



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη και Σχεδιασμός Ενδοτικού Ρομποτικού Βραχίονα Τριών  
Βαθμών Ελευθερίας Χαμηλού Κόστους για Βιομηχανικά  
Περιβάλλοντα**

Αλιγιάννης Φώτιος

*Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Μανωλάκος*

ΑΘΗΝΑ 2023



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και το σχεδιασμό ενός ενδοτικού ρομποτικού βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας χαμηλού κόστους, ο οποίος προορίζεται για λειτουργία σε βιομηχανικό περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα έχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης και συνεργασίας με ανθρώπους. Το εν λόγω σύστημα, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των ρομποτικών βραχιόνων που απαντώνται στη βιομηχανία, έχει τη δυνατότητα υποχώρησης και προσαρμογής σε απρόσμενες εξωτερικές διαταραχές (ενδοτικότητα), οι οποίες χαρακτηρίζουν τα ανθρωποκεντρικά περιβάλλοντα. Αυτή η προσέγγιση αποκλίνει από τη μέχρι πρόσφατα υιοθετούμενη στο πεδίο του ρομποτικού χειρισμού, καθώς τα ρομπότ αυτά κατά κανόνα λειτουργούσαν υπό απολύτως ελεγχόμενες συνθήκες και εκτελούσαν προκαθορισμένες ενέργειες. Η ειδοποιός διαφορά των δύο συστημάτων είναι πως οι ρομποτικοί βραχίονες μέχρι τώρα ενεργούσαν με βάση τον έλεγχο θέσης, ενώ στην εξεταζόμενη εφαρμογή απαιτείται έλεγχος δύναμης.

Ταυτόχρονα, με αφορμή την εκτενή προσπάθεια που γίνεται από την επιστημονική κοινότητα με σκοπό τα ρομποτικά συστήματα να γίνουν διαθέσιμα στο ευρύ κοινό, εξετάζεται η δυνατότητα σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος με χαμηλό κόστος, χωρίς όμως να υπολείπεται επιδόσεων.

Αρχικά, ύστερα από μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση, απαριθμούνται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις με βάση τις οποίες σχεδιάζεται ένας ενδοτικός ρομποτικός βραχίονας, με τις σημαντικότερες να είναι ενδοτικότητα, υψηλός λόγος ωφέλιμου φορτίου προς μάζα και χαμηλό κόστος. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των κυρίαρχων λύσεων που μπορούν να βρεθούν στο εμπόριο και στη βιβλιογραφία και αξιολογούνται με σκοπό να επιλεγθούν αυτές που ικανοποιούν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Αναλυτικότερα, εξετάζονται αρχικά τα συστήματα επενέργειας ως προς τις επιδόσεις τους σε θέματα πυκνότητας ροπής, μέτρησης δύναμης, κόστους και εύρους ζώνης ελέγχου δύναμης. Επιλέγεται η μέθοδος επενέργειας άμεσης μετάδοσης, με την οποία επιτυγχάνεται έλεγχος δύναμης μέσω ιδιοδεκτικότητας και κρίνεται πως πληροί σε μεγαλύτερο βαθμό όλα κριτήρια σε σχέση με τις εναλλακτικές. Στη συνέχεια μελετώνται οι διαφορετικές μηχανικές δομές του βραχίονα, με την πιο κατάλληλη να είναι η ανθρωπομορφική, λόγω των αυξημένου χώρου εργασίας αλλά και της μηχανικής αξιοπιστίας της. Εξετάζεται η τοποθέτηση των κινητήρων σε σχέση με τις αρθρώσεις και συγκρίνονται η σειριακή και η παράλληλη διάταξη. Κατά την σύγκριση αυτή, αναπτύσσεται στο επίπεδο το μοντέλο του βραχίονα (κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις (μέθοδος Euler-Lagrange)) για την κάθε περίπτωση, και επιλέγεται η παράλληλη διάταξη χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί ο βραχίονας σε κάποια ονομαστικά σενάρια λειτουργίας (στατική φόρτιση, ευθύγραμμη και κυκλική τροχιά τελικού στοιχείου δράσης). Καθώς η παράλληλη διάταξη συνεπάγεται πως ο κινητήρας του αγκώνα τοποθετείται ομοαξονικά με τον κινητήρα του ώμου, είναι επιτακτική η χρήση ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης για τη μεταφορά της ισχύος στην άρθρωση. Επιλέγεται ιμάντας χρονισμού καθώς ενδείκνυται για εφαρμογές ακριβείας και λόγω της εύκολης εγκατάστασής του.

Στη συνέχεια σχεδιάζεται ο βραχίονας με βάση τις παραπάνω αποφάσεις, χρησιμοποιώντας το λογισμικό SolidWorks. Επιλέγεται κινητήρας με στόχο τη μεγιστοποίηση της πυκνότητας ροπής ο οποίος συνοδεύεται από το κατάλληλο σύστημα οδήγησης. Για το βραχίονα χρησιμοποιούνται κυρίως υλικά υψηλής ειδικής αντοχής (λόγος

αντοχής προς βάρος), όπως αλουμίνιο 7075-t6 και ανθρακόνημα. Επιλέγονται οι τελικές διαστάσεις του βραχίονα μέσω παραμετρικής ανάλυσης σε μοντέλο που αναπτύχθηκε στο λογισμικό MATLAB της εταιρείας Mathworks βασισμένο στις δυναμικές εξισώσεις του βραχίονα (μέθοδος Euler-Lagrange), με σκοπό την ταυτόχρονη ικανοποίηση απαιτήσεων χώρου εργασίας και ωφέλιμου φορτίου. Τέλος, εξάγονται οι προδιαγραφές / επιδόσεις του βραχίονα σε θέματα ωφέλιμου φορτίου, λόγω ωφέλιμου φορτίου προς βάρος, χώρου εργασίας και γίνεται εκτίμηση του κόστους του. Βρίσκεται πως ο βραχίονας έχει συγκρίσιμες προδιαγραφές με αντίστοιχους του εμπορίου, ενώ το κόστος του είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο και μάλιστα παρόμοιο με άλλα συστήματα που αναπτύχθηκαν σε ερευνητικό πλαίσιο με τον ίδιο σκοπό.



## Abstract

This thesis concerns the design of a compliant three degree-of-freedom low-cost manipulator. The goal is for it to be able to operate in industrial environments, while also having the capability to interact and cooperate with humans. In contrast with the majority of robotic manipulators found in industry, this system is able to sense and adjust its behavior to unpredictable external disturbances (compliance), which greatly characterize anthropocentric environments. This approach deviates from the common path followed in the field of robotic manipulation, due to the fact that these robots mainly operated under well-defined conditions and executed pre-determined tasks. The main difference between the two systems is that up until now, robotic manipulators acted based on position control, while the application at hand demands the implementation of force control schemes.

At the same time, the possibility of achieving a low-cost design is being examined, thus contributing to the extensive effort made by the scientific community to make robots accessible to the general public.

The thesis begins with a brief literature review. Then, the design requirements for the development of such a system are defined, with the most important ones being compliance, high payload-to-weight ratio and low cost. Based on these requirements, the most prominent solutions found either in industrial or research context are examined. More specifically, firstly, the actuation system is studied in terms of force sensing capabilities, cost and bandwidth. The direct-drive actuation method is selected, which achieves force control through proprioception and it displays the greatest degree of fulfilment of the aforementioned criteria. Subsequently, the various alternatives concerning the mechanical structure are studied and the anthropomorphic configuration is chosen due to its increased structural reliability and workspace. Following that, the placement of the actuators relative to the joints is being addressed and, in that context, the serial and parallel configuration are compared. During this comparison, the two-dimensional models (kinematic and dynamic equations (Euler-Lagrange Method)) of each case are developed, and the parallel configuration is selected based on its payload capabilities in different nominal operation scenarios (static load, horizontal, vertical and circular movement of the end-effector). Since the parallel configuration dictates that the actuator of the elbow joint is placed coaxially with the actuator of the shoulder joint, a transmission system had to be implemented for the power to be transmitted between the motor and the joint. Timing belt is selected as the method of transmission, since it is suitable for precision applications and also for its relatively simple installation procedure.

The next step is to design the manipulator according to the previous design decisions. First of all, a BLDC motor and a suitable BLDC motor driver are chosen, based on torque density maximization (torque-to-weight ratio). For the manipulator's design, materials of high specific strength (strength-to-weight ratio) are used, mainly Aluminum alloy 7075-t6 and carbon fiber. The selection of the final values of the geometric parameters of the robot (link lengths) is accomplished through a parametric analysis, executed on the model of the manipulator developed in MATLAB, based on the kinematic and dynamic (Euler-Lagrange Method) equations. The goal of the analysis is to select the parameter values such that the workspace and payload requirements are simultaneously satisfied. Finally, the developed manipulator is evaluated in terms of payload, payload-to-weight ratio, acceleration and

velocity development capabilities. Also, its total cost is estimated. It is concluded that the system has comparable capabilities to the already existing robotic manipulators. As for the cost, it is lower by an order of magnitude and it is similar to that of other robots developed as part of research on the matter.

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα της εργασίας κ. Δημήτριο Μανωλάκο που μου έδωσε τη δυνατότητα να διεξάγω τη συγκεκριμένη έρευνα.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω του συμφοιτητές Φ. Νούση, Μ. Σωτηρίου, Σ. Παϊπέτη και Χ. Παπαγιάννη που ήταν πάντοτε πρόθυμοι να αφιερώσουν χρόνο με σκοπό να ξεπεραστούν τα αμέτρητα εμπόδια που εμφανίζονταν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την απύθμενη υπομονή και στήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	3
Abstract .....	5
Ευχαριστίες .....	7
Περιεχόμενα .....	8
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Κατάλογος Πινάκων .....	18
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>19</b>
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	19
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	20
1.2.1 Ρομποτικοί Χειριστές Εμπορίου.....	20
1.2.2 Ερευνητικοί Ρομποτικοί Χειριστές.....	21
1.3 Δομή Εργασίας.....	23
<b>2 Σχεδιαστικές Αρχές Ρομποτικών Βραχιόνων .....</b>	<b>25</b>
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Σχεδιαστικές Απαιτήσεις Ρομποτικού Βραχίονα .....	26
2.2.1 Ενδοτικότητα .....	26
2.2.2 Μεγιστοποίηση Λόγου Ωφέλιμου Φορτίου προς Βάρος .....	29
2.2.3 Χρήσιμο Χώρο Εργασίας.....	30
2.2.4 Ελαχιστοποίηση Κόστους.....	30
2.2.5 Μικρή Πολυπλοκότητα .....	30
2.3 Συστήματα Επενέργειας.....	30
2.4 Μηχανική Δομή Βραχίονα .....	36
2.5 Τοποθέτηση Επενεργητών .....	38
2.5.1 Στοιχεία Θεωρίας.....	40
2.5.2 Σχεδιασμός Τροχιάς .....	44
2.5.3 Χωρική Ανάλυση .....	50
2.5.4 Σύγκριση Σειριακής και Παράλληλης Διάταξης .....	53
2.6 Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης.....	58
<b>3 Σχεδιασμός Ρομποτικού Βραχίονα.....</b>	<b>62</b>
3.1 Εισαγωγή.....	62
3.2 Σύστημα Επενέργειας .....	62
3.2.1 Επιλογή Κινητήρα .....	62
3.2.2 Επιλογή Συστήματος Οδήγησης Κινητήρα.....	65
3.2.3 Αισθητήρας Γωνιακής Θέσης (encoder) .....	67

3.3	Σχεδιασμός Βραχίονα .....	67
3.3.1	Σταθερή Βάση .....	69
3.3.2	Περιστρεφόμενη Βάση.....	73
3.3.3	Πρώτος Σύνδεσμος .....	82
3.3.4	Δεύτερος Σύνδεσμος.....	89
3.4	Επιλογή Τελικών Διαστάσεων .....	91
3.4.1	Στοιχεία Θεωρίας.....	92
3.4.2	Προσδιορισμός Μηκών Συνδέσμων .....	92
3.5	Επιδόσεις Βραχίονα και Ανάλυση Κόστους .....	95
3.5.1	Επιδόσεις Βραχίονα .....	95
3.5.2	Ανάλυση Κόστους .....	101
3.5.3	Συμπεράσματα.....	102
3.6	Επιλογή Ιμάντα Χρονισμού.....	102
3.7	Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων.....	107
3.7.1	Σταθερή Βάση .....	110
3.7.2	Περιστρεφόμενη Βάση.....	112
3.7.3	Πρώτος Σύνδεσμος .....	115
3.7.4	Δεύτερος Σύνδεσμος.....	117
<b>4</b>	<b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....</b>	<b>119</b>
4.1	Συμπεράσματα .....	119
4.2	Μελλοντική Εργασία .....	120
<b>5</b>	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>121</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1.	Οι βραχίονες (αριστερά) UR5 της Universal Robotics και (δεξιά) KUKA LBR iiwa της εταιρείας KUKA. Πηγές εικόνων: [1] [2].....	20
Σχήμα 1-2.	Το σύστημα επενέργησης του ρομπότ KUKA LBR-iiwa. Παρατηρείται η χρήση αρμονικού μειωτήρα στροφών (harmonic drive gear unit) και αισθητήρα ροπής (torque sensor with digital interface). Πηγή εικόνας: [5]....	21
Σχήμα 1-3.	Ο ρομποτικός βραχίονας του Quigley. Πηγή εικόνας: [6]. .....	22
Σχήμα 1-4.	Το σύστημα επενέργησης για τις τέσσερις πρώτες αρθρώσεις του ρομποτικού βραχίονα του Quigley. Η έξοδος του βηματικού κινητήρα (stepper motor) συνδέεται με ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης ιμάντα χρονισμού (timing belt) – συρματόσχοινο (cable circuit) για τη μεταφορά της ισχύος. Μεταξύ αυτού και της άρθρωσης (έξοδος) παρεμβάλλεται ένα ελαστικό στοιχείο (series compliance), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ενδοτικότητα της άρθρωσης. Πηγή εικόνας: [6].....	22
Σχήμα 1-5.	Ο ρομποτικός βραχίονας BLUE. Πηγή εικόνας: [4]. .....	23
Σχήμα 1-6.	Ένα δομικό κελί (structural shell) του βραχίονα BLUE. Στους κινητήρες (motor) υπάρχει μείωση 1:7 με ιμάντα χρονισμού (timing belt), ενώ η ροπή τους μεταφέρεται στην έξοδο μέσω διαφορικού. Πηγή εικόνας: [4].....	23
Σχήμα 2-1.	Σχηματική αναπαράσταση ενός ρομποτικού χειριστή. Σημειώνονται τα βασικά του τμήματα: Η βάση, οι σύνδεσμοι, οι αρθρώσεις και το ΤΣΔ. Πηγή εικόνας: [7]. .....	25
Σχήμα 2-2.	Βραχίονας δύο ΒΕ ο οποίος ασκεί στο περιβάλλον δυνάμεις $f$ και ροπές $n$ . .	28
Σχήμα 2-3.	Σχηματική αναπαράσταση των συστημάτων ηλεκτρομηχανικής επενέργησης που έχουν τη δυνατότητα μέτρησης δύναμης. Φαίνονται (α) ο ΣΕΕ και (β) η παραλλαγή του με αισθητήρα ροπής αντί για στροφικό ελατήριο και οι (γ) ΕΨΑΜ και (δ) ΕΑΜ.....	31
Σχήμα 2-4.	Το σύστημα επενέργησης του ρομπότ KUKA LBR-iiwa. Παρατηρείται η χρήση αρμονικού μειωτήρα στροφών (harmonic drive gear unit) και αισθητήρα ροπής (torque sensor with digital interface). Πηγή εικόνας: [5]....	33
Σχήμα 2-5.	Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου επενεργητή. Με “m” συμβολίζονται τα μεγέθη που αντιστοιχούν στον κινητήρα, με “g” του συστήματος μετάδοσης κίνησης και με “L” του φορτίου.....	33
Σχήμα 2-6.	Η διαμόρφωση του εύρους ζώνης ελέγχου δύναμης συναρτήσκει της δυσκαμψίας του ελατηρίου, του λόγου μετάδοσης και της ροπής αδράνειας της εξόδου.....	34
Σχήμα 2-7.	Παράδειγμα επενεργητή (πάνω) άμεσης και (κάτω) ψευδοάμεσης μετάδοσης. Πηγές εικόνων: [14], [15]. .....	35
Σχήμα 2-8.	Παραδείγματα μηχανικών δομών ρομποτικών βραχιόνων τριών ΒΕ που προκύπτουν από διάφορους συνδυασμούς περιστροφικών και πρισματικών αρθρώσεων: (α) καρτεριανός, (β) κυλινδρικός, (γ) σφαιρικός και (δ) SCARA. Πηγή εικόνων: [7]. .....	37
Σχήμα 2-9.	Η μηχανική δομή γνωστή και ως ανθρωπομορφικός βραχίονας. Έχει σημειωθεί η αρίθμηση των αρθρώσεων και η σχετική ονοματολογία. Πηγή εικόνας: [7]. .....	37

Σχήμα 2-10.	Ο βραχίονας UR5e, με σειριακή διάταξη επενεργητών. Πηγή εικόνας: [1]. ...	38
Σχήμα 2-11.	Συστήματα με σειριακή διάταξη κινητήρων, με τον επενεργητή του αγκώνα (εδώ γονάτου (knee actuator)) τοποθετημένο κοντά στη βάση. Φαίνονται τα πόδια (αριστερά) του MIT Cheetah 3 και του Mini Cheetah του MIT. Πηγές εικόνων: [18] [15]. .....	39
Σχήμα 2-12.	Παράδειγμα ρομποτικού βραχίονα με παράλληλη διάταξη κινητήρων ώμου και αγκώνα. Πηγή εικόνας: [19]. .....	39
Σχήμα 2-13.	Το μοντέλο της (α) σειριακής και (β) παράλληλης διάταξης κινητήρων στο επίπεδο. Τον ορισμό των συμβόλων περιλαμβάνει ο Πίνακας 2-2. ....	40
Σχήμα 2-14.	Οι δύο δυνατές διαμορφώσεις του βραχίονα που προκύπτουν από την επίλυση της διαφορικής κινηματικής. Πηγή εικόνας: [7]. .....	42
Σχήμα 2-15.	(Αριστερά) Οι τροχιές των συντεταγμένων του ΤΣΔ και (δεξιά) η διαδρομή του ακολουθεί το ΤΣΔ, επιτυγχάνοντας ευθύγραμμη τροχιά με τρία τμήματα: επιτάχυνση, κίνηση με σταθερή ταχύτητα και επιβράδυνση. ....	46
Σχήμα 2-16.	Το προφίλ τις ταχύτητας των συντεταγμένων του ΤΣΔ για ευθύγραμμη τροχιά .....	46
Σχήμα 2-17.	(Αριστερά) Οι τροχιές των συντεταγμένων του ΤΣΔ και (δεξιά) η διαδρομή του ακολουθεί το ΤΣΔ, επιτυγχάνοντας ευθύγραμμη τροχιά με δύο τμήματα: επιτάχυνση και επιβράδυνση. ....	47
Σχήμα 2-18.	Το προφίλ τις ταχύτητας των συντεταγμένων του ΤΣΔ για ευθύγραμμη τροχιά με επιτάχυνση και επιβράδυνση. ....	47
Σχήμα 2-19.	Κυκλική τροχιά ΤΣΔ με παραβολικά τμήματα. ....	49
Σχήμα 2-20.	Ο μελετώμενος χώρος εργασίας του βραχίονα. ....	51
Σχήμα 2-21.	Παράδειγμα διακριτοποίησης του μελετώμενου χώρου εργασίας του βραχίονα (βήμα ακτίνας: 0.05, βήμα γωνίας: $\pi/32$ ). ....	51
Σχήμα 2-22.	Διάγραμμα ροπών κινητήρων που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της χωρικής ανάλυσης για στατική φόρτιση, με ωφέλιμο φορτίο 0.5 kg. ....	52
Σχήμα 2-23.	Αναπαράσταση της χωρικής ανάλυσης, για ευθύγραμμη οριζόντια κίνηση από αριστερά στα δεξιά για το σημείο (0.5,0). Αρχικά, (αριστερά) εκτελείται η τροχιά με αφετηρία το σημείο αυτό και πέρας το σύνορο του χώρου εργασίας, στη συνέχεια (κέντρο) υπολογίζεται η RMS (ή μέγιστη εάν είναι επιθυμητό) τιμή της ροπής του δεύτερου κινητήρα (παρουσιάζεται μόνο του δεύτερου για εξοικονόμηση χώρου, η διαδικασία για τον τρίτο είναι ακριβώς η ίδια) και (δεξιά) τέλος αυτή αποδίδεται στο σημείο (0.5,0) του διαγράμματος ροπών του χώρου εργασίας. ....	53
Σχήμα 2-24.	Τα διαγράμματα ροπών των κινητήρων για (πάνω σειρά) σειριακή και (κάτω σειρά) παράλληλη διάταξη, σε στατική φόρτιση με 0.5 kg. ....	55
Σχήμα 2-25.	Σύγκριση ροπών δεύτερου κινητήρα σειριακής και παράλληλης διάταξης (διαφορά απόλυτων ροπών) για όλα τα σημεία του χώρου εργασίας, σε στατική φόρτιση 0.5 kg. ....	56
Σχήμα 2-26.	Σύγκριση ροπών (μέγιστης απόλυτης και RMS) δεύτερου κινητήρα της σειριακής και παράλληλης διάταξης, για όλα τα σημεία του χώρου εργασίας για (α,β) οριζόντια και (γ,δ) κάθετη ευθύγραμμη τροχιά ΤΣΔ, από κάτω προς τα πάνω, με ωφέλιμο φορτίο 0.5 kg και γραμμική επιτάχυνση g. Στην περίπτωση της κατακόρυφης τροχιάς έχουν αφαιρεθεί οι τιμές των σημείων στην περιοχή κάτω από τη βάση του βραχίονα καθώς λόγω της διέλευσής του ΤΣΔ κοντά από ιδιομορφία οι τιμές της ροπής αυξάνονται δραματικά, χωρίς να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες στην ανάλυση. ...	57

Σχήμα 2-27.	Σύγκριση ροπών (μέγιστης απόλυτης και RMS) πρώτου κινητήρα της σειριακής και παράλληλης διάταξης, για όλα τα σημεία του χώρου εργασίας για κυκλική κίνηση ΤΣΔ, με ωφέλιμο φορτίο 0.5 kg και γραμμική επιτάχυνση g. ....	57
Σχήμα 2-28.	Ιμάντας χρονισμού με δύο τροχαλίες. Αριστερά βρίσκεται η κινητήρια τροχαλία (είσοδος) και δεξιά η κινούμενη (έξοδος). Πηγή εικόνας: [21]. ....	59
Σχήμα 2-29.	Τα ενισχυτικά μέλη ενός ιμάντα χρονισμού. Πηγή εικόνας: [21]. ....	59
Σχήμα 2-30.	Η δομή ενός συρματοσχοινου. Πηγή εικόνας: [22]. ....	60
Σχήμα 2-31.	Παράδειγμα συστήματος μετάδοσης κίνησης με συρματοσχοίνα. Πηγή εικόνας: [23]. ....	60
Σχήμα 2-32.	Παράδειγμα ρομποτικών βραχιόνων που χρησιμοποιούν ράβδους ώθησης-έλξης. Αριστερά φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση ενός βραχίονα που λειτουργεί με μηχανισμό παραλληλογράμμου, ενώ δεξιά η διάταξη των ράβδων στο ρομπότ KUKA KR 40 PA. Πηγές εικόνων: [7]. ....	61
Σχήμα 3-1.	(Πάνω) Το ρομπότ MIT Mini Cheetah και ο κινητήρας των επενεργητών του, iFlight ex-8. (Κάτω) Ο ρομποτικός χειριστής BLUE και ο κινητήρας των επενεργητών του, iPower GBM110. Πηγές εικόνων: [15] [26] [4] [27]. ...	63
Σχήμα 3-2.	Ο κινητήρας T-Motor R100 KV90. Πηγή εικόνας: [28]. ....	64
Σχήμα 3-3.	Ο χάρτης λειτουργίας του κινητήρα (continuous operation: συνεχής λειτουργία, short term operation: περιορισμένη λειτουργία, non-operating: περιοχή στην οποία δεν μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας). Πηγή εικόνας: [28]. ....	65
Σχήμα 3-4.	Το σύστημα οδήγησης ODrive v3.6 (56V). Πηγή εικόνας [35]. ....	66
Σχήμα 3-5.	Ο αισθητήρας γωνιακής θέσης AMS – AS5047P-TS_EK_AB. Πηγή εικόνας: [40]. ....	67
Σχήμα 3-6.	(Αριστερά) Ο διαμετρικά πολωμένος μαγνήτης Bomatec AG AS500-MD6H του αισθητήρα γωνιακής θέσης και (δεξιά) η σχηματική αναπαράσταση της πόλωσης του. Πηγή εικόνων: [40]. ....	67
Σχήμα 3-7.	Το συναρμολόγημα του βραχίονα σε (αριστερά) έκταση και (δεξιά) δίπλωση. ....	68
Σχήμα 3-8.	Τα κύρια υποσυστήματα του συναρμολογήματος του βραχίονα. ....	68
Σχήμα 3-9.	Το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης σε (αριστερά) ισομετρική όψη και (δεξιά) σε ανεπτυγμένη προβολή (exploded view). ....	69
Σχήμα 3-10.	Η άνω του κάτω τμήματος της σταθερής βάσης. Επισημαίνονται οι χρήσεις των διαφόρων οπών. ....	70
Σχήμα 3-11.	(Αριστερά) Η κάτω όψη της σταθερής βάσης. Φαίνεται η ειδική διαμόρφωση για τον αισθητήρα γωνιακής θέσης και (δεξιά) η ενσωμάτωσή του. ....	70
Σχήμα 3-12.	Ο τρόπος πρόσδεσης του μαγνήτη του αισθητήρα γωνιακής θέσης στον κινητήρα. Πηγή εικόνας (αριστερά): [28]. ....	71
Σχήμα 3-13.	(Αριστερά) Το συναρμολόγημα κάτω τμήματος σταθερής βάσης – κινητήρα – αισθητήρα γωνιακής θέσης – κελύφους κινητήρα και (δεξιά) η τομή του. ....	71
Σχήμα 3-14.	Το άνω τμήμα της σταθερής βάσης σε (αριστερά) άνω και (δεξιά) κάτω όψη. Τα νεύρα στο κάτω μέρος του εξαρτήματος επιτρέπουν την αφαίρεση μεγάλης ποσότητας υλικού, μειώνοντας έτσι τη μάζα του διατηρώντας ταυτόχρονα πολύ καλές δομικές ιδιότητες. ....	72



Σχήμα 3-15.	Ο τρόπος εγκατάστασης και ασφάλισης των εδράνων κύλισης της πρώτης άρθρωσης σε (πάνω) ισομετρική όψη και (κάτω) σε τομή. Επισημαίνεται επίσης το τρόπος πρόσδεσης του άνω τμήματος στο κέλυφος του κινητήρα. ....	72
Σχήμα 3-16.	(Αριστερά) Το συναρμολόγημα κόπλερ – πρώτου κινητήρα σε ισομετρική όψη και (δεξιά) η κάτω πλευρά του συνδέσμου. ....	73
Σχήμα 3-17.	Το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης σε τομή. ....	73
Σχήμα 3-18.	(Πάνω) Το συναρμολόγημα της περιστρεφόμενης βάσης σε ισομετρική όψη και (κάτω) το ανεπτυγμένη προβολή. Λόγω του μεγάλου βαθμού συμμετρίας αναπτύσσεται μόνο η μια πλευρά. ....	74
Σχήμα 3-19.	(Πάνω) Ο άξονας της περιστρεφόμενης βάσης και (κάτω) η συναρμολόγησή του με τη σταθερή βάση. ....	75
Σχήμα 3-20.	Η συναρμογή του άξονα της περιστρεφόμενης βάσης με τα έδρανα κύλισης της πρώτης άρθρωσης και η σύνδεσή του με τον σύνδεσμο του κινητήρα. ..	76
Σχήμα 3-21.	Πλάκα έδρασης της περιστρεφόμενης βάσης. Δεξιά φαίνεται η συναρμογή της με τους κοχλίες του χαλύβδινου άξονα. ....	76
Σχήμα 3-22.	Πλαϊνό τμήμα στήριξης επενεργητών / κινητήρων. ....	77
Σχήμα 3-23.	(Αριστερά) Η τοποθέτηση του εδράνου κύλισης της 2 <sup>ης</sup> άρθρωσης και (δεξιά) το συναρμολόγημα σε τομή, μετά την τοποθέτηση. ....	77
Σχήμα 3-24.	Η διαδικασία ασφάλισης του πλαϊνού τμήματος στήριξης των κινητήρων στην συνδετική πλάκα της περιστρεφόμενης βάσης. Τα κόκκινα βέλη συμβολίζουν την φορά κίνησης των εξαρτημάτων που τοποθετούνται σε κάθε βήμα. ....	78
Σχήμα 3-25.	Το συναρμολόγημα του βραχίονα μέχρι αυτό το σημείο. ....	79
Σχήμα 3-26.	Ενσωμάτωση του κινητήρα στο πλαϊνό τμήμα στήριξης. ....	80
Σχήμα 3-27.	(Αριστερά) Ο τρόπος ενσωμάτωσης του αισθητήρα γωνιακής θέσης στο τμήμα έδρασης του κινητήρα και (δεξιά) η το συναρμολόγημα σε τομή. ....	80
Σχήμα 3-28.	(Αριστερά) Το συναρμολόγημα συνδέσμου – δεύτερου κινητήρα σε ισομετρική όψη και (δεξιά) η πίσω πλευρά του συνδέσμου. ....	81
Σχήμα 3-29.	Υποστηρικτικό άξονα (shaft-support) της Misumi. Πηγή (αριστερά) εικόνας: [42] ....	81
Σχήμα 3-30.	Τα βήματα συναρμολόγησης του κόπλερ του κινητήρα της τρίτης άρθρωσης. ....	82
Σχήμα 3-31.	(Αριστερά) Το συναρμολόγημα του πρώτου συνδέσμου του βραχίονα και (δεξιά) η ανεπτυγμένη προβολή του. ....	83
Σχήμα 3-32.	Η συναρμολόγηση του κάτω τμήματος του πρώτου συνδέσμου. ....	84
Σχήμα 3-33.	Η συναρμογή του κάτω τμήματος του πρώτου συνδέσμου με την περιστρεφόμενη βάση. Ο αριστερός εκ των χαλύβδινων αξόνων συνδέεται μέσω κοχλίων με το κόπλερ του κινητήρα της δεύτερης άρθρωσης. ....	84
Σχήμα 3-34.	Ο σωλήνας ανθρακονήματος που χρησιμοποιείται για το σώμα του πρώτου συνδέσμου. Πηγή εικόνας: [43]. ....	85
Σχήμα 3-35.	Η ασφάλιση του σωλήνα ανθρακονήματος του πρώτου συνδέσμου μέσω σύσφιξης. ....	85
Σχήμα 3-36.	Το συναρμολόγημα του άνω άκρου του πρώτου συνδέσμου. Ο σωλήνας ανθρακονήματος ασφαρίζεται μέσω σύσφιξης. Τα έδρανα κύλισης	

	αποτελούν τη στήριξη της άνω τροχαλίας του συστήματος μετάδοσης κίνησης και ουσιαστικά έχουν το ρόλο της τρίτης άρθρωσης. ....	86
Σχήμα 3-37.	Ο άξονας της (αριστερά) κάτω και (δεξιά) πάνω τροχαλίας. Παρατηρούνται οι κατάλληλες διαμορφώσεις (φρεζαρίσματα) για την καλύτερη εφαρμογή των κοχλιών ασφάλισης των εξαρτημάτων. ....	86
Σχήμα 3-38.	Παράδειγμα πάκτωσης της τροχαλίας GT5 και του shaft-support σε άξονα μέσω ακτινικών κοχλιών ασφάλισης. ....	87
Σχήμα 3-39.	Ο τρόπος ενσωμάτωσης του ιμάντα χρονισμού στο βραχίονα (τομή). Χρησιμοποιούνται βελονοειδή έδρανα κύλισης ως άεργες τροχαλίες και εκατέρωθέν τους τοποθετούνται αντιτριβικοί δακτύλιοι από Teflon για την ελαχιστοποίηση της τριβής με τα τοιχώματα. ....	87
Σχήμα 3-40.	Το τελικό συναρμολόγημα του (αριστερά) κάτω και (δεξιά) άνω τμήματος του πρώτου συνδέσμου. ....	88
Σχήμα 3-41.	Το σύστημα τάνυσης του ιμάντα. Συσφίγγοντας τον ακέφαλο κοχλία, το φορείο προωθείται με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του ιμάντα και άρα την δημιουργία προέντασης. ....	88
Σχήμα 3-42.	Η ενσωμάτωση του πρώτου συνδέσμου στην περιστρεφόμενη βάση. ....	89
Σχήμα 3-43.	(Πάνω) Το συναρμολόγημα του δεύτερου συνδέσμου και (κάτω) σε ανεπτυγμένη προβολή. ....	90
Σχήμα 3-44.	Συναρμολόγηση του τμήματος σύνδεσης του δεύτερου με τον πρώτο σύνδεσμο. ....	90
Σχήμα 3-45.	Ασφάλιση του κυρίου σώματος του δεύτερου συνδέσμου (σωλήνας ανθρακονήματος) μέσω σύσφιξης. ....	91
Σχήμα 3-46.	Ο ρομποτικό βραχίονας σε πλήρη δίπλωση. ....	91
Σχήμα 3-47.	Μηχανικός αντάπτορας – φλάντζα ο οποίος τοποθετείται στο ελεύθερο άκρο του δεύτερου συνδέσμου μέσω σύσφιξης. ....	91
Σχήμα 3-48.	Το μοντέλο του τελικού βραχίονα. ....	92
Σχήμα 3-49.	Ο εξεταζόμενος χώρος εργασίας του βραχίονα, για βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο. ....	93
Σχήμα 3-50.	(Αριστερά) Το διάγραμμα της επιφάνειας του χώρου εργασίας και (δεξιά) του ωφέλιμου φορτίου, συναρτήσει των μηκών των συνδέσμων. Το χρώμα σε κάθε σημείο αντιπροσωπεύει την τιμή των εξεταζόμενων μεγεθών. Έχουν σημειωθεί τα σημεία που αντιστοιχούν στο συνδυασμό μηκών που επιλέχθηκε. ....	94
Σχήμα 3-51.	Διαγράμματα ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα για το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (0.61 kg) στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας σε στατική φόρτιση. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή της απόλυτης ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή των κινητήρων... ..	97
Σχήμα 3-52.	Διαγράμματα ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα για το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (2.1 kg) στην περιοχή περιορισμένης λειτουργίας σε στατική φόρτιση. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή της απόλυτης ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή των κινητήρων... ..	97
Σχήμα 3-53.	Διάγραμμα (αριστερά) γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου και (δεξιά) γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου, για ευθύγραμμη οριζόντια τροχιά. Έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που οριοθετούν τις περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας. ....	98
Σχήμα 3-54.	Διάγραμμα (αριστερά) γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου και (δεξιά) γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου, για ευθύγραμμη	

	κατακόρυφη τροχιά. Έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που οριοθετούν τις περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας. ....	99
Σχήμα 3-55.	Διαγράμματα RMS ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα, για ευθύγραμμη οριζόντια κίνηση ΤΣΔ, στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 0.85g. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή RMS της ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή του κινητήρα ή/και η μέγιστη απόλυτη ροπή τη μέγιστη ροπή του κινητήρα. ....	99
Σχήμα 3-56.	Διαγράμματα RMS ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα, για ευθύγραμμη κατακόρυφη κίνηση ΤΣΔ, στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 0.9g. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή RMS της ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή του κινητήρα ή/και η μέγιστη απόλυτη ροπή τη μέγιστη ροπή του κινητήρα. ....	100
Σχήμα 3-57.	Διάγραμμα (αριστερά) γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου και (δεξιά) γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου, για κυκλική τροχιά. Έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που οριοθετούν τις περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας. ....	100
Σχήμα 3-58.	Διαγράμματα RMS ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα, για κυκλική κίνηση ΤΣΔ, στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 0.9g. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή RMS της ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή του κινητήρα ή/και η μέγιστη απόλυτη ροπή τη μέγιστη ροπή του κινητήρα. ....	101
Σχήμα 3-59.	(Αριστερά) Η μέγιστη απόλυτη ροπή και (δεξιά) η μέγιστη απόλυτη γωνιακή ταχύτητα του δεύτερου κινητήρα, για ευθύγραμμη κατακόρυφη τροχιά, με ωφέλιμο φορτίο 0 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 2.5g. Έχει σημειωθεί το σημείο που είναι η αφετηρία της τροχιάς στην οποία παρατηρείται ταυτόχρονα μέγιστη (απόλυτη) ροπή και γωνιακή ταχύτητα. .	103
Σχήμα 3-60.	Η κατανομή τάσης στον ιμάντα χρονισμού. (Πάνω) Όταν δεν υπάρχει μεταφορά ισχύος, και στους δύο κλάδους η τάση είναι ίση με την προένταση του ιμάντα. (Κάτω) Κατά τη μετάδοση ροπής, αναπτύσσεται διαφορά τάσης στους δύο κλάδους. ....	104
Σχήμα 3-61.	Διάγραμμα δυνάμεων σε ιμάντα χρονισμού με ίσα μήκη κλάδων, συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος. Με 1 συμβολίζεται ο έλκοντας κλάδος και με 2 ο ελκόμενος. Όταν δεν μεταφέρεται ισχύς, η δύναμη και στους δύο κλάδους είναι ίση με την προένταση, $F_V$ . Όταν αρχίσει να μεταφέρεται ισχύς, η τάση στον έλκοντα κλάδο αυξάνεται ενώ στον ελκόμενο μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό. Όταν μεταφερόμενη δύναμη μεγιστοποιείται, γίνεται ίση με $2F_V$ ενώ η δύναμη στον ελκόμενο κλάδο μηδενίζεται. ....	104
Σχήμα 3-62.	Διάγραμμα δυνάμεων σε ιμάντα χρονισμού με ίσα μήκη κλάδων. Όταν η μεταφερόμενη δύναμη $F_t$ γίνει ίση με την επιθυμητή δύναμη $F_u$ , ο ελκόμενος κλάδος παραμένει υπό τάση $2F_V - F_u$ . Επιπλέον, έχουν σχεδιαστεί η μέγιστη δύναμη οδόντων $F_N$ και η μέγιστη εφελκυστική δύναμη ενισχυτικών μελών $F_{zul}$ , οι οποίες πρέπει να είναι μεγαλύτερες από την $F_u$ και $F_{max}$ αντίστοιχα. ....	105
Σχήμα 3-63.	Το προφίλ της οδόντωσης (αριστερά) του ιμάντα EV5GT και (δεξιά) της τροχαλίας GT5. Πηγή εικόνας: [52]. ....	106
Σχήμα 3-64.	Η αναπαράσταση της κοχλιοσύνδεσης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Με μπλε χρώμα συμβολίζονται οι κυκλικές επιφάνειες γύρω	

	από τις οπές στο κάτω μέρος της βάσης, με διάμετρο ίση με του κεφαλιού των κοχλιών, οι οποίες ορίζονται ως bonded με την πάνω επιφάνεια της πλάκας που αντιπροσωπεύει το έδαφος, συμβολισμένη με μωβ χρώμα. ....	108
Σχήμα 3-65.	Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στην κατασκευή του βραχίονα.....	109
Σχήμα 3-66.	Διαγράμματα ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα για το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (2.1 kg) στην περιοχή περιορισμένης λειτουργίας σε στατική φόρτιση. Έχουν σημειωθεί τα σημεία στα οποία μεγιστοποιείται η ροπή των κινητήρων. ....	110
Σχήμα 3-67.	Η μορφή που λαμβάνει το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης για την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.....	110
Σχήμα 3-68.	Ο τρόπος εφαρμογής των φορτίων στη σταθερή βάση. (Αριστερά) Τα φορτία της 2 <sup>ης</sup> και 3 <sup>ης</sup> άρθρωσης, η οριζόντια δύναμη $f_z$ και το βάρος της υπόλοιπης κατασκευής ασκούνται.....	111
Σχήμα 3-69.	Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στην σταθερή βάση, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, που εμφανίζεται γύρω από μια από τις κοχλιοσυνδέσεις μεταξύ του άνω τμήματος της βάσης και του κελύφους του κινητήρα.....	111
Σχήμα 3-70.	Η μορφή που λαμβάνει το συναρμολόγημα της περιστρεφόμενης βάσης για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. ....	112
Σχήμα 3-71.	Ο τρόπος εφαρμογής των φορτίων στην περιστρεφόμενη βάση. Η ροπή και το βάρος των κινητήρων ασκούνται στις επιφάνειες γύρω από τους κοχλίες που τους συγκρατούν, ενώ το βάρος των συνδέσμων, η ροπή του πρώτου κινητήρα και η οριζόντια δύναμη $f_z$ στο εσωτερικό των εδράνων κύλισης.....	113
Σχήμα 3-72.	Η πάκτωση στην εξωτερική πλευρά του άξονα της περιστρεφόμενης βάσης, που αντιπροσωπεύει τη στήριξή της στα έδρανα κύλισης της σταθερής βάσης.....	113
Σχήμα 3-73.	Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στην περιστρεφόμενη βάση, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises, με τις ροπές των κινητήρων της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης να ασκούνται με την (πάνω) ίδια και (κάτω) αντίθετη φορά. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, όπου και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται γύρω από μια από τις κοχλιοσυνδέσεις μεταξύ του χαλύβδινου άξονα και της συνδετικής πλάκας. ....	114
Σχήμα 3-74.	Η διαμόρφωση του πρώτου συνδέσμου για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	115
Σχήμα 3-75.	Τα φορτία που ασκούνται στον πρώτο σύνδεσμο. Αριστερά φαίνεται η ροπή του δεύτερου κινητήρα, στο κέντρο η ροπή του πρώτου κινητήρα και δεξιά τα βάρη, η δύναμη από τον ιμάντα χρονισμού και η οριζόντια δύναμη $f_z$ . ....	116
Σχήμα 3-76.	Οι στηρίξεις του πρώτου συνδέσμου. (Αριστερά) Η έδραση στα ρουλεμάν της περιστρεφόμενης βάσης αντιπροσωπεύεται από μια άρθρωση, ενώ (δεξιά) η ακινητοποίηση λόγω του κινητήρα από μια πάκτωση στο σημείο σύνδεσης. ....	116
Σχήμα 3-77.	Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στον πρώτο σύνδεσμο, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, όπου εμφανίζεται στο σημείο επαφής του άξονα με το κάτω συνδετικό τμήμα.....	116

Σχήμα 3-78.	Η διαμόρφωση του δεύτερου συνδέσμου για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	117
Σχήμα 3-79.	Η φόρτιση του δεύτερου συνδέσμου από (α) τη ροπή του 1 <sup>ου</sup> κινητήρα, (β) τη δύναμη $f_z$ και (γ) το ωφέλιμο φορτίο. ....	118
Σχήμα 3-80.	Η έδραση του δεύτερου συνδέσμου μέσω πάκτωσης στο εσωτερικό των shaft-supports. ....	118
Σχήμα 3-81.	Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στον πρώτο σύνδεσμο, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, όπου εμφανίζεται στη βάση του τμήματος σύσφιξης. ....	118

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Προδιαγραφές βραχιόνων που προορίζονται για αντίστοιχες εφαρμογές [3] [4] [6] [10] [11]. Όπου εισάγεται (-) δεν είναι διαθέσιμη η προδιαγραφή. ...	29
Πίνακας 2-2. Οι παράμετροι των μοντέλων των βραχιόνων από το Σχήμα 2-12. ....	54
Πίνακας 3-1. Οι προδιαγραφές κινητήρων ΣΡΧΨ εξωτερικού δρομέα παρόμοιων ρομποτικών συστημάτων. Όπου εισάγεται (-) η προδιαγραφή δεν είναι διαθέσιμη. ....	63
Πίνακας 3-2. Οι προδιαγραφές του κινητήρα T-Motor R100 KV90 [28].....	64
Πίνακας 3-3. Οι τελικές τιμές των παραμέτρων του βραχίονα. Οι συμβολισμοί αντιστοιχούν στο Σχήμα 3-48. ....	94
Πίνακας 3-4. Κατάλογος εξαρτημάτων (bill of materials) του βραχίονα και οι τιμές του καθενός.....	101
Πίνακας 3-5. Τα χαρακτηριστικά του ιμάντα χρονισμού EV5GT. ....	107
Πίνακας 3-6. Τα χαρακτηριστικά της τροχαλίας GT5. ....	107
Πίνακας 3-7. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. ....	107

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

Οι ρομποτικοί βραχίονες (ή χειριστές) αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας και των γραμμών παραγωγής, με τα εν λόγω ρομποτικά συστήματα να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συναρμολόγηση, διακίνηση υλικών και έλεγχο ποιότητας. Ωστόσο, στις εφαρμογές αυτές, τα ρομπότ λειτουργούν υπό απολύτως ελεγχόμενες συνθήκες και εκτελούν προκαθορισμένες ενέργειες, χωρίς να έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν σε εξωτερικά ερεθίσματα.

