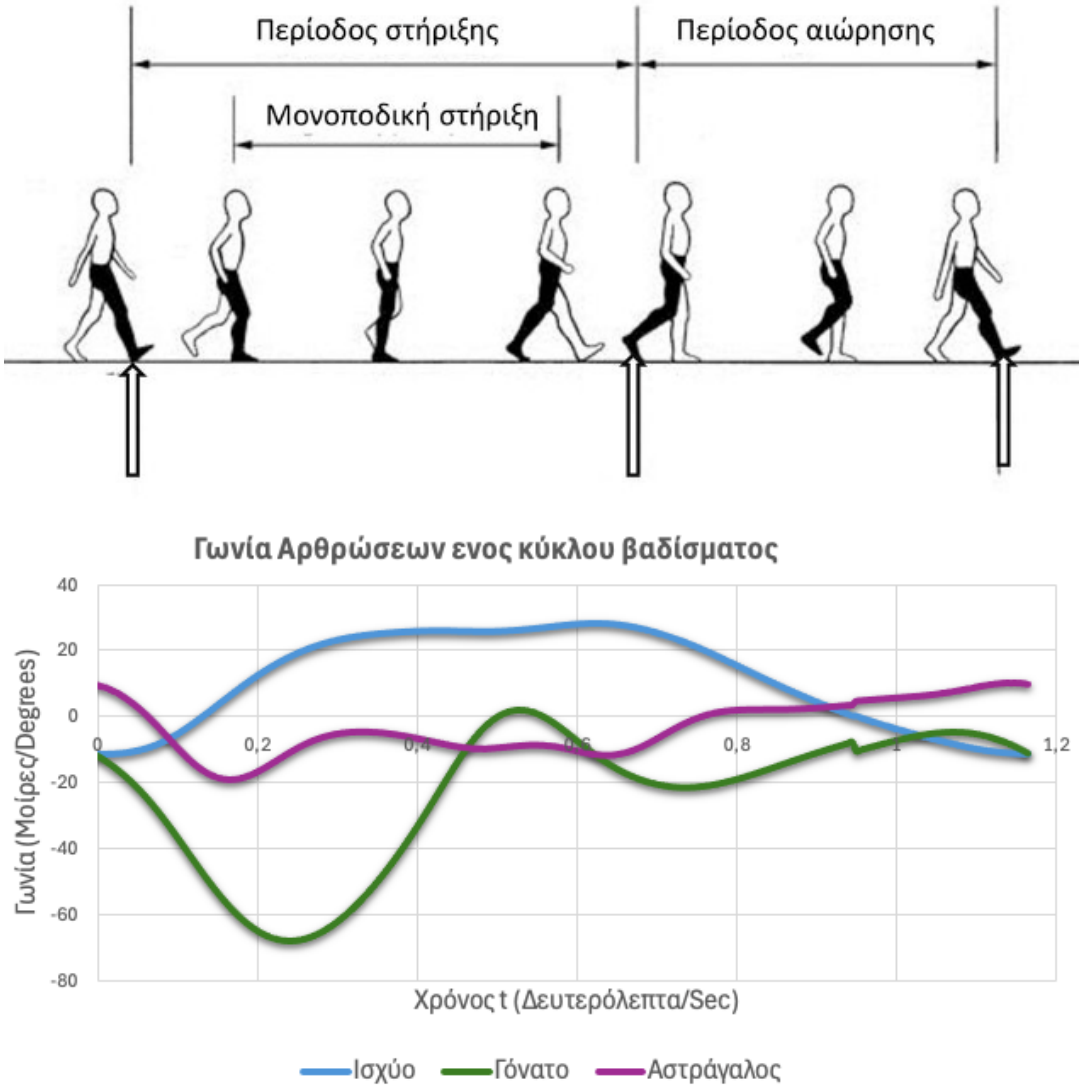
Τέλος, στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας επειδή υπάρχει υποβοήθηση κατά 50% καθώς και δεν υπάρχει η οικονομική ευχέρεια για κινητήρες τέτοιων δυνάμεων η ροπή διαλέγεται διαφορετικά. Έτσι, διαμορφώνεται σε 32,5 Nm όπου αυτά αφορούν το περπάτημα με ταχύτητα 1,2 m/s με τον τελεστή της υποβοήθησης σε αυτό. Επίσης στην ροπή προστίθεται και η μέγιστη στιγμιαία Ροπή η οποία σύμφωνα και με τον Πίνακα 1 είναι 8,25 Nm. Οπότε οι τελικές απαιτήσεις μετατρέπονται και γίνονται ως εξής:

Μέγιστη Ροπή	39,25 Nm
Μέγιστη Γωνία	135,38° (Μοίρες)
Μέγιστη Ταχύτητα	91,07 RPM

Πίνακας 4. Τελικές Απαιτούμενες Τιμές και Περιορισμοί για την Επιλογή Κινητήρα με Υποβοήθηση

2.1.4 Γραφικές Παραστάσεις και Δημιουργία Τροχιάς

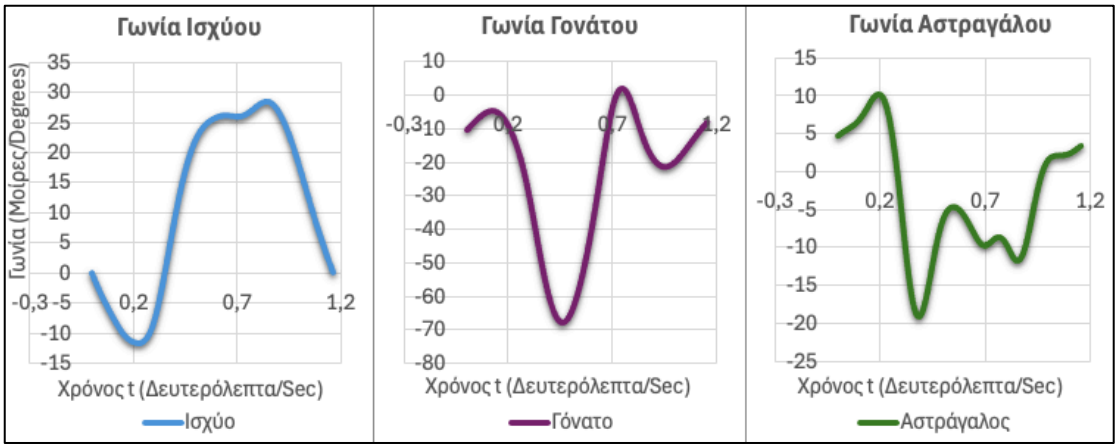
Στην παρούσα ενότητα συνεχίζεται η ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων με στόχο την δημιουργία γραφικών παραστάσεων. Αυτές θα ολοκληρωθούν σε 3 διαφορετικές περιπτώσεις και θα αφορούν την γωνία που διανύουν ξεχωριστά οι αρθρώσεις μέσα στον χρόνο κατά την διάρκεια του περπατήματος με ταχύτητα 1,2 m/s. Ως αποτέλεσμα θα παραχθούν οι οπτικοποιημένες πλέον τροχιές τις οποίες οι αρθρώσεις θα πρέπει να ακολουθήσουν για να πραγματοποιήσουν ως σύνολο έναν κύκλο βαδίσματος.



Εικόνα 14. Κύκλος Βάδιση σε Σύγκριση με την Κίνηση Κάθε Άρθρωσης (Ισχίο/Γόνατο/Αστράγαλος) Σύμφωνα με τα Δεδομένα που Συλλέχτηκαν, Πράσινο Γράφημα (Ισχίο), Μώβ Γράφημα (Γόνατο), Γαλάζιο Γράφημα (Αστράγαλος))

Παραπάνω λοιπόν (βλ. Εικόνα 14) φαίνονται οι τροχιές όπου ακολουθούνε οι ανθρώπινες αρθρώσεις για να ολοκληρώσουν την διαδικασία του περπατήματος. Όπως παρατηρείται η γωνία του γονάτου είναι παρεμφερής και σχεδόν όμοια με τις άλλες δυο περιπτώσεις σε σύγκριση με την γωνία του αστραγάλου και ακόμη περισσότερο του ισχίου. Συνεπώς λοιπόν το γόνατο είναι ένα καλό σημείο αναφοράς από το οποίο αργότερα μπορούν να ξεκινήσουν τα πειραματικά στάδια του μηχανισμού με ευκολία και αξιοπιστία.

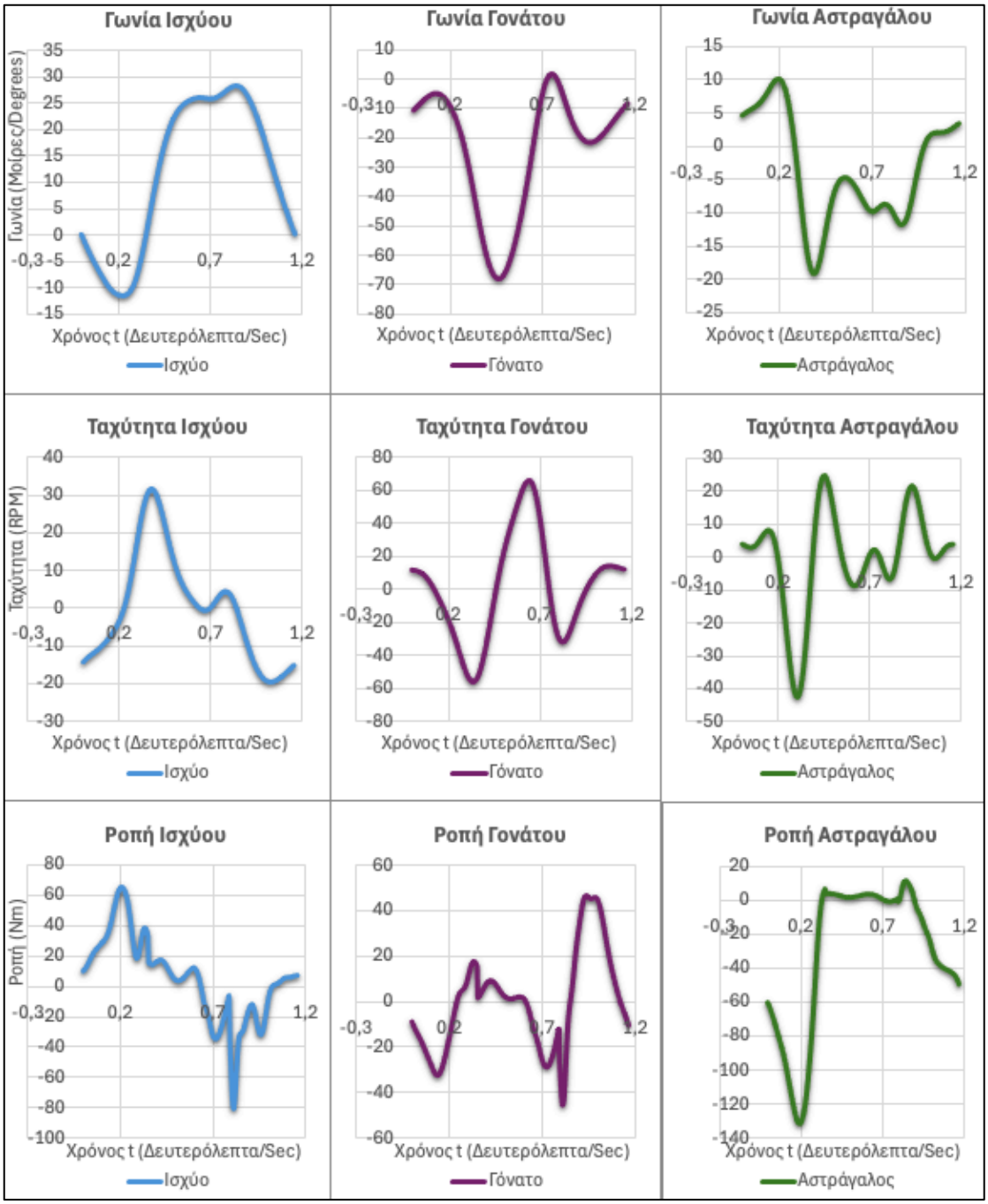
Έπειτα για περαιτέρω ανάλυση και κυρίως για εξακρίβωση των μεμονωμένων τροχιών έγιναν οι γραφικές παραστάσεις μιας διαδοχικής περιόδου από κάθε άρθρωση. Έτσι γίνονται γνωστά πλέον και φανερώνονται τα δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν καθώς και τις ακριβείς τροχιές όπου αργότερα ο ρομποτικός βραχίονας θα πρέπει να ακολουθήσει με ακρίβεια για την καλύτερη δυνατή μίμηση (Βλ. Εικόνα 15).



Εικόνα 15. Γωνία αρθρώσεων για ένα κύκλο βαδίσματος κατά την βάδιση σε διάδρομο κίνησης.

Στην περίπτωση της περιόδου που έχει καταγραφεί από τις γραφικές παραστάσεις ενός κύκλου βαδίσματος είναι επί της ουσίας η αρχή της φάσης της μονοποδικής στήριξης, στην περίοδο στήριξης του κύκλου βαδίσματος (βλ. Εικόνα 14). Οπότε συγκρίνοντας τις δύο αυτές εικόνες γίνεται πιο ευδιάκριτος ο κύκλος περπατήματος ανάμεσα στην πραγματικότητα και τα διαγράμματα.

Τέλος για πλήρης κατανόηση του κύκλου βαδίσματος και των καταπονήσεων που περιτριγυρίζουν αυτόν δημιουργήθηκαν άλλα τρία διαγράμματα. Σε αυτά φαίνονται και γίνονται πιο εύκολα συγκρίσιμες οι τιμές ταχύτητας και ροπής ανά δεδομένη γωνία της κάθε άρθρωσης όσο η καθεμία πραγματοποιεί τον κύκλο της. Εξαιτίας αυτών συμπεραίνεται ότι οι μεγαλύτερες ροπές συναντώνται σε καταστάσεις όπου οι αρθρώσεις είναι στην μικρότερη ταχύτητα τους, ενώ οι μεγαλύτερες ροπές στις μικρότερες ταχύτητες όπως παρατηρείται λοιπόν στην Εικόνα 16 όπου οι μώβ γραμμές αναπαριστούν την Ταχύτητα (RPM), οι πράσινες την Γωνία (Μοίρες/ Degrees) και οι γαλάζιες την Ροπή (Nm). Στην συγκεκριμένη περίπτωση κίνησης παρατηρείται ότι όταν η ροπή φτάνει ακραία ποσά όπως τα 61 Nm ενώ η ταχύτητα παραμένει σε ταχύτητες μικρότερες των 20 RPM. Αυτό ευνοεί τις προδιαγραφές του κινητήρα όπου αναπτύσσονται και σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 16. Γραφικές παραστάσεις γωνίας/ταχύτητας/ροπής ανά δευτερόλεπτο κάθε άρθρωσης (Ισχίου/Γονάτου/Αστραγάλου) σε έναν κύκλο βαδίσματος , με σκοπό την σύγκριση τους

3. Μοντελοποίηση Ρομποτικής Άρθρωσης

Πολύ σημαντικός τομέας της ανάπτυξης ενός ρομποτικού μηχανισμού είναι οι Κινηματικές εξισώσεις καθώς και το διάγραμμα ελευθέρου σώματος. Μέσα από τέτοιου είδους υπολογισμούς και εξισώσεις αποκτούνται λεπτομερή στοιχεία κίνησης στον χώρο καθώς και δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα.

Τέτοια δεδομένα χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη ενός ορθού και πλήρως ελεγχόμενου με ακρίβεια κώδικα κίνησης. Το Διάγραμμα Ελευθέρου σώματος από την άλλη παρέχει δυνάμεις οι οποίες χρησιμεύουν ώστε να εισαχθούν στην αργότερη προσομοίωση αντοχής κοκ. του παραμετρικού σχεδίου.

3.1 Κινηματικές Εξισώσεις

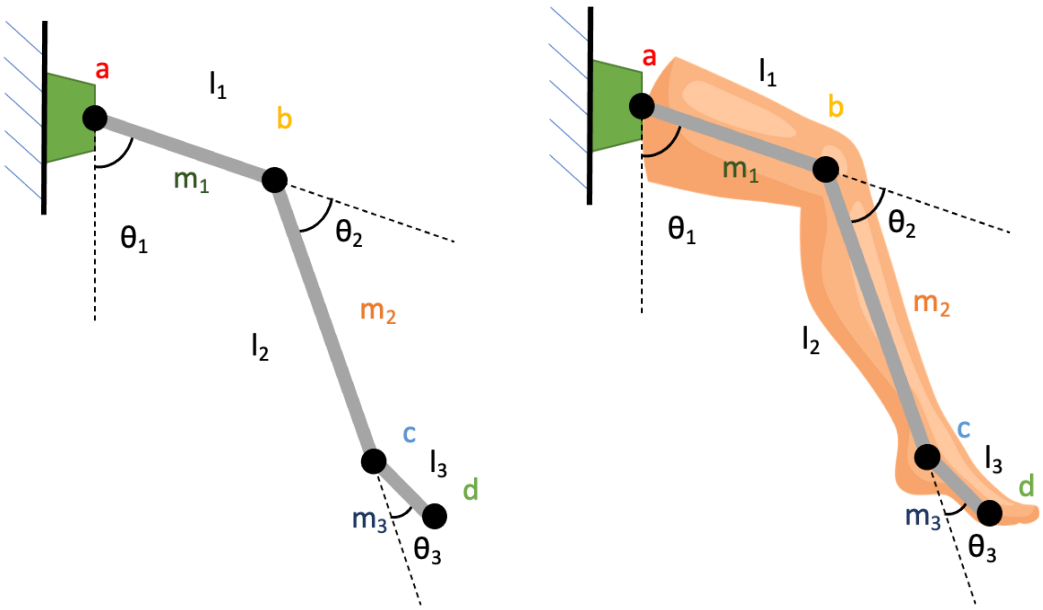
Οι κινηματικές εξισώσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, το ευθύ κινηματικό και το αντίστροφο κινηματικό. Στο ευθύ κινηματικό δίνονται οι γωνίες των αρθρώσεων και βρίσκεται η τελική θέση του άκρου του βραχίονα που στην δική μας περίπτωση πρόκειται για ένα πόδι. Στο αντίστροφο κινηματικό ως δεδομένο παίρνεται η τελική θέση του άκρου και αναζητούνται οι γωνίες οι οποίες φέρουν αυτό το αποτέλεσμα.

Εφόσον το σύστημα αφορά μόνο αρθρώσεις περιστρεφόμενες σε παράλληλο άξονα το τελικό αποτέλεσμα θα είναι σε δύο διαστάσεις. Οι συντεταγμένες των αρθρώσεων έπειτα επηρεάζονται μόνο από το μήκος των βραχιόνων το οποίο είναι σταθερό και τις γωνίες των αρθρώσεων οι οποίες είναι μεταβαλλόμενες.

Για το παράδειγμα μας έχουμε τους εξής όρους (βλ. Εικόνα 17):

Σύμβολα και Στοιχεία	**Μέρη στην Εικόνα 17**
a, $\boldsymbol{b}$, **c**	Άρθρωση Ισχίου, Γονάτου, Αστραγάλου
Μέρος μεταξύ σημείων, $\boldsymbol{\alpha}$ -$\boldsymbol{b}$	Μηριαίος
Μέρος μεταξύ σημείων, $\boldsymbol{b}$- **c**	Κνήμη
Μέρος μεταξύ σημείων, **c** - $\boldsymbol{d}$	Πόδι
Μήκη Συνδέσμων, $\boldsymbol{l_1}, \boldsymbol{l_2}, \boldsymbol{l_3}$	Μήκος Μηριαίου, Κνήμης, Ποδιού
Μάζες Βραχιόνων, $\boldsymbol{m_1}, \boldsymbol{m_2}, \boldsymbol{m_3}$	Μάζα Μηριαίου, Κνήμης, Ποδιού
Γωνία Άρθρωσης, $\boldsymbol{\theta_1}$	Γωνία Μεταξύ Επιπέδου και Μηριαίου
Γωνία Άρθρωσης, $\boldsymbol{\theta_2}$	Γωνία Μεταξύ Μηριαίου και Κνήμης
Γωνία Άρθρωσης, $\boldsymbol{\theta_3}$	Γωνία Μεταξύ Κνήμης και Ποδιού

3.1.1 Ευθύ Κινηματικό



Εικόνα 17. Διάγραμμα Βραχίονα Ποδιού Τριών Βαθμών Ελευθερίας

Στη παραπάνω εικόνα είναι σχεδιασμένο το διάγραμμα του βραχίονα "ποδιού" και ακολουθώντας αυτό θα αναπτυχθούν οι εξισώσεις όπου χρειάζονται. Για αρχή γίνεται η ανάλυση της θέσης των σημείων των αρθρώσεων (a,b,c,d) ξεχωριστά μέσω βασικών τριγωνομετρικών πράξεων οι οποίες είναι οι ακόλουθες.

Ως προς τον άξονα x:

$$\begin{aligned} b_{ax} &= l_1 \cdot cos(\theta_1) \\ c_{bx} &= l_2 \cdot cos(\theta_1 + \theta_2) \\ d_{cx} &= l_3 \cdot cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \tag{4}$$

Ως προς τον άξονα y:

$$\begin{aligned} b_{ay} &= l_1 \cdot sin(\theta_1) \\ c_{by} &= l_2 \cdot sin(\theta_1 + \theta_2) \\ d_{cy} &= l_3 \cdot sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \tag{5}$$

***b_a**, συμβολίζει το σημείο b ως προς το σημείο α.*

Συνολικά οπότε οι εξισώσεις του ευθύ κινηματικού μπορούν να υπολογίσουν την καρτεσιανή θέση του τελικού σημείου δράσης d:

$$\begin{aligned} x &= b_{ax} + c_{bx} + d_{cx} \\ y &= b_{ay} + c_{by} + d_{cy} \end{aligned} \Rightarrow$$

$$\boldsymbol{x = l_1 \cdot cos(\theta_1) + l_2 \cdot cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cdot cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}$$

$$\boldsymbol{y = l_1 \cdot sin(\theta_1) + l_2 \cdot sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cdot sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)} \quad (6)$$

3.1.2 Αντίστροφο Κινηματικό

Για το αντίστροφο κινηματικό ξέρουμε ότι συνολική γωνία του τελικού σημείου δράσης δίνεται από:

$$\varphi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (7)$$

Και η θέση των άκρων:

$$\begin{aligned} x_w &= x - l_3 \cos(\varphi) \\ y_w &= y - l_3 \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

Γι' αυτό μέσω τριγωνομετρικών εξισώσεων προκύπτουνε τα εξής:

$$cos(\theta_2) = \frac{x_w^2 + y_w^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\theta_2} = a cos\left(\frac{x_w^2 + y_w^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2}\right) \quad (10)$$

Κάνοντας χρήση του νόμου ημιτόνων:

$$\alpha = atan\left(\frac{x_w}{y_w}\right),\ \beta = atan\left(\frac{l_2 sin(\theta_2)}{l_1 + l_2 cos(\theta_2)}\right) (11) \quad (11)$$

Όπου $\boldsymbol{\alpha}$, είναι η συνολική γωνία στόχευσης του τελικού σημείου και $\boldsymbol{\beta}$, είναι η συμβολή της γεωμετρίας της άρθρωσης μεταξύ (l_1 και l_2) στη γωνία αυτή.

Άρα θ_1 είναι η γωνία στη βάση και προκύπτει από τη διαφορά των γωνιών α και β, ενώ θ_3 είναι η γωνία στο τελικό σημείο και εκφράζει τη διόρθωση ώστε η συνολική γωνία να ισούται με φ, θα είναι:

$$\boldsymbol{\theta_1} = \alpha - \beta,\ \boldsymbol{\theta_3} = \phi - \theta_1 - \theta_2 \quad (12)$$

3.2 Δυναμικές Εξισώσεις

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την αναλυτική διαδικασία εξαγωγής των δυναμικών εξισώσεων ενός απλού, επίπεδου ρομποτικού βραχίονα με έναν βαθμό ελευθερίας (1-DOF) χρησιμοποιώντας την αναλυτική μέθοδο Lagrange. Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από έναν ομοιόμορφο βραχίονα μήκους l και μάζας m, ο οποίος δύναται να περιστραφεί γύρω από έναν σταθερό σύνδεσμο. Η γενικευμένη συντεταγμένη του συστήματος είναι η γωνία θ, η οποία ορίζει τη θέση του βραχίονα σε σχέση με έναν κατακόρυφο άξονα.

Η συνολική κινητική ενέργεια του βραχίονα προκύπτει από την περιστροφική του κίνηση. Δεδομένου ότι ο βραχίονας θεωρείται ομοιόμορφος, η ροπή αδράνειας, I, γύρω από τον σύνδεσμο υπολογίζεται ως:

$$I = \frac{1}{3}ml^2 \tag{13}$$

Όπου, m είναι η μάζα του βραχίονα σε (kg) και l είναι το μήκος του βραχίονα σε (m).

Η κινητική ενέργεια, K, ορίζεται από τη σχέση:

$$K = \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \tag{14}$$

όπου, $\dot{\theta}$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του βραχίονα σε (rad/s).

Με την αντικατάσταση της ροπής αδράνειας, η τελική έκφραση για την κινητική ενέργεια διαμορφώνεται ως εξής:

$$K = \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{3}ml^2\dot{\theta}^2 = \frac{1}{6}ml^2\dot{\theta}^2 \tag{15}$$

Η δυναμική ενέργεια του συστήματος οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας και υπολογίζεται βάσει της κατακόρυφης θέσης του κέντρου μάζας (CM) του βραχίονα. Το κέντρο μάζας βρίσκεται στο μέσον του βραχίονα, δηλαδή σε απόσταση $l/2$ από τον σύνδεσμο.

Η θέση του κέντρου μάζας στον άξονα y είναι $y_{CM} = \frac{1}{2}\sin(\theta)$ επομένως, η δυναμική ενέργεια, P, δίνεται από τον τύπο:

$$P = mgy_{CM} = mg\frac{l}{2}\sin(\theta) \tag{16}$$

όπου, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας με τιμή περίπου 9.81 m/s^2 και y_{CM} είναι το κατακόρυφο ύψος του κέντρου μάζας του συνδέσμου σε (m).

Η Λαγκρανζιανή, η οποία αποτελεί τη βάση της δυναμικής ανάλυσης, ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας του συστήματος:

$$L = K - P = \frac{1}{6}ml^2\dot{\theta}^2 - mg\frac{l}{2}\sin(\theta) \tag{17}$$

Η Λαγκρανζιανή αποτελεί μια κεντρική έννοια της αναλυτικής μηχανικής και είναι μια μαθηματική συνάρτηση που περιγράφει την κατάσταση ενός δυναμικού συστήματος. Η χρήση της προσφέρει ένα πιο κομψό και αποτελεσματικό πλαίσιο για την εξαγωγή των εξισώσεων κίνησης, καθώς βασίζεται σε ενεργειακές ποσότητες (κινητική και δυναμική ενέργεια) αντί για διανυσματικές ποσότητες (δυνάμεις και

Ηράκλειο © 2025

ροπές). Αυτό απλοποιεί σημαντικά τους υπολογισμούς, ειδικά για σύνθετα συστήματα.

Οι εξισώσεις Euler-Lagrange για τη γενικευμένη συντεταγμένη θ περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = \tau \tag{18}$$

όπου, τ είναι η εφαρμοσμένη ροπή στον σύνδεσμο σε (Nm).

Έπειτα γίνονται οι υπολογισμοί:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}}\left(\frac{1}{6}ml^2\dot{\theta}^2 - mg\frac{l}{2}\sin(\theta)\right) = \frac{1}{3}ml^2\dot{\theta}^2 \tag{19}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{1}{6}ml^2\dot{\theta}^2 - mg\frac{l}{2}\sin(\theta)\right) = -mg\frac{l}{2}cos(\theta) \tag{20}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η χρονική παράγωγος του πρώτου όρου:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}}\right) = \frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\left(\frac{1}{3}ml^2\dot{\theta}^2\right) = \frac{1}{3}ml^2\ddot{\theta}^2 \tag{21}$$

όπου, $\ddot{\theta}$ είναι η γωνιακή επιτάχυνση του βραχίονα σε (rad/s^2)

Αντικαθιστώντας τους όρους στην εξίσωση Euler-Lagrange, προκύπτει:

$$\frac{1}{3}ml^2\ddot{\theta}^2 + mg\frac{l}{2}cos(\theta) = \tau \tag{22}$$

Η τελική μορφή της δυναμικής εξίσωσης του συστήματος μπορεί να εκφραστεί με τη γενική μορφή:

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\theta} + \boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}\right)\dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau} \tag{23}$$

όπου τα μέλη της εξίσωσης ταυτοποιούνται ως εξής:

Ο όρος μάζας, $\mathrm{M}(\theta)$ αντιπροσωπεύει τη γενικευμένη αδράνεια του συστήματος. Για έναν βραχίονα 1-DOF, ο όρος αυτός είναι σταθερός και ισούται με τη ροπή αδράνειας του βραχίονα:

$$\mathrm{M}(\theta) = \frac{1}{3}ml^2 \tag{24}$$

Ο όρος Coriolis/Φυγόκεντρος, αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις που προκύπτουν από την ταχύτητα του συστήματος. Στην περίπτωση ενός συστήματος 1-DOF, ο όρος αυτός είναι μηδενικός:

$$C\left(\theta, \dot{\theta}\right) = 0 \tag{25}$$

Ο όρος βαρύτητας, G(θ) αντιπροσωπεύει τη ροπή που ασκείται στον σύνδεσμο λόγω της βαρύτητας:

$$\mathrm{G}(\theta) = mg\frac{l}{2}cos(\theta) \tag{26}$$

Συνεπώς, η τελική δυναμική εξίσωση κίνησης του συστήματος είναι:

$$\frac{1}{3}ml^2 + mg\frac{l}{2}cos(\theta) = \tau \tag{27}$$

3.3 Κινηματικές και Δυναμικές Εξισώσεις του Συστήματος

Εφόσον το αρθρωτό σύστημα της συγκεκριμένης εργασίας εξυπηρετεί την προσομοίωση μιας άρθρωσης με σκοπό την πειραματική έρευνα ενός soft επενεργητή, η άρθρωση τριών αρθρώσεων θεωρείται πλεονάζων. Επίσης θα είχε ένα μεγαλύτερο οικονομικό κόστος το οποίο θα ξεπερνούσε κατά πολύ το ζητούμενο όριο. Επομένως έχοντας γνώση του προηγούμενου κεφαλαίου τα πράγματα γίνονται πιο απλά όσον αφορά τις εξισώσεις όπου περιγράφουν το σύστημα μιας άρθρωσης:

Για τις κινηματικές εξισώσεις το σύστημα έχει:

$$\begin{aligned} x &= l\cos(\theta) \\ y &= l\sin(\theta) \end{aligned} \tag{28}$$

$$\theta = \mathrm{atan2}(y, x) \tag{29}$$

Ενώ για τις δυναμικές εξισώσεις:

$$\frac{1}{3}ml^2 + mg\frac{l}{2}cos(\theta) = \tau \tag{27}$$

Στο μοντέλο του απλού βραχίονα με έναν βαθμό ελευθερίας (1DOF), η δυναμική του περιγράφεται από μια εξίσωση ροπής που συνδέει τη γωνιακή επιτάχυνση του βραχίονα με τις δυνάμεις που δρουν πάνω του. Ο όρος $I\ddot{\theta}$ εκφράζει την αδρανειακή αντίσταση του συστήματος στην επιτάχυνση, όπου I είναι η ροπή αδράνειας του βραχίονα ως προς το σημείο περιστροφής. Ο όρος $mgL\sin(\theta)$ αναπαριστά τη ροπή που δημιουργείται από το βάρος του βραχίονα λόγω της βαρύτητας, με το m να είναι η μάζα, το g η επιτάχυνση της βαρύτητας, το L η απόσταση του κέντρου μάζας από

τον άξονα περιστροφής, και το θ η γωνία από την κατακόρυφη. Η εξίσωση ολοκληρώνεται με το τ, την εξωτερική ροπή που εφαρμόζεται στον βραχίονα (π.χ. από κινητήρα). Αυτή η σχέση επιτρέπει την πρόβλεψη της κίνησης του βραχίονα υπό την επίδραση γνωστών ροπών, ή αντίστροφα, τον υπολογισμό της απαιτούμενης ροπής για να παραχθεί συγκεκριμένη κίνηση, και χρησιμοποιείται τόσο για τον σχεδιασμό ελέγχου όσο και για τη φυσική προσομοίωση του συστήματος.

3.4 Νόμος Ελέγχου

Για την παρακολούθηση της επιθυμητής τροχιάς του κινητήρα εφαρμόστηκε ένας συνδυαστικός νόμος ελέγχου που βασίζεται τόσο στην ανάδραση (feedback control) όσο και στην προτροφοδότηση (feedforward control). Η φιλοσοφία είναι ότι η ανάδραση εξασφαλίζει σταθερότητα και ανθεκτικότητα σε αβεβαιότητες, ενώ η προτροφοδότηση αξιοποιεί την εκ των προτέρων γνώση της αναφοράς ώστε να μειωθεί το σφάλμα παρακολούθησης.

Το σύστημα λειτουργεί συγκρίνοντας συνεχώς την πραγματική γωνία της άρθρωσης $\theta_{\text{feedback}}(t)$, μετρούμενη από τον αισθητήρα IMU, με την επιθυμητή γωνία $\theta_{\text{target}}(t)$. Η διαφορά τους, γνωστή ως σφάλμα $e(t)$, τροφοδοτείται στον ελεγκτή, ο οποίος υπολογίζει την κατάλληλη εντολή για τον βηματικό κινητήρα ώστε να μειώσει ή να μηδενίσει αυτό το σφάλμα. Οπότε το σφάλμα ορίζεται ως:

$$e(t) = \theta_{\text{target}}(t) - \theta_{\text{feedback}}(t) \tag{62}$$

Η συνιστώσα ανάδρασης υλοποιήθηκε με ελεγκτή PID της μορφής:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \tag{62}$$

Όπου K_p είναι ο αναλογικός όρος που αντιδρά άμεσα στο σφάλμα, K_i είναι ο ολοκληρωτικός όρος που εξαλείφει μόνιμα σφάλματα και ο K_d είναι ο παραγώγος όρος που βελτιώνει τη δυναμική απόκριση.

Η συνιστώσα προτροφοδότησης προστέθηκε ώστε να βελτιώσει την ικανότητα του συστήματος να ακολουθεί γρήγορες αλλαγές στην αναφορά. Στην περίπτωση αυτή, η προτροφοδότηση βασίζεται στον ρυθμό μεταβολής της επιθυμητής γωνίας, δηλαδή στην επιθυμητή ταχύτητα. Στο πεδίο του Laplace εκφράζεται ως:

$$F(s) = K_{ff} \cdot s \tag{62}$$

Γεγονός που αντιστοιχεί σε έναν όρο αναλογικό με την παράγωγο της επιθυμητής γωνίας. Περνώντας στο πεδίο του χρόνου, αυτό σημαίνει ότι το σήμα προτροφοδότησης είναι:

$$F(s) = K_{ff} \cdot \dot{\theta}_{\text{target}}(t) \tag{62}$$

Ο τελικός νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται στον οδηγό του κινητήρα προκύπτει από τον συνδυασμό των δύο συνιστωσών:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)\ dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_{ff} \cdot \dot{\theta}_{\text{target}}(t) \qquad (63)$$

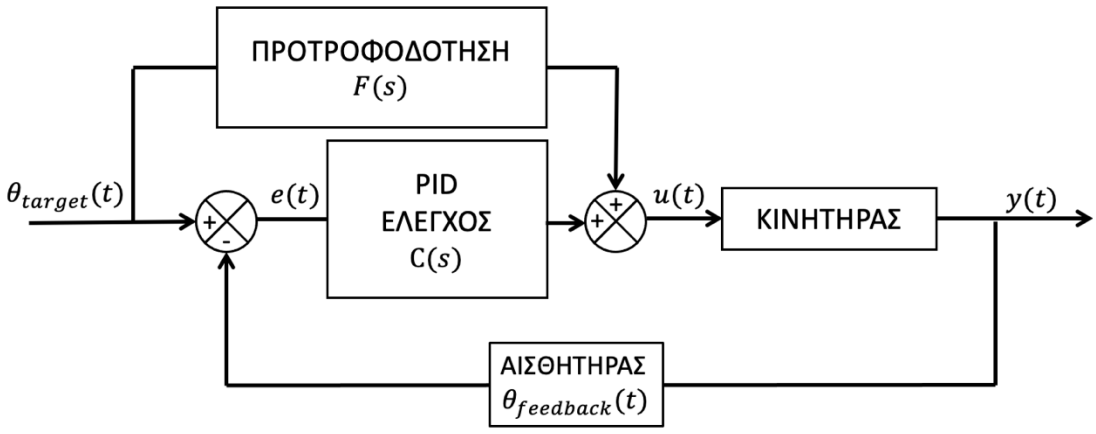
Με άλλα λόγια, ο ελεγκτής δεν βασίζεται αποκλειστικά στο σφάλμα, αλλά «προβλέπει» την απαιτούμενη ταχύτητα κίνησης με βάση την επιθυμητή τροχιά. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να ακολουθεί πιο ομαλά τις γρήγορες μεταβολές, ενώ το PID αναλαμβάνει να διορθώσει τυχόν αποκλίσεις και να διασφαλίσει τη σταθερότητα.

Σε επίπεδο κλειστού βρόχου, αν το φυσικό σύστημα $P(s)$ προσεγγιστεί ως ένα σύστημα πρώτης τάξης με καθυστέρηση, η συνολική συνάρτηση μεταφοράς γράφεται:

$$T(s) = \frac{P(s) \cdot (C(s) + F(s))}{1 + P(s) \cdot C(s)} \qquad (64)$$

Από τη σχέση αυτή παρατηρείται ότι η ευστάθεια εξαρτάται αποκλειστικά από το γινόμενο $P(s) \cdot C(s)$ δηλαδή από τον PID ελεγκτή και το φυσικό σύστημα. Η προτροφοδότηση δεν επηρεάζει τη σταθερότητα αλλά δρα στον αριθμητή, βελτιώνοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια παρακολούθησης της αναφοράς.

Συνολικά, ο νόμος ελέγχου συνδυάζει την αποσβεστική δράση της ανάδρασης με την προβλεπτική δράση της προτροφοδότησης, προσφέροντας ισορροπία μεταξύ σταθερότητας και επίδοσης.



Εικόνα 18. Function block diagram συστήματος ελέγχου

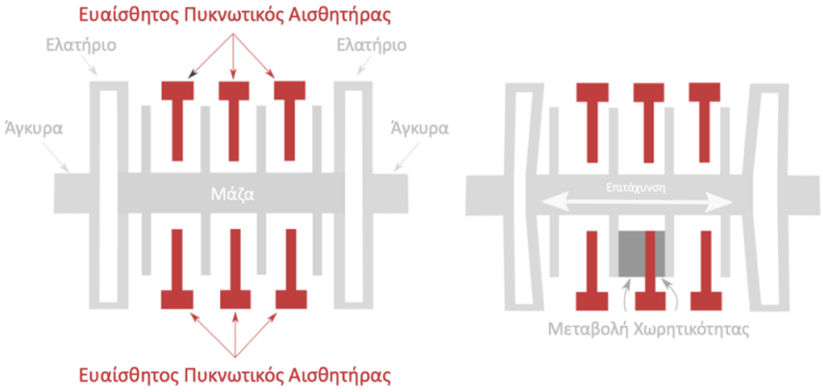
3.4.1 Αισθητήριο Όργανο Ανάδρασης

Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος θα πρέπει μέσα στο σύστημα να εμπεριέχεται και ένα στοιχείο εξόδου το οποίο θα εξασφαλίζει τα δεδομένα για τον υπολογισμό του σφάλματος στον έλεγχο. Στην προκειμένη περίπτωση ο μηχανισμός για να λειτουργήσει απαιτεί μόνο την ενημέρωση όσον αναφορά την γωνία. Αυτό θα πραγματοποιείται μέσω ενός Αισθητήρα Αδράνειας 9 Αξόνων που θα επεξηγηθεί παρακάτω. Έτσι επιλέχθηκε ένας αισθητήρας Αδρανειακής Μέτρησης (IMU Inertia Measurement Unit).

Πρόκειται για μία ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και μέτρηση των κινήσεων ενός σώματος στο χώρο, καταγράφοντας τις γραμμικές και γωνιακές επιταχύνσεις που υφίσταται. Στις περισσότερες εφαρμογές, ο IMU περιλαμβάνει επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και, σε πολλές περιπτώσεις, μαγνητόμετρα, με σκοπό τη μέτρηση της επιτάχυνσης, της γωνιακής ταχύτητας και του προσανατολισμού ενός σώματος στον τρισδιάστατο χώρο. Η σύνθεση αυτών των αισθητήρων επιτρέπει τη δημιουργία ενός πλήρους μοντέλου της κίνησης του σώματος, απαραίτητο για εφαρμογές όπως η ναυσιπλοΐα, η ρομποτική, οι φορητές συσκευές και η αεροναυπηγική.

Η λειτουργία του IMU στηρίζεται στις αρχές της μηχανικής και συγκεκριμένα στον Νόμο του Hooke και στον 2ο Νόμο του Νεύτωνα. Σύμφωνα με τον Νόμο του Hooke, η δύναμη που ασκείται σε ένα ελατήριο είναι ανάλογη με την απόσταση συμπίεσης ή τεντώματος του ελατηρίου. Στο πλαίσιο των επιταχυνσιομέτρων, αυτή η αρχή εκμεταλλεύεται την αλληλεπίδραση μιας μάζας με τα ελατήρια που την περιβάλλουν. Όταν το σύστημα βιώνει μία επιτάχυνση, η μάζα κινείται προκαλώντας την αλλαγή στη χωρητικότητα του πυκνωτικού αισθητήρα, καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων μεταβάλλεται.

Η επιτάχυνση που βιώνει το σύστημα εξαρτάται από τη δύναμη που ασκείται στην ελεύθερη μάζα, η οποία σε συνδυασμό με τον 2ο Νόμο του Νεύτωνα (όπου η δύναμη είναι ανάλογη της επιτάχυνσης) επιτρέπει την υπολογισμό της επιτάχυνσης. Αυτή η μεταβολή στη χωρητικότητα του πυκνωτή ανιχνεύεται από το ηλεκτρονικό σύστημα του IMU και στη συνέχεια επεξεργάζεται για να προσδιορίσει την επιτάχυνση του σώματος.



Εικόνα 19. Αρχή Λειτουργίας Αισθητήρων IMU

Ηράκλειο © 2025

Επιπλέον, η χρήση γυροσκοπίων και μαγνητόμετρων παρέχει πληροφορίες για τη γωνιακή ταχύτητα και τον προσανατολισμό του σώματος. Τα γυροσκόπια μετρούν τον ρυθμό περιστροφής γύρω από τους τρεις άξονες (x, y, z), ενώ τα μαγνητόμετρα μετρούν την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης, επιτρέποντας έτσι την ακριβή εκτίμηση του προσανατολισμού. Όταν όλοι αυτοί οι αισθητήρες συνδυάζονται, το IMU μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια την κίνηση και τον προσανατολισμό του σώματος στον τρισδιάστατο χώρο, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία. Εξίσου σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι αισθητήρες ως σημείο αναφοράς έχουν το σημείο ενεργοποίησης τους καθώς εξαρτώνται από την παρατήρηση των αλλαγών στους αισθητήρες και δεν αποτελούν γνωρίζουν την θέση τους στον χάρτη όπως τα συστήματα στιγματοθέτησης (GPS).

Τέλος τέτοιου είδους σύγχρονοι αισθητήρες για την επικοινωνία με τους μικροελεγκτές χρησιμοποιούν συγκεκριμένα πρωτόκολλα όπως αυτό του I2C το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί στην προκειμένη περίπτωση. Το I2C (IIC Inter – Integrated Circuit) είναι ιδανικό όσο αναφορά την σύζευξη χαμηλής ταχύτητας περιφερειακών με έναν ελεγκτή. Τέτοιου είδους συσκευές χρησιμοποιούν δύο ακροδέκτες για την μεταφορά δεδομένων, αυτή του SCL (Serial Clock) και του SDA (Serial Data). Αυτός ο μειωμένος αριθμός καλωδίων επιτρέπει την δημιουργία μικρότερων συστημάτων με μεγαλύτερη ευκολία καθώς και ελάχιστη κατανάλωση ρεύματος.

4. Σχεδίαση Ρομποτικού Συστήματος

Η σχεδίαση του ρομποτικού μηχανισμού αποτελεί το κρίσιμο ενδιάμεσο στάδιο ανάμεσα στην θεωρητική ανάλυση της κίνησης και την πρακτική υλοποίηση του πρωτοτύπου. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη για την υλοποίηση ενός ρεαλιστικού, λειτουργικού και μηχανολογικά βελτιστοποιημένου ρομποτικού ποδιού. Λαμβάνοντας υπόψη τις κινηματικές απαιτήσεις, τις τιμές ροπών και γωνιών που προέκυψαν από την ανάλυση βάδισης, καθώς και τις απαιτήσεις εγκατάστασης ενός soft επενεργητή, γίνεται ο συστηματικός σχεδιασμός του μηχανισμού τόσο στο επίπεδο του CAD όσο και της επιλογής υλικών και εξαρτημάτων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυνατότητα ενσωμάτωσης του επενεργητή υποβοήθησης, την εργονομία της κατασκευής, και την ικανότητά της να προσομοιώνει επαρκώς τις κινήσεις των κύριων αρθρώσεων του ανθρώπινου κάτω άκρου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αρχικά πρωτότυπα, οι επιλογές κινητήρων και η εξέλιξη του σχεδιασμού μέχρι την τελική επιλογή, βάσει προδιαγραφών και λειτουργικών απαιτήσεων.