Την τελευταία δεκαετία, αυτή η τάση έχει αρχίσει να αλλάζει. Γίνεται μια εκτενής προσπάθεια από την επιστημονική κοινότητα τα ρομπότ να εξέλθουν από τα ελεγχόμενα περιβάλλοντα στα οποία εργάζονταν μέχρι τώρα και να εγκατασταθούν σε περιβάλλοντα με ανθρώπους, στα οποία θα μπορούν να συμβάλουν άμεσα σε καθημερινές εργασίες. Η δυσκολία αυτού του εγχειρήματος έγκειται στο ότι οι χώροι στους οποίους κινούνται άνθρωποι χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα. Αυτό συνεπάγεται πως είναι αδύνατο για ένα ρομπότ να μπορέσει να λειτουργήσει με ασφάλεια για τον εαυτό του και για το περιβάλλον, εάν λειτουργεί με βάση προκαθορισμένες κινήσεις (έλεγχος θέσης). Αντιθέτως, απαιτείται ένα σύστημα το οποίο να μπορεί αφενός να αντιληφθεί και αφετέρου να προσαρμόσει την συμπεριφορά του στις απρόσμενες εξωτερικές διαταραχές (έλεγχος δύναμης). Η ιδιότητα αυτή είναι γνωστή ως ενδοτικότητα (compliance), από την οποία προκύπτει και το αντίστοιχο πεδίο των ενδοτικών (compliant) ρομπότ, που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Ταυτόχρονα, στην προσπάθεια παροχής των εν λόγω ρομποτικών συστημάτων στο ευρύ κοινό, τέθηκε αναπόφευκτα το ερώτημα του κόστους. Καθώς η πλειοψηφία των ρομποτικών βραχιόνων απευθύνεται στη βιομηχανία και συνήθως προορίζεται για εφαρμογές υψηλών προδιαγραφών, καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό κομμάτι της αγοράς και επομένως το κόστος απόκτησης αυτών αποτελεί επένδυση εκτός των ορίων των καθημερινών χρηστών. Παρ' ολ' αυτά, λόγω της δημοσιότητας που έχει αποκτήσει το αντικείμενο, πλέον προκύπτουν νέες λύσεις και τεχνολογίες, που σταδιακά καθιστούν τη δημιουργία οικονομικών, που όμως δεν υπολείπονται ποιότητας και επιδόσεων, ρομποτικών συστημάτων δυνατή.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην τομή των παραπάνω προσεγγίσεων. Αποσκοπεί στο σχεδιασμό ενός ρομποτικού βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας, ο οποίος προορίζεται για βιομηχανικά περιβάλλοντα, αλλά έχει στόχο πρώτον την ασφάλεια των χειριστών μέσω της δυνατότητας αίσθησης εξωτερικών δυνάμεων, δεύτερον την εκτέλεση ενεργειών σε συνεργασία με το προσωπικό, όπως υποβοήθηση στη μεταφορά ενός αντικειμένου και τρίτο το κόστος του να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερο. Έτσι, μελετάται το πεδίο των ενδοτικών ρομποτικών συστημάτων και ταυτόχρονα εξετάζεται η δυνατότητα υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος με χαμηλό κόστος, καθώς τα μέχρι στιγμής χρησιμοποιούμενα ρομπότ που επιτελούν παρόμοιες εργασίες βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά του φάσματος. Επιλέγεται να εξεταστούν τρεις βαθμοί ελευθερίας καθώς κρίνεται ότι επαρκούν για την εμβάθυνση σε όλες της πτυχές του αντικειμένου.

Αναλυτικότερα, μελετώνται οι αρχές λειτουργίας των ρομποτικών βραχιόνων με ενδοτικότητα, από τις οποίες προκύπτουν οι σχεδιαστικές απαιτήσεις του συστήματος. Με

βάση αυτές, αναλύονται και αξιολογούνται σχεδιαστικές λύσεις για τις κύριες συνιστώσες ενός ρομποτικού βραχίονα, δηλαδή το σύστημα επενέργησης, τη μηχανική δομή και το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του, με τον σχεδιασμό να υπακούει στις σχεδιαστικές αποφάσεις που λήφθηκαν. Τέλος, αξιολογείται ο τελικός βραχίονας από άποψη επιδόσεων σε θέματα ωφέλιμου φορτίου, βάρους, ανάπτυξης ταχύτητας στο άκρο του και κόστος και συγκρίνεται με ήδη υπάρχοντες βραχίονες αντίστοιχων εφαρμογών.

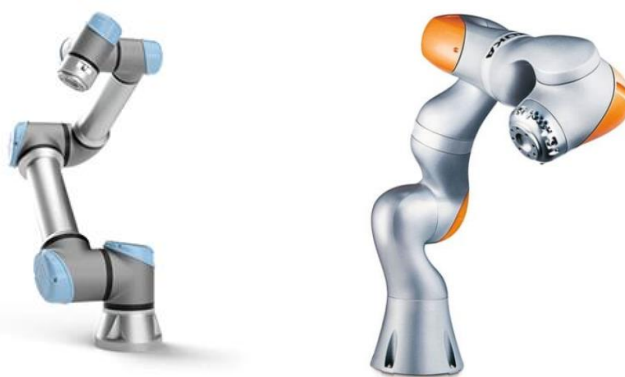
## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ανά τα χρόνια, έχουν κατασκευαστεί αμέτρητοι ρομποτικοί χειριστές. Λόγω των πολλαπλών πτυχών του αντικειμένου που πραγματεύεται η εργασία, επιλέγεται να αναφερθούν οι ρομποτικοί βραχίονες που ξεχωρίζουν σε κάθε μια από τις απαιτήσεις της εργασίας, λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη πως είναι λίγα τα συστήματα που τις ικανοποιούν ταυτόχρονα.

Υπάρχει μια μεγάλη κατηγορία ρομποτικών χειριστών τα οποία προορίζονται για συνεργασία με τον άνθρωπο, αλλά ο σχεδιασμός τους τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες άλλες εργασίες (συναρμολόγηση, διακίνηση υλικών, ποιοτικό έλεγχο) και για αυτό απαντώνται αρκετά συχνά και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Τα ρομπότ αυτά αναφέρονται συχνά και ως ρομπότ συνεργασίας – cobots (cooperation robots). Το μειονέκτημα με τα ρομπότ αυτά είναι πως οι υλοποιήσεις τους τα καθιστούν ιδιαίτερα ακριβά. Αναφέρονται όμως εδώ, καθώς είναι αυτά που καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό το δρόμο για ενδοτικούς βραχίονες και έχουν μερικά αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά.

### 1.2.1 Ρομποτικοί Χειριστές Εμπορίου

Με τον πάροδο των χρόνων, έχει προκύψει ένας συγκεκριμένος σχεδιασμός σε αυτά τα συστήματα, ο οποίος πλέον απαντάται σχεδόν σε κάθε βραχίονα συνεργασίας του εμπορίου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το ρομπότ UR5 της εταιρείας Universal Robots και το KUKA LBR iiwa της εταιρείας KUKA, όπου είναι από τους πιο διαδεδομένους ρομποτικούς βραχίονες (βλ. Σχήμα 1-1).

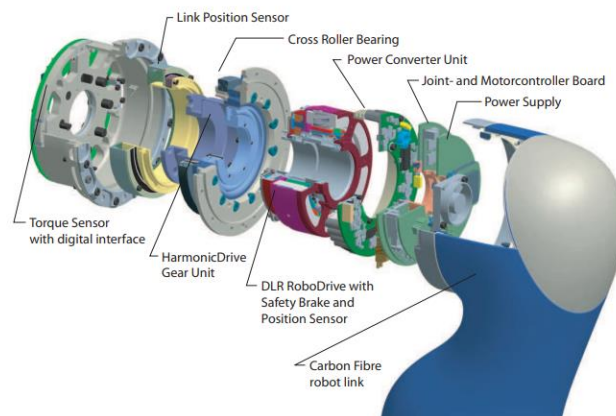


**Σχήμα 1-1. Οι βραχίονες (αριστερά) UR5 της Universal Robotics και (δεξιά) KUKA LBR iiwa της εταιρείας KUKA. Πηγές εικόνων: [1] [2].**

Όπως θα αναλυθεί περαιτέρω και στο Κεφάλαιο 2, ένα βασικό προαπαιτούμενο των ρομπότ που λειτουργούν σε περιβάλλοντα με ανθρώπους είναι η δυνατότητα αίσθησης δύναμης (force sensing), ώστε η συμπεριφορά του ρομπότ να προσαρμόζεται αναλόγως τις απρόβλεπτες εξωτερικές διαταραχές. Οι προαναφερθέντες βραχίονες, αυτό το επιτυγχάνουν μέσω αισθητήρων ροπής στους επενεργητές τους. Όσον αφορά την ίδια την επενέργηση,



χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήρες συζευγμένους με έναν αρμονικό μειωτήρα στροφών (harmonic drive / gearbox), μέσω του οποίου αυξάνεται σημαντικά η πυκνότητα ροπής (λόγος ροπής προς μάζα) των επενεργητών. Στο Σχήμα 1-2 φαίνεται ο επενεργητής του βραχίονα KUKA LBR iiwa, που χρησιμοποιεί αυτή τη διάταξη. Λόγω της μεγάλης πυκνότητας ροπής, οι επενεργητές είναι τοποθετημένοι σε σειριακή διάταξη, δηλαδή απευθείας πάνω στις αρθρώσεις, και διαθέτουν επτά βαθμούς ελευθερίας. Επιπλέον, και τα δύο συστήματα επιτυγχάνουν εντυπωσιακή ακρίβεια και επαναληψιμότητα, της τάξεως των 0.1 mm (KUKA LBR iiwa) και 0.03 mm (UR5). Όμως, όπως προαναφέρθηκε, το βασικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι το κόστος τους. Συγκεκριμένα, το UR 5 και το KUKA LBR iiwa, κοστίζουν 29000€ και 61000€ αντίστοιχα [3] [4]. Περαιτέρω προδιαγραφές τους καταγράφονται στον Πίνακα 2-1.



**Σχήμα 1-2.** Το σύστημα επενέργησης του ρομπότ KUKA LBR-iiwa. Παρατηρείται η χρήση αρμονικού μειωτήρα στροφών (harmonic drive gear unit) και αισθητήρα ροπής (torque sensor with digital interface). Πηγή εικόνας: [5].

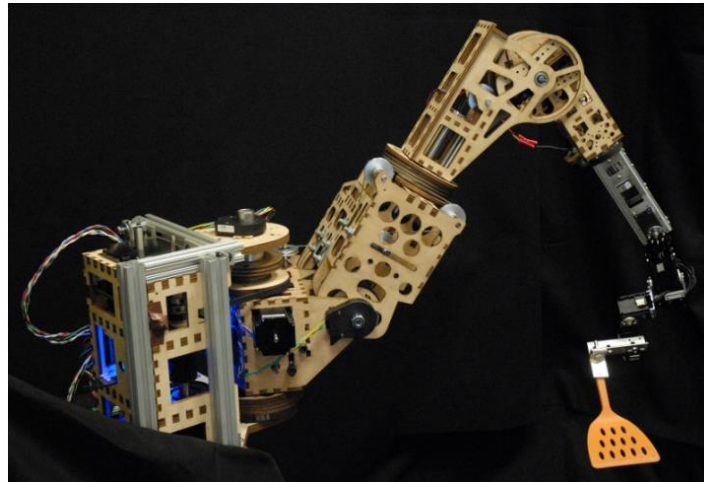
### 1.2.2 Ερευνητικοί Ρομποτικοί Χειριστές

Στην προσπάθεια δημιουργίας οικονομικότερων ρομποτικών βραχιόνων συνεργασίας, έχουν γίνει δύο αξιοσημείωτες μελέτες σε ερευνητικό επίπεδο. Στόχος είναι, όμοια με την παρούσα εργασία, η ανάπτυξη ενός ρομποτικού βραχίονα ο οποίος έχει δυνατότητες ενδοτικότητας και αίσθησης δύναμης, ικανού ωφέλιμου φορτίου και χώρου εργασίας, διατηρώντας ταυτόχρονα το κόστος όσο το δυνατόν χαμηλότερο.

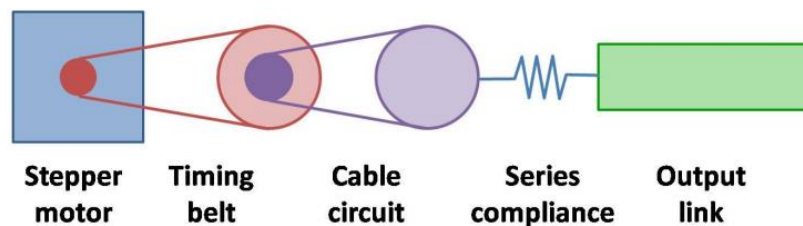
#### **Quigley's Low-Cost Manipulator**

Ο ρομποτικός βραχίονας του Quigley [6] (βλ. Σχήμα 1-3) σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει χαμηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια σε χώρο με ανθρώπους. Διαθέτει επτά βαθμούς ελευθερίας και η επενέργησή του γίνεται μέσω βηματικών κινητήρων (stepper motors). Έχει τη δυνατότητα ανάπτυξης γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ έως 1.5 m/s και μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου 2 kg, ζυγίζοντας 11.4 kg. Η ενδοτικότητα επιτυγχάνεται μέσω προσθήκης ελαστικότητας σε σειρά με τον κάθε επενεργητή των τεσσάρων πρώτων βαθμών ελευθερίας (η αρχή λειτουργίας αυτής της διάταξης αναλύεται στην Ενότητα 2.2.1). Κρίνεται πως αυτό επαρκεί καθώς έτσι ο βραχίονας μπορεί να υποχωρεί και στις τρεις διευθύνσεις του καρτεσιανού χώρου. Επιπλέον, οι κινητήρες των αρθρώσεων αυτών τοποθετούνται κοντά στη βάση και η ισχύς μεταφέρεται στις αρθρώσεις μέσω συστήματος μετάδοσης κίνησης και συγκεκριμένα μέσω ενός συνδυασμού ιμάντων χρονισμού και συρματόσχοινων (cable drives), μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις ισχύος και την

αιωρούμενη μάζα (flying inertia) του συστήματος. Το συνολικό σύστημα επενέργησης για τις τέσσερις πρώτες αρθρώσεις παρατίθεται στο Σχήμα 1-4. Κατασκευάζοντας τον σκελετό από τμήματα κοντραπλακέ (plywood) κομμένα από σύστημα κοπής με laser (laser-cutter), το κόστος του συστήματος ανέρχεται στα \$4135, μια πολύ σημαντική διαφορά σε σχέση με τις εναλλακτικές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.2.1. Τέλος, παρά το χαμηλό κόστος, ο βραχίονας μπορεί να επιτύχει επαναληψιμότητα 3 mm.



Σχήμα 1-3. Ο ρομποτικός βραχίονας του Quigley. Πηγή εικόνας: [6].

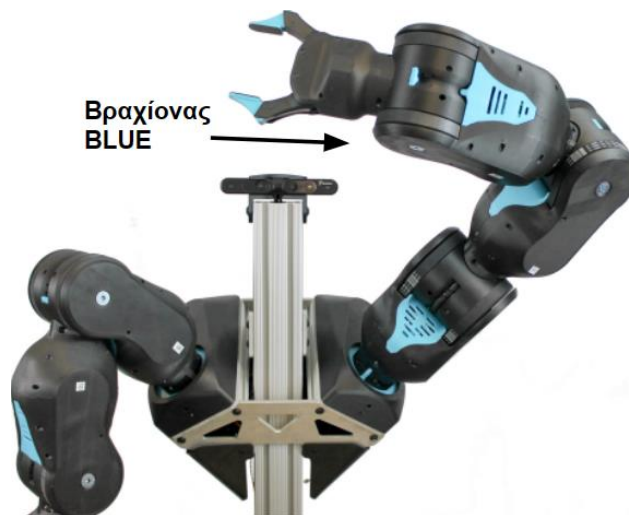


Σχήμα 1-4. Το σύστημα επενέργησης για τις τέσσερις πρώτες αρθρώσεις του ρομποτικού βραχίονα του Quigley. Η έξοδος του βηματικού κινητήρα (stepper motor) συνδέεται με ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης ιμάντα χρονισμού (timing belt) – συρματόσχοινο (cable circuit) για τη μεταφορά της ισχύος. Μεταξύ αυτού και της άρθρωσης (έξοδος) παρεμβάλλεται ένα ελαστικό στοιχείο (series compliance), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ενδοτικότητα της άρθρωσης. Πηγή εικόνας: [6].

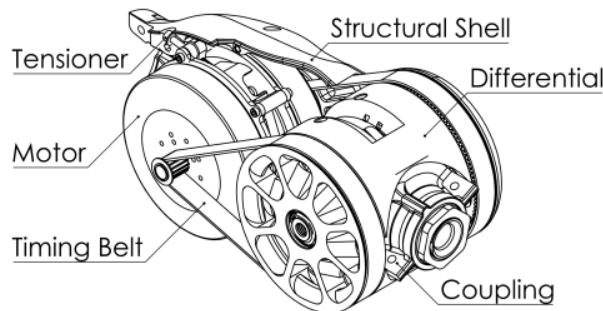
### **BLUE Manipulator**

Πρόκειται για ένα βραχίονα επτά βαθμών ελευθερίας, ο οποίος αναπτύχθηκε στο Berkley με αντίστοιχες προδιαγραφές με αυτόν του Quigley, δηλαδή χαμηλό κόστος, χώρο εργασίας και ωφέλιμο φορτίο ανάλογο ενός ανθρώπινου βραχίονα και δυνατότητα ασφαλούς λειτουργίας δίπλα σε ανθρώπους [4]. Ο βραχίονας BLUE υιοθετεί ένα σχήμα επενέργησης το οποίο χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά σε εφαρμογές ρομποτικής βάρδισης (legged locomotion). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες εξωτερικού δρομέα, οι οποίοι λόγω της μεγάλης ακτίνα διακένου τους έχουν αυξημένες δυνατότητες ανάπτυξης ροπής. Έτσι, είναι δυνατό μέσω του συνδυασμού τους με ένα σύστημα μείωσης στροφών χαμηλού λόγου μετάδοσης (1:7), να προκύψει ένα ρομποτικό σύστημα ικανών προδιαγραφών, το οποίο ταυτόχρονα διαθέτει ενδοτικότητα μέσω ιδιοδεκτικότητας (μέτρηση ροπής από τα ρεύματα στα τυλίγματα των κινητήρων. Η αρχή λειτουργίας αναλύεται στην Ενότητα 2.2.1). Επιλέγεται ο βραχίονας να αποτελείται από δομικά κελιά (structural cells), τα οποία διαθέτουν δύο βαθμούς ελευθερίας έκαστο (βλ. Σχήμα 1-6). Μάλιστα, μέσω της

υιοθέτησης διαφορικού μεταξύ των κινητήρων, προκύπτει μια πολύ εργονομική διάταξη. Τοποθετώντας τρία δομικά κελιά διαδοχικά μαζί με ένα επιπλέον βαθμό ελευθερίας στη βάση που περιστρέφει ολόκληρο το βραχίονα προκύπτουν οι επτά βαθμοί ελευθερίας. Το υλικό (hardware) (κινητήρες – ηλεκτρονικά – υλικά) μαζί με τα τμήματα του σκελετού τα οποία κατασκευάστηκαν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή (3D-printer), οδήγησαν σε ένα συνολικό κόστος \$3328, το οποίο εκτιμάται ότι θα μειωθεί στο μισό σε περίπτωση μαζικής παραγωγής. Τέλος, ο βραχίονας έχει ωφέλιμο φορτίο 2 kg, βάρος 8.7 kg και επαναληψιμότητα 3.7 mm.



Σχήμα 1-5. Ο ρομποτικός βραχίονας BLUE. Πηγή εικόνας: [4].



Σχήμα 1-6. Ένα δομικό κελί (structural shell) του βραχίονα BLUE. Στους κινητήρες (motor) υπάρχει μείωση 1:7 με ιμάντα χρονισμού (timing belt), ενώ η ροπή τους μεταφέρεται στην έξοδο μέσω διαφορικού. Πηγή εικόνας: [4].

### 1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο, περιγράφεται αρχικά η αφορμή του θέματος της εργασίας και ο σκοπός της. Παρουσιάζονται παρόμοια ρομποτικά συστήματα και αναφέρονται τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του καθενός.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετώνται οι σχεδιαστικές αρχές των ρομποτικών βραχιόνων, από τη σκοπιά των συστημάτων που διαθέτουν την δυνατότητα να προσαρμόζονται σε απρόβλεπτες εξωτερικές διαταραχές. Αρχικά, ορίζονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος. Στη συνέχεια, αναλύονται και αξιολογούνται οι εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις για τις κύριες συνιστώσες του βραχίονα, το σύστημα επενέργειας, τη

μηχανική δομή και τα συστήματα μετάδοσης κίνησης. Αναλυτικότερα, εξετάζονται αρχικά τα συστήματα επενέργειας ως προς τις επιδόσεις τους σε θέματα μέτρησης δύναμης, κόστους και εύρους ζώνης. Επιλέγεται η μέθοδος επενέργειας άμεσης μετάδοσης, καθώς κρίνεται πως πληροί σε μεγαλύτερο βαθμό και τα τρία κριτήρια, σε σχέση με τις εναλλακτικές. Στη συνέχεια μελετώνται οι διαφορετικές μηχανικές δομές του βραχίονα, με την πιο κατάλληλη να είναι η ανθρωπομορφική, λόγω των αυξημένου χώρου εργασίας αλλά και της μηχανικής αξιοπιστίας της. Εξετάζεται η τοποθέτηση των κινητήρων σε σχέση με τις αρθρώσεις και συγκρίνονται η σειριακή και η παράλληλη διάταξη. Κατά την σύγκριση αυτή, αναπτύσσεται στο επίπεδο το μοντέλο του βραχίονα (κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις (μέθοδος Euler-Lagrange) για την κάθε περίπτωση, και επιλέγεται η παράλληλη διάταξη χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί ο βραχίονας σε κάποια ονομαστικά σενάρια λειτουργίας (στατική φόρτιση, ευθύγραμμη και κυκλική τροχιά τελικού στοιχείου δράσης). Καθώς η παράλληλη διάταξη συνεπάγεται πως ο κινητήρας του αγκώνα τοποθετείται στη βάση, ομοαξονικά με τον κινητήρα του ώμου, είναι επιτακτική η χρήση ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης για τη μεταφορά της ισχύος στην άρθρωση. Επιλέγεται ιμάντας χρονισμού καθώς ενδείκνυται για εφαρμογές ακριβείας και λόγω της εύκολης εγκατάστασής του.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός ρομποτικού βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας που υπακούει στις σχεδιαστικές απαιτήσεις που τέθηκαν. Μετά την επιλογή ηλεκτροκινητήρα και συστήματος οδήγησης, παρουσιάζεται αναλυτικά το σχέδιο του βραχίονα που έγινε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks. Αναλύονται οι διάφορες σχετικές επιλογές και αιτιολογείται πως η κάθε μια συμβάλει στην ικανοποίηση των σχεδιαστικών απαιτήσεων. Εξάγεται επίσης το κινηματικό και δυναμικό (μέθοδος Euler-Lagrange) μοντέλο του βραχίονα, μέσα από τα οποία μέσω παραμετρικής ανάλυσης επιλέγονται οι γεωμετρικές παράμετροι του βραχίονα (μήκη συνδέσμων) ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ωφέλιμου φορτίου και χώρου εργασίας και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιδόσεις του βραχίονα σε σχέση με την ανάπτυξη ταχύτητας και επιτάχυνσης, συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου. Επιπλέον, εξετάζεται το συνολικό κόστος του συστήματος με βάση το σχεδιασμό που έγινε. Τέλος, εκτελείται στατική μελέτη για την κατασκευή στα δυσμενέστερα σενάρια λειτουργίας, ώστε να επιβεβαιωθεί η δομική ακεραιότητα του βραχίονα.

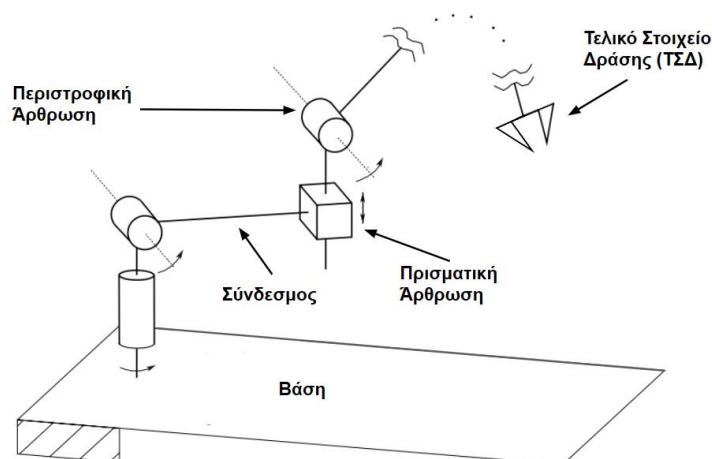
Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται σύντομη ανασκόπηση της εργασίας, παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο.

## 2 Σχεδιαστικές Αρχές Ρομποτικών Βραχιόνων

### 2.1 Εισαγωγή

Στον παρόν κεφάλαιο τίθεται το πλαίσιο σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα. Αρχικά, στην Ενότητα 2.2 ορίζονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις, και στη συνέχεια αναλύονται και αξιολογούνται οι διάφορες λύσεις που τις ικανοποιούν.

Ένας ρομποτικός βραχίονας, ή αλλιώς ρομποτικός χειριστής (robotic manipulator), αποτελείται από συνδέσμους (links), που συνδέονται μέσω αρθρώσεων (joints), οι οποίες του προσδίδουν τους βαθμούς ελευθερίας (BE) (degree of freedom) του. Οι πιο συχνά απαντώμενοι τύποι είναι η πρισματική (prismatic) άρθρωση (για γραμμική κίνηση) και η περιστροφική άρθρωση, με ένα BE έκαστη. Η κίνηση των συνδέσμων επιτυγχάνεται μέσω επενεργητών, δηλαδή μονάδων μετατροπής μιας μορφής ισχύος (υδραυλική, πνευματική, ηλεκτρική) σε μηχανική ισχύ, οι οποίοι ενσωματώνονται στις αρθρώσεις. Επιπλέον, διαθέτει ένα τελικό στοιχείο δράσης (ΤΣΔ) (end-effector), μέσω του οποίου επιτελεί τις διάφορες εργασίες που απαιτούνται. Η γενική μορφή ενός τέτοιου βραχίονα μπορεί να φανεί στο Σχήμα 2-1. Η δομή αυτή ονομάζεται σειριακή ή ανοιχτή κινηματική αλυσίδα, λόγω της ύπαρξης μόνο μιας ακολουθίας μελών που συνδέουν τη βάση με το ΤΣΔ. Σε διαφορετική περίπτωση ονομάζεται κλειστή κινηματική αλυσίδα.



Σχήμα 2-1. Σχηματική αναπαράσταση ενός ρομποτικού χειριστή. Σημειώνονται τα βασικά του τμήματα: Η βάση, οι σύνδεσμοι, οι αρθρώσεις και το ΤΣΔ. Πηγή εικόνας: [7].

Σε ότι αφορά το σχεδιασμό του ρομποτικού συστήματος που περιεγράφηκε, αυτό μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες συνιστώσες, οι οποίες μελετώνται σε βάθος στην πορεία αυτού του κεφαλαίου. Αυτές είναι:

- **Το σύστημα επενέργειας (Actuation system)** – Ενότητα 2.3: Όπως προαναφέρθηκε, πρόκειται το σύστημα που αναλαμβάνει την κίνηση του βραχίονα. Στην περίπτωση ηλεκτρομηχανικής επενέργειας, που είναι και η πιο ευρέως διαδεδομένη, αυτό το σύστημα συνήθως αποτελείται από τον ηλεκτροκινητήρα, το σύστημα μείωσης στροφών, και αισθητήρες όπως γωνιακής θέσης και δύναμης. Υπάρχει πληθώρα επιλογών επενέργειας (όπως υδραυλική, ηλεκτρομηχανική, με μείωση, χωρίς μείωση), με το κάθε σύστημα να έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επομένως, πρέπει να δοθεί μεγάλη βάση στη σωστή επιλογή, διότι

από αυτό εξαρτώνται πολλά χαρακτηριστικά του βραχίονα, όπως το βάρος, το εύρος ζώνης (bandwidth), η δυνατότητα ελέγχου μέσω δύναμης και το κόστος.

- **Η μηχανική δομή (Mechanical structure)** – Ενότητα 2.4 και 2.5: Το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό γιατί καθορίζει άμεσα στο χώρο εργασίας (workspace) του βραχίονα και το ωφέλιμο φορτίο, και επομένως καθορίζει το εάν θα είναι κατάλληλος για μια εφαρμογή. Με βάση αυτό καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό και η τοποθέτηση των επενεργητών σε σχέση με τις αρθρώσεις.
- **Το σύστημα μετάδοσης ισχύος (Power transmission system)** – Ενότητα 2.6: Στις περιπτώσεις όπου οι επενεργητές βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία σε σχέση με τις αρθρώσεις, απαιτείται η υιοθέτηση ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης, όπως ιμάντας χρονισμού, συρματόσχοινα ή αλυσίδα, για να μπορεί να μεταφερθεί η ισχύς από τον επενεργητή στην άρθρωση. Η επιλογή αυτού του συστήματος έχει σημασία, καθώς όπως και οι προηγούμενες συνιστώσες, έχει άμεση επιρροή στα χαρακτηριστικά του βραχίονα, όπως η ενδοτικότητα, το βάρος και η ακρίβεια.

## 2.2 Σχεδιαστικές Απαιτήσεις Ρομποτικού Βραχίονα

Βασικό προαπαιτούμενο της σχεδίασης ενός μηχανολογικού και στην προκειμένη περίπτωση, ρομποτικού, συστήματος, είναι ο ορισμός των σχεδιαστικών απαιτήσεων ή προδιαγραφών, ώστε να υπάρχει ένα σαφές πλαίσιο με βάση το οποίο γίνονται οι σχεδιαστικές επιλογές. Οι προδιαγραφές αυτές προκύπτουν με βάση την εφαρμογή στην οποία καλείται να λειτουργήσει ο βραχίονας, όπως αυτή περιεγράφηκε και στην Ενότητα 1.1. Συγκεκριμένα, επιλέγονται έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός ρομποτικού βραχίονα ο οποίος να μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται άλλοι περιορισμοί, όπως χαμηλό κόστος. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις συνοψίζονται παρακάτω.

### 2.2.1 Ενδοτικότητα

Η ενδοτικότητα είναι το χαρακτηριστικό το οποίο πρέπει να διαθέτει οποιοδήποτε ρομποτικό σύστημα προορίζεται για λειτουργία σε περιβάλλον με ανθρώπους. Ως ενδοτικότητα ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να υποχωρεί σε εξωτερικές διαταραχές (δυνάμεις). Έτσι, μπορεί αφενός να λειτουργεί με ασφάλεια για τους ανθρώπους που αλληλοεπιδρούν μαζί του, αλλά και για τον εαυτό του.

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν δύο εκδοχές για την επίτευξη της ενδοτικότητας, η παθητική και η ενεργητική ενδοτικότητα.

#### **Παθητική Ενδοτικότητα**

Η παθητική (ή εγγενής (inherent)) ενδοτικότητα επιτυγχάνεται μέσω παθητικών μηχανικών στοιχείων, κυρίως ελατήρια, τα οποία τοποθετούνται σε σειρά με τους επενεργητές, ώστε σε περίπτωση που υπάρξει επαφή με το περιβάλλον, το σύστημα να υποχωρεί. Αυτή όμως η προσέγγιση έχει πληθώρα μειονεκτημάτων.

Αρχικά, ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει για μια συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας. Αυτό συνεπάγεται πως ο βραχίονας μπορεί να λειτουργεί σε περιορισμένο φάσμα εφαρμογών και μόνο υπό σχεδόν ελεγχόμενες συνθήκες, το οποίο είναι σε αντίθεση με τα περιβάλλοντα με ανθρώπους, που χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα. Η πιο συνηθισμένη λύση που έχει προταθεί πάνω σε αυτό, είναι μέσω επενεργητών μεταβλητής δυσκαμψίας (variable

stiffness actuators). Αυτοί όμως δεν έχουν γνωρίσει ιδιαίτερη επιτυχία, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητάς τους και των μέτριων επιδόσεών τους [8].

### **Ενεργητική Ενδοτικότητα**

Ως εναλλακτική στην παθητική ενδοτικότητα προτείνεται η ενεργητική ενδοτικότητα, κατά την οποία οι ιδιότητες των προαναφερθέντων μηχανικών στοιχείων προσομοιώνονται από τους επενεργητές, μέσω κατάλληλων μεθόδων ελέγχου. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής της ενδοτικότητας του ρομποτικού συστήματος, αναλόγως τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Έχει δύο βασικά προαπαιτούμενα:

**Ακριβής Μέτρηση Δύναμης σε Υψηλές Συχνότητες:** Η ενεργητική ενδοτικότητα βασίζεται στη δυνατότητα του ρομπότ να μπορεί να αντιληφθεί εξωτερικές δυνάμεις με βάση τις οποίες προσαρμόζει τη λειτουργία του, χρησιμοποιώντας σχήματα ελέγχου που βασίζονται σε έλεγχο δύναμης. Δεδομένης της ταχύτητας που χαρακτηρίζει αυτά τα φαινόμενα, ο βρόχος του ελέγχου πρέπει να εκτελείται σε συχνότητες της κλίμακας των kHz, ώστε να μπορεί το σύστημα να αντιληφθεί εγκαίρως τις διαταραχές. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται και εύρος ζώνης ελέγχου δύναμης (force control bandwidth) και αντιπροσωπεύει την ικανότητα ενός επενεργητή αφενός να αντιδράσει σε διαταραχές δύναμης και αφετέρου τη μέγιστη συχνότητα με την οποία μπορεί να μεταφερθεί ροπή από την είσοδο στην έξοδο του.

Επομένως, είναι επιτακτικό η μέτρηση δύναμης να μπορεί να γίνει αξιόπιστα. Στους ρομποτικούς βραχίονες, η μέτρηση δύναμης γίνεται με δύο τρόπους:

- 1. Απομακρυσμένη Μέτρηση Δύναμης (Non Co-located Force Sensing):** Σε αυτή την εκδοχή, ο έλεγχος δύναμης γίνεται μέσω ενός αισθητήρα δύναμης, ο οποίος τοποθετείται στο ΤΣΔ του βραχίονα. Αν και σχετικά απλή στην υλοποίηση, αυτή η λύση δεν είναι αξιόπιστη καθώς λόγω των διαρκών συγκρούσεων με το περιβάλλον, κινδυνεύει η ακεραιότητα του αισθητήρα. Επιπλέον, στο παρελθόν έχουν παρατηρηθεί προβλήματα ευστάθειας [9].
- 2. Εντοπισμένη Μέτρηση Δύναμης (Co-located Force Sensing):** Στην εντοπισμένη αίσθηση δύναμης, οι εξωτερικές δυνάμεις μετρούνται έμμεσα, μέσω των επενεργητών. Συγκεκριμένα, έστω ένας ρομποτικός βραχίονα  $n$  ΒΕ και με  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  συμβολίζεται το διάνυσμα των γωνιών των αρθρώσεων. Για αυτόν, ορίζεται ο ιακωβιανός πίνακας  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  (γεωμετρική ιακωβιανή), ο οποίος συσχετίζει τη γραμμική και γωνιακή ταχύτητα του ΤΣΔ στον καρτεσιανό χώρο με τις ταχύτητες των αρθρώσεων και εξαρτάται από τη γεωμετρία του βραχίονα:

$$\mathbf{V} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2-1)$$

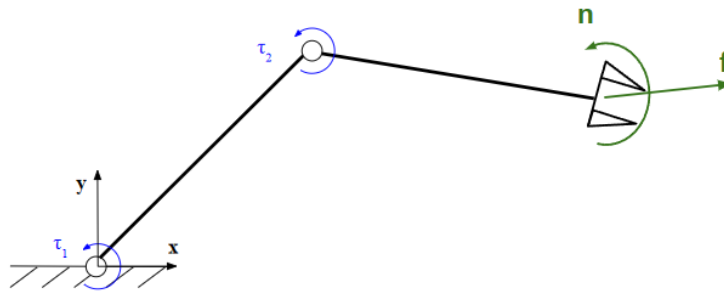
με  $\mathbf{V} = [V_x \ V_y \ V_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  και  $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \ \dots \ \dot{q}_n]^T$ . Προκύπτει πως οι δυνάμεις που ασκούνται από το ΤΣΔ στο περιβάλλον μπορούν να συσχετιστούν με τις ροπές των αρθρώσεων μέσω της γεωμετρικής ιακωβιανής [7]:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h} \quad (2-2)$$

όπου  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  το διάνυσμα των ροπών κάθε άρθρωσης και  $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^{r \times 1}$  το διάνυσμα δυναμοροπών (wrench), που ουσιαστικά περιέχει τις δυνάμεις ( $\mathbf{f}$ ) και ροπές ( $\mathbf{n}$ ) που ασκεί το ΤΣΔ στο περιβάλλον:  $\mathbf{h} = [\mathbf{f} \ \mathbf{n}]^T$  (βλ. Σχήμα 2-2). Με  $r$  συμβολίζεται η διάσταση του χώρου που μελετάται, δηλαδή ο αριθμός δυνάμεων ή/και ροπών. Έτσι, με



γνωστή την ιακωβιανή και τη ροπή στους επενεργητές, είναι δυνατό να υπάρξει μια εκτίμηση της δύναμης στο άκρο του βραχίονα.



Σχήμα 2-2. Βραχίονας δύο ΒΕ ο οποίος ασκεί στο περιβάλλον δυνάμεις  $f$  και ροπές  $n$ .

Όσον αφορά τη μέτρηση ροπής στους επενεργητές, υπάρχουν δύο κυρίαρχες υλοποιήσεις:

- i. **Μέσω ιδιοδεκτικότητας (proprioception):** Ορίζεται ως η εκτίμηση της δύναμης μέσω μέτρησης ρευμάτων στους επενεργητές, καθώς στους ηλεκτροκινητήρες, η ροπή και το ρεύμα σχετίζονται μέσω της σταθεράς ροπής  $k_t$ :

$$\tau = k_t i \quad (2-3)$$

Αποτελεί μια οικονομική και αξιόπιστη λύση, η οποία πλέον χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό περιπτώσεων, τόσο σε εφαρμογές ρομποτικού χειρισμού, όσο και βιάδισης. Απαιτεί όμως προσεκτικό σχεδιασμό, καθώς πρέπει οι δυνάμεις να φτάνουν στον επενεργητή όσο το δυνατόν πιο αναλλοίωτες, δηλαδή ο επενεργητής αλλά και το σύστημα να έχουν χαμηλή μηχανική εμπέδηση (βλ. παρακάτω).

- ii. **Μέσω αισθητήρα ή ελαστικού στοιχείου:** Αυτή η εκδοχή προτιμάται σε συστήματα τα οποία έχουν μεγάλους λόγους μείωσης στροφών. Συγκεκριμένα, στην έξοδο του συστήματος μείωσης στροφών τοποθετείται είτε ένα ελαστικό στοιχείο γνωστής δυσκαμψίας, μέσω των οποίων μετριέται η δύναμη με βάση τη σχετική μετατόπιση των άκρων του:

$$\tau = k \Delta \theta = k (\theta_L - \theta_g) \quad (2-4)$$

, όπου  $k$  η σταθερά δυσκαμψίας του ελατηρίου και  $\theta_g$ ,  $\theta_L$  η γωνιακή μετατόπιση στην είσοδο και έξοδο του ελατηρίου αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 2-5), είτε ένας αισθητήρας μέτρησης δύναμης / ροπής (strain-gauge ή load-cell). Όμως, οι αισθητήρες και τα συστήματα μείωσης στροφών καθιστούν αυτά τα συστήματα αρκετά ακριβότερα σε σχέση με αυτά που λειτουργούν με ιδιοδεκτικότητα. Επιπλέον, όπως θα φανεί και στη συνέχεια (βλ. Ενότητα 2.3), έχουν μειωμένο εύρος ζώνης ελέγχου δύναμης.

Από τις παραπάνω εναλλακτικές, ως καταλληλότερη κρίνεται η λύση του εντοπισμένου ελέγχου δύναμης και συγκεκριμένα μέσω ιδιοδεκτικότητας, λόγω της αξιοπιστίας, του χαμηλότερου κόστους της σε σχέση με τις εναλλακτικές, και της ευκολίας στην υλοποίησή. Η επιλογή αυτή αιτιολογείται και αναλύεται περαιτέρω στην Ενότητα 2.3.



**Χαμηλή Μηχανική Εμπέδηση (Low Mechanical Impedance):** Για να υλοποιηθεί οποιοδήποτε τύπος ελέγχου, στην προκειμένη περίπτωση έλεγχος δύναμης, πρέπει να είναι βέβαιο πως οι διαταραχές (εδώ εξωτερικές δυνάμεις) φτάνουν στους αισθητήρες (δηλαδή στους επενεργητές) αφενός αναλλοίωτες και αφετέρου εγκαίρως. Ως μηχανική εμπέδηση, ορίζεται οποιοδήποτε χαρακτηριστικό μπορεί να παρεμποδίσει τη μεταφορά της δύναμης από το σημείο άσκησης της στους επενεργητές. Συχνά παραδείγματα είναι η ροπή αδράνειας των κινούμενων μελών, η χάρη μεταξύ των οδόντων (backlash) σε συστήματα μετάδοσης κίνησης και μείωσης στροφών, η ενδοτικότητα μηχανικών στοιχείων όπως στους ιμάντες χρονισμού ή στους συνδέσμους του βραχίονα, και η τριβή σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Ένας συναφής όρος με τη χαμηλή μηχανική εμπέδηση που συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία είναι η διαφάνεια (transparency) του συστήματος, που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αναλλοίωτη διάδοση μιας διαταραχής από το ΤΣΔ στους επενεργητές.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως, για να υλοποιηθεί με επιτυχία η ενεργητική ενδοτικότητα, θα πρέπει να δοθεί προσοχή κατά το σχεδιασμό ώστε οι απαιτήσεις που τέθηκαν, να τηρούνται ταυτόχρονα σε επίπεδο επενεργητών, κατασκευής και συστήματος μετάδοσης κίνησης. Δηλαδή, η κατασκευή θα πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτη και ταυτόχρονα ελαφριά, οι επενεργητές θα πρέπει να έχουν επίσης χαμηλή ροπή αδράνειας, μικρή τριβή και ελάχιστη χάρη μεταξύ οδόντων (σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μείωση), όπως το ίδιο ισχύει και για το σύστημα μετάδοσης κίνησης, το οποίο πρέπει επιπλέον να έχει και χαμηλή ενδοτικότητα.

## 2.2.2 Μεγιστοποίηση Λόγου Ωφέλιμου Φορτίου προς Βάρος

Το χαμηλό βάρος είναι επιθυμητό στην πλειοψηφία των μηχανολογικών συστημάτων, καθώς συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος και στην περίπτωση ενός βραχίονα μικρότερη αιωρούμενη μάζα. Εξετάζοντας βραχίονες που προορίζονται για παρόμοιες εφαρμογές, τις προδιαγραφές των οποίων περιέχει ο Πίνακας 2-1, ο λόγος αυτός κυμαίνεται από 0.1 έως 0.3 και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Στόχος είναι ο λόγος αυτός για το σύστημα που θα αναπτυχθεί να είναι εντός του εύρους αυτού και όσο το δυνατόν υψηλότερος. Επιπλέον, καθώς πρόκειται για πρωτότυπο και δίνεται βάση στη μελέτη της ενδοτικότητας, το ωφέλιμο φορτίο χρειάζεται να είναι τέτοιο ώστε να μπορούν να επιτευχθούν οι βασικές λειτουργίες του βραχίονα όταν αυτός λειτουργεί στην ονομαστική περιοχή λειτουργίας. Έτσι, κρίνονται ως ικανοποιητική τιμή τα 0.5 kg.

**Πίνακας 2-1. Προδιαγραφές βραχιόνων που προορίζονται για αντίστοιχες εφαρμογές [3] [4] [6] [10] [11]. Όπου εισάγεται (-) δεν είναι διαθέσιμη η προδιαγραφή.**

Ρομπότ	Βάρος [kg]	Ωφέλιμο Φορτίο [kg]	Βάρος/Ωφέλιμο Φορτίο [-]	Μέγιστη Έκταση [mm]	Μέγιστη Γραμμική Ταχύτητα ΤΣΔ [m/s]	Κόστος [\$]
Quigley's Low-Cost Manipulator	11.4	2	0.175	1000	1.5	4135
BLUE	8.7	2	0.229	700	2.1	3328
Kinova Gen 3	8.2	2	0.244	902	0.5	-

Kuka LBR iiwa 7	24	7	0.292	900	-	67000
UR 5	18.4	5	0.272	850	1	27000
Barret WAM	27	3	0.111	1000	3	135000

### 2.2.3 Χρήσιμο Χώρο Εργασίας

Ως χώρος εργασίας ορίζεται το τμήμα του περιβάλλοντος στο οποίο έχει πρόσβαση το ΤΣΔ. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως δεν έχει σημασία μόνο η τιμή του ωφέλιμου φορτίου, αλλά και τι εύρος κίνησης μπορεί να έχει με αυτό. Γίνεται η παραδοχή πως, δεδομένου ότι στις απαιτήσεις της εφαρμογής περιλαμβάνεται η συνεργασία του βραχίονα με ανθρώπους, ο βραχίονας πρέπει να καλύπτει χώρο εργασίας αντίστοιχο με ενός ανθρώπινου χεριού. Λαμβάνοντας υπόψη και άλλους βραχίονες αντίστοιχων εφαρμογών (Πίνακας 2-1), τίθεται σαν κατώτατο όριο της μέγιστης έκτασης του βραχίονα η τιμή 700 mm.

### 2.2.4 Ελαχιστοποίηση Κόστους

Όπως επισημάνθηκε και στην εισαγωγή, η ελαχιστοποίηση του κόστους είναι από τους βασικούς στόχους της εργασίας. Ανατρέχοντας στον Πίνακα 2-1, παρατηρείται πως οι οικονομικοί βραχίονες που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικό επίπεδο (Quigley's Manipulator και BLUE) με αυτό το σκοπό κοστίζουν μια τάξη μεγέθους κάτω σε σχέση με τους αντίστοιχους του εμπορίου. Έτσι, τίθεται η απαίτηση το κόστος του συστήματος της παρούσης εργασίας να βρίσκεται στο εύρος τιμών των βραχιόνων αυτών, δηλαδή στην περιοχή 2000€ - 4000€.

### 2.2.5 Μικρή Πολυπλοκότητα

Χωρίς να είναι επιτακτικό, επιδιώκεται η πολυπλοκότητα της κατασκευής να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Έτσι, επιτυγχάνεται πιο εύκολη συναρμολόγηση και επισκευή, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πιθανότητα αστοχίας, που είναι ανάλογη του αριθμού των εξαρτημάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι σχεδιαστικές λύσεις για τις κύριες συνιστώσες του βραχίονα.

## 2.3 Συστήματα Επενέργησης

Εξετάζοντας τις σχεδιαστικές απαιτήσεις (βλ. Ενότητα 2.2), μπορεί κανείς να τις ανάξει σε χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει μια μονάδα επενέργησης ώστε να μπορεί να εξασφαλίσει την επιθυμητή λειτουργία του βραχίονα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής:

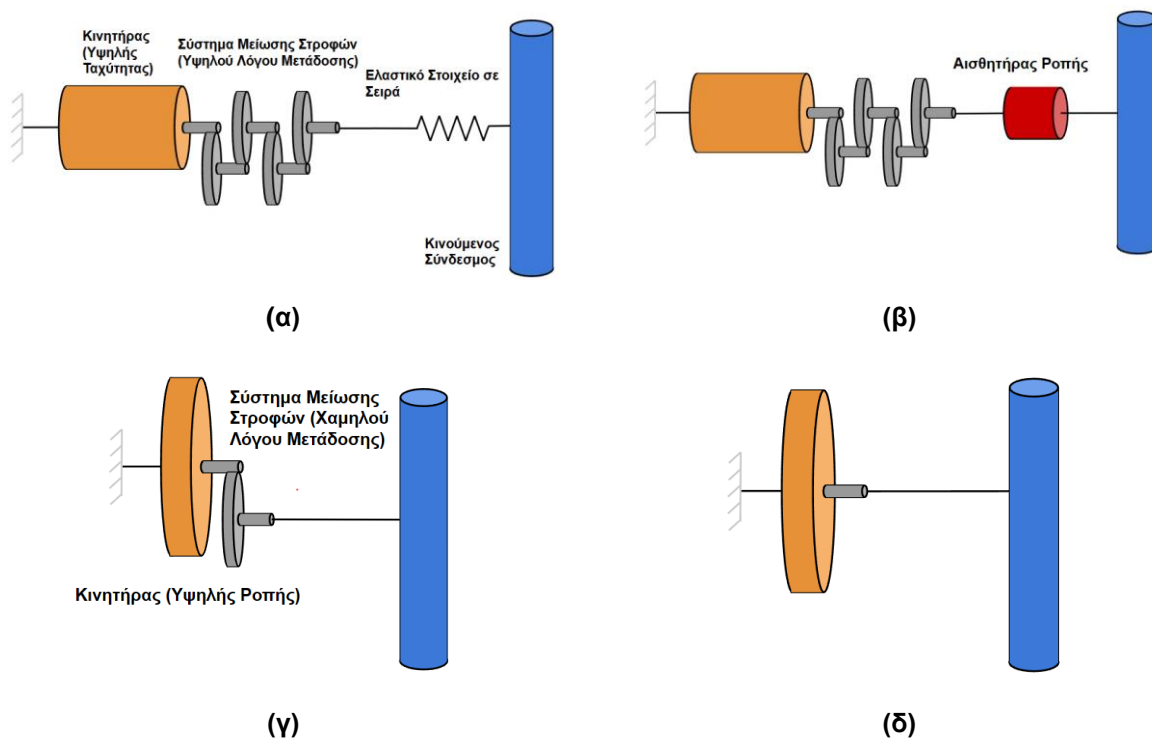
- **Εντοπισμένη Αίσθηση Δύναμης.** Όπως αναφέρθηκε, επιλέγεται ο έλεγχος δύναμης του ρομπότ να γίνεται μέσω μέτρησης ροπής στους επενεργητές.
- **Υψηλή Πυκνότητα Ροπής.** Η ανάγκη για υψηλό λόγο ωφέλιμου φορτίου προς βάρος συνεπάγεται πως οι ίδιοι οι επενεργητές πρέπει να διαθέτουν αυτό το χαρακτηριστικό (πυκνότητα ροπής ορίζεται ως η διαθέσιμη ροπή ανά μονάδα μάζας του επενεργητή).
- **Υψηλό Εύρος Ζώνης.** Για την επίτευξη της ενεργητικής ενδοτικότητας, πρέπει η συχνότητα μέτρησης ισχύος και η ικανότητα άσκησης ροπής να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

- Χαμηλό Κόστος.

Εν γένει, υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι επενέργησης, αναλόγως τον τύπο διαθέσιμης ισχύος. Εάν και κατά περιόδους έχουν αναπτυχθεί ρομποτικά συστήματα που λειτουργούν με υδραυλικούς και πνευματικούς επενεργητές με επιτυχία, τα εν λόγω συστήματα παρουσιάζουν πολλές δυσκολίες στην υλοποίηση, αυξημένο κόστος και μάζα. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [12] για παραπάνω πληροφορίες.

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται ηλεκτρομηχανική επενέργηση, δηλαδή μέσω ηλεκτροκινητήρων, λόγω των καλών χαρακτηριστικών πυκνότητας ροπής τα οποία έχουν βελτιωθεί ακόμα περισσότερο τα τελευταία χρόνια, του χαμηλού κόστους τους και την ευκολία στον έλεγχο τους.

Στο Σχήμα 2-3, παρατίθενται αναπαραστάσεις των τεσσάρων πιο συχνά χρησιμοποιούμενων και επιτυχημένων συστημάτων ηλεκτρομηχανικής επενέργησης, που ικανοποιούν τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Πρόκειται είτε για συστήματα με κινητήρες υψηλών στροφών που συνδυάζονται με ένα σύστημα μείωσης στροφών υψηλού λόγου μετάδοσης (1:10 έως 1:100) και ένα στοιχείο για την μέτρηση ροπής (είτε στροφικό ελατήριο σε σειρά, είτε αισθητήρας ροπής), είτε για συστήματα με κινητήρες υψηλής ροπής που είτε χρησιμοποιούνται αυτούσιοι (επενεργητές άμεσης μετάδοσης - EAM (direct-drive)), είτε συνδυάζονται με ένα σύστημα μείωσης στροφών χαμηλού λόγου μετάδοσης (1:2 έως 1:10) (επενεργητές ψευδοάμεσης μετάδοσης - ΕΨΑΜ (quasi-direct-drive)).



Σχήμα 2-3. Σχηματική αναπαράσταση των συστημάτων ηλεκτρομηχανικής επενέργησης που έχουν τη δυνατότητα μέτρησης δύναμης. Φαίνονται (α) ο ΣΕΕ και (β) η παραλλαγή του με αισθητήρα ροπής αντί για στροφικό ελατήριο και οι (γ) ΕΨΑΜ και (δ) EAM.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να οριστεί η έννοια του backdrivability, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μηχανική εμπέδηση. Ένα σύστημα θεωρείται backdrivable, όταν μπορεί να υπάρξει μετάδοση ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, είσοδο προς έξοδο και

το αντίστροφο. Στην περίπτωση του βραχίονα, ως έξοδος θεωρείται το ΤΣΔ και ως είσοδος οι επενεργητές, και συγκεκριμένα οι κινητήρες. Ορίζονται δύο τύποι backdrivability [13]:

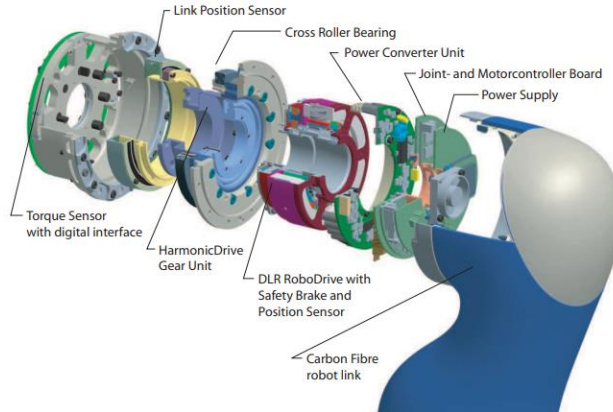
- **Backdrivability εξαρτώμενο από την επιτάχυνση (acceleration-dependent backdrivability):** Ένα σύστημα στο οποίο όταν ασκηθεί δύναμη στον έξοδο αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις τάξης μεγέθους μεγαλύτερες από τη διαταραχή, υπολείπεται backdrivability εξαρτώμενο από την επιτάχυνση. Στην περίπτωση του βραχίονα, αυτό συμβαίνει εάν είναι μεγάλες οι μάζες των συνδέσμων, ή χρησιμοποιείται μεγάλος λόγος μετάδοσης στα συστήματα μείωσης στροφών στους επενεργητές. Όσον αφορά το τελευταίο, το πρόβλημα προκύπτει λόγω της δυναμικής της ροπής αδράνειας του δρομέα των κινητήρων και του λόγου μετάδοσης. Συγκεκριμένα, προκύπτει πως εάν  $N$  ο λόγος μετάδοσης και  $J_m$  η ροπή αδράνειας του δρομέα, η ισοδύναμη ροπή αδράνειας του δρομέα στην πλευρά του φορτίου είναι ίση με  $N^2 J_m$ , δηλαδή αυξάνεται με το τετράγωνο του λόγου μετάδοσης [7]. Η τελευταία είναι γνωστή και ως αντανακλώμενη ροπή αδράνειας (reflected inertia). Εάν λοιπόν οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την επιτάχυνση του δρομέα ή ενός συνδέσμου είναι συγκρίσιμες ή ξεπερνούν τις δυνάμεις μιας διαταραχής ή του φορτίου, η μεταφορά δύναμης από την έξοδο στην είσοδο είναι αδύνατη.
- **Backdrivability εξαρτώμενο από την ταχύτητα (velocity-dependent backdrivability):** Σχετίζεται με το μέγεθος των δυνάμεων τριβής που εμφανίζονται όταν στην έξοδο του συστήματος επιβληθεί μια ταχύτητα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τριβές, τόσο μικρότερο το backdrivability. Ένα τέτοιο σύστημα είναι για παράδειγμα η μετάδοση κίνησης μέσω κοχλία-περικοχλίου, όπου είναι πρακτικά μη-backdrivable.

Επομένως, γίνεται κατανοητό τώρα το γιατί στην περίπτωση μεγάλου λόγου μετάδοσης είναι αδύνατη η μέτρηση δύναμης μέσω του ρεύματος, και επομένως είναι αναγκαία η συμπερίληψη κάποιου επιπλέον στοιχείου για να επιτελεί αυτή τη λειτουργία. Αυτή η προσέγγιση ακολουθείται στην περίπτωση των ΣΕΕ. Αυτός, όπως και οι υπόλοιποι τρόποι επενέργησης, παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

### **Σειριακός Επενεργητής με Ελαστικότητα (Series Elastic Actuator)**

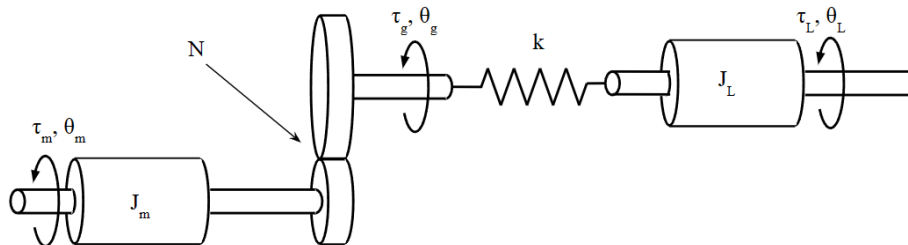
Οι Σειριακοί Επενεργητές με Ελαστικότητα (ΣΕΕ) για συστήματα επενέργησης που αποτελούνται από έναν κινητήρα υψηλής ταχύτητας, ένα σύστημα μείωσης στροφών (συνήθως αρμονικός μειωτήρας στροφών (harmonic drive)) και ένα ελατήριο σε σειρά (βλ. Σχήμα 2-3). Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, για μεγάλους λόγους μετάδοσης το σύστημα χάνει την ιδιοδεκτικότητά του, στους ΣΕΕ η μέτρηση ροπής επιτυγχάνεται μέσω του στροφικού ελατηρίου γνωστής δυσκαμψίας, μετρώντας τη διαφορά της γωνιακής θέσης μεταξύ των άκρων του.

Μια παραλλαγή αυτού του επενεργητή προκύπτει εάν θέση του ελαστικού στοιχείου χρησιμοποιηθεί αισθητήρας ροπής. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται με επιτυχία σε πληθώρα επενεργητών και μάλιστα από τους πιο διαδεδομένους βραχίονες συνεργασίας, όπως ο KUKA LBR iiwa [5] (βλ. Σχήμα 2-4).



**Σχήμα 2-4.** Το σύστημα επενέργειας του ρομπότ KUKA LBR-iiwa. Παρατηρείται η χρήση αρμονικού μειωτήρα στροφών (harmonic drive gear unit) και αισθητήρα ροπής (torque sensor with digital interface). Πηγή εικόνας: [5].

Οι ΣΕΕ (και η παραλλαγή με τον αισθητήρα δύναμης), έχουν δύο βασικά μειονεκτήματα. Αρχικά, η πολυπλοκότητά τους και τα στοιχεία που τους αποτελούν, κυρίως το σύστημα μείωσης στροφών και ο αισθητήρας ροπής, έχουν αυξημένο κόστος, σε βαθμό που τα καθιστούν εκτός των προδιαγραφών της εργασίας. Πέραν αυτού, στην περίπτωση που η μέτρηση δύναμης γίνεται μέσω ελατηρίου, αυτό λειτουργεί σαν χαμηλοπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης, που σημαίνει πως απορροφά τα φορτία μεγάλης συχνότητας. Αυτό, αν και προστατεύει το σύστημα από κρουστικές φορτίσεις, ταυτόχρονα μειώνει το εύρος ζώνης ελέγχου δύναμης του συστήματος, δηλαδή το σύστημα δεν μπορεί να αντιληφθεί ή/και να αντιδράσει εγκαίρως σε διαταραχές μεγάλης συχνότητας. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, στο Σχήμα 2-5 φαίνεται η μοντελοποίηση των επενεργητών που περιεγράφηκαν. Όπως φαίνεται, αποτελείται από έναν κινητήρα, ένα σύστημα μείωσης στροφών λόγω μετάδοσης  $N$ , ένα ελατήριο δυσκαμψίας  $k$  και ένα φορτίο το οποίο αντιπροσωπεύεται από μια ροπή αδράνειας  $J_L$ . Το φορτίο στην περίπτωση του βραχίονα αντιστοιχεί στο σύνδεσμο τον οποίο κινεί ο επενεργητής (αιωρούμενη αδράνεια). Το μοντέλο αυτό, μπορεί να αναπαραστήσει οποιοδήποτε από τα παραπάνω συστήματα επενέργειας, αναλόγως τις τιμές των παραμέτρων του. Δηλαδή, για χαμηλή δυσκαμψία ελατηρίου και υψηλό λόγο μείωσης αναπαριστά το ΣΕΕ, ενώ για μεγάλη δυσκαμψία και χαμηλούς λόγους μείωσης αναπαριστά ΕΑΜ και ΕΨΑΜ.

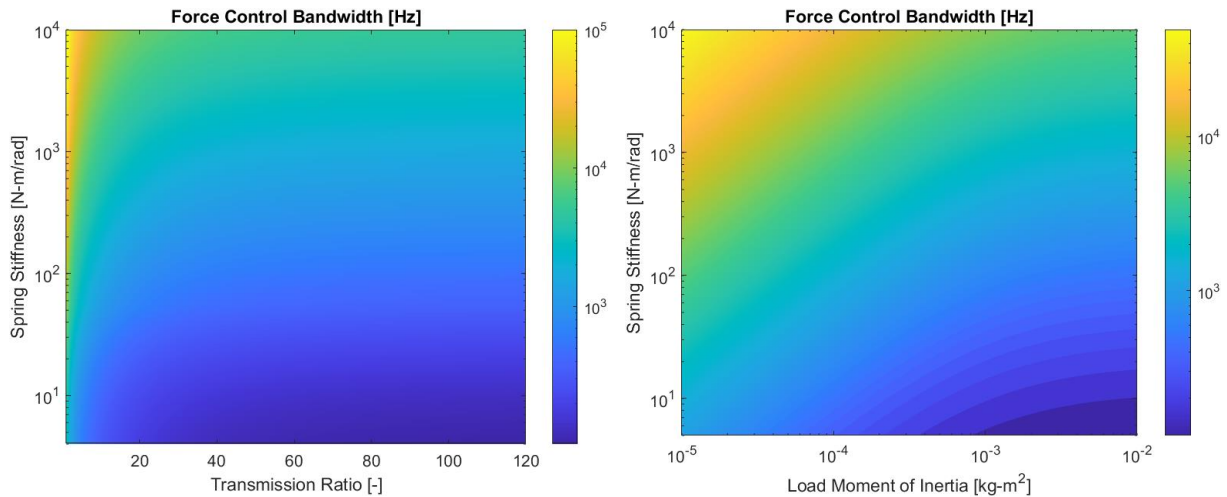


**Σχήμα 2-5.** Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου επενεργητή. Με “m” συμβολίζονται τα μεγέθη που αντιστοιχούν στον κινητήρα, με “g” του συστήματος μετάδοσης κίνησης και με “L” του φορτίου.

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος αυτού, για είσοδο τη ροπή του κινητήρα και έξοδο τη ροπή που αναπτύσσεται στο φορτίο είναι

$$\frac{\tau_L}{\tau_m} = \frac{J_L k N}{J_L J_M N s^2 + k (J_M N^2 + J_L)} \quad (2-5)$$

Το εύρος ζώνης αυτής της συνάρτησης μεταφοράς αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης ελέγχου δύναμης του συστήματος. Στο Σχήμα 2-6 έχουν σχεδιαστεί οι τιμές του εύρους ζώνης συναρτήσει της δυσκαμψίας του ελατηρίου, του λόγου μετάδοσης και της ροπής αδράνειας του φορτίου (συνδέσμου).



**Σχήμα 2-6.** Η διαμόρφωση του εύρους ζώνης ελέγχου δύναμης συναρτήσει της δυσκαμψίας του ελατηρίου, του λόγου μετάδοσης και της ροπής αδράνειας της εξόδου.

Μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής. Όπως φαίνεται, αρχικά, το εύρος ζώνης είναι ανάλογο της δυσκαμψίας του ελατηρίου, που είναι σε συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν πριν. Επιπλέον, αποδεικνύεται πως είναι αντιστρόφως ανάλογο του λόγου μετάδοσης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή όσο μεγαλώνει ο λόγος μετάδοσης, η αντανακλώμενη ροπή αδράνειας του κινητήρα αυξάνεται, που δρα ανασταλτικά στην αντιδραστικότητα του συστήματος (μειώνεται το backdrivability εξαρτώμενο από την επιτάχυνση). Αυτό το συμπέρασμα ενισχύεται και από την επίδραση της ροπής αδράνειας του φορτίου, όπου είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογη του εύρους ζώνης.

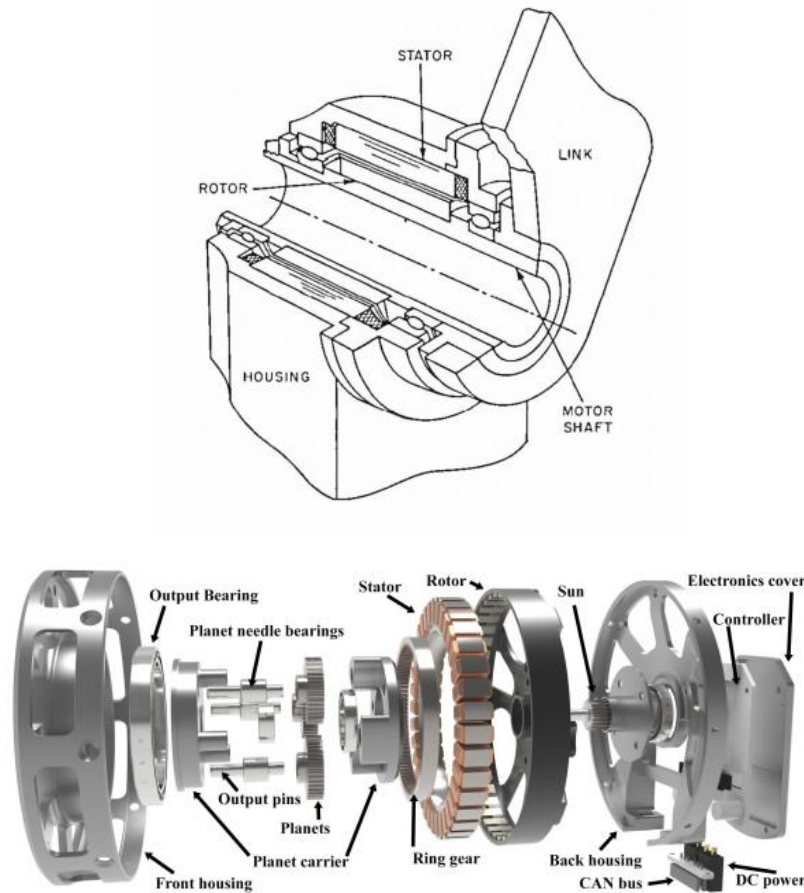
Συνοψίζοντας, για να επιτευχθεί μέγιστο εύρος ζώνης ελέγχου δύναμης σε επίπεδο επενεργητή, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι ενδοτικότητες των διαφόρων στοιχείων του (εδώ ελατήριο) και ο λόγος μείωσης στροφών. Επιπλέον, αν και όχι άμεσα σχετιζόμενο με την επιλογή επενεργητών, εξήχθησε ένα χρήσιμο συμπέρασμα για τη μάζα των συνδέσμων, η οποία πρέπει να είναι ελάχιστη όχι μόνο για λόγους κατανάλωσης και κόστους, αλλά και για τις επιδόσεις του βραχίονα ως προς τον έλεγχο δύναμης. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως, σε ότι αφορά το εύρος ζώνης του συστήματος, ο ΣΕΕ αποδίδει χειρότερα από τις εναλλακτικές (ΕΑΜ και ΕΨΑΜ), λόγω της ύπαρξης του ελατηρίου και του μεγάλου λόγου μείωσης. Οι παραλλαγές του ΣΕΕ που χρησιμοποιούν αισθητήρες δύναμης, αν και εξαλείφουν το πρόβλημα του ελατηρίου, απορρίπτονται λόγω του μεγάλου κόστους.

### **Επενεργητές Άμεσης και Ψευδοάμεσης Μετάδοσης**

Οι επενεργητές άμεσης και ψευδοάμεσης μετάδοσης (ΕΑΜ και ΕΨΑΜ), σε αντίθεση με τους ΣΕΕ, χρησιμοποιούν κινητήρες υψηλής ροπής και έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για μεγάλη

μείωση στροφών. Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, οι λόγοι μετάδοσης κυμαίνονται από 1:1 (που σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ΕΑΜ) έως 1:10 (ΕΨΑΜ) (βλ. Σχήμα 2-7).



**Σχήμα 2-7. Παράδειγμα επενεργητή (πάνω) άμεσης και (κάτω) ψευδοάμεσης μετάδοσης. Πηγές εικόνων: [14] [15].**

Οι ΕΑΜ, μελετήθηκαν για πρώτη φορά το 1982 από τους Asada και Toumi στο πλαίσιο ρομποτικών χειριστών, σε διάφορες εκδοχές [14]. Η αφαίρεση του συστήματος μείωσης στροφών προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, εξαλείφονται οποιεσδήποτε ανακρίβειες στον έλεγχο θέσης λόγω τριβής ή χάρης οδόντων στο μειωτήρα στροφών. Για τον ίδιο λόγο, βελτιώνεται και ο έλεγχος δύναμης μέσω ιδιοδεκτικότητας, καθώς πλέον δεν είναι παρόντα τα φαινόμενα που προσέδιδαν μηχανική εμπέδηση στο σύστημα. Τέλος, δίνονται επιπλέον δυνατότητες για τον έλεγχο, όπως μέθοδοι ελέγχου βασισμένοι στη μοντελοποίηση (model-based methods), καθώς η απώλεια πηγών μη-γραμμικότητας στο σύστημα, όπως η τριβή, επιτρέπει ακριβή μοντελοποίηση του συστήματος. Τέλος, λόγω της απώλειας μείωσης είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμες οι δυνατότητες ανάπτυξης ταχύτητας του κινητήρα, οδηγώντας έτσι σε ένα σημαντικά πιο γρήγορο ρομπότ.

Ένας περιοριστικός, αλλά όχι αποτρεπτικός, παράγοντας για τους ΕΑΜ μέχρι πρόσφατα ήταν η διαθέσιμη ροπή. Ως επί το πλείστον, οι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να προσφέρουν υψηλές στροφές, αλλά υπολείπονται της δυνατότητας ανάπτυξης ροπής. Όμως, την τελευταία δεκαετία, αναπτύχθηκαν κινητήρες μεγαλύτερης διαμέτρου, οι οποίοι αν και αρχικά προορίζονταν για drones, βρήκαν εφαρμογή στη ρομποτική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω της γεωμετρίας τους μπορούν να αναπτύξουν πολύ μεγαλύτερη ροπή από τους



πρόσφατα χρησιμοποιούμενους [16] και για αυτό άρχισαν να ενσωματώνονται σε ρομποτικά συστήματα.

Στις περιπτώσεις που η ροπή αυτή δεν επαρκεί, συνδυάζεται με ένα σύστημα μείωσης στροφών (συνήθως πλανητικός μειωτήρας) χαμηλού λόγου μετάδοσης (1:5 έως 1:10) και έτσι άρχισαν να αποκτούν δημοσιότητα και οι ΕΨΑΜ. Αυτοί, συνδυάζουν έως ένα βαθμό τις δύο προσεγγίσεις (ΕΑΜ και κινητήρες υψηλών στροφών με μεγάλους λόγους μείωσης). Κατά συνέπεια, έχουν τη δυνατότητα ελέγχου δύναμης μέσω ιδιοδεκτικότητας, αν και μειωμένη σε σχέση με έναν ΕΑΜ, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να αναπτύξουν ροπή συγκρίσιμη με ένα σύστημα μεγάλου λόγου μείωσης. Παρ' ολ' αυτά, για να είναι πραγματικά δυνατή η ιδιοδεκτικότητα, πρέπει το σύστημα μείωσης στροφών (συνήθως πλανητικός μειωτήρας), να είναι κατασκευασμένος με μεγάλη ακρίβεια για την ελαχιστοποίηση της χάρης οδόντων. Επιπλέον, καθώς δεν υπάρχει κάποιο ελαστικό στοιχείο για να αποσυμπλέξει τον επενεργητή από τα κρουστικά φορτία, τα γρανάζια δέχονται μεγάλες καταπονήσεις, επομένως πρέπει να είναι εξαιρετικά καλών προδιαγραφών. Όλα αυτά, αυξάνουν σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος επενέργησης.

### **Συμπεράσματα**

Από τα παραπάνω φαίνεται πως οι επενεργητές τύπου ΣΕΕ, έχουν υποβαθμισμένες επιδόσεις σε θέματα ελέγχου δύναμης, τα οποία μπορούν να εξαιρεθούν μόνο εάν αυξηθεί το κόστος του συστήματος. Όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης ΣΕΕ αλλά παραμένουν υψηλές οι απαιτήσεις ροπής, η αμέσως επόμενη λύση είναι οι ΕΨΑΜ, οι οποίοι επιτυγχάνουν έλεγχο δύναμης μέσω ιδιοδεκτικότητας, έχουν χαμηλότερο κόστος από τους ΣΕΕ και ικανές δυνατότητες ροπής. Παρ' ολ' αυτά, οι κινητήρες του εμπορίου πλέον παρέχουν αρκετή ροπή ώστε ένα σύστημα ΕΑΜ να είναι εφικτό, όταν είναι διαθέσιμη και η απαιτούμενη ισχύς. Δεδομένου πως δεν πρόκειται για ένα ρομπότ που στηρίζεται σε παροχή ισχύος από μπαταρίες, όπως θα ήταν στην περίπτωση ενός ποδιού τετράποδου ρομπότ ή ενός βραχίονα σε τροχοφόρο όχημα, μπορεί να αναπτυχθεί ένα οικονομικότερο σύστημα, με βελτιωμένο έλεγχο δύναμης το οποίο δεν υπολείπεται δυνατοτήτων διαχείρισης ωφέλιμου φορτίου και ανάπτυξης ταχύτητας. Επομένως, ως μέθοδος επενέργησης επιλέγεται η ΕΑΜ.

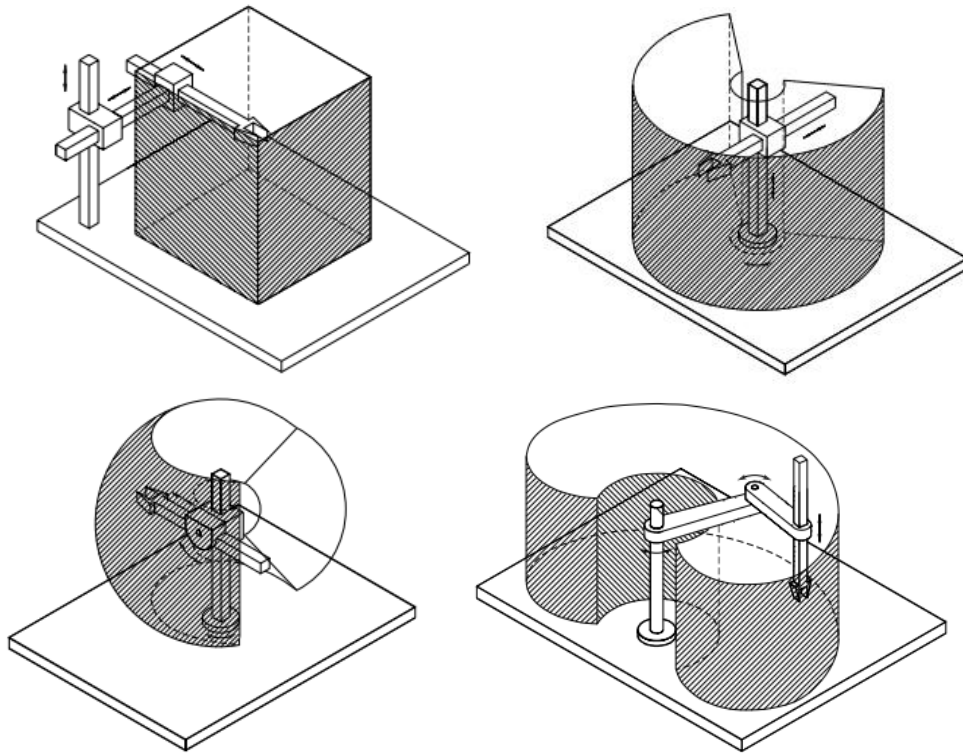
## **2.4 Μηχανική Δομή Βραχίονα**

Η μηχανική δομή (ή γεωμετρία ή τοπολογία) του βραχίονα είναι σημαντική καθώς αυτή καθορίζει το χώρο εργασίας του. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από συνδέσμους, που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις. Η ακολουθία, ο τύπος, ο προσανατολισμός και τα όρια των αρθρώσεων οδηγούν σε διαφορετικές μηχανικές δομές βραχίονα με τους αντίστοιχους χώρους εργασίας.