4.1 Σχεδιαστικές Απαιτήσεις και Περιορισμοί

Για να σχεδιαστεί ο μηχανισμός ο οποίος αναπτύσσεται είχε κάποιες πρωταρχικές απαιτήσεις και σκοπούς. Αρχικά θα έπρεπε να φιλοξενεί με άνεση έναν Soft επενεργητή εσωτερικά και εξωτερικά του. Έπειτα θα έπρεπε να είναι ανθεκτικός στην καταπόνηση των δυνάμεων που θα δεχτεί από αυτόν και επίσης θα έπρεπε το σύστημα να είναι λειτουργικό και ως προς την ταχύτητα αλλά και τις απαιτούμενες γωνίες. Οι αρχικές απαιτήσεις και οι περιορισμοί όπου δίνονται λοιπόν είναι:

- Ελευθερία Κίνησης: 135° έως -135° ανάμεσα στους δύο βραχίονες (Η μέγιστη γωνία αναδείχθηκε από τα προαναφερθέντα υπολογιστικά φύλλα excel βλ. Πίνακα 2)

- Ελεύθερη επιφάνεια 200mm κατά μήκος του ποδιού, δηλαδή 100 mm από την άρθρωση προς τα δύο μέρη εκάστοτε (Αυτά προσαρμόζονται από τις ανάλογες διαστάσεις του Soft επενεργητή ενώ παράλληλα εφαρμόζεται μία υπερδιαστασιολόγηση για την ευελιξία εγκατάστασης διαφορετικών επενεργητών στο μέλλον, δηλ. στο μήκος 190 mm και πλάτος 74 mm (βλ. Εικόνα 20).

- Αρκετή επιφάνεια κατά πλάτος του επενεργητή ώστε να μπορεί να εφαρμόζει σωστά κατανεμημένες δυνάμεις σε όλο το σύστημα του ΄΄ποδιού΄΄με το οποίο έρχεται σε επαφή.



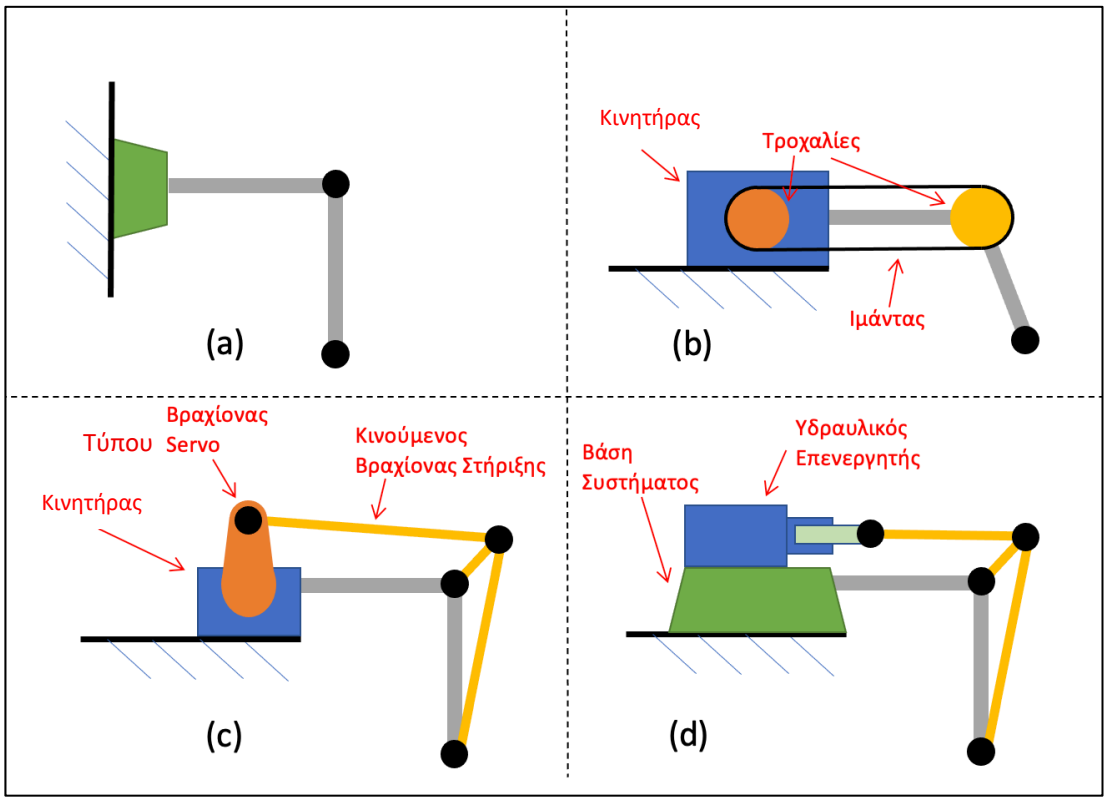
Εικόνα 20. Διαστάσεις πρωτότυπου Soft Επενεργητή υποβοήθησης, μέτρηση μήκους 190 mm και πλάτους 74 mm επενεργητή για τον καθορισμό των διαστάσεων του, επίσης φαίνονται τα ‘‘straps’’ τα οποία χρειάζονται για την εφαρμογή στου Soft επενεργητή στο πόδι καθώς και ο σωλήνας εισόδου του αέρα

Οπότε ως αποτέλεσμα τα τελικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται από το σύστημα ολοκληρωμένα είναι τα εξής:

1. Ροπές με μέγιστη δύναμη στα 83,54 Nm
2. Ελευθερία κίνησης έως 135°
3. Ελεύθερη επιφάνεια εγκατάστασης Soft Επενεργητή συνολικά κατά 200 mm
4. Μέγιστη ταχύτητα στα 100 RPM

4.2 Πρωταρχικά Σχέδια και Ιδέες Μηχανισμών

Γνωρίζοντας πλέον κάποιους στοιχειώδης περιορισμούς και απαιτήσεις πραγματοποιήθηκαν κάποιες πρώτες σκέψεις ως προς την μορφή του μηχανισμού. Αυτές περιέχουν κυρίως διαφορετικούς τρόπους του συστήματος μετάδοσης της κίνησης. Οπότε μετά από έρευνα επιλέχθηκαν τρείς κύριοι μηχανισμού. Αυτοί ξεχώρισαν διότι ήταν οι πιο απλοί και συχνοί που συναντώνται στον κόσμο της ρομποτικής. Έτσι παρακάτω αναπτύσσονται ρομποτικοί μηχανισμοί όπου σαν επενεργητές για την κίνηση του βραχίονα χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ηλεκτρικοί κινητήρες ,όπου χρησιμοποιούνται κατά κόρων στον κλάδο (βλ. StarIETH [17], AnyMAL-D [18]) καθώς και ένας υδραυλικός επενεργητής (προσπαθώντας να σχεδιαστεί μηχανισμός όμοιος του Electro-Hydraulic robotic leg [23]). Επίσης έγιναν προσπάθειες για διαφορετικούς τρόπους της περιστροφής της άρθρωσης μέσω επιπλέον βραχιόνων όπως παρατηρείται στους περισσότερους μηχανισμούς ρομποτικής βάδισης από τα τετράποδα που προαναφέρθηκαν μέχρι και το πόδι το οποίο ως επενεργητές εφαρμόστηκαν υδραυλικά συστήματα παρόμοια με αυτά του ανθρώπινου τένοντα [30].

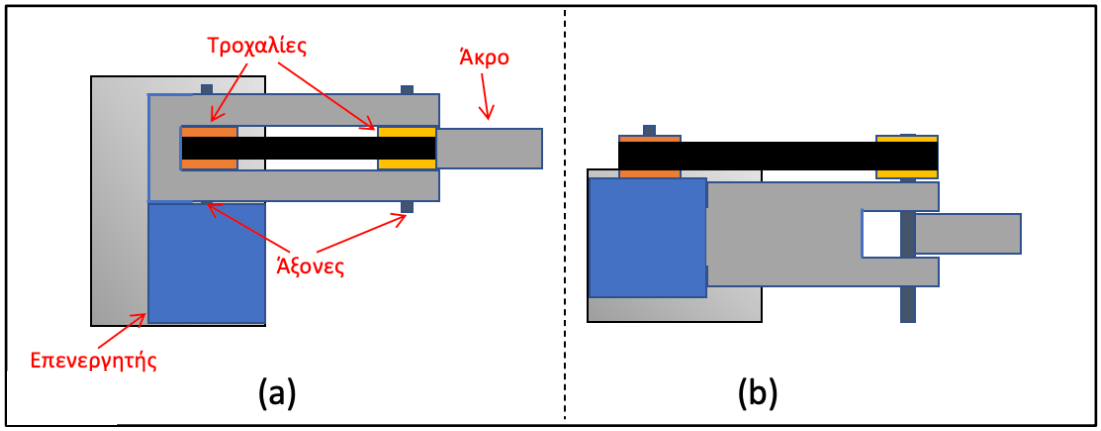


Εικόνα 21. Πλάγια όψη πρωτότυπων σχεδίων διαφόρων μηχανισμών, (a) Μηχανισμός σε μορφή ελευθέρου σώματος, (b) Μηχανισμός με σύστημα τροχαλίας και ιμάντα, (c) Μηχανισμός με σύστημα κινούμενων βραχιόνων με κινητήρα, (d) Μηχανισμός με σύστημα κινούμενων βραχιόνων με υδραυλικό επενεργητή

Στο σχέδιο (a) στην Εικόνα 21 φαίνεται η κύρια διάταξη του συστήματος, το οποίο αποτελείται από τρία στοιχεία: τη σταθερή βάση, και δύο μέλη που αναπαριστούν τα μέλη του ανθρώπινου ποδιού για την εκάστοτε άρθρωση που μελετάται. Στα σχήματα (b), (c), (d) της Εικόνας 21 φαίνονται οι κύριοι που ξεχώρισαν και επιλέχθηκαν μέσω της έρευνας. Ο πρώτος όπως φαίνεται στο σχέδιο (b) αποτελείται από έναν κινητήρα ο οποίος μεταδίδει μέσω ενός συστήματος τροχαλιών και ιμάντα ροπή στην άρθρωση. Ο δεύτερος τρόπος του σχεδίου (c) αφορά έναν κινητήρα όπου μέσω εξωτερικών κινούμενων βραχιόνων θα κινούσε και τα υπόλοιπα άκρα. Στο σχέδιο (d) η λογική κίνησης είναι η ίδια με αυτή της περίπτωσης (c) αλλά ο επενεργητής αφορά έναν γραμμικό υδραυλικό όπου θυμίζει έμμεσα αυτό ενός εκσκαφέα.

Γνωρίζοντας τις απαιτήσεις από την Ενότητα 2.1.4 το πιο σημαντικό στοιχείο το οποίο το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να πραγματοποιεί είναι η ελευθερία κίνησης υπό γωνία από -135 μοίρες έως και 135 μοίρες. Αυτό αυτομάτως καταργεί την περίπτωση των σχεδίων (c) και (d) καθώς τέτοιου είδους μηχανισμοί είναι περιορισμένοι στο πόσο μπορούν να φτάσουν σε τέτοιες γωνίες χωρίς να περιλαμβάνουν πιο σύνθετα συστήματα και ενίσχυση δύναμης του επενεργητή για την πραγματοποίηση της πιο απλής κίνησης. Επίσης σε τέτοια συστήματα είναι δυσκολότερη η εγκατάσταση του Soft Επενεργητή.

Έτσι καταλήγουμε στο σχέδιο (b) της Εικόνας 21 ,το οποίο ικανοποιεί την προϋπόθεση της γωνίας, αλλά προκύπτει το πρόβλημα της ευκολίας εγκατάστασης του έπειτα Soft Επενεργητή. Για να αντιμετωπιστεί και να γίνει ευκολότερη και πιο γρήγορη η προσθήκη και η αφαίρεση των Soft Επενεργητών προέκυψαν τα σχέδια των εξής συστημάτων:



Εικόνα 22. Κάτοψη διαφορετικών συστημάτων με μηχανισμό Τροχαλίας-Ιμάντα, (a) ο ιμάντας Βρίσκεται στο εσωτερικό του βραχίονα, (b) ο ιμάντας βρίσκεται εξωτερικά του βραχίονα

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο σχεδιαστικών παραλλαγών είναι η τοποθέτηση του ιμάντα. Στην πρώτη περίπτωση (σχέδιο a) ο ιμάντας βρίσκεται στο ενδιάμεσο του βραχίονα επιτρέποντας την πλήρη υποδοχή του εξωτερικού επενεργητή χωρίς να ενοχλεί ουσιαστικά κάποιο μέρος του. Στο δεύτερο σχέδιο (σχέδιο b) είναι εξίσου εύκολο παρ' όλα αυτά ο περιορισμός στην μια πλευρά του βραχίονα ίσως να περιορίζει την εγκατάσταση του επενεργητή ως ένα βαθμό.

Ως αποτέλεσμα για παραπάνω μελέτη των δυο αυτών περιπτώσεων σχεδιάστηκαν κάποια σχέδια σε 3D Cad περιβάλλον. Αυτό θα επιτρέψει περεταίρω εξέταση σε κάθε περίπτωση με περισσότερη λεπτομέρεια για την μείωση της περίπτωσης σφαλμάτων.

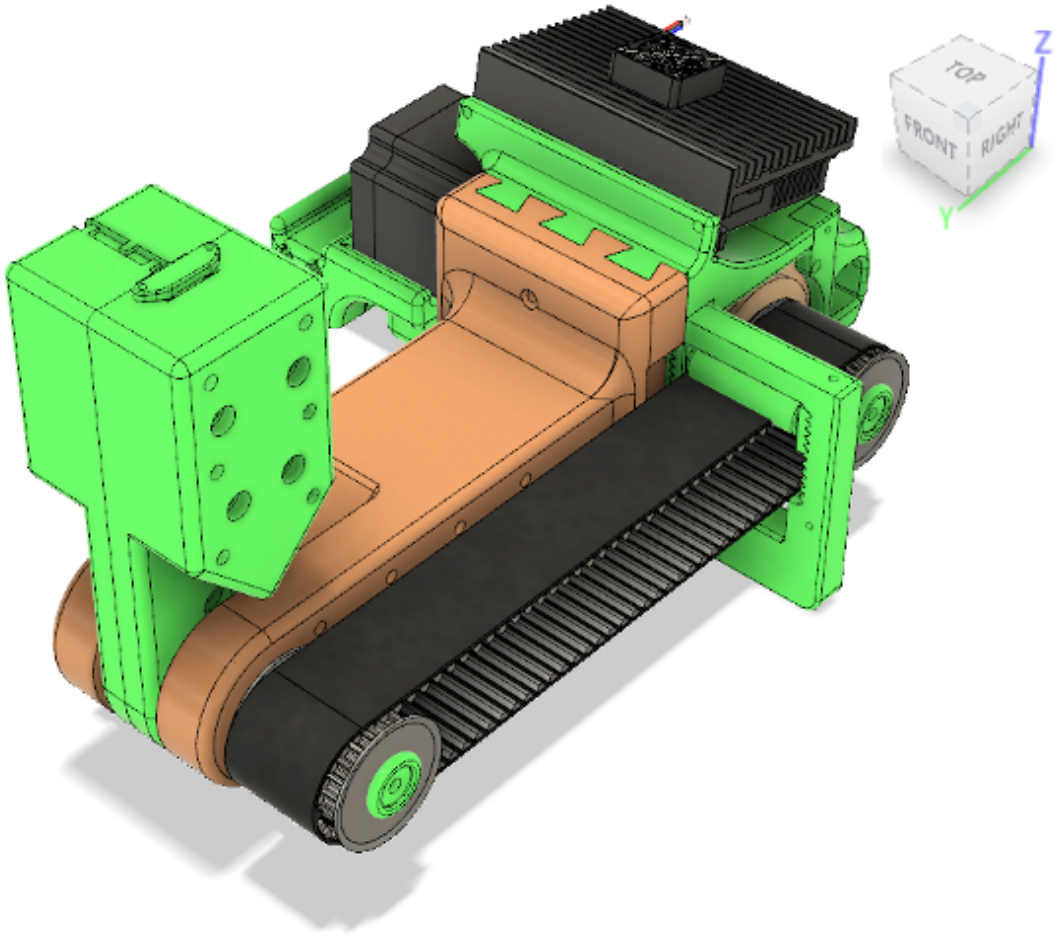
4.3 Σχεδίαση σε Τρισδιάστατο Περιβάλλον

Έχοντας πλέον συγκεντρώσει όλα τα στοιχεία που θα χρειαστούν από το θεωρητικό κομμάτι μέχρι και το ηλεκτρομηχανολογικό πλέον μπορεί να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση του συστήματος. Για την ανάπτυξη του υπό μελέτη μηχανισμού, ήταν απαραίτητη η δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου, τόσο για την κατανόηση της γεωμετρικής δομής όσο και για την προετοιμασία της κατασκευής μέσω 3D εκτύπωσης. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Fusion 360, το οποίο παρέχει όλες τις απαραίτητες δυνατότητες παραμετρικής μοντελοποίησης, συναρμολόγησης και αργότερα προσομοίωσης, καλύπτοντας επαρκώς τις απαιτήσεις της εργασίας.

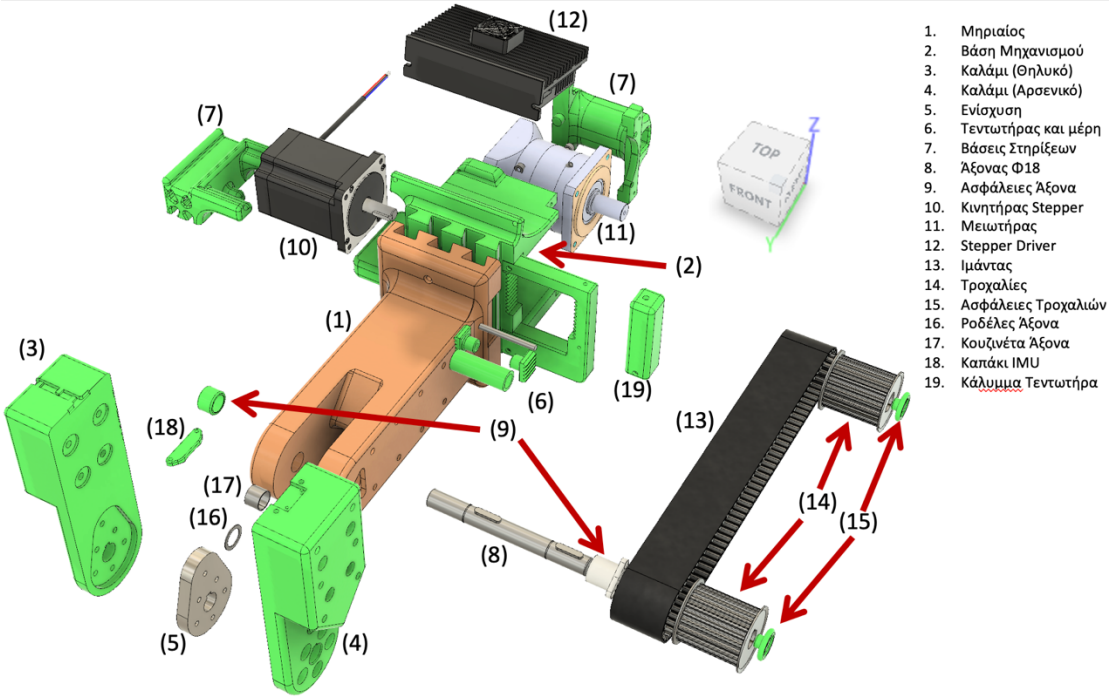
Η χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου επέτρεψε τη λεπτομερή αναπαράσταση όλων των εξαρτημάτων, τη γεωμετρική τους προσαρμογή, τη διερεύνηση της κινηματικής τους συμπεριφοράς μέσω εικονικής συναρμολόγησης καθώς και την δοκιμή των καταπονήσεων μέσω προσομοιώσεων. Παράλληλα, η δυνατότητα εξαγωγής

κατάλληλων κατασκευαστικών αρχείων (π.χ. STL) για τρισδιάστατη εκτύπωση συνέβαλε στην ομαλή μετάβαση από τη φάση της σχεδίασης στη φάση της υλοποίησης του μηχανισμού.

Για αρχή λοιπόν σχεδιάστηκαν τα πρωτότυπα μοντέλα και οι πρώτοι πιθανοί μηχανισμοί. Έπειτα αφού επιλέχθηκαν οι τελικές απαιτήσεις και ο τελικός μηχανισμός ξεκίνησε η τρισδιάστατη μοντελοποίηση και αργότερα συναρμολόγηση. Τέλος πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των δυνάμεων σε περιβάλλον προσομοίωσης του προγράμματος για τυχόν αλλαγές στα σχέδια που λόγω έλλειψης ενισχύσεων σε συγκεκριμένα σημεία. Παρακάτω ακολουθεί το πλήρες σύστημα συναρμολογημένο καθώς και σε Exploded-View για την καλύτερη κατανόηση του πλήρους σχεδίου και των μεθόδων που ακολουθήθηκαν.



Εικόνα 23. Συναρμολογημένο και ολοκληρωμένο σύστημα βραχίονα



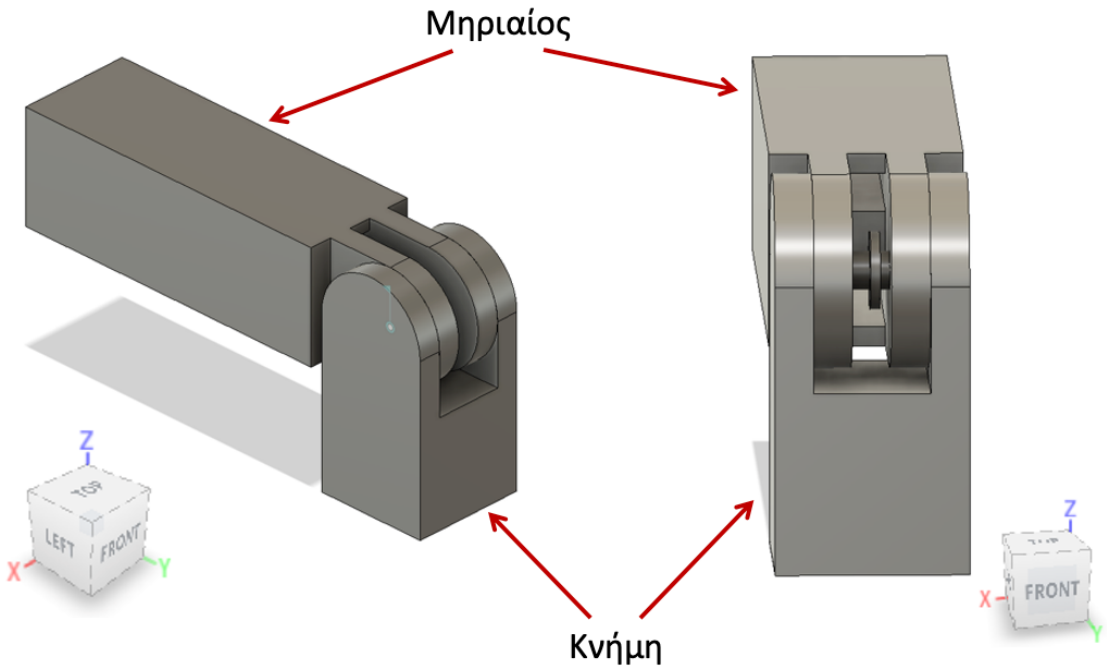
Εικόνα 24.Αριθμημένα μέρη συστήματος

Μέρη Συστήματος	Αρίθμηση
Σταθερό Μέλος	1
Βάση Συστήματος	2
Κινούμενο Μέλος (Θηλυκό)	3
Κινούμενο Μέλος (Αρσενικό)	4
Ενίσχυση	5
Τεντωτήρας (και μέρη αυτού)	6
Βάσεις Στηρίξεων	7
Άξονας Καλαμιού	8
Ασφάλειες Άξονα Καλαμιού	9
Κινητήρας Stepper	10
Μειωτήρας 5:1	11
Stepper Driver	12
Ιμάντας	13
Τροχαλίες	14
Ασφάλειες Τροχαλιών	15
Ροδέλες Άξονα	16
Κουζινέτα Άξονα	17
Καπάκι IMU	18
Κάλυμμα Ασφάλισης Τεντωτήρα	19

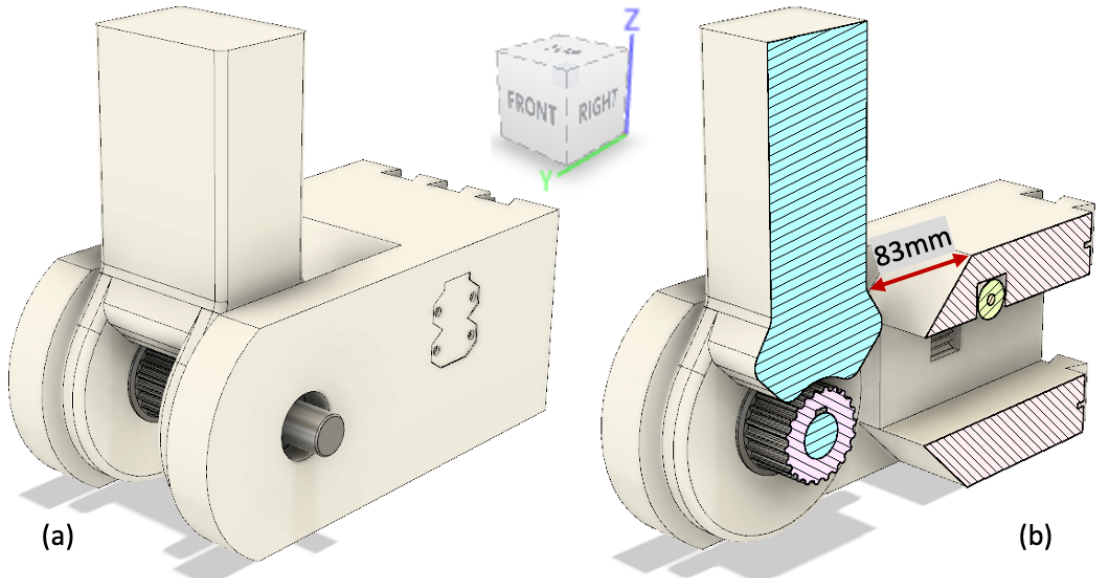
Πίνακας 5. Αριθμημένα μέρη συστήματος

4.3.1 Πρωτότυπα Σχέδια σε Τρισδιάστατο Περιβάλλον

Αρχικά λοιπόν η διαδικασία ξεκίνησε με τον σχεδιασμό των άκρων για την καλύτερη κατανόηση των βημάτων που θα πραγματοποιηθούν για τον σχεδιασμό του γενικού συστήματος. Έτσι για τον μηχανισμό που φαίνεται στα πρότυπα σχέδια (Εικόνα 21 & 22) έγινε η εξής πρωτότυπη σχεδίαση σε τρισδιάστατο περιβάλλον έπειτα από τα πρώτα σκίτσα με σκοπό την δημιουργία μίας πρώτης ιδέας για το ολικό σχέδιο:



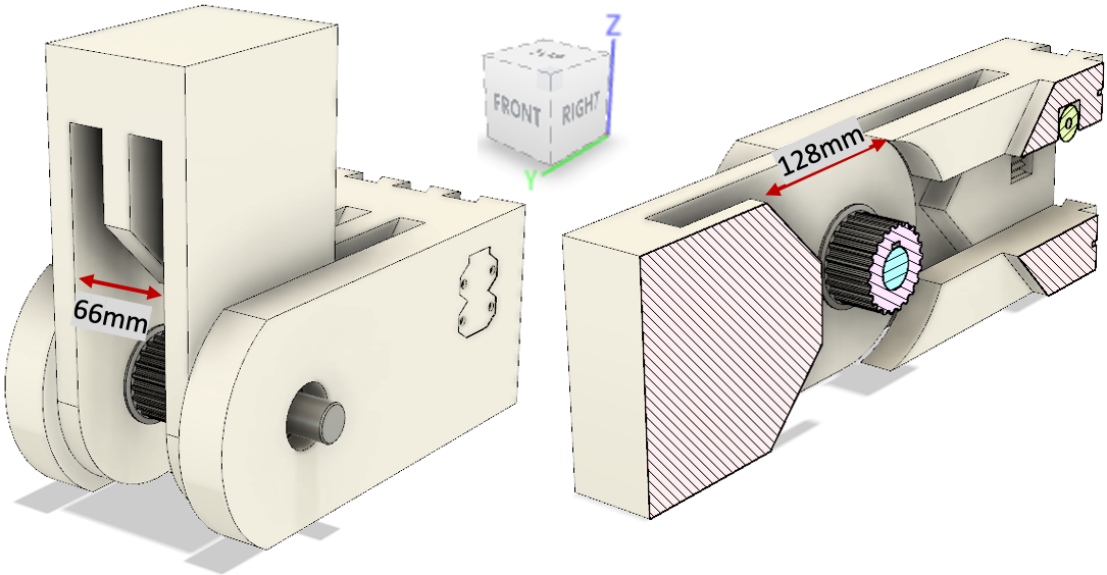
Εικόνα 25. Πρωτότυπο σχέδιο μηχανισμού έπειτα από πρόχειρα σκίτσα για καλύτερη κατανόηση του συστήματος και δημιουργίας μίας πρώτης ιδέας



Εικόνα 26.(α) Αρχική πρωτότυπη τρισδιάστατη μοντελοποίηση ''α'' περίπτωσης Εικόνα 22 και Τομή στο μέσο της για φανέρωση του συστήματος ιμάντα τροχαλίας στην προκειμένη περίπτωση

Στα παραπάνω σχέδια (Εικόνα 25 & 26) διακρίνεται η κνήμη και ο μηριαίος ,αν υποθετικά η συγκεκριμένη άρθρωση ήταν το γόνατο ενός ανθρώπινου ποδιού. Όπως διακρίνεται ο μηχανισμός του ιμάντα στα παραπάνω σχέδια βρίσκεται ακόμα εντός του μηριαίου. Ο μηχανισμός αυτός δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί, παρ' όλα αυτά αυτός ο μηχανισμός δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί αφού στις ακραίες θέσεις του, κοντά στις 135° γωνία, δεν υπήρχε αρκετή επιφάνεια επαφής για τον Soft Επενεργητή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 26 (b) εμφανίζει μία κενή απόσταση 83 mm ανάμεσα στην κνήμη και τον μηριαίο η οποία είναι αρκετά μεγάλη για τον soft επενεργητή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί χωρίς να επηρεάσει την λειτουργία του.

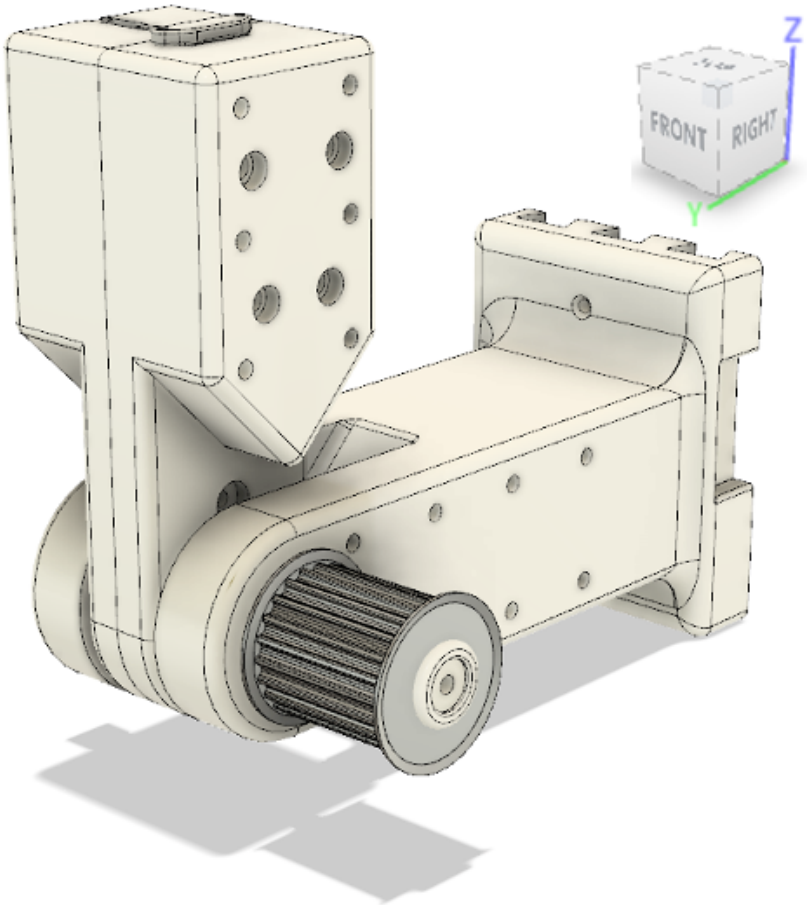
Μια πρώτη πιθανή εναλλακτική για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος θα ήταν η αλλαγή των διαστάσεων της τροχαλίας και του ιμάντα, πράγμα όμως αδύνατο εφόσον όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 3.4 αυτές είναι οι μικρότερες δυνατές παράμετροι ώστε το σύστημα να αντέξει τις καταπονήσεις. Έτσι πραγματοποιήθηκαν και διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι σχεδιασμού όπως η δημιουργία εφαρμοσμένων συναρμοζόμενων μεταξύ τους μελών για να μην εμποδίζονται όταν η γωνία φτάνει τις 135° όπως στην Εικόνα 27:



Εικόνα 27. Συναρμοζόμενο Δοκιμαστικό τρισδιάστατο σχέδιο με ενδιάμεσο κενό κινούμενου μέλους ίσο με 66 mm, τομή σχεδίου και ένδειξη απόστασης κενού επενεργητή 128 mm σε ευθεία θέση πράγμα που το καθιστά κακή επιλογή για το αναπτυσσόμενο σύστημα

Παρ' όλα αυτά στην προκειμένη περίπτωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 27 όταν ο μηχανισμός βρίσκεται σε ευθεία θέση αυτό δημιουργεί ένα κενό ίσο με 128 mm απόσταση η οποία είναι κρίσιμη για την ομαλή λειτουργία του επενεργητή. Αυτό δεν θα αποτελούσε πρόβλημα εάν κι εφόσον το διάκενο κατά πλάτος ήταν μικρότερο από 50-55 mm ώστε να μπορεί να στηρίξει τα άκρα του επενεργητή. Ωστόσο όπως διακρίνεται το διάκενο αυτό ανέρχεται στα 66 mm και δεν μπορεί να γίνει μικρότερο αφού η τροχαλία και η κνήμη δεν μπορούν να μικρύνουν παραπάνω λόγω παραγόντων αντοχής στην καταπόνηση.

Έτσι, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία ενός συστήματος το οποίο θα είναι της μορφής που φαίνεται στην Εικόνα 22, περίπτωση (b), έχοντας δηλαδή εξωτερικά το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Ως αποτέλεσμα με την σειρά του πραγματοποιήθηκε το εξής σχέδιο (Εικόνα 28):

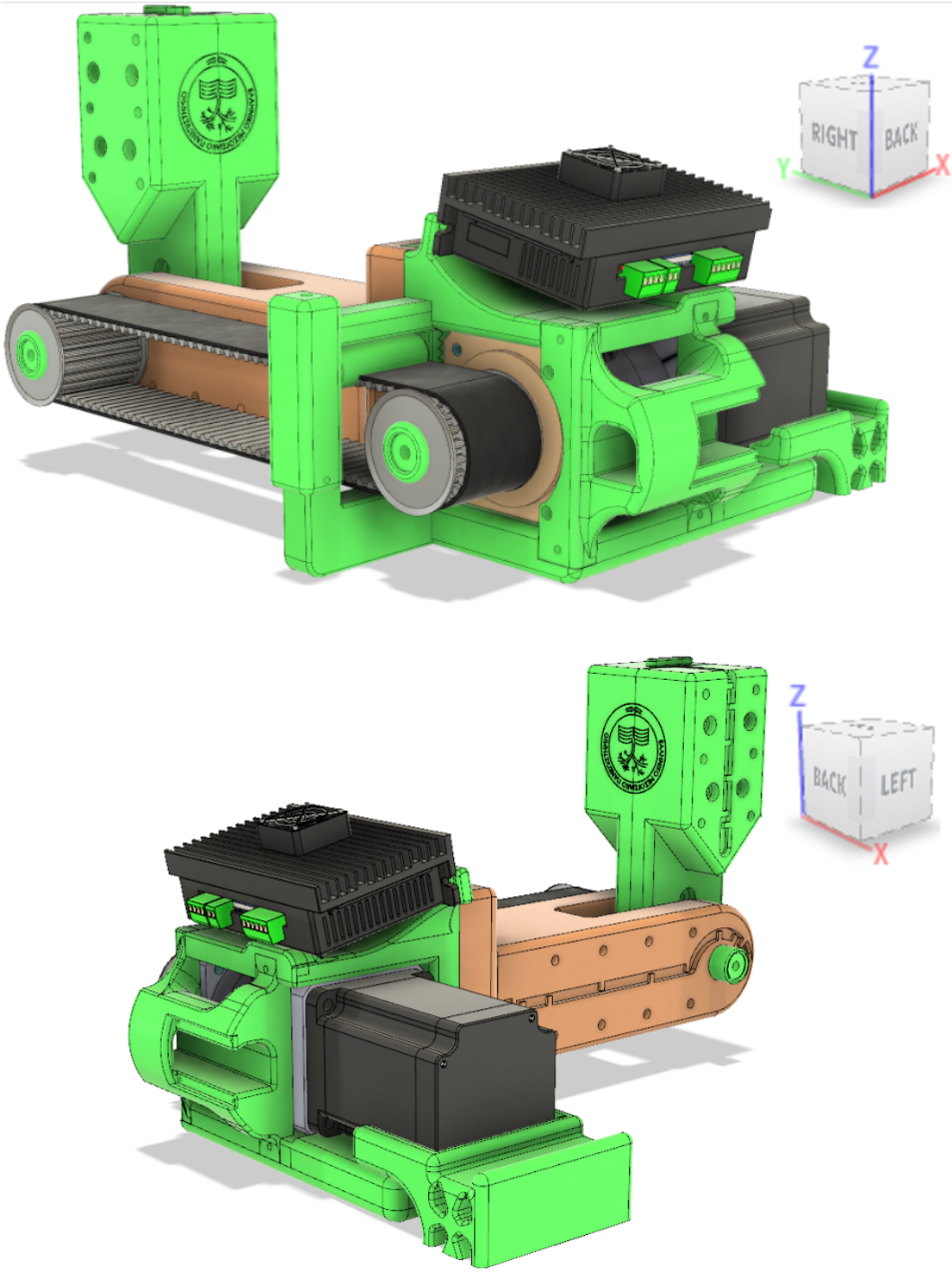


Εικόνα 28. Τελικό σχέδιο άκρου βραχίονα (κινούμενο μέλος και σταθερό μέλος), παρατηρείται πλέον πώς το διάκενο μειώνεται στα 38 mm και το κενό μεταξύ

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το σύστημα τροχαλίας ιμάντα πρόκειται να τοποθετηθεί εξωτερικά του μηχανισμού χωρίς όμως αυτό να περιορίζει την ελευθερία εγκατάστασης του επενεργητή. Επίσης αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση του επενεργητή, εφόσον το διάκενο μειώνεται μόλις στα 38 mm και το κενό που δημιουργείται, σε ευθεία θέση, κατά μήκος μειώνεται στα 55 mm.

Συνεπώς το σύστημα το οποίο επιτρέπει την περεταίρω ανάπτυξη του θα είναι αυτό στο οποίο ο μηχανισμός θα βρίσκεται εξωτερικά του βραχίονα. Έχοντας καλύψει πλήρως τις γενικές απαιτήσεις και τους περιορισμούς πλέον μπορεί να σχεδιαστεί, να κατασκευαστεί και να συναρμολογηθεί ολοκληρωτικά ο βραχίονας.

Ως αποτέλεσμα έπειτα από διαφορετικές τροποποιήσεις του συστήματος σχεδιαστικά ακολουθεί ο βραχίονας ολοκληρωμένος όπως συναρμολογήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον σε επιπλέον όψεις περιμετρικά του. Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύονται τα μέρη της κατασκευής αναλυτικά και με λεπτομέρεια.



Εικόνα 29. Πλάγιες όψεις ολοκληρωμένου βραχίονα για ακριβέστερη κατανόηση, (πάνω φαίνεται η δεξιά πίσω πλάγια όψη και κάτω η αριστερή πίσω πλάγια όψη)

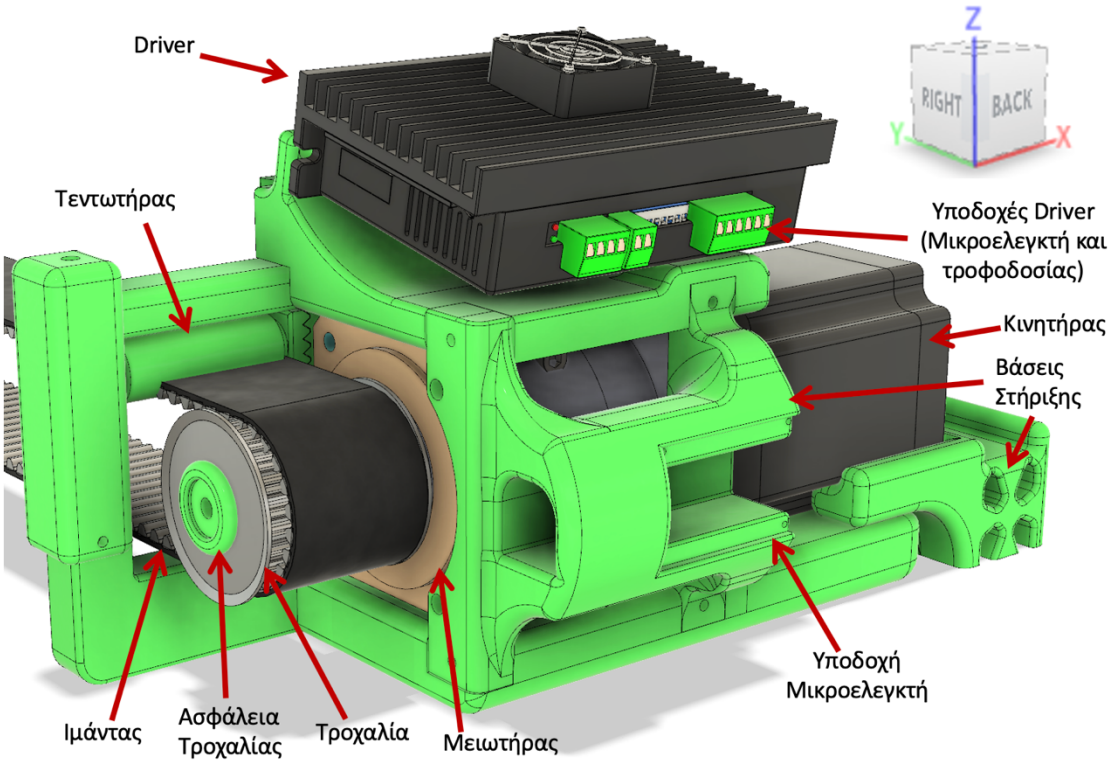
4.3.2 Σχεδίαση Τελικών Εξαρτημάτων

Εφόσον πραγματοποιήθηκε η βασική λογική του σχεδίου μπορούν πλέον να πραγματοποιηθούν και τα τελικά μέρη του συστήματος για την μετέπειτα συναρμολόγηση τους στο σχεδιαστικό περιβάλλον, την προσομοίωση τους όσον

αναφορά τις καταπονήσεις και στο τελικό στάδιο την εξαγωγή G κώδικα για την τρισδιάστατη εκτύπωση τους.

Βάση Βραχίονα

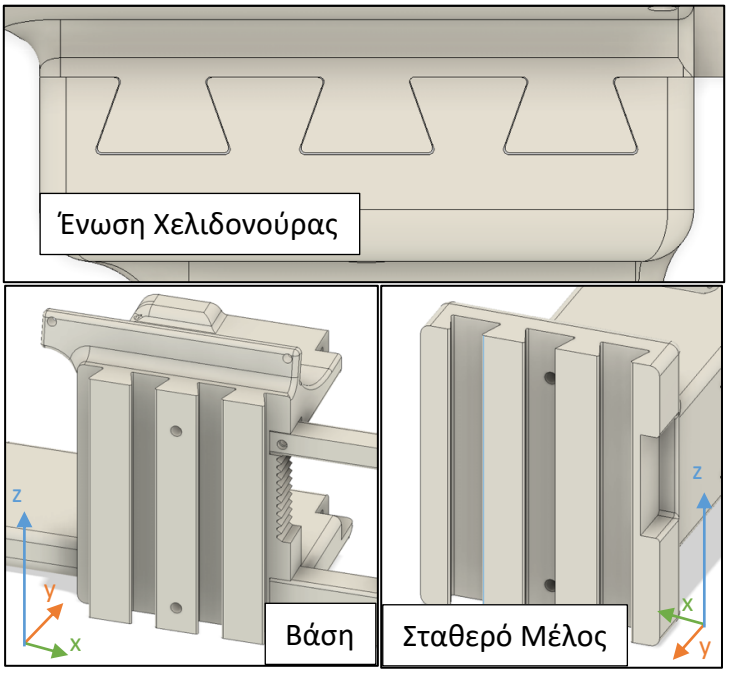
Γνωρίζοντας τα μηχανικά μέρη καθώς και την λογική του μηχανισμού και κάποιες πρώτες διαστάσεις πλέον είναι δυνατή η σχεδίαση της βάσης ολόκληρου του συστήματος. Η βάση του βραχίονα κατασκευάστηκε με κύριο στόχο να φιλοξενεί το σύστημα κινητήρα-μειωτήρα του μηχανισμού. Επιπλέον, είναι υπεύθυνη για τη σταθεροποίηση ολόκληρου του μηχανισμού, και τέλος περιλαμβάνει το σύστημα προέντασης του ιμάντα. Ο σχεδιασμός ξεκίνησε πρώτα από τις υποδοχές του κινητήρα και του μειωτήρα. Ο μειωτήρας θα πραγματοποιεί μία μείωση 5:1 η οποία απαιτείται όπως εξηγείται και αργότερα και αυτή γίνεται με πλανητική διάταξη γραναζιών στο εσωτερικό του, ενώ ο συγκεκριμένος επιλέχθηκε αφού ήταν κατάλληλος και για το συγκεκριμένο κινητήρα. Ο κινητήρας εφαρμόζει άμεσα με τον μειωτήρα χωρίς να πραγματοποιείται κάποια περιστροφή κίνησης οπότε μέχρι την τροχαλία τα τρία αυτά μέλη πρέπει να έχουν τους άξονες ευθυγραμμισμένους στο ίδιο σημείο. Παράλληλα πάνω από την βάση τοποθετείται ο Driver του Stepper κινητήρα ενώ και στην μία βάση στήριξης εκ των δύο φιλοξενείται ο μικροελεγκτής για την καλύτερη οργάνωση των καλωδίων στο σύστημα. Επιπροσθέτως τοποθετείται μία ασφάλεια στην τροχαλία για να μπορεί πάνω σε αυτή να εδραιωθεί η βίδα και η ροδέλα που ασφαλίζουν όλο τω σύστημα του άξονα.