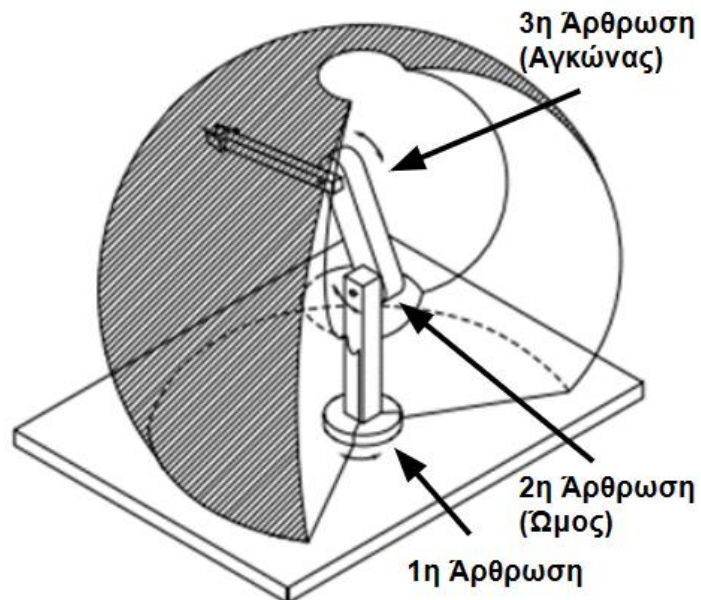
Στο Σχήμα 2-8 και Σχήμα 2-9, φαίνονται οι πιο συχνά απαντώμενες δομές βραχιόνων τριών ΒΕ που προκύπτουν από συνδυασμούς πρισματικής και περιστροφικής άρθρωσης. Από αυτές, η δομή που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε βραχίονες συνεργασίας είναι η ανθρωπομορφική (βλ. Σχήμα 2-9). Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ο μεγαλύτερος χώρος εργασίας σε σχέση με τις άλλες δομές, αλλά εκτός αυτό είναι και η πιο μηχανικά αξιόπιστη δομή, καθώς αποτελείται μόνο από περιστροφικές αρθρώσεις. Για αυτούς τους λόγους, θα υιοθετηθεί και στην παρούσα εργασία. Επίσης, αναφέρεται πως λόγω της ομοιότητας της με ανθρώπινο βραχίονα, η δεύτερη και η τρίτη άρθρωση κατά σύμβαση ονομάζονται και άρθρωση του ώμου (ή ώμος) και άρθρωση του αγκώνα (ή αγκώνας) αντίστοιχα, όπως



φαίνεται στο Σχήμα 2-9. Αυτή η ονοματολογία θα χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2-8. Παραδείγματα μηχανικών δομών ρομποτικών βραχιόνων τριών ΒΕ που προκύπτουν από διάφορους συνδυασμούς περιστροφικών και πρισματικών αρθρώσεων: (α) καρτεσιανός, (β) κυλινδρικός, (γ) σφαιρικός και (δ) SCARA. Πηγή εικόνων: [7].



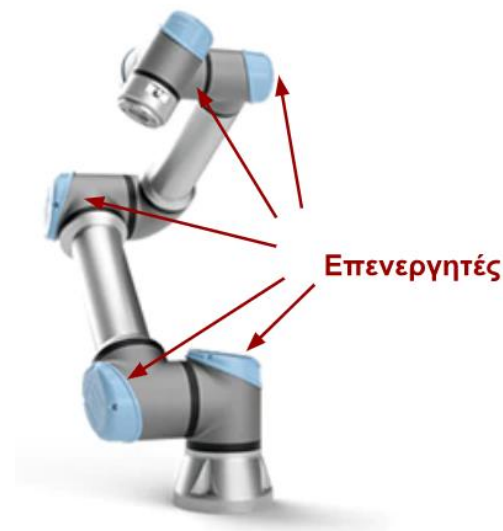
Σχήμα 2-9. Η μηχανική δομή γνωστή και ως ανθρωπομορφικός βραχίονας. Έχει σημειωθεί η αρίθμηση των αρθρώσεων και η σχετική ονοματολογία. Πηγή εικόνας: [7].

## 2.5 Τοποθέτηση Επενεργητών

Ένα ερώτημα που προκύπτει μετά την επιλογή της δομής του βραχίονα είναι τα σημεία τοποθέτησης των επενεργητών σε σχέση με τις αρθρώσεις. Στη βιβλιογραφία και στο εμπόριο μπορούν να βρεθούν πολλές εναλλακτικές λύσεις, οι επικρατούσες εκ των οποίων αναλύονται στη συνέχεια.

### Σειριακή Διάταξη

Η πιο συνηθισμένη είναι η σειριακή διάταξη, στην οποία οι επενεργητές τοποθετούνται απευθείας πάνω στις αρθρώσεις. Αυτή χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των co-bots σήμερα. Αυτό είναι δυνατό επειδή, όπως έχει αναφερθεί μέχρι τώρα, χρησιμοποιούν ως επί το πλείστο ΣΕΕ, επομένως υπάρχει περίσσεια ροπής στο σύστημα, επιτρέποντας στον κάθε επενεργητή να υποστηρίξει το βάρος των επόμενων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι βραχίονες UR5e και KUKA LBR-iiwa [5] (βλ. Σχήμα 2-10). Έχει αποδειχτεί όμως πως σε συστήματα EAM, μια τέτοια υλοποίηση είναι μη πρακτική, έως και αδύνατη, καθώς το μέγεθος των κινητήρων πρέπει να αυξάνεται εκθετικά από το ΤΣΔ στη βάση για να μπορούν να διαθέσουν την απαιτούμενη ροπή και επομένως προκύπτει ένα πολύ ακριβό σύστημα, με μη αποδεκτό λόγο ωφέλιμου φορτίου προς βάρος [17].



Σχήμα 2-10. Ο βραχίονας UR5e, με σειριακή διάταξη επενεργητών. Πηγή εικόνας: [1].

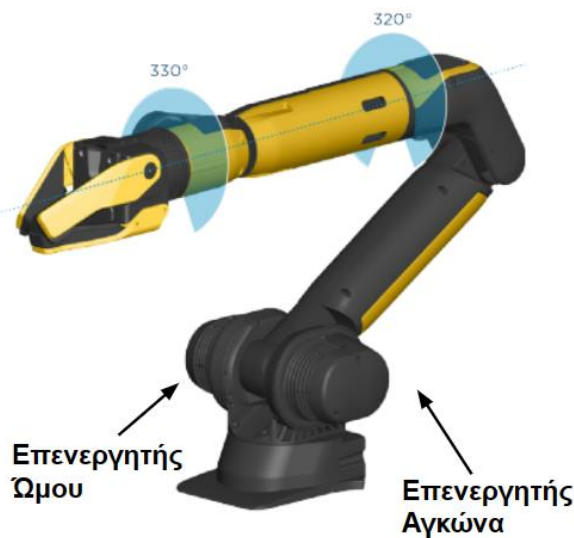
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια παραλλαγή αυτής της τοποθέτησης, στην οποία ο επενεργητής του αγκώνα τοποθετείται κοντά στη βάση και η ισχύς μεταφέρεται στην άρθρωση μέσω ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η αιωρούμενη μάζα του συστήματος και επομένως οι απαιτήσεις ροπής των προηγούμενων επενεργητών. Αυτή η εκδοχή παρατηρείται συχνά στα πόδια τετράποδων ρομπότ, όπως στο MIT Cheetah 3 και στο Mini Cheetah του MIT [18] [15] (βλ. Σχήμα 2-11) και ενδεχομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και στο βραχίονα. Από εδώ και στο εξής, όταν γίνεται αναφορά σε σειριακή διάταξη, θα εννοείται η συγκεκριμένη παραλλαγή.



Σχήμα 2-11. Συστήματα με σειριακή διάταξη κινητήρων, με τον επενεργητή του αγκώνα (εδώ γονάτου (knee actuator)) τοποθετημένο κοντά στη βάση. Φαίνονται τα πόδια (αριστερά) του MIT Cheetah 3 και του Mini Cheetah του MIT. Πηγές εικόνων: [18] [15].

### Παράλληλη Διάταξη

Μια επίσης συχνή υλοποίηση είναι αυτή της παράλληλης διάταξης, στην οποία οι επενεργητές και του ώμου και του αγκώνα τοποθετούνται στη βάση (βλ. Σχήμα 2-12) και η ισχύς μεταφέρεται στον αγκώνα πάλι με κάποιο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση είναι πως τώρα ο δεύτερος είναι αποσυμπλεγμένος από τον πρώτο. Αν και εκ πρώτης όψεως τα δύο συστήματα φαίνεται να έχουν παρόμοιες ιδιότητες, όπως θα φανεί στη συνέχεια επιλογή μεταξύ σειριακού και παράλληλου μηχανισμού είναι κρίσιμη για τις επιδόσεις του βραχίονα.

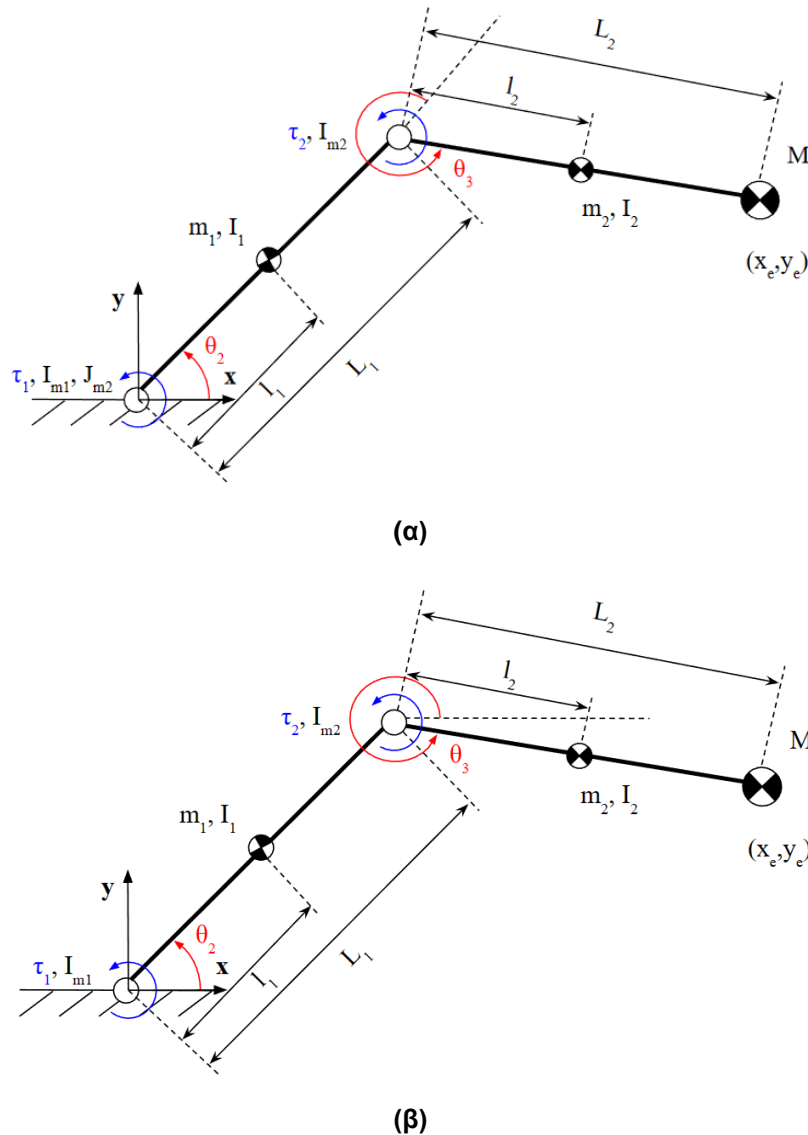


Σχήμα 2-12. Παράδειγμα ρομποτικού βραχίονα με παράλληλη διάταξη κινητήρων ώμου και αγκώνα. Πηγή εικόνας: [19].

Για να μπορέσει να γίνει μια τεκμηριωμένη επιλογή μεταξύ των δύο φαινομενικά παρόμοιων εναλλακτικών, γίνεται μια εκτενής ανάλυση που παρουσιάζεται παρακάτω. Για την ανάλυση αυτή όπως και για όλες αντίστοιχες ακολουθήσουν έχει υλοποιηθεί κώδικας στο λογισμικό MATLAB της εταιρείας MathWorks, ο οποίος μπορεί να βρεθεί στο CD που παρέχεται μαζί με την εργασία.

### 2.5.1 Στοιχεία Θεωρίας

Αρχικά, αναπτύσσονται τα μοντέλα των δύο μηχανισμών στο επίπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-13. Η ανάλυση σε δύο διαστάσεις αρκεί καθώς η συμβολή του πρώτου βαθμού ελευθερίας δεν είναι σημαντική. Αντιθέτως, τη μεγαλύτερη φόρτιση την παραλαμβάνει ο κινητήρας του ώμου και σε κάποιες περιπτώσεις ο κινητήρας του αγκώνα.



Σχήμα 2-13. Το μοντέλο της (α) σειριακής και (β) παράλληλης διάταξης κινητήρων στο επίπεδο. Τον ορισμό των συμβόλων περιλαμβάνει ο Πίνακας 2-2.

Από τα μοντέλα, αρχικά μπορούν να βρεθούν οι κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των συστημάτων.

#### Εξισώσεις Κίνησης – Ευθεία Κινηματική

Αρχικά, βρίσκονται οι εξισώσεις της ευθείας κινηματικής, δηλαδή η θέση του ΤΣΔ συναρτήσει των γωνιών των αρθρώσεων. Στην περίπτωση δύο διαστάσεων, μπορούν να προσδιοριστούν κατ' ευθείαν από τη γεωμετρία των βραχιόνων.

- Σειριακή Διάταξη

$$x_e = L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (2-6)$$

$$y_e = L_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (2-7)$$

- *Παράλληλη Διάταξη*

$$x_e = L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_3 \quad (2-8)$$

$$y_e = L_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin \theta_3 \quad (2-9)$$

### **Εξισώσεις Κίνησης – Αντίστροφη Κινηματική**

Αντίστοιχα, ορίζονται οι εξισώσεις της αντίστροφης κινηματικής, από τις οποίες προκύπτει η τιμή των γωνιών των αρθρώσεων, συναρτήσει της θέσης του ΤΣΔ. Όπως και πριν, σε δύο διαστάσεις μπορούν να βρεθούν μέσω της γεωμετρίας των συστημάτων.

$$\cos(\theta_2 - \theta_3) = \frac{x_e^2 + y_e^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} = c \quad (2-10)$$

$$\sin(\theta_2 - \theta_3) = \pm \sqrt{1 - c^2} = s \quad (2-11)$$

$$\varphi = \text{atan2}(y_e, x_e) \quad (2-12)$$

$$\psi = \text{atan2}(L_3s, L_2 + L_3c) \quad (2-13)$$

- *Σειριακή Διάταξη*

$$\theta_2 = \varphi - \psi \quad (2-14)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}(c) \quad (2-15)$$

- *Παράλληλη Διάταξη*

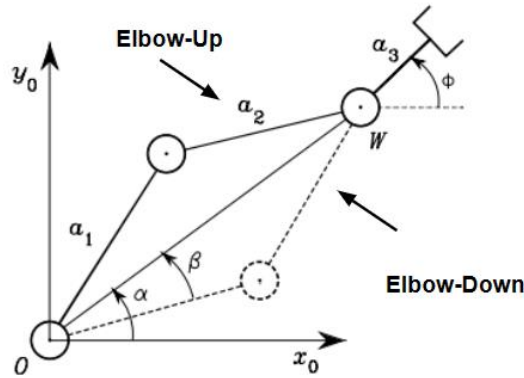
$$\theta_2 = \varphi - \psi \quad (2-16)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + \cos^{-1}(c) \quad (2-17)$$

Επιπλέον, στα παραπάνω πρέπει να ισχύει ο περιορισμός

$$(L_1 - L_2)^2 \leq x_e^2 + y_e^2 \leq (L_1 + L_2)^2 \quad (2-18)$$

Σημειώνεται πως οι δύο τιμές που μπορεί να λάβει το συνημίτονο της Εξ. (2-11), αντιστοιχούν σε δύο διαμορφώσεις, γνωστές και ως elbow-down (θετικό πρόσημο) και elbow-up (αρνητικό πρόσημο) (βλ. Σχήμα 2-14). Στις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν, ο βραχίονας θεωρείται πως βρίσκεται στην elbow-up διαμόρφωση.



Σχήμα 2-14. Οι δύο δυνατές διαμορφώσεις του βραχίονα που προκύπτουν από την επίλυση της διαφορικής κινηματικής. Πηγή εικόνας: [7].

### Διαφορική Κινηματική

Τέλος, ορίζονται οι εξισώσεις της διαφορική κινηματικής, μέσω των οποίων συσχετίζεται η ταχύτητα του ΤΣΔ στο καρτεσιανό χώρο με τις ταχύτητες των αρθρώσεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ιακωβιανής  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  (βλ. Ενότητα 2.2.1). Έτσι, προκύπτουν τα παρακάτω.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

- Σειριακή Διάταξη

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_2 - L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) & L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

- Παράλληλη Διάταξη

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_2 & -L_2 \sin \theta_3 \\ L_1 \cos \theta_2 & L_2 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

Όσον αφορά τις ιδιομορφίες (singularities) του συστήματος, αυτές μπορούν να βρεθούν εύκολα εάν εξισωθεί η ορίζουσα της ιακωβιανής με το μηδέν:  $\det \mathbf{J} = 0$ . Προκύπτει:

- Σειριακή Διάταξη

$$\sin \theta_3 = 0 \quad (2-22)$$

- Παράλληλη Διάταξη

$$\sin(\theta_2 - \theta_3) = 0 \quad (2-23)$$

Αυτές οι λύσεις αντιστοιχούν και για τις δύο διατάξεις σε βραχίονα είτε σε πλήρη έκταση είτε διπλωμένο. Επομένως θα πρέπει αυτές οι θέσεις να αποφεύγονται.

### Δυναμικό Μοντέλο

Στη συνέχεια, προσδιορίζεται το δυναμικό μοντέλο των βραχιόνων, με χρήση της μεθόδου Euler-Lagrange. Μέσω αυτού του μοντέλου, εξάγονται οι εξισώσεις κίνησης, που συνδέουν τις δυνάμεις και ροπές των επενεργητών με την κίνηση του συστήματος. Η θεωρία [7] υπαγορεύει πως η γενική μορφή των εξισώσεων κίνησης ενός βραχίονα είναι η εξής

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T \mathbf{h} = \boldsymbol{\tau} \quad (2-24)$$

, εάν αγνοηθούν τα φαινόμενα ιξώδους και στατικής τριβής. Στην Εξ. (2-24), το  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών των αρθρώσεων. Στην προκειμένη περίπτωση, αυτές ταυτίζονται με τις γωνίες  $\theta_2$  και  $\theta_3$  (βλ. Σχήμα 2-13), δηλαδή  $\mathbf{q} = [\theta_2 \ \theta_3]$ . Ο πίνακας  $\mathbf{B}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ονομάζεται πίνακας αδράνειας, ο πίνακας  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  είναι ο όρος φυγόκεντρων και Coriolis, ενώ το διάνυσμα  $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  είναι όρος βαρύτητας. Το διάνυσμα  $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  είναι το σύνθετο διάνυσμα δυνάμεων και ροπών που ασκούνται από το ΤΣΔ στο περιβάλλον, εκφρασμένα ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης. Τέλος, το ζητούμενο διάνυσμα  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  περιλαμβάνει τις ροπές που πρέπει να ασκηθούν στις αρθρώσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα περιεχόμενα των πινάκων της Εξ. (2-24), για τις δύο διατάξεις.

- *Σειριακή Διάταξη*

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

$$b_{11} = m_1 l_1^2 + I_1 + k r_1^2 I_{m1} + J_{m2} + m_2 (L_1^2 + l_1^2 + 2L_1 l_2 \cos \theta_3) + M (L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 \cos \theta_3) \quad (2-26)$$

$$b_{12} = b_{21} = I_2 + k r_2 I_{m2} + m_2 (L_1 l_2 \cos \theta_3 + l_2^2) + M (L_1 L_2 \cos \theta_3 + L_2^2) \quad (2-27)$$

$$b_{22} = m_2 l_2^2 + I_2 + M L_2^2 + k r_2^2 I_{m2} \quad (2-28)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

$$c_{11} = -(m_2 l_2 + M L_2) L_1 \sin \theta_3 \dot{\theta}_3 \quad (2-30)$$

$$c_{12} = -(m_2 l_2 + M L_2) L_1 \sin \theta_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \quad (2-31)$$

$$c_{21} = (m_2 l_2 + M L_2) L_1 \sin \theta_3 \dot{\theta}_2 \quad (2-32)$$

$$c_{22} = 0 \quad (2-33)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1 l_1 + m_2 L_1 + M L_1) g \cos \theta_2 + (m_2 l_2 + M L_2) g \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ (m_2 l_2 + M L_2) g \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

- *Παράλληλη Διάταξη*

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

$$b_{11} = m_1 l_1^2 + I_1 + m_2 L_1^2 + M L_1^2 + k r_1^2 I_{m1} \quad (2-36)$$

$$b_{12} = b_{21} = (m_2 L_1 l_2 + M L_1 L_2) \cos(\theta_2 - \theta_3) \quad (2-37)$$

$$b_{22} = m_2 l_2^2 + I_2 + M L_2^2 + k r_2^2 I_{m2} \quad (2-38)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

$$c_{11} = c_{22} = 0 \quad (2-40)$$

$$c_{12} = (m_2 L_1 l_2 + M L_1 L_2) \sin(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_3 \quad (2-41)$$

$$c_{21} = -(m_2 L_1 l_2 + M L_1 L_2) \sin(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2 \quad (2-42)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1 l_1 + m_2 L_1 + M L_1) g \cos \theta_2 \\ (m_2 l_2 + M L_2) g \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

### 2.5.2 Σχεδιασμός Τροχιάς

Κρίνεται σκόπιμο η θεωρητική ανάλυση των βραχιόνων να γίνει με βάση κάποιες ονομαστικές τροχιές, οι οποίες επιλέγονται με κριτήριο την πιθανότητα εμφάνισής τους κατά τη λειτουργία του βραχίονα. Μελετώντας αυτές, καθώς και τη στατική φόρτιση, από πλευράς απαίτησης ροπής στους κινητήρες, θα μπορεί να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα σε σχέση με τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις του βραχίονα.

Πριν παρουσιαστούν οι τροχιές που επιλέχθηκαν, γίνεται μια σύντομη αναφορά στη θεωρητική θεμελίωση μιας τροχιάς. Μια τροχιά εκφράζεται μέσω των συντεταγμένων της ως συνάρτηση του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας μια τροχιά που εκτελείται μεταξύ των χρονικών στιγμών  $t_0$  και  $t_f$ , οι συντεταγμένες του ΤΣΔ στο χρόνο είναι

$$x = x(t), t_0 \leq t \leq t_f \quad (2-45)$$

$$y = y(t), t_0 \leq t \leq t_f \quad (2-46)$$

και οι αντίστοιχες ταχύτητες

$$\dot{x} = \dot{x}(t), t_0 \leq t \leq t_f \quad (2-47)$$

$$\dot{y} = \dot{y}(t), t_0 \leq t \leq t_f \quad (2-48)$$

Αυτές μπορούν να διακριτοποιηθούν σε

$$x(t_i) = x_i, i = 1, 2, \dots, n_t \quad (2-49)$$

$$y(t_i) = y_i, i = 1, 2, \dots, n_t \quad (2-50)$$

και

$$\dot{x}(t_i) = \dot{x}_i, i = 1, 2, \dots, n_t \quad (2-51)$$

$$\dot{y}(t_i) = \dot{y}_i, i = 1, 2, \dots, n_t \quad (2-52)$$

όπου



$$n_i = \frac{t_f - t_0}{\Delta t} \quad (2-53)$$

και

$$t_i = i \Delta t, i = 1, 2, \dots, n_i \quad (2-54)$$

Το χρονικό βήμα  $\Delta t$  διαμορφώνεται ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της κίνησης, διότι στην περίπτωση που το διατηρείται σταθερό, ο χρόνος επίλυσης είναι αντιστρόφως ανάλογος της σε κινήσεις χαμηλής ταχύτητας και μάλιστα αυξάνεται εκθετικά. Επειδή στην παρούσα εργασία ο χρόνος της κάθε κίνησης ορίζεται μέσω της μέγιστης γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ, όπως θα φανεί παρακάτω, επιλέγεται το χρονικό βήμα να λαμβάνεται από τη σχέση

$$\Delta t = 10^{-\frac{\text{ceil}(\log a) - 1}{2} - 2} \quad (2-55)$$

όπου  $a$  η επιτάχυνση αυτή.

Η τροχιά αυτή, ουσιαστικά υπαγορεύει την επιθυμητή κίνηση και ταχύτητα του ΤΣΔ. Έτσι, οι συντεταγμένες και η ταχύτητα μπορούν να αναχθούν μέσω της αντίστροφης κινηματικής σε γωνίες και γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων, από αυτές μπορεί να βρεθεί και η γωνιακή επιτάχυνση μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης και στη συνέχεια μέσω των εξισώσεων κίνησης (Εξ. (2-24) - (2-44)) μπορεί να υπολογιστεί για κάθε χρονική στιγμή η απαίτηση ροπής των κινητήρων.

Για την γωνιακή επιτάχυνση χρησιμοποιείται αριθμητική παραγωγή με πεπερασμένες διαφορές. Στην πρώτη και τελευταία χρονική στιγμή εφαρμόζονται πρόσω και πίσω πεπερασμένες διαφορές δεύτερης τάξης αντίστοιχα (Εξ. (2-56), (2-57)), ενώ για τα ενδιάμεσα σημεία κεντρικές πεπερασμένες διαφορές πρώτης τάξης (Εξ. (2-58)).

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{-\frac{3}{2}\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 - \frac{1}{2}\dot{\theta}_3}{\Delta t} \quad (2-56)$$

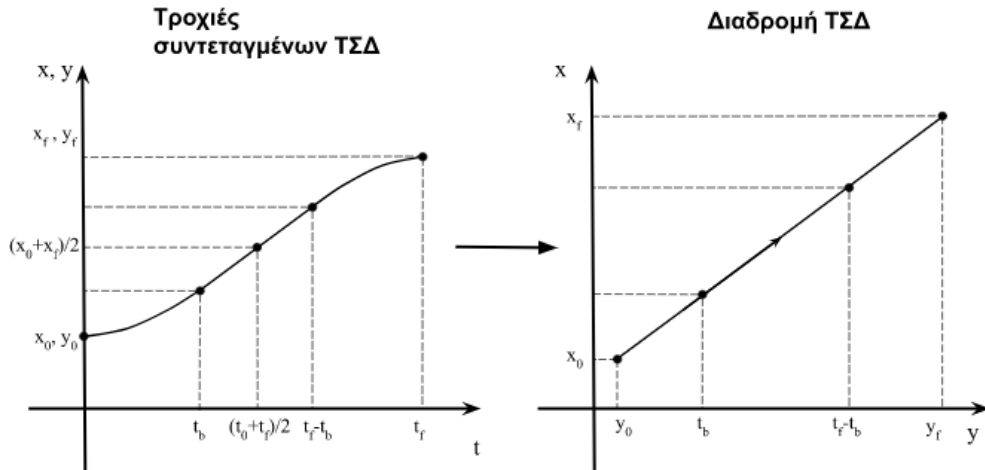
$$\ddot{\theta}_{n_i} = \frac{-\frac{3}{2}\dot{\theta}_{n_i} + 2\dot{\theta}_{n_i-1} - \frac{1}{2}\dot{\theta}_{n_i-2}}{\Delta t} \quad (2-57)$$

$$\ddot{\theta}_i = \frac{\dot{\theta}_{i+1} - \dot{\theta}_{i-1}}{2\Delta t}, i = 2, \dots, n_i - 1 \quad (2-58)$$

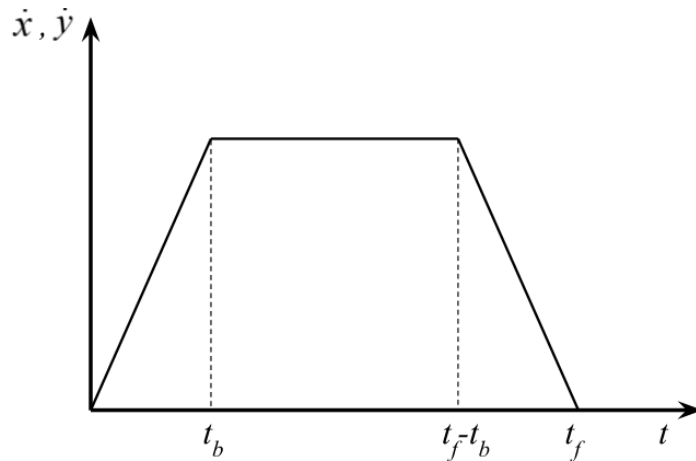
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν τις τροχιές που θα χρησιμοποιηθούν στην υπόλοιπη εργασία.

### **Ευθύγραμμη Τροχιά ΤΣΔ**

Η πρώτη τροχιά που είναι βέβαιο πως θα παρατηρηθεί είναι η ευθύγραμμη τροχιά του ΤΣΔ μεταξύ δύο σημείων. Το προφίλ της τροχιάς στο χρόνο είναι τέτοιο ώστε να αντιπροσωπεύει μια ρεαλιστική κίνηση του βραχίονα. Συγκεκριμένα, αποτελείται από τρία τμήματα: επιτάχυνση, ευθύγραμμη ομαλή κίνηση και επιβράδυνση. Οι περίοδοι επιτάχυνσης και επιβράδυνσης αντιστοιχούν στα παραβολικά τμήματα που φαίνονται στο Σχήμα 2-15. Η κάθε μια διαρκεί χρόνο  $t_b$ , που ονομάζεται και χρόνος επιτάχυνσης/επιβράδυνσης. Το προφίλ της ταχύτητας που αντιστοιχεί σε αυτή τη τροχιά είναι τραπεζοειδές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-16.



Σχήμα 2-15. (Αριστερά) Οι τροχιές των συντεταγμένων του ΤΣΔ και (δεξιά) η διαδρομή του ακολουθεί το ΤΣΔ, επιτυγχάνοντας ευθύγραμμη τροχιά με τρία τμήματα: επιτάχυνση, κίνηση με σταθερή ταχύτητα και επιβράδυνση.



Σχήμα 2-16. Το προφίλ τις ταχύτητας των συντεταγμένων του ΤΣΔ για ευθύγραμμη τροχιά .

Οι εξισώσεις της παραπάνω τροχιάς (θέση (Εξ. (2-59), (2-60)) και ταχύτητα (Εξ. (2-61), (2-62)) ΤΣΔ) είναι οι εξής:

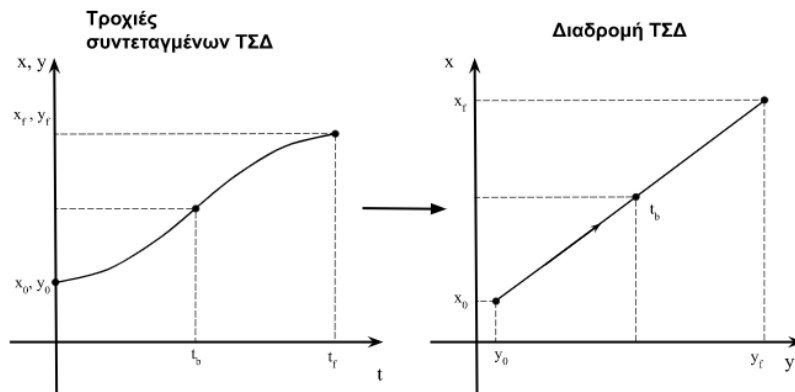
$$x(t) = \begin{cases} x_0 + \frac{1}{2} \ddot{x} t^2, t < t_b \\ x_0 + \frac{1}{2} \ddot{x} t_b^2 + \dot{x} t_b (t - t_b), t_b \leq t < t_f - t_b \\ x_f - \frac{1}{2} \ddot{x} (t_f - t)^2, t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (2-59)$$

$$y(t) = \begin{cases} y_0 + \frac{1}{2} \ddot{y} t^2, t < t_b \\ y_0 + \frac{1}{2} \ddot{y} t_b^2 + \dot{y} t_b (t - t_b), t_b \leq t < t_f - t_b \\ y_f - \frac{1}{2} \ddot{y} (t_f - t)^2, t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (2-60)$$

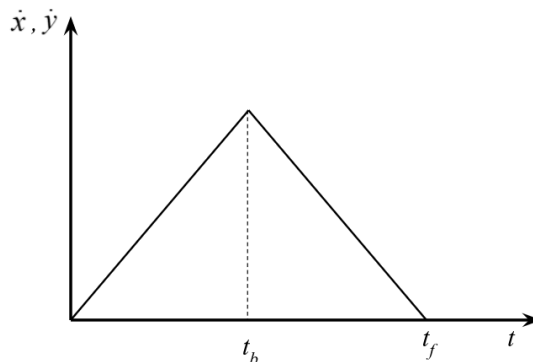
$$\dot{x}(t) = \begin{cases} \ddot{x}t, t < t_b \\ \ddot{x}t_b, t_b \leq t < t_f - t_b \\ \ddot{x}(t_f - t), t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (2-61)$$

$$\dot{y}(t) = \begin{cases} \ddot{y}t, t < t_b \\ \ddot{y}t_b, t_b \leq t < t_f - t_b \\ \ddot{y}(t_f - t), t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (2-62)$$

Εάν στην παραπάνω τροχιά δεν μεσολαβήσει περίοδος σταθερής ταχύτητας μεταξύ των τμημάτων επιβράδυνσης και επιτάχυνσης, το προφίλ της ταχύτητας γίνεται τριγωνικό (βλ. Σχήμα 2-17 και Σχήμα 2-18). Αυτή η εκδοχή θα χρησιμοποιηθεί ως επί το πλείστο στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, καθώς εκτός από το ότι είναι το πιο απαιτητικό σε σενάριο, έτσι αναπτύσσεται και η μέγιστη δυνατή γραμμική ταχύτητα στην ευθύγραμμη κίνηση, που είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των βραχιόνων.



Σχήμα 2-17. (Αριστερά) Οι τροχιές των συντεταγμένων του ΤΣΔ και (δεξιά) η διαδρομή του ακολουθεί το ΤΣΔ, επιτυγχάνοντας ευθύγραμμη τροχιά με δύο τμήματα: επιτάχυνση και επιβράδυνση.



Σχήμα 2-18. Το προφίλ της ταχύτητας των συντεταγμένων του ΤΣΔ για ευθύγραμμη τροχιά με επιτάχυνση και επιβράδυνση.

Σε επίπεδο κώδικα, για λόγους συνοχής η διάρκεια μιας τροχιάς, είτε ευθύγραμμης είτε άλλου τύπου (βλ. παρακάτω), ορίζεται με βάση την μέγιστη αναπτυσσόμενη γραμμική επιτάχυνση του ΤΣΔ. Αυτή, επιλέχθηκε καθώς εκτός από το ότι είναι η ίδια ένας βασικός δείκτης των επιδόσεων ενός βραχίονα, για τις τροχιές που εξετάζονται καθορίζει και τη μέγιστη αναπτυσσόμενη ταχύτητα του ΤΣΔ, που είναι επίσης είναι βασικό κομμάτι των

προδιαγραφών των βραχιόνων. Έτσι, πρέπει οι παράμετροι των Εξ. (2-59) - (2-62) να εκφραστούν με βάση τη μέγιστη αναπτυσσόμενη γραμμική επιτάχυνση (αυτά αναφέρονται για τριγωνικό προφίλ ταχύτητας). Για να γίνει αυτό, αρχικά υπολογίζεται η γωνία που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα της τροχιάς με τον άξονα  $x$  :

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y_f - y_0}{x_f - x_0} \right) \quad (2-63)$$

Εάν με  $a$  συμβολιστεί η γραμμική επιτάχυνση του ΤΣΔ, μπορούν να προσδιοριστούν οι επιταχύνσεις των συνιστωσών της τροχιάς στους δύο άξονες:

$$\ddot{x} = a \cos \theta \quad (2-64)$$

$$\ddot{y} = a \sin \theta \quad (2-65)$$

, ενώ η γραμμική ταχύτητα  $V$  μπορεί εύκολα να βρεθεί από τη σχέση

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (2-66)$$

Τέλος, υπολογίζεται ο χρόνος επιτάχυνσης / επιβράδυνσης ως

$$t_b = \frac{\dot{x}}{\ddot{x}} \quad (2-67)$$

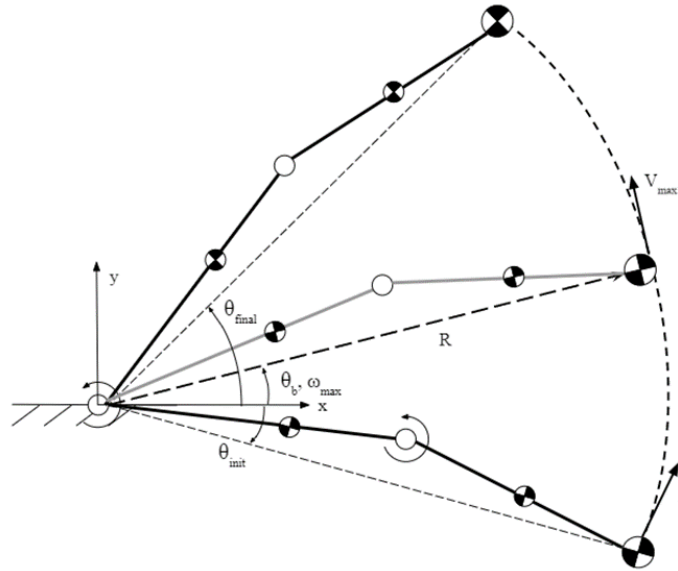
ή

$$t_b = \frac{\dot{y}}{\ddot{y}} \quad (2-68)$$

και έτσι μπορούν να βρεθούν οι συντεταγμένες του ΤΣΔ ανά πάσα χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της τροχιάς.

### **Κυκλική Τροχιά**

Μια τροχιά που επίσης κρίνεται σημαντική είναι η κυκλική κίνηση του ΤΣΔ (βλ. Σχήμα 2-19), καθώς είναι ιδιαίτερα απαιτητική από άποψη ροπών, ιδίως για τον κινητήρα της άρθρωσης του αγκώνα. Κατά την τροχιά αυτή, θεωρείται πως το ΤΣΔ βρίσκεται σε σταθερή απόσταση  $R$  από το κέντρο περιστροφής (άρθρωση αγκώνα) και διαγράφει ένα τόξο το οποίο οριοθετείται μεταξύ των γωνιών  $\theta_0$  και  $\theta_f$ , που ορίζονται μεταξύ του ευθύγραμμου τμήματος  $R$  και του οριζόντιου άξονα. Θεωρείται πως πάντα ο βραχίονας εκτελεί ανοδική πορεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-19.



**Σχήμα 2-19. Κυκλική τροχιά ΤΣΔ με παραβολικά τμήματα.**

Η τροχιά ορίζεται με βάση τις πολικές συντεταγμένες, καθώς οδηγούν σε μια πιο ευδιάκριτη μορφή και στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε καρτεσιανές, όπως θα φανεί παρακάτω. Έτσι, σε αντιστοιχία με την ευθύγραμμη κίνηση, εδώ επιλέγεται το προφίλ της γωνιακής ταχύτητας να είναι τριγωνικό, καθώς έτσι θα αναπτύξει τη μέγιστη ταχύτητα με την επιτάχυνση που του υπαγορεύεται. Η γωνία και η γωνιακή ταχύτητα σε αυτή την περίπτωση δίνονται από τους τύπους

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 + \frac{1}{2} a_{ang} t^2, t_0 \leq t \leq t_b \\ \theta_f - \frac{1}{2} a_{ang} (t_f - t)^2, t_b < t \leq t_f \end{cases} \quad (2-69)$$

$$\dot{\theta} = \omega = \begin{cases} a_{ang} t, t_0 \leq t \leq t_b \\ a_{ang} (t_f - t), t_b < t \leq t_f \end{cases} \quad (2-70)$$

όπου  $a_{ang}$  η γωνιακή επιτάχυνση, η οποία σχετίζεται με την γραμμική επιτάχυνση του ΤΣΔ μέσω της σχέσης

$$a_{ang} = \frac{a}{R} \quad (2-71)$$

ενώ χρόνος επιτάχυνσης / επιβράδυνσης υπολογίζεται από τη σχέση

$$t_b = \frac{\sqrt{\theta_f - \theta_0}}{a_{ang}} \quad (2-72)$$

Τέλος, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες οι εξισώσεις της τροχιάς στον καρτεσιανό χώρο:

$$x(t) = R \cos \theta \quad (2-73)$$

$$y(t) = R \sin \theta \quad (2-74)$$

$$\dot{x}(t) = -R \sin \theta \dot{\theta} \quad (2-75)$$

$$\dot{y}(t) = R \cos \theta \dot{\theta} \quad (2-76)$$

### 2.5.3 Χωρική Ανάλυση

Στο χώρο εργασίας του ρομπότι, ο δυνατός αριθμός των τροχιών που μπορούν να εκτελεστούν είναι έως και μη-πεπερασμένος και για αυτό το λόγο, αν και θα ήταν θεμιτό, είναι αδύνατο να εξεταστούν όλα τα δυνατά σενάρια κατά τη θεωρητική μελέτη. Παρ' ολ' αυτά, λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης των απαιτήσεων ροπής αναλόγως τη θέση του ΤΣΔ στο χώρο εργασίας και της κίνησης που εκτελείται, υπάρχει η ανάγκη για την χρήση μιας μεθόδου που να μπορεί να δώσει μια όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη εικόνα.

Έτσι, με στόχο να υπάρξουν συμπεράσματα όσο το δυνατόν πιο γενικευμένα και που περιλαμβάνουν έναν ικανό και αντιπροσωπευτικό αριθμό σεναρίων, επιλέγεται η μελέτη του βραχίονα να γίνει στα πλαίσια της χωρικής ανάλυσης. Αυτό σημαίνει πως κάθε σενάριο (είτε στατική φόρτιση είτε τροχιά), εξετάζεται σε ολόκληρο το χώρο εργασίας, με τον τρόπο που θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

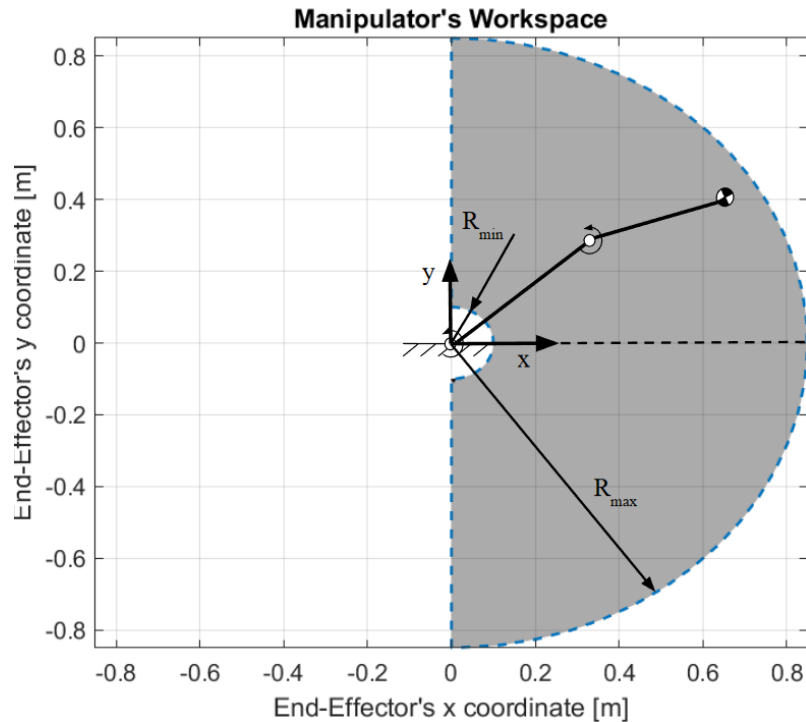
Ο χώρος εργασίας του μοντέλου μπορεί να βρεθεί από τους περιορισμούς της αντίστροφης κινηματικής, Εξ. (2-18), από τους οποίους προκύπτει πως είναι ένας κυκλικός δακτύλιος, με εσωτερική ακτίνα

$$R_{\min} = |L_2 - L_1| \quad (2-77)$$

και εξωτερική ακτίνα

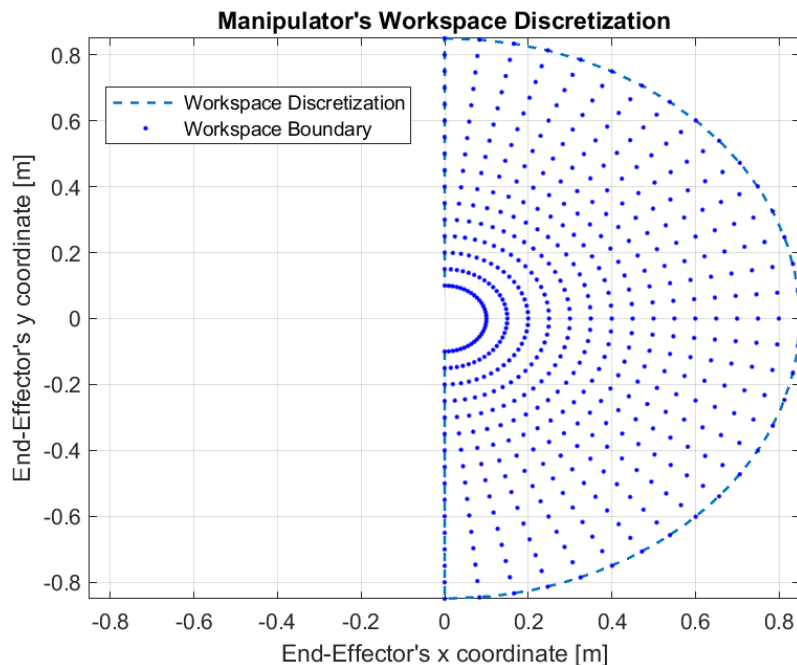
$$R_{\max} = L_1 + L_2 \quad (2-78)$$

Παρ' ολ' αυτά, στην παρούσα εργασία θεωρείται πως ο βραχίονας είναι διαρκώς σε διαμόρφωση elbow-up, η οποία λειτουργεί αποδοτικά στο ένα μισό του χωρίου, ενώ για την πρόσβαση του βραχίονα στο άλλο μισό χρησιμοποιείται η πρώτη άρθρωση, που περιστρέφει το βραχίονα γύρω από τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το κέντρο του χώρου εργασίας. Έτσι, μελετάται ο χώρος εργασίας που φαίνεται στο Σχήμα 2-20. Επιπλέον, σημειώνεται πως, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, τα σημεία του χώρου στα οποία ο βραχίονας είναι πλήρως εκτεταμένος ή σε δίπλωση, δηλαδή όταν το ΤΣΔ βρίσκεται πάνω στις ακτίνες  $R_{\min}$  και  $R_{\max}$ , αντιστοιχούν σε ιδιομορφίες. Έτσι, στην πράξη δεν χρησιμοποιείται όλη η έκταση του χώρου εργασίας, αλλά χρησιμοποιούνται όρια που είναι 5% μεγαλύτερα από το  $R_{\min}$  και μικρότερα από το  $R_{\max}$ .



Σχήμα 2-20. Ο μελετώμενος χώρος εργασίας του βραχίονα.

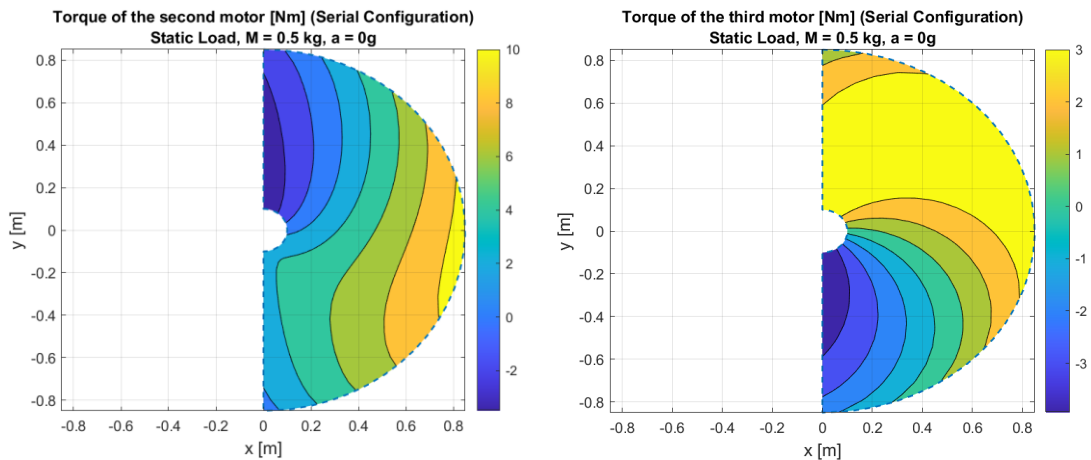
Το πρώτο βήμα για τη χωρική ανάλυση, είναι η διακριτοποίηση του χωρίου, η οποία γίνεται στο πολικό σύστημα συντεταγμένων. Στο Σχήμα 2-21, φαίνεται το διακριτοποιημένο χωρίο για βήμα ακτίνας  $\Delta r = 0.05$  m και βήμα γωνίας  $\Delta \theta = \pi/32$  rad. Οι τελευταίες τιμές έχουν χρησιμοποιηθεί για να είναι πιο ευδιάκριτη η αναπαράσταση. Στην πράξη η διακριτοποίηση έγινε με  $\Delta r = 0.01$  m και  $\Delta \theta = \pi/64$  rad.



Σχήμα 2-21. Παράδειγμα διακριτοποίησης του μελετώμενου χώρου εργασίας του βραχίονα (βήμα ακτίνας: 0.05, βήμα γωνίας:  $\pi/32$ ).

Στην περίπτωση της στατικής ανάλυσης, η διαδικασία δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα. Το ΤΣΔ τοποθετείται σε κάθε ένα από τα σημεία, υπολογίζεται η αντίστοιχη

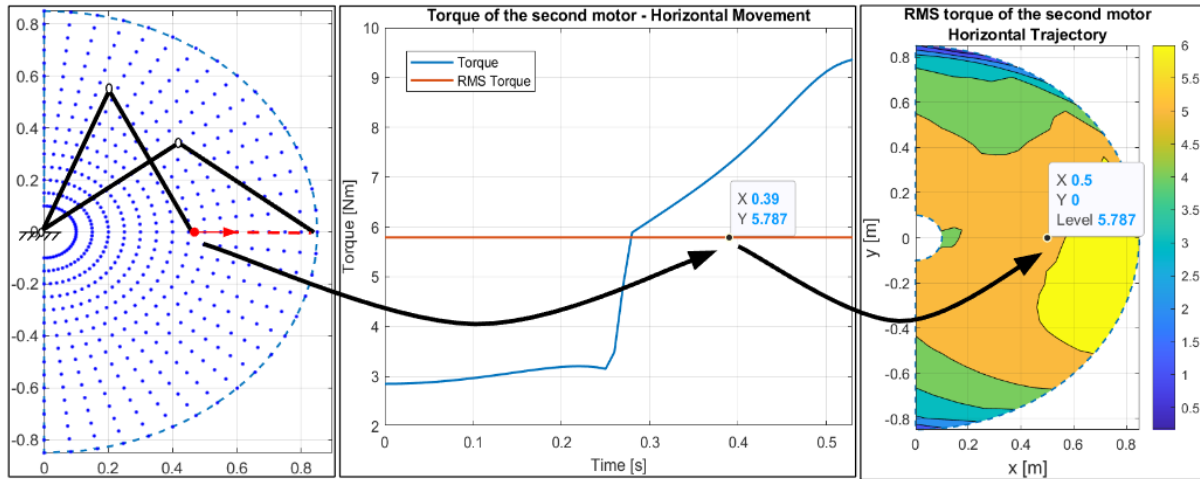
ροπή των κινητήρων και απεικονίζεται με χρώμα στο διάγραμμα. Έτσι, πρακτικά έχει γίνει χαρτογράφηση των τιμών των ροπών στο χώρο εργασίας. Η τελική μορφή ενός τέτοιου διαγράμματος για τον κάθε κινητήρα φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2-22.



**Σχήμα 2-22. Διάγραμμα ροπών κινητήρων που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της χωρικής ανάλυσης για στατική φόρτιση, με ωφέλιμο φορτίο 0.5 kg.**

Αντιθέτως, η περίπτωση παρακολούθησης τροχιάς με επιτάχυνση του ΤΣΔ είναι πιο περίπλοκη. Επειδή τα μεγέθη που αναζητούνται μεταβάλλονται διαρκώς κατά μήκος μιας τροχιάς, δεν είναι ξεκάθαρο τι πρέπει να αντιπροσωπεύει η τιμή που τυπώνεται στο εκάστοτε σημείο του χώρου εργασίας. Ο τρόπος που αντιμετωπίζεται το εν λόγω ζήτημα είναι ο εξής. Αρχικά, εκτελείται η μελετώμενη κατά περίπτωση τροχιά, έστω ευθύγραμμη οριζόντια, από αριστερά προς τα δεξιά (περισσότερες λεπτομέρειες όπως η τιμή της επιτάχυνσης του ΤΣΔ ή το ωφέλιμο φορτίο δεν απαιτούνται για την παρούσα εξήγηση), χρησιμοποιώντας κάθε σημείο του χώρου εργασίας ως αφετηρία και ως τέλος το σύνορο του χώρου εργασίας και καταγράφεται η τιμή της ροπής των κινητήρων σε κάθε σημείο της τροχιάς. Για την λειτουργία των ηλεκτροκινητήρων, ο πιο αυστηρός περιορισμός είναι η θερμότητα, η οποία μάλιστα, εφόσον πρέπει να μένει κάτω από κάποιο όριο, καθορίζει και τις προδιαγραφές ροπής ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας τους. Από τη θεωρία των ηλεκτροκινητήρων, είναι γνωστό πως όταν η ροπή που ασκεί ο κινητήρας είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, η RMS (Root-Mean-Square) τιμή της αντιστοιχεί στην ισοδύναμη σταθερά ασκούμενη ροπή, που συνεπάγεται πως για να μην υπάρχει υπερθέρμανση πρέπει η τιμή της να είναι κάτω από την ονομαστική ροπή του κινητήρα [20]. Επομένως, επιλέγεται σε κάθε σημείο που χρησιμοποιήθηκε ως αφετηρία τροχιάς, να τυπώνεται η RMS τιμή της ροπής, λόγω της ιδιότητας της να άρει τον παράγοντα του χρόνου. Επιπλέον, αποθηκεύεται και η μέγιστη απόλυτη τιμή της ροπής που παρατηρείται, καθώς αφενός η πληροφορία της χάνεται με την RMS και αφετέρου πρέπει να είναι βέβαιο πως μένει εντός επιτρεπτών ορίων. Στο Σχήμα 2-23, απεικονίζεται η προαναφερθείσα διαδικασία, για το σημείο (0.5,0) και απεικόνιση της RMS ροπής στο διάγραμμα του χώρου εργασίας, για ευθύγραμμη οριζόντια κίνηση από αριστερά στα δεξιά. Όταν αυτή η διαδικασία εκτελεστεί με αφετηρία όλα τα σημεία του χώρου εργασίας, οδηγεί στο δεξί διάγραμμα στο Σχήμα 2-23.





**Σχήμα 2-23.** Αναπαράσταση της χωρικής ανάλυσης, για ευθύγραμμη οριζόντια κίνηση από αριστερά στα δεξιά για το σημείο (0.5,0). Αρχικά, (αριστερά) εκτελείται η τροχιά με αφετηρία το σημείο αυτό και πέρας το σύνορο του χώρου εργασίας, στη συνέχεια (κέντρο) υπολογίζεται η RMS (ή μέγιστη εάν είναι επιθυμητό) τιμή της ροπής του δεύτερου κινητήρα (παρουσιάζεται μόνο του δεύτερου για εξοικονόμηση χώρου, η διαδικασία για τον τρίτο είναι ακριβώς η ίδια) και (δεξιά) τέλος αυτή αποδίδεται στο σημείο (0.5,0) του διαγράμματος ροπών του χώρου εργασίας.

Με τον παραπάνω τρόπο μπορεί κανείς να αποκτήσει μια αρκετά πλήρη αντίληψη για το πως διαμορφώνονται οι απαιτήσεις ροπής και ισχύος για τις διάφορες ενέργειες που θα κληθεί να εκτελέσει ο βραχίονας.

#### 2.5.4 Σύγκριση Σειριακής και Παράλληλης Διάταξης

Εφόσον πλέον έχουν οριστεί τα μοντέλα των βραχιόνων, οι τροχιές και ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η ανάλυση, εξετάζονται τα προαναφερθέντα σενάρια. Στόχος είναι να συγκριθούν οι δύο διατάξεις από την οπτική απαίτησης ροπής, ώστε να προσδιοριστεί ποια από τις δύο είναι καταλληλότερη για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Όπως προαναφέρθηκε, τα σενάρια που πρόκειται να εξεταστούν είναι:

- Στατική φόρτιση.
- Ευθύγραμμη Τροχιά ΤΣΔ.
- Κυκλική Τροχιά ΤΣΔ.

Στα σενάρια που αφορούν παρακολούθηση τροχιάς, υπενθυμίζεται πως βρίσκεται η RMS και η απόλυτη μέγιστη τιμή της ροπής σε κάθε τροχιά, ώστε να υπάρξει μια όσο το δυνατόν πιο πλήρης εικόνα της συμπεριφοράς των δύο μηχανισμών.

Για να μπορεί να εκτελεστεί η ανάλυση, είναι επιτακτικό οριστούν κάποιες τιμές για τις παραμέτρους των μοντέλων. Αν και πρόκειται για σύγκριση, που σημαίνει πως δεν επηρεάζουν το σχεδιασμό του βραχίονα οι τιμές που θα επιλεγθούν, γίνονται κάποιες αρχικές παραδοχές ώστε να είναι ρεαλιστικές. Αυτές είναι οι εξής:

- Οι δύο σύνδεσμοι του βραχίονα έχουν το ίδιο μήκος.
- Είναι κατασκευασμένοι από σωλήνα κράματος αλουμινίου 7075 t6, εξωτερικής διαμέτρου 70 mm και πάχους 3 mm (πυκνότητα 2810 kg/m<sup>3</sup>).
- Η πλήρης έκταση του βραχίονα είναι 0.9 m.
- Τα χαρακτηριστικά των κινητήρων επιλέγονται με βάση τους κινητήρες T-Motor R100 KV90, που είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται και κατά το σχεδιασμό του βραχίονα (βλ. Ενότητα 3.2).

Ο Πίνακας 2-2 περιλαμβάνει τις τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τις παραδοχές αυτές.

**Πίνακας 2-2. Οι παράμετροι των μοντέλων των βραχιόνων από το Σχήμα 2-13.**

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Μάζα Πρώτου Συνδέσμου	$m_1$	0.7985 kg
Ροπή Αδράνειας Πρώτου Συνδέσμου (w.r.t CoM)	$I_1$	0.0139 kgm <sup>2</sup>
Μάζα Δεύτερου Συνδέσμου	$m_2$	0.7985 kg
Ροπή Αδράνειας Δεύτερου Συνδέσμου (w.r.t CoM)	$I_2$	0.0139 kgm <sup>2</sup>
Μήκος Πρώτου Συνδέσμου	$L_1$	0.45 m
Απόσταση Κέντρου Μάζας Πρώτου Συνδέσμου Από Πρώτη Άρθρωση	$l_1$	0.225 m
Μήκος Δεύτερου Συνδέσμου	$L_2$	0.45 m
Απόσταση Κέντρου Μάζας Δεύτερου Συνδέσμου Από Δεύτερη Άρθρωση	$l_2$	0.225 m
Ροπή Αδράνειας Δρομέα Κινητήρα Πρώτης Άρθρωσης	$I_{m1}$	0.000072 kgm <sup>2</sup>
Ροπή Αδράνειας Δρομέα Κινητήρα Δεύτερης Άρθρωσης	$I_{m2}$	0.000072 kgm <sup>2</sup>
Ροπή Αδράνειας Δεύτερου Κινητήρα	$J_{m2}$	0.001 kgm <sup>2</sup>
Ωφέλιμο Φορτίο	$M$	Προς εξέταση

### Στατική Φόρτιση

Αρχικά, εκτελείται η σύγκριση των διατάξεων σε στατική φόρτιση. Για αυτή, θεωρείται πως το ωφέλιμο φορτίο είναι 0.5 kg, το οποίο είναι ένα βάρος αρκετά πιθανό να σηκώνει ο βραχίονας. Υπολογίζοντας με όσα προαναφέρθηκαν τη ροπή που ασκούν οι δύο κινητήρες για να διατηρηθεί ακίνητο το βάρος σε όλα τα σημεία του χώρου εργασίας, προκύπτουν τα διαγράμματα στο Σχήμα 2-24.

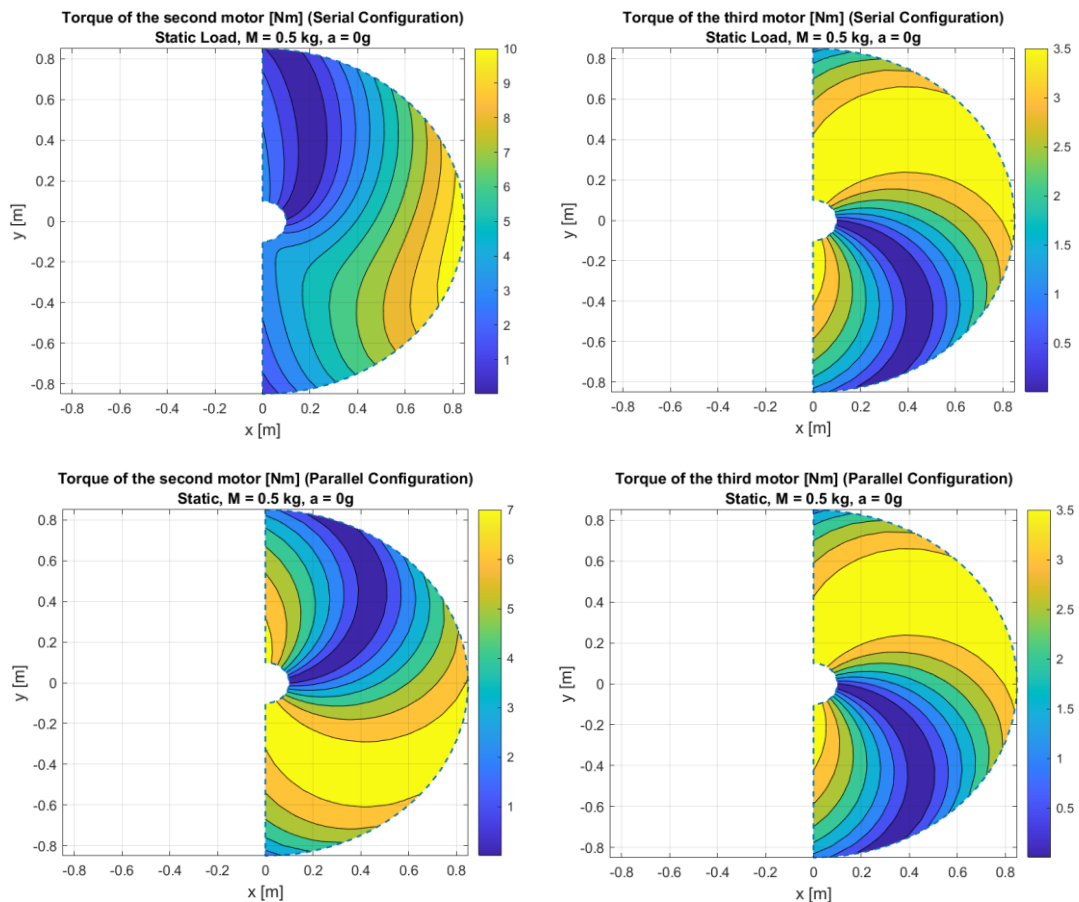
Η πρώτη παρατήρηση που γίνεται είναι πως οι ροπές του κινητήρα της τρίτης άρθρωσης ταυτίζονται ανεξαρτήτως της διάταξης των κινητήρων και θα ήταν αναμενόμενο, είναι μικρότερες από τις ροπές του πρώτου κινητήρα. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα

ότι ο δεύτερος κινητήρας είναι ο καθοριστικός παράγοντας για πολλά ζητήματα, όπως η απαίτηση ροπής αλλά και η διάταξη των κινητήρων.

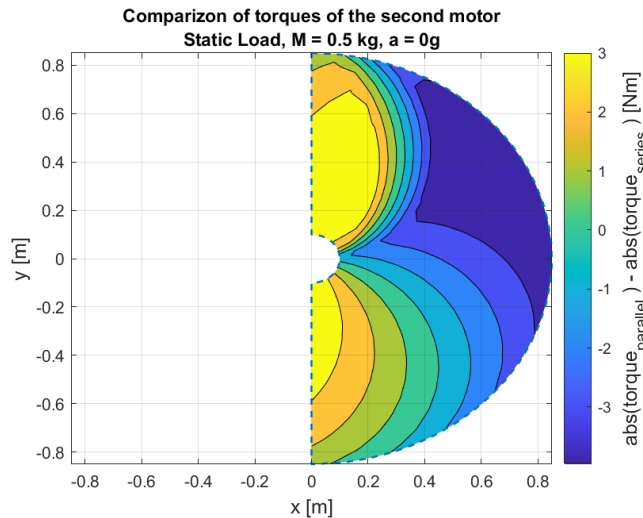
Για να γίνει πιο ευδιάκριτη η σύγκριση, σχεδιάζεται το διάγραμμα της διαφοράς των απόλυτων των ροπών του δεύτερου κινητήρα από κάθε διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-24. Στο διάγραμμα αυτό, οι θετικές τιμές της χρωματικής κλίμακας αντιπροσωπεύουν τα σημεία στα οποία ο παράλληλος μηχανισμός απαιτεί μεγαλύτερη ροπή, ενώ οι αρνητικές τιμές το αντίθετο. Παρατηρώντας το διάγραμμα, φαίνεται πως ο σειριακός μηχανισμός έχει πλεονέκτημα στις περιοχές πάνω από τη βάση του βραχίονα (που σημειώνονται με κίτρινο, πορτοκαλί και πράσινο χρώμα), ενώ στις υπόλοιπες περιοχές υπερέρχει ο παράλληλος.

Μια επιπλέον παρατήρηση που γίνεται, είναι πως συνολικά ο σειριακός μηχανισμός μπορεί να διαχειριστεί μικρότερο φορτίο από τον παράλληλο. Ο δεύτερος, αν και παρουσιάζει αδυναμία στις περιοχές που προαναφέρθηκαν, η ροπή που καλείται να ασκήσει όταν εργάζεται σε αυτές είναι παρόμοιας τάξης με του υπόλοιπου χώρου εργασίας του. Αντιθέτως, η απαίτηση ροπής του σειριακού στις περιοχές που μειονεκτεί αυξάνεται απότομα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη πως γενικά σε εφαρμογές που λειτουργούν οι βραχίονες εργάζονται πιο συχνά στην περιοχή που βρίσκεται στο μπροστινό μέρος του βραχίονα, οδηγεί στο αρχικό συμπέρασμα πως από τους δύο μηχανισμούς, υπερισχύει ο παράλληλος. Αυτό το συμπέρασμα θα ενισχυθεί και στη συνέχεια.



Σχήμα 2-24. Τα διαγράμματα ροπών των κινητήρων για (πάνω σειρά) σειριακή και (κάτω σειρά) παράλληλη διάταξη, σε στατική φόρτιση με 0.5 kg.



Σχήμα 2-25. Σύγκριση ροπών δεύτερου κινητήρα σειριακής και παράλληλης διάταξης (διαφορά απόλυτων ροπών) για όλα τα σημεία του χώρου εργασίας, σε στατική φόρτιση 0.5 kg.

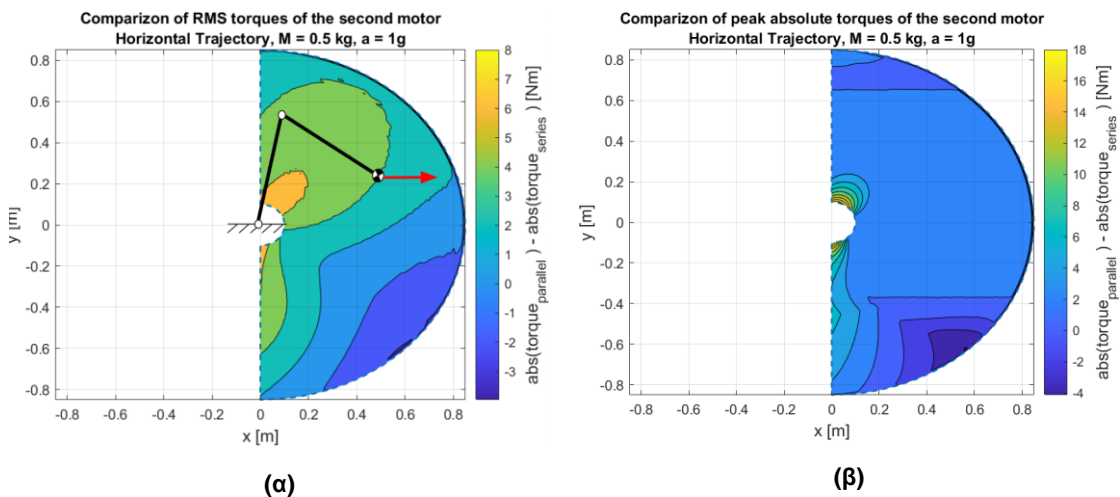
**Ευθύγραμμη Τροχιά ΤΣΔ**

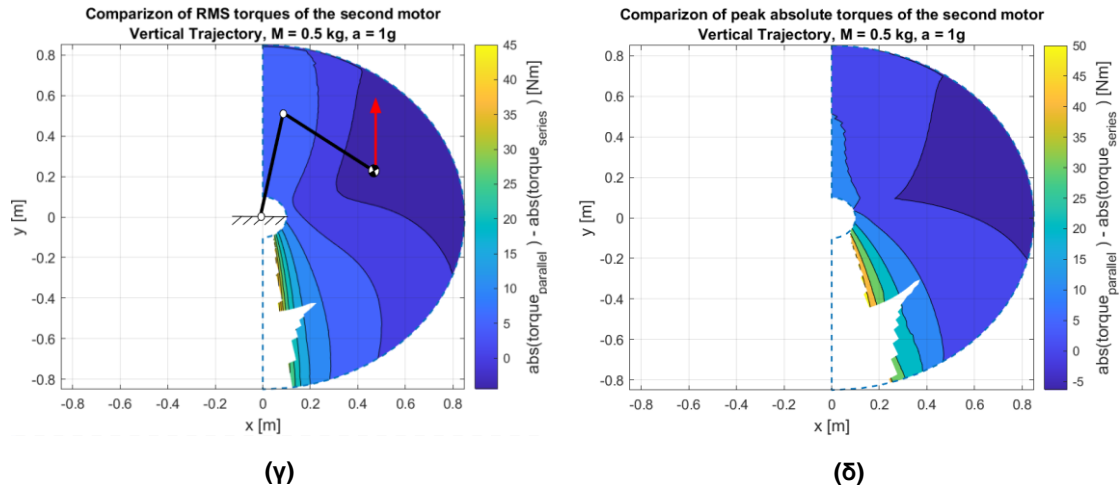
Στη συνέχεια, εξετάζεται η ευθύγραμμη τροχιά του ΤΣΔ, όπως αυτή περιεγράφηκε στην Ενότητα 2.5.2, με τριγωνικό προφίλ ταχύτητας. Μάλιστα, επιλέγεται να εξεταστούν δύο εξ ίσου σημαντικές εκδοχές της κίνησης:

- Οριζόντια ευθύγραμμη τροχιά (από αριστερά προς τα δεξιά).
- Κατακόρυφη ευθύγραμμη τροχιά (από κάτω προς τα πάνω).

Για τα σενάρια αυτά το ωφέλιμο φορτίο ορίστηκε ίσο με 0.5 kg και η γραμμική επιτάχυνση του ΤΣΔ,  $a$ , ίση με  $g$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

Όπως και στην στατική περίπτωση, χρησιμοποιούνται για σύγκριση τα διαγράμματα ροπών των δεύτερων κινητήρων, καθώς είναι αυτοί που μεταφέρουν το μεγαλύτερο φορτίο. Για εξοικονόμηση χώρου, παρουσιάζονται κατευθείαν τα διαγράμματα σύγκρισης ροπών (απόλυτης μέγιστης και RMS) των δύο διατάξεων (βλ. Σχήμα 2-26).



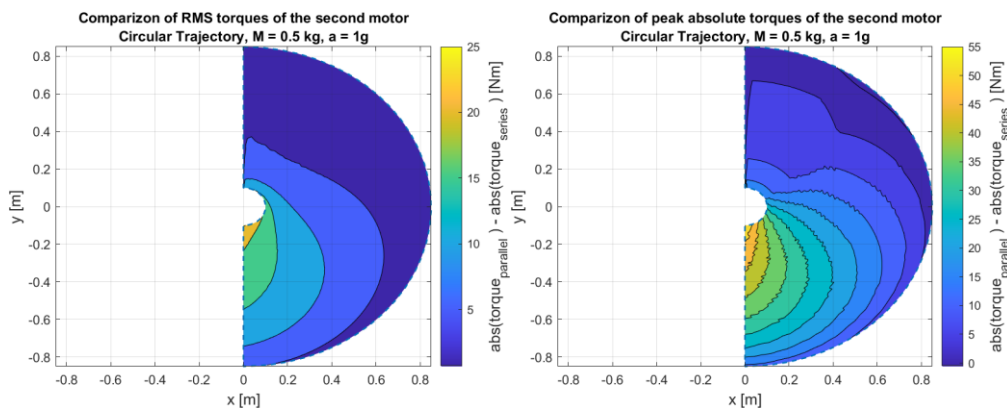


**Σχήμα 2-26.** Σύγκριση ροπών (μέγιστης απόλυτης και RMS) δεύτερου κινητήρα της σειριακής και παράλληλης διάταξης, για όλα τα σημεία του χώρου εργασίας για (α,β) οριζόντια και (γ,δ) κάθετη ευθύγραμμη τροχιά ΤΣΔ, από κάτω προς τα πάνω, με ωφέλιμο φορτίο 0.5 kg και γραμμική επιτάχυνση g. Στην περίπτωση της κατακόρυφης τροχιάς έχουν αφαιρεθεί οι τιμές των σημείων στην περιοχή κάτω από τη βάση του βραχίονα καθώς λόγω της διέλευσής του ΤΣΔ κοντά από ιδιομορφία οι τιμές της ροπής αυξάνονται δραματικά, χωρίς να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες στην ανάλυση.

Από τα διαγράμματα στο Σχήμα 2-26 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, σε μεγάλο βαθμό παρατηρείται παρόμοια κατανομή ροπών με αυτή που βρέθηκε στη στατική φόρτιση, δηλαδή ότι η σειριακή διάταξη έχει μικρότερη απαίτηση ροπής στην περιοχή κοντά στη βάση ενώ η παράλληλη στις υπόλοιπες. Αυτό ισχύει και για τη μέγιστη απόλυτη και για την RMS τιμή της ροπής. Έτσι, επιβεβαιώνεται και το συμπέρασμα της στατικής φόρτισης, πως δηλαδή για την συγκεκριμένη εφαρμογή η παράλληλη διάταξη κρίνεται καταλληλότερη.

### Κυκλική Κίνηση ΤΣΔ

Στο τρίτο σενάριο, χρησιμοποιείται η κυκλική τροχιά της Ενότητας 2.5.2. Αυτή η τροχιά, έχει αφηρησία κατά τα γνωστά το κάθε σημείο του χώρου εργασίας και τέλος το κατακόρυφο σύνορο πάνω από τη βάση (θετικός άξονας y). Το ωφέλιμο φορτίο διατηρείται ίσο με 0.5 kg, και επιλέγεται γραμμική επιτάχυνση ίση με g (9.81 m/s<sup>2</sup>). Έτσι προκύπτουν τα διαγράμματα που παρατίθενται στο Σχήμα 2-27.



**Σχήμα 2-27.** Σύγκριση ροπών (μέγιστης απόλυτης και RMS) πρώτου κινητήρα της σειριακής και παράλληλης διάταξης, για όλα τα σημεία του χώρου εργασίας για κυκλική κίνηση ΤΣΔ, με ωφέλιμο φορτίο 0.5 kg και γραμμική επιτάχυνση g.

Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με όσα έχουν προηγηθεί. Κοντά στη βάση πλεονεκτεί η σειριακή διάταξη, ενώ στα πιο απόμακρα σημεία του χώρου εργασίας ο παράλληλος. Μάλιστα, βρέθηκε πως η περιοχή υπεροχής του σειριακού μειώνεται με την αύξηση των απαιτήσεων (επιτάχυνσης ή ωφέλιμου φορτίου). Επομένως, και από αυτό το σενάριο συμπεραίνεται πως η πιο κατάλληλη διάταξη για την εφαρμογή είναι η παράλληλη.

### **Σύνοψη Αποτελεσμάτων**

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, οι δύο διατάξεις υπερέχουν σε διαφορετικές περιοχές, γεγονός που διευκολύνει την επιλογή της μιας έναντι της άλλης εάν είναι γνωστή η εφαρμογή στην οποία καλείται να λειτουργήσει το ρομποτικό σύστημα. Ένας βραχίονας που πρόκειται να εκτελέσει ενέργειες όπως χειρισμό αντικειμένων ή συνεργασίας, εργάζεται σε μεγάλο βαθμό μακριά από την βάση του. Επομένως, με βάση τα παραπάνω ευρήματα, η παράλληλη αξιολογείται ως η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, λόγω της δυνατότητάς της να διαχειριστεί φορτία σε όλο το εύρος του χώρου εργασίας και κυρίως στις απομακρυσμένες από τη βάση περιοχές.

## **2.6 Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης**

Από την τοποθέτηση των κινητήρων είναι εμφανές πως θα πρέπει να συμπεριληφθεί στο βραχίονα και ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης, το οποίο να μεταφέρει την ισχύ του κινητήρα στην άρθρωση του αγκώνα. Στη βιβλιογραφία, μπορούν να βρεθούν διάφορες διατάξεις μέσω των οποίων επιτυγχάνεται μετάδοση κίνησης σε μεγάλες αποστάσεις. Για την επιλογή μιας από αυτές, πρέπει να οριστούν πρώτα οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το εν λόγω σύστημα. Όπως και στα συστήματα επενέργησης, αυτές μπορούν να εξαχθούν άμεσα από τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του βραχίονα (βλ. Ενότητα 2.2):

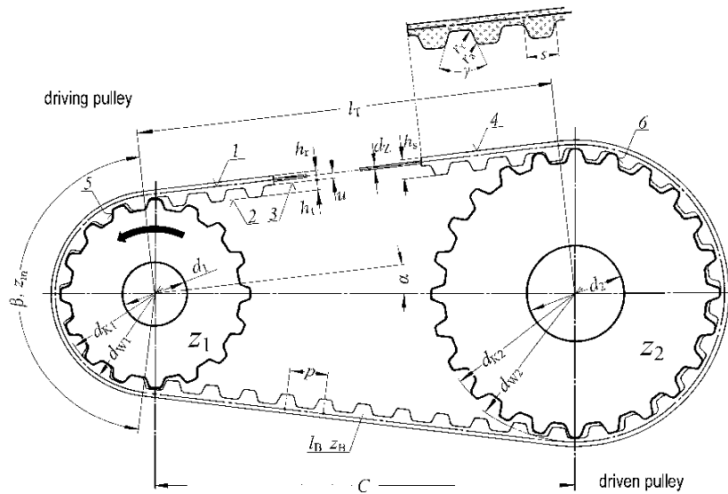
- **Χαμηλή Μηχανική Εμπέδηση:** Όπως όλα τα προηγούμενα συστήματα, έτσι και το σύστημα μετάδοσης κίνησης πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις για να είναι εφικτός ο έλεγχος δύναμης μέσω ιδιοδεκτικότητας. Συγκεκριμένα, πρέπει να δοθεί προσοχή να ικανοποιούνται τα εξής:
  - **Μικρή Χάρη Οδόντων:** Σε μεταδόσεις κίνησης με στοιχεία όπως ιμάντες χρονισμού ή αλυσίδες, τα οποία λειτουργούν με οδοντώσεις, αντίστοιχα με τα γρανάζια, υπάρχει πιθανότητα ύπαρξης χάρης μεταξύ οδόντων τροχαλίας και ιμάντα / αλυσίδας.
  - **Χαμηλή Ενδοτικότητα.**
  - **Backdrivability:** Το σύστημα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να μεταδοθεί ισχύς και προς τις δύο κατευθύνσεις. Εάν για παράδειγμα επιλεγόταν μετάδοση μέσω κοχλίας – περικοχλίου, είναι γνωστό πως είναι δύσκολη η επίτευξη backdrivability σε σχέση με άλλα συστήματα μετάδοσης.
- **Χαμηλό Κόστος:** Όπως σε όλες τις σχεδιαστικές επιλογές μέχρι τώρα, γίνεται προσπάθεια το κόστος να διατηρηθεί όσο το δυνατό χαμηλότερο.

Τα συστήματα που ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις και απαντώνται πιο συχνά σε εφαρμογές ρομποτικής και ειδικά σε βραχίονες είναι τα ακόλουθα.