Εικόνα 30. Βάση συστήματος με υποδοχή κινητήρα ,μειωτήρα και μικροελεγκτή, Driver, τεντωτήρα, τροχαλία και ασφάλεια τροχαλίας με τον άξονα και ιμάντα σε πίσω δεξιά πλάγια όψη

Επειδή τα μέρη τα οποία σχεδιάστηκαν είναι αρκετά μεγάλα ο συνολικός μηχανισμός πρέπει να εκτυπωθεί σε μικρότερα κομμάτια. Γι’ αυτόν τον λόγο μεταξύ βάσης και βραχίονα πραγματοποιήθηκε επί της ουσίας μία τομή για να γίνει η κατάλληλη ένωση.

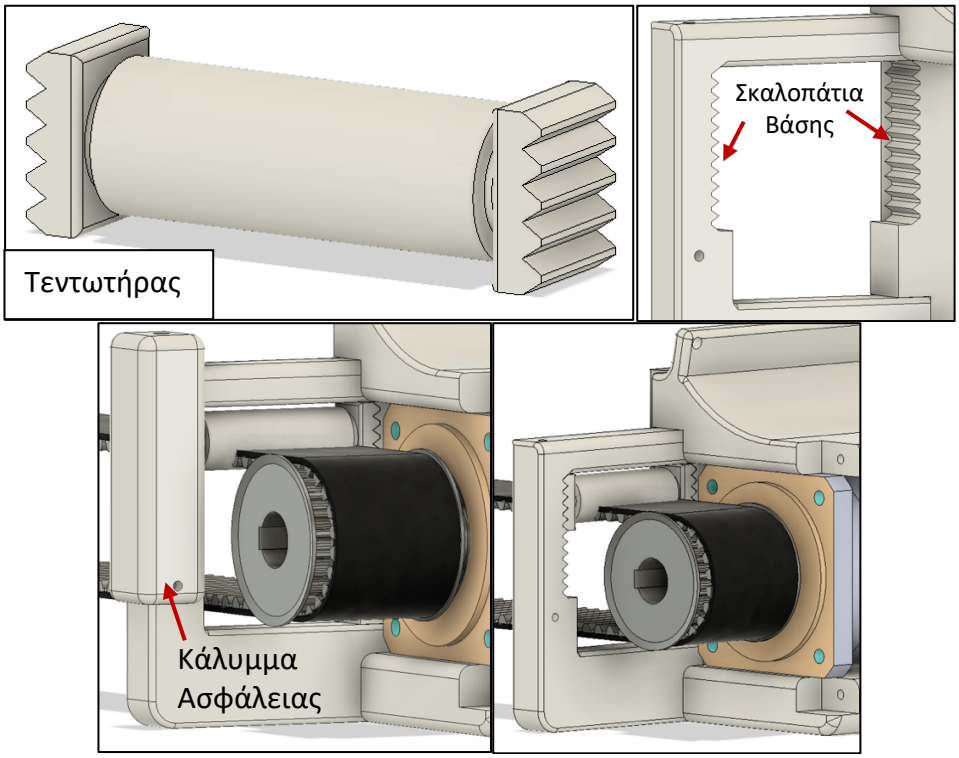
Αυτή στην αρχή θα γινόταν με βίδες παρ’ όλα αυτά οι καταπονήσεις στα σημεία των βιδών θα ήταν μεγάλη και το υλικό της εκτύπωσης ήταν σίγουρο ότι δεν θα άντεχε τις αναμενόμενες δυνάμεις. Γι’ αυτό έπειτα από έρευνα πάρθηκε η απόφαση ώστε αυτή η ένωση να είναι τύπου χελιδονούρας (βλ. Εικόνα 31) η οποία συναντάτε πολύ συχνά στην ξυλουργική και με αυτόν τον τρόπο οι καταπονήσεις θα κατανέμονταν κάθετα κατά μήκος της ένωσης.



Εικόνα 31. Κάτοψη ένωσης χελιδονούρας μεταξύ βάσης και σταθερού μέλους (κάτοψη), όψεις ένωσης

Επίσης για να σφραγίσει και η κίνηση κατά τον κάθετο άξονα z τοποθετούνται δύο βίδες. Αυτές ενισχύουν ακόμα περισσότερο την ανθεκτικότητα και όπως θα δούμε και παρακάτω στην προσομοίωση η ένωση πλέον είναι κατάλληλη ν’ αντέξει τις προκαθορισμένες καταπονήσεις.

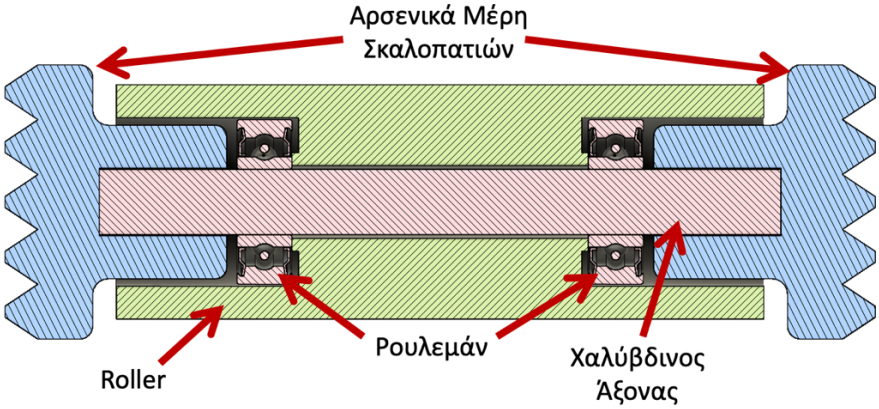
Άλλο ένα χαρακτηριστικό το οποίο θα έπρεπε να υπάρχει στο σύστημα είναι ο τεντωτήρας του ιμάντα για την σωστή λειτουργία του. Έτσι πραγματοποιήθηκε μία έρευνα και ο πιο συχνός τρόπος τέτοιων τεντωτήρων είναι μέσω τραπεζοειδών κοχλιών οι οποίοι ασφαλίζονται από παξιμάδια στην θέση τους. Ωστόσο επειδή η σταθερότητα της θέσης τους μπορεί να άλλαζε με τον καιρό χρήσης πάρθηκε η απόφαση να αναπτυχθεί ένας διαφορετικός τύπος τεντωτήρα. Οπότε σχεδιάστηκε ένας ο οποίος ρυθμίζεται μέσω σκαλοπατιών και φαίνεται πιο καθαρά στην παρακάτω Εικόνα 32:



Εικόνα 32. Τεντωτήρας σκαλοπατιών, κάλυμμα ασφαλείας και σκαλοπάτια βάσης σε πίσω δεξιά πλάγια όψη

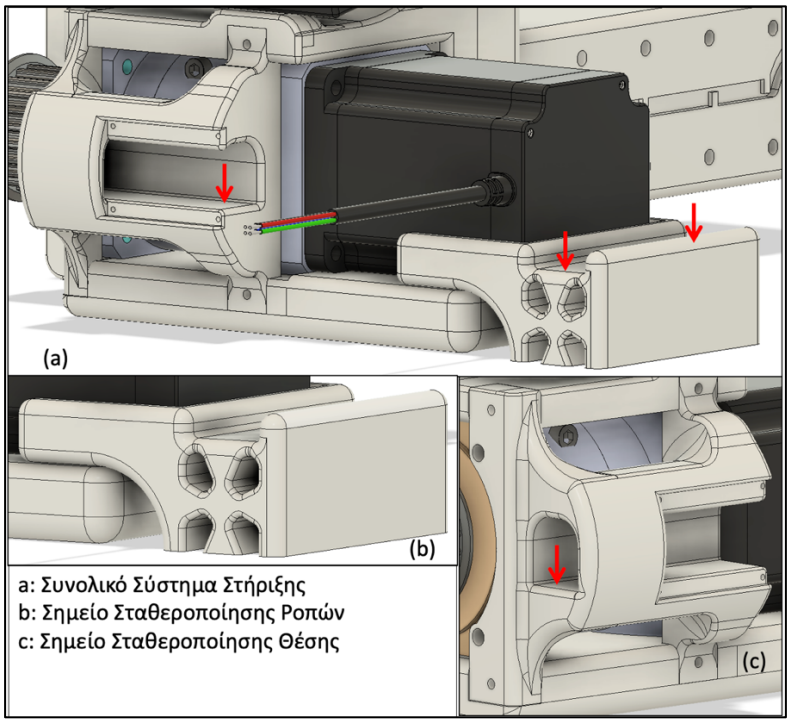
Με αυτόν τον τρόπο σχεδιασμού, ο τεντωτήρας μπορεί και εισέρχεται με ευκολία συρταρωτά στην επιθυμητή θέση στα σκαλοπάτια της βάσης εξωτερικά από την μεριά του βραχίονα, ακόμα και όταν ο ιμάντας έχει ήδη εγκατασταθεί. Για να σταθεροποιηθεί έπειτα ο τεντωτήρας χωρίς να μετακινείται λόγο της τριβής με τον ιμάντα έγινε κι ένα κάλυμμα ασφαλείας το οποίο εφαρμόζει στην βάση.

Ο τεντωτήρας αποτελείται από ένα εξωτερικό ‘’Roller’’ ο οποίος βασίζεται σε δυο ρουλεμάν τα οποία είναι εφαρμοσμένα σε έναν χαλύβδινο άξονα. Τα άκρα του χαλύβδινου άξονα αποτελούν το αρσενικό κομμάτι το οποίο έρχεται και εφαρμόζει στα αρσενικά σκαλοπάτια της βάσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 33. Τομή στο Μέσο του Τεντωτήρα για την Ανάλυση Των Εξαρτημάτων του, στην τομή φαίνεται η θέση των ρουλεμάν, του άξονα και τα αρσενικά μέρη των σκαλοπατιών

Τέλος, εξίσου σημαντικό για την βάση του βραχίονα ήταν η δημιουργία σημείων στα οποία μπορεί με ευκολία τα τοποθετηθεί και να σταθεροποιηθεί πάνω σε μια γωνία ενός τραπεζιού. Γι’ αυτό αγοράστηκαν δύο σφιγκτήρες οι οποίοι θα εφαρμόζουν σε δυο διαφορετικά μέρη του συστήματος για να την ακινητοποίηση του. Για να πραγματοποιηθεί σωστά τοποθετήθηκαν η μία στο πίσω μέρος της βάσης και η άλλη στο ένα άκρο για την παραλαβή των δυνάμεων σε όλους τους άξονες που θα χρειαστεί για την μείωση της προκαλούμενης ροπής (Βλ. Εικόνα 34).



Εικόνα 34. (a) Συνολικό σύστημα στήριξης σε πίσω αριστερή πλάγια όψη, (b) σημείο σταθεροποίησης ροπών σε πίσω αριστερή πλάγια όψη και (c) σημείο σταθεροποίησης θέσης σε πίσω δεξιά πλάγια όψη

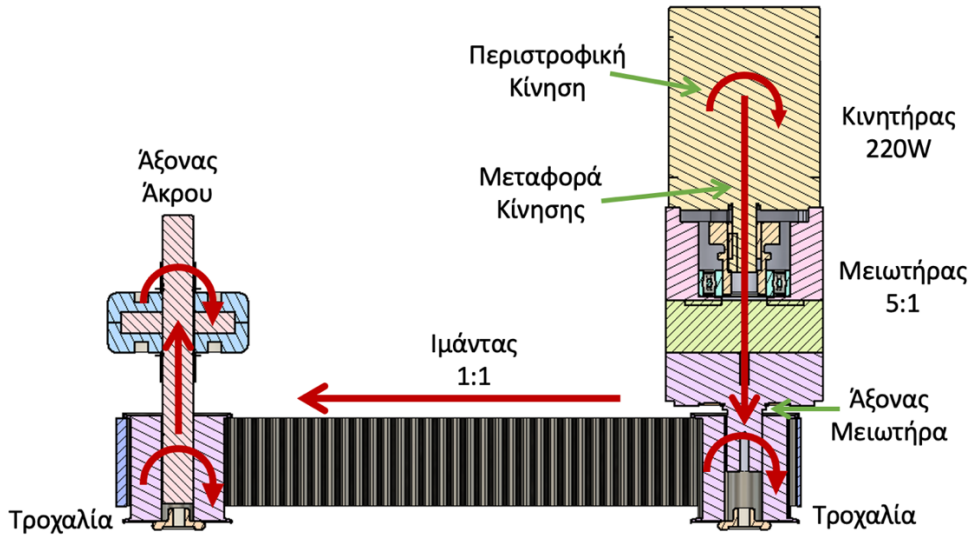
Σε αυτή διακρίνονται και οι δυνάμεις στις οποίες οι σφιγκτήρες θα ασκήσουν τις αντιστάσεις γι’ αυτό και σε αυτά τα σημεία όπως φαίνεται παραπάνω εικόνα έχουν δημιουργηθεί υποδοχές για τις ίδιες. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η κίνηση ολόκληρου του συστήματος και κρατιέται στην επιθυμητή θέση. Το σημείο σταθεροποίησης τον ροπών τοποθετείται σε σημείο απέναντι από το μέγιστο σημείο παραγωγής τέτοιου είδους ροπών όπου είναι ο βραχίονας. Από την άλλη το σημείο σταθεροποίησης θέσης περιορίζει το σύστημα σε γενικότερες κινήσεις που προκύπτουν επάνω στο σημείο τοποθέτησης δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση στο τραπέζι.

Τέλος προστέθηκε υποδοχή για τον Driver του βηματικού κινητήρα στο πάνω μέρος της βάσης για λόγους τακτοποίησης των καλωδίων.

Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο ο κινητήρας μεταδίδει την κίνηση στο κινούμενο μέλος του ποδιού το οποίο θα δούμε παρακάτω. Ο κινητήρας

συνδέεται με τον μειωτήρα κι έπειτα αυτός μεταδίδει την κίνηση στην τροχαλία μέσω της συναρμογής του άξονα του του με την μία τροχαλία. Έπειτα ο ιμάντας μεταφέρει την περιστροφική αυτή κίνηση στην δεύτερη τροχαλία όπου είναι ενωμένη με τον δεύτερο άξονα στο άκρο του σταθερού μέλους του ποδιού. Μέσω του δεύτερου άξονα μεταφέρεται η περιστροφική αυτή κίνηση και στο κινούμενο μέλος κι έτσι πραγματοποιείται η κίνηση του συστήματος όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 35.

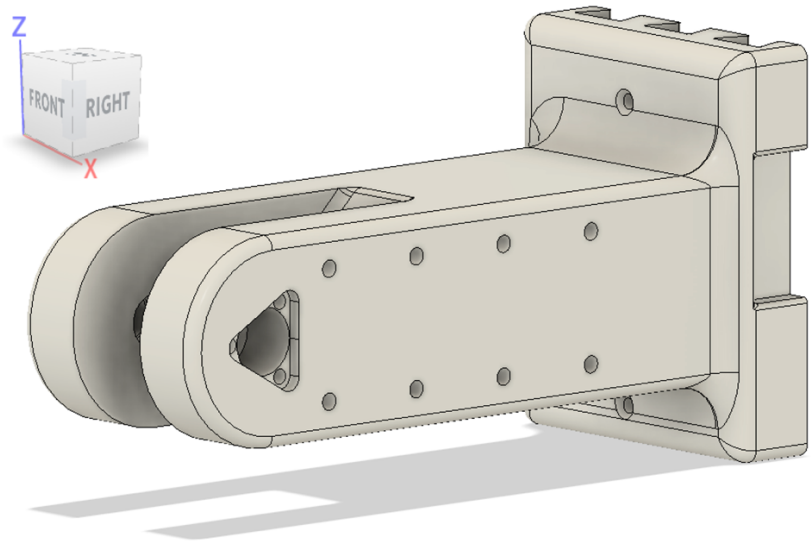


Εικόνα 35. Σύστημα μετάδοσης κίνησης με τομή, η κίνηση μεταφέρεται από τον κινητήρα στον μειωτήρα 5:1, έπειτα συνεχίζει στην τροχαλία της βάσης και από εκεί μεταφέρεται μέσω του ιμάντα στην τροχαλία του κινούμενου μέλους

Οι δύο τροχαλίες είναι όμοιες, οπότε δεν εισάγεται επιπλέον μείωση στο σύστημα, εκτός από την ήδη υπάρχουσα του μειωτήρα (5:1). Η εξασφάλιση της σύνδεσης ανάμεσα στους άξονες και τα κινούμενα μέλη γίνεται με σκουλικόβιδες των τροχαλιών καθώς οι άξονες έχουν τις απαιτούμενες εσοχές.

Σταθερό Μέλος Ποδιού

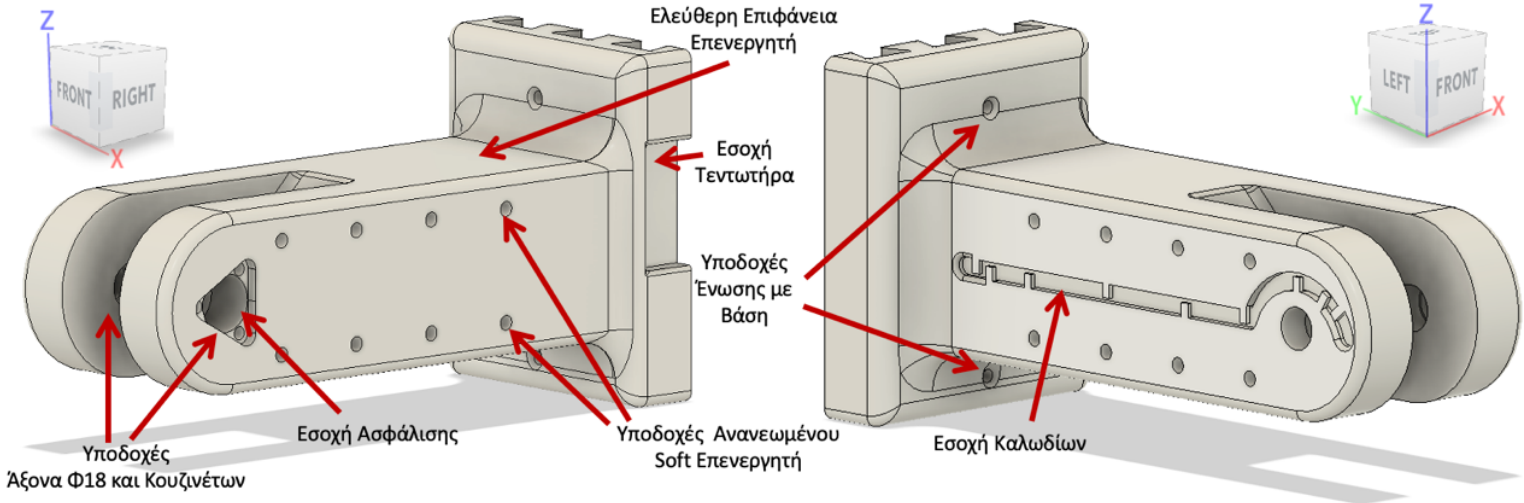
Αυτό αποτελεί το μέρος το οποίο θα αναπαριστά είτε το σώμα είτε τον μηριαίο είτε την κνήμη ως σταθερό σημείο αναφοράς για το συγκεκριμένο σύστημα. Οι απαιτήσεις ως προς αυτό το κομμάτι είναι κυρίως δύο. Να μπορεί να υποδεχτεί τον Soft επενεργητή χωρίς να τον περιορίζει σε ότι αφορά τις διαστάσεις του και τον τρόπο κίνησης καθώς και να είναι ικανός να ανταπεξέλθει στις καταπονήσεις του συστήματος. Έτσι σχεδιάστηκε το εξής μέλος (Εικόνα 36):



Εικόνα 36. Σταθερό μέλος ποδιού σε μπροστά δεξιά πλάγια όψη

Το συγκεκριμένο κομμάτι έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να υποδέχεται το σύστημα ιμάντα-τροχαλίας εξωτερικά όπως προαναφέρθηκε ενώ παράλληλα έχει αρκετό μήκος ώστε να μπορεί να τοποθετείται ο Soft επενεργητής με ευκολία. Επίσης όπως ζητήθηκε τοποθετήθηκαν ειδικές υποδοχές για την εγκατάσταση ενός Soft επενεργητή στα πλαϊνά μέρη του συγκεκριμένου μέλους αλλά όπως θα δούμε αργότερα και στο κινούμενο μέλος του ποδιού.

Επιπλέον οι υπόλοιπες απαιτήσεις για την ολοκλήρωση του συστήματος είναι τα μηχανικά μέρη και οι θέσεις που θα τοποθετηθούν σε αυτό. Αρχικά λοιπόν στο άκρο σχεδιάστηκαν υποδοχές για τον άξονα καθώς και για τα κουζινέτα όπου θα επιτρέπουν την κύλιση του όσο η τροχαλία περιστρέφεται λόγω του κινητήρα. Στο ενδιάμεσο για να ακινητοποιηθεί γραμμικά και όχι περιστροφικά ο άξονας στην θέση του καθώς και το κινούμενο μέλος το οποίο πρόκειται να τοποθετηθεί, θα υπάρξει μία ασφάλεια και αποστάτες δεξιά κι αριστερά του μέλους με σκοπό τον περιορισμό του.



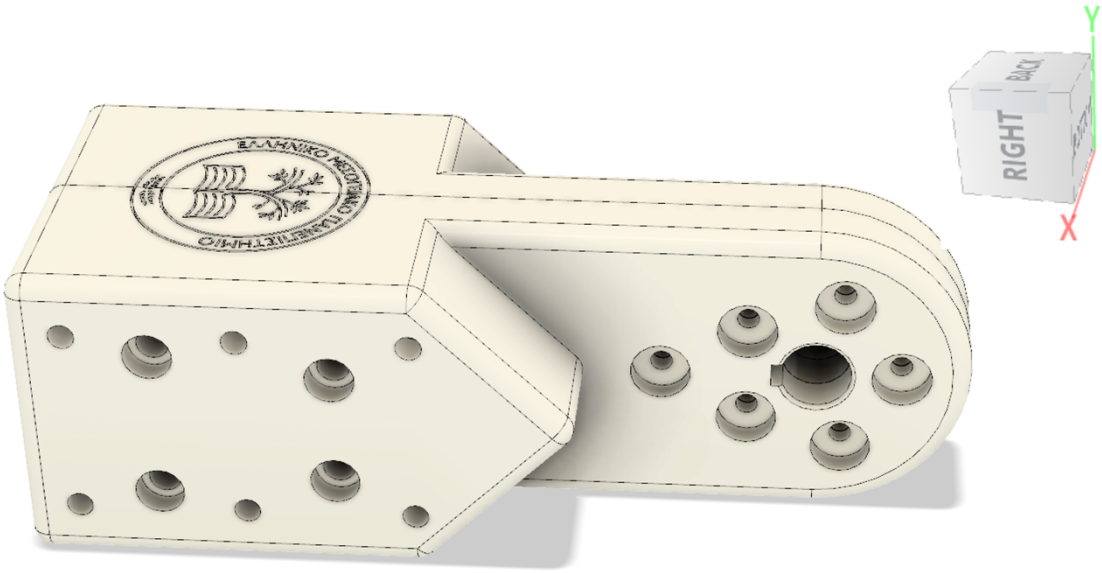
Εικόνα 37. Σταθερό Μέλος Ποδιού σε μπροστά δεξιά και αριστερή πλάγια όψη καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτού (Εσοχή Ασφάλισης, Υποδοχές Άξονα Φ18 και Κουζινέτων, Ελεύθερη Επιφάνεια Soft Επενεργητή, Εσοχή Καλωδίων, Εσοχή Τεντωτήρα, Υποδοχές Ανανεωμένου Soft Επενεργητή, Υποδοχές Ένωσης με Βάση

Ηράκλειο © 2025

Επίσης για την τελειοποίηση του σχεδίου τοποθετήθηκαν οι εκάστοτε εσοχές χελιδονούρας όπως και στην βάση για να σταθεροποιηθεί η ένωση μεταξύ τους καθώς και εσοχή στην άκρη για τακτοποίηση των καλωδίων. Τέλος για να είναι εύκολη η τοποθέτηση του τεντωτήρα στην βάση σχεδιάστηκε άλλη μια εσοχή η οποία επιτρέπει σε αυτόν να τοποθετηθεί αργότερα με ευκολία στην αρχή του μέλους αυτού και πιο σημαντικά σχεδιάστηκε ένα καπάκι ασφάλισης για να πραγματοποιηθεί με ευκολία η συναρμολόγηση μέσω της εσοχής που παρατηρείται.

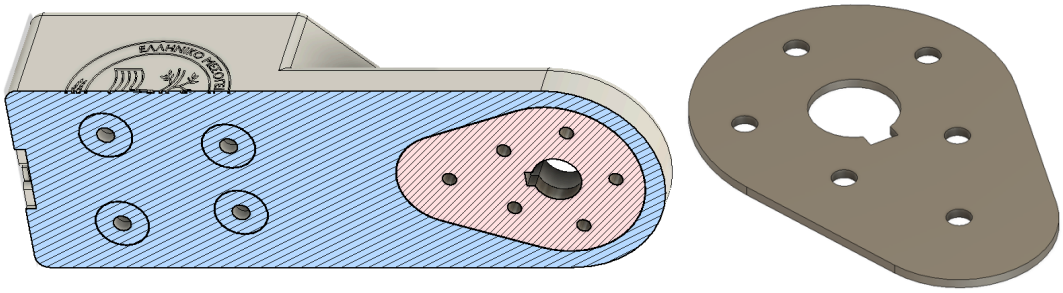
Κινούμενο Μέλος Άρθρωσης (Ποδιού)

Το συγκεκριμένο μέλος αποτελεί το μοναδικό το οποίο θα κινείται σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη που σχεδιάστηκαν. Οι απαιτήσεις αυτού του μέρους είναι πανομοιότυπες με αυτές του σταθερού, δηλαδή να γίνεται εύκολα η εγκατάσταση του Soft επενεργητή καθώς και να αντέχει τις καταπονήσεις που θα αναπτυχθούν κατά τη λειτουργία. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 38 το κινούμενο μέλος μοιάζει με το σταθερό ωστόσο με κάποιες πολύ σημαντικές αλλαγές.



Εικόνα 38. Κινούμενο μέλος ποδιού σε πλάγια όψη

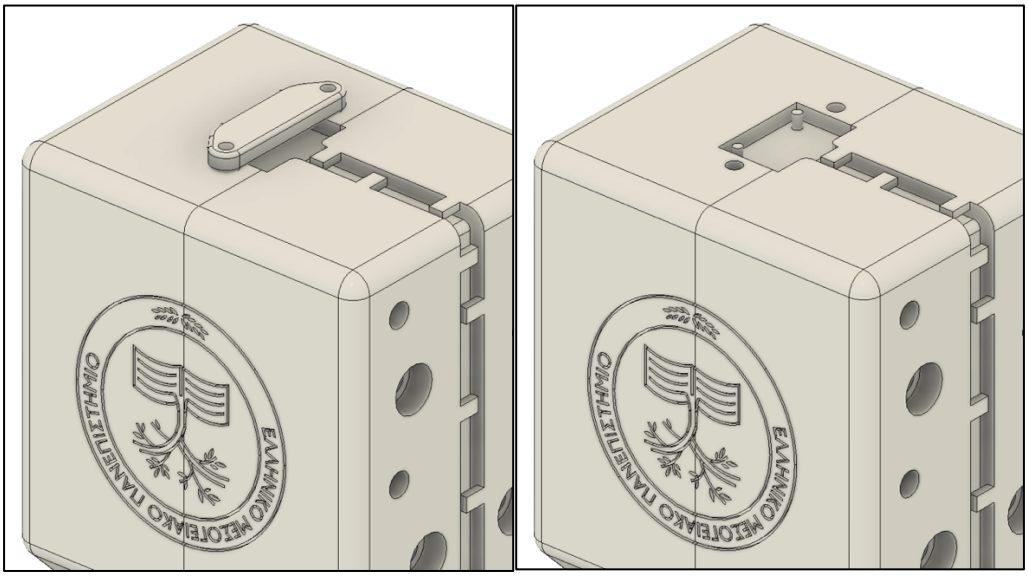
Στο συγκεκριμένο κομμάτι η διαδικασία ενδυνάμωσης είναι πιο περίπλοκη όσο αναφορά την σύνδεση της με τον άξονα περιστροφής. Αυτή πραγματοποιείται μέσω της σφήνας όπως με όλα τα εξαρτήματα, ωστόσο επειδή αυτό το μέρος είναι φτιαγμένο από εκτυπωμένο πλαστικό δεν θα ήταν αρκετό ν’ αντέξει τις εκάστοτε ροπές του επενεργητή. Γι’ αυτό τον λόγο έγινε μία τομή στη μέση αυτού για να τοποθετηθούν πολλαπλά φύλλα 2 χιλιοστών τιτανίου τα οποία θα ενδυναμώσουν την περιοχή που απαιτείται (Βλ. Εικόνα 39).



Εικόνα 39. Τομή κινούμενου μέλους στο μέσο και η εσωτερική ενίσχυση αυτού

Ως αποτέλεσμα όπως θα διαπιστωθεί και αργότερα στις σχεδιαστικές προσομοιώσεις το κινούμενο μέλος θα είναι ικανό πλέον να δεχτεί τις απαιτούμενες ροπές χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις ή θραύσεις στο εσωτερικό. Όπως διαπιστώνεται για την ένωση των δύο μελών λόγω της τομής τοποθετούνται εσοχές τύπου M5 για την καλύτερη πίεση των φύλλων τιτανίου μεταξύ τους ως προς την ενίσχυση και M6 ως προς το υπόλοιπο μέρος του κομματιού.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν οι υπόλοιπες εσοχές όπως προαναφέρθηκαν και στο σταθερό μέλος για την εγκατάσταση Soft επενεργητή και την τακτοποίηση των καλωδίων. Επιπροσθέτως έγινε μία υποδοχή για τον αισθητήρα κίνησης 9 αξόνων (IMU). Αυτός τοποθετήθηκε στο άκρο υπό συγκεκριμένη κλίση ώστε να έχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα όσο αναφορά την ακρίβεια της γωνίας (Βλ. Εικόνα 40).



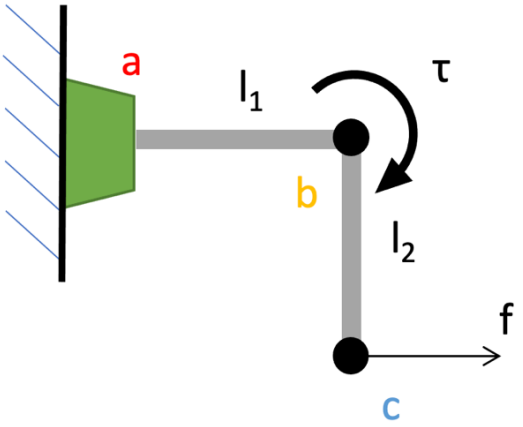
Εικόνα 40. Υποδοχή IMU και καπάκι στο άκρο του κινούμενο μέλος

4.4 Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος και Προσομοιώσεις Συστήματος Βραχίονα

4.4.1 Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος

Το διάγραμμα ελευθέρου σώματος αποτελεί μια διαδικασία η οποία κρίνεται απαραίτητη για μια καλύτερη ανάλυση του συστήματος όσο αναφορά τις δυνάμεις

και τις ροπές του. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση του ελευθέρου σώματος και η μαθηματική του ανάλυση για να χρησιμοποιηθούν οι δυνάμεις αργότερα σε περιβάλλον προσομοίωσης. Αρχικά έγινε η μελέτη της κνήμης και του μηριαίου έχοντας μια ροπή στο γόνατο (a-b: Μηριαίος, b-c: Κνήμη, b: γόνατο).



Εικόνα 41. Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος Βραχίονα

Σε αυτό προστίθεται μία δύναμη f να ασκείται στο άκρο του γονάτου ως αντίδραση του επενεργητή που αργότερα θα προστεθεί για την προσομοίωση. Επίσης είναι γνωστό πλέον πως η μέγιστη ροπή όπου θα δέχεται το σύστημα είναι 94,21Nm. Οπότε υποθέτοντας επίσης κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά λόγω των προ απαιτήσεων τα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν τη σχεδίαση είναι τα εξής:

Μήκος, l1: 0,258m
Μήκος, l2: 0,2m
Ροπή Κινητήρα, M: 94,21Nm

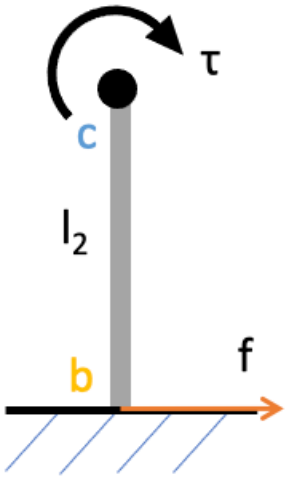
Οπότε και οι υπολογισμοί ακολουθώντας τον τύπο της ροπής θα έχουν:

$$M = f \cdot l_2 \rightarrow$$

$$94{,}21 = f \cdot 0{,}2 \rightarrow$$

$$f = 471{,}05\ N$$

Εν ολίγης στο άκρο “c” του βραχίονα θα αναπτύσσεται μία δύναμη αντίστασης f της τάξεως των 471,05N. Έπειτα για μεγαλύτερη διευκόλυνση το κινούμενο μέλος θεωρείται ως πακτωμένο από το άκρο του με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και ανάλυση των δυνάμεων και των ροπών που δέχεται (βλ. Εικόνα 42).

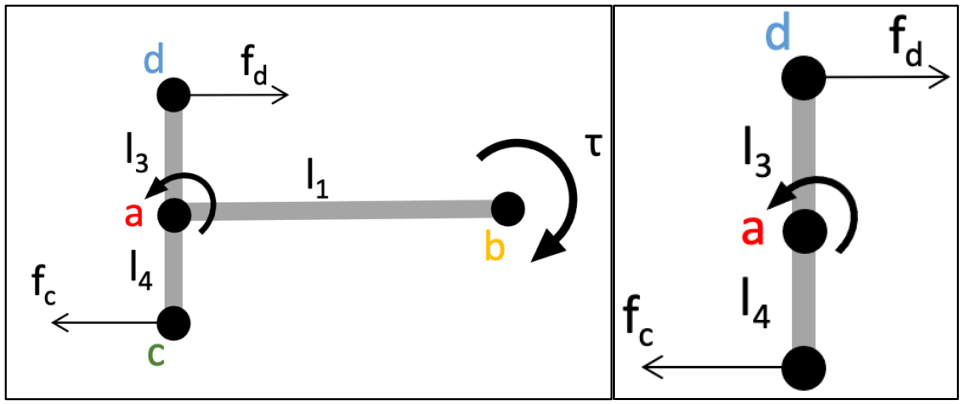


Εικόνα 42. Ανάλυση δυνάμεων στο κινούμενο μέλος του βραχίονα, εδώ το κινούμενο μέλος παρουσιάζεται ως πακτωμένο με σκοπό την ανάλυση του ως προς τις δυνάμεις και τις ροπές που δέχεται

Ως επακόλουθο για να ισορροπήσει το σύστημα στο τμήμα a-b υπάρχει μία ροπή στο σημείο a ίση και αντίθετη με τη ροπή στο σημείο b. Αυτή πραγματοποιεί την εξής εξίσωση ισορροπίας:

$$\Sigma M = 0 \rightarrow M_a + M_b = 0 \rightarrow M_a = -M_b \rightarrow M_a = -94{,}21\ Nm$$

Στην συνέχεια γίνεται η μελέτη της στήριξης με σκοπό την ανάλυση των δυνάμεων που θα ασκούνται στην βάση. Σε αυτό περιέχονται ο μηριαίος, το γόνατο (το οποίο χρησιμοποιείται για την ένδειξη της ροπής) και τη βάση στήριξης όπου παρουσιάζεται έμμεσα αφού θα ενώνεται με την βάση και σε αυτά τα σημεία θα παρουσιάζονται δυνάμεις δράσης αντίδρασης (f_d, f_c).



Εικόνα 43. Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος Σταθερού Μέλους Βραχίονα καθώς και Ανάλυση των Δυνάμεων ως προς την Βάση,

Ως δεδομένα από το σχέδιο το οποίο έχει ετοιμαστεί υπάρχουν:

l_1=0,258 m
l_3=0,084 m
l_4=0,0638 m
M_b = 94,21 Nm

M_a = -94,21 Nm

Άρα η ανάλυση της ράβδου d-c έχει ως εξής:

$$\Sigma M_a = 0 \rightarrow l_3 f_d + l_4 f_c = 0 \rightarrow 0{,}084\, f_d = -0{,}0638\, f_c$$

$$f_d = -0{,}759\, f_c$$

$$\Sigma M_c = 0 \rightarrow M_a \cdot l_4 - f_d \cdot (l_3 + l_4) \rightarrow$$
$$100 \cdot 0{,}0638 - f_d \cdot (0{,}084 + 0{,}0638) = 0 \rightarrow$$

$$f_d = 40{,}66\, N$$

$$f_c = 53{,}53\, N$$

4.4.2 Προσομοίωση Βραχίονα σε Καταπονήσεις μέσα σε Προγραμματιστικό Περιβάλλον

Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του συστήματος όσο αναφορά τις καταπονήσεις πριν ξεκινήσει η διαδικασία υλοποίησης και κατασκευής πρώτα έγιναν κάποιες δοκιμές καταπονήσεων μέσω του προγράμματος Fusion 360. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες οι οποίες μπορεί να είναι είτε επικίνδυνες είτε χρονοβόρες ως προς το σύστημα και την ανακατασκευή.

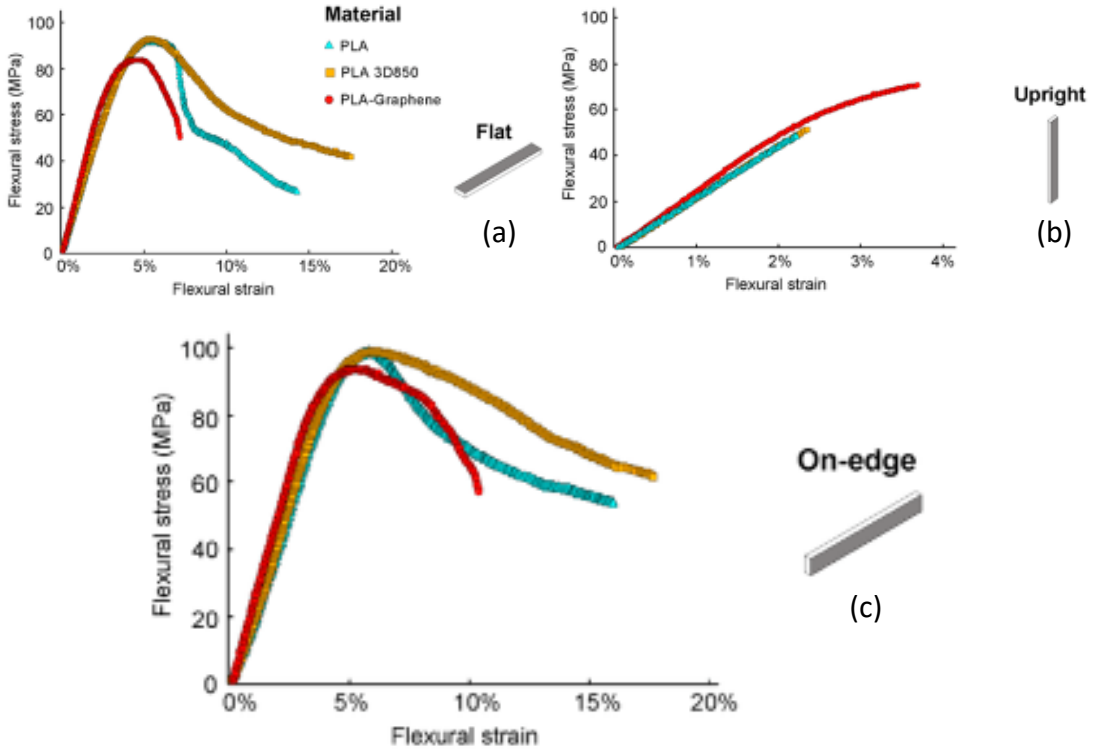
Γνωρίζοντας κι έχοντας ήδη αναλύσει το σύστημα στο ελεύθερο διάγραμμα σώματος (Κεφάλαιο 3.4.1), μπορούν στο εκάστοτε τμήμα του σχεδίου να τοποθετηθούν δυνάμεις και ροπές οι οποίες θα προσομοιώνουν ένα ρεαλιστικό περιβάλλον καταπονήσεων. Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων, επιτρέπει την ψηφιακή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εξαρτήματος υπό φορτίο.

Η προσομοίωση εστιάστηκε στα πιο κρίσιμα εξαρτήματα του μηχανισμού δηλαδή τη βάση, το σταθερό μέλος και, κυρίως, το κινούμενο μέλος του ποδιού, το οποίο δέχεται τις μεγαλύτερες ροπές. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη ρύθμιση της ανάλυσης στατικής καταπόνησης (Static Stress Analysis) ήταν η επιλογή του υλικού, η επιλογή των σταθερών σημείων αναφοράς και η εφαρμογή των φορτίων στα επιλεγμένα σημεία όπως αυτά υπολογίστηκαν.

Ως επιλογή του υλικού εννοείται το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το κάθε τμήμα της κατασκευής. Στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα είναι βασισμένο στο Πολυγαλακτικό Οξύ PLA (Polylactic Acid), άλλα στοιχεία τα οποία εμπεριέχονται είναι το τιτάνιο και ο χάλυβας που συναντώνται στα φύλλα ενίσχυσης και στον άξονα του τεντωτήρα. Το υλικό είναι σημαντικό για την προσομοίωση εφόσον απαιτούνται οι μηχανικές ιδιότητες όπως το Μέτρο Ελαστικότητας ή και η Αντοχή σε Διαρροή για την μεγαλύτερη δυνατή πιστότητα της προσομοίωσης.

Η μηχανική αντοχή των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο Fused Deposition Modeling (FDM) παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα, καθώς εξαρτάται άμεσα από τις παραμέτρους της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για την παρούσα εργασία, με ρυθμίσεις εκτύπωσης τεσσάρων περιμετρικών τοιχωμάτων (wall loops) και 20% πυκνότητας πλήρωσης (infill) η οποία πραγματοποιήθηκε στα τεμάχια που παράχθηκαν, η αντοχή διαρροής του εκτυπωμένου PLA εκτιμάται στα 45 MPa. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής είναι τεκμηριωμένη, καθώς επιστημονικές μελέτες αποδεικνύουν πως ο αριθμός των τοιχωμάτων αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα που καθορίζει την αντοχή ενός εξαρτήματος, επιδρώντας σημαντικά περισσότερο από το ποσοστό της εσωτερικής πλήρωσης [6. da Silva, F. P. T., et al. (2021)], [7. Mogan, A., et al. (2020)].

Ως αποτέλεσμα όπως φαίνεται και από την παρακάτω Εικόνα 44 η καλύτερη τοποθέτηση για την εκτύπωση των τεμαχίων του συστήματος του ποδιού είναι ως προς το άκρο. Αυτό είναι και λογικό καθώς οι στρώσεις δεν καταπονούνται ως προς το ενδιάμεσο τους το οποίο θα προκαλούσε τον διαχωρισμό αυτών αλλά ως προς τον τρόπο τοποθέτησης τους. Στην εν λόγο εικόνα φαίνεται η κάθε περίπτωση εκτύπωσης με τρία διαφορετικά υλικά. Για τον συγκριμένο βραχίωνα χρησιμοποιήθηκε το Πολυγαλακτικό Οξύ (PLA) και γι αυτό τον λόγο η γρμμή ενδιαφέροντος στις εκάστοτε γραφικές παραστάσεις είναι η γαλάζια.