### **Ιμάντας Χρονισμού**

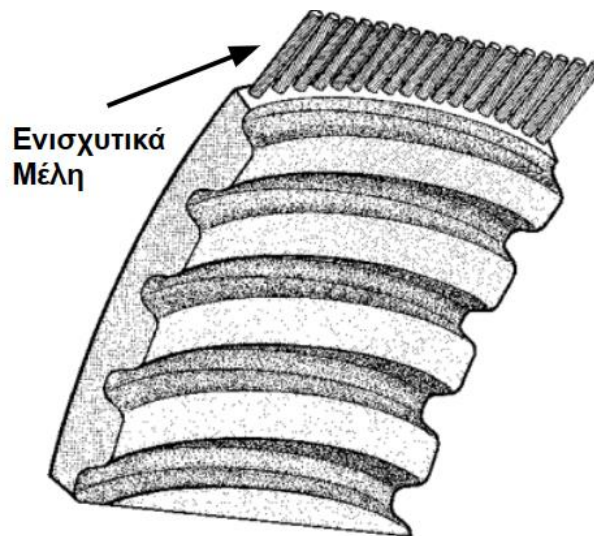
Πρόκειται για παραλλαγή των ιμάντων τριβής και επιτυγχάνουν τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις μέσω της συνεργασίας των οδόντων τους με τους οδόντες τροχαλιών που είναι συζευγμένες με την είσοδο και την έξοδο (ή εξόδους) του συστήματος (βλ. Σχήμα

2-28). Ο λόγος διαμέτρων των τροχαλιών καθορίζει το λόγο μείωσης του συστήματος μετάδοσης.



**Σχήμα 2-28. Ιμάντας χρονισμού με δύο τροχαλίες. Αριστερά βρίσκεται η κινητήρια τροχαλία (είσοδος) και δεξιά η κινούμενη (έξοδος). Πηγή εικόνας: [21].**

Το κύριο σώμα των ιμάντων και οι οδόντες είναι από ελαστομερές, όπως πολυουρεθάνη. Επιπλέον, διαθέτουν πυρήνα από ενισχυτικά μέλη (tensions members), τα οποία κατασκευάζονται είτε από χάλυβα είναι από υαλόνημα (glass fiber) (βλ. Σχήμα 2-29). Μέσω αυτών, αυξάνεται σημαντικά η αντοχή τους και ελαχιστοποιείται ο ερπυσμός, που δεν είναι επιθυμητός σε εφαρμογές ακριβείας.



**Σχήμα 2-29. Τα ενισχυτικά μέλη ενός ιμάντα χρονισμού. Πηγή εικόνας: [21].**

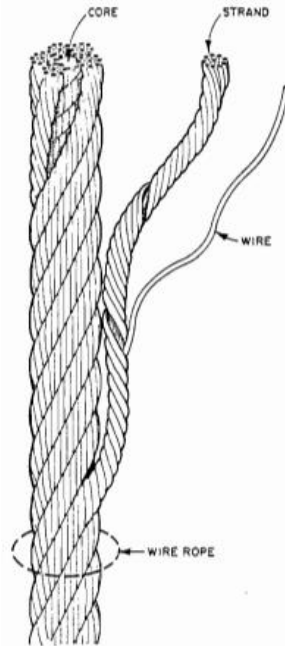
Οι ιμάντες χρονισμού, εάν επιλεγθούν σωστά είναι κατάλληλοι για εφαρμογές με αλλαγή διευθύνσεων, οι οποίες χαρακτηρίζουν έντονα τα ρομποτικά συστήματα. Επιπλέον, έχουν εύκολη εγκατάσταση και μεγάλο βαθμό απόδοσης.

### **Συρματόσχοινα**

Τα συρματόσχοινα αποτελούνται από λεπτές ίνες χάλυβα, πεπλεγμένες με συγκεκριμένο τρόπο (βλ. Σχήμα 2-30). Αναλόγως τον τρόπο εγκατάστασής τους, επιτυγχάνουν τη μετάδοση ισχύος μέσω τριβής ή μέσω πάκτωσης και χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό

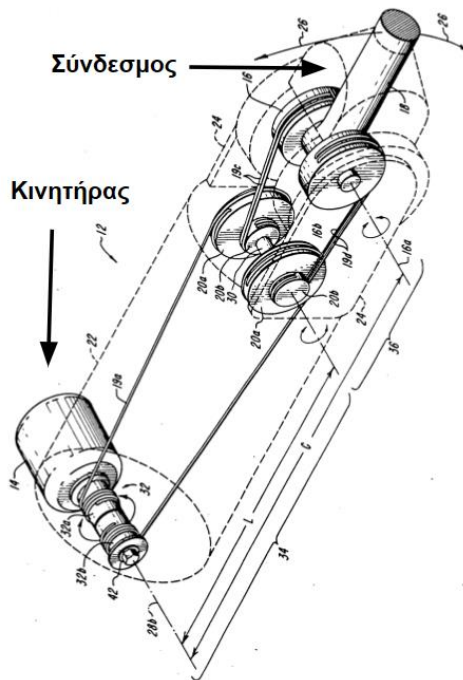


απόδοσης. Επιπλέον, τα μη-εκτατά συρματόσχοινα που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, έχουν μηδενικό backlash και ερπυσμό, που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές ακριβείας.



Σχήμα 2-30. Η δομή ενός συρματόσχοινου. Πηγή εικόνας: [22].

Ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2-31. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι πως έχουν αρκετά σύνθεση εγκατάσταση και συντήρηση. Επιπλέον είναι επιρρεπή σε φθορά και επομένως αυξάνεται και ο κίνδυνος αστοχίας. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να αποφευχθούν, αλλά με σημαντική αύξηση του κόστους.

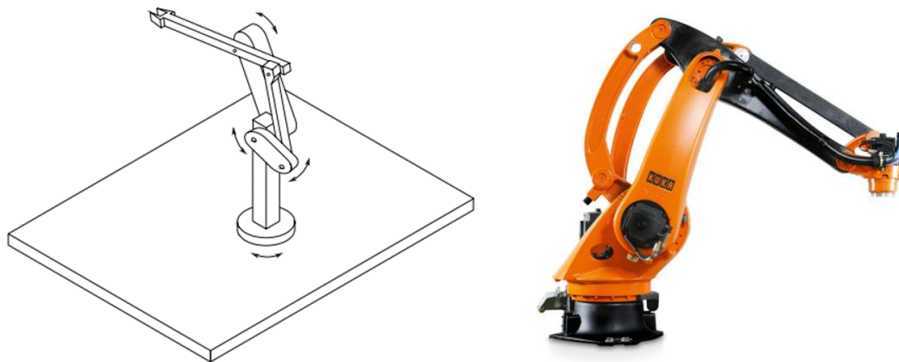


Σχήμα 2-31. Παράδειγμα συστήματος μετάδοσης κίνησης με συρματόσχοινα. Πηγή εικόνας: [23].



### Μηχανισμός Πέντε Μελών – Ράβδοι Ωθησης-Έλξης

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης της ισχύος μέσω στερεών σωμάτων, γνωστά και ως ράβδοι ώθησης-έλξης (push-pull rods). Είναι ένα συχνά χρησιμοποιούμενο σύστημα σε βραχίονες, ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται κίνηση μεγάλου ωφέλιμου φορτίου, και συνήθως εμφανίζονται σε μορφή μηχανισμού πέντε μελών (5-bar linkage), κάποιες φορές αναφερόμενος και ως μηχανισμός παραλληλογράμμου. Τα μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι πως αρχικά λόγω της δυσκαμψίας των ράβδων το σύστημα αδυνατεί να αποσβέσει τα φορτία σε περίπτωση κρουστικής φόρτισης. Επιπλέον, ο χώρος εργασίας του βραχίονα περιορίζεται σε σχέση με την υιοθέτηση ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης με ιμάντα χρονισμού ή συρματόσχοινων, λόγω του αυξημένου όγκου του. Αυτό συνεπάγεται αυξημένη μάζα του συστήματος και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα κατασκευής.



Σχήμα 2-32. Παράδειγμα ρομποτικών βραχιόνων που χρησιμοποιούν ράβδους ώθησης-έλξης. Αριστερά φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση ενός βραχίονα που λειτουργεί με μηχανισμό παραλληλογράμμου, ενώ δεξιά η διάταξη των ράβδων στο ρομπότ KUKA KR 40 PA. Πηγές εικόνων: [7].

### Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μετάδοση ισχύος μέσω ιμάντα χρονισμού. Αν και τα συρματόσχοινα έχουν πολύ ελκυστικά χαρακτηριστικά, η δυσκολία στην εγκατάστασή και στη συντήρησή τους τα υποβαθμίζει σε σχέση με έναν ιμάντα χρονισμού που δεν αντιμετωπίζει αυτά τα προβλήματα. Επιπλέον, για να υπάρχει συνοχή με την επιλογή EAM που συνεπάγεται λόγω μετάδοσης ίσο με τη μονάδα και προσφέρει χαμηλή μηχανική εμπέδηση, και εφόσον, όπως θα φανεί και στην Ενότητα 3.5, οι απαιτήσεις ροπής της άρθρωσης του αγκώνα είναι μειωμένες, επιλέγεται ο λόγος μετάδοσης στον ιμάντα χρονισμού να είναι 1:1, δηλαδή οι τροχαλίες θα είναι ίσης διαμέτρου και αριθμού οδόντων.

## 3 Σχεδιασμός Ρομποτικού Βραχίονα

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του βραχίονα, ο οποίος υπακούει σε όλους τους περιορισμούς και επιλογές που τέθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Στην Ενότητα 3.2 γίνεται η επιλογή κινητήρα για το σύστημα επενέργησης και το αντίστοιχο σύστημα οδήγησης. Στην Ενότητα 3.3 παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός του βραχίονα στο λογισμικό SolidWorks. Με βάση το σχέδιο του βραχίονα στην Ενότητα 3.4 εκτελείται μια παραμετρική ανάλυση μέσω του MATLAB ώστε να επιλεχθούν τα μήκη των συνδέσμων που ικανοποιούν τις απαιτήσεις ωφέλιμου φορτίου και χώρου εργασίας. Ακολούθως, παρατίθενται οι επιδόσεις βραχίονα σε θέματα ανάπτυξης γραμμικής ταχύτητας και επιτάχυνσης συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου. Στην Ενότητα 3.6 παρουσιάζεται η διαδικασία επιλογής συστήματος μετάδοσης κίνησης και τέλος, στην Ενότητα 3.7 εξετάζεται και εξασφαλίζεται η δομική ακεραιότητα του βραχίονα μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό SolidWorks.

### 3.2 Σύστημα Επενέργησης

Το πρώτο στοιχείο του βραχίονα που πρέπει να καθοριστεί είναι το σύστημα επενέργησης. Εφόσον πρόκειται ένα σύστημα άμεσης μετάδοσης, ο περιοριστικός παράγοντας και άρα το κριτήριο επιλογής είναι η δυνατότητα ανάπτυξης ροπής (και όχι ισχύος) του κινητήρα, και συγκεκριμένα η πυκνότητα ροπής, η οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί.

Επιπλέον, πρέπει να επιλεχθεί και το κατάλληλο σύστημα οδήγησης για του κινητήρες. Αυτό είναι ένα λεπτό ζήτημα καθώς η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος στα τυλίγματα (Εξ. (2-3)) του κινητήρα και επομένως το σύστημα οδήγησης θα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί τα μεγάλα ρεύματα που πρόκειται να αναπτυχθούν.

#### 3.2.1 Επιλογή Κινητήρα

Στο εμπόριο, υπάρχει πληθώρα τύπων ηλεκτροκινητήρων, όπως συνεχούς ρεύματος με ή χωρίς ψήκτρες, επαγωγικοί και βηματικοί κινητήρες. Τα τελευταία χρόνια, με την άνοδο των τετράποδων ρομπότ, έχει βρεθεί πως οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (ΣΡΧΨ) εξωτερικού δρομέα, οι οποίοι αρχικά προορίζονταν για εφαρμογές τύπου drone, ενδείκνυται για ρομποτικά συστήματα σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρων [24]. Ένας από τους λόγους, είναι η μεγάλη ακτίνα διακένου που διαθέτουν, που συνεπάγεται δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλης ροπής [25]. Η επιλογή τέτοιων κινητήρων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα εύστοχη σε πληθώρα εφαρμογών, είτε αφορούν ρομποτική βάδιση είτε ρομποτικό χειρισμό. Αξιοσημείωτα παραδείγματα αποτελούν τα τετράποδα ρομπότ του MIT και ο ρομποτικός βραχίονας BLUE του UC Berkeley (βλ. Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1. (Πάνω) Το ρομπότ MIT Mini Cheetah και ο κινητήρας των επενεργητών του, iFlight ex-8. (Κάτω) Ο ρομπωτικός χειριστής BLUE και ο κινητήρας των επενεργητών του, iPower GBM110. Πηγές εικόνων: [15] [26] [4] [27].

Με αυτό ως αναφορά, βρέθηκε πως ο κινητήρας T-Motor R100 KV90 (βλ. Σχήμα 3-2), έχει ιδιαίτερα ανταγωνιστική πυκνότητα ροπής, συγκρινόμενος με κινητήρες που υιοθετούν αντίστοιχα ρομπωτικά συστήματα, ενώ ταυτόχρονα διαθέτει εξαιρετικές δυνατότητες ανάπτυξης ροπής (Πίνακας 3-1).

Πίνακας 3-1. Οι προδιαγραφές κινητήρων ΣΡΧΨ εξωτερικού δρομέα παρόμοιων ρομπωτικών συστημάτων. Όπου εισάγεται (-) η προδιαγραφή δεν είναι διαθέσιμη.

Κινητήρας	Ρομπωτικό Σύστημα	Ονομαστική Ροπή [Nm]	Μέγιστη Ροπή [Nm]	Βάρος [kg]	Ονομαστική Πυκνότητα Ροπής [Nm/kg]	Μέγιστη Πυκνότητα Ροπής [Nm/kg]	Σταθερά Ροπής [Nm/A]
T-Motor R100 KV90 [28]	Ρομπωτικός Βραχίονας Εργασίας	3.7	11	0.731	5.06	15.04	0.106
iFlight ex-8 [26]	MIT Mini Cheetah [15]	-	2.18	0.227	-	9.60	0.091
TQ ILM - E85x26 Servo Kit [29]	Michigan Prosthetic Leg [30]	2.87	9.24	0.712	4.03	12.98	0.268
T-Motor	GOAT [8]	1.45	6.5	0.405	3.58	16.05	0.260

U10 KV80 [31]							
------------------	--	--	--	--	--	--	--

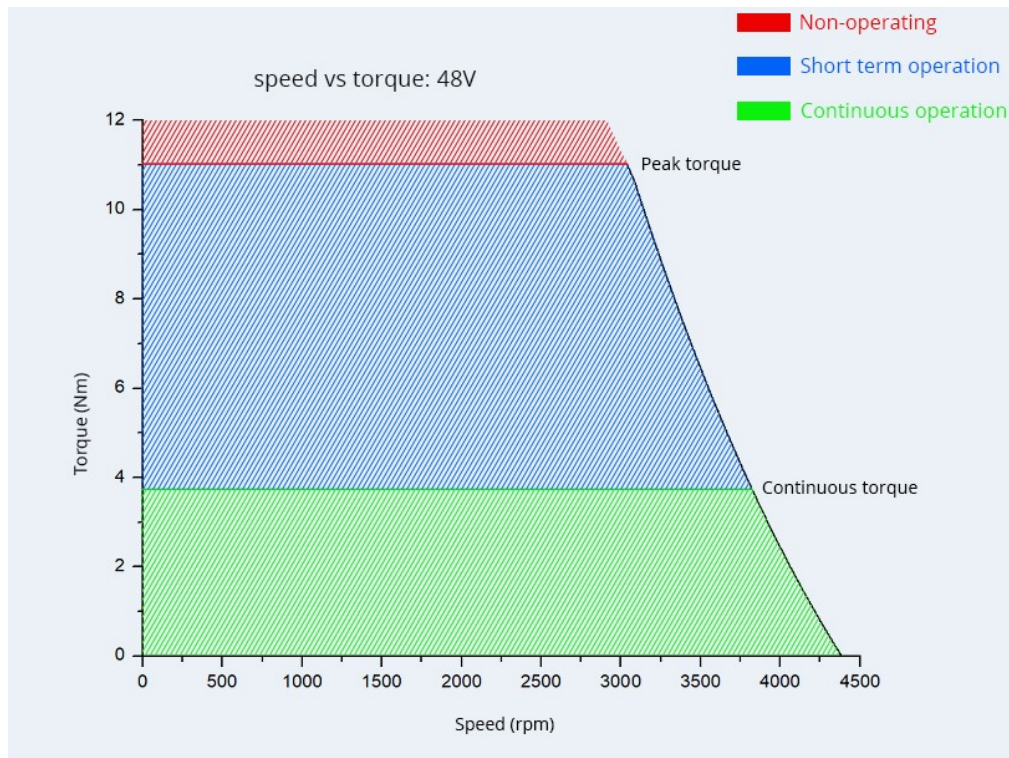
Αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι ο κινητήρας έχει ήδη ενσωματωμένο κέλυφος (casing). Έτσι, διαθέτει βελτιωμένες ιδιότητες σε θέματα απαγωγής θερμότητας, η οποία, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.5, είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας των ηλεκτροκινητήρων. Επιπλέον, περιλαμβάνει αισθητήρα Hall για την οδήγηση (commutation) του και την ανάδραση γωνιακής θέσης. Ο Πίνακας 3-2 περιλαμβάνει τις προδιαγραφές του σύμφωνα με τον κατασκευαστή [28], ενώ στο Σχήμα 3-3 φαίνεται το διάγραμμα στρωφών – ροπής (χάρτης λειτουργίας), στο οποίο διακρίνονται οι περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας.



Σχήμα 3-2. Ο κινητήρας T-Motor R100 KV90. Πηγή εικόνας: [28].

Πίνακας 3-2. Οι προδιαγραφές του κινητήρα T-Motor R100 KV90 [28].

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Μάζα	0.731	kg
Μέγιστη Τάση Τροφοδοσίας	48	V
Ονομαστική Ροπή	3.7	Nm
Μέγιστη Ροπή	11	Nm
Ονομαστικό Ρεύμα	35	A
Μέγιστο Ρεύμα	104	A
Σταθερά Ροπής	0.106	Nm/A
Αριθμός Ζευγών Πόλων	21	-
Αντίσταση (Phase-to-Phase)	51	mΩ
Επαγωγή (Phase-to-Phase)	33	μH
Μέγιστος λόγος ροπής-βάρους	16.4	Nm/kg
Διάμετρος	106.8	mm
Τύπος Τυλίγματος	Δέλτα / Τρίγωνο	-



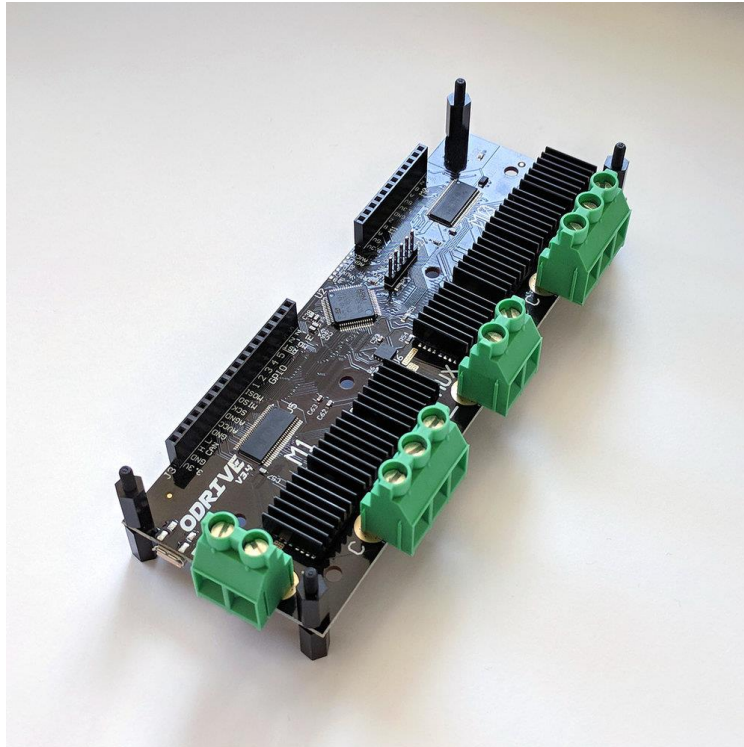
**Σχήμα 3-3.** Ο χάρτης λειτουργίας του κινητήρα (continuous operation: συνεχής λειτουργία, short term operation: περιορισμένη λειτουργία, non-operating: περιοχή στην οποία δεν μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας). Πηγή εικόνας: [28].

### 3.2.2 Επιλογή Συστήματος Οδήγησης Κινητήρα

Μέχρι πρόσφατα, για την οδήγηση των κινητήρων ΣΡΧΨ χρησιμοποιούνταν συστήματα τα οποία αποσκοπούσαν στον έλεγχο ταχύτητας (speed-control). Καθώς όμως στις εφαρμογές ρομποτικής απαιτείται ακριβής έλεγχος ροπής και θέσης σε όλο το φάσμα ταχυτήτων περιστροφής του κινητήρα, πλέον έχουν αναπτυχθεί ελεγκτές που επιτελούν αυτή τη λειτουργία.

Στο εμπόριο μπορεί να βρεθεί πληθώρα συστημάτων οδήγησης με σχετικά χαμηλό κόστος, όπως το MIT Mini Cheetah Controller [32], το Moteus r4.11 controller [33] και οι ελεγκτές της εταιρείας ODrive [34]. Από αυτά, το καταλληλότερο κρίνεται πως είναι το ODrive v3.6 (56V) [35] (βλ. Σχήμα 3-4), αρχικά λόγω της ικανότητάς του να διαχειριστεί ρεύματα εξ ίσου μεγάλα με του κινητήρα, αλλά και επειδή έχει επιδείξει ανώτερες επιδόσεις από άλλους σε αντίστοιχη τιμή [36].





**Σχήμα 3-4. Το σύστημα οδήγησης ODrive v3.6 (56V). Πηγή εικόνας [35].**

Έχει τη δυνατότητα τροφοδοσίας με τάση από 12 V έως 56 V. Η προδιαγραφή μέγιστου ρεύματος είναι 120 A, ενώ η τιμή του συνεχούς εξαρτάται από την ψύξη. Συγκεκριμένα, είναι 40 A όταν η πλακέτα είναι εκτεθειμένη σε αέρα χωρίς επιπλέον ψύξη, ενώ 75 A με ψύξη από ανεμιστήρα [37]. Έτσι, κρίνεται ως κατάλληλο για την οδήγηση του παραπάνω κινητήρα, καθώς η τιμή του ρεύματος συνεχούς λειτουργίας (χωρίς ψύξη) και του μέγιστου ρεύματος είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τους κινητήρα.

Έχει ενσωματωμένο μικροελεγκτή STMicroelectronics της σειράς STM32F405 με ταχύτητα ρολογιού 168 MHz και οδηγό Texas Instruments DRV8301 με τρεις ανορθωτές μισής γέφυρας, αποτελούμενοι από δύο N-channel MOSFETs έκαστος, για την οδήγηση κινητήρα. Δέχεται έως δύο κινητήρες, μαζί με τους αντίστοιχους αισθητήρες γωνιακής θέσης (encoders). Μάλιστα, υποστηρίζει είτε αισθητήρες αυξανόμενης (incremental) (με ή χωρίς index pulse) ή απόλυτης (absolute) θέσης, είτε αισθητήρες Hall. Η επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές (π.χ. PC, Raspberry Pi) μπορεί να γίνει μέσω διαφόρων διεπαφών (interfaces), μεταξύ των οποίων είναι το USB, το CAN και το UART. Σε ότι αφορά το USB, που χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής, η επικοινωνία γίνεται σε πραγματικό χρόνο (realtime communication), με δυνατότητα αποστολής 4000 floats/sec.

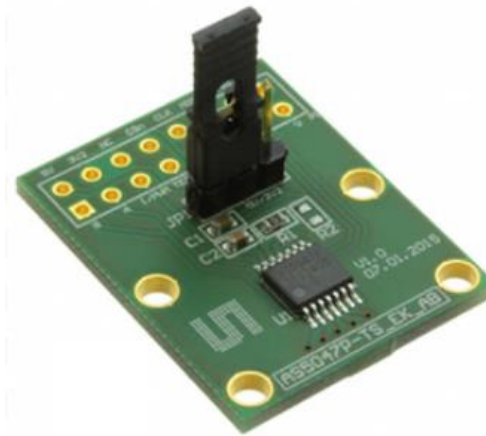
Το ODrive αναλαμβάνει την οδήγηση (commutation) των κινητήρων και την εκτέλεση κλειστού βρόχου ελέγχου τύπου PID (proportional – integral – derivative), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται έλεγχος θέσης, ταχύτητας και ρεύματος στα 8 kHz. Η συχνότητα του PWM (pulse width modulation) σήματος είναι 24 kHz. Η οδήγηση (commutation) των κινητήρων γίνεται μέσω Field Oriented Control (FOC) και συγκεκριμένα με τη μέθοδο Space Vector Modulation (SVM). Τέλος, έχει τη δυνατότητα αναγεννητικής πέδησης (regenerative braking), όταν τροφοδοτείται από μπαταρία.

### 3.2.3 Αισθητήρας Γωνιακής Θέσης (encoder)

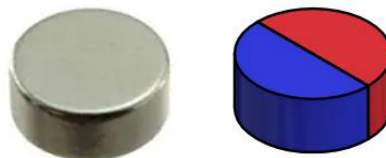
Παρά το γεγονός ότι ο κινητήρας έχει ενσωματωμένο αισθητήρα Hall, για την ανάδραση γωνιακής θέσης χρησιμοποιείται ο μαγνητικός encoder AMS AS5047P-TS\_EK\_AB (βλ Σχήμα 3-5). Αυτό συμβαίνει γιατί οι αισθητήρες Hall προσφέρουν πολύ μικρότερη ακρίβεια από έναν encoder. Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα ανά περιστροφή (counts per revolution – CPR) του αισθητήρα Hall του κινητήρα είναι ίσα με έξι φορές τον αριθμό των ζευγών πόλων [38], δηλαδή 120 CPR. Η χαμηλή ανάλυση του αισθητήρα Hall δυσχεραίνει τη λειτουργία του κινητήρα, ειδικά στις χαμηλές στροφές στις οποίες πρόκειται να λειτουργήσει. Συγκριτικά, ο AS5047P-TS\_EK\_AB έχει ανάλυση 16384 CPR (για επικοινωνία με SPI).

Η μέτρηση της γωνίας περιστροφής από το μαγνητικό encoder γίνεται μέσω στοιχείων Hall, τα οποία αντιλαμβάνονται την αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από έναν κυλινδρικό, διαμετρικά πολωμένο μαγνήτη (AS500-MD6H, Bomatec AG) (βλ. Σχήμα 3-6), ο οποίος περιστρέφεται μαζί με τον άξονα του κινητήρα. Για να εκτελεστεί σωστά η μέτρηση, πρέπει το κέντρο περιστροφής, το κέντρο του μαγνήτη και το κέντρο του μικροκυκλώματος (chip) που περιλαμβάνει τα στοιχεία Hall να ταυτίζονται. Επιπλέον, ο μαγνήτης πρέπει να έχει απόσταση από 0.5 mm έως 3 mm από το μικροκύκλωμα [39].

Η απόλυτη θέση δίνεται μέσω σειριακής διεπαφής SPI, με ανάλυση 14-bit (16384 CPR), στα 10 MHz. Διαφορετικά, είναι διαθέσιμη και η αυξανόμενη θέση, μέσω σημάτων ABI. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη ανάλυση είναι 4000 CPR.



Σχήμα 3-5. Ο αισθητήρας γωνιακής θέσης AMS – AS5047P-TS\_EK\_AB. Πηγή εικόνας: [40].

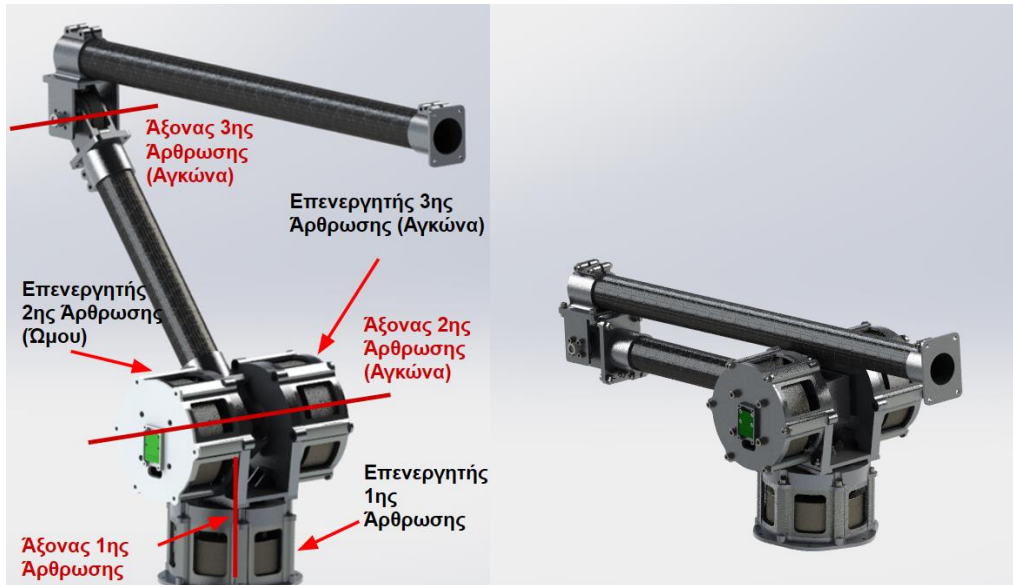


Σχήμα 3-6. (Αριστερά) Ο διαμετρικά πολωμένος μαγνήτης Bomatec AG AS500-MD6H του αισθητήρα γωνιακής θέσης και (δεξιά) η σχηματική αναπαράσταση της πόλωσής του. Πηγή εικόνων: [40].

## 3.3 Σχεδιασμός Βραχίονα

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται το τρισδιάστατο σχέδιο του βραχίονα. Αυτό υλοποιήθηκε στο σχεδιαστικό λογισμικό SolidWorks. Για να είναι πιο κατανοητή η παρουσίαση των

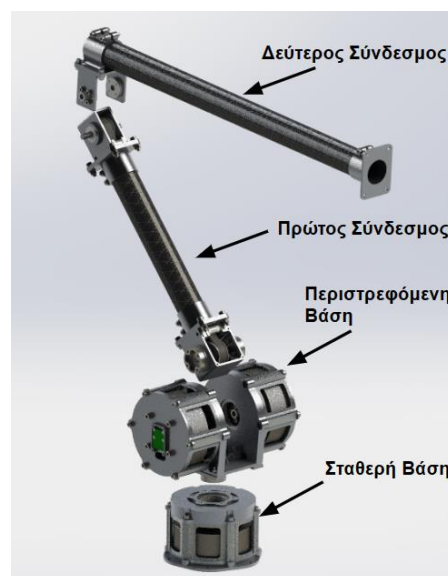
διαφόρων τμημάτων του σχεδίου, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί πρώτα η τελική μορφή του βραχίονα. Αυτή μπορεί να φανεί στο Σχήμα 3-7.



Σχήμα 3-7. Το συναρμολόγημα του βραχίονα σε (αριστερά) έκταση και (δεξιά) δίπλωση.

Το συναρμολόγημα του βραχίονα κατηγοριοποιείται στα εξής υποσυστήματα (βλ. Σχήμα 3-8), με βάση τα οποία θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια:

- **Σταθερή Βάση** (fixed base). Ουσιαστικά αποτελείται από τον πρώτο κινητήρα και την αντίστοιχη άρθρωση. Σε αυτή εδράζεται ο υπόλοιπος βραχίονας, ενώ ταυτόχρονα είναι το σημείο πρόσδεσης και ασφάλισης του βραχίονα με το περιβάλλον.
- **Περιστρεφόμενη Βάση** (rotating base). Σε αυτή εδράζονται οι κινητήρες της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης. Είναι το τμήμα που συνδέεται με την έξοδο του πρώτου κινητήρα.
- **Πρώτος Σύνδεσμος** (first link).
- **Δεύτερο Σύνδεσμος** (second link).



Σχήμα 3-8. Τα κύρια υποσυστήματα του συναρμολογήματος του βραχίονα.



Για τα διάφορα εξαρτήματα του βραχίονα είναι χρησιμοποιείται κυρίως κράμα αλουμινίου 7075-T6, λόγω του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος. Η μοναδική εξαίρεση είναι στα σημεία που υπάρχει συναρμογή εξαρτήματος με έδρανο κύλισης, που για την ελαχιστοποίηση φθοράς υλικού χρησιμοποιείται ανοξείδωτος χάλυβας.

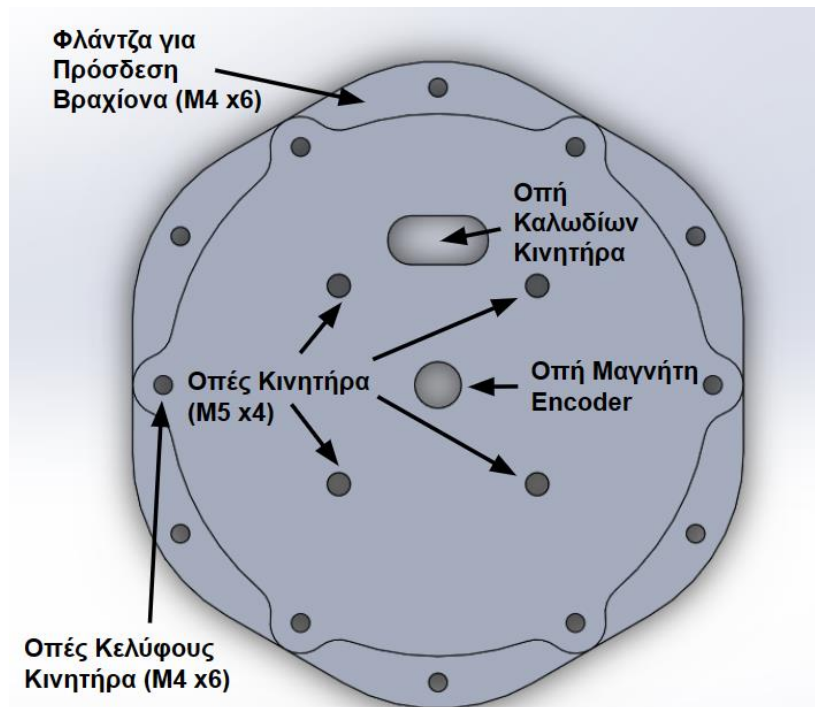
### 3.3.1 Σταθερή Βάση

Όπως προαναφέρθηκε, η σταθερή βάση εξυπηρετεί τρεις ρόλους: την έδραση του βραχίονα, την έδραση του πρώτου επενεργητή και την έδραση του υπόλοιπου βραχίονα (περιστρεφόμενη βάση, πρώτος και δεύτερος σύνδεσμος). Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται φαίνονται στο Σχήμα 3-9.

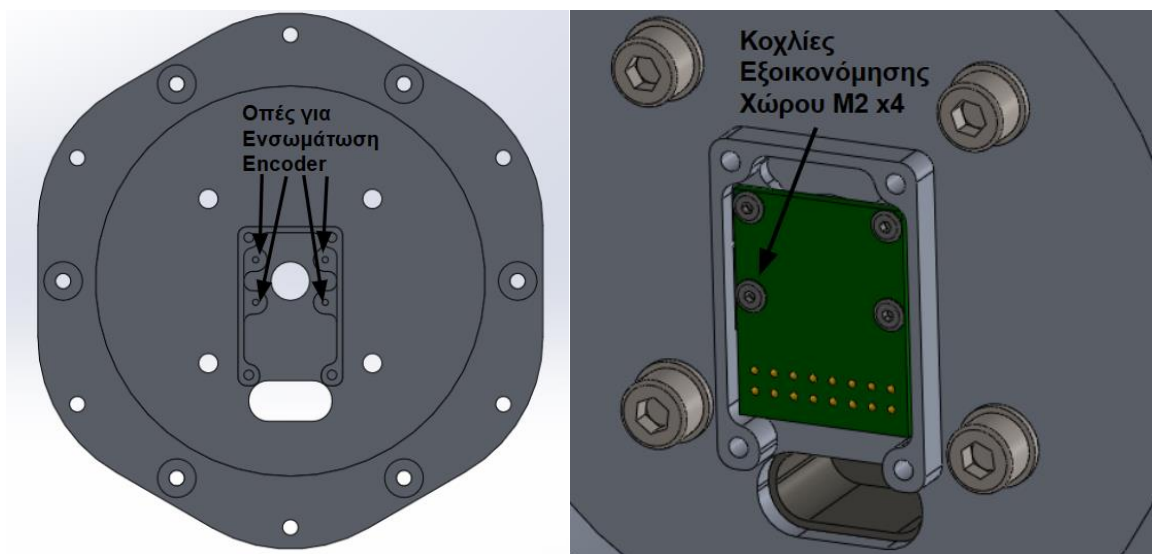


**Σχήμα 3-9.** Το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης σε (αριστερά) ισομετρική όψη και (δεξιά) σε ανεπτυγμένη προβολή (exploded view).

Το κάτω τμήμα της σταθερής βάσης, φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Σε αυτή εδράζονται ο κινητήρας μέσω τεσσάρων κοχλιών M5, το κέλυφος του κινητήρα και ο αισθητήρας γωνιακής θέσης, ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνει διαμόρφωση φλάντζας για την πρόσδεσή του βραχίονα στο περιβάλλον, μέσω έξι κοχλιών M4. Συγκεκριμένα για τον αισθητήρα γωνιακής θέσης, έχει σχεδιαστεί ειδική διαμόρφωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11, στην οποία εδράζεται μέσω τεσσάρων κοχλιών εξοικονόμησης χώρου (space-saving bolts) M2. Επιπλέον, σχεδιάζεται ειδικό εξάρτημα για την ενσωμάτωση του μαγνήτη του αισθητήρα γωνιακής θέσης στον κινητήρα, μέσω του οποίου εξασφαλίζεται και η σωστή απόσταση από τον αισθητήρα Hall (βλ. Σχήμα 3-12 και Σχήμα 3-13). Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται και στους υπόλοιπους κινητήρες. Το μέχρι στιγμής συναρμολόγημα φαίνεται στο Σχήμα 3-13.



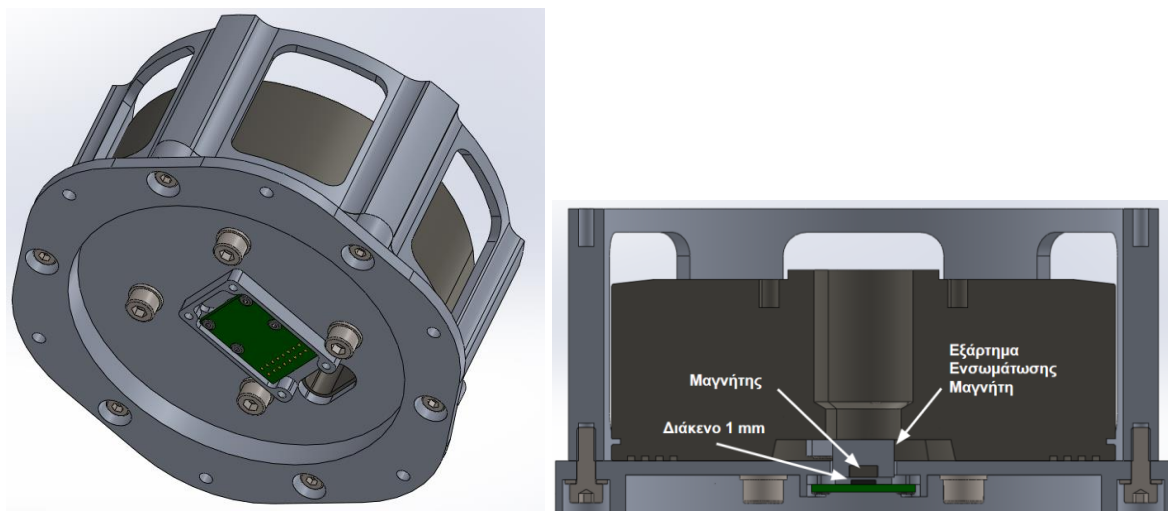
Σχήμα 3-10. Η άνω του κάτω τμήματος της σταθερής βάσης. Επισημαίνονται οι χρήσεις των διαφόρων οπών.



Σχήμα 3-11. (Αριστερά) Η κάτω όψη της σταθερής βάσης. Φαίνεται η ειδική διαμόρφωση για τον αισθητήρα γωνιακής θέσης και (δεξιά) η ενσωμάτωσή του.

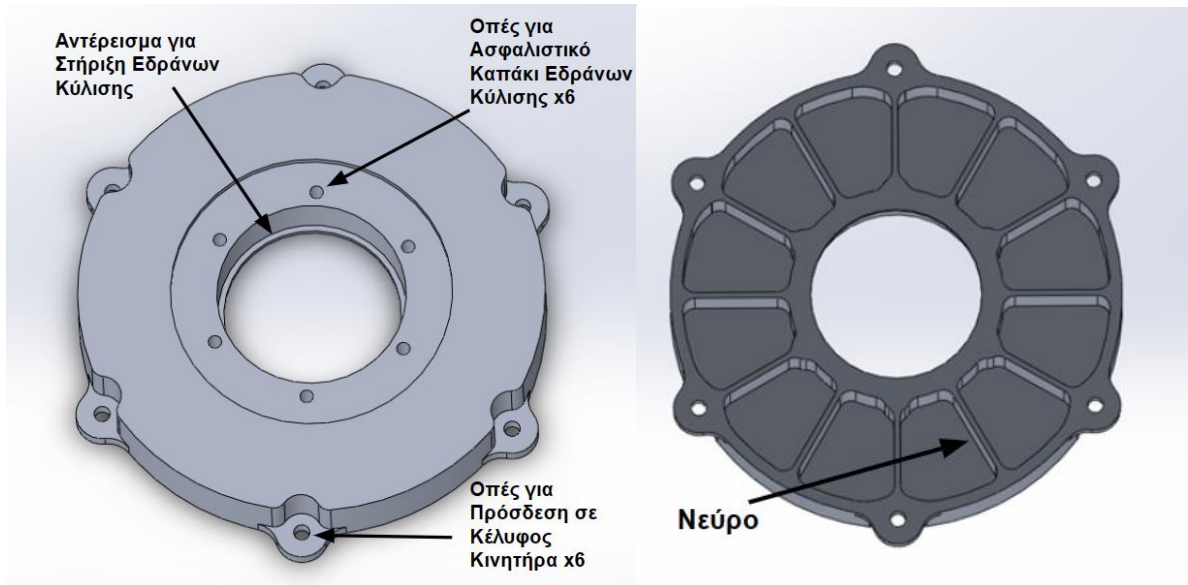


Σχήμα 3-12. Ο τρόπος πρόσδεσης του μαγνήτη του αισθητήρα γωνιακής θέσης στον κινητήρα. Πηγή εικόνας (αριστερά): [28].

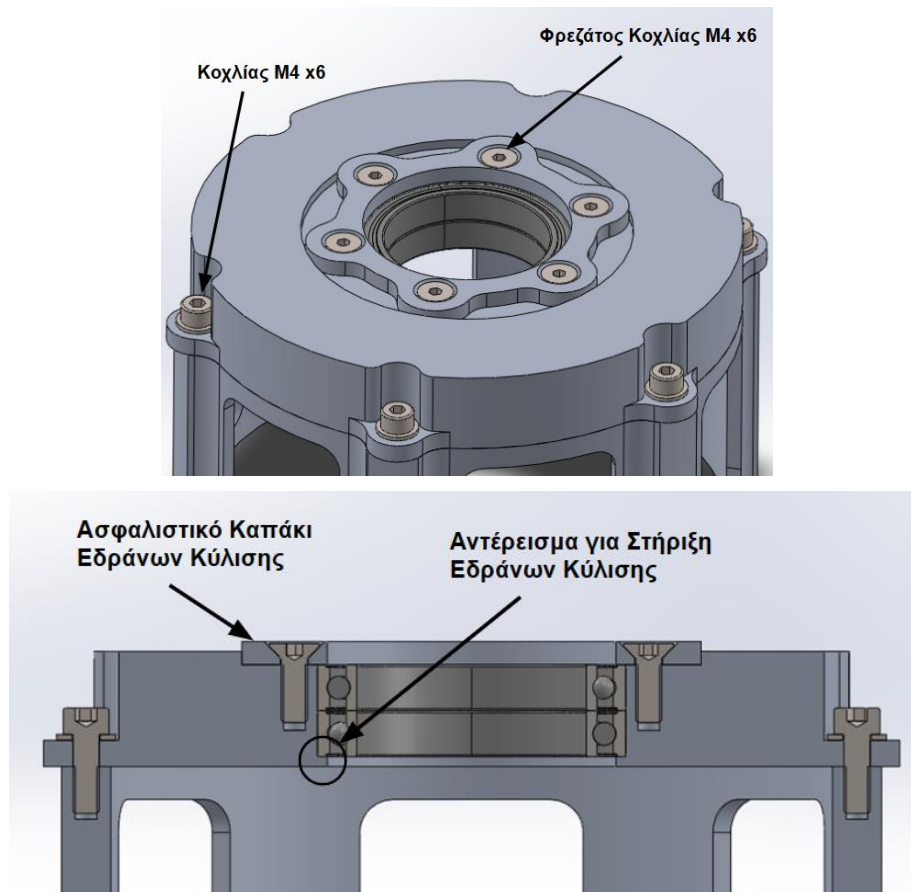


Σχήμα 3-13. (Αριστερά) Το συναρμολόγημα κάτω τμήματος σταθερής βάσης – κινητήρα – αισθητήρα γωνιακής θέσης – κελύφους κινητήρα και (δεξιά) η τομή του.

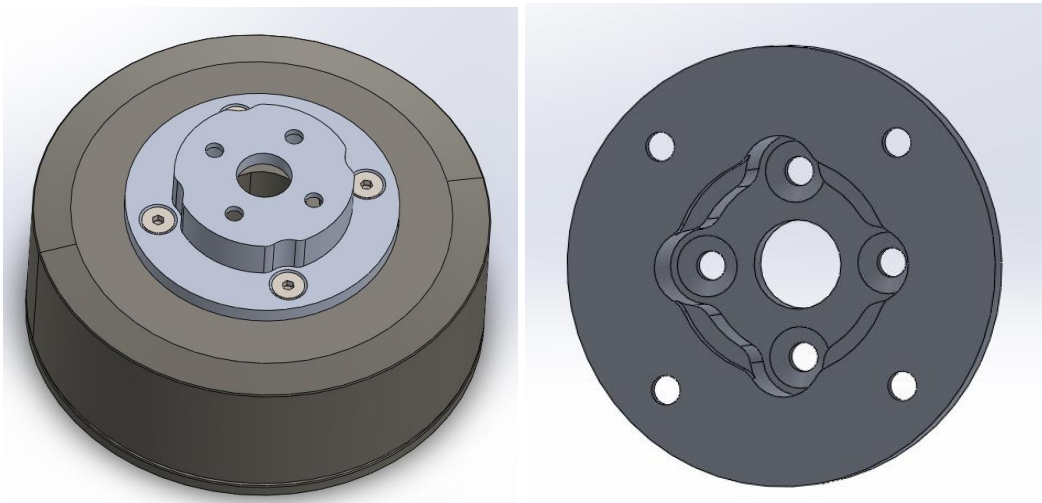
Το άνω τμήμα της σταθερής βάσης, στεγάζει τα έδρανα κύλισης της πρώτης άρθρωσης και έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η μάζα του, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η δομική του ακεραιότητα (βλ. Σχήμα 3-14). Ως πλέον κατάλληλα έδρανα κύλισης, σύμφωνα με τον κατάλογο της SKF [41], κρίθηκαν τα 61807-2RZ. Για τη στήριξη στο κάτω μέρος τους έχει σχεδιαστεί αντέρεισμα (abutment) με τις διαστάσεις που προτείνει ο κατασκευαστής [41], ενώ στο πάνω μέρος τους ασφαλίζονται με ασφαλιστικό καπάκι, το οποίο εγκαθίσταται με έξι φρεζάτους κοχλίες M4. Τέλος, για την έξοδο του κινητήρα έχει σχεδιαστεί κατάλληλο κόπλερ (σύνδεσμος), για τη μετάδοση της ισχύος στην άρθρωση. Το ελεύθερο άκρο του κόπλερ συνδέεται με την περιστρεφόμενη βάση, όπως θα φανεί παρακάτω.



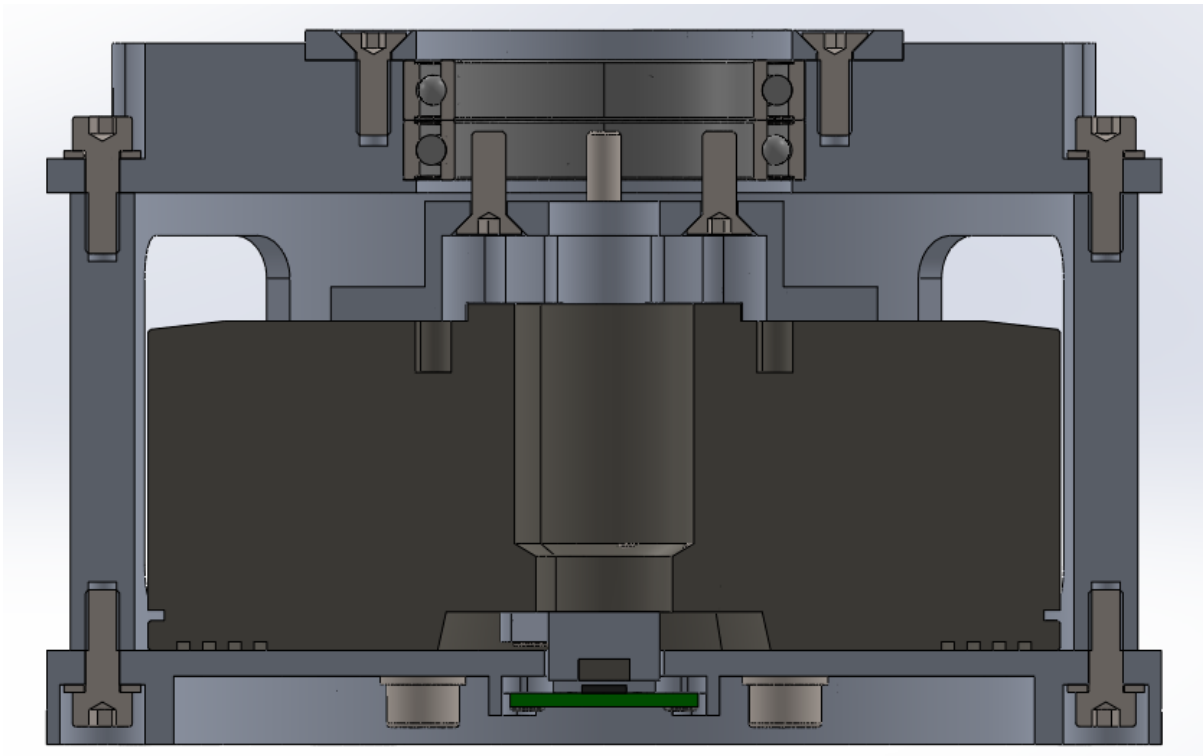
Σχήμα 3-14. Το άνω τμήμα της σταθερής βάσης σε (αριστερά) άνω και (δεξιά) κάτω όψη. Τα νεύρα στο κάτω μέρος του εξαρτήματος επιτρέπουν την αφαίρεση μεγάλης ποσότητας υλικού, μειώνοντας έτσι τη μάζα του διατηρώντας ταυτόχρονα πολύ καλές δομικές ιδιότητες.



Σχήμα 3-15. Ο τρόπος εγκατάστασης και ασφάλισης των εδράνων κύλισης της πρώτης άρθρωσης σε (πάνω) ισομετρική όψη και (κάτω) σε τομή. Επισημαίνεται επίσης το τρόπο πρόσδεσης του άνω τμήματος στο κέλυφος του κινητήρα.



Σχήμα 3-16. (Αριστερά) Το συναρμολόγημα κόπλερ – πρώτου κινητήρα σε ισομετρική όψη και (δεξιά) η κάτω πλευρά του συνδέσμου.

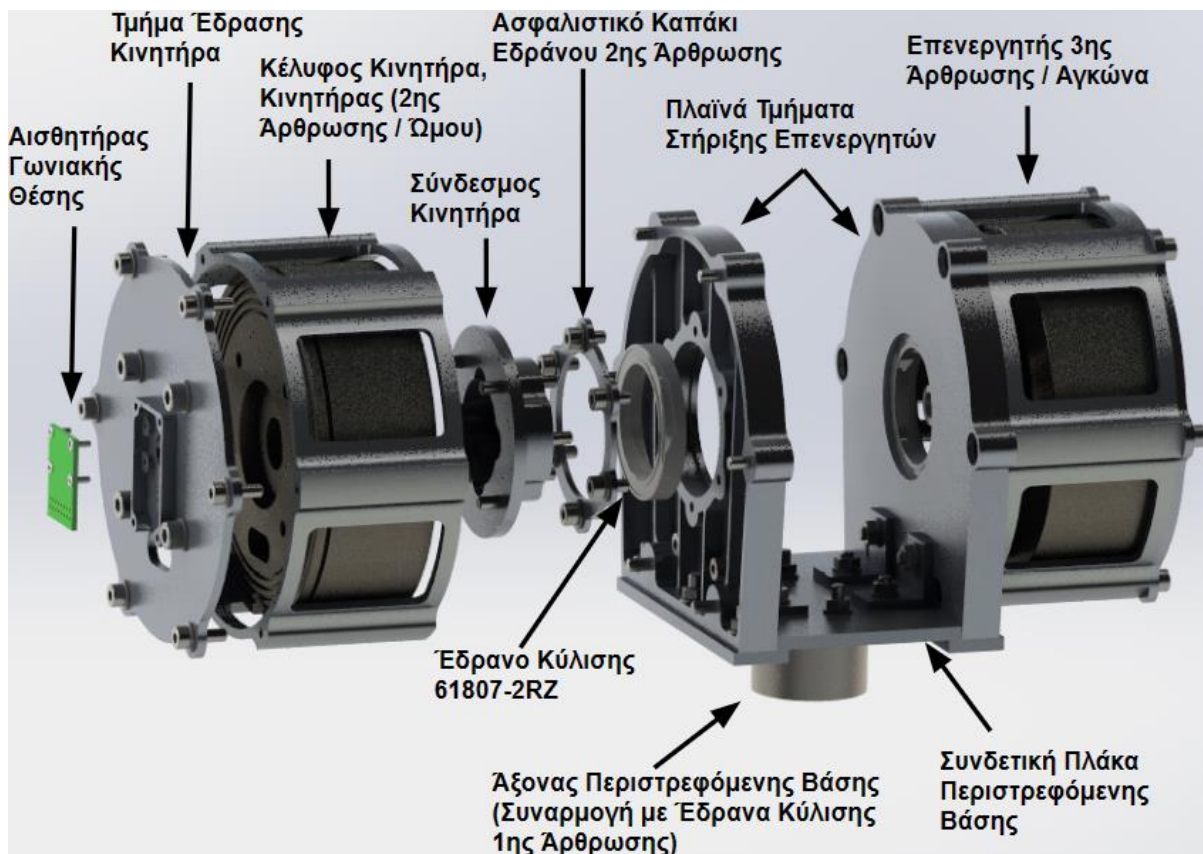
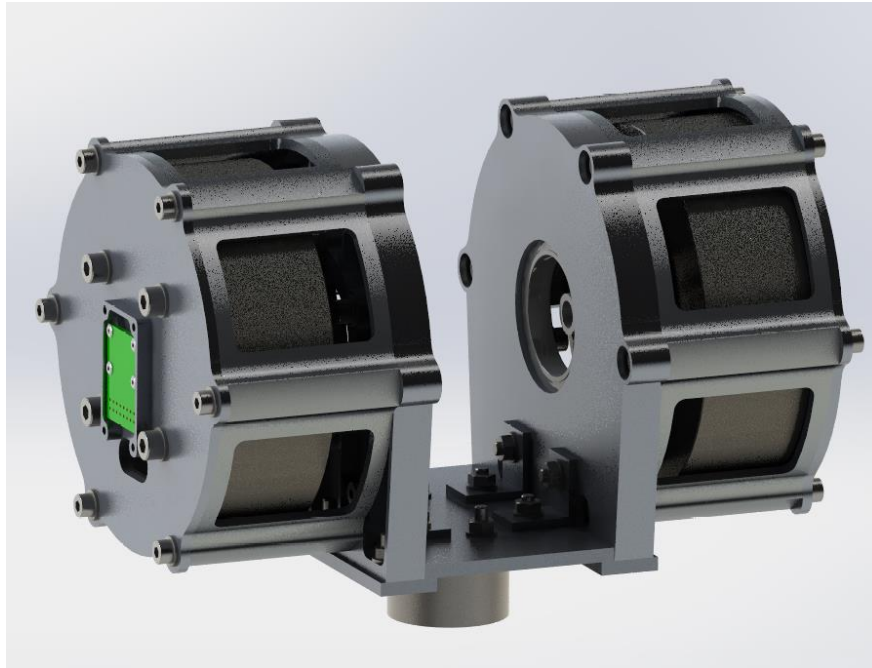


Σχήμα 3-17. Το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης σε τομή.

### 3.3.2 Περιστρεφόμενη Βάση

Η περιστρεφόμενη βάση στηρίζεται στα έδρανα κύλισης της πρώτης άρθρωσης και φέρει τους κινητήρες της άρθρωσης του αγκώνα και του ώμου. Το συναρμολόγημά της μπορεί να φανεί στο Σχήμα 3-18, το οποίο με εξαίρεση τους συνδέσμους των κινητήρων, είναι απολύτως συμμετρικό. Για αυτό, θα αναλυθεί η μια πλευρά και θα επισημαίνεται όπου υπάρχουν διαφοροποιήσεις.

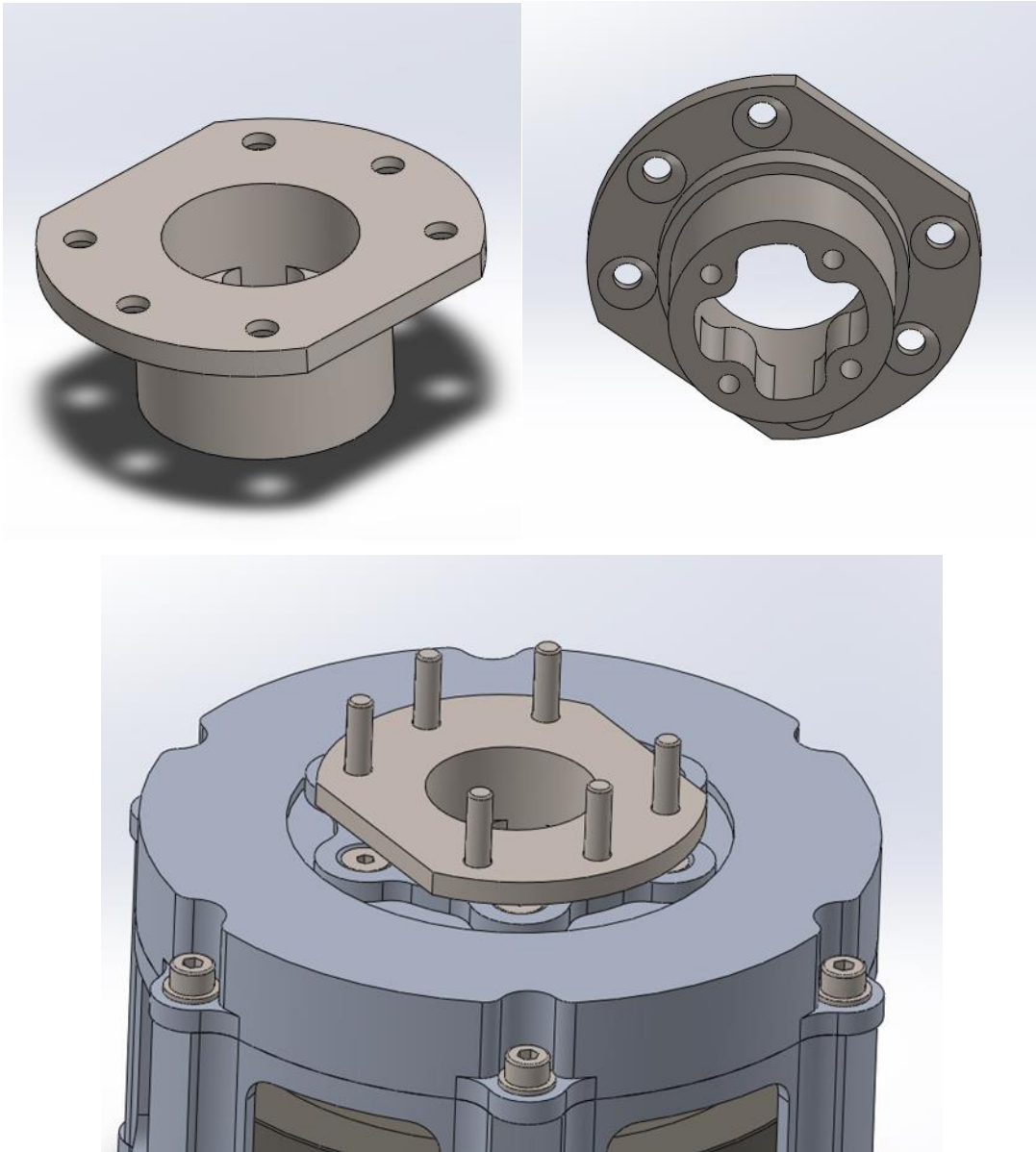




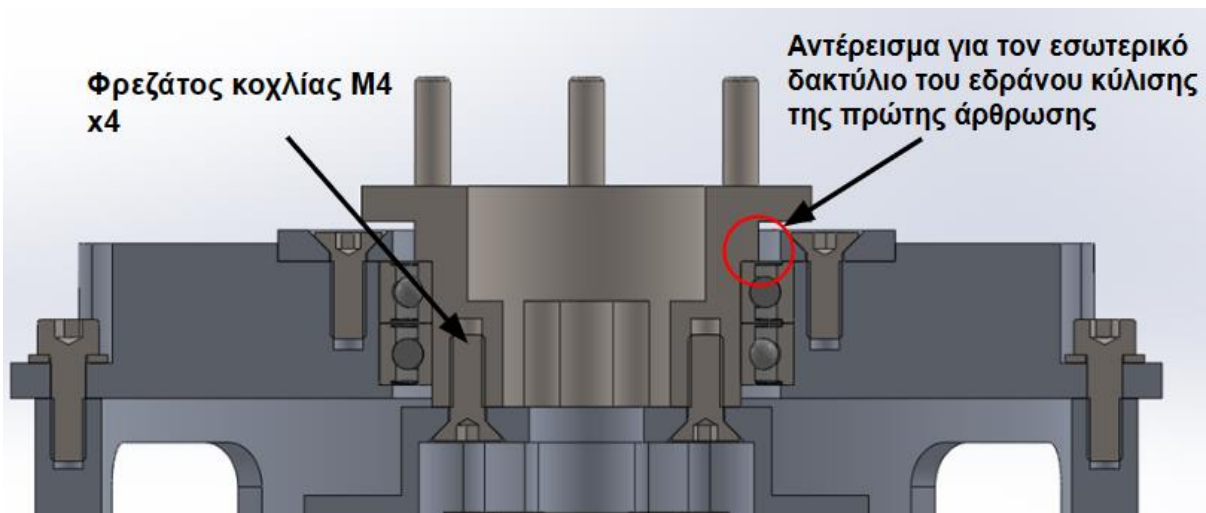
Σχήμα 3-18. (Πάνω) Το συναρμολόγημα της περιστρεφόμενης βάσης σε ισομετρική όψη και (κάτω) το ανεπτυγμένη προβολή. Λόγω του μεγάλου βαθμού συμμετρίας αναπτύσσεται μόνο η μια πλευρά.

Η περιστρεφόμενη βάση στηρίζεται πάνω στον άξονα που τη συνδέει με τα έδρανα κύλισης της πρώτης άρθρωσης (βλ. Σχήμα 3-19). Το υλικό του άξονα είναι ανοξείδωτος χάλυβας, για να ελαχιστοποιηθεί η φθορά στο σημείο συναρμογής με τα έδρανα κύλισης. Το πάνω μέρος του άξονα έχει διαμόρφωση φλάντζας (υποδοχή για έξι φρεζάτους κοχλίες M4), ώστε να συνδεθεί με το υπόλοιπο συναρμολόγημα, ενώ η κάτω πλευρά διαθέτει οπές με

σπείρωμα (τέσσερις κοχλίες M4) για τη σύνδεση με τον πρώτο κινητήρα, μέσω του κόπλερ του (βλ. Σχήμα 3-20). Επιπλέον, περιλαμβάνει αντέρεισμα για την στήριξη του στον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν της πρώτης άρθρωσης.

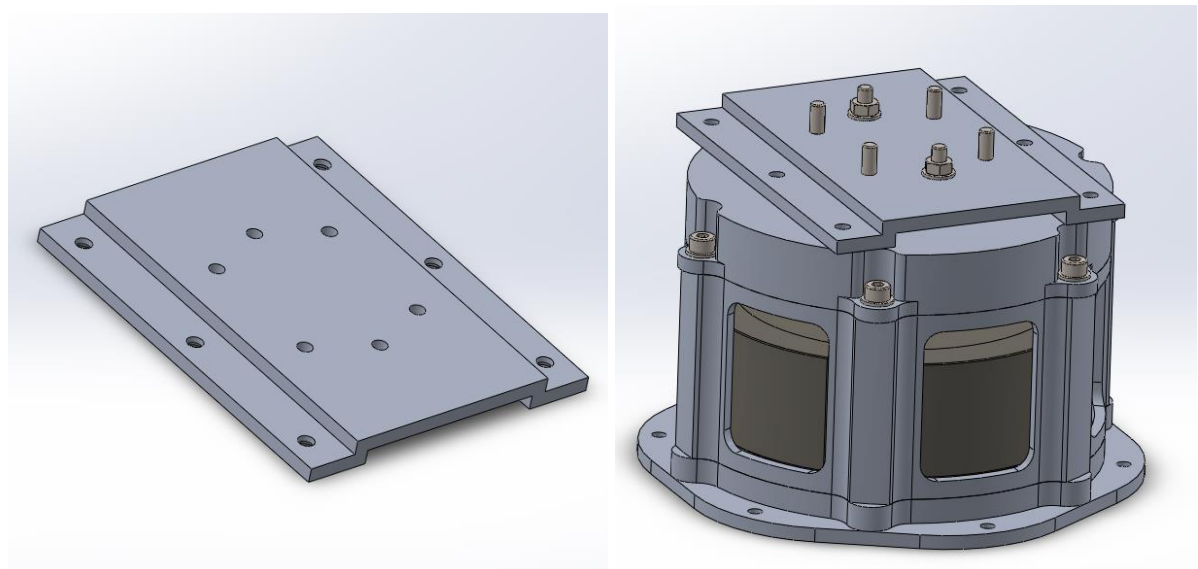


Σχήμα 3-19. (Πάνω) Ο άξονας της περιστρεφόμενης βάσης και (κάτω) η συναρμολόγησή του με τη σταθερή βάση.



**Σχήμα 3-20.** Η συναρμογή του άξονα της περιστρεφόμενης βάσης με τα έδρανα κύλισης της πρώτης άρθρωσης και η σύνδεσή του με τον σύνδεσμο του κινητήρα.

Προτιμήθηκε, αντί το υπόλοιπο συναρμολόγημα της περιστρεφόμενης βάσης να στηρίζεται απευθείας πάνω στην έξοδο του άξονα (στο σημείο που τώρα είναι η φλάντζα), να δημιουργηθεί μια διεπαφή από αλουμίνιο, το οποίο έχει πολύ χαμηλότερη πυκνότητα από τον χάλυβα, εξοικονομώντας έτσι αρκετή μάζα. Έτσι, σχεδιάστηκε η πλάκα που φαίνεται στο Σχήμα 3-21. Αυτή, ασφαλίζεται πάνω στη φλάντζα του άξονα (βλ. Σχήμα 3-19). Στην παρούσα φάση της συναρμολόγησης τοποθετούνται μόνο στους δύο κοχλίες περικόχλια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21, γιατί οι υπόλοιποι συμμετέχουν στην ασφάλιση και άλλων εξαρτημάτων, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

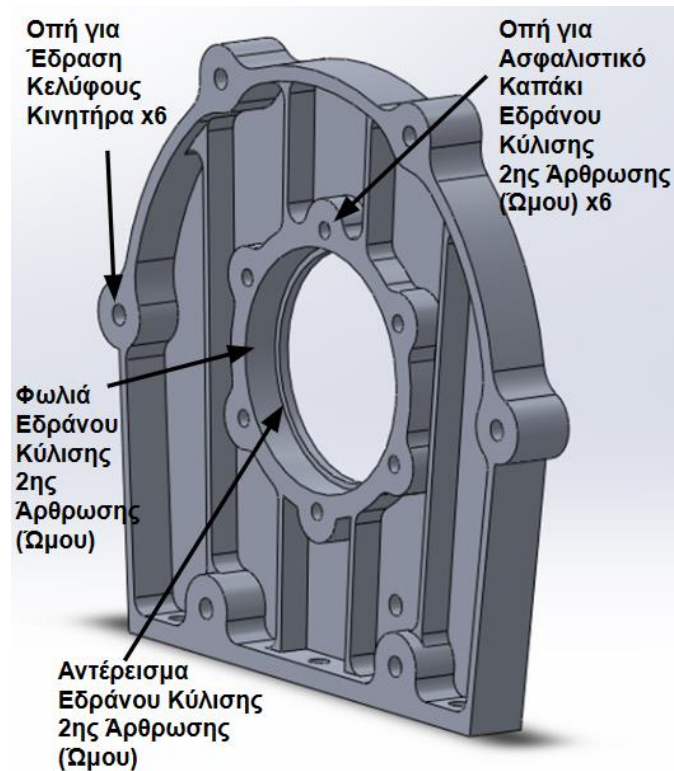


**Σχήμα 3-21.** Πλάκα έδρασης της περιστρεφόμενης βάσης. Δεξιά φαίνεται η συναρμογή της με τους κοχλίες του χαλύβδινου άξονα.

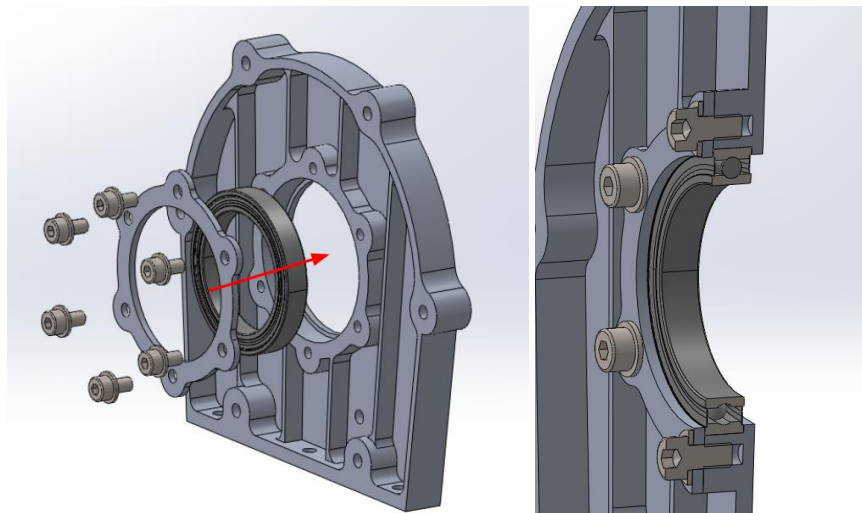
Πάνω στην εν λόγω πλάκα, εδράζονται τα τμήματα που αποσκοπούν στη στήριξη των κινητήρων και περιλαμβάνουν τα έδρανα κύλισης της 2<sup>ης</sup> άρθρωσης (ώμου) (βλ. Σχήμα 3-22). Η τοποθέτηση νεύρων συνέβαλε δραματικά στην μείωση του βάρους και την αύξηση της δυσκαμψίας. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, οι επενεργητές συνδέονται μέσω έξι κοχλιών M4. Τα έδρανα κύλισης, τύπου 61807-2RZ, σε αντιστοιχία με τη σταθερή βάση, στη



μια τους πλευρά στηρίζονται μέσω αντερείσματος, ενώ μετά την εγκατάστασή τους τοποθετείται ασφαλιστικό καπάκι ώστε να περιοριστεί πλήρως η αξονική μετατόπισή τους (βλ. Σχήμα 3-23).



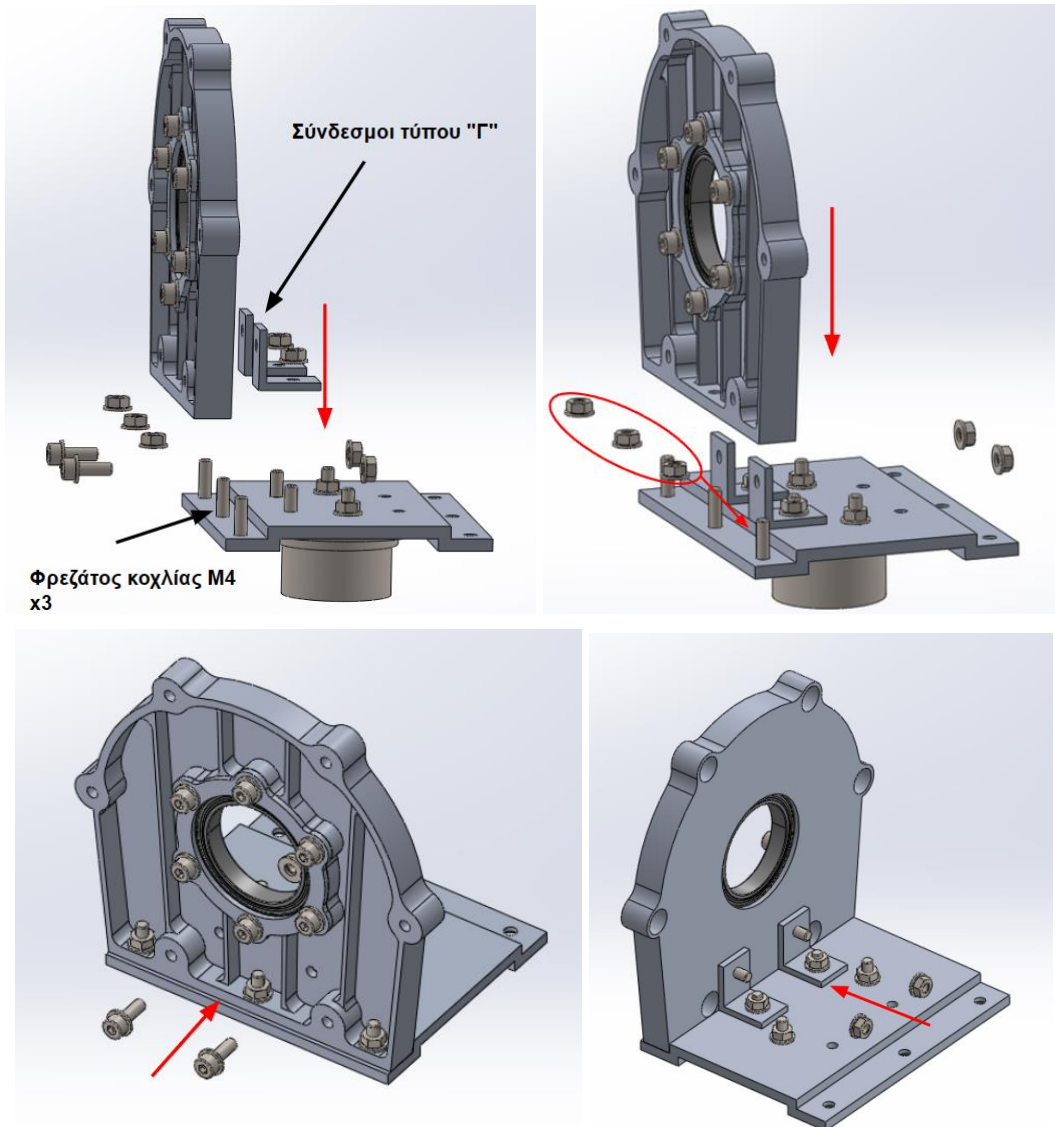
Σχήμα 3-22. Πλαϊνό τμήμα στήριξης επενεργητών / κινητήρων.



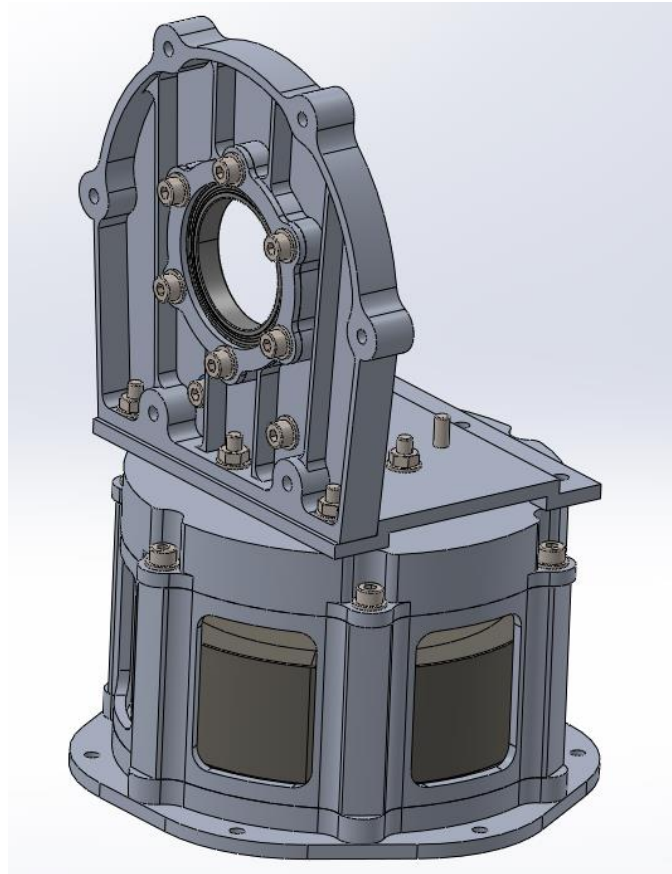
Σχήμα 3-23. (Αριστερά) Η τοποθέτηση του εδράνου κύλισης της 2<sup>ης</sup> άρθρωσης και (δεξιά) το συναρμολόγημα σε τομή, μετά την τοποθέτηση.

Καθώς τα πλαϊνά τμήματα στήριξης των επενεργητών πρακτικά παραλαμβάνουν τις ροπές που αυτοί αναπτύσσουν, για την ασφάλισή τους χρησιμοποιούνται αρχικά τρεις κοχλίες M4 που συνδέουν το κάτω μέρος τους με την πλάκα στήριξης, αλλά προστίθενται και άλλοι δύο κοχλίες M4 μαζί με δύο συνδέσμους τύπου "Γ", όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-24. Παρατηρείται πως στη μια πλευρά τους, οι σύνδεσμοι τύπου "Γ" συναρμολογούνται με τους

κοχλίες της φλάντζας του άξονα. Έτσι, επιτυγχάνεται καλύτερος διαμοιρασμός των φορτίων στην πλάκα, αλλά ταυτόχρονα συμμετέχει άμεσα και ο (μεγαλύτερης αντοχής) χαλύβδινος άξονας, μειώνοντας περαιτέρω την καταπόνηση της πλάκας.

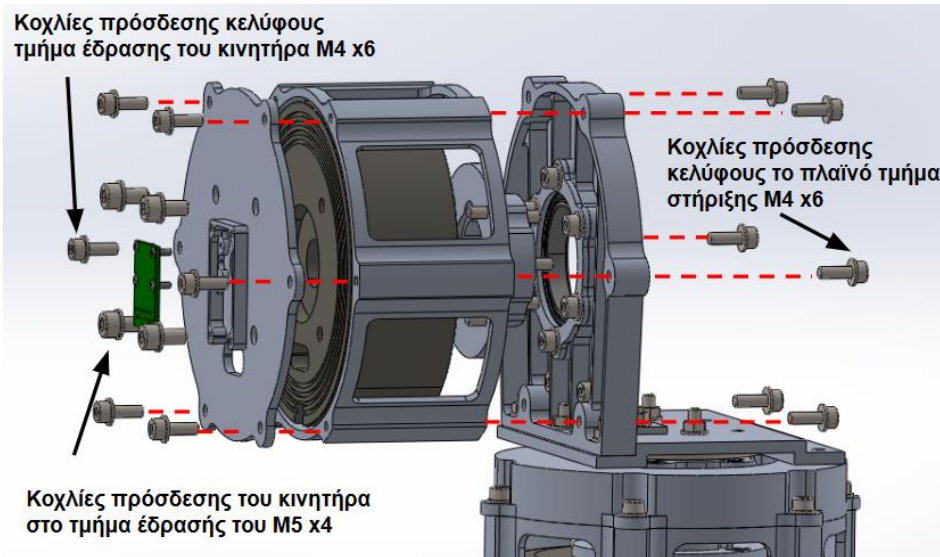


Σχήμα 3-24. Η διαδικασία ασφάλισης του πλαϊνού τμήματος στήριξης των κινητήρων στην συνδετική πλάκα της περιστρεφόμενης βάσης. Τα κόκκινα βέλη συμβολίζουν την φορά κίνησης των εξαρτημάτων που τοποθετούνται σε κάθε βήμα.