Εικόνα 44. Ασκούμενες Δυνάμεις ανά Τοποθέτηση Εκτύπωσης (Miguel Ángel Caminero [5]), (a) Σε Επίπεδη Θέση, (b) Σε Όρθια Θέση, (c) Σε πλάγια Θέση, Η Γαλάζια Γραμμή Αναπαριστά τις Αντοχές στο PLA

Αντίστοιχα, για τα μεταλλικά μέρη της συναρμολόγησης, οι τιμές αντοχής είναι σαφέστερα καθορισμένες. Ειδικότερα, για τα φύλλα ενίσχυσης του κινούμενου

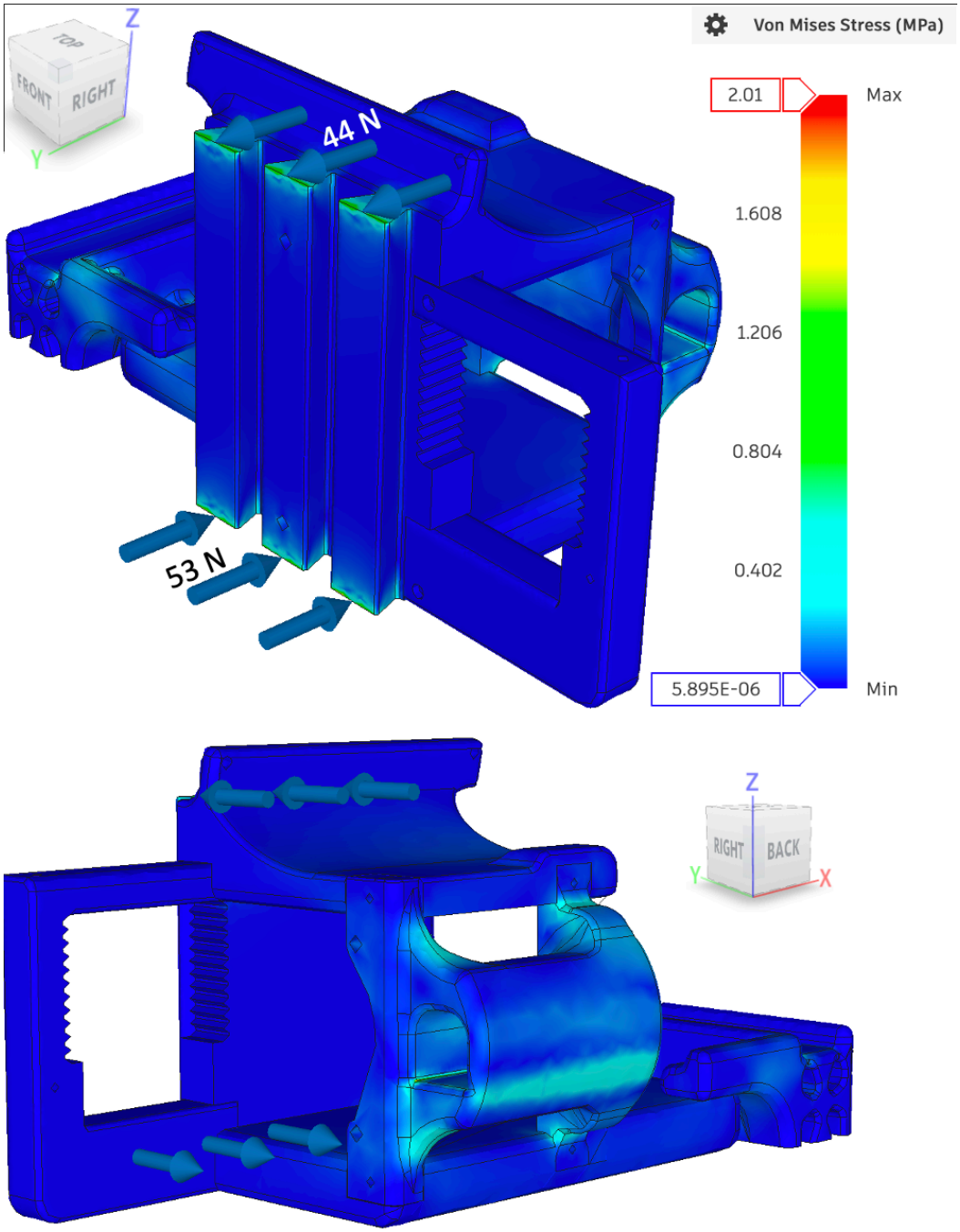
μέλους, όπου χρησιμοποιήθηκε το ευρέως διαδεδομένο κράμα Τιτανίου Ti-6Al-4V (Grade 5), η χαρακτηριστική αντοχή διαρροής του υλικού ανέρχεται στα 880 MPa [8.ASM International (2002)]. Παράλληλα, οι άξονες του μηχανισμού, οι οποίοι κατασκευάζονται από χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα (π.χ. AISI 1045), παρουσιάζουν αντοχή διαρροής της τάξης των 400 MPa [9. MatWeb (2023)].

Με τις τιμές που προαναφέρθηκαν να αποτελούν το σημείο αναφοράς και το κριτήριο ελέγχου, ακολουθεί η παρουσίαση και η ανάλυση των γραφικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για κάθε βασικό εξάρτημα του μηχανισμού, με σκοπό την επιβεβαίωση των αντοχών τους μέσω πεπερασμένων στοιχείων για τις καταπονήσεις όπου πρόκειται να υποστούν. Μέσω αυτών υπολογίζεται ένας Συντελεστής Ασφαλείας (Factor of Safety – FoS) για την καλύτερη εκπόνηση και πιο πλήρως εμπεριστατωμένες δοκιμές. Αυτός ο συντελεστής δεν είναι τίποτα παραπάνω από την διαίρεση της Αντοχής Διαρροής του Υλικού με την Μέγιστη Τάση Λειτουργίας που υπολογίστηκε μέσω των πεπερασμένων στοιχείων του προγραμματιστικού περιβάλλοντος. Ένας συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερος από 2 θεωρείται αρκετά ασφαλής ενώ όσο πλησιάζει την μονάδα αυτό καθιστά το σύστημα αβέβαιο και πιο επικίνδυνο ως προς την αντοχή του στις εκάστοτε καταπονήσεις.

Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, το κριτήριο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της καταπόνησης του μοντέλου είναι το ισοδύναμο όριο τάσης Von Mises και μετράτε στην προκειμένη περίπτωση σε MPa. Πρόκειται για έναν δείκτη που λαμβάνει υπόψη τον συνδυασμό όλων των επιμέρους τάσεων και χρησιμοποιείται ευρέως στη μηχανική για να εκτιμηθεί αν ένα υλικό πλησιάζει το όριο διαρροής του. Η χρωματική κλίμακα που εμφανίζεται δίπλα σε κάθε εικόνα (από μπλε έως κόκκινο) αντιπροσωπεύει την ένταση των τάσεων, με το μπλε να δείχνει τις περιοχές μικρότερης καταπόνησης και το κόκκινο τις περιοχές όπου οι τάσεις είναι υψηλότερες. Έτσι, γίνεται άμεσα ορατή η κατανομή της φόρτισης και τα σημεία που ενδέχεται να είναι πιο κρίσιμα για τη σχεδίαση. Επιπλέον, τα βέλη που απεικονίζονται πάνω στο μοντέλο δείχνουν τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις, τόσο ως προς το σημείο εφαρμογής όσο και τη διεύθυνση τους και από δίπλα εμφανίζεται το ποσό της δύναμης που ασκείται σε N. Αν αυτά είναι περιμετρικά τότε ασκείται ροπή στο σημείο με μονάδα μέτρησης τα Nm.

<u>Βάση Βραχίονα</u>

Στην βάση τα κύρια μέρη καταπόνησης είναι στα σημεία απ’ όπου στηρίζεται εξ’ ολοκλήρου το σύστημα μέσω δύο σφιγκτήρων επί του τραπεζιού καθώς και η ένωση ανάμεσα στο σταθερό μέλος από το οποίο μεταφέρονται οι δυνάμεις κίνησης και ροπών του βραχίονα. Έτσι τοποθετώντας τις κατάλληλες μέγιστες δυνάμεις στην ένωση και ορίζοντας τις βάσεις ως σταθερά σημεία η προσομοίωση έβγαλε μία μέγιστη δύναμη διαρροής της τάξεως των 2 MPa.



Εικόνα 45. Προσομοίωση καταπονήσεων σημείου μέγιστης αντοχής διαρροών βάσης βραχίονα, στα δεξιά της φωτογραφίας φαίνεται η μπάρα καταπονήσεων Von Mises, από το βαθύ γαλάζιο όπου είναι τα σημεία με την λιγότερη καταπόνηση μέχρι το κόκκινο όπου η καταπόνηση είναι πολύ υψηλή, στην εικόνα οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν και ασκούνται φαίνονται με βέλη και δίπλα το ποσό δύναμης σε N

Εφόσον όλο το τμήμα της βάσης είναι κατασκευασμένο από εκτύπωση PLA ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ως:

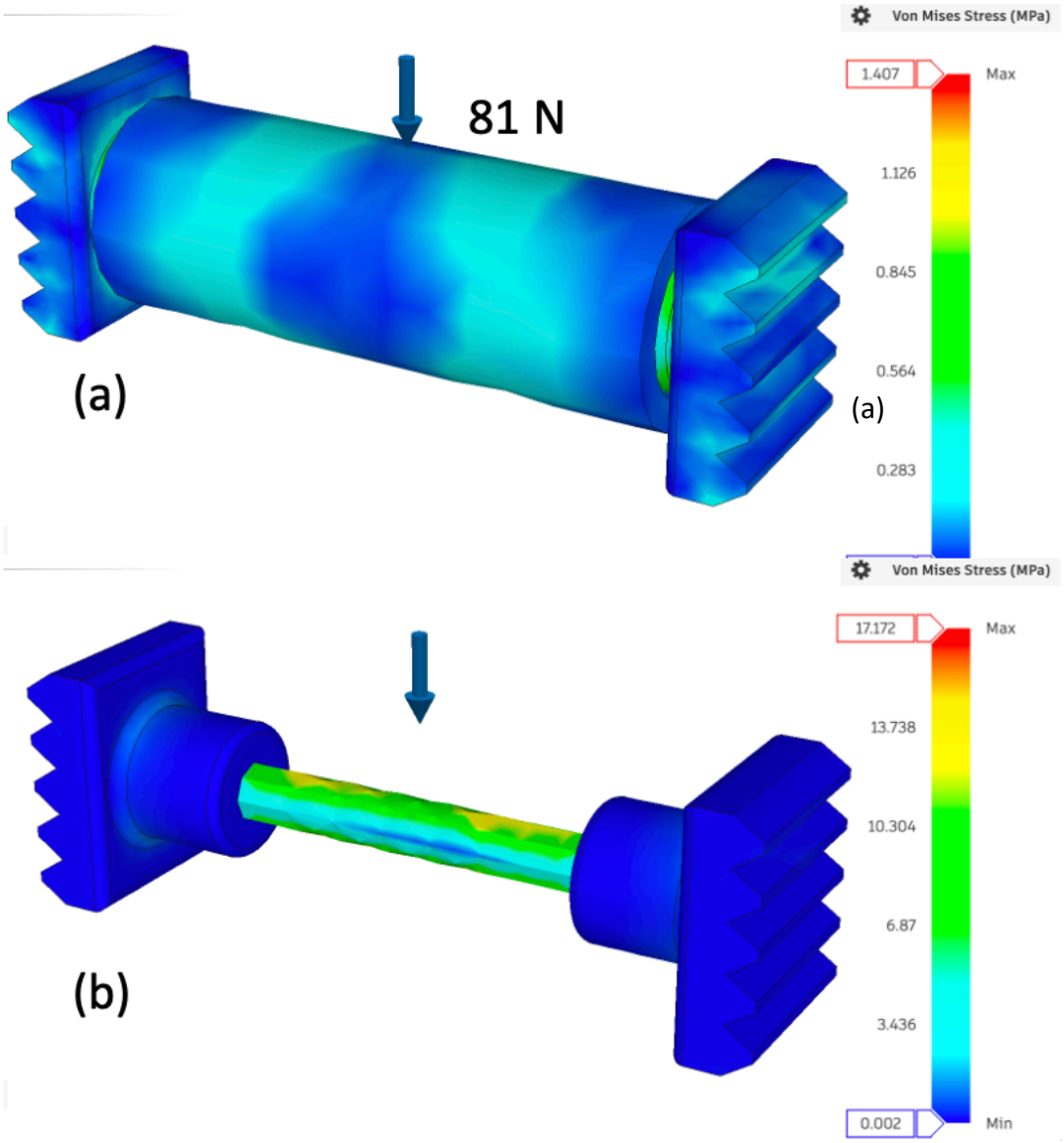
Συντελεστής Ασφαλείας = Αντοχή Διαρροής Υλικού / Μέγιστη Τάση Λειτουργίας

Οπότε θα έχουμε:

Συντελεστής Ασφαλείας = 45 / 2 = 22,5

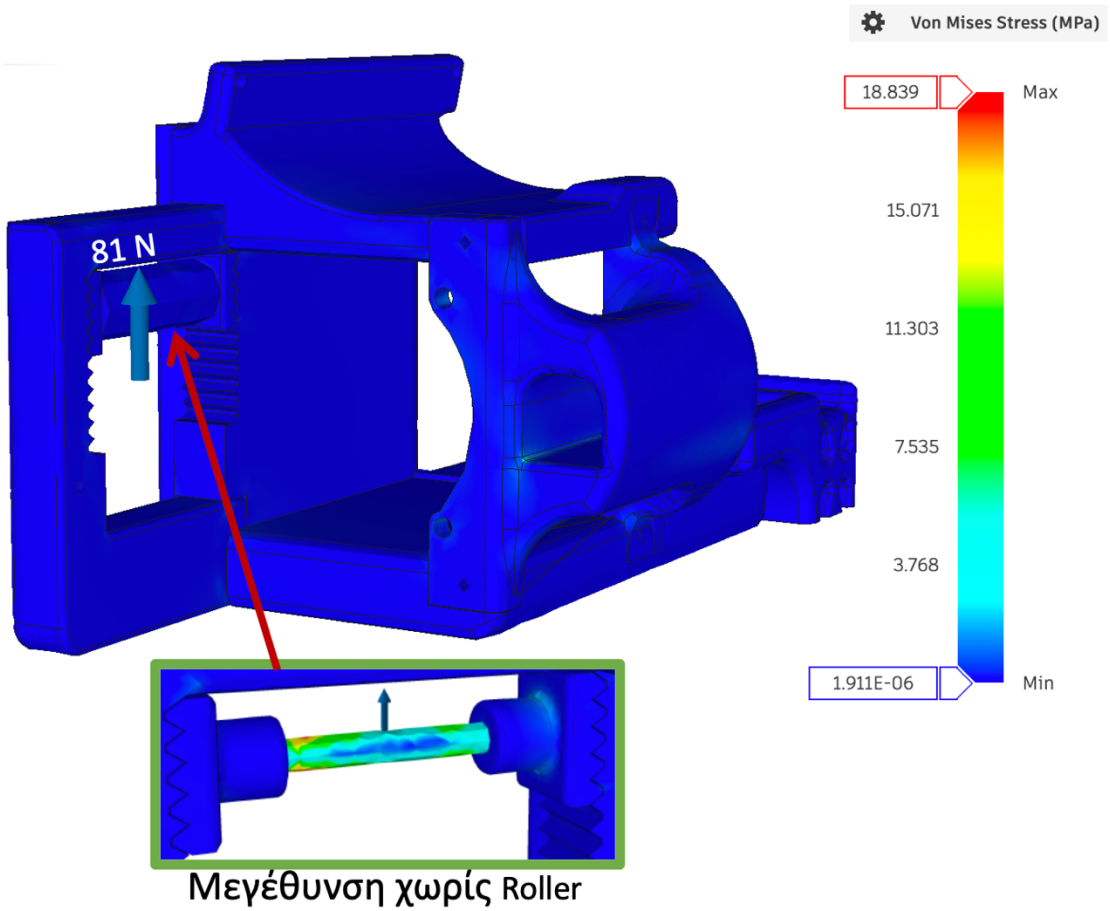
Ως αποτέλεσμα ένας τέτοιος δείκτης ασφαλείας καθιστά την κατασκευή ασφαλής και ελεύθερη από τυχόν σφάλματα και αστοχίες.

Παράλληλα στην βάση του βραχίονα πραγματοποιούνται επιπλέον καταπονήσεις αλλά στα επιπλέον εξαρτήματα που παρευρίσκονται όπως αυτό του τεντωτήρα. Σε αυτό το μέρος έγιναν έλεγχοι ως προς το θηλυκό μέρος ζεύξης του τεντωτήρα αλλά και ως προς τον τεντωτήρα καθ' αυτόν. Οι δυνάμεις που ασκούνται από αυτόν τον τομέα είναι αποκλειστικά από τον ιμάντα και υπολογίζονται μέσω του φυλλαδίου που δίνεται από τον κατασκευαστή [10. Mitsuboshi Timing Belts Catalog]. Έτσι τα αποτελέσματα έδειξαν μέγιστες δυνάμεις διαρροής ως προς το PLA τα 1,4 MPa (Βλέπε Εικόνα 44 Περίπτωση a.) και 17,2 MPa για τον Χαλύβδινο Άξονα (Βλέπε Εικόνα 44 Περίπτωση b.)



Εικόνα 46. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Τεντωτήρα (a. Στα μέρη από PLA, b. Στον Χαλύβδινο Άξονα)

Παράλληλα οι μέγιστες δυνάμεις ως προς την βάση από τον τεντωτήρα ανέρχονται στα 4,177 MPa τα οποία αποτελούν Δυνάμεις Διαρροής ως προς το PLA.



Εικόνα 47. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Βάσης Βραχίονα μέσω Τεντωτήρα

Ως αποτέλεσμα για την βάση οι Συντελεστές Ασφαλείας έχουν ως εξής:

Για την Βάση του Βραχίονα από τον Τεντωτήρα,

Συντελεστής Ασφαλείας = 45 / 4,17 = 10,79

Για τον Τεντωτήρα,

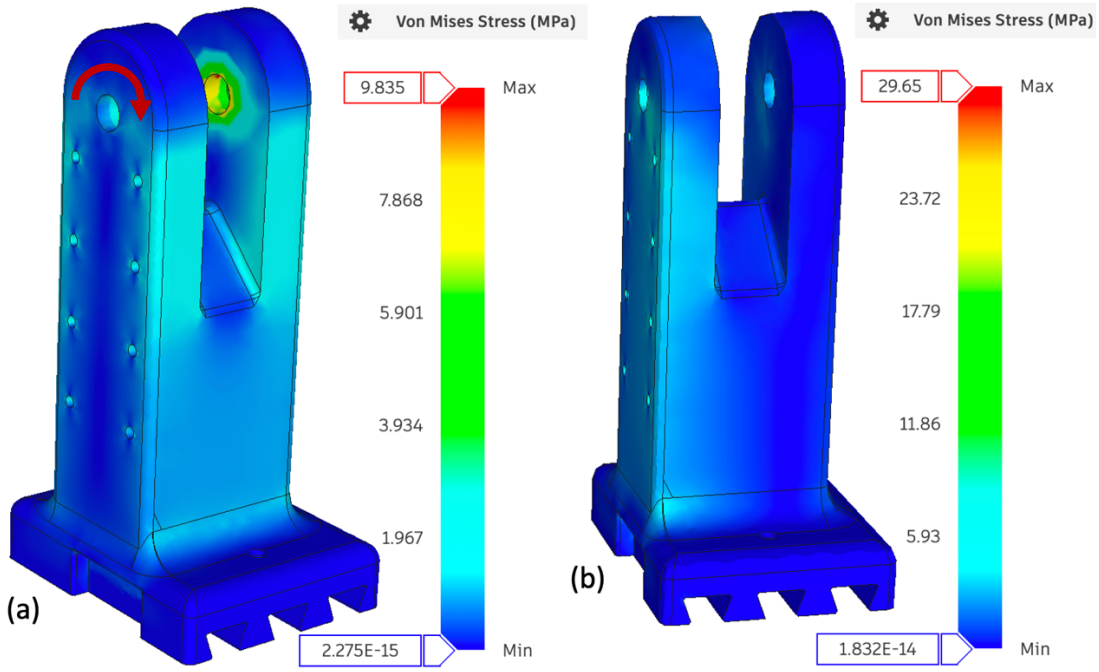
Για το PLA, Συντελεστής Ασφαλείας = 45 / 1,4 = 32,14

Για τον Χαλύβδινο Άξονα, Συντελεστής Ασφαλείας = 45 / 18,84 = 2,38

Έτσι είναι προφανές, εφόσον οι συντελεστές ασφαλείας σε όλες τις δοκιμές είναι μεγαλύτεροι από 2, πως δεν υπάρχει κάποιος λόγος ανησυχίας ως προς αυτά τα τεμάχια για κίνδυνο αστοχίας και βλάβης.

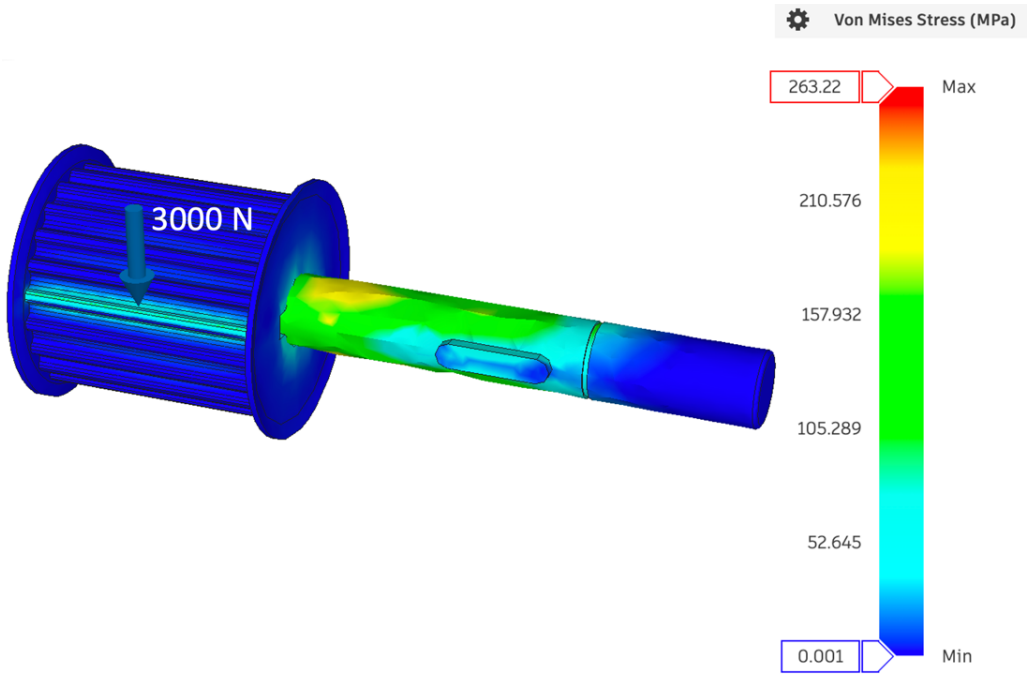
Σταθερό Μέλος Βραχίονα

Για το Σταθερό Μέλος του Βραχίονα οι δυνάμεις ασκούνται εκεί που βρίσκεται ο άξονας καθώς και έμμεσες δυνάμεις του Soft Επενεργητή ενώ το σταθερό σημείο αναφοράς είναι το σημείο με το οποίο ενώνεται με την βάση του βραχίονα στην ‘’χελιδονούρα’’. Σ’ αυτό το τεμάχιο ωστόσο παρευρίσκεται και ο κύριος Άξονας Κίνησης του Βραχίονα ο οποίος δέχεται δυνάμεις εξίσου όπως ο τεντωτήρας από τον ιμάντα λόγω των ροπών και των δυνάμεων που παρευρίσκονται. Συνεπώς λοιπόν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο Σταθερό Μέλος του βραχίονα έχουν ως μέγιστο τα 9 MPa ενώ αν ασκηθούν και οι δυνάμεις που δέχεται ο άξονας οι δυνάμεις φτάνουν ακόμη και τα 29,65 MPa.



Εικόνα 48. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Σταθερού Μέλους Βραχίονα (a. η μέγιστη δύναμη διαρροής αποκλειστικά από τον επενεργητή, b. δυνάμεις λόγο δυνάμεων από τον άξονα)

Επίσης γίνεται και έλεγχος δυνάμεων ως προς τις αντοχές του άξονα καθ’ αυτόν από τον ιμάντα και το σταθερό μέλος του βραχίονα. Η μέγιστη Δύναμη Διαρροής που παρατηρείται στο συγκεκριμένο τεμάχιο είναι τα 263 MPa.



Εικόνα 49. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Κύριου Άξονα Σταθερού Μέλους Βραχίονα

Συγκεντρωτικά λοιπόν οι Συντελεστές Ασφαλείας στην προκειμένη περίπτωση θα είναι:

Για το Σταθερό Μέλος του Βραχίονα ο Ελάχιστος Συντελεστής (όπως παρατηρείται στην περίπτωση του άξονα με δυνάμεις διαρροής στα 29,65 MPa) είναι,

(PLA) , Συντελεστής Ασφαλείας = 45 / 29,65 = 1,51

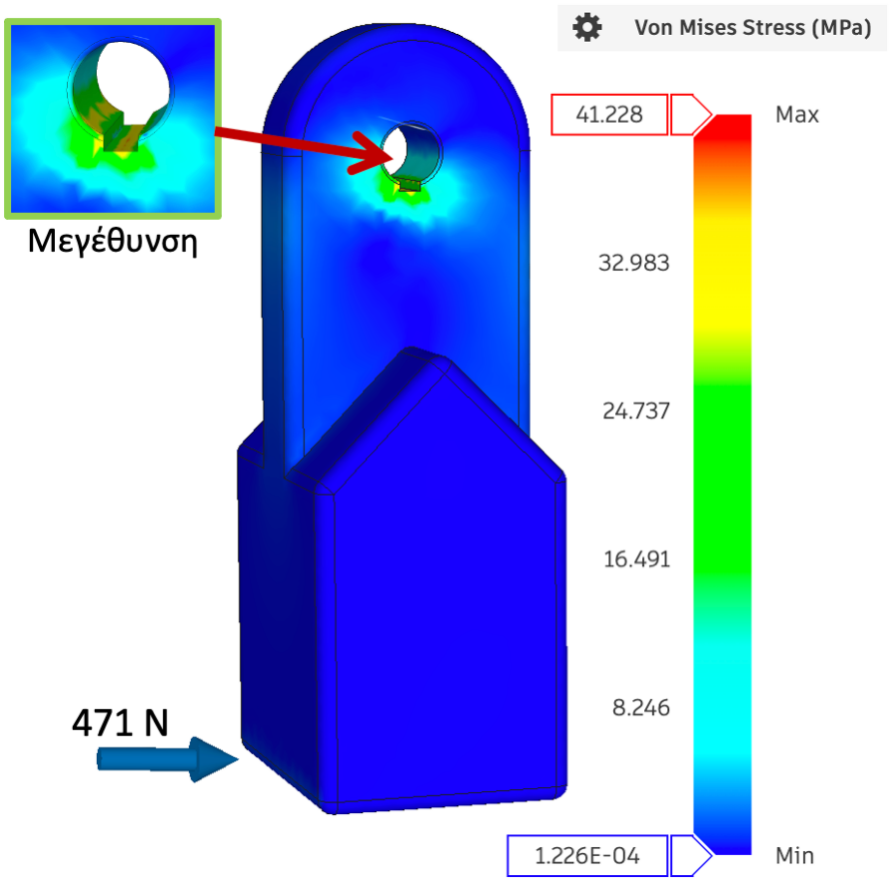
Για τον Κύριο Άξονα Κίνησης του Βραχίονα,

(Χάλυβας) , Συντελεστής Ασφαλείας = 400 / 263,22 = 1,52

Έτσι όπως παρατηρείται ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται σημαντικά στις συγκεκριμένες περιπτώσεις. Ωστόσο είναι ακόμα σε ικανοποιητικό σημείο στο οποίο θεωρείται αξιόπιστος για την λειτουργία ενός πρωτότυπου συστήματος χωρίς προβλήματα.

<u>Κινούμενο Μέλος Βραχίονα</u>

Στο συγκεκριμένο μέλος οι δυνάμεις προέρχονται αποκλειστικά από τον Soft Επενεργητή και συγκεντρώνεται στο σημείο του άξονα και της σφήνας. Εδώ προέκυψε πρόβλημα όσο αναφορά τον συντελεστή ασφαλείας καθώς το PLA δεν ήταν αρκετό για να εξασφαλίσει ένα ασφαλές τμήμα του συστήματος για την λειτουργία. Η μέγιστη Δύναμη Διαρροής έφτανε τα 37,34 MPa νούμερο σημαντικό για το υλικό από το οποίο αποτελείται καθώς ο συντελεστής είναι πολύ μικρός.

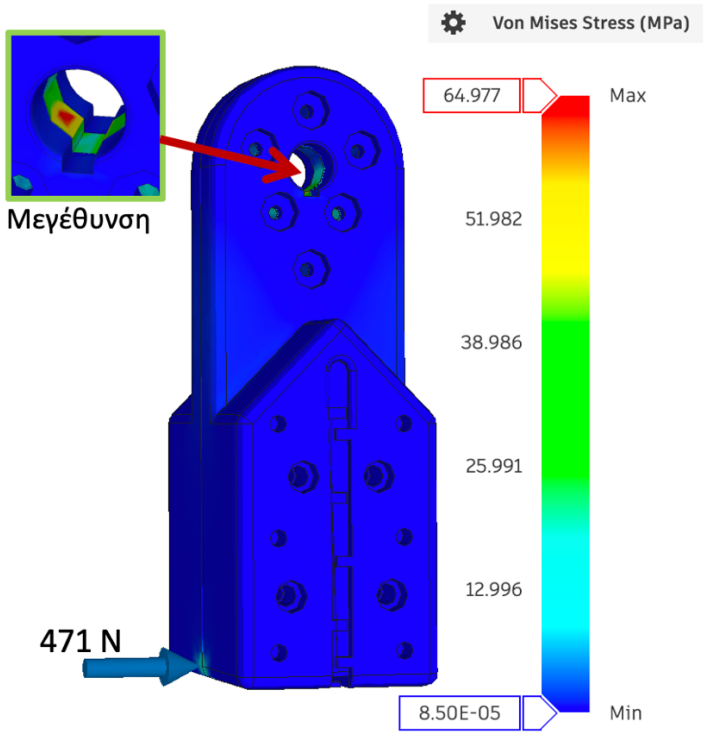


Εικόνα 50. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Πρώτης Έκδοσης Κινούμενου Μέλους Βραχίονα

Έτσι ο Συντελεστής Ασφαλείας της πρώτης εκδοχής υπολογίζεται ως:

Συντελεστής Ασφαλείας = 45 / 41,22 = 1,09

Ο Συγκεκριμένος συντελεστής ασφαλείας είναι σημαντικά χαμηλός και κοντά στην μονάδα. Αυτό καθιστά το τεμάχιο αρκετά επικίνδυνο, ευαίσθητο σε φθορές και εύθραυστο. Γι’ αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της δεύτερης έκδοσης του Κινούμενου Μέλους με ενσωμάτωση ενίσχυσης από Τιτάνιο στα σημεία όπου συναντάται η μεγαλύτερη δύναμη. Έτσι έπειτα από την προσομοίωση η Μέγιστη Τάση που συναντάται είναι τα 65 MPa. Αυτά ωστόσο βρίσκονται αποκλειστικά στο μέρος του τιτανίου πράγμα που το κάνει πολύ πιο δυνατό.



Εικόνα 51. Προσομοίωση Καταπονήσεων Σημείου Μέγιστης Αντοχής Διαρροών Δεύτερης Έκδοσης με Ενίσχυση Τιτανίου

Ως αποτέλεσμα ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται κατά πολύ ως εξής:

Τιτάνιο, Συντελεστής Ασφαλείας = 880 / 65 = 13,53

Με αυτόν τον τρόπο πλέον και το Κινούμενο Μέλος γίνεται πλέον αξιόπιστο ως προς την λειτουργία του υπό τις καταπονήσεις που υπολογίστηκαν.

Συμπερασματικά, η διαδικασία της προσομοίωσης μέσω της Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων αποδείχθηκε καθοριστικής σημασίας για την ψηφιακή επικύρωση και βελτιστοποίηση της μηχανολογικής σχεδίασης πριν την έναρξη της φυσικής κατασκευής. Μέσω της ανάλυσης, επιβεβαιώθηκε αρχικά η υψηλή αντοχή της βάσης και του σταθερού μέλους, τα οποία παρουσίασαν συντελεστές ασφαλείας σημαντικά μεγαλύτερους από τα ελάχιστα αποδεκτά όρια.

Ωστόσο, η πιο κρίσιμη συνεισφορά της προσομοίωσης ήταν ο εντοπισμός της σχεδιαστικής αδυναμίας στο αρχικό κινούμενο μέλος, του οποίου ο οριακός συντελεστής ασφαλείας (FoS = 1.09) κατέδειξε την επιτακτική ανάγκη για ανασχεδιασμό. Η επιτυχής επίλυση του προβλήματος, μέσω της ενσωμάτωσης ενίσχυσης από τιτάνιο και της επακόλουθης αύξησης του συντελεστή ασφαλείας σε μια εξαιρετικά ασφαλή τιμή (FoS = 13.53), επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Έχοντας, λοιπόν, ολοκληρώσει τον κύκλο της ψηφιακής ανάλυσης και με τη βεβαιότητα ότι όλα τα εξαρτήματα θα ανταποκριθούν με ασφάλεια στις αναμενόμενες καταπονήσεις, το επόμενο κεφάλαιο εστιάζει στη μετάβαση από το ψηφιακό μοντέλο στην φυσική υλοποίηση του μηχανισμού.

Ηράκλειο © 2025

4.4.3 Επιλογή Κινητήρα

Η επιλογή κινητήρα ξεκίνησε πρώτα απ' όλα από την κατηγορία του κινητήρα όπου θα επιλέγονταν. Κατά τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου κινητήρα για την επενέργηση της ρομποτικής άρθρωσης, λήφθηκαν υπόψη οι απαιτήσεις σε μέγιστη ροπή, γωνία και ταχύτητα, όπως προέκυψαν από την ανάλυση της ανθρώπινης βάδισης. Η επιλογή επικεντρώθηκε στην κάλυψη αυτών των απαιτήσεων με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, αξιοπιστία και χαμηλό κόστος. Ανάμεσα στις διαθέσιμες κατηγορίες (DC, servo, stepper), ο stepper κινητήρας κρίθηκε ως η καταλληλότερη επιλογή λόγω της ικανότητάς του να προσφέρει υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, ακρίβεια στον έλεγχο θέσης χωρίς την ανάγκη ανατροφοδότησης, και ευκολία ενσωμάτωσης σε συστήματα ελέγχου ανοικτού ή κλειστού βρόχου.

Επιπλέον, η τεχνολογία stepper παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς διακριτοποίησης της κίνησης, στοιχείο ιδιαίτερα χρήσιμο για την πιστή αναπαραγωγή του κύκλου βάδισης. Συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες, όπως οι DC ή οι servo κινητήρες, ο stepper προσφέρει αποδοτική και σταθερή απόδοση σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια στην τοποθέτηση είναι κρίσιμη, χωρίς να απαιτείται σύνθετη ανάδραση ή ακριβός εξοπλισμός.

Έτσι, το πιο κρίσιμο και καθοριστικό σημείο του μηχανισμού αυτού είναι η κατάλληλη επιλογή του Stepper κινητήρα καθώς περιλαμβάνει αρκετούς παράγοντες που επηρεάζουν όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα καθώς και το σχέδιο. Οι κύριες απαιτήσεις του κινητήρα είναι αυτές που υπολογίσθηκαν στο Κεφάλαιο 2 και φαίνονται και εδώ στον Πίνακα 5 για πληρότητα:

Μέγιστη Στιγμιαία Ροπή	39,25 Nm
Μέγιστη Γωνία	270° (Μοίρες), από 135° έως -135°
Μέγιστη Ταχύτητα	91,07 RPM

Πίνακας 6. Προδιαγραφές Συστήματος Μετάδοσης για την Λειτουργία του Βραχίονα

Ως αποτέλεσμα επιλέχθηκε ο εξής κινητήρας:

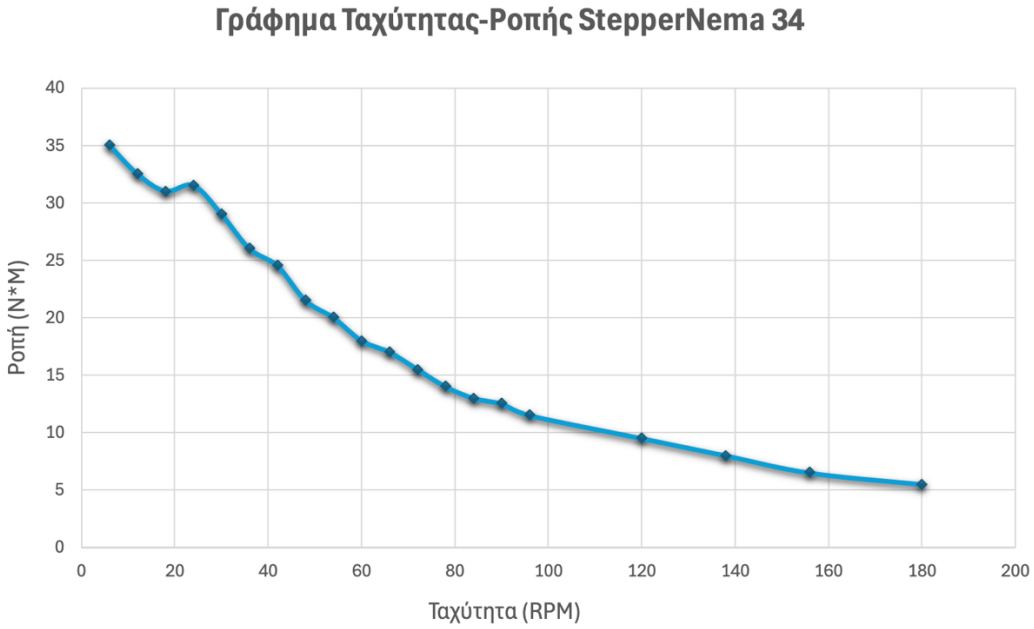


Εικόνα 52. Stepper Κινητήρας Nema 34

Στοιχεία	
Απαιτούμενη Τάση (V)	48-60 VDC
Ισχύς (W)	288
Ονομαστική Ταχύτητα (RPM)	500
Ονομαστική Ροπή(Nm)	4.2
Ονομαστική Τάση (V)	48 VDC

Πίνακας 7.Χαρακτηριστικά Stepper Nema 34 Χωρίς Προσθήκη Μειωτήρα

Όπως παρατηρείται ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι σημαντικά πιο αδύναμος όσο αναφορά την ροπή, ωστόσο είναι ακόμα ικανός να παράγει την ταχύτητα που απαιτείται. Για την ενίσχυση της ροπής προστίθεται πάλι ένας μειωτήρας με λόγο τιμής 5:1, ως αποτέλεσμα η ταχύτητα υπό-πενταπλασιάζεται και η ροπή πενταπλασιάζεται. Οπότε ο τελικός πίνακας (Πίνακας 5) καθώς και το διάγραμμα χαρακτηριστικής καμπύλης του (Εικόνα 53) μετατρέπεται σε:



Εικόνα 53. Σχέση Ταχύτητας-Ροπής Κινητήρα Nema 34

Στοιχεία	
Απαιτούμενη Τάση (V)	48-60 VDC
Ισχύς (W)	288
Ονομαστική Ταχύτητα (RPM)	100
Ονομαστική Ροπή(Nm)	21
Ονομαστική Τάση (V)	48 VDC

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά Stepper Nema 34 Με Προσθήκη Μειωτήρα

Σύμφωνα και με το διάγραμμα πιο συγκεκριμένα φαίνεται η ονομαστική ταχύτητα και αντίστοιχη ροπή που μπορεί να ανταποδώσει ο κινητήρας στην προκειμένη περίπτωση. Έτσι με την μείωση ο κινητήρας ενισχύεται όσο αναφορά την ροπή και παράλληλα παραμένει ικανός να παράξει την ταχύτητα στην οποία πρέπει να

ανταπεξέλθει. Συνεπώς ενώ τα αρχικά κριτήρια δεν ικανοποιούνται πλήρως, πρόκειται για ένα αξιόπιστο σύστημα όσο αναφορά το πειραματικό στάδιο και μια πρώτη επαφή με την έρευνα αυτής της εργασίας.

4.4.4 Μηχανικό Υποσύστημα

Το σύστημα που επιλέχθηκε, δηλαδή αυτό του Stepper Κινητήρα με τον μηχανισμό τροχαλιών-ιμάντα, απαιτεί πολύ συγκεκριμένα εξαρτήματα και θα πρέπει το καθένα να είναι ικανό να ανταπεξέλθει στις εκάστοτε καταπονήσεις. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία επιλογής τους ανάλογα με τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν.

Ιμάντας

Οι ιμάντες χρονισμού (timing belts) αποτελούν ένα από τα πιο διαδεδομένα μέσα μεταφοράς κίνησης σε σύγχρονες μηχανολογικές εφαρμογές. Η λειτουργία τους βασίζεται στη μεταφορά ροπής χωρίς ολίσθηση μεταξύ των οδοντώσεων του ιμάντα και των αντίστοιχων τροχαλιών. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για περιπτώσεις όπου απαιτείται ακρίβεια στον συγχρονισμό, όπως για παράδειγμα σε CNC μηχανές, τρισδιάστατους εκτυπωτές, ρομποτικά συστήματα, μηχανές εσωτερικής καύσης κοκ.

Η επιλογή και η σχεδίαση ενός συστήματος με ιμάντες χρονισμού προϋποθέτει την κατανόηση μιας σειράς παραμέτρων, όπως το φορτίο, οι ταχύτητες περιστροφής, οι συντελεστές καταπόνησης και το περιβάλλον λειτουργίας. Παρότι πρόκειται για μια φαινομενικά απλή τεχνολογία, η σωστή εφαρμογή της παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής μιας μηχανικής διάταξης. Η διαδικασία αυτής λοιπόν έχει ως εξής:

Αρχικά καταγράφονται σημαντικά χαρακτηριστικά όσο αναφορά το σύστημα όπως η ισχύς του κινητήρα, η ταχύτητα λειτουργίας του κοκ. Οπότε ακολουθεί ο εξής πίνακας 8 χαρακτηριστικών:

Στοιχεία	
Τύπος Μηχανής	Ρομποτικός Βραχίονας
Ισχύς Μετάδοσης (P_t)	220 W
Ώρες Λειτουργίας ανά Ημέρα	8-12 Ώρες
Ταχύτητα Μικρής Τροχαλίας	100 RPM
Λόγος Μείωσης Τροχαλιών	1:1
Απόσταση Μεταξύ των Κέντρων	323 mm

Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά Μηχανής για την Εύρεση Ιμάντα

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούνται κάποια στοιχεία τα οποία επιλέχθηκαν έπειτα από πρόχειρη διευθέτηση των απαιτήσεων του συστήματος. Οι ώρες λειτουργίας (8-12 Ώρες) αφορούν τις μέγιστες ώρες κατά τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιείται ο μηχανισμός καθημερινά πηγαίνοντας σε μια κλάση παραπάνω για

την επιβεβαίωση της ασφάλειας. Έπειτα ο λόγος μείωσης είναι 1:1 εφόσον δεν χρειάζεται στην περίπτωση αυτή του συστήματος καθώς υπάρχει μειωτήρας που θα αναλάβει αυτή την διαδικασία στον κινητήρα. Επίσης η απόσταση μεταξύ των κέντρων θα είναι 323 mm όπως προέκυψε από τον σχεδιασμό του συστήματος.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η σχεδιαστική ισχύς του συστήματος. Αρχικά γίνεται η απαραίτητη επιλογή στοιχείων που περιλαμβάνονται στον παράγοντα συντήρησης του ιμάντα (K_o). Έτσι από τρείς πίνακες (Παραπομπή 1 & 2) που δίνονται γι' αυτή την διαδικασία από τη Mitsuboshi (Κατασκευαστής Ανταλλακτικών) και σημειώνονται οι απαιτούμενοι παράγοντες συντελεστή διόρθωσης $K_o\ (=2)$, λόγου μείωσης $K_r\ (=0)$ και τεντωτήρα $K_i (=0{,}2)$:

Ο τεντωτήρας όπως αναπτύσσεται κι αργότερα θα τοποθετηθεί στο σχέδιο θα είναι εκτός του ιμάντα κι εφόσον πρόκειται για σύστημα το οποίο δεν θα έχει ''χαλαρή'' μεριά το K_i θα είναι ίσο με 0.2 όπως εμφανίζεται στην Παραπομπή 2. Έτσι ο παράγοντας συντήρησης του ιμάντα (K_s) υπολογίζεται ως εξής:

$$K_s = K_o + K_r + K_i \ \rightarrow$$

$$K_s \ = \ 2 + 0 + 0{,}2 \ = \ 2{,}2$$

Σε συνδυασμό και με τα χαρακτηριστικά που καταγράφονται στη Παραπομπή 1 η σχεδιαστική ισχύς βρίσκεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$P_d = \ P_t \times K_s$$

$$P_d = \ 220 \times 2.2 = \ 484\ W$$

Γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω στην συνέχεια γίνεται η επιλογή του κατάλληλου τύπου ιμάντα μέσω πινάκων του κατασκευαστή έχοντας ως γνώμονα την σχεδιαστική ισχύ (P_d = 484W) και την ταχύτητα των 100 RPM του συστήματος.

Εξετάζοντας την Παραπομπή 3 και τα χαρακτηριστικά που έχουν διευθετηθεί και υπολογισθεί ο τύπος ιμάντα ο οποίος επιλέχθηκε είναι ο S8M. Ενώ υπήρχαν και κάποιοι άλλοι που ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις, ο συγκεκριμένος είναι πιο ασφαλής και εγκρίνεται και για εγκατάσταση κινητήρα μεγαλύτερης ισχύος (έως και 6kW σχεδιαστικής ισχύος) για τυχόν μελλοντικά project.

Εν συνεχεία, ακολουθεί ο υπολογισμός των υπολοίπων χαρακτηριστικών που απαιτούνται για τον ιμάντα όπως το μήκος, το πλάτος καθώς και η επιλογή της κατάλληλης τροχαλίας. Αρχικά, υπολογίζεται ο αριθμός οδοντώσεων της τροχαλίας σύμφωνα με τον τύπο ιμάντα που επιλέχθηκε. Σε αυτή τη διαδικασία λαμβάνεται υπ' όψιν ως παράγοντας η μικρότερη δυνατή διάμετρος της τροχαλίας καθώς το σύστημα θα πρέπει να είναι μικρό και όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ για μελλοντικές και πάλι χρήσεις που μπορεί να προκύψουν.

Έτσι όπως φαίνεται και στην Παραπομπή 4 ο ελάχιστος αριθμός οδοντώσεων για τον S8M τύπο ιμάντα είναι Z_d=22. Έπειτα από αναζήτηση των χαρακτηριστικών της τροχαλίας προκύπτει επίσης ότι η διάμετρος αυτής θα είναι D_p (mm)= 56,02. Οπότε συνεχίζοντας την μεθοδολογία υπολογισμού ακολουθεί ο υπολογισμός μήκους του ιμάντα (L'_p) :

$$L'_p = 2C' + \frac{\pi(D_p + d_p)}{2} + \frac{(D_p - d_p)^2}{4C'}$$

$$L'_p = 2 \cdot 323 + \frac{\pi(56{,}02 + 56{,}02)}{2} + \frac{(56{,}02 - 56{,}02)^2}{4 \cdot 323}$$

$$L'_p = 821{,}9\ mm$$

Ως επακόλουθο πλέον υπολογίζεται το πλάτος του ιμάντα ξεκινώντας αρχικά από την εύρεση του παράγοντα διόρθωσης οδοντώσεων σε επαφή με την τροχαλία K_m. Ο συγκεκριμένος εξαρτάται από την επαφή που έχει ο ιμάντας με την τροχαλία όπου στην προκειμένη περίπτωση ο λόγος μείωσης είναι 1:1 και η διάμετρος των τροχαλιών είναι ίση οπότε υπολογίζεται:

$$\theta = 180 - \frac{57{,}3 \times (D_p - d_p)}{C}$$

$$\theta = 180 - \frac{57{,}3 \times (56{,}02 - 56{,}02)}{323}$$

$$\theta = 180°$$

Και εν συνεχεία οι οδοντώσεις που έρχονται σε επαφή με την τροχαλία Z_m θα είναι:

$$Z_m = \frac{Z_d \times \theta}{360}$$

$$Z_m = \frac{22 \times 180}{360}$$

$$Z_m = 11$$

Οπότε σύμφωνα και με την Παραπομπή 5 ο συντελεστής K_m στην προκειμένη περίπτωση θα είναι ίσος με 1. Γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω πλέον έχουν συλλεχθεί όλα τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά και οι παράγοντες για να υπολογισθεί το πλάτος του ιμάντα το οποίο βρίσκεται με τον εξής τύπο, όπου B_w, είναι το Πλάτος Τροχαλίας , P_s η βασική εκτίμηση ισχύος και W_p το καθορισμένο πλάτος του ιμάντα:

$$B_{w'} = \frac{P_d}{P_s \times K_m} \times W_p$$

Η βασική εκτίμηση ισχύος και το καθορισμένο πλάτος ιμάντα βρίσκονται από άλλους δύο πίνακες (Παραπομπή 6 & 7). Συνεπώς το πλάτος ιμάντα θα είναι:

$$B_{w'} = \frac{484}{810 \times 1} \times 60$$

$$B_{w'} = 35{,}85\ mm$$

Ως αποτέλεσμα γνωρίζοντας πλέον και το ελάχιστο πλάτος ιμάντα μπορεί να βρεθεί ο τελικός ιμάντας μέσω του καταλόγου (Παραπομπή 8) ακολουθώντας τα εξής τελικά χαρακτηριστικά:

Τύπος Οδοντώσεων Ιμάντα	S8M
Ελάχιστο Μήκος Ιμάντα L'_p	821,9 mm
Ελάχιστο Πλάτος Ιμάντα $B_{w'}$	35,85 mm

Πίνακας 10. Προδιαγραφές Απαιτούμενου Ιμάντα ως Αποτέλεσμα των Υπολογισμών

Οπότε σύμφωνα με τον κατάλογο του κατασκευαστή ο ιμάντας που εξυπηρετεί τις απαιτήσεις του συστήματος θα είναι ο **''40 S8M 824 G''**. Καθώς δεν υπάρχουν ακριβώς τα νούμερα τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 9 επιλέγεται ο αμέσως επόμενος ιμάντας όσο αναφορά το μήκος και το πλάτος του.

Τέλος για την επίσημη έγκριση των χαρακτηριστικών του ιμάντα και την αποφυγή μετέπειτα προβλημάτων και κινδύνων υπάρχει ένας τελικός τύπος βεβαίωσης. Αυτός περιγράφει πως η σχεδιαστική ισχύς (P_d) θα πρέπει να είναι μικρότερη από τον πολλαπλασιασμό της βασικής εκτίμησης ισχύος (P_s), τον συντελεστή διόρθωσης πλάτους (K_b) και τον συντελεστή επαφής των οδοντώσεων με την τροχαλία (K_m). Οπότε για τον τελικό υπολογισμό απαιτείται ο συντελεστής διόρθωσης πλάτους του ιμάντα (K_b) ο οποίος βρίσκεται από την Παραπομπή 9 και είναι ίσος με K_b=0,63.

Συνεπώς ο τελικός υπολογισμός έχει ως εξής:

$$P_d < P_s \times K_m \times K_b$$

$$484 < 810 \times 1 \times 0{,}63$$

$$484 < 510$$

Πράγμα το οποίο ισχύει, οπότε ο ιμάντας είναι κατάλληλος για τον μηχανισμό και δεν θα έχει κανένα πρόβλημα εφαρμογής στο σύστημα.



Εικόνα 54. Ιμάντας Τύπου S8M

Κουζινέτο

Ως επιφάνεια κύλισης του άξονα οι επιλογές για το σύστημα ήταν δύο. Η χρήση ενός ρουλεμάν ή ενός κουζινέτου με επικάλυψη γραφίτη. Καθώς στην αρχή η επιλογή για ρουλεμάν ήταν αυτονόητη δεν υπήρχε κάτι το οποίο να εφαρμόζει στις διαστάσεις του σχεδίου και αν υπήρχε δεν θα άφηνε περιθώρια στήριξης στον βραχίονα. Γι' αυτό ως εναλλακτική λύση υπήρξε η χρήση κουζινέτου.

Το κουζινέτο είναι ένα εξάρτημα το οποίο χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε μηχανισμούς όπου χρειάζεται η ελευθερία κύλισης ενός άξονα. Ωστόσο δεν προορίζονται για ταχύτητες πολλών στροφών ανά λεπτό. Παρ' όλα αυτά η ενίσχυση γραφίτη στο εσωτερικό του επιτρέπει μια τέτοια δυνατότητα καθώς οι στρώσεις αυτές δρουν ως λιπαντικό στο μέταλλο με το οποίο έρχεται σε επαφή οπότε η διάβρωση λόγο στροφών εξαλείφεται. Ωστόσο και πάλι υπάρχουν περιορισμοί γι' αυτό χρειάζεται η επαλήθευση της ανοχής του μέσω του καταλόγου του κατασκευαστή. Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από ένα πρόχειρο σχέδιο οπότε είναι:

- Εσωτερική Διάμετρος 18 mm, για άξονα 18 mm
- Πάχος μικρότερο από 20 mm και όσο το δυνατόν μικρότερη εξωτερική διάμετρος, για να επιτρέπεται η καλύτερη υποστήριξη του βραχίονα
- Στήριξη του άξονα με δυνάμεις έως και 1000 N
- Επιτρεπόμενη Ταχύτητα Περιστροφής μεγαλύτερη των 100 RPM

Έτσι μέσω του καταλόγου το κουζινέτο το οποίο παρέχει αυτές τις διαστάσεις έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά	
Εξωτερική Διάμετρος	20 mm
Εσωτερική Διάμετρος	18 mm
Πάχος	15 mm
Επιτρεπόμενο Φορτίο	80 N/mm^2
Επιτρεπόμενη Ταχύτητα Κύλισης	2 m/s

Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά Κουζινέτων

Ηράκλειο © 2025

Έτσι για να βεβαιωθεί ότι είναι ικανό να ανταπεξέλθει στο σύστημα γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί. Αρχικά υπολογίζεται η επιφάνεια επαφής (A) ώστε έπειτα να βρεθεί η πίεση (P) ανά τετραγωνικό χιλιοστό όπου για μέγιστη δύναμη σύμφωνα και με το ελεύθερο διάγραμμα θα ασκούνται 1000 N στο άκρο οπότε 500 N ανά κουζινέτο εφόσον στο πρόχειρο σχέδιο ο άξονα πρόκειται να στηρίζεται σε δύο απ' αυτά:

$$A = d \cdot l = 18\ \text{mm} \cdot 15\ \text{mm} = 270\ \text{mm}^2$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{500\ \text{N}}{270\ \text{mm}^2} \approx 1.85\ \text{N/mm}^2 \ll 80\ \text{N/mm}^2$$

Στην συνέχεια μετατρέπεται η μέγιστη ταχύτητα των 100 RPM που απαιτεί το σύστημα σε m/s και υπολογίζεται ο δείκτης PV ο οποίος συσχετίζει την πίεση με την ταχύτητα για περεταίρω έλεγχο καταπονήσεων και επιβάρυνσης.

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 18\ \text{mm} \cdot 100\ \text{rpm}}{60 \cdot 1000} \approx 0{,}0942\ \text{m/s} \ll 2\ \text{m/s}$$

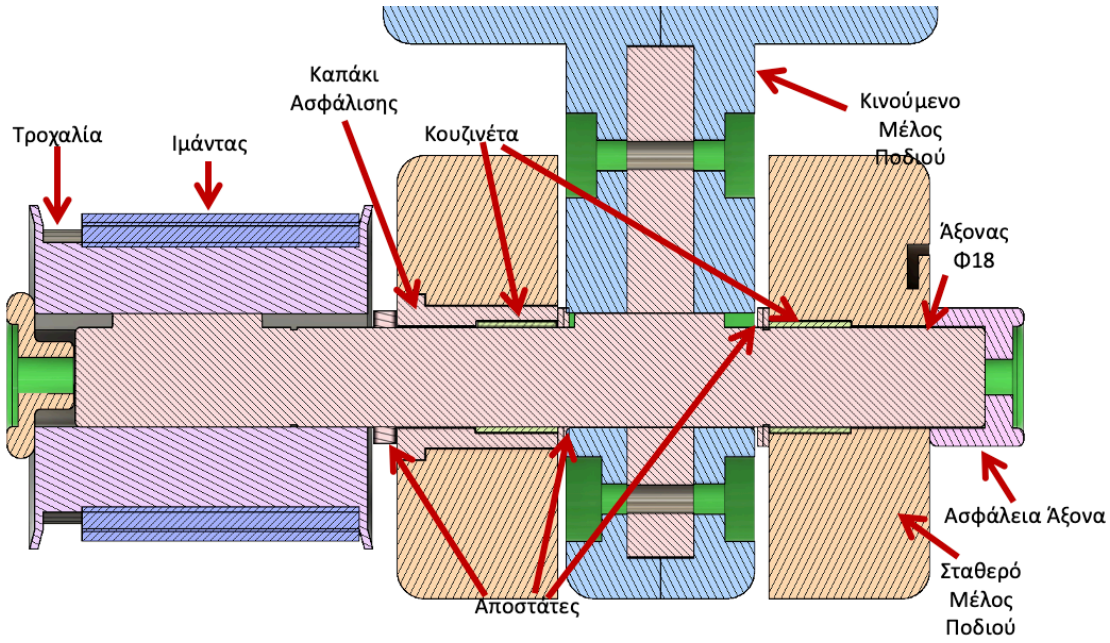
$$PV = P \cdot v = 1{,}85\ \text{N/mm}^2 \cdot 0{,}0942\ \text{m/s} \approx 0.17427\ \text{N/mm}^2 \cdot \text{m/s} \ll 0{,}5$$

Επίσης από την Παραπομπή 12 φαίνεται πως το εξάρτημα αυτό είναι και στα επιτρεπόμενα όρια PV του κατασκευαστή καθώς ο δείκτης βρίσκεται στην περιοχή I κατά την οποία η χρήση της εγκρίνεται αδιαμφησβήτητα. Ως αποτέλεσμα επιβεβαιώνεται πως το κουζινέτο είναι κατάλληλο για το σύστημα και μπορεί να δεχθεί κατά πολύ μεγαλύτερες καταπονήσεις.

Άξονες

Οι άξονες απαιτούνται για την μεταφορά της κίνησης στο σύστημα και την σύνδεση μεταξύ των τροχαλιών. Στην προκειμένη περίπτωση απαιτούνται δύο άξονες όσο αναφορά τις διαμέτρους, έναν διατομής 20 mm που συνδέεται με τον κινητήρα και ο οποίος έρχεται μαζί με τον μειωτήρα και ένας 18 mm ο οποίος θα βρίσκεται στον βραχίονα και θα μεταφέρει την κίνηση από την τροχαλία στο άκρο του βραχίονα. Οι συγκεκριμένοι άξονες επιλέχθηκαν ωστόσο γιατί έχουν έτοιμες εσοχές για ασφάλειες και σφήνες οι οποίες θα χρειαστούν για να ασφαλίσουν την κίνηση ανάμεσα σε αυτούς και τις τροχαλίες καθώς και τον βραχίονα.

Ολοκληρωμένος ο άξονας του άκρου θα στηρίζεται πάνω σε δύο κουζινέτα και θα περιορίζεται γραμμικά από μία ασφάλεια σε μία από τις εσοχές του. Επίσης στα άκρα του έχει δύο υποδοχές M5 βιδών οι οποίες χρησιμοποιούνται για να ασφαλιστούν γραμμικά και οι τροχαλίες. Ως αποτέλεσμα η τομή του άξονα με όλα τα μηχανικά μέρη εφαρμοσμένα πάνω του θα έχουν ως εξής (Εικόνα 55):



Εικόνα 55. Τομή Άξονα Άκρου με όλα τα Στοιχεία που τον Συμπληρώνουν (Τροχαλία, Ιμάντας, Κουζινέτα, Κινούμενο Μέλος Ποδιού, Άξονας Φ18, Αποστάτες, Σταθερό Μέλος Ποδιού, Καπάκι Ασφάλισης, Ασφάλεια άξονα

Τροχαλίες

Στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης ένα από τα πιο καθοριστικά εξαρτήματα είναι οι τροχαλίες. Αυτές έχοντας τον κατάλληλο τύπο βήματος για να ταιριάξουν με τον ιμάντα μεταφέρουν τις δυνάμεις στον άξονα. Η επιλογή τους γίνεται από τον κατάλογο του ιμάντα όπως προαναφέρθηκε καθώς και από τις διαστάσεις που απαιτούνται από το γενικό σχέδιο, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση είναι η ελαχιστοποίηση βάρους και όγκου. Γι' αυτό επιλέχτηκαν οι μικρότερες δυνατές τροχαλίες με αριθμό 22 δοντιών και πλάτος 50 mm όπως απαιτείται από τον ιμάντα, δηλαδή όπως αναγράφεται από τον κατασκευαστή **''22-S8M-50''**.

4.4.5 Ηλεκτρονικό Υποσύστημα

Για να εκτελεστεί σωστά η τροχιά βαδίσματος του συστήματος απαιτείται ένα ηλεκτρονικό υποσύστημα το οποίο εφαρμόζει την λογική ελέγχου και είναι υπεύθυνο για την επενέργηση του κινητήρα. Στην προκειμένη περίπτωση το κύκλωμα του ελέγχου αποτελείται από έναν αισθητήρα IMU 9 Axis (Συνδεδεμένος με πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C), έναν μικροελεγκτή, έναν Stepper Driver και μία τροφοδοσία 200 Watt που απαιτούνται για τον κινητήρα. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν αναλυτικά τα εξαρτήματα κι θα παρουσιαστεί η συνδεσμολογία του κυκλώματος μέσω κατάλληλου προγράμματος.

Μικροελεγκτής

Μικροελεγκτές ονομάζονται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν σχεδιαστεί για να μπορούν να ρυθμίζουν ένα σύστημα και να δίνουν εντολές ανάλογα με την καθορισμένη λειτουργία τους. Συνήθως αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, μια μνήμη και τις εισόδους/εξόδους υπό συγκεκριμένες ονομασίες στο κύκλωμα που εντάσσονται και στο τσιπ που τα ενώνει.

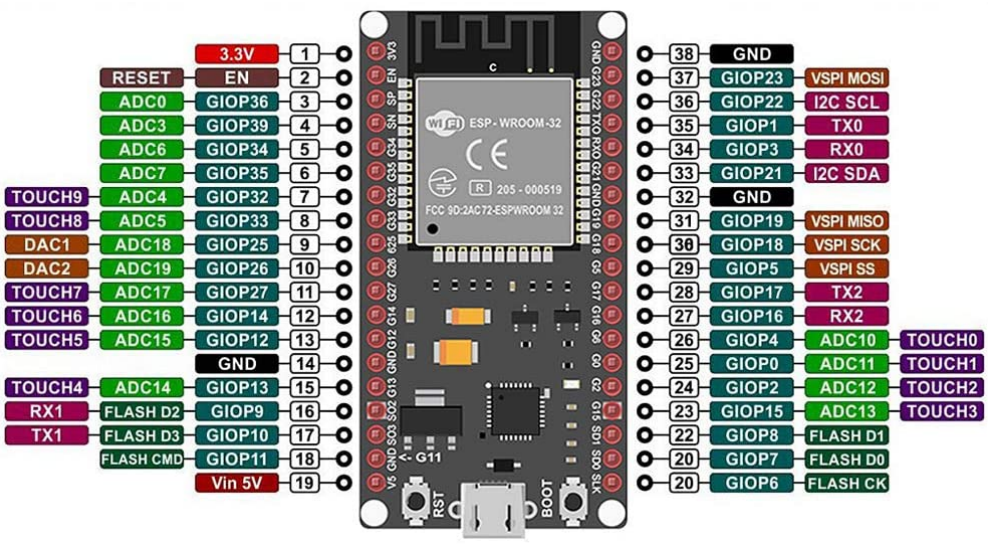
Στις μέρες μας είναι ευρέως διαδεδομένα καθώς πλέον η ανάπτυξη ενός ρομποτικού αυτοματισμού και η πρόσβαση σε ήδη έτοιμα συστήματα (DIY, Plug and Play Συστήματα) συναντάτε παντού γύρω μας. Από τις αίθουσες των τάξεων όπου διδάσκονται οι βασικές αρχές ρομποτικής μέχρι τα πιο σύνθετα συστήματα παραγωγής, οι μικροελεγκτές αποτελούν την βάση για τους περισσότερους αυτοματισμούς και ρομποτικά συστήματα.

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε πρόκειται για έναν από τους πιο φημισμένους στην αγορά καθώς παρέχει μεγάλη επεξεργαστική ισχύ, πολλές διαθέσιμες εισόδους/εξόδους αναλογικές/ψηφιακές, μικρό μέγεθος και όλα αυτά σε μια πολύ προσιτή τιμή. Παρέχει δυνατότητες επικοινωνίας μέσω Bluetooth και Wi-Fi, πολλαπλές προσαρμοζόμενες θύρες I2C πρωτοκόλλου, μια θύρα micro USB για σύνδεση με τον υπολογιστή και χαμηλή απαίτηση ισχύς της τάξεως των 5-12V.

Πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μικροελεγκτή ESP32 DEV-KIT 1 (Πίνακας 11) καθώς και το διάγραμμα συνδεσμολογίας (Εικόνα 56) του είναι τα εξής:

Χαρακτηριστικά	
Μικροελεγκτής	Tensilica 32-bit Single-/Dual-core CPU Xtensa LX6
Απαιτούμενη Τάση Επεξεργαστή	3.3 V
Απαιτούμενη Τάση Λειτουργίας	7-12 V
Ψηφιακά Pin (Εισόδου/ Εξόδου, I/O)	25
Αναλογικά Pin Εισόδου (Inputs)	6
Αναλογικά Pin Εξόδου (Outputs)	2
Διαθέσιμα Pins I2C πρωτοκόλλου	3
Flash Memory	4 MB
SRAM	520 kB
Ταχύτητα Χρονισμού	240 MHz

Πίνακας 12.Χαρακτηριστικά μμικροελεγκτή



Εικόνα 56. Διάγραμμα Συνδεσμολογίας Μικροελεγκτή

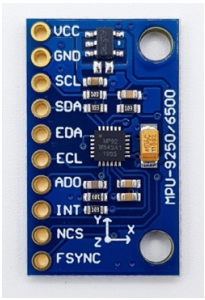
Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής μπορεί να προγραμματιστεί σε διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού όπως C++ ή και Python. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το περιβάλλον Arduino IDE το οποίο βασίζεται στην C++ και δημιουργήθηκε κυρίως για χρήση με μικροελεγκτές Arduino. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει ευκολία στον χρήστη καθώς παρέχει αρκετές βιβλιοθήκες και Drivers συστημάτων τα οποία κάνουν πιο εύκολη την διαδικασία προγραμματισμού με συστήματα που μπορεί να έχουν ήδη αναπτυχθεί από μία μεγαλύτερη κοινότητα η οποία περιστρέφεται γύρω από την ρομποτική. Στον μικροελεγκτή παρέχονταν τα δεδομένα μέσω ενός εξωτερικού κώδικα python ο οποίος διάβαζε αρχεία τύπου csv και έστελνε τα κατάλληλα δεδομένα στη σειριακή του Arduino IDE περιβάλλοντος.

Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος είναι επειδή διαθέτει δυο διαφορετικούς πυρήνες επεξεργασίας επιτρέποντας την εκτέλεση των διαδικασιών μέσω multithreading. Αυτή η ικανότητα δίνει την δυνατότητα στον μικροελεγκτή να τρέχει διαφορετικές διαδικασίες κώδικα ακόμα και με διαφορετικούς χρόνους παράλληλα χωρίς να μπλοκάρονται αυτές μεταξύ τους. Στην προκειμένη περίπτωση οι εντολές στον Stepper Driver για μεγαλύτερη ακρίβεια δίνονται ανά 1 ms, ενώ την ίδια στιγμή ο IMU παρέχει πληροφορίες θέσης με τον ίδιο σχεδόν ρυθμό ανανέωσης. Αυτό θα προκαλούσε μεγάλο θέμα σε έναν μονοπύρηνο μικροελεγκτή ο οποίος για να εκτελέσει σωστά έναν τέτοιο κώδικα θα πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές εντός του κώδικα οι οποίες καθυστερούν το σύστημα και κάνουν την διαδικασία πιο ανακριβής.

Αισθητήρας IMU

Ο αισθητήρας κρίνεται απαραίτητος όσο αναφορά τον έλεγχο που πρόκειται να πραγματοποιηθεί και καθοριστικός για την ακρίβεια του μοντέλου. Έτσι επιλέχθηκε ο MPU9250 όπου πρόκειται για έναν μικρού μεγέθους, χαμηλής κατανάλωσης αισθητήρας που χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές που σχετίζονται με πλοήγηση, ισορροπία ή παρακολούθηση κίνησης. Στην ουσία, πρόκειται για έναν συνδυασμό τριών διαφορετικών αισθητήρων σε ένα μόνο κύκλωμα: επιταχυνσιόμετρο

(accelerometer), γυροσκόπιο (gyroscope) και μαγνητόμετρο (magnetometer). Με πιο απλά λόγια, μπορεί να «καταλαβαίνει» την κίνηση και τον προσανατολισμό σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της Γης.



Εικόνα 57. Αισθητήρας IMU 9 AXIS MPU-9250

Το επιταχυνσιόμετρο μετρά την επιτάχυνση σε κάθε άξονα (X, Y, Z) και μας βοηθά να καταλάβουμε προς ποια κατεύθυνση κινείται ή γέρνει το αντικείμενο στο οποίο είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας. Το γυροσκόπιο μετρά την περιστροφική κίνηση, δηλαδή πόσο γρήγορα περιστρέφεται κάτι γύρω από κάθε άξονα. Το μαγνητόμετρο λειτουργεί σαν μια μικρή πυξίδα και βοηθά στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης.

Ο MPU9250 είναι πολύ δημοφιλής σε ρομποτικές κατασκευές, drones, φορητές συσκευές και έργα που απαιτούν καλή κατανόηση της θέσης και της κίνησης. Συνδέεται εύκολα με μικροελεγκτές όπως Arduino ή ESP32 και παρέχει αρκετά αξιόπιστα δεδομένα για εφαρμογές ελέγχου και ανάλυσης κίνησης. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 12):

Χαρακτηριστικά	
Τροφοδοσία	3-5 V
Πρωτόκολλο Επικοινωνίας	I2C, SPI
Εύρος Γυροσκοπίου	± 250, 500, 100, 2000 °/s
Εύρος Επιταχυνσιομέτρου	± 2, 4, 8, 16 g
Εύρος Μαγνητικού Πεδίου	± 4800 uT
I2C Συχνότητα Δεδομένων	400 kHz

Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά IMU 9 AXIS MPU-9250

Stepper Driver

Οι Stepper Driver αποτελούν ηλεκτρονικές συσκευές που μπορεί να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά του κινητήρα ενισχύοντας το ρεύμα ακολουθούμενο από σήματα εισόδου. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι που ταξινομούνται με βάση τις κατηγορίες των κινητήρων.

Ένας Driver είναι ο ενδιάμεσος μεταξύ του μικροελεγκτή και του ίδιου του κινητήρα. Δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής δεν μπορεί να λειτουργήσει απευθείας τον κινητήρα, ο Driver παρέχει ισχύ ως απόκριση στο σήμα του μικροελεγκτή.



Εικόνα 58. Stepper Driver (DM860T)

Ο Driver επιλέχθηκε είναι ένας πλήρως ψηφιακός οδηγός βηματικού κινητήρα, ο οποίος έχει αναπτυχθεί με σύγχρονους αλγορίθμους ελέγχου βασισμένους σε τεχνολογία DSP (Digital Signal Processing). Χάρη στις προηγμένες τεχνικές ελέγχου κίνησης που ενσωματώνει, προσφέρει εξαιρετικά ομαλή λειτουργία, βελτιστοποιημένη ροπή και εξαλείφει τα προβλήματα αστάθειας που συχνά εμφανίζονται στη μεσαία περιοχή ταχυτήτων.

Μια σημαντική δυνατότητα του DM860T είναι η αυτόματη αναγνώριση του κινητήρα και η αυτόματη ρύθμιση των παραμέτρων του, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία ρύθμισης, ακόμα και με διαφορετικούς τύπους κινητήρων. Σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αναλογικούς οδηγούς, ο DM860T καταφέρνει να λειτουργεί με χαμηλότερο θόρυβο, μικρότερη θερμική καταπόνηση και πιο ομαλή κίνηση.

Επίσης άλλο ένα προτέρημα είναι πως συμπεριλαμβάνει Optocoupler Module μέσα σε αυτόν. Αυτό αποτελεί κάτι πολύ σημαντικό ως προς την μείωση του θορύβου που περιχέεται στο σύστημα λόγω πολλών παραγόντων αλλά μεταξύ όλων και της μεγάλης διαφοράς τάσης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω ενός φωτοευαίσθητου ουσιαστικά διακόπτη όπου από την μία άκρη τα σήματα μεταφράζονται από τον μικροελεγκτή ως δέσμες φωτός και στο άλλο άκρο μία φωτοευαίσθητη αντίσταση ανοιγοκλείνει στέλνοντας σήματα High/Low στον Driver με αποτέλεσμα την απομόνωση των δύο συστημάτων.

Αυτά καθιστούν τον DM860T ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία στην κίνηση. Τα χαρακτηριστικά λοιπόν σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι τα εξής (Πίνακας 13):

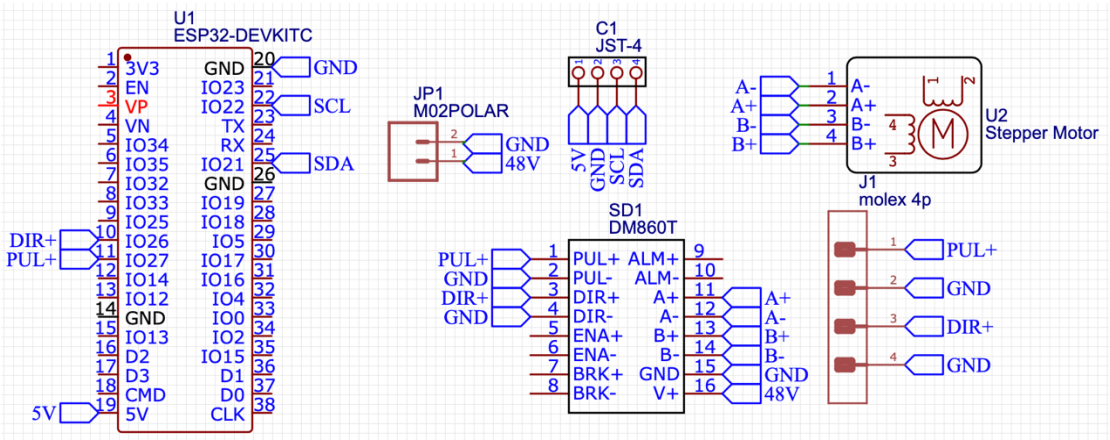
Χαρακτηριστικά	

Ονομαστική Τάση Εισόδου (V)	24-80AC/36-110 DC
Τάση Εισόδου (V)	18-80AC/36-110 DC
Μέγιστο Ρεύμα Εξόδου RMS (A)	6
Ρεύμα Εξόδου (A)	2.4-7.2
Microsteps (Steps/rev)	400-51200
Μέγιστη Είσοδος Παλμού (kHZ)	200
Πλάτος Παλμού (μs)	2.5

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά Driver Βηματικού Κινητήρα

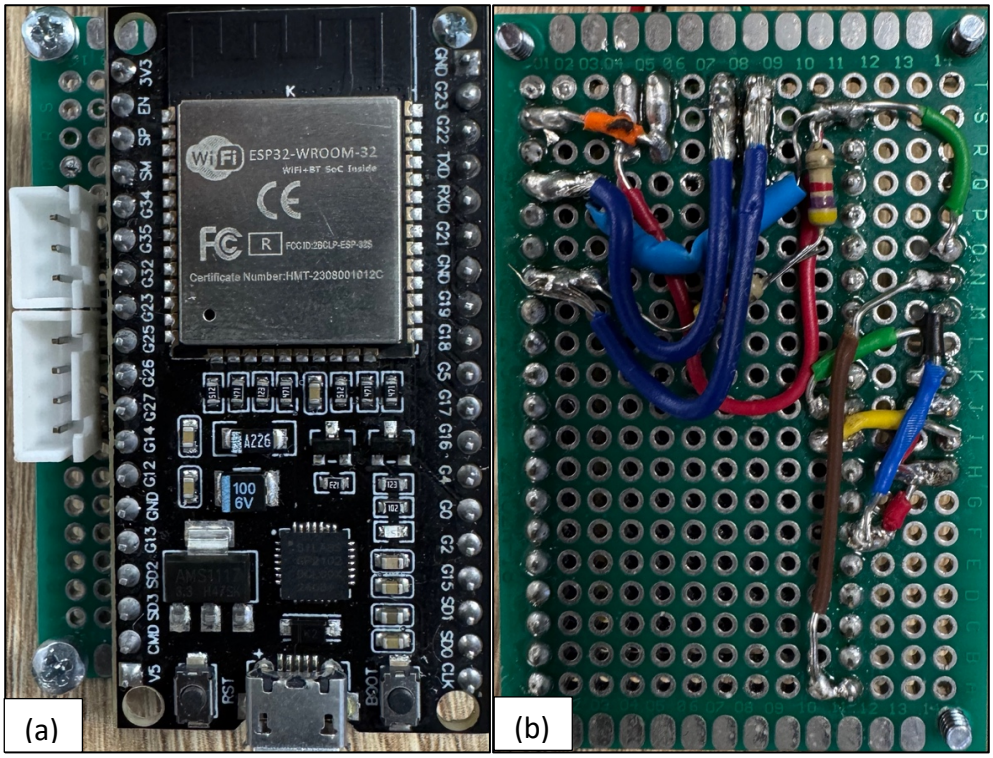
Ηλεκτρολογικό Κύκλωμα

Όλος ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός έχει ως βάση μια πλακέτα πρωτοτύπου. Για να δημιουργηθεί έγινε πρώτα ένα γενικό ηλεκτρονικό σχεδιάγραμμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον EasyEDA για την εξακρίβωση των συνδέσεων του συστήματος. Επίσης όμως βοήθησε στην αργότερη οργάνωση τοποθέτησης του μικροελεγκτή, διαφόρων JST θυρών καθώς και άλλες υποδοχές για τον Driver και τον Αισθητήρα.



Εικόνα 59. Σχεδιάγραμμα Ηλεκτρολογικού Κυκλώματος Συστήματος

Έτσι έχοντας το σχεδιάγραμμα προχώρησε η κατασκευή της πλακέτας και των συνδέσεων ακολουθώντας το παραπάνω σχεδιάγραμμα. Με αποτέλεσμα την ακόλουθη πρωτότυπη πλακέτα (βλ. Εικόνα 60) με εμπρόσθια όψη (a) και οπίσθια όψη (b):



Εικόνα 60. Πρωτότυπη Πλακέτα Ηλεκτρολογικού Συστήματος, (a) Μπροστά Όψη, (b) Πίσω Όψη

5. Κατασκευή Ρομποτικής Άρθρωσης (Ποδιού)

5.1 Εξοπλισμός και Κατεργασίες

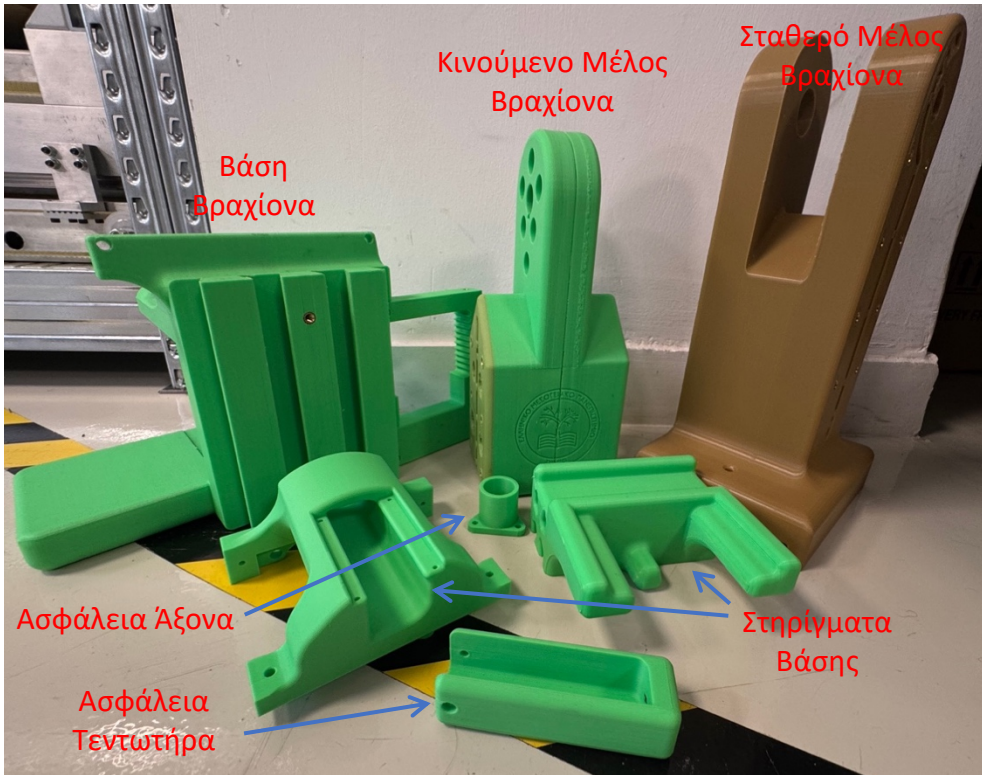
Στο παρών κεφάλαιο θα αναπτυχθούν τα μηχανήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για να ολοκληρωθεί το παρών σύστημα. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τριών ειδών, της αφαίρεσης υλικού, της προσθετικής κατασκευής και της κοπής. Η πρώτη κατηγορία χρειάστηκε για την κατεργασία εξαρτημάτων του μηχανισμού ενώ οι άλλες δύο για δημιουργία τεμαχίων.

5.1.1 Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής κατηγοριοποιείται ως μηχάνημα προσθετικής κατασκευής και συναντάται παντού σήμερα, ειδικά όταν αφορά πρωτότυπα συστήματα υπό ανάπτυξη, αλλά μπορούν να αποτελέσουν πλέον και βασικό προϊόν. Τα υλικά ποικίλουν από πλαστικό διαφόρων τύπων μέχρι και σε πιο εξελιγμένους εκτυπωτές που μπορούν να εκτυπώσουν μέχρι και μέταλλο. Οι εκτυπωτές πλαστικών κατηγοριοποιούνται σε δύο είδη. Σε αυτούς της μοντελοποίησης λιωμένης εναπόθεσης FDM (Fused Deposition Modeling) και σε αυτούς της στερεολιθογραφίας SLA (Stereolithography).

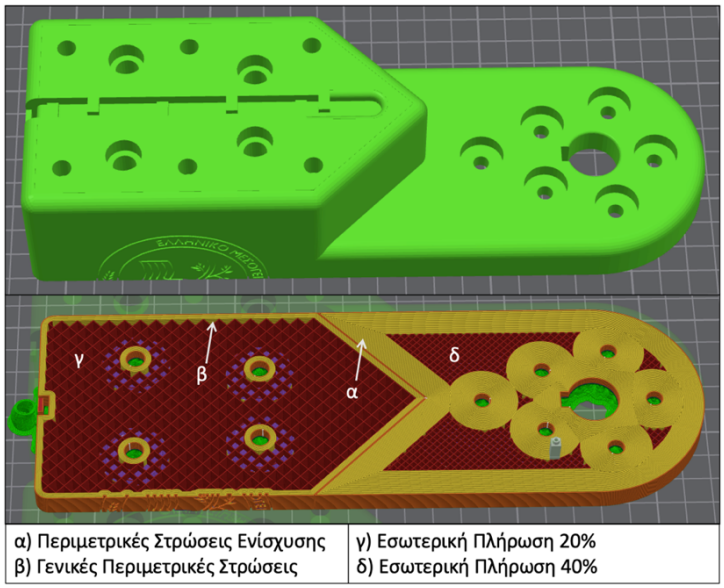
Αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία ανήκουν στην πρώτη κατηγορία των FDM και ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν οι συγκεκριμένοι είναι προσθέτοντας υλικό μέσω ενός θερμαινόμενου άκρου το οποίο εξωθεί λιωμένο υλικό στην κατάλληλη θερμοκρασία και ακολουθεί μία αλληλουχία κινήσεων η οποία προσθέτει ανά συγκεκριμένο διάστημα στρώματα πλαστικού μέχρι να ολοκληρωθεί το επιθυμητό σχέδιο. Το άκρο ακολουθεί ένα συγκεκριμένο προγραμματισμένο μονοπάτι το οποίο λέγεται G κώδικας. Στην ουσία σε αυτόν περιλαμβάνονται πληροφορίες κίνησης του άκρου καθώς και εξώθησης υλικού στην προκειμένη περίπτωση. Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες όπου ενισχύουν την κατασκευή του τεμαχίου. Αυτοί μπορεί να είναι από τον αριθμό των τοιχωμάτων που προστίθενται και το υλικό που χρειάζεται στο εσωτερικό, μέχρι και τον τρόπο τοποθέτησης των τεμαχίων για εκτύπωση για μεγαλύτερη αντοχή στις εκάστοτε καταπονήσεις.

Τα μέλη τα οποία εκτυπώθηκαν με αυτή την διαδικασία είναι η βάση του βραχίονα, το κινούμενο μέλος, το σταθερό μέλος, ο τεντωτήρας, τα στηρίγματα της βάσης, οι ασφάλειες-καπάκια των αξόνων και η ασφάλεια του τεντωτήρα όπως φαίνονται στην Εικόνα 61.



Εικόνα 61. Σύνολο Εκτυπωμένων Τεμαχίων του Συστήματος, Βάση-Κινούμενο Μέλος-Σταθερό Μέλος Βραχίονα, Στηρίγματα Βάσης, Ασφάλειες-Καπάκια Αξόνων, Ασφάλεια Τεντωτήρα

Για να πραγματοποιηθεί η σωστή εκτύπωση με τις κατάλληλες αντοχές στο κινούμενο μέλος του ποδιού ,έγιναν οι ρυθμίσεις που φαίνονται στην Εικόνα 62. Τα σημεία όπου χρειάζονται περισσότερη ενίσχυση είναι αυτά με τα οποία συνδέεται ο άξονας και δέχεται ροπές στην σφήνα του τεμαχίου όπως και τα σημεία από τα οποία η ενίσχυση από τιτάνιο θα τοποθετηθεί. Σε αυτά τα σημεία όπως παρατηρείται (Εικόνα 62, α και δ) τοποθετείται μεγαλύτερος αριθμός στρώσεων εξωτερικά για τις καμπτικές ροπές και μεγαλύτερη εσωτερική πλήρωση για πιο συμπαγές και σταθερό εσωτερικό.



Εικόνα 62. Ρυθμίσεις Εκτύπωσης, (α) Περιμετρικές στρώσεις ενίσχυσης, (β) Γενικές περιμετρικές στρώσεις, (γ) Εσωτερική πλήρωση 20% και (δ) Εσωτερική πλήρωση 40%

Ηράκλειο © 2025

Επίσης έγινε αναζήτηση της καλύτερης δυνατής εκτύπωσης ανάλογα τις καταπονήσεις. Σε αυτό συντέλεσε πολύ σημαντική η έρευνα του Miguel Ángel Caminero [5] η οποία αναλύει το πόσο ανθεκτικές γίνονται οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις ανάλογα με τον τρόπο που εκτυπώνονται. Στην συγκεκριμένη έρευνα τοποθετούνται με τρείς τρόπους όπως είναι και δυνατόν από αυτούς τους εκτυπωτές. Σε όρθια θέση, επίπεδη και στο άκρο ως προς το επίπεδο του εκτυπωτή.

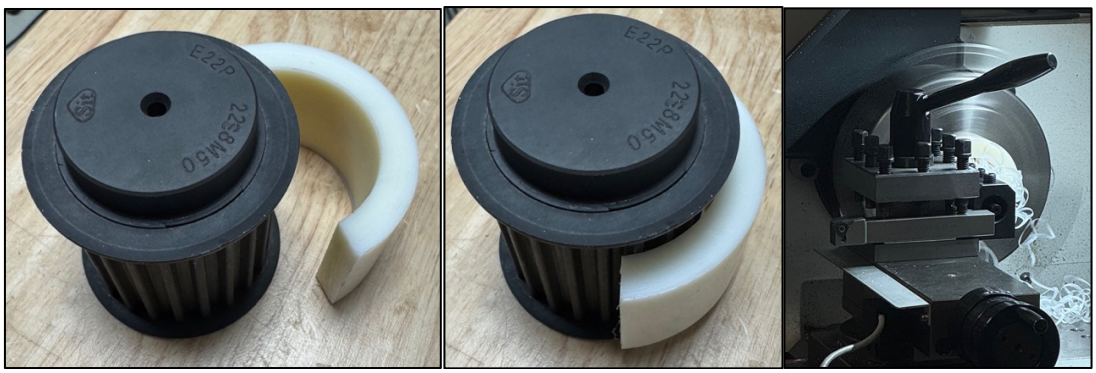
5.1.2 Τόρνευση

Με σκοπό την επεξεργασία των τροχαλιών που αποτελούν μεταλλικά τεμάχια απαιτούνται βαρέως τύπου κατεργασίες. Γι’ αυτό χρησιμοποιήθηκε ο τόρνος για να δημιουργηθούν οι κατάλληλες οπές και διαμορφώσεις για την εισαγωγή και ασφάλιση του άξονα (βλ. Εικόνα 66).



Εικόνα 63. Ακατέργαστη Τροχαλία

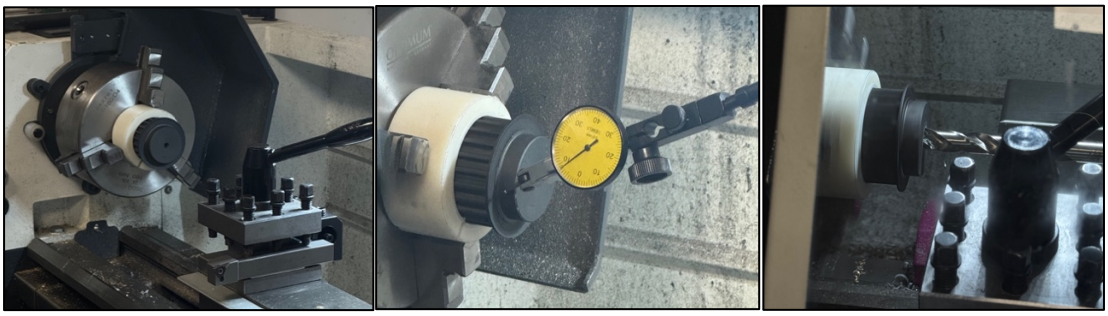
Έτσι ξεκίνησε η διαδικασία δημιουργώντας ένα καλούπι στήριξης της τροχαλίας για τον τόρνο καθώς και περιστροφικής εξισορρόπησης με μικρόμετρο για την ακτινομέτρηση. Αυτή η διαδικασία της ακτινομέτρησης πραγματοποιείται ώστε να τοποθετηθεί το επεξεργαζόμενο τεμάχιο όσο πιο κεντρικά γίνεται στο μηχάνημα επεξεργασίας ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι περιπτώσεις αστοχίας. Για αρχή πραγματοποιήθηκε κατεργασία ενός καλουπιού από σιλικόνη το οποίο θα ‘’αγκαλιάζει’’ την τροχαλία πάνω από τα βήματα αυτής (βλ. Εικόνα 64).



Εικόνα 64. Δημιουργία καλουπιού τροχαλίας για την έπειτα κατεργασία στον τόρνο

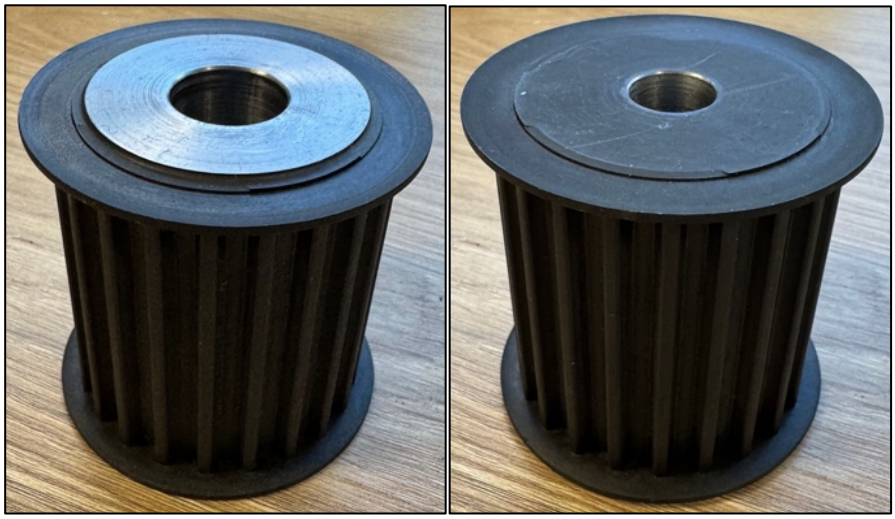
Ηράκλειο © 2025

Έπειτα τοποθετήθηκε η τροχαλία με το καλούπι και με την βοήθεια μικρομέτρου έγινε η ακτινομέτρηση. Όπου βρισκόταν κάποια ανωμαλία γινότανε η κατάλληλη ρύθμιση του τόρνου μέσω των άκρων του κι ακολούθησε η κατεργασία μέσω τρυπανιού καταλλήλων διαστάσεων του τόρνου (βλ. Εικόνα 65).



Εικόνα 65. Διαδικασία ακτινομέτρησης τροχαλίας στον τόρνο, τοποθέτηση τροχαλίας, ακτινομέτρηση και κατεργασία

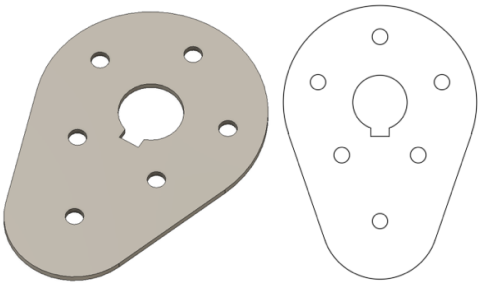
Ως αποτέλεσμα γίνανε οι επιθυμητές τροχαλίες με εσοχή αξόνων 18Φ και 20Φ καθώς και το στοπ το οποίο περιορίζει την κίνηση του άξονα ως προς το σταθερό μέλος του ποδιού (βλ. Εικόνα 66).



Εικόνα 66. Τελικό κατεργασμένο τεμάχιο τροχαλίας,, στην αριστερή εικόνα φαίνεται η εσοχή για άξονα έπειτα από κατεργασία ενώ στην δεξιά εικόνα διακρίνεται η εσοχή για την βίδα του άξονα με σκοπό τον περιορισμό της τροχαλίας σε αυτόν

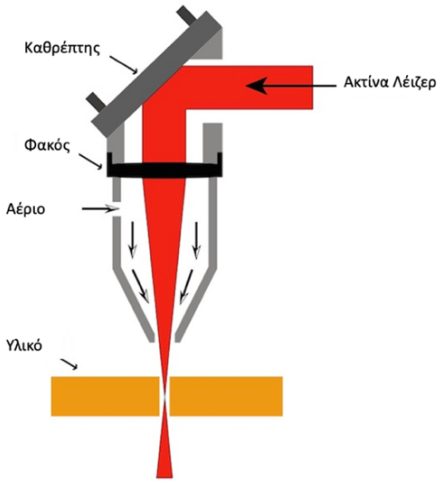
5.1.3 Κοπή με Laser

Για την ενίσχυση του κινούμενου μέρους του ποδιού τοποθετήθηκε ενίσχυση από τιτάνιο στο μέσω αυτού του μέρους. Έτσι έγινε παραγγελία από ειδικό παρασκευαστήριο το οποίο ήταν εξοπλισμένο με μηχανές κοπής μετάλλου. Απαιτήθηκαν πέντε φύλλα τιτανίου πάχους δύο χιλιοστών τα οποία έπρεπε να έχουν την μορφή του σχεδίου της Εικόνας 67. Αυτό το σχέδιο πραγματοποιήθηκε στο τρισδιάστατο περιβάλλον Fusion 360 που προαναφέρθηκε και στάλθηκε για επεξεργασία σε μορφή σχεδίου DXF Sketch.



Εικόνα 67. Ενίσχυση κινούμενου μέλους και σχέδιο μορφής DXF

Η κοπή πραγματοποιείται μέσω ενός ισχυρού λέιζερ το οποίο ακολουθεί μια προγραμματιζόμενη διαδρομή G κώδικα όπως αυτή που προαναφέρθηκε και στην διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία δίνονταν η επιλογή κοπής μέχρι και δέκα χιλιοστών. Παρ' όλα αυτά επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν πέντε τεμάχια των πέντε χιλιοστών. Αυτό γίνεται διότι κατά την διάρκεια κοπής των τεμαχίων υπάρχει ένα φαινόμενο κωνικής κοπής από την φύση και τον τρόπο λειτουργίας του λέιζερ το οποίο φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 68.



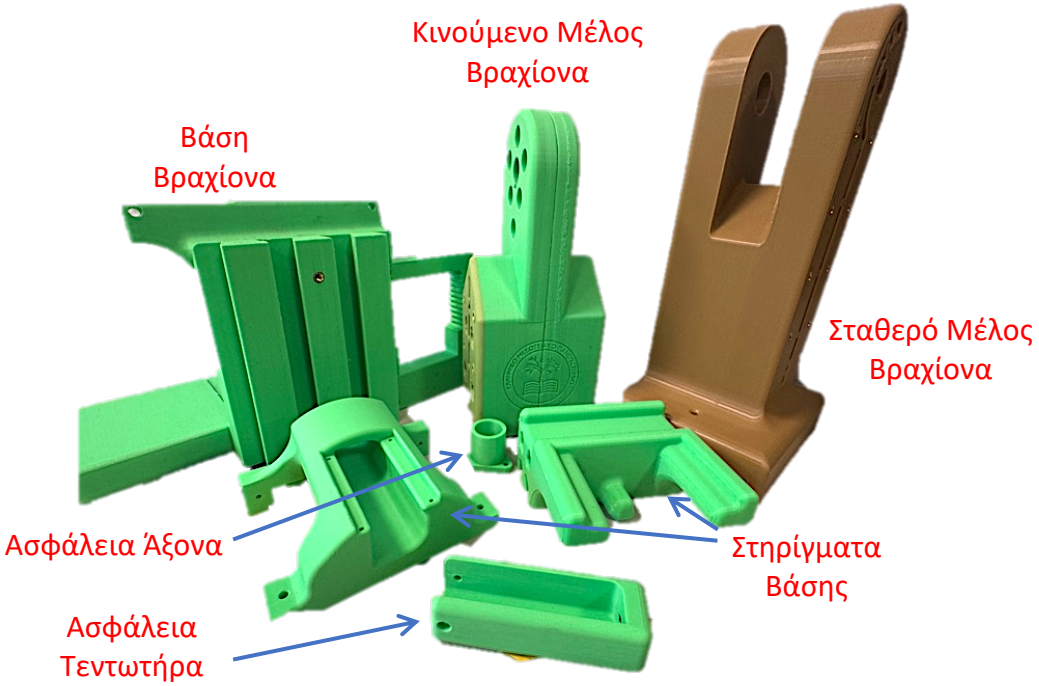
Εικόνα 68. Αρχή κοπής λέιζερ

Όπως φαίνεται στο υλικό στη διάτρηση του λέιζερ παρατηρείται μία κωνική κοπή η οποία θα προκαλούσε πρόβλημα στο τεμάχιο ως προς την ακρίβεια των άκρων του. Γι' αυτό έγιναν πολλαπλές στρώσεις μικρότερου πάχους για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου στην συγκεκριμένη περίπτωση του συστήματος.

4.2 Κατασκευή και Συναρμολόγηση

Η συνολική συναρμολόγηση πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το κάθε μέλος να είναι εύκολο στην επανατοποθέτηση και την γενικότερη πρόσβαση. Αυτό διευκολύνει κατά πολύ τις διαδικασίες σε περίπτωση που υπάρξει αστοχία των υλικών, ανάγκη για αντικατάσταση αυτών αλλά και γενικότερη ευκολία ως προς την συναρμολόγηση. Έτσι για αρχή κατασκευάστηκαν τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέλη του συστήματος. Το καθένα από αυτά εκτυπώθηκε με διαφορετικές ρυθμίσεις ανάλογα τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Έτσι εκτυπώθηκαν τα παρακάτω τεμάχια της Εικόνας δηλαδή, η Βάση του Βραχίονα, το Σταθερό Μέλος του Βραχίονα, το Κινούμενο Μέλος του Βραχίονα και υπόλοιπα μέρη όπως οι βάσεις ασφάλειες κτλ. :



Εικόνα 69. Μέλη κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης

Κι έπειτα αφότου τοποθετηθούνε και τα υπόλοιπα τεμάχια μαζί με το σύστημα κίνησης ακολουθεί το τελικό αποτέλεσμα συναρμολόγησης όλων των τεμαχίων:



Εικόνα 70. Συναρμολογημένο σύστημα βραχίονα με σύστημα κίνησης, αισθητήρα και μικροελεγκτή

Ηράκλειο © 2025

6. Πειράματα και Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση, τη ρύθμιση και τον έλεγχο της ρομποτικής άρθρωσης. Η μετάβαση από τη θεωρητική ανάλυση και τη σχεδίαση στην πρακτική υλοποίηση απαιτεί μια σειρά από συστηματικές δοκιμές για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας κάθε υποσυστήματος ξεχωριστά, αλλά και του συνόλου του μηχανισμού.

Η πειραματική διαδικασία δομήθηκε σε τρεις βασικούς άξονες:

1. **Μεμονωμένος Έλεγχος και Βαθμονόμηση Εξαρτημάτων**: Διασφάλιση της σωστής λειτουργίας και της ακρίβειας των βασικών ηλεκτρονικών και μηχανικών μερών (αισθητήρας IMU, βηματικός κινητήρας).

2. **Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Συστήματος Ελέγχου**: Υλοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου PID και FeedForward για την επίτευξη ακριβούς παρακολούθησης της επιθυμητής γωνίας.

3. **Εκτέλεση Προφίλ Βάδισης και Αξιολόγηση**: Δοκιμή του συστήματος στην προσομοίωση του κύκλου βάδισης, βάσει των δεδομένων που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2, και ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσής του.

6.1 Μεμονωμένος Έλεγχος και Βαθμονόμηση Εξαρτημάτων

Πριν από την ολοκληρωμένη λειτουργία του συστήματος, κρίθηκε απαραίτητος ο έλεγχος και η βαθμονόμηση των βασικών του στοιχείων, ώστε να απομονωθούν πιθανές πηγές σφάλματος και να διασφαλιστεί η αξιοπιστία τους.

Εφόσον ολοκληρώθηκε το μηχανολογικό και το ηλεκτρολογικό υποσύστημα ξεκίνησαν έπειτα οι διαδικασίες των ελέγχων του εξοπλισμού, της ρύθμισης του και στο τέλος των πειραμάτων. Έτσι ως πρώτο μέλημα ήταν η δημιουργία ενός σταθερού κέντρου αναφοράς καθώς πάνω σε αυτό θα βασίζεται όλη η λογική του συστήματος. Έπειτα έπρεπε να πραγματοποιηθεί η κίνηση του κινητήρα και να βρεθούν οι ακραίες τιμές στις οποίες θα μπορεί να ανταπεξέλθει στο συγκεκριμένο σύστημα. Εφόσον επιτεύχθηκε ο έλεγχος αυτών των εξαρτημάτων και αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας για το καθένα αναπτύχθηκε ένας συνδυαστικός κώδικας ώστε αργότερα να ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία.

6.1.1 Ανάπτυξη Κώδικα Λειτουργίας IMU και Έλεγχος Ακρίβειας

Ο αισθητήρας IMU MPU-9250 αποτελεί το κεντρικό στοιχείο ανάδρασης του συστήματος. Η ανάπτυξη ενός σταθερού κώδικα για την ανάγνωση της γωνιακής θέσης και η επαλήθευση της ακρίβειάς του ήταν το πρώτο κρίσιμο βήμα.

Διαδικασία Βαθμονόμησης και Φιλτραρίσματος:

Ο αισθητήρας συνδέθηκε στον μικροελεγκτή ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου I2C. Αναπτύχθηκε κώδικας στο περιβάλλον Arduino IDE, ο οποίος αρχικά εκτελεί μια αυτόματη διαδικασία βαθμονόμησης (calibration). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη συλλογή 300 διαδοχικών δειγμάτων γωνίας με τον αισθητήρα σε ακινησία.

Η βαθμονόμηση θεωρείται επιτυχής μόνο εάν η τυπική απόκλιση (standard deviation) των δειγμάτων είναι κάτω από ένα αυστηρό όριο (0.3), διασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχει ανεπιθύμητη κίνηση. Η μέση τιμή αυτών των δειγμάτων ορίζεται ως η γωνία μηδέν (zeroAngle), εξαλείφοντας τυχόν σφάλματα απόκλισης.

Για την εξαγωγή μιας σταθερής και αξιόπιστης εκτίμησης της γωνίας σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόστηκε ένα συμπληρωματικό φίλτρο πρώτης τάξης (complementary filter), το οποίο συνδυάζει τα δεδομένα από το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο. Το φίλτρο δίνει έμφαση στη γρήγορη και ομαλή απόκριση του γυροσκοπίου, η οποία είναι πιο αξιόπιστη σε δυναμικές συνθήκες, ενώ περιοδικά διορθώνει την εκτίμηση βάση του επιταχυνσιομέτρου, το οποίο είναι πιο σταθερό σε στατικές καταστάσεις.

Η εξίσωση του φίλτρου που υλοποιήθηκε είναι η εξής:

$$\theta_{\text{est}}(t) = \alpha \cdot \left(\theta_{\text{est}}(t-1) + \omega_{\text{gyro}} \cdot \Delta t\right) + (1-\alpha) \cdot \theta_{\text{acc}}$$

*$\theta_{\text{est}}(t)$: εκτιμώμενη γωνία τη χρονική στιγμή t
θ_{acc} : γωνία που υπολογίζεται από τις επιταχύνσεις
Δt : το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο μετρήσεων,
α : συντελεστής στάθμισης του γυροσκοπίου
ω_{gyro} : γωνιακή ταχύτητα από τον γυροσκοπικό αισθητήρα

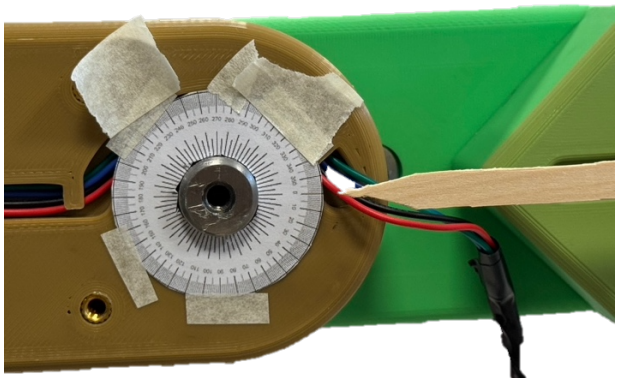
Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε α = 0.96, με σκοπό τη μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στο σήμα του γυροσκοπίου και τη μείωση του θορύβου που παράγεται από το επιταχυνσιόμετρο. Η υλοποίηση αυτή βασίζεται στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο έργο των Mahony et al. (2008) [16], το οποίο περιγράφει τη χρήση συμπληρωματικών φίλτρων για αισθητήρες αδράνειας σε πραγματικό χρόνο.

Έλεγχος Ακρίβειας του Αισθητήρα:

Η ακρίβεια των μετρήσεων του IMU επαληθεύτηκε εξωτερικά με δύο τρόπους. Με έναν πιο απλό τρόπο μέσω ενός μοιρογνωμονίου στην άκρη του άξονα και ένα βελάκι στο άκρο του βραχίονα κι έπειτα με τη χρήση του λογισμικού ανάλυσης κίνησης Kinovea.

Ο πρώτος τρόπος ήταν να σταλθεί κώδικας κατά τον οποίο ο αισθητήρας στέλνει άμεσα γωνίες στη σειριακή θύρα του Arduino. Παρατηρώντας και συγκρίνοντας

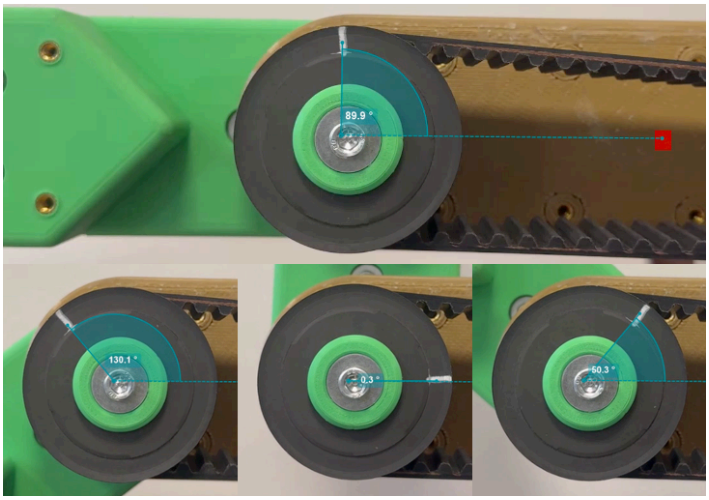
ζωντανά τ’ αποτελέσματα με το μοιρογνωμόνιο έγινε ένας πρώτος πειραματισμός ως προς την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα.



Εικόνα 71. Πρώτος Τρόπος Ελέγχου Ακρίβειας Αισθητήρα IMU μέσω Σειριακής και Μοιρογνωμονίου στον Άξονα

Ακολουθώντας αυτόν τον τρόπο παρατηρήθηκε ένα σφάλμα της τάξεως των 0,8 μοιρών. Παρ’ όλα αυτά ένα μέρος του σφάλματος προοριζόταν από την αδυναμία ακριβής τοποθέτησης του βραχίονα στα σημεία που φαίνονταν στο μοιρογνωμόνιο.

Γι’ αυτό ακολούθησε έπειτα η δεύτερη διαδικασία εξακρίβωσης σε προγραμματιστικό περιβάλλον κίνησης όπως το Kinovea. Τοποθετώντας μια κάμερα σταθερά σε ένα τρίποδα μπόρεσε να αναπτυχθεί η μέτρηση των μοιρών συγκρίνοντας κάποια σταθερά σημεία της εικόνας μεταξύ τους. Έτσι τοποθετήθηκε ο βραχίονας σε γωνίες ανά 10 μοίρες σε περιοχή από 180 έως τις -180 μοίρες και πραγματοποιήθηκαν τρείς επαναλήψεις της συγκεκριμένης διαδικασίας.



Εικόνα 72. Έλεγχος Ακεραιότητας IMU Μέσω του Προγράμματος Kinovea σε Διαφορετικές Γωνίες του Βραχίονα

Ως αποτέλεσμα ελέγχθηκε η ακρίβεια του αισθητήρα καθώς και η ικανότητα επαναληψιμότητας του. Η σύγκριση των δεδομένων του IMU με αυτά του Kinovea έδειξε μια εξαιρετική συμφωνία, με μέση απόκλιση της τάξης του ±0.4°, τιμή αποδεκτή για τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Επίσης η επαναληψιμότητα ήταν εξαιρετική εφόσον οι τιμές των γωνιών παράμεναν σταθερές κάθε φορά που ο βραχίονας βρισκόταν στη συγκεκριμένη θέση.

6.1.2 Έλεγχος Λειτουργίας Βηματικού Κινητήρα

Για την αρχική επαλήθευση της καλωδίωσης και της λειτουργίας του βηματικού κινητήρα Nema 34 και του driver DM860T, χρησιμοποιήθηκε ένας απλός κώδικας που έστελνε παλμούς στα pins PUL και DIR. Οι δοκιμές αυτές επιβεβαίωσαν την ορθή απόκριση του κινητήρα και τον προσδιορισμό της μέγιστης αξιόπιστης ταχύτητας λειτουργίας υπό φορτίο, η οποία μετρήθηκε περίπου στις 115 RPM, υπερκαλύπτοντας την απαίτηση των 91.07 RPM.

Ο βηματικός κινητήρας επίσης είναι γνωστό από τον κατασκευαστή πως έχει ακρίβεια 1,8 μοίρες ανά βήμα. Έτσι μέσω του Driver ενεργοποιήθηκε η λειτουργία Microstepping για μεγαλύτερη ακρίβεια στις γωνίες. Ωστόσο όσο περισσότερα γίνονται τα Microsteps τόσο μπορεί να μειωθεί η ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι η ρύθμιση στα 3200 Microsteps ήταν η κατάλληλη ώστε να επιτρέψει στον κινητήρα να λειτουργεί ομαλά, στις επιθυμητές ταχύτητες και με την ακρίβεια που απαιτείται.

6.2 Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Συστήματος Ελέγχου

Μετά την επιτυχή μεμονωμένη δοκιμή των εξαρτημάτων, το επόμενο βήμα ήταν η σύνθεση τους για την ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου. Για να πραγματοποιηθεί αυτό γράφτηκε ένα πρόγραμμα στο περιβάλλον Arduino IDE που διαβάζει τις μετρήσεις από το επιταχυνσιόμετρο και να στέλνει εντολές θέσης στον κινητήρα. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν προβλήματα κατά την ταυτόχρονη λειτουργία του αισθητήρα και του κινητήρα, με τον μικροελεγκτή να μην μπορεί να διαβάσει τις μετρήσεις της γωνίας από το IMU και παράλληλα να στείλει τις κατάλληλες εντολές στον κινητήρα. Αυτό το πρόβλημα παρατηρείται διότι ο αισθητήρας στέλνει άμεσα τις μετρήσεις στην σειριακή του μικροελεγκτή ενώ ο κινητήρας χρειάζεται αλλαγές σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα για να λειτουργήσει. Ως αποτέλεσμα αυτές οι δύο διαδικασίες σταματούσαν η μία την άλλη.

6.2.1 Αρχιτεκτονική Ελέγχου με FreeRTOS

Για την επίτευξη υψηλής απόκρισης και αξιόπιστης λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, υιοθετήθηκε μια αρχιτεκτονική πολλαπλών εργασιών (multi-tasking) με τη χρήση του λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου FreeRTOS, το οποίο είναι ενσωματωμένο στον πυρήνα του ESP32. Δημιουργήθηκαν δύο παράλληλες εργασίες (tasks), καρφιτσωμένες σε διαφορετικούς πυρήνες του επεξεργαστή:

- IMU Task (Core 0): Μια εργασία υψηλής προτεραιότητας, αποκλειστικά υπεύθυνη για τη συνεχή ανάγνωση και το φιλτράρισμα των δεδομένων του IMU. Αυτό διασφάλιζε ότι η μέτρηση της τρέχουσας γωνίας ήταν πάντα ενημερωμένη, ανεξάρτητα από άλλες διεργασίες.

- Motor Task (Core 1): Μια δεύτερη εργασία, υπεύθυνη για τον υπολογισμό του αλγορίθμου ελέγχου και την αποστολή των παλμών στον Driver του κινητήρα.

Αυτή η προσέγγιση απέτρεψε την αλληλεπίδραση μεταξύ της χρονοβόρας ανάγνωσης του αισθητήρα και της ακριβούς χρονικά κίνησης του κινητήρα, οδηγώντας σε ένα εξαιρετικά σταθερό και αποδοτικό σύστημα ελέγχου.

6.2.2 Υλοποίηση Ελεγκτή PID με Προτροφοδότηση (Feedforward)

Για να μπορεί το σύστημα να ακολουθήσει την τροχιά των κάτω άκρων του ανθρώπου κατά το περπάτημα αναπτύχθηκε κώδικας κατά τον οποίο θα δίνονται γωνίες μέσω της σειριακής επικοινωνίας και θα φτάνει στην επιθυμητή γωνία μέσω του νόμου ελέγχου κλειστού κυκλώματος που προαναφέρθηκε (Κεφάλαιο 2.2). Έτσι, υλοποιήθηκε ένας ελεγκτής PID με την προσθήκη ενός όρου προτροφοδότησης ταχύτητας (velocity feedforward). Ο πλήρης νόμος ελέγχου στον κώδικα είναι:

Output = Kp * error + Ki * pidIntegral + Kd * derivative + Kv * feedforwardVelocity

Η προσθήκη του όρου προτροφοδότησης (Kv) ήταν κρίσιμη, γιατί ενώ ο κλασικός ελεγκτής PID αντιδρά στο σφάλμα που έχει ήδη συμβεί, ο όρος προτροφοδότησης επιτρέπει στο σύστημα να "προβλέψει" την απαιτούμενη ταχύτητα του κινητήρα βάσει της επιθυμητής ταχύτητας της τροχιάς. Αυτό μειώνει δραματικά το σφάλμα παρακολούθησης (tracking error) κατά τη διάρκεια δυναμικών κινήσεων, κάτι που ένας απλός PID ελεγκτής αδυνατεί να κάνει αποτελεσματικά. Όπως ειπώνεται παρακάτω σε επόμενη ενότητα ο κύριος λόγος προσθήκης τέτοιου είδους όρου στην προκειμένη περίπτωση του βραχίονα ήταν πως ο έλεγχος με PID όρους ενώ ακολουθούσε την πορεία πιστά, είχε μία σημαντικά μεγαλύτερη χρονοκαθυστέρηση προκαλώντας έτσι ένα μέγιστο σφάλμα έως και 10 Μοίρες (Βλ. Εικόνα 73). Ωστόσο ο όρος της προτροφοδότησης έσβησε σχεδόν οριστικά αυτή την αστοχία και μείωσε το μέγιστο σφάλμα σε 5 Μοίρες (Βλ. Εικόνα 78).

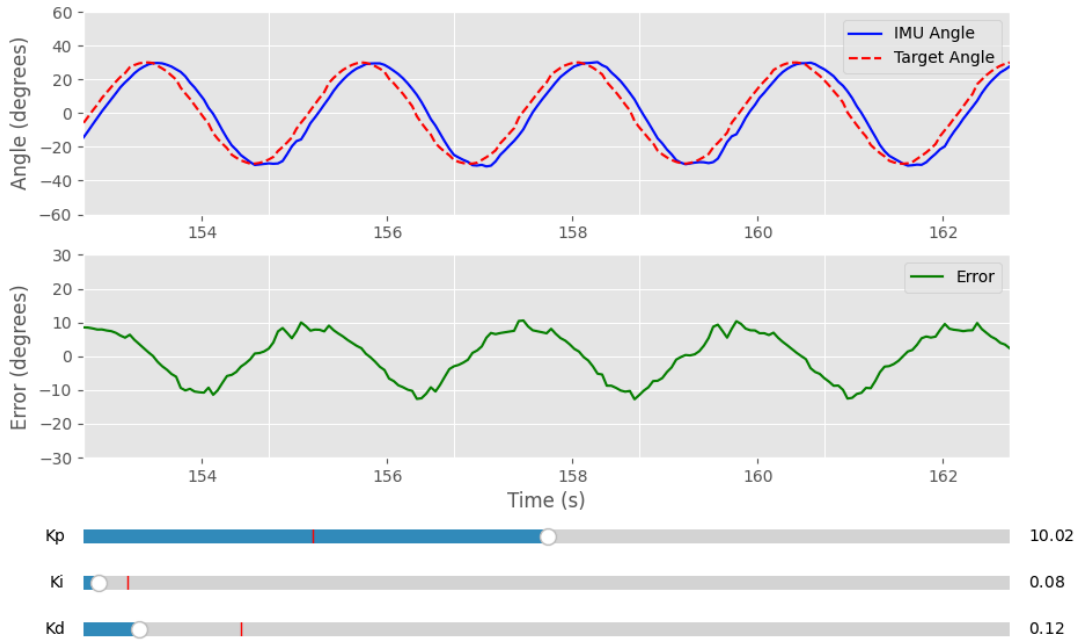
6.2.3 Πειραματική Ρύθμιση μέσω Διαδραστικών Ρυθμίσεων και Γραφημάτων

Για την αποτελεσματική και ταχύτατη ρύθμιση (tuning) των συντελεστών Kp, Ki, Kd και Kv, αναπτύχθηκε μια custom γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) σε Python με χρήση της βιβλιοθήκης Matplotlib. Αυτό έγινε διότι η διαδικασία αποστολής κώδικα με αλλαγμένους όρους PID ήταν αρκετά χρονοβόρα. Έτσι η διεπαφή αυτή προσέφερε:

- Απεικόνιση γραφημάτων πραγματικού χρόνου της τροχιάς (Βλ. Εικόνα 73) όπου η κόκκινη διασπώμενη γραμμή στο πρώτο γράφημα αναπαριστά την ζητούμενη γωνία (Target Angle), η μπλε συνεχής γραμμή αναπαριστά την πραγματική γωνία που στέλνει ο αισθητήρας IMU, και η συνεχής γραμμή του σφάλματος μεταξύ ζητούμενης και πραγματικής γωνίας στο δεύτερο γράφημα με πράσινο χρώμα.

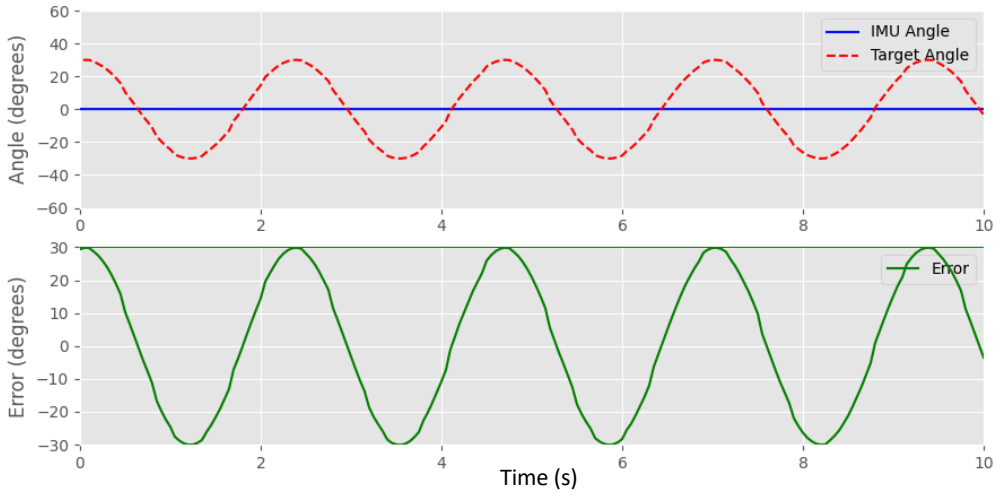
- Διαδραστικούς Ρυθμιστές (Sliders): επέτρεπαν την άμεση, ζωντανή αλλαγή των τιμών Kp, Ki, Kd και Kv, στέλνοντας τις νέες τιμές στον ESP32 μέσω της σειριακής θύρας (Βλέπε Εικόνα 78 Ρυθμιστές Kp, Ki, Kd και Kv στο κάτω μέρος της διάταξης, Error).

Αυτό το εργαλείο μετέτρεψε τη χρονοβόρα διαδικασία του tuning σε μια άμεση και οπτικά καθοδηγούμενη διαδικασία, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος μέσα σε λίγα λεπτά. Παρακάτω (βλ. Εικόνα 73) ακολουθεί η πρώτη γραφική διεπαφή. Σε αυτή ο όρος προτροφοδότησης δεν συμπεριλαμβάνεται ακόμα γι' αυτό παρατηρείται ένα σφάλμα των 10 μοιρών ενώ στα γραφήματα γωνίας υπάρχει ενός είδους χρονοκαθυστέρηση στο ενδιάμεσο τους. Αυτό αντιμετωπίζεται με την προσθήκη του όρου προτροφοδότησης Kv όπως θα αναπτυχθεί αργότερα όπου πλέον το σφάλμα θα μειώνεται στις 5 μοίρες (Βλ. Εικόνα78).



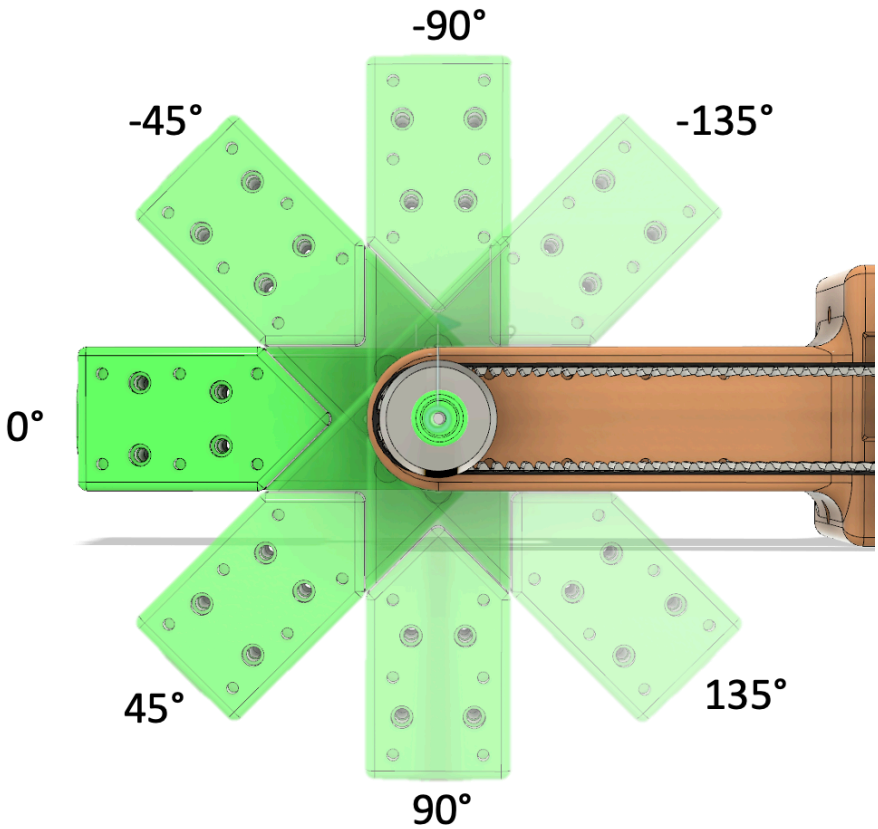
Εικόνα 73. Ακολουθία τροχιάς βραχίονα Μόνο με PID όρους, στο πάνω γράφημα Γωνίας-Χρόνου εμφανίζεται με κόκκινη γραμμή η επιθυμητή γωνία και με μπλε η γωνία που βρίσκεται ο κινούμενο μέλος εκείνη την στιγμή, στο κάτω γράφημα Σφάλματος-Χρόνου με πράσινο εμφανίζεται το σφάλμα, το σύστημα είναι χωρίς προτροφοδότηση. έτσι είναι εμφανής η χρονοκαθυστέρηση και το μέγιστο σφάλμα στις ανέρχεται στις 10 Μοίρες, οι μπάρες κάτω ''sliders'' είναι ρυθμιζόμενες για την κατάλληλη επιλογή των PID όρων

Υπό συνθήκες ηρεμίας όπου δεν δίνεται ρεύμα στον κινητήρα και ο αισθητήρας ως επακόλουθο δεν κινείται γίνονται πιο ξεκάθαρες οι γραμμές. Αυτή της ζητούμενης γωνίας (Target Angle), ανάλογα την τροχιά που δίνεται από τον χρήστη στον βραχίονα όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι ένα ημιτονοειδές σήμα με πλάτος 60 μοίρες και περίοδο δύο δευτερολέπτων καθώς και η γραμμή του Αισθητήρα (IMU Angle), όπου δείχνει την γωνία που βρίσκεται ο αισθητήρας την δεδομένη στιγμή λειτουργίας δηλαδή στην θέση απ' όπου ξεκίνησε εφόσον ο κινητήρας στην προκειμένη περίπτωση δεν κινείται (Βλ. Εικόνα 74).



Εικόνα 74. Γράφημα Βραχίονα με Μηδενικό Ρεύμα στο σύστημα κίνησης. Εδώ αναδεικνύονται καλύτερα οι δύο γραμμές του Στόχου της Γωνίας (Target Angle, Διασπώμενη Κόκκινη Γραμμή) και η γωνία του Αισθητήρα την Δεδομένη Στιγμή (IMU Angle, Μπλε Συνεχής Γραμμή)

Στην παρακάτω Εικόνα 75 ακολουθεί το εύρος κίνησης του βραχίονα για καλύτερη αντίληψη των γραφημάτων όσο αναφορά το σύστημα. Ο βραχίονας όπως προαναφέρθηκε στο σχεδιαστικό κομμάτι έχει εύρος γωνίας από 135° έως και -135° με το σημείο έναρξης να είναι σε ευθεία θέση δηλαδή σε γωνία 0°. Οι γωνίες όταν ο κινητήρας περιστρέφεται δεξιόστροφα είναι αρνητικές και θετικές όταν περιστρέφεται αριστερόστροφα.



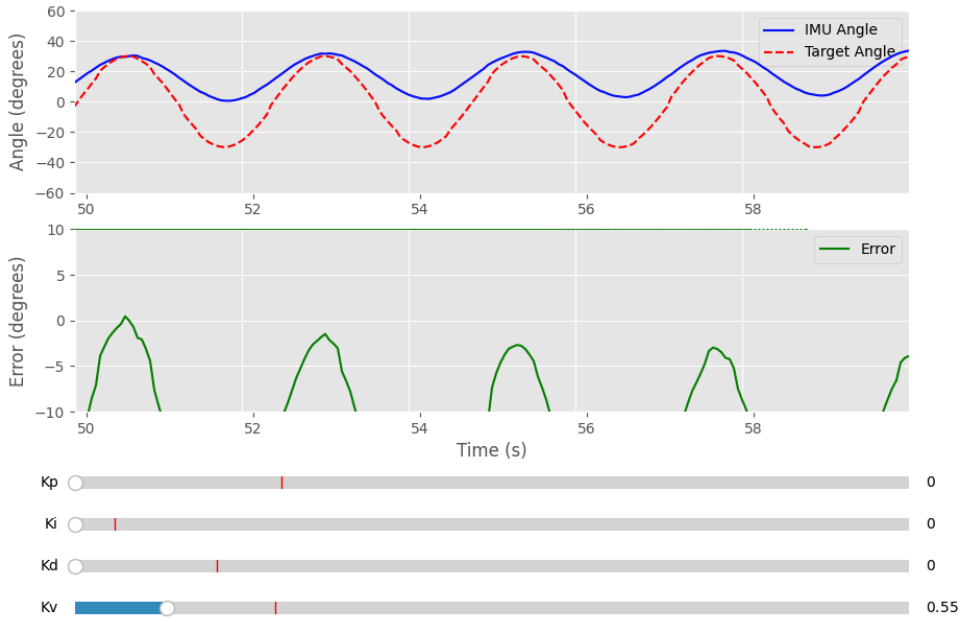
Εικόνα 75. Πλήρες εύρος κίνησης βραχίονα από 135° έως και -135°, όταν ο κινητήρας περιστρέφεται δεξιόστροφα οι γωνίες είναι αρνητικές ενώ όταν κινείται αριστερόστροφα θετικές

Ηράκλειο © 2025

5.2.4 Ανάπτυξη Κώδικα Python για Ρύθμιση Όρων Ελέγχου σε Προκαθορισμένα Τριγωνικά και Ημιτονοειδή Μονοπάτια

Πριν αναπτυχθεί ο ολοκληρωμένος κώδικας ο οποίος ακολουθεί τα μονοπάτια των αρθρώσεων από αρχείο CSV πρώτα έγιναν κάποιες δοκιμές σε προκαθορισμένες τροχιές. Αυτά που επιλέχθηκαν ήταν το τριγωνικό προφίλ και το ημιτονοειδές. Μέσω αυτών μπόρεσαν να βρεθούν οι τιμές των κερδών του ελέγχου που οδηγούν στον καλύτερο έλεγχο του συστήματος, χωρίς να είναι βελτιστοποιημένος μόνο για μια συγκεκριμένη τροχιά και να έχει κακή απόκριση στις υπόλοιπες.

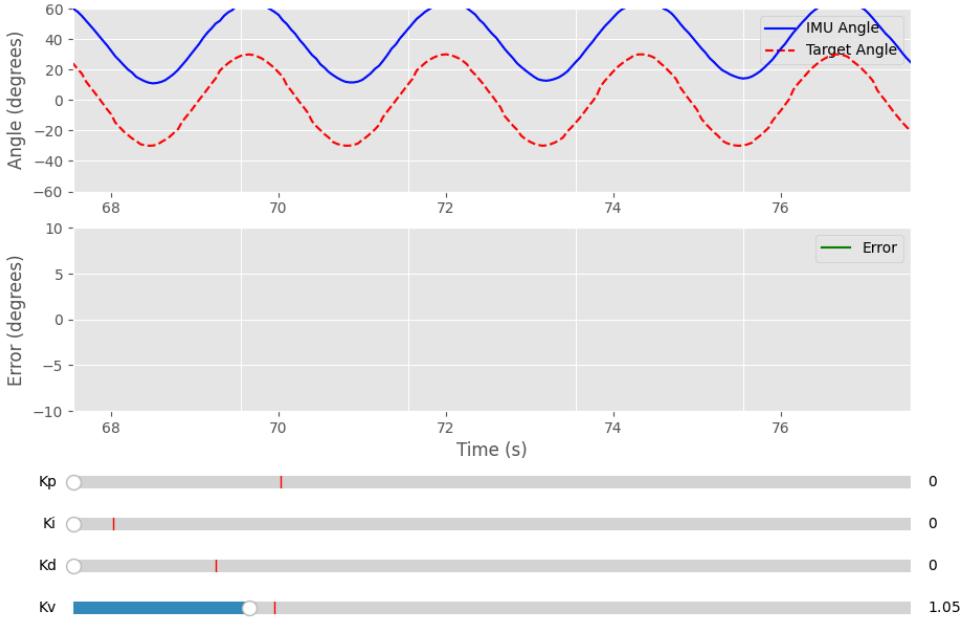
Έτσι για αρχή έγιναν έλεγχοι σε ημιτονοειδές σήμα για την ρύθμιση σε ποιο ομαλό περιβάλλον και τον ακριβή έλεγχο. Στην αρχή λοιπόν ξεκίνησε η διαδικασία μηδενίζοντας όλους τους όρους εκτός από αυτόν της προτροφοδότησης. Όσο αυτός ο όρος παραμένει μικρός υπάρχει μια σχετική ακολουθία του μονοπατιού αλλά εκτός των πραγματικών γωνιών καθώς ακολουθείται μόνο η κίνηση και όχι το μονοπάτι καθ’ αυτό. Το σφάλμα πλέον είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με την ποθητή τιμή και γι’ αυτό η γραμμή παρατήρησης φεύγει εκτός κατά άξονα y.



Εικόνα 76. Κίνηση Βραχίονα με Ελάχιστη Προτροφοδότηση, Παρατηρείται Χαμηλή Ακολουθία του Μονοπατιού χωρίς να Υπάρχει Πιστότητα Κίνησης, το σφάλμα πλέον είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με την ποθητή τιμή και γι’ αυτό η γραμμή φεύγει εκτός του άξονα y

Εν συνεχεία αυξάνοντας τον όρο προτροφοδότησης Kv παρατηρείται πως η κίνηση του μονοπατιού γίνεται πιο ακριβής ενώ μετά από κάποιο σημείο παρατηρούνται ταλαντώσεις. Παράλληλα ο στόχος και η πραγματική τιμή δεν συναντώνται ακόμα αλλά οι κινήσεις του μονοπατιού γίνονται όλο και πιο ταυτόσημες. Στο συγκεκριμένο γράφημα το σφάλμα ξεφεύγει από την δυνατή ορατότητα των αξόνων καθώς το σφάλμα γίνεται κατά πολύ μεγαλύτερο από το ελάχιστο που απαιτείται. Παρ’ όλα αυτά στην προκειμένη περίπτωση το σφάλμα επί της ουσίας μεταφέρεται κατά τον

άξονα y'y του σφάλματος καθώς δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διόρθωση από τον PID έλεγχο για την πραγματική τροχιά παρά μόνο για την πιστότητα της κίνησης.



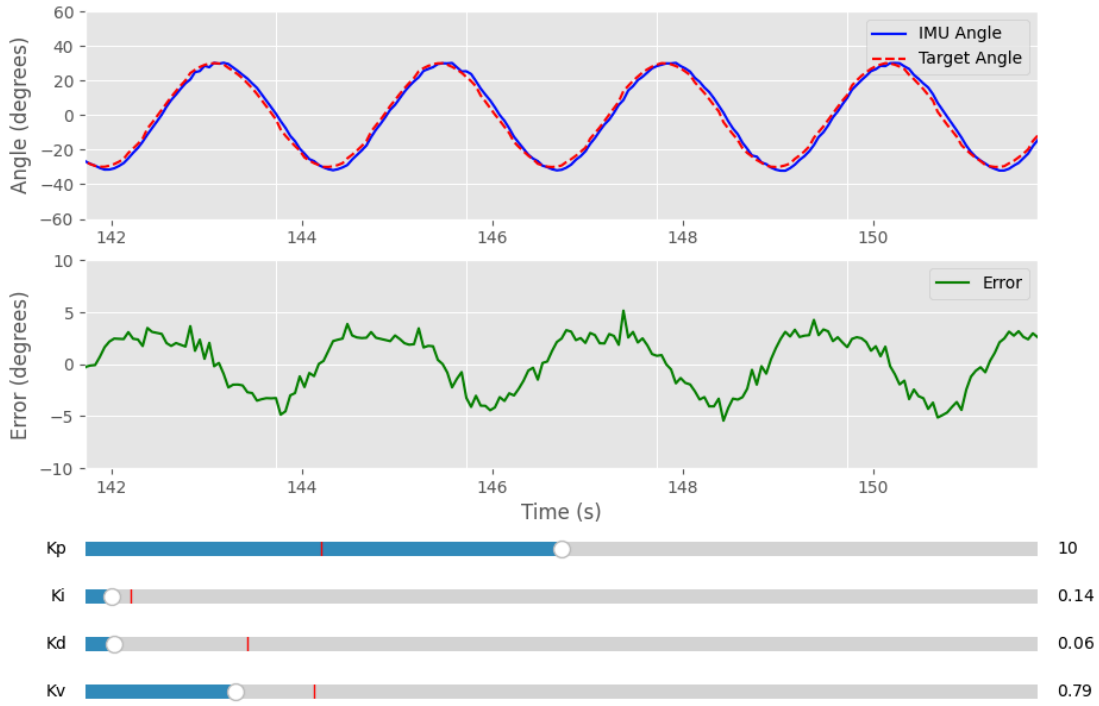
Εικόνα 77. Προσθήκη μεγαλύτερης προτροφοδότησης, πιστή ακολουθία μονοπατιού αλλά σε μεγαλύτερες γωνίες εκτός κανονικής τροχιάς, το σφάλμα εφόσον είναι μεγαλύτερο των 10 μοιρών δεν εμφανίζεται

Έπειτα εφόσον βρέθηκε ένας σχετικά καλός όρος προτροφοδότησης πλέον γίνεται αύξηση του αναλογικού όρου K_P ο οποίος ελαττώνει το σφάλμα και πλέον η ακολουθία συμπίπτει με αυτή της επιθυμητής γωνίας. Όσο αυξάνεται αυτός ο όρος τόσο το γράφημα του αισθητήρα πλησιάζει το επιθυμητό.

Ωστόσο όταν το κέρδος K_P ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή ξεκινάει η δημιουργία ταλαντώσεων στο σύστημα. Μόλις παρατηρηθεί κάτι τέτοιο πλέον μπορεί να γίνει η αύξηση του Παραγωγικού όρου K_d. Αυτός ελαττώνει τις ταλαντώσεις και πλέον το σύστημα γίνεται και πάλι ομαλό. Παρ' όλα αυτά αν αυτός ο όρος in aleίναι πολύ μεγάλος το σύστημα γίνεται πιο αργό κι εκεί πλέον εφαρμόζεται και ο Ολοκληρωτικός Όρος ο οποίος διορθώνει αυτό το σφάλμα και κάνει το σύστημα πιο απότομο και ακριβές. Όσο, όμως, ο όρος K_i αυξάνεται το σύστημα γίνεται όλο και πιο ασταθές. Έτσι γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω και πειραματίζοντας διαφορετικές ρυθμίσεις επιλέχθηκαν η εξής όροι για το ημιτονοειδές μονοπάτι:

Αναλογικός Όρος **K_P**	10
Παραγωγικός Όρος **K_d**	0.14
Ολοκληρωτικός Όρος **K_i**	0.06
Όρος Προτροφοδότησης **K_v**	0.79

Πίνακας 15. Όροι Νόμου Ελέγχου Συστήματος Kp, Kd, Ki και Kv Έπειτα απο Πειραματισμούς σε Ημιτονοειδές Σήμα



Εικόνα 78. Πλήρως ρυθμισμένος PID έλεγχος με προτροφοδότηση σε ημιτονοειδές μονοπάτι

Με την ίδια διαδικασία επιλέχθηκαν και οι όροι για το τριγωνοειδές μονοπάτι στο οποίο παρατηρείται πως ο αναλογικός όρος Kp είναι μειωμένος. Αυτό διότι λόγω των ακραίων αλλαγών ταχυτήτων στα μέγιστα των τριγώνων δημιουργούνταν ταλαντώσεις και ο Kd όρος δεν μπορούσε να αυξηθεί για να τις μειώσει εφόσον προκαλούσε άλλα προβλήματα αστάθειας. Έτσι οι τελικοί όροι ήταν οι εξής:

Αναλογικός Όρος K_P	9.5
Παραγωγικός Όρος K_d	0.14
Ολοκληρωτικός Όρος K_i	0.06
Όρος Προτροφοδότησης K_v	1

Πίνακας 16. Όροι Νόμου Ελέγχου Συστήματος Kp, Kd, Ki και Kv Έπειτα από Πειραματισμούς σε Τριγωνοειδές Σήμα



Εικόνα 79. Πλήρως ρυθμισμένος PID έλεγχος με προτροφοδότηση σε τριγωνοειδές τροχιά, σε αυτή την περίπτωση γίνονται πειραματισμοί στις απότομες αλλαγές γωνίας

Ως τελικό αποτέλεσμα το μέγιστο σφάλμα που αναπαραγόταν ήταν αυτό των 5 μοιρών. Αυτό εντοπιζόταν σε περιοχές απότομης αλλαγής ταχύτητας την οποία έπειτα στο σύστημα αναπαραγόντουσαν ταλαντώσεις εξαιτίας αυτού. Το σφάλμα στην αρχή ξεκίνησε με 10 Μοίρες όπου η κίνηση στο μονοπάτι είχε πιο χαλαρή αλληλεπίδραση, με τον πειραματισμό όμως των όρων ελαττώθηκε σημαντικά. Οι τελικοί όροι λοιπόν που εξυπηρετούσαν και τις δύο περιπτώσεις του συστήματος ήταν οι εξής:

Αναλογικός Όρος K_P	9.7
Παραγωγικός Όρος K_d	0.14
Ολοκληρωτικός Όρος K_i	0.06
Όρος Προτροφοδότησης K_v	0.9

Πίνακας 17. Τελικοί Όροι Ελέγχου Kp, Kd, Ki και Kv Έπειτα από Πειραματισμούς του Συστήματος

6.3 Προσομοίωση Ανθρώπινης Βάδισης

Το τελικό πείραμα αφορά την εκτέλεση ενός πλήρους κύκλου βάδισης, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για τη γωνία του αστραγάλου που εξήχθησαν στο Κεφάλαιο 2.

6.3.1 Εκτέλεση Προκαθορισμένου Μονοπατιού Κίνησης

Ο κώδικας Python που αναπτύχθηκε ακολουθούσε την εξής διαδικασία για να πραγματοποιήσει το επιθυμητό μονοπάτι κάθε άρθρωσης:

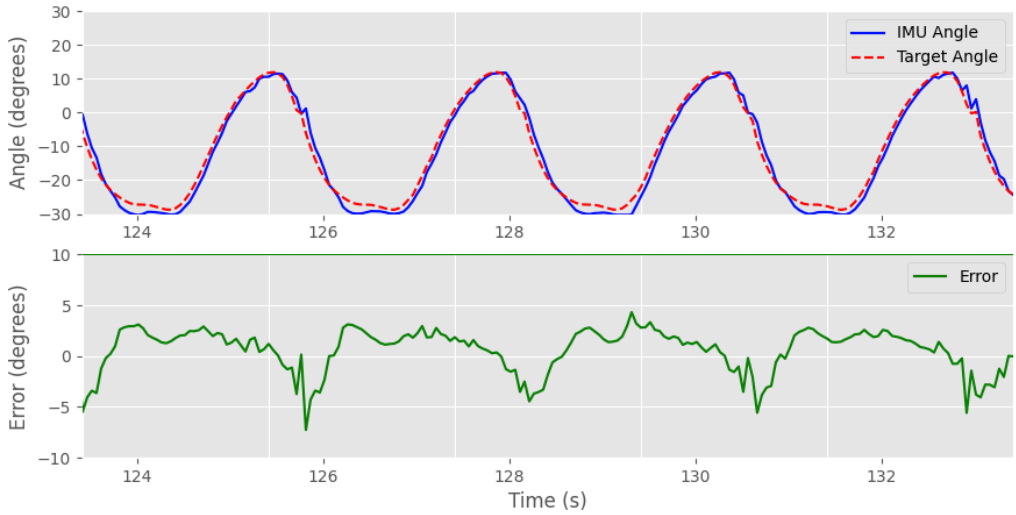
1. Διαβάζει το αρχείο CSV με τις χρονοσειρές της γωνίας.

2. Υπολογίζει την παράγωγο της γωνίας ως προς τον χρόνο για να εξαγάγει τη στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα.

3. Στέλνει συνεχώς στον ESP32, μέσω της σειριακής θύρας του Arduino, εντολές της μορφής A:<angle value>,V:<velocity value>, παρέχοντας στο σύστημα ελέγχου τόσο την επιθυμητή θέση όσο και την επιθυμητή ταχύτητα.

Επίσης προστέθηκε η παράμετρος SPEED_MULTIPLIER στον κώδικα της Python η οποία επέτρεψε την εύκολη προσαρμογή της ταχύτητας εκτέλεσης του πειράματος. Έτσι διευκόλυνε την διαδικασία της ρύθμισης του PID σε συγκεκριμένα στάδια.

Αργότερα λοιπόν ξεκίνησαν οι πειραματισμοί με τα διαφορετικά προφίλ κίνησης του ισχίου, του γονάτου και του αστραγάλου με ταχύτητα κίνησης ίση με 1,2 m/s ενός ανθρώπου βάρους 75 Kg. Ως πρώτο μονοπάτι επιλέχθηκε αυτό του ισχίου καθώς δεν περιλαμβάνει διαταραχές και θυμίζει την κίνηση αυτή του ημιτονοειδούς προφίλ.

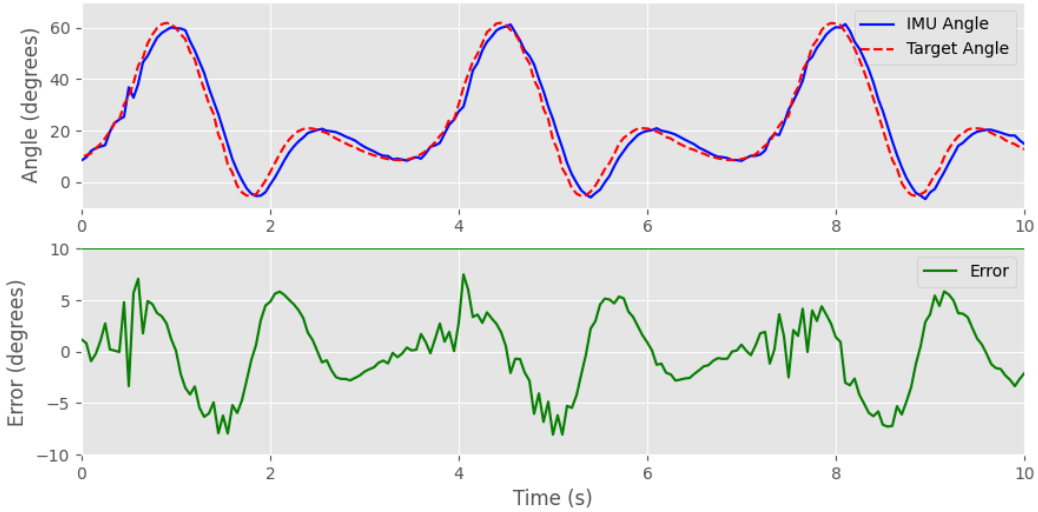


Εικόνα 80. Ακολουθία Μονοπατιού Ισχίου Ρομποτικού Βραχίονα, παρατηρείται μέσος όρος σφάλματος 3 μοιρών ενώ σε συγκεκριμένα σημεία απότομων αλλαγών φαίνονται κάποια spikes

Στην προκειμένη περίπτωση κατά μέσο όρο το μέγιστο σφάλμα έφτανε τις 3 μοίρες. Το σύστημα ακολουθεί πιστά την τροχιά αλλά αργεί να το υλοποιήσει όταν υπάρχουν απότομες αλλαγές υπό μικρές γωνίες. Παρατηρούνται κάποια spikes σε συγκεκριμένα σημεία λόγω πολύ μικρών αλλαγών αλλά επί των πλείστων πρόκειται για μια πολύ ικανοποιητική ακολουθία.

Έπειτα ακολούθησε η τροχιά του γονάτου η οποία αποτελεί μια πιο περίπλοκη διαδρομή καθώς έχει απότομες αλλαγές σε μικρά χρονικά διαστήματα μεταξύ τους.

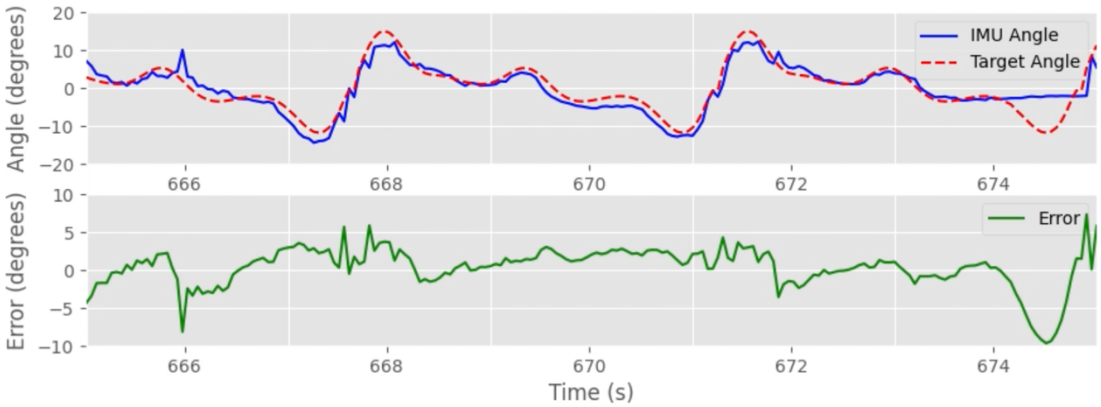
Αυτό πρόσθετε αρκετές ταλαντώσεις ωστόσο είναι αρκετά χαμηλές και με μικρή επιρροή στο γενικότερο σύστημα.



Εικόνα 81. Ακολουθία μονοπατιού γονάτου ρομποτικού βραχίονα, μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται κατά την διάρκεια της απότομης πτώσης της γωνίας όπου ο έλεγχος προσπαθεί να προλάβει την τροχιά

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το σφάλμα γίνεται πιο ομαλό και πάλι περιορίζεται σε ένα μέγιστο των 6^{o} με τον μέσο όρο να κυμαίνεται στις 3-5 μοίρες. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του σφάλματος μοιάζει με χρονοκαθυστέρηση αλλά είναι λογικό εφόσον η αλλαγή γωνιών είναι μεγάλη και απότομη στην συγκεκριμένη περίπτωση του γονάτου. Οπότε για μια τροχιά με τόσες διαταραχές είναι ένα αρκετά μικρό σφάλμα.

Τέλος ακολούθησε η ίδια διαδικασία για τον αστράγαλο. Το συγκεκριμένο μονοπάτι καθότι είναι σε μικρότερες μοίρες (λιγότερες των 20 μοιρών) έχει ακόμη περισσότερες αλλαγές και είναι δύσκολο από το σύστημα να τις ακολουθήσει πιστά.



Εικόνα 82. Ακολουθία μονοπατιού αστραγάλου ρομποτικού βραχίονα, εδώ παρατηρούνται πολύ περισσότερες αστάθειες αφού το εύρος περιστροφής στην συγκεκριμένη τροχιά είναι πολύ μικρό οπότε οι 5 μοίρες διακρίνονται πιο εύκολα

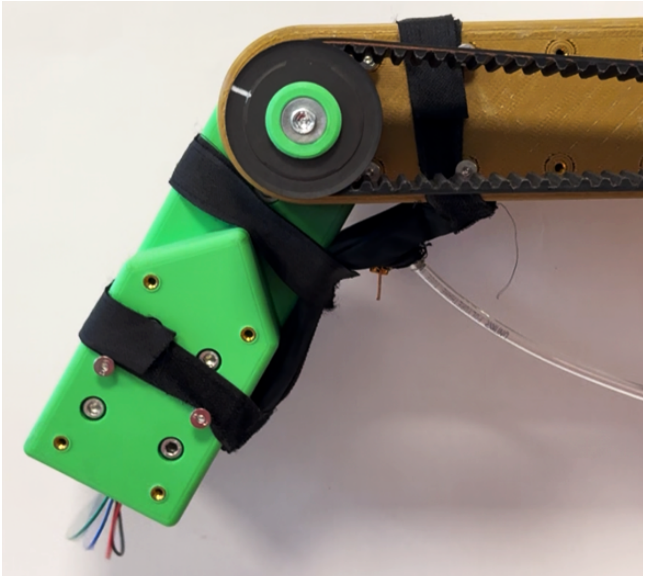
Όπως παρατηρείται υπάρχουν σημαντικές ταλαντώσεις σε όλο το σύστημα παρ' όλα αυτά το μονοπάτι και πάλι ακολουθείται κατά το κύριο μέρος της διαδικασίας. Το

μέγιστο σφάλμα κατά μέσο όρο ανέρχεται στις 5 μοίρες και η χρονοκαθυστέρηση επηρεάζει εξίσου αυτόν τον παράγοντα.

Συμπερασματικά, το σύστημα μπορεί να ακολουθήσει πιστά τα διαφορετικά μονοπάτια ωστόσο με ένα σφάλμα της τάξης των 5 μοιρών, που παρατηρείται κυρίως στις περιοχές της τροχιάς που έχουν απότομες αλλαγές στην γωνία.

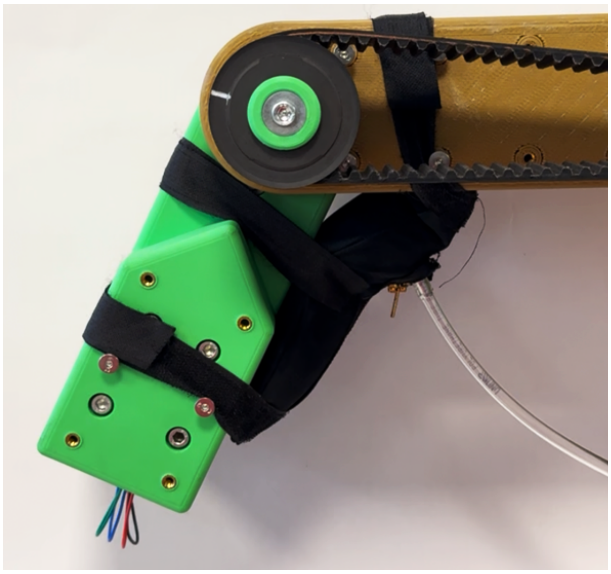
6.3.2 Ανθρώπινη Βάδιση με Άσκηση Δύναμης Εξωτερικών Παραγόντων

Αφού έγινε η πραγματοποίηση της ανθρώπινης βάδισης αμέσως επόμενο ήταν να εγκατασταθεί ο Soft Επενεργητής στον ρομποτικό βραχίονα για πειραματισμούς όσο αναφορά την πιστότητα του συστήματος και τις επιρροές από εξωτερικούς παράγοντες καθώς και τις δυνάμεις του Soft Επενεργητή. Έτσι έγινε η τοποθέτηση του επενεργητή και πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ως προς την τροχιά του ισχίου που παρουσίαζε την πιο ομαλή διαδρομή και έτσι τυχόν περίεργες ενέργειες θα είναι πιο ευδιάκριτες.



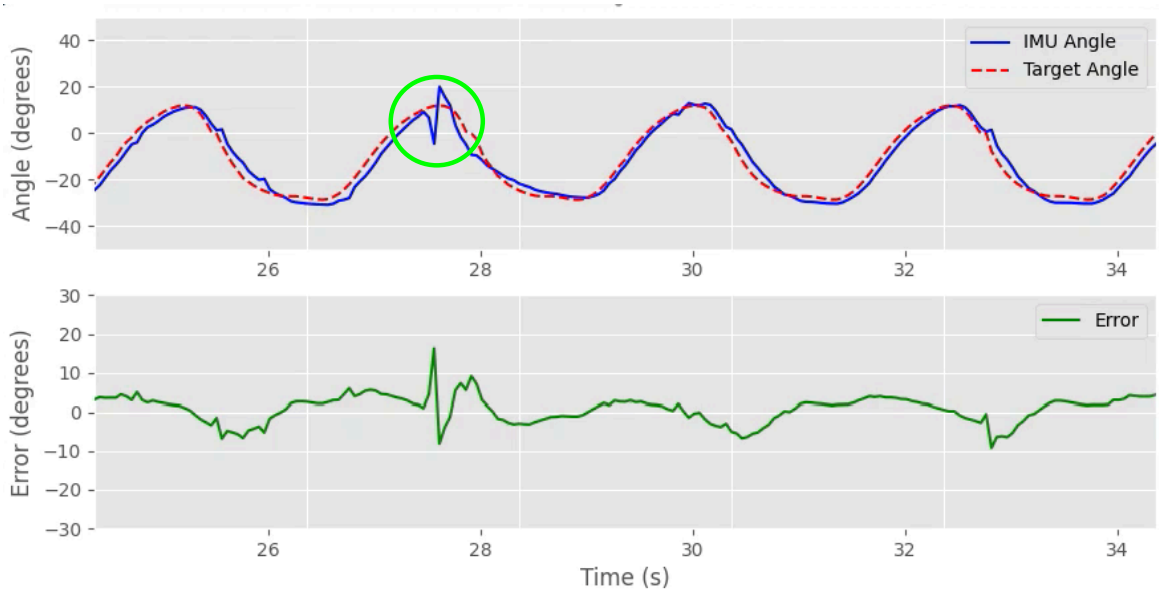
Εικόνα 83. Εφαρμοσμένος Soft επενεργητής στον βραχίονα χωρίς να του ασκείται εσωτερική πίεση

Στην αρχή όταν εφαρμόστηκε χωρίς καμία πίεση δεν παρουσίασε καμία αντίδραση ενώ συνέχιζε το μονοπάτι κανονικά χωρίς επιρροές. Έπειτα ξεκίνησε να αυξάνεται η πίεση στον επενεργητή και πλέον να εφαρμόζεται σταδιακά μεγαλύτερη αντίσταση στον βραχίονα.



Εικόνα 84.Εφαρμοσμένος Soft επενεργητής στον Βραχίονα με Άσκηση Πίεσης

Οι αυξομειώσεις της πίεσης δεν προκαλέσανε καμία αλλαγή στην πορεία μέχρι και τα 0,8 Bar αφού οι ροπές του Soft Επενεργητή είναι ακόμη ελάχιστες. Ωστόσο αφότου η πίεση ξεπερνούσε αυτή την τιμή παρατηρήθηκε μία ασυνήθιστη συμπεριφορά. Ο βραχίονας μόλις έφτανε στην μέγιστη γωνία του μονοπατιού, δημιουργούσε μία διαταραχή, σαν να έσπαγε για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα και μετά συνέχιζε να ακολουθεί τον Στόχο της Γωνίας του ισχίου κανονικά όπως πριν. Αυτή η αντίδραση φαίνεται στο παρακάτω γράφημα από τις πληροφορίες του αισθητήρα πιο έντονα κυκλωμένη με πράσινο χρώμα.



Εικόνα 85. Γράφημα βραχίονα στο οποίο παρατηρείται η αντίδραση του συστήματος από τον Soft επενεργητή όταν του ασκείται δύναμη πιέσεως 1 Bar, η αντίδραση φαίνεται κυκλωμένη με πράσινο χρώμα

Αυτή η συμπεριφορά σαν ‘’Spike’’ διήρκησε για περίπου 0,1 Δευτερόλεπτα πράγμα το οποίο δικαιολογείται από τον αναλογικό όρο εφόσον έχει αρκετά υψηλή τιμή. Μόλις ο κινητήρας ζοριστεί να φτάσει στην επιθυμητή θέση και ξεφύγει από το μονοπάτι δημιουργώντας ένα σφάλμα 10 μοιρών τότε εξαιτίας της αυστηρότητας του

όρου ο κώδικας δίνει πολύ μεγάλες τιμές στον κινητήρα τις οποίες δεν μπορεί να ακολουθήσει άμεσα. Παρ’ όλα αυτά μόλις οι γωνίες πλησιάσουν την γωνία του βραχίονα και οι τιμές που δίνονται στον κινητήρα είναι πάλι σε φυσιολογικά πλαίσια ο κινητήρας επιστρέφει στο μονοπάτι που το καθορίζεται και η κίνηση συνεχίζεται κανονικά χωρίς προβλήματα.

Στο σύστημα του βραχίονα και του Soft Επενεργητή δεν παρατηρήθηκαν επιπλέον αντιδράσεις παρά μόνο αυτή. Όσο το σύστημα παρέμενε κάτω από τα 0,9 Bar πιέσεως δεν παρατηρούνται ανωμαλίες και το μονοπάτι ακολουθείται πιστά. Όμως μόλις η πίεση γίνει μεγαλύτερη από το 1 Bar πίεσης αυτή η ανωμαλία επαναλαμβάνεται όλο και πιο συχνά ενώ σπανίως μπορεί και πάλι να συνεχίζει την πορεία χωρίς αντίδραση από τον επενεργητή. Οπότε κατά κύριο λόγο το σφάλμα παραμένει στις 5 μοίρες μέχρις ότου ασκηθεί αυτή η πίεση. Με το που προστεθεί αυτή η δύναμη στα μέγιστα των διαδρομών το σφάλμα φτάνει μέχρι και τις 10 μοίρες.

6.3.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η συνολική αξιολόγηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα κεφάλαια 5.2 και 5.3 επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της του συστήματος που αναπτύχθηκε να ακολουθήσει πιστά την τροχιά των αρθρώσεων του ανθρώπου κατά το περπάτημα. Το σύστημα βασίστηκε στον μικροελεγκτή ESP32 σε περιβάλλον FreeRTOS και στην υλοποίηση ελεγκτή PID με προσθήκη όρου προτροφοδότησης. Η λειτουργία του κρίθηκε σταθερή σε δοκιμές ελεύθερης εκτέλεσης, χωρίς εξωτερικούς περιορισμούς, παρουσιάζοντας καλή χρονική απόκριση και επαρκή ακρίβεια στη ρύθμιση της γωνίας του μηχανισμού βάσει της μέτρησης από την IMU.

Η δυνατότητα ρύθμισης των συντελεστών PID και Feedforward μέσω γραφικού περιβάλλοντος Python επέτρεψε ευέλικτο και γρήγορο εντοπισμό των βέλτιστων τιμών για κάθε επιθυμητό μονοπάτι, χωρίς την ανάγκη τροποποίησης του firmware. Οι αποκλίσεις μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής γωνίας παρέμειναν εντός ανεκτών ορίων, με το σφάλμα να ελαχιστοποιείται κυρίως στις φάσεις σταθερής ταχύτητας. Αντίθετα, στις περιοχές απότομης επιτάχυνσης η απουσία προσαρμοστικού ελεγκτή οδήγησε σε στιγμιαίες υστερήσεις.

Κατά την εκτέλεση προκαθορισμένων τροχιών βάδισης με χρήση τριγωνικών και ημιτονοειδών κυματομορφών, το σύστημα ακολούθησε ικανοποιητικά τα μονοπάτια, καταφέρνοντας να αναπαράγει you πλήρεις κύκλους βάδισης. Η ανάλυση της κίνησης σε συνθήκες χωρίς εξωτερικό φορτίο επιβεβαίωσε ότι οι ροπές και οι γωνίες βρίσκονταν εντός των ορίων που τέθηκαν από τα βιολογικά δεδομένα βάδισης.

Στο επόμενο στάδιο, με την ενσωμάτωση του soft επενεργητή, δοκιμάστηκε η συμπεριφορά του μηχανισμού υπό συνθήκες εξωτερικής αντίστασης. Η παρουσία πίεσης προκάλεσε εμφανείς αποκλίσεις στην κίνηση, ιδιαίτερα στην κάμψη του γονάτου, όπου η απόκριση του κινητήρα καθυστερούσε σε σχέση με το επιθυμητό σήμα. Για χαμηλές πιέσεις (1 bar), το σφάλμα παρέμεινε σχετικά μικρό, ωστόσο για

υψηλότερες τιμές παρατηρήθηκε αδυναμία ολοκλήρωσης του πλήρους μονοπατιού, λόγω υπέρβασης της διαθέσιμης ροπής.

Τα πειραματικά αποτελέσματα συνολικά δείχνουν ότι ο σχεδιασμός του συστήματος είναι λειτουργικός και προσαρμόσιμος, επιτρέποντας τόσο την απλή εκτέλεση μονοπατιών όσο και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μηχανισμού υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φορτίου. Η επιτυχής υλοποίηση και η σταθερή λειτουργία του ελεγκτικού συστήματος αποτελούν ισχυρή βάση για μελλοντική ενσωμάτωση πιο σύνθετων στρατηγικών, όπως προσαρμοστικούς ή προγνωστικούς ελεγκτές, οι οποίοι θα μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά σε εξωτερικές μεταβολές. Η αλληλεπίδραση με τον Soft Επενεργητή ανέδειξε τον πρακτικό χαρακτήρα της κατασκευής και την καταλληλότητα της ως πειραματική πλατφόρμα ελέγχου ρομποτικής βάδισης.

6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Μελλοντική Εργασία

Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει πολλούς τρόπους εξέλιξης σε επόμενα στάδια είτε όσο αναφορά την πιστότητα είτε όσο αναφορά την πλήρη στελέχωσή του. Έτσι σαν μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να προορίζονται δύο για αρχή. Η πρώτη είναι η τοποθέτηση ενός επενεργητή με πλήρη ικανότητα στρέψης ,όσο αναφορά την ταχύτητα και τις ροπές, με αυτή του ανθρώπινου ποδιού. Η δεύτερη είναι η ανάπτυξη ενός βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας όπου θα περιείχε τρείς κινητήριες αρθρώσεις για τον πλήρη έλεγχο και προσομοίωση όλων των αρθρώσεων συνολικά μαζί.

Κινητήρας



Εικόνα 86. Αναβαθμισμένος κινητήρας μελλοντικής εργασίας, Servostepper DSY-1200RS

Ο συγκεκριμένος κινητήρας αποτελεί μία άμεση και εύκολη λύση όσο αναφορά τις περισσότερες απαιτήσεις από τον έλεγχο μέχρι την ισχύ και την ταχύτητα. Η χρήση του συναντάται σε εργοστασιακές/βιομηχανικές εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλή καθημερινή καταπόνηση με μεγάλη λεπτομέρεια και εύκολη σύνδεση με ένα γενικό σύστημα με αλγόριθμο τύπου Modbus/485. Ο πίνακας χαρακτηριστικών του (Πίνακας 17) είναι τα εξής:

Στοιχεία	
Απαιτούμενη Τάση (V)	24-70 VDC
Ισχύς (W)	1000
Ονομαστική Ταχύτητα (RPM)	3000
Ονομαστική Ροπή(Nm)	3,2
Ονομαστική Τάση (V)	48 VDC

Πίνακας 18.Χαρακτηριστικά DSY-1200RS Χωρίς Προσθήκη μειωτήρα

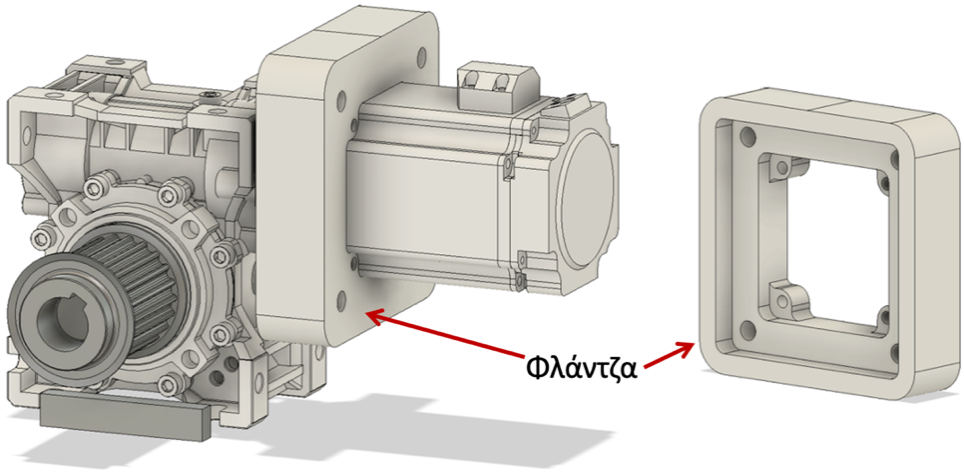
Καθώς η ονομαστική ροπή είναι πολύ μικρή και δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις γίνεται μια μείωση της ταχύτητας μέσω ενός μειωτήρα. Ο λόγος μείωσης θα πρέπει να είναι 30:1, ως αποτέλεσμα η ταχύτητα θα μειωθεί στα 100 RPM και η ροπή στα 96 Nm. Οπότε τα χαρακτηριστικά με την προσθήκη μειωτήρα μετατρέπονται σε (Πίνακας 18):

Στοιχεία	
Απαιτούμενη Τάση (V)	24-70 VDC
Ισχύς (W)	1000
Ονομαστική Ταχύτητα (RPM)	100
Ονομαστική Ροπή(Nm)	96
Ονομαστική Τάση (V)	48 VDC

Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά DSY-1200RS Με Προσθήκη Μειωτήρα

Παρ' όλα αυτά όπως παρατηρείται η ισχύς για την λειτουργία ενός τέτοιου κινητήρα ανέρχεται στα 1000W. Μία τέτοια τροφοδοσία αποτελεί πρόβλημα ως προς τον οικονομικό παράγοντα καθώς η απόκτηση ενός τέτοιου τροφοδοτικού είναι αρκετά δαπανηρή και σε συνδυασμό με την τιμή του κινητήρα είναι αδύνατη η απόκτηση ενός τέτοιου συστήματος.

Στον συγκεκριμένο κινητήρα έπειτα από αναζήτηση κατάλληλου μειωτήρα δεν βρέθηκε κάποιος ο οποίος να ταίριαζε στον κινητήρα και να είχε την απαιτούμενη μείωση. Γι' αυτό σχεδιάστηκε μία φλάντζα (βλ. Εικόνα 87) η οποία θα υποδεχόταν εσωτερικός τον κινητήρα ενώ παράλληλα θα ''αγκάλιαζε'' και τον μειωτήρα ώστε με την προσθήκη βιδών ο μηχανισμός να εφάρμοζε όπως έπρεπε για την σωστή λειτουργία και την επίτευξη της μείωσης.



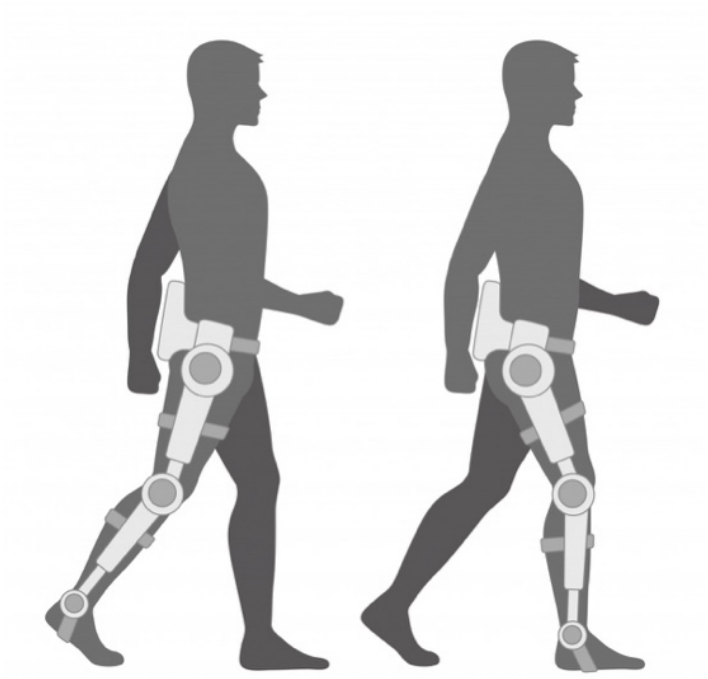
Εικόνα 87. Φλάντζα κινητήρα 1000W – μειωτήρα

Αυτά μελετήθηκαν όσο αναφορά τον συγκεκριμένο τομέα της μελλοντικής εργασίας για την αναβάθμιση του κινητήρα. Σαν συνέχει αυτών είναι η σχεδίαση μιας καινούριας βάσης για το συγκεκριμένο σύστημα μετάδοσης και εν συνεχεία επαναπροσομοίωση του βραχίονα για τυχόν χαμηλότερους συντελεστές ασφαλείας όσο αναφορά τις δυνάμεις αντοχών των υλικών.

Σύστημα Τριών Αρθρώσεων

Η προτεινόμενη προέκταση του υπάρχοντος μηχανισμού περιλαμβάνει την υλοποίηση ενός βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας, ο οποίος θα επιτρέπει την ταυτόχρονη και ανεξάρτητη κίνηση των τριών βασικών αρθρώσεων του ανθρώπινου κάτω άκρου: ισχίου, γόνατος και αστραγάλου. Η παρούσα εργασία εστιάζει κυρίως σε έναν μηχανισμό ενός βαθμού ελευθερίας για σκοπούς απομόνωσης των επιδράσεων του κάθε συστήματος. Ωστόσο, για την πλήρη αναπαραγωγή της ανθρώπινης βάδισης θα μπορούσε να αναπτυχθεί σύστημα προσομοίωσης του ποδιού εξ' ολοκλήρου.

Ένα τέτοιο σύστημα θα απαιτεί επιπλέον δύο κινητήρες, κατάλληλους σε ισχύ και ροπή, καθώς και αντίστοιχες αρθρώσεις οι οποίες θα πρέπει να ενσωματωθούν σε ένα ενιαίο σκελετικό πλαίσιο, διατηρώντας τη γεωμετρική ορθότητα και την κατανομής μάζας κοντά στην ανθρώπινη ανατομία. Παράλληλα, το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να επανασχεδιαστεί ώστε να μπορεί να διαχειρίζεται ταυτόχρονα τρεις εξόδους κίνησης, να συγχρονίζει τη δράση τους, και να ελέγχει τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, θα απαιτηθεί και νέα συλλογή δεδομένων που αφορά τη συσχετισμένη κίνηση των αρθρώσεων σε έναν πλήρη κύκλο βάδισης, ώστε να είναι δυνατή η αντιγραφή της συνολικής τροχιάς.



Εικόνα 88. Μελλοντική εργασία ανάπτυξης συστήματος τριών βαθμών ελευθερίας

Η υλοποίηση ενός τέτοιου μοντέλου θα αποτελέσει ουσιαστικό βήμα προς την κατεύθυνση της πλήρους προσομοίωσης ανθρώπινης βάδισης, και θα μπορούσε να λειτουργήσει ως βάση για την ανάπτυξη εξωσκελετικών συστημάτων ή ανθρωποειδών ρομπότ με λειτουργική, ρεαλιστική κίνηση.

Σύστημα Αυτόματης Ρύθμισης PID + FeedForward

Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο για μελλοντική εργασία αφορά την ανάπτυξη αυτόματης διαδικασίας ρύθμισης των όρων PID, σε συνδυασμό με βελτιωμένες στρατηγικές Feedforward. Στην παρούσα υλοποίηση, οι τιμές των συντελεστών του PID (Kp, Ki, Kd) και ο όρος Feedforward (Kv) επιλέχθηκαν πειραματικά, μέσω δοκιμών και παρατηρήσεων της απόκρισης του συστήματος. Αν και η μέθοδος αυτή οδήγησε σε λειτουργικά αποτελέσματα, απαιτεί σημαντικό χρόνο, εμπειρία και δεν προσαρμόζεται εύκολα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, όπως αλλαγές φορτίου ή εξωτερικές διαταραχές.

Η χρήση τεχνικών αυτόματου συντονισμού θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Κλασικές μέθοδοι όπως οι Ziegler–Nichols [38], προσεγγίσεις προσαρμοστικού ελέγχου [39], αλλά και νεότερες τεχνικές που βασίζονται σε αλγορίθμους βελτιστοποίησης ή μηχανική μάθηση, έχουν δείξει ότι μπορούν να παρέχουν δυναμική προσαρμογή και σταθερότητα σε πραγματικό χρόνο.

Παράλληλα, η περαιτέρω αξιοποίηση του Feedforward μπορεί να ενισχύσει την πιστότητα της κίνησης. Δεδομένου ότι ο Feedforward έλεγχος βασίζεται σε γνωστές ή προβλεπόμενες τροχιές, μπορεί να προλάβει τα σφάλματα και να μειώσει την καθυστέρηση απόκρισης. Σε μελέτες που αφορούν ρομποτικά γόνατα και εξωσκελετικούς μηχανισμούς, έχει φανεί ότι ο συνδυασμός PID με Feedforward οδηγεί σε πιο φυσική και ομαλή βάδιση [25].

Ένα τέτοιο σύστημα θα μείωνε την εξάρτηση από χειροκίνητες παρεμβάσεις, θα έκανε τη διάταξη πιο αυτόνομη και θα άνοιγε τον δρόμο για μελλοντικές εφαρμογές σε εξωσκελετικούς μηχανισμούς αποκατάστασης ή σε ρομποτικές αρθρώσεις που προορίζονται για καθημερινή χρήση.

6.2 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως βασικό στόχο τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την πειραματική αξιολόγηση μιας ρομποτικής άρθρωσης ικανής να προσομοιώνει την ανθρώπινη βάδιση με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η πορεία της εργασίας κάλυψε ολόκληρο το φάσμα, από τον μηχανολογικό σχεδιασμό και την επιλογή υλικών, μέχρι την ανάπτυξη συστήματος ελέγχου και την ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων βάδισης.

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να αναπαράγει με πιστότητα τα προκαθορισμένα μονοπάτια κίνησης, με σφάλμα που κυμαίνεται περίπου στις 5 μοίρες. Το σφάλμα αυτό παρατηρείται κυρίως σε περιοχές όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές της γωνίας και ταχύτητας, γεγονός που δείχνει ότι ο συνδυασμός PID με όρο Feedforward βελτιώνει σημαντικά την απόκριση, αλλά εξακολουθεί να έχει περιθώρια βελτίωσης σε ακραίες συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση, το σύστημα απέδειξε σταθερή λειτουργία, καλή χρονική απόκριση και αξιοσημείωτη

αντοχή σε εξωτερικές επιρροές, στοιχεία που το καθιστούν μια αξιόπιστη πειραματική πλατφόρμα.

Η αξιολόγηση της απόδοσης με την ενσωμάτωση του Soft Επενεργητή ανέδειξε την ευελιξία και την πρακτική χρησιμότητα του σχεδιασμού. Παρά τις προκλήσεις που σχετίζονται με την πίεση λειτουργίας, η άρθρωση κατάφερε να ανταποκριθεί στις περισσότερες περιπτώσεις με μικρές αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η χρήση ευέλικτων, μη άκαμπτων μηχανισμών μπορεί να ανοίξει τον δρόμο για πιο φυσικές και εργονομικές λύσεις στη ρομποτική υποβοήθηση βάδισης.

Συνολικά, η εργασία ανέδειξε τρία βασικά σημεία:

1. Πρακτικότητα: Η σχεδίαση και κατασκευή μιας βιομιμητικής άρθρωσης βάδισης μπορεί να υλοποιηθεί με σχετικά απλά μέσα, χωρίς να απαιτείται περίπλοκη μοντελοποίηση.

2. Απόδοση Ελέγχου: Ο PID με προσθήκη Feedforward αποτελεί μια αποτελεσματική λύση, η οποία ισορροπεί μεταξύ απλότητας και ακρίβειας.

3. Δυναμική για εξέλιξη: Το σύστημα λειτουργεί ως γόνιμη βάση πάνω στην οποία μπορούν να χτιστούν πιο εξελιγμένοι ελεγκτές, αλλά και πιο ολοκληρωμένες ρομποτικές διατάξεις με τρεις βαθμούς ελευθερίας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πέρα από τα τεχνικά αποτελέσματα, η εργασία αυτή απέδειξε και κάτι βαθύτερο: ότι η σύνδεση βιομιμητικής μηχανικής, πραγματικών βιολογικών δεδομένων και ευέλικτων τεχνικών ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε μηχανισμούς που δεν μιμούνται απλώς την κίνηση, αλλά καταφέρνουν να την αποτυπώσουν με φυσικότητα και σταθερότητα. Αυτός ο συνδυασμός αποτελεί κλειδί για την εξέλιξη συστημάτων αποκατάστασης, εξωσκελετών και ανθρωποειδών ρομπότ.

Καταλήγοντας, η διπλωματική εργασία έθεσε τα θεμέλια για ένα λειτουργικό και ευέλικτο σύστημα προσομοίωσης βάδισης. Αν και υπάρχουν ακόμη όρια προς υπέρβαση —όπως η μείωση του σφάλματος σε ταχείες μεταβολές και η προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές συνθήκες— τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πορεία που ακολουθήθηκε είναι ορθή και υποσχόμενη. Με περαιτέρω βελτιώσεις, το έργο αυτό μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη ρομποτικών εφαρμογών που φέρνουν τον άνθρωπο και τη μηχανή πιο κοντά σε έναν κοινό ρυθμό κίνησης.

7. Βιβλιογραφία

[1] **Yang A., Chen Y., Naeem W., Fei M., Chen L.**
Humanoid motion planning of robotic arm based on human arm action feature and reinforcement learning. Mechatronics, Vol. 78, 2021, 102630.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957415821001082?via%3Dihub

[2] **Yang A., Chen Y., Naeem W., Fei M., Chen L.** Humanoid motion planning of robotic arm based on human arm action feature and reinforcement learning. Mechatronics, Vol. 78, Article 102630, Early online 24 July 2021, Published October 2021.
https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102630

[3] **Muscolo G.G., Ceccarelli M.**
Editorial: Mechanics of Legged Robots: From Bio-Inspiration to Novel Legged Machines. Frontiers in Mechanical Engineering, Vol. 7, 2021, Article 667164.
https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2021.667164/full

[4] **Muscolo, G. G., & Ceccarelli, M. (2021).**
"Design and Performance Analysis of Lower Limb Robots for Gait Rehabilitation." Applied Sciences, 11(3), 1124.

[5] **van der Zee T.J., Mundinger E.M., Kuo A.D.**
A biomechanics dataset of healthy human walking at various speeds, step lengths and step widths. Scientific Data, Vol. 9, 2022, Article 704
https://www.nature.com/articles/s41597-022-01817-1

[6] **Scherpereel, K., Molinaro, D., Inan, O., Shepherd, M., & Young, A. (2023)**. A human lower-limb biomechanics and wearable sensors dataset during cyclic and non-cyclic activities. Scientific Data, 10, Article 924.
https://doi.org/10.1038/s41597-023-02840-6

[7] **Miguel Ángel Caminero, Jesús Miguel Chacón , Eustaquio García-Plaza , Pedro José Núñez , José María Reverte , Jean Paul Becar**
Additive Manufacturing of PLA-Based Composites Using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture
https://www.mdpi.com/2073-4360/11/5/799

[8] **da Silva, F. P. T., et al. (2021).** "Influence of printing parameters on the mechanical properties of PLA," Journal of Materials Research and Technology, 15, pp. 1545-1555.

[9] **Mogan, A., et al. (2020).** "Mechanical Properties of FDM-Printed PLA Parts: The Effect of Infill and Shell Parameters," Materials Today: Proceedings, 27, pp. 2801-2806.

[10] **ASM International (2002)**. "ASM Material Data Sheet: Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed," ASM Aerospace Specification Metals Inc.

[11] **MatWeb (2023)**. "AISI 1045 Medium-Carbon Steel, Hot Rolled," MatWeb Material Property Data. [Online]. Διαθέσιμο:

http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1b3061320b94156a5554157d6023d24.

[12] Mitsuboshi Timing Belts Catalog https://www.mitsuboshi.com/dcms_media/other/V832-E_timingbelt.pdf

[13] **Polygerinos, P., et al. (2015**). "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation." Robotics and Autonomous Systems, 73, 135–143.

[14] **Zhu, M., et al. (2019).** "Fluidic fabric muscle sheets for wearable and soft robotics." Science Advances, 5(10), eaaw2844.

[15] **Liu, J., & Realmuto, J. (2024).** "Hyper-Bending Fabric Actuators for Sit-to-Stand Assistance." IEEE Robotics and Automation Letters, 9(1), 222–229.

[16] **Mahony, R., Hamel, T., & Pflimlin, J.-M. (2008).** Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. IEEE Transactions on Automatic Control, 53(5), 1203–1218. https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738

[17] **M. Hutter et al.,** "StarlETH: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion," Autonomous Systems Lab, ETH Zurich, 2013.

[18] **Bjelonic M., Bellicoso C.D., Wagner D., Wellhausen L., Günther F., Hutter M., (2019)**, ANYmal-D: Design and Performance of a Dynamic Quadrupedal Robot. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 7447–7453. https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/365379

[19] **X. Sun et al**., "Tensegrity-inspired design for adaptive robotic legs," arXiv preprint, arXiv:2504.19685, 2025 https://arxiv.org/abs/2504.19685

[20] **L. Araki et al**., "StaccaToe: Toe-off motion and trajectory generation in springy monopedal robots," arXiv preprint, arXiv:2404.05039, 2024 https://arxiv.org/abs/2404.05039

[21] **T. J. Mundinger, A. D. Kuo**, "Energetics of walking across a range of speeds and step frequencies," Journal of Experimental Biology, vol. 224, 2021. https://doi.org/10.1242/jeb.239699

[22] **M. Dorschky, M. Nitschke, B. Schroll, et al**., "CNN-based estimation of sagittal plane biomechanics from IMUs," Sensors, vol. 21, no. 14, 2021. https://doi.org/10.3390/s21144680

[23] **Mao, Y., et al. (2023)**. Electrohydraulic musculoskeletal robotic leg for agile, adaptive, yet energy-efficient locomotion. Nature Communications, 14, 382. https://doi.org/10.1038/s41467-022-35767-8

[24] **Prilutsky, B. I., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2009).** Combined feedforward and feedback control of a redundant, nonlinear, dynamic musculoskeletal system. Medical & Biological Engineering & Computing, 47(5), 541–551. https://doi.org/10.1007/s11517-009-0479-3

[25] **Zhang, J., Fiers, P., Witte, K. A., Jackson, R. W., Poggensee, K. L., Atkeson, C. G., & Collins, S. H. (2017).** "Human-in-the-loop optimization of exoskeleton assistance during walking." Science, 356(6344), 1280-1284. https://www.science.org/doi/10.1126/science.aal5054

Ηράκλειο © 2025

[26] **S. Rezazadeh, A. Abate, R. L. Hatton, J. W. Hurst,** "Robot Leg Design: A Constructive Framework," IEEE Access, vol. 6, pp. 14912–14921, 2018. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870291

[27] **Borelli: De Motu Animalium. A first treatise on biomechanics** https://archive.org/details/McGillLibrary-osl_motu-animalium_B731m1680_81_v1-20170/page/212/mode/2up

[28] **Héloïse Baillet. (2018).** Approche dynamique de l'utilisation d'un cheval mécanique au service de la rééducation posturale de patients cérébrolésés. (Έχει υποστεί επεξεργασία η εικόνα για μετάφραση στα ελληνικά) https://www.researchgate.net/publication/330439871_Approche_dynamique_de_l'utilisation_d'un_cheval_mecanique_au_service_de_la_reeducation_posturale_de_patients_cerebroleses

[29] **Y. Zhong, R. Wang, H. Feng, Y. Chen,** "Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review," International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 16, 2019. https://doi.org/10.1177/1729881419844148

[30] **L. Liow, J. Brett, J. Pinskier, L. Hanson, L. Tidswell, N. Kottege, D. Howard,** "A Compliant Robotic Leg Based on Fibre Jamming," IEEE Transactions on Robotics, vol. 40, no. 1, pp. 1–20, 2024. https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3443714

[31] **M. E. Rosheim,** Leonardo's Lost Robots, Springer, 2006.

[32] **Åström, K.J., & Hägglund, T.** , *Advanced PID Control*. ISA. , 2006

[33] **Franklin, G.F., Powell, J.D., & Emami-Naeini, A.** ,*Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson, 2015.

[34] **Lee, H., et al.**, "Trajectory tracking control of a robotic knee joint using PID with feedforward compensation." *IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2017.

[35] **Zhang, J., et al.** ,"Feedforward-enhanced PID control for exoskeleton-assisted gait training." *Robotics and Autonomous Systems*, 128, 2020.

[36] **Park, S., & Seo, K.** ,"Gait trajectory feedforward control in lower-limb exoskeletons." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(12), 2018.

[37] **S. K. Mishra, G. Wrat, P. Ranjan, and J. Das,** "PID controller with feed forward estimation used for fault tolerant control of hydraulic system," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 32, no. 8, pp. 3849–3855, Aug. 2018. https://www.researchgate.net/publication/335881337_PID_controller_with_feed_forward_estimation_used_for_fault_tolerant_control_of_hydraulic_system

[38] **Åström, K. J., & Hägglund, T.,** PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, Instrument Society of America, 1995. https://aiecp.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf

[39] **Li, Y., Ang, K. H., & Chong, G. C. Y**., "PID control system analysis and design: Problems, remedies, and future directions," IEEE Control Systems Magazine, 26(1), 32–41, 2006. https://ieeexplore.ieee.org/document/1580152

Ηράκλειο © 2025

8. Ιστότοποι

-1- https://www.sagemotion.com/blog/how-does-an-imu-work
-2- https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/34361-soft-robotics-perception-inspired-by-humans
-3- https://en.wikipedia.org/wiki/Biomechanics#/media/File:Giovanni_Borelli_-_lim_joints_(De_Motu_Animalium).jpg
-4- https://www.omc-stepperonline.com/double-output-shaft-for-nmrv40-worm-gear-speed-reducer-rv40-ab
-5- https://www.mitsuboshi.com/products_search_en/timing-belt2/item_6
-6- https://multiplesclerosisnewstoday.com/news-posts/2016/05/17/clinical-trials-robotic-legs-helping-patients-walk/
-7-

9. Παραπομπές

Service correction factor (Ko) **Table 2 -16**

Driven machine	Driving unit / Motor					
	Rated max. output of 300% or less AC motor (standard motor, synchronized motor) DC motor (Shunt) 2 or higher cylinder engine			Rated max. output of more than 300% Special motor (High torque) DC motor (Series coil) 1-cylinder engine Operation by line shaft or clutch		
	Running time (hr/day)			Running time (hr/day)		
	3~5	8~12	16~24	3~5	8~12	16~24
● Display equipment ● Medical equipment	1.0	1.2	1.4	1.2	1.4	1.6
● Carpenter's lathe ● Band saw	1.2	1.4	1.6	1.4	1.6	1.8
● Packaging machine ● Light load belt conveyor ● Screen	1.3	1.5	1.7	1.5	1.7	1.9
● Liquid stirring machine ● Drilling machine ● Lathe ● Threading machine ● Circular saw ● Planer	1.4	1.6	1.8	1.6	1.8	2.0
● Grinder ● Mixer (Cement/Viscous medium) ● Boring machine ● Milling machine ● Centrifugal compressor ● Vibrating screen ● Rotary compressor ● Injection molding machine ● Shaping machine ● Belt conveyor (ore, coal or sand)	1.5	1.7	1.9	1.7	1.9	2.1
● Extraction pump ● Hoist ● Elevator ● Washer ● Rubber processing machine (Calender, roll, extrusion machine) ● Fan ● Blower ● Conveyor (Apron, pan, bucket elevator) ● Textile machine	1.6	1.8	2.0	1.8	**2.0**	2.2
● Centrifugal separator ● Conveyor (Flight or screw) ● Hammer mill ● Papermaking machine (Pulper and beater)	1.7	1.9	2.1	1.9	2.1	2.3
● Kiln machinery (Brick or kneading machine) ● Mine propeller ● Air circulator	1.8	2.0	2.2	2.0	2.2	2.4

Παραπομπή 1. Συντελεστής Διόρθωσης Service (Ko)

2.Kr

Speed ratio correction factor (Kr) **Table 2 -17**

Speed ratio	Correction factor Kr
1.00~1.24	0
1.25~1.74	0.1
1.75~2.49	0.2
2.50~3.49	0.3
3.50 and higher	0.4

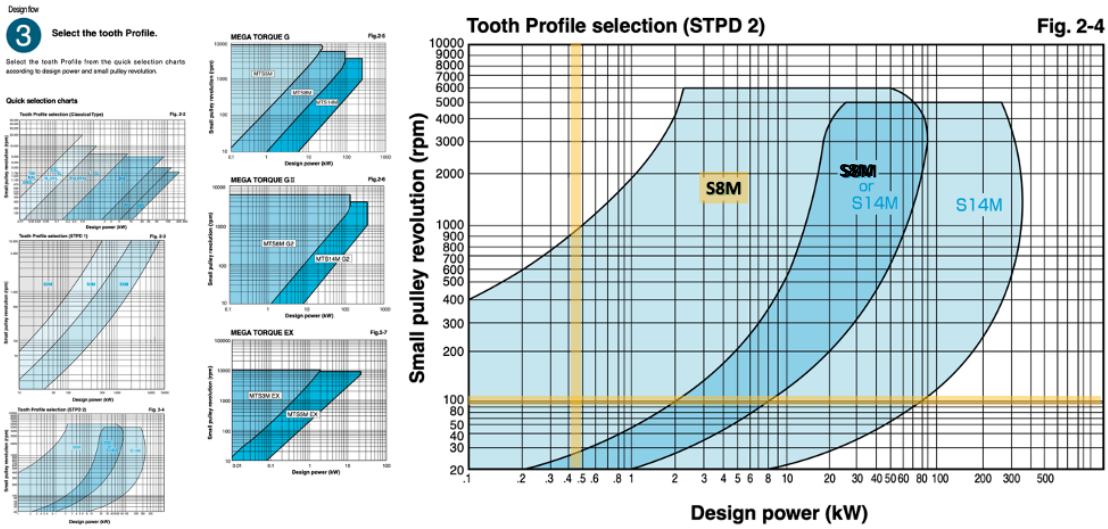
3.Ki

Idler correction factor (Ki) **Table 2 -18**

Idler position	Correction factor(Ki)
When used on belt inner side on slack side of belt	0
When used on belt outer side on slack side of belt	0.1
When used on belt inner side on tight side of belt	0.1
When used on belt outer side on tight side of belt	0.2

*** The idler correction factor is Ki × n when using n number of idler pulleys.**

Παραπομπή 2. Παράγοντες Λόγου Μείωσης και Τεντωτήρα (Kr , Ki)



Παραπομπή 3. Επιλογή Τύπου Οδόντωσης Ιμάντα

Allowable minimum number of teeth — Table 2 -19

Revolution (rpm)	S2M	S3M DS3M	S5M DS5M	S8M DS8M	S14M DS14M	T80 MXL DMXL	XL DXL	L DL	H DH	XH	XXH	T5 DT5	T10 DT10
Over 3,500	20	20	–	30	–	–	16	20	24	–	–	20	22
3,500	18	18	24	28	48	16	12	16	20	30	–	16	20
1,750	16	16	20	26	40	14	11	14	18	26	26	14	18
1,160	14	14	16	24	38	12	10	12	16	24	24	12	16
870	14	14	14	**22**	34	–	10	12	14	22	22	12	14
690	–	–	–	–	–	–	10	12	14	20	20	12	14
575	–	–	–	–	–	–	10	12	14	18	18	12	14

Παραπομπή 4. Επιτρεπόμενος Αριθμός Οδοντώσεων ανά Τύπο Ιμάντα

Standard belt width (Wp) — Table 2 -21

Type	Wp
S2M	4.0mm
S3M,DS3M,MTS3M	6.0mm
S5M,DS5M,MTS5M	10.0mm
S8M,DS8M,MTS8M	60.0mm
S14M,DS14M,MTS14M	120.0mm

Type	Wp
MXL,DMXL	6.4mm
XL,DXL	25.4mm(1 inch)
L,DL	25.4mm(1 inch)
H,DH	25.4mm(1 inch)
XH,DXH	25.4mm(1 inch)
XXH	25.4mm(1 inch)
T5,DT5	10.0mm
T10,DT10	10.0mm
T80	6.4mm

Παραπομπή 5. Καθορισμένα Πλάτη Ιμάντα

Teeth in mesh correction factor (Km) — Table 2 -20

Number of teeth in mesh	6 or more	5	4	3	2
Factor Km	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2

Παραπομπή 6. Συντελεστής Διόρθωσης Οδοντώσεων σε Επαφή με την Τροχαλία

Ηράκλειο © 2025

SUPER TORQUE S8M Basic power rating

(For 60 mm belt width)

Table 2-53a

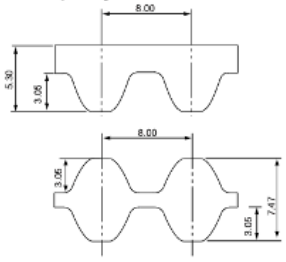
kW S8M 60mm

Number of teeth (T) / Pitch diameter (mm) / Revolution(rpm)	20	21	22	24	26	28	30	32	36	40	44	48	50	60	72	84
	50.93	53.48	56.02	61.12	66.21	71.30	76.39	81.49	91.67	101.86	112.05	122.23	127.32	152.79	183.35	213.90
870	6.38	6.70	7.02	7.66	8.29	8.93	9.56	10.20	11.47	12.73	14.00	15.25	15.88	19.01	22.73	26.41
1160	8.51	8.93	9.35	10.20	11.05	11.89	12.73	13.58	15.25	16.93	18.60	20.26	21.08	25.19	30.03	34.77
1750	12.81	13.44	14.07	15.34	16.61	17.86	19.12	20.37	22.86	25.33	27.78	30.20	31.40	37.29	44.09	50.52
3500	25.33	26.56	27.78	30.20	32.59	34.96	37.29	39.60	44.09	48.42	52.57	56.52	58.42	67.02	75.09	80.26
50	0.37	0.39	0.40	0.44	0.48	0.51	0.55	0.59	0.66	0.73	0.81	0.88	0.92	1.10	1.32	1.54
100	0.73	0.77	**0,81**	0.88	0.95	1.03	1.10	1.18	1.32	1.47	1.62	1.76	1.84	2.20	2.64	3.08
200	1.47	1.54	1.62	1.76	1.91	2.06	2.20	2.35	2.64	2.94	3.23	3.52	3.67	4.40	5.28	6.16
300	2.20	2.31	2.42	2.64	2.86	3.08	3.30	3.52	3.96	4.40	4.84	5.28	5.50	6.60	7.92	9.24
400	2.94	3.08	3.23	3.52	3.82	4.11	4.40	4.70	5.28	5.87	6.46	7.04	7.34	8.80	10.55	12.30
500	3.67	3.85	4.04	4.40	4.77	5.14	5.50	5.87	6.60	7.34	8.07	8.80	9.16	10.99	13.17	15.34

Παραπομπή 7. Βασική Εκτίμηση Ισχύος

SUPER TORQUE (D)S8M

G Type (Rubber) only



● Product Code

250 (D)S8M 2000 G

- 250: Nominal width (mm)×10
- (D)S8M: Tooth Profile (DS8M for Double timing belt)
- 2000: Nominal length(mm)
- G: G Type (rubber)

Belt width lineup Table 1-42

Nominal width	Width (mm)
150	15
250	25
300	30
400	40
600	60

Belt weight per unit (kg/10mm x 1m) Table 1-43

Material	Tooth Profile	Belt weight
rubber	S8M	0.052
	DS8M	0.060

Standard belt size table Table 1-44

Nominal length	Number of teeth	Pitch length(mm)	Manufacturable Size (G Type)
S8M 376	47	376	S
S8M 400	50	400	S
S8M 408	51	408	S
S8M 440	55	440	S
S8M 480	60	480	S · D
S8M 496	62	496	S · D
S8M 512	64	512	S · D
S8M 520	65	520	S · D
S8M 528	66	528	S · D
S8M 560	70	560	S · D
S8M 584	73	584	S · D
S8M 600	75	600	S · D
S8M 632	79	632	S · D
S8M 640	80	640	S · D
S8M 656	82	656	S · D
S8M 680	85	680	S · D
S8M 712	89	712	S · D
S8M 720	90	720	S · D
S8M 760	95	760	S · D
S8M 800	100	800	S · D
S8M 824	103	824	S · D
S8M 840	105	840	S · D
S8M 848	106	848	S · D
S8M 856	107	856	S · D

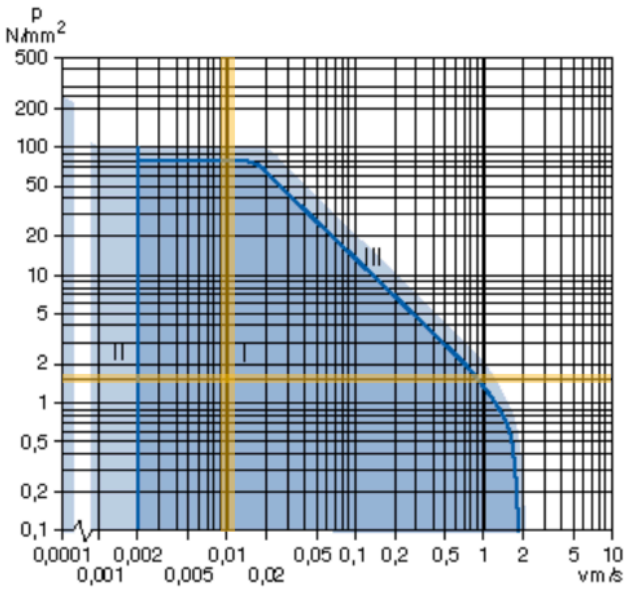
Nominal length	Number of teeth	Pitch length(mm)	Manufacturable Size (G Type)
S8M 1312	164	1312	S · D
S8M 1320	165	1320	S · D
S8M 1352	169	1352	S · D
S8M 1360	170	1360	S · D
S8M 1384	173	1384	S · D
S8M 1400	175	1400	S · D
S8M 1424	178	1424	S · D
S8M 1440	180	1440	S · D
S8M 1480	185	1480	S · D
S8M 1488	186	1488	S · D
S8M 1520	190	1520	S · D
S8M 1600	200	1600	S · D
S8M 1640	205	1640	S · D
S8M 1648	206	1648	S · D
S8M 1680	210	1680	S · D
S8M 1696	212	1696	S · D
S8M 1728	216	1728	S · D
S8M 1760	220	1760	S · D
S8M 1776	222	1776	S · D
S8M 1792	224	1792	S · D
S8M 1800	225	1800	S · D
S8M 1816	227	1816	S · D
S8M 1832	229	1832	S · D
S8M 1912	239	1912	S · D

Παραπομπή 8. Κατάλογος Ιμάντα Κατασκευαστή

Width correction factor Kb (1) Table 2 -23a

Nominal width	Width(mm)	S2M	S3M(DS3M) MTS3M	S5M(DS5M) MTS5M	S8M(DS8M) MTS8M	S14M(DS14M) MTS14M
40	4.0	1.00				
60	6.0	1.59	1.00			
100	10.0	2.84	1.79	1.00		
150	15.0		2.84	1.59	0.21	
200	20.0				0.29	
250	25.0			2.84	0.37	
300	30.0				0.45	0.21
400	40.0				**0.63**	0.29
500	50.0				0.81	0.37
600	60.0				1.00	0.45
700	70.0				1.19	
800	80.0				1.39	0.63
1000	100.0				1.79	0.81
1200	120.0					1.00
1400	140.0					1.19

Παραπομπή 9. Συντελεστής Διόρθωσης Πλάτους του Ιμάντα



Παραπομπή10.Επιλογή PV κουζινέτου τύπου PTFE

Παραπομπή 11. Κώδικας Μικροελεγκτή

```
// === LIBRARIES ===
#include <Wire.h>
#include <MPU9250.h>
#include <algorithm>

// === IMU SETUP ===
MPU9250 mpu;
float angleEstimate = 0;
float zeroAngle = 0;
bool calibrated = false;
unsigned long lastTime = 0;
```

```
// === STEPPER SETUP ===
#define PUL 27
#define DIR 26
const float stepsPerRev = 3200.0;
const float gearRatio = 5.0;
const float stepsPerOutputRev = stepsPerRev * gearRatio;
const float degreesPerStep = 360.0 / stepsPerOutputRev;

// === ANGLE TRACKING ===
float targetAngle = 0;

// === PID SETUP ===
float Kp = 10.0;
float Ki = 0.14;
float Kd = 0.06;
float pidIntegral = 0;
float lastError = 0;
float feedforwardVelocity = 0;
float Kv = 1.0;

// === TASK HANDLES ===
TaskHandle_t imuTaskHandle;
TaskHandle_t motorTaskHandle;

// === SETUP ===
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(PUL, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);

  Wire.begin();
  Wire.setClock(100000);  // Set I2C frequency to 100kHz
  if (!mpu.setup(0x68)) {
    Serial.println("MPU9250 connection failed!");
    while (1)
      ;
  }

  Serial.println("Hold still for calibration...");

  xTaskCreatePinnedToCore(imuTask, "IMU Task", 4096, NULL, 1, &imuTaskHandle,
0);
  xTaskCreatePinnedToCore(motorTask, "Motor Task", 4096, NULL, 1,
&motorTaskHandle, 1);
```

```
}

void loop() {
 if (Serial.available()) {
  String input = Serial.readStringUntil('\n');
  input.trim();

  if (input.startsWith("Kp:")) {
   Kp = input.substring(3).toFloat();
   Serial.print("✅ New Kp: ");
   Serial.println(Kp);
  } else if (input.startsWith("Ki:")) {
   Ki = input.substring(3).toFloat();
   Serial.print("✅ New Ki: ");
   Serial.println(Ki);
  } else if (input.startsWith("Kd:")) {
   Kd = input.substring(3).toFloat();
   Serial.print("✅ New Kd: ");
   Serial.println(Kd);
  } else if (input.startsWith("Kv:")) {
   Kv = input.substring(3).toFloat();
   Serial.print("✅ New Kv: ");
   Serial.println(Kv);
  } else if (input.startsWith("A:") && input.indexOf(",V:") > 0) {
   int vIndex = input.indexOf(",V:");
   float newAngle = input.substring(2, vIndex).toFloat();
   float newVelocity = input.substring(vIndex + 3).toFloat();
   if (newAngle < -135 || newAngle > 135) {
    Serial.println("❌ Target angle out of bounds.");
   } else {
    targetAngle = newAngle;
    feedforwardVelocity = newVelocity;
    Serial.print("📨 New target angle: ");
    Serial.println(targetAngle);
   }
  }
 }

 if (calibrated) {
  Serial.print("📐 Angle: ");
  Serial.println(angleEstimate);
 }

 delay(1);
}
```

```
// === IMU TASK ===
void imuTask(void *param) {
  while (1) {
    if (!mpu.update()) continue;

    float ay = mpu.getAccY();
    float az = mpu.getAccZ();
    float rawAngle = atan2(-az, ay) * 180.0 / PI;
    float manualTrim = -0.8;

    if (!calibrated) {
      static int count = 0;
      static float sum = 0;
      static float sumSq = 0;

      float sample = rawAngle;
      sum += sample;
      sumSq += sample * sample;
      count++;

      if (count >= 300) {
        float mean = sum / count;
        float variance = (sumSq / count) - (mean * mean);
        float stddev = sqrt(variance);
        if (stddev < 0.3) {
          zeroAngle = mean + manualTrim;
          calibrated = true;
          Serial.println("✅ Calibration complete!");
        } else {
          Serial.println("⚠️ Hold still...");
          count = 0;
          sum = 0;
          sumSq = 0;
        }
      }
      delay(10);
      continue;
    }

    float accelAngle = rawAngle - zeroAngle;
    if (accelAngle > 180) accelAngle -= 360;
    if (accelAngle < -180) accelAngle += 360;

    float gyroRate = mpu.getGyroX();
    unsigned long now = micros();
```

```
    float dt = (now - lastTime) / 1000000.0;
    lastTime = now;

    angleEstimate += gyroRate * dt;
    angleEstimate = 0.96 * angleEstimate + 0.04 * accelAngle;
  }
}

// === Safe Error Calculation ===
float computeSafeError(float current, float target) {
  float error = target - current;

  while (error > 180) error -= 360;
  while (error < -180) error += 360;

  if ((current > 90 && target < -90) || (current < -90 && target > 90)) {
    if (error > 0)
      error -= 360;
    else
      error += 360;
  }

  return error;
}

// === MOTOR TASK ===
void motorTask(void *param) {
  const unsigned int minPulseDelay = 10;
  const float maxStepRate = 1000000.0 / (minPulseDelay * 2);
  const float deadband = 0.5;
  const float maxAngleError = 134.0;

  while (1) {
    if (!calibrated) {
      delay(50);
      continue;
    }

    float error = computeSafeError(angleEstimate, targetAngle);
    float projected = angleEstimate + error;
    if (projected > 135) error = 135 - angleEstimate;
    if (projected < -135) error = -135 - angleEstimate;

    if (abs(error) < deadband) {
      angleEstimate = angleEstimate * 0.9 + targetAngle * 0.1;
      delay(10);
```

```
    continue;
   }

   float dt = 0.02;
   pidIntegral += error * dt;
   pidIntegral = constrain(pidIntegral, -100, 100);

   float derivative = (error - lastError) / dt;
   lastError = error;

   float output = Kp * error + Ki * pidIntegral + Kd * derivative + Kv *
feedforwardVelocity;

   const float maxAllowedStepRate = 8000.0;
   float stepRate = constrain(abs(output) / degreesPerStep, 0,
min(maxAllowedStepRate, maxStepRate));

   if (stepRate < 1) {
    delay(10);
    continue;
   }

   unsigned long pulseDelay = max((unsigned long)(1000000.0 / (stepRate * 2)),
(unsigned long)minPulseDelay);

   digitalWrite(DIR, output > 0 ? HIGH : LOW);

   digitalWrite(PUL, HIGH);
   delayMicroseconds(pulseDelay);
   digitalWrite(PUL, LOW);
   delayMicroseconds(pulseDelay);
  }
}
```

Παραπομπή 12. Κώδικας Python Ανάγνωσης CSV και Εντολών στο Arduino IDE

```
import serial

import pandas as pd

import time

import matplotlib.pyplot as plt

from collections import deque

import matplotlib.animation as animation
```

```
from threading import Thread
from matplotlib.widgets import Slider


# === CONFIGURATION ===
CSV_PATH = "KneeAngle.csv"
SERIAL_PORT = "/dev/cu.usbserial-0001"
BAUD_RATE = 115200
SPEED_MULTIPLIER = 0.3

# === PLOT SETUP ===
plt.style.use('ggplot')
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(10, 8))
fig.suptitle('Real-time IMU Monitoring')
time_window = 10
max_points = 500

times = deque(maxlen=max_points)
imu_angles = deque(maxlen=max_points)
target_angles = deque(maxlen=max_points)

line_imu, = ax1.plot([], [], 'b-', label='IMU Angle')
line_target, = ax1.plot([], [], 'r--', label='Target Angle')
ax1.set_xlim(0, time_window)
ax1.set_ylim(-10, 70)
ax1.set_ylabel('Angle (degrees)')
ax1.legend(loc='upper right')
```

```
ax1.grid(True)

line_error, = ax2.plot([], [], 'g-', label='Error')
ax2.set_xlim(0, time_window)
ax2.set_ylim(-30, 30)
ax2.set_ylabel('Error (degrees)')
ax2.set_xlabel('Time (s)')
ax2.legend(loc='upper right')
ax2.grid(True)

# === SLIDERS ===
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.4)
slider_axcolor = 'lightgoldenrodyellow'
ax_kp = plt.axes([0.1, 0.3, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)
ax_ki = plt.axes([0.1, 0.25, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)
ax_kd = plt.axes([0.1, 0.2, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)
ax_kv = plt.axes([0.1, 0.15, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)

slider_kp = Slider(ax_kp, 'Kp', 0.0, 20.0, valinit=10, valstep=0.01)
slider_ki = Slider(ax_ki, 'Ki', 0.0, 5.0, valinit=0.14, valstep=0.01)
slider_kd = Slider(ax_kd, 'Kd', 0.0, 2.0, valinit=0.06, valstep=0.01)
slider_kv = Slider(ax_kv, 'Kv', 0.0, 5.0, valinit=1, valstep=0.01)

class SerialReader:
    def __init__(self):
        self.ser = None
        self.running = True
```

```
        self.current_imu_angle = 0
        self.current_target_angle = 0
        self.start_time = time.time()

    def connect(self):
        try:
            self.ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUD_RATE, timeout=1)
            time.sleep(2)
            print(f"✅ Connected to {SERIAL_PORT}")
            return True
        except Exception as e:
            print(f"❌ Failed to open serial port: {e}")
            return False

    def read_serial(self):
        while self.running:
            if self.ser and self.ser.in_waiting:
                try:
                    line = self.ser.readline().decode('utf-8').strip()
                    if line.startswith("📐 Angle: "):
                        self.current_imu_angle = float(line.replace("📐 Angle: ", ""))
                    elif line.startswith("📨 New target angle: "):
                        self.current_target_angle = float(line.replace("📨 New target angle: ",
"""))
                except:
                    pass
            time.sleep(0.001)
```

```
    def stop(self):
        self.running = False
        if self.ser and self.ser.is_open:
            self.ser.close()

    def send_pid(self, Kp=None, Ki=None, Kd=None, Kv=None):
        if not self.ser:
            return
        if Kp is not None:
            self.ser.write(f"Kp:{Kp:.3f}\n".encode())
        if Ki is not None:
            self.ser.write(f"Ki:{Ki:.3f}\n".encode())
        if Kd is not None:
            self.ser.write(f"Kd:{Kd:.3f}\n".encode())
        if Kv is not None:
            self.ser.write(f"Kv:{Kv:.3f}\n".encode())

def send_csv_angles():
    try:
        df = pd.read_csv(CSV_PATH, header=None, names=["time", "angle"], sep=';',
decimal=',')
        df["time"] -= df["time"].iloc[0]
        df["time"] = df["time"] / SPEED_MULTIPLIER
        df["velocity"] = df["angle"].diff() / df["time"].diff()
        df["velocity"].fillna(0, inplace=True)
        print(f"CSV loaded successfully. Speed multiplier: {SPEED_MULTIPLIER}x")
    except Exception as e:
        print(f"❌ Error loading CSV: {e}")
```

```
        return

    try:
        while True:
            start_time = time.time()
            print("\n--- Starting new cycle ---")
            for _, row in df.iterrows():
                target_time = row["time"]
                angle = row["angle"] * -1# ΕΔΩ ΕΙΝΑΙ ΠΟΥ ΑΛΛΑΖΕΙΣ ΦΟΡΑ CSV
                velocity = row["velocity"] * -1 # ΕΔΩ ΕΙΝΑΙ ΠΟΥ ΑΛΛΑΖΕΙΣ ΦΟΡΑ CSV

                while (time.time() - start_time) < target_time:
                    time.sleep(0.0001)

                if serial_reader.ser:
                    serial_reader.ser.write(f"A:{angle:.2f},V:{velocity:.2f}\n".encode())
            print("✅ Cycle complete. Restarting...")
    except KeyboardInterrupt:
        print("\n✋ CSV transmission interrupted by user.")
    except Exception as e:
        print(f"An unexpected error occurred: {e}")

def update_plot(frame):
    current_time = time.time() - serial_reader.start_time
    times.append(current_time)
    imu_angles.append(serial_reader.current_imu_angle)
    target_angles.append(serial_reader.current_target_angle)
```

```
    line_imu.set_data(times, imu_angles)
    line_target.set_data(times, target_angles)
    errors = [t - i for t, i in zip(target_angles, imu_angles)]
    line_error.set_data(times, errors)
    if current_time > time_window:
        ax1.set_xlim(current_time - time_window, current_time)
        ax2.set_xlim(current_time - time_window, current_time)
    return line_imu, line_target, line_error


def update_pid(val):
    serial_reader.send_pid(Kp=slider_kp.val, Ki=slider_ki.val, Kd=slider_kd.val,
Kv=slider_kv.val)


slider_kp.on_changed(update_pid)
slider_ki.on_changed(update_pid)
slider_kd.on_changed(update_pid)
slider_kv.on_changed(update_pid)


if __name__ == "__main__":
    serial_reader = SerialReader()
    if not serial_reader.connect():
        exit()


    serial_thread = Thread(target=serial_reader.read_serial)
    serial_thread.daemon = True
    serial_thread.start()


    csv_thread = Thread(target=send_csv_angles)
```

```
    csv_thread.daemon = True
    csv_thread.start()


    ani = animation.FuncAnimation(fig, update_plot, interval=50, blit=True)


    try:
        plt.show()
    except KeyboardInterrupt:
        print("\n✋ Plot closed by user.")
    finally:
        serial_reader.stop()
        csv_thread.join()
        serial_thread.join()
        print("✅ Cleanup complete. Exiting.")
```

Παραπομπή 13. Κώδικες Python για Επίτευξη Ημιτονοειδούς και Τριγωνοειδούς Μονοπατιού

Ημιτονοειδές

```
import serial
import pandas as pd
import time
import matplotlib.pyplot as plt
from collections import deque
import matplotlib.animation as animation
from threading import Thread
from matplotlib.widgets import Slider
import numpy as np

# === CONFIGURATION ===
CSV_PATH = "AnkleAngle.csv"
SERIAL_PORT = "/dev/cu.usbserial-0001"
BAUD_RATE = 115200
SPEED_MULTIPLIER = 1

# === PLOT SETUP ===
```

```
plt.style.use('ggplot')
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(10, 8))
fig.suptitle('Real-time IMU Monitoring')
time_window = 10
max_points = 500

times = deque(maxlen=max_points)
imu_angles = deque(maxlen=max_points)
target_angles = deque(maxlen=max_points)

line_imu, = ax1.plot([], [], 'b-', label='IMU Angle')
line_target, = ax1.plot([], [], 'r--', label='Target Angle')
ax1.set_xlim(0, time_window)
ax1.set_ylim(-60, 60)
ax1.set_ylabel('Angle (degrees)')
ax1.legend(loc='upper right')
ax1.grid(True)

line_error, = ax2.plot([], [], 'g-', label='Error')
ax2.set_xlim(0, time_window)
ax2.set_ylim(-30, 30)
ax2.set_ylabel('Error (degrees)')
ax2.set_xlabel('Time (s)')
ax2.legend(loc='upper right')
ax2.grid(True)

# === SLIDERS ===
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.4)
slider_axcolor = 'lightgoldenrodyellow'
ax_kp = plt.axes([0.1, 0.3, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)
ax_ki = plt.axes([0.1, 0.25, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)
ax_kd = plt.axes([0.1, 0.2, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)
ax_kv = plt.axes([0.1, 0.15, 0.8, 0.03], facecolor=slider_axcolor)

slider_kp = Slider(ax_kp, 'Kp', 0.0, 20.0, valinit=4.95, valstep=0.01)
slider_ki = Slider(ax_ki, 'Ki', 0.0, 5.0, valinit=0.24, valstep=0.01)
slider_kd = Slider(ax_kd, 'Kd', 0.0, 2.0, valinit=0.34, valstep=0.01)
slider_kv = Slider(ax_kv, 'Kv', 0.0, 5.0, valinit=1.2, valstep=0.01)

class SerialReader:
    def __init__(self):
        self.ser = None
        self.running = True
        self.current_imu_angle = 0
        self.current_target_angle = 0
        self.start_time = time.time()
```

```
    def connect(self):
        try:
            self.ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUD_RATE, timeout=1)
            time.sleep(2)
            print(f"✅ Connected to {SERIAL_PORT}")
            return True
        except Exception as e:
            print(f"❌ Failed to open serial port: {e}")
            return False

    def read_serial(self):
        while self.running:
            if self.ser and self.ser.in_waiting:
                try:
                    line = self.ser.readline().decode('utf-8').strip()
                    if line.startswith("📐 Angle: "):
                        self.current_imu_angle = float(line.replace("📐 Angle: ", ""))
                    elif line.startswith("📨 New target angle: "):
                        self.current_target_angle = float(line.replace("📨 New target angle: ",
"""))
                except:
                    pass
            time.sleep(0.001)

    def stop(self):
        self.running = False
        if self.ser and self.ser.is_open:
            self.ser.close()

    def send_pid(self, Kp=None, Ki=None, Kd=None, Kv=None):
        if not self.ser:
            return
        if Kp is not None:
            self.ser.write(f"Kp:{Kp:.3f}\n".encode())
        if Ki is not None:
            self.ser.write(f"Ki:{Ki:.3f}\n".encode())
        if Kd is not None:
            self.ser.write(f"Kd:{Kd:.3f}\n".encode())
        if Kv is not None:
            self.ser.write(f"Kv:{Kv:.3f}\n".encode())

def send_sine_wave():
    frequency = 0.5  # Hz (e.g., one full wave every 5 seconds)
    amplitude = 30.0  # degrees
```

```
    sample_rate = 300  # Hz (samples per second)
    dt = 1.0 / sample_rate
    t = 0.0

    print(f"🔁 Sending sine wave: {amplitude}° amplitude @ {frequency} Hz")

    try:
        while True:
            angle = -amplitude * np.sin(2 * np.pi * frequency * t)
            velocity = -2 * np.pi * frequency * amplitude * np.cos(2 * np.pi * frequency *
t)

            if serial_reader.ser:
                serial_reader.ser.write(f"A:{angle:.2f},V:{velocity:.2f}\n".encode())

            t += dt
            time.sleep(dt)
    except KeyboardInterrupt:
        print("\n✋ Sine wave transmission interrupted.")

def update_plot(frame):
    current_time = time.time() - serial_reader.start_time
    times.append(current_time)
    imu_angles.append(serial_reader.current_imu_angle)
    target_angles.append(serial_reader.current_target_angle)
    line_imu.set_data(times, imu_angles)
    line_target.set_data(times, target_angles)
    errors = [t - i for t, i in zip(target_angles, imu_angles)]
    line_error.set_data(times, errors)
    if current_time > time_window:
        ax1.set_xlim(current_time - time_window, current_time)
        ax2.set_xlim(current_time - time_window, current_time)
    return line_imu, line_target, line_error

def update_pid(val):
    serial_reader.send_pid(Kp=slider_kp.val, Ki=slider_ki.val, Kd=slider_kd.val,
Kv=slider_kv.val)

slider_kp.on_changed(update_pid)
slider_ki.on_changed(update_pid)
slider_kd.on_changed(update_pid)
slider_kv.on_changed(update_pid)

if __name__ == "__main__":
    serial_reader = SerialReader()
    if not serial_reader.connect():
```

```
        exit()

    serial_thread = Thread(target=serial_reader.read_serial)
    serial_thread.daemon = True
    serial_thread.start()

    csv_thread = Thread(target=send_sine_wave)
    csv_thread.daemon = True
    csv_thread.start()

    ani = animation.FuncAnimation(fig, update_plot, interval=50, blit=True)

    try:
        plt.show()
    except KeyboardInterrupt:
        print("\n🖐 Plot closed by user.")
    finally:
        serial_reader.stop()
        csv_thread.join()
        serial_thread.join()
        print("✅ Cleanup complete. Exiting.")
```

Τριγωνοειδές

```
// === LIBRARIES ===
#include <Wire.h>
#include <MPU9250.h>
#include <algorithm>

// === IMU SETUP ===
MPU9250 mpu;
float angleEstimate = 0;
float zeroAngle = 0;
bool calibrated = false;
unsigned long lastTime = 0;

// === STEPPER SETUP ===
#define PUL 27
#define DIR 26
const float stepsPerRev = 3200.0;
const float gearRatio = 5.0;
const float stepsPerOutputRev = stepsPerRev * gearRatio;
const float degreesPerStep = 360.0 / stepsPerOutputRev;

// === ANGLE TRACKING ===
```

```
float targetAngle = 0;

// === PID SETUP ===
float Kp = 10.0;
float Ki = 0.14;
float Kd = 0.06;
float pidIntegral = 0;
float lastError = 0;
float feedforwardVelocity = 0;
float Kv = 1.0;

// === TASK HANDLES ===
TaskHandle_t imuTaskHandle;
TaskHandle_t motorTaskHandle;

// === SETUP ===
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(PUL, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);

  Wire.begin();
  Wire.setClock(100000);  // Set I2C frequency to 100kHz
  if (!mpu.setup(0x68)) {
    Serial.println("MPU9250 connection failed!");
    while (1)
      ;
  }

  Serial.println("Hold still for calibration...");

  xTaskCreatePinnedToCore(imuTask, "IMU Task", 4096, NULL, 1, &imuTaskHandle,
0);
  xTaskCreatePinnedToCore(motorTask, "Motor Task", 4096, NULL, 1,
&motorTaskHandle, 1);
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    String input = Serial.readStringUntil('\n');
    input.trim();

    if (input.startsWith("Kp:")) {
      Kp = input.substring(3).toFloat();
      Serial.print("✅ New Kp: ");
```

```
      Serial.println(Kp);
    } else if (input.startsWith("Ki:")) {
      Ki = input.substring(3).toFloat();
      Serial.print("✅ New Ki: ");
      Serial.println(Ki);
    } else if (input.startsWith("Kd:")) {
      Kd = input.substring(3).toFloat();
      Serial.print("✅ New Kd: ");
      Serial.println(Kd);
    } else if (input.startsWith("Kv:")) {
      Kv = input.substring(3).toFloat();
      Serial.print("✅ New Kv: ");
      Serial.println(Kv);
    } else if (input.startsWith("A:") && input.indexOf(",V:") > 0) {
      int vIndex = input.indexOf(",V:");
      float newAngle = input.substring(2, vIndex).toFloat();
      float newVelocity = input.substring(vIndex + 3).toFloat();
      if (newAngle < -135 || newAngle > 135) {
        Serial.println("❌ Target angle out of bounds.");
      } else {
        targetAngle = newAngle;
        feedforwardVelocity = newVelocity;
        Serial.print("📨 New target angle: ");
        Serial.println(targetAngle);
      }
    }
  }

  if (calibrated) {
    Serial.print("📐 Angle: ");
    Serial.println(angleEstimate);
  }

  delay(1);
}

// === IMU TASK ===
void imuTask(void *param) {
  while (1) {
    if (!mpu.update()) continue;

    float ay = mpu.getAccY();
    float az = mpu.getAccZ();
    float rawAngle = atan2(-az, ay) * 180.0 / PI;
    float manualTrim = -0.8;
```

```
  if (!calibrated) {
    static int count = 0;
    static float sum = 0;
    static float sumSq = 0;

    float sample = rawAngle;
    sum += sample;
    sumSq += sample * sample;
    count++;

    if (count >= 300) {
      float mean = sum / count;
      float variance = (sumSq / count) - (mean * mean);
      float stddev = sqrt(variance);
      if (stddev < 0.3) {
        zeroAngle = mean + manualTrim;
        calibrated = true;
        Serial.println("✅ Calibration complete!");
      } else {
        Serial.println("⚠️ Hold still...");
        count = 0;
        sum = 0;
        sumSq = 0;
      }
    }
    delay(10);
    continue;
  }

  float accelAngle = rawAngle - zeroAngle;
  if (accelAngle > 180) accelAngle -= 360;
  if (accelAngle < -180) accelAngle += 360;

  float gyroRate = mpu.getGyroX();
  unsigned long now = micros();
  float dt = (now - lastTime) / 1000000.0;
  lastTime = now;

  angleEstimate += gyroRate * dt;
  angleEstimate = 0.96 * angleEstimate + 0.04 * accelAngle;
 }
}

// === Safe Error Calculation ===
float computeSafeError(float current, float target) {
```

```
  float error = target - current;

  while (error > 180) error -= 360;
  while (error < -180) error += 360;

  if ((current > 90 && target < -90) || (current < -90 && target > 90)) {
    if (error > 0)
      error -= 360;
    else
      error += 360;
  }

  return error;
}

// === MOTOR TASK ===
void motorTask(void *param) {
  const unsigned int minPulseDelay = 10;
  const float maxStepRate = 1000000.0 / (minPulseDelay * 2);
  const float deadband = 0.5;
  const float maxAngleError = 134.0;

  while (1) {
    if (!calibrated) {
      delay(50);
      continue;
    }

    float error = computeSafeError(angleEstimate, targetAngle);
    float projected = angleEstimate + error;
    if (projected > 135) error = 135 - angleEstimate;
    if (projected < -135) error = -135 - angleEstimate;

    if (abs(error) < deadband) {
      angleEstimate = angleEstimate * 0.9 + targetAngle * 0.1;
      delay(10);
      continue;
    }

    float dt = 0.02;
    pidIntegral += error * dt;
    pidIntegral = constrain(pidIntegral, -100, 100);

    float derivative = (error - lastError) / dt;
    lastError = error;
```

```
   float output = Kp * error + Ki * pidIntegral + Kd * derivative + Kv *
feedforwardVelocity;

   const float maxAllowedStepRate = 8000.0;
   float stepRate = constrain(abs(output) / degreesPerStep, 0,
min(maxAllowedStepRate, maxStepRate));

   if (stepRate < 1) {
     delay(10);
     continue;
   }

   unsigned long pulseDelay = max((unsigned long)(1000000.0 / (stepRate * 2)),
(unsigned long)minPulseDelay);

   digitalWrite(DIR, output > 0 ? HIGH : LOW);

   digitalWrite(PUL, HIGH);
   delayMicroseconds(pulseDelay);
   digitalWrite(PUL, LOW);
   delayMicroseconds(pulseDelay);
  }
}
```