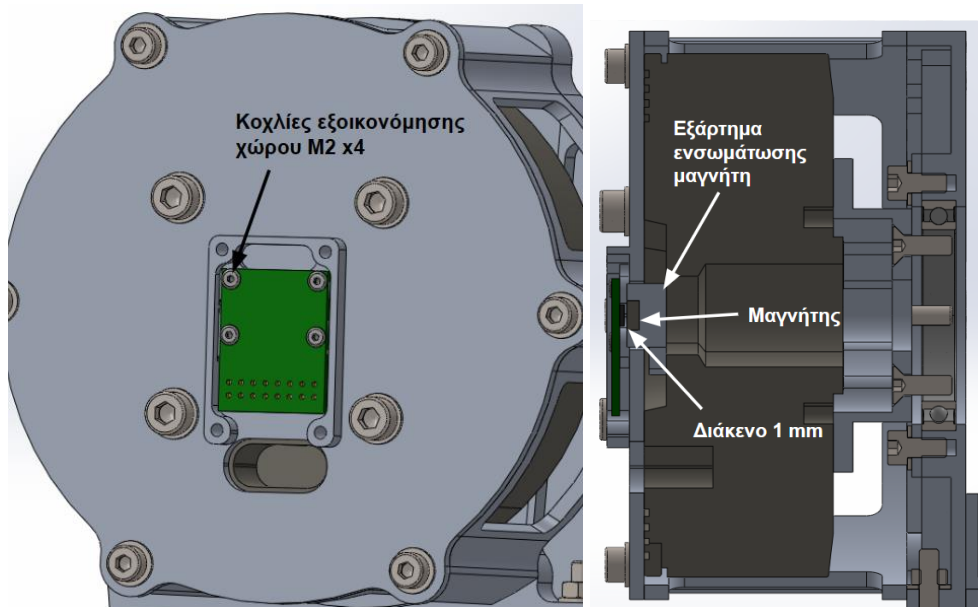


**Σχήμα 3-25. Το συναρμολόγημα του βραχίονα μέχρι αυτό το σημείο.**

Στην παρούσα φάση δεν τοποθετείται το τμήμα στήριξης της άλλης πλευράς, για να ακολουθηθεί πιο πιστά η διαδικασία της συναρμολόγησης. Αυτό, τοποθετείται μετά την εγκατάσταση του πρώτου συνδέσμου, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Το τελευταίο βήμα που πρέπει να γίνει είναι η εγκατάσταση του κινητήρα. Αυτό, έχει πολλές ομοιότητες με την περίπτωση της σταθερής βάσης, και μπορεί να φανεί στην ανεπτυγμένη προβολή στο Σχήμα 3-26. Ουσιαστικά, το πίσω μέρος του κινητήρα προσδένεται στο τμήμα έδρασής του, όπως και ο αισθητήρας γωνιακής θέσης. Για τον τελευταίο έχει σχεδιασθή ειδική διαμόρφωση, όμοια με τη σταθερή βάση (βλ. Σχήμα 3-27). Επιλέγεται, για εξοικονόμηση χώρου και σε περίπτωση που χρειαστεί να τοποθετηθεί καπάκι, όπως και στην σταθερή βάση, να χρησιμοποιηθούν κοχλίες εξοικονόμησης χώρου M2. Για το μαγνήτη του αισθητήρα γωνιακής θέσης χρησιμοποιείται η ίδια διάταξη με το Σχήμα 3-12 (βλ. Σχήμα 3-27). Μετά, αυτό το σύνολο, μέσω του κελύφους του κινητήρα και των έξι κοχλιών M4, συνδέεται με το πλαϊνό τμήμα στήριξης του κινητήρα.



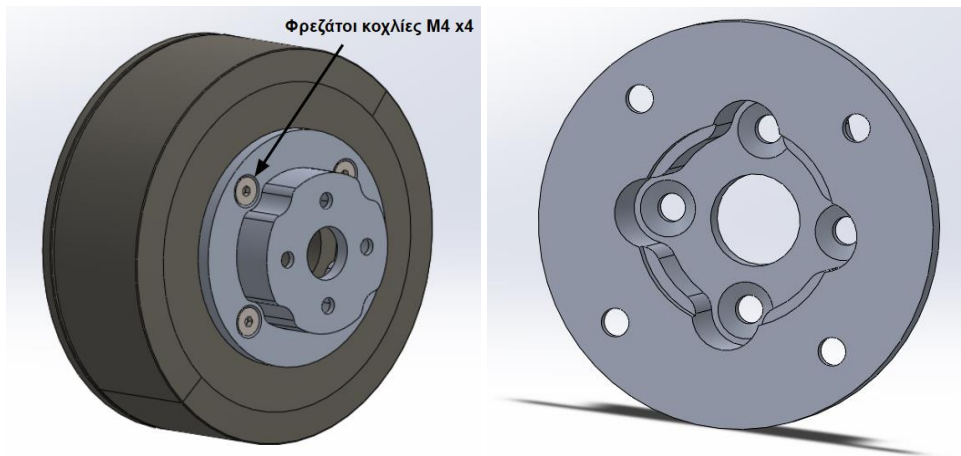
Σχήμα 3-26. Ενσωμάτωση του κινητήρα στο πλαϊνό τμήμα στήριξης.



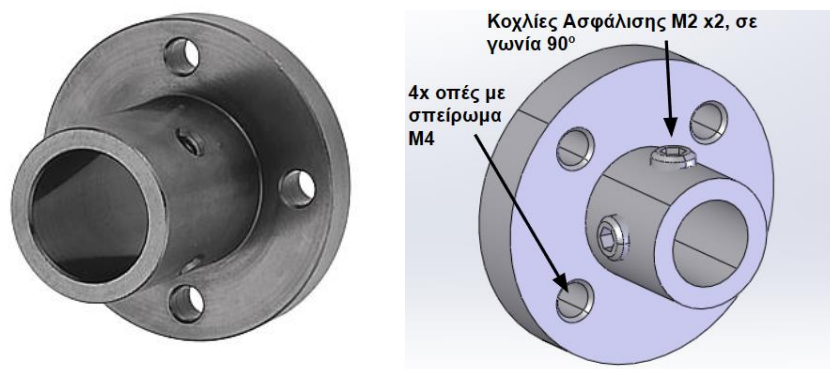
Σχήμα 3-27. (Αριστερά) Ο τρόπος ενσωμάτωσης του αισθητήρα γωνιακής θέσης στο τμήμα έδρασης του κινητήρα και (δεξιά) η το συναρμολόγημα σε τομή.

Όπως προαναφέρθηκε, η διάταξη στήριξης που παρουσιάστηκε είναι πανομοιότυπη για τους δύο βαθμούς ελευθερίας, με μόνη εξαίρεση τους συνδέσμους των κινητήρων. Αυτό συμβαίνει διότι, ο κινητήρας της δεύτερης άρθρωσης στρέφει τον πρώτο σύνδεσμο, ενώ ο κινητήρας της τρίτης στρέφει τον σύστημα μετάδοσης κίνησης της άρθρωσης του ώμου, δηλαδή τον άξονα της τροχαλίας του ιμάντα χρονισμού. Έτσι, ο σύνδεσμος του κινητήρα της δεύτερης άρθρωσης έχει πολλές ομοιότητες με το σύνδεσμο της πρώτης (βλ. Σχήμα 2-27). Όσον αφορά το σύνδεσμο της τρίτης, η μεταφορά ροπής από έναν κινητήρα που έχει στην έξοδο φλάντζα σε έναν άξονα, δεν είναι τετριμμένη. Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές όπως μέσω τριβής, σύσφιξης και μέσω ακτινικού κοχλία ασφάλισης (σκουλικόβιδα (set-screw)). Σε αυτή την εργασία επιλέγεται η τρίτη εναλλακτική, λόγω του χαμηλού κόστους, μικρού βάρους και της αξιοπιστίας της. Συγκεκριμένα, επιλέγεται το υποστηρικτικό άξονα (shaft-support) της Misumi [42], το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3-29. Διαθέτει δύο κοχλίες ασφάλισης τοποθετημένους σε γωνία 90° και για τη σύνδεσή του με λοιπά εξαρτήματα έχει διαμόρφωση

φλάντζας με τέσσερις οπές με σπείρωμα M4. Με αυτό ως αναφορά, σχεδιάστηκε ένας αντάπτορας ώστε να συνδεθεί το υποστηρικτικό άξονα με την έξοδο του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-30.

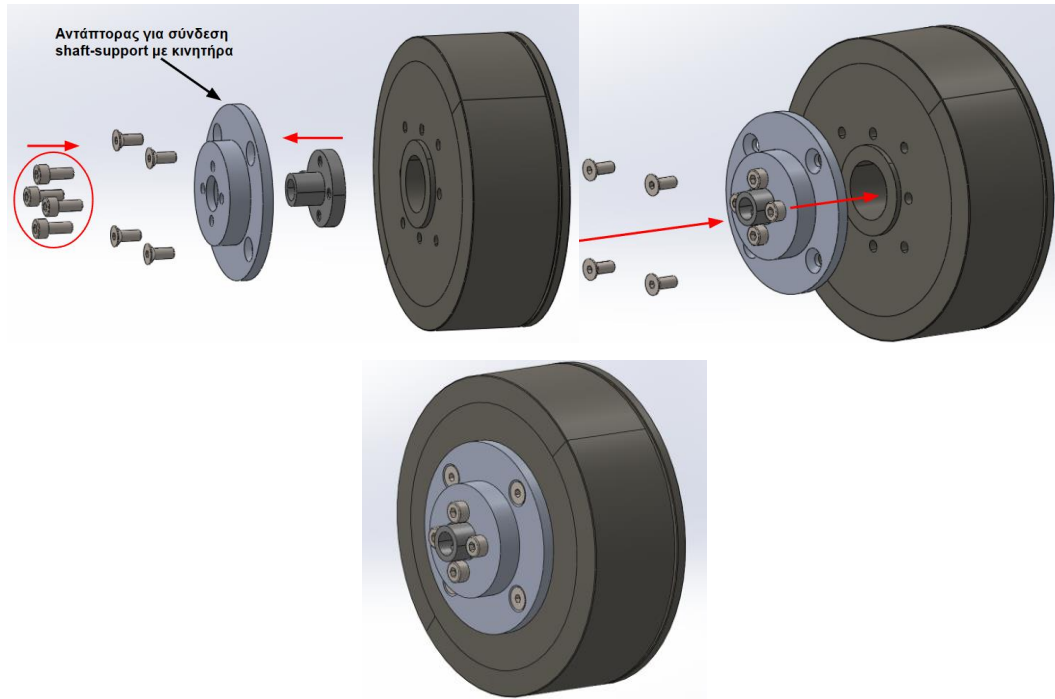


Σχήμα 3-28. (Αριστερά) Το συναρμολόγημα συνδέσμου – δεύτερου κινητήρα σε ισομετρική όψη και (δεξιά) η πίσω πλευρά του συνδέσμου.



Σχήμα 3-29. Υποστηρικτικό άξονα (shaft-support) της Misumi. Πηγή (αριστερά) εικόνας: [42]

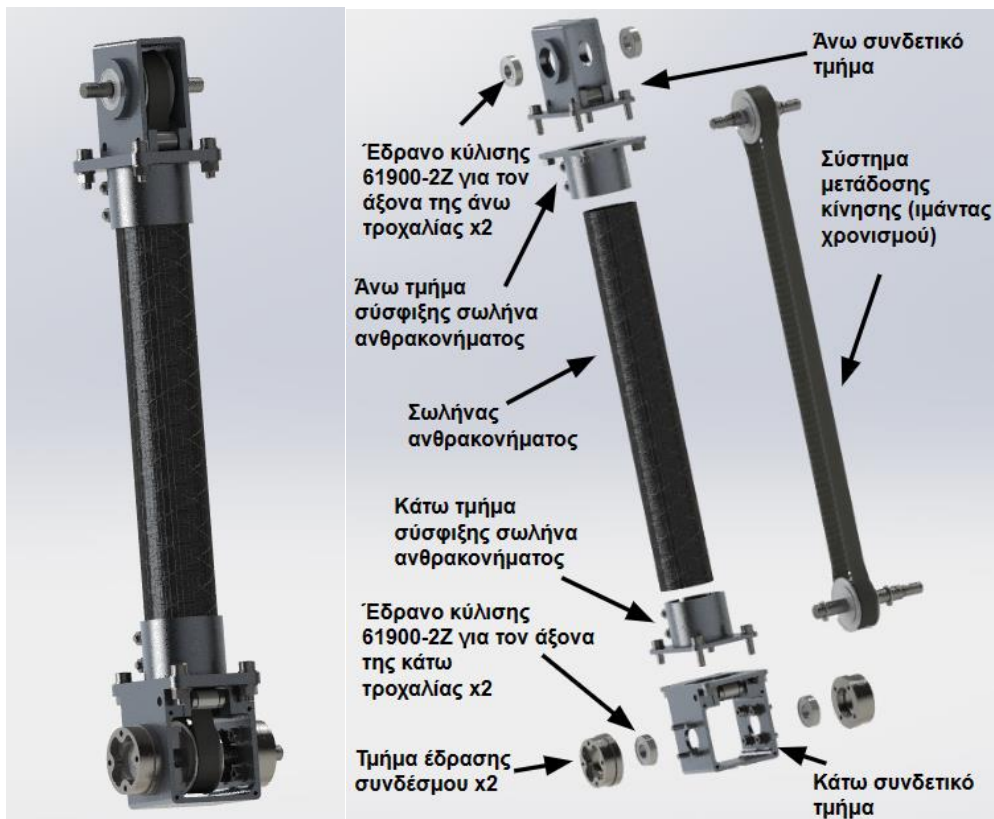




Σχήμα 3-30. Τα βήματα συναρμολόγησης του κόπλερ του κινητήρα της τρίτης άρθρωσης.

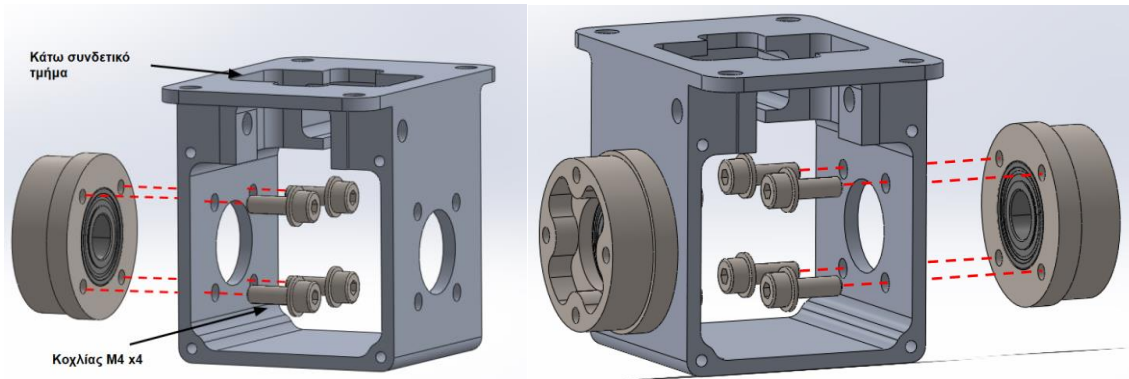
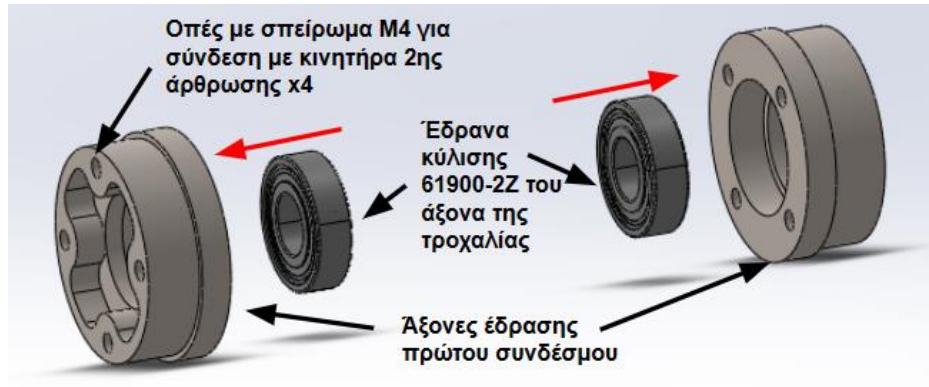
### 3.3.3 Πρώτος Σύνδεσμος

Το συναρμολόγημα του πρώτου συνδέσμου και τα τμήματά του μπορούν να φανούν στο Σχήμα 3-31. Πρόκειται για ένα σχετικά σύνθετο σύστημα καθώς πρέπει να συμπεριληφθεί και το σύστημα μετάδοσης κίνησης για την άρθρωση του ώμου, το οποίο διέρχεται από το εσωτερικό του συνδέσμου.

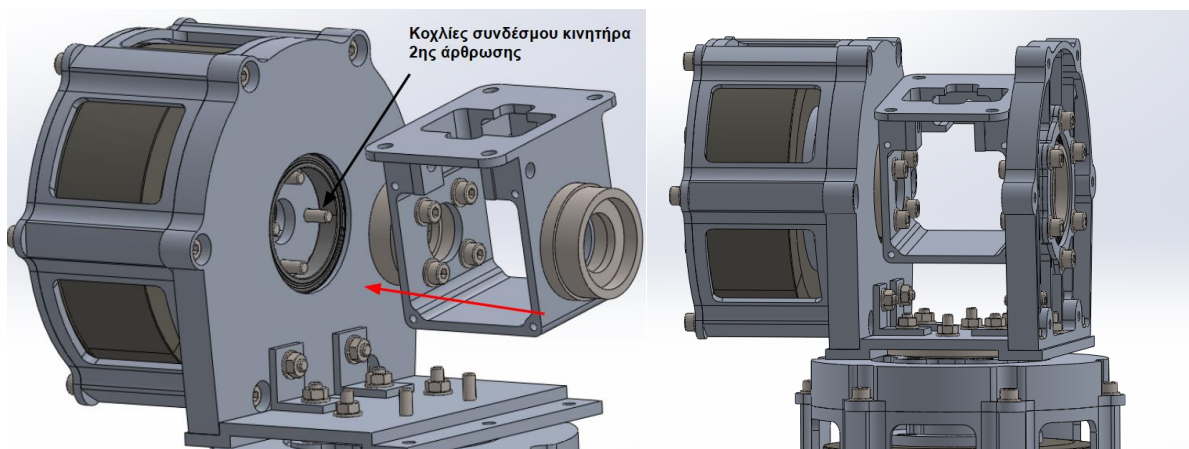


**Σχήμα 3-31. (Αριστερά) Το συναρμολόγημα του πρώτου συνδέσμου του βραχίονα και (δεξιά) η ανεπτυγμένη προβολή του.**

Ο πρώτος σύνδεσμος, στηρίζεται σε δύο ειδικά διαμορφωμένους χαλύβδινους άξονες, οι οποίοι εδράζονται στο εσωτερικό των εδράνων κύλισης της περιστρεφόμενης βάσης. Σε αυτούς, παρεμβάλλεται ένα αλουμινένιο τμήμα μέσω του οποίου συνδέονται με τον υπόλοιπο σύνδεσμο (βλ. Σχήμα 3-32 και Σχήμα 3-33). Μάλιστα, το τοίχωμα του συνδετικού τμήματος λειτουργεί και ως αντέρισμα στον εξωτερικό δακτύλιο των εδράνων κύλισης. Όπως θα αναφερθεί και πιο αναλυτικά και στη συνέχεια, το εν λόγω συνδετικό τμήμα στεγάζει και την κάτω τροχαλία του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Ο αριστερός εκ των δύο αξόνων είναι αυτός που συνδέεται με τον σύνδεσμο του κινητήρα της δεύτερης άρθρωσης, και έτσι μπορεί να μεταδοθεί ισχύς στον πρώτο σύνδεσμο. Επιπλέον, εντός των αξόνων του πρώτου συνδέσμου, ενσωματώνονται δύο έδρανα κύλισης 61900-2Z, στα οποία θα εδράζεται ο άξονας της τροχαλίας του συστήματος μετάδοσης κίνησης (βλ. Σχήμα 3-32 και Σχήμα 3-40).



Σχήμα 3-32. Η συναρμολόγηση του κάτω τμήματος του πρώτου συνδέσμου.



Σχήμα 3-33. Η συναρμογή του κάτω τμήματος του πρώτου συνδέσμου με την περιστρεφόμενη βάση. Ο αριστερός εκ των χαλύβδινων αξόνων συνδέεται μέσω κοχλιών με το κόπλερ του κινητήρα της δεύτερης άρθρωσης.

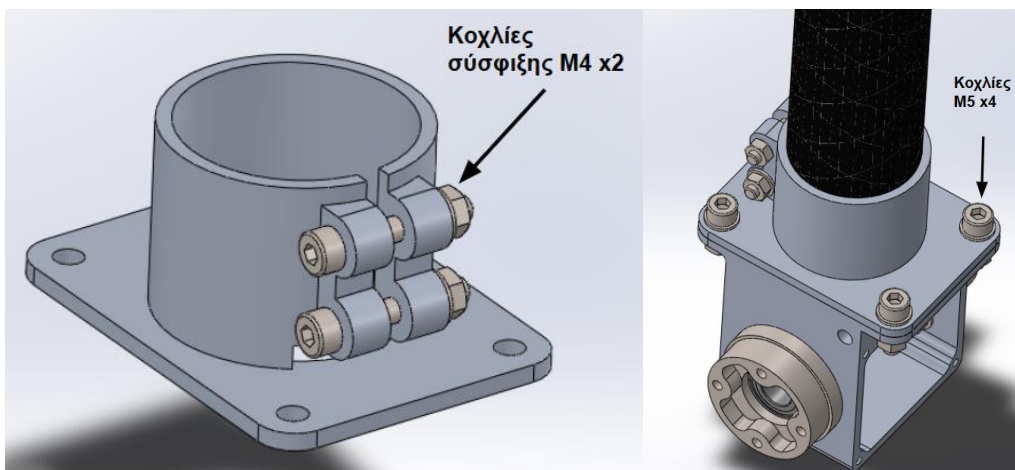
Το υλικό του κύριου σώματος του συνδέσμου επιλέγεται να είναι ανθρακόνημα, λόγω το πολύ υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο σωλήνας ανθρακονήματος που φαίνεται στο Σχήμα 3-34, εξωτερικής διαμέτρου 37.8 mm και πάχους 1.5 mm, ο οποίος έχει πυκνότητα 1.6 g/cm<sup>3</sup> [43]. Για σύγκριση, αναφέρεται πως ένας σωλήνας αλουμινίου ίδιων διαστάσεων, μήκους 350 mm έχει μάζα 0.160 kg, ενώ ο σωλήνας που επιλέχθηκε μόνο 0.095 kg. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται η αιωρούμενη μάζα του συστήματος, που όπως φάνηκε στην Ενότητα 2.3 συνεπάγεται χαμηλότερη μηχανική εμπέδηση και άρα αυξημένο εύρος ζώνης ελέγχου δύναμης. Η συγκράτηση του σωλήνα ανθρακονήματος επιλέγεται να γίνει μέσω σύσφιξης (βλ. Σχήμα 3-35). Αυτή η μέθοδος



προτιμάται έναντι άλλων μεθόδων, όπως με κόλλα, επειδή προσφέρει εύκολη εγκατάσταση του σωλήνα, χωρίς να θυσιάζεται αξιοπιστία.

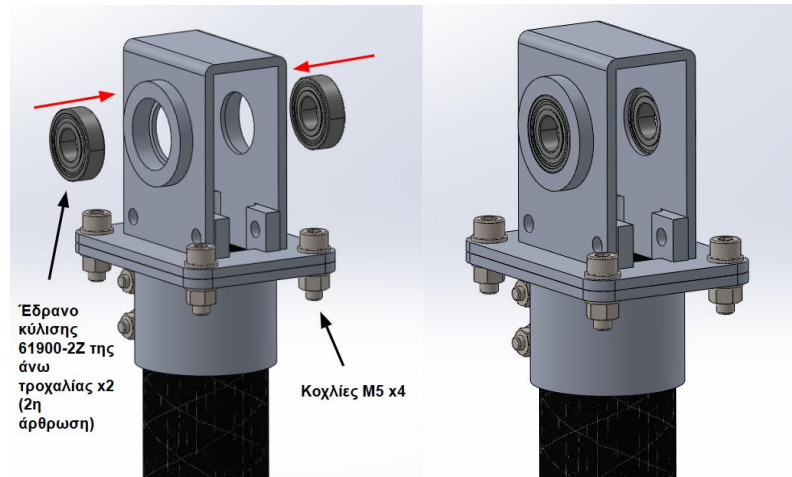


Σχήμα 3-34. Ο σωλήνας ανθρακονήματος που χρησιμοποιείται για το σώμα του πρώτου συνδέσμου. Πηγή εικόνας: [43].



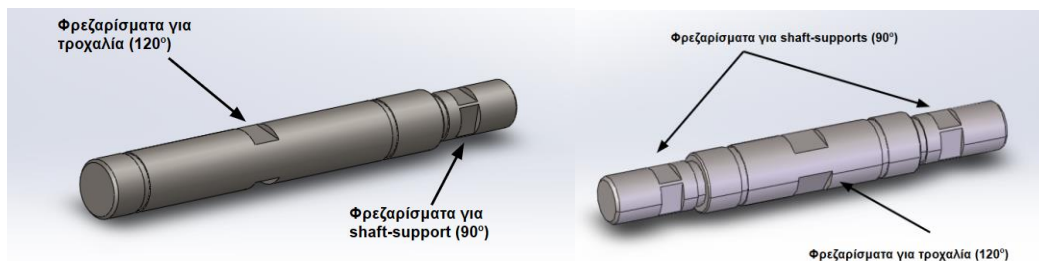
Σχήμα 3-35. Η ασφάλιση του σωλήνα ανθρακονήματος του πρώτου συνδέσμου μέσω σύσφιξης.

Στο πάνω μέρος του συνδέσμου υπάρχει μια αντίστοιχη διάταξη τμήματος σύσφιξης και συνδετικού τμήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-36. Στο άνω συνδετικό τμήμα εδράζεται η δεύτερη τροχαλία του ιμάντα χρονισμού, σε δύο έδρανα κύλισης 61900-2Z τα οποία εγκαθίστανται στις αντίστοιχες φωλιές. Ουσιαστικά σε αυτό το σημείο βρίσκεται η άρθρωση του αγκώνα.

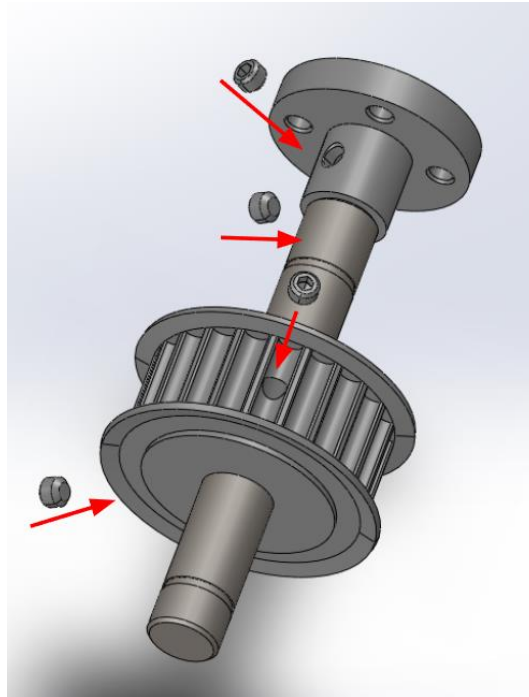


**Σχήμα 3-36.** Το συναρμολόγημα του άνω άκρου του πρώτου συνδέσμου. Ο σωλήνας ανθρακωνήματος ασφαρίζεται μέσω σύσφιξης. Τα έδρανα κύλισης αποτελούν τη στήριξη της άνω τροχαλίας του συστήματος μετάδοσης κίνησης και ουσιαστικά έχουν το ρόλο της τρίτης άρθρωσης.

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης του ιμάντα χρονισμού αποτελείται κατά κύριο λόγο από τον ιμάντα, τις τροχαλίες και το σύστημα τάνυσης. Ως κατάλληλος ιμάντας, όπως θα αναλυθεί περαιτέρω στην Ενότητα 3.6, κρίνεται ο EV5GT της εταιρίας Misumi [44], μαζί με τροχαλίες τύπου GT5 [45]. Η μεταφορά ισχύος από τους άξονες στις τροχαλίες γίνεται μέσω δύο ακτινικών κοχλιών ασφάλισης, οι οποίοι βρίσκονται σε γωνία  $120^\circ$  μεταξύ τους (βλ. Σχήμα 3-37 και Σχήμα 3-38). Οι άξονες, οι οποίοι επίσης επιλέγονται από τη Misumi [46] [47], έχουν φρεζαρίσματα στα κατάλληλα σημεία, ώστε να εξασφαλίζεται όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή με τους ακτινικούς κοχλίες ασφάλισης, τόσο των τροχαλιών, όσο και των shaft-supports.

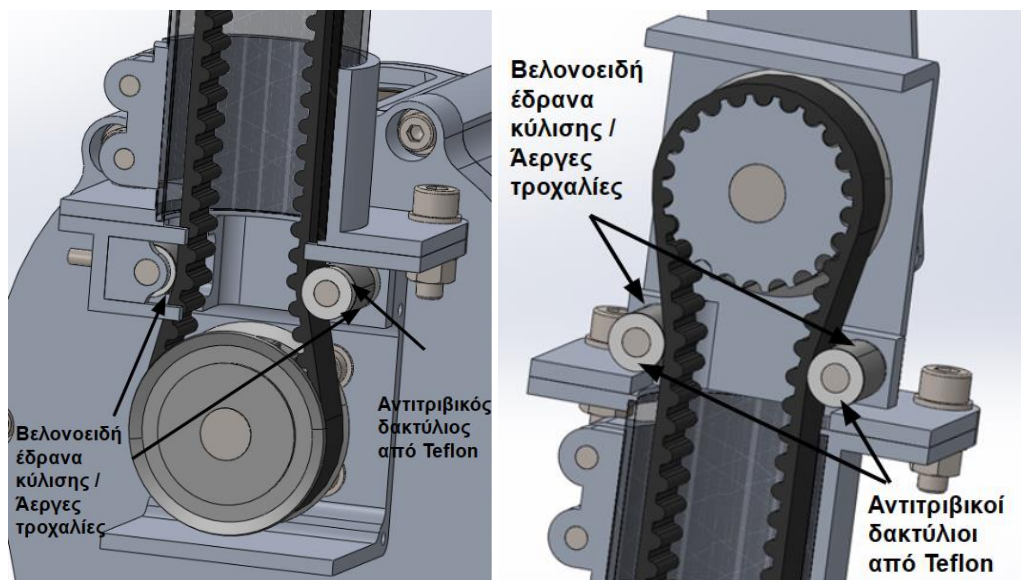


**Σχήμα 3-37.** Ο άξονας της (αριστερά) κάτω και (δεξιά) πάνω τροχαλίας. Παρατηρούνται οι κατάλληλες διαμορφώσεις (φρεζαρίσματα) για την καλύτερη εφαρμογή των κοχλιών ασφάλισης των εξαρτημάτων.

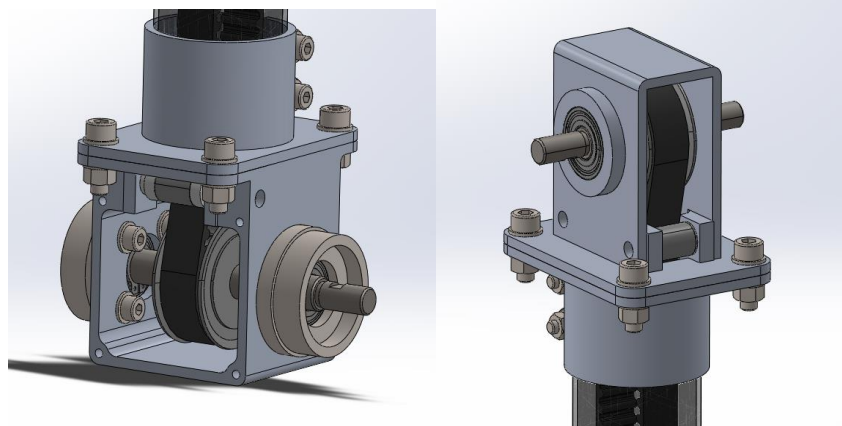


**Σχήμα 3-38.** Παράδειγμα πάκτωσης της τροχαλίας GT5 και του shaft-support σε άξονα μέσω ακτινικών κοχλιών ασφάλισης.

Καθώς η διάμετρος των τροχαλιών είναι μεγαλύτερη από του σωλήνα ανθρακονήματος, για την ελεύθερη διέλευση του ιμάντα στο εσωτερικό του χρησιμοποιούνται βελονοειδή έδρανα κύλισης ως άεργες τροχαλίες (idler pulleys), συγκεκριμένα του τύπου NK 5/12 TN (βλ. Σχήμα 3-39), μέσω των οποίων μειώνεται η απόσταση των κλάδων του ιμάντα. Επιπλέον, εκατέρωθεν κάθε εδράνου κύλισης τοποθετούνται αντιτριβικοί δακτύλιοι από Teflon, για την ελαχιστοποίηση της τριβής μεταξύ των εδράνων κύλισης και των τοιχωμάτων των συνδετικών τμημάτων.

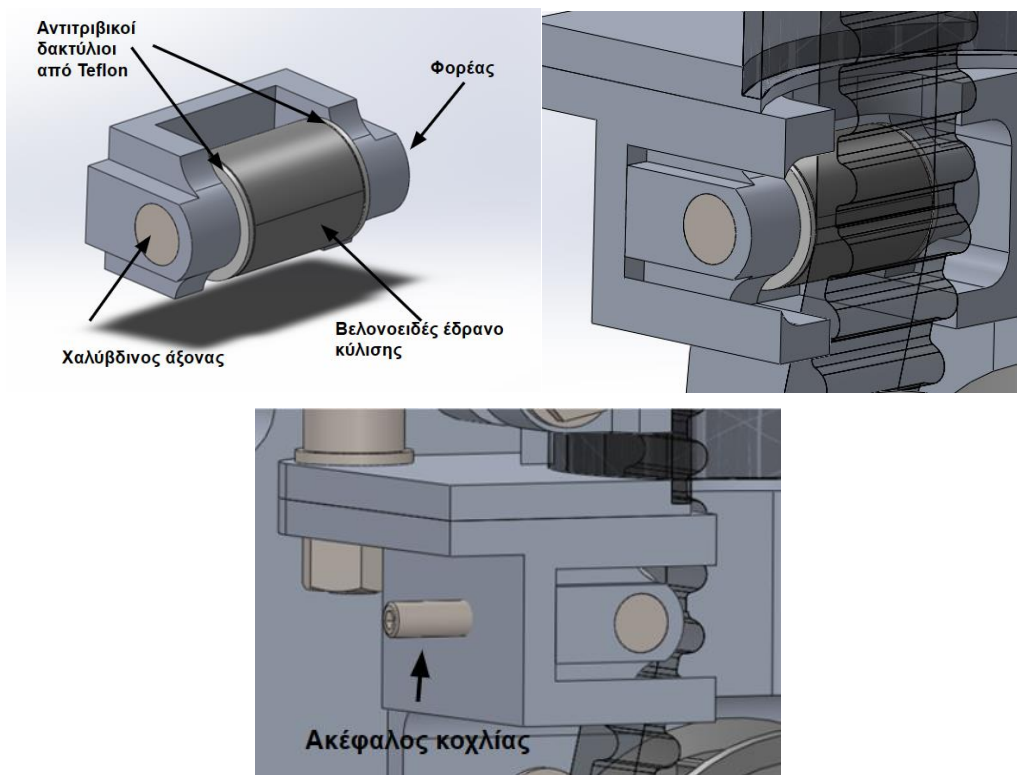


**Σχήμα 3-39.** Ο τρόπος ενσωμάτωσης του ιμάντα χρονισμού στο βραχίονα (τομή). Χρησιμοποιούνται βελονοειδή έδρανα κύλισης ως άεργες τροχαλίες και εκατέρωθέν τους τοποθετούνται αντιτριβικοί δακτύλιοι από Teflon για την ελαχιστοποίηση της τριβής με τα τοιχώματα.

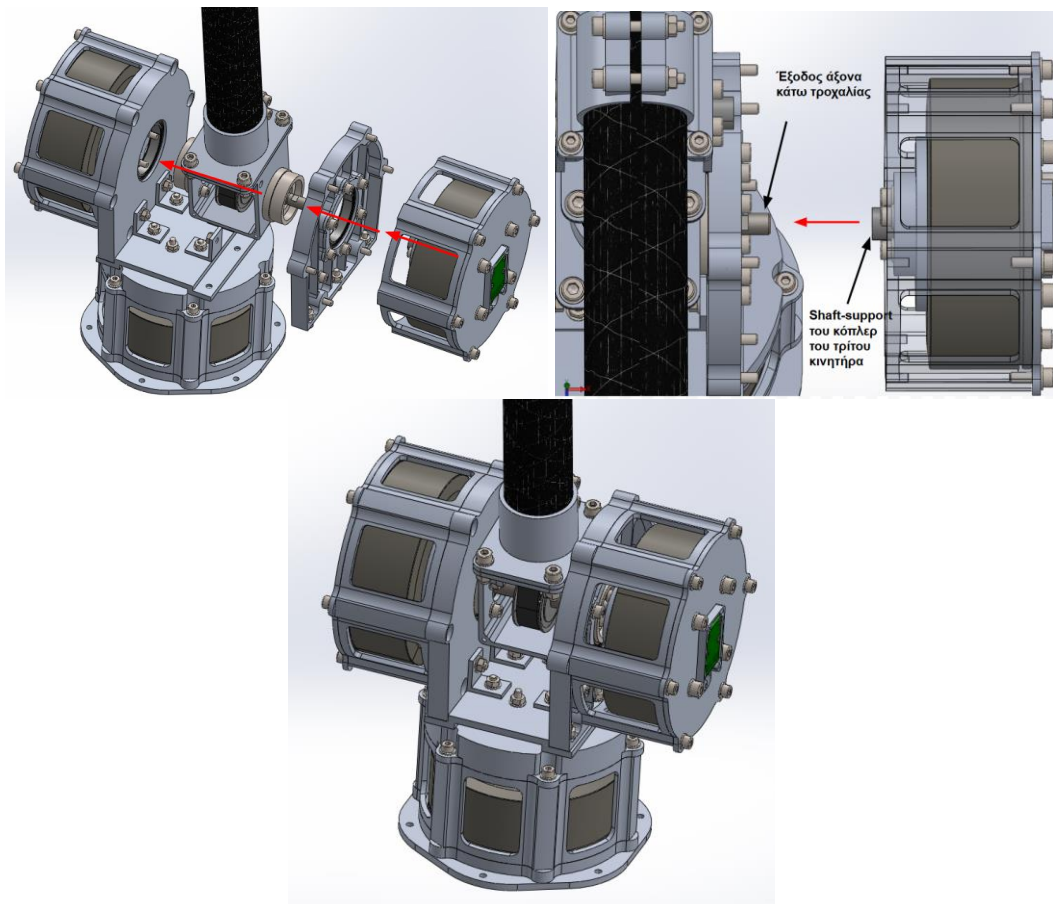


**Σχήμα 3-40.** Το τελικό συναρμολόγημα του (αριστερά) κάτω και (δεξιά) άνω τμήματος του πρώτου συνδέσμου.

Για την τάνυση του ιμάντα, ένα από τα έδρανα κύλισης τοποθετείται πάνω σε γραμμικά κινούμενο φορείο, το οποίο μετατοπίζεται μέσω ενός ακέφαλου κοχλίας (βλ. Σχήμα 3-41). Αυτή η διάταξη είναι αρκετά δημοφιλής τον τελευταίο καιρό, ειδικά σε ρομπότ με πόδια [15] [48]. Τέλος, στο Σχήμα 3-42 φαίνεται η ενσωμάτωση του πρώτου συνδέσμου στο υπόλοιπο συναρμολόγημα.



**Σχήμα 3-41.** Το σύστημα τάνυσης του ιμάντα. Συσφίγγοντας τον ακέφαλο κοχλίας, το φορείο προωθείται με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του ιμάντα και άρα την δημιουργία προέντασης.

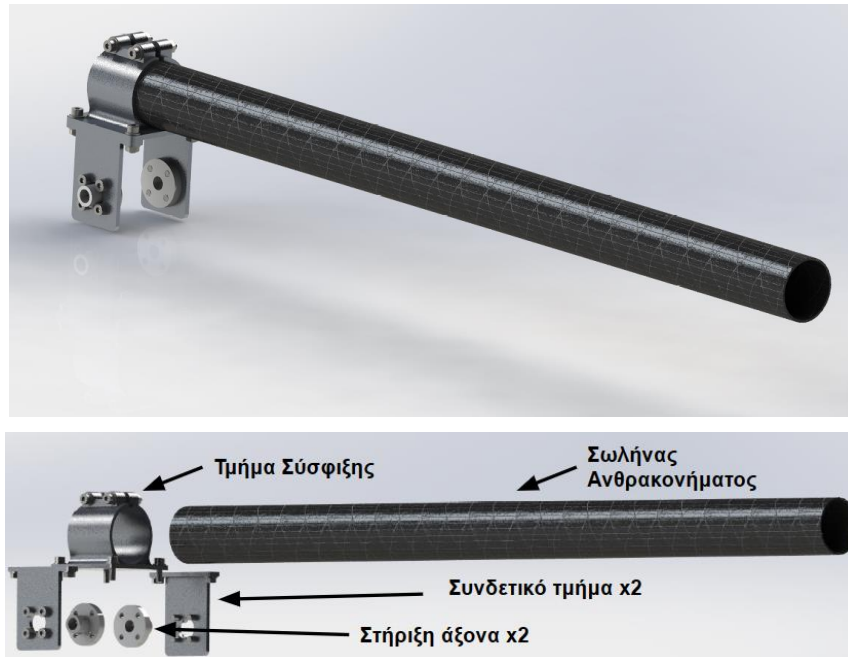


Σχήμα 3-42. Η ενσωμάτωση του πρώτου συνδέσμου στην περιστρεφόμενη βάση.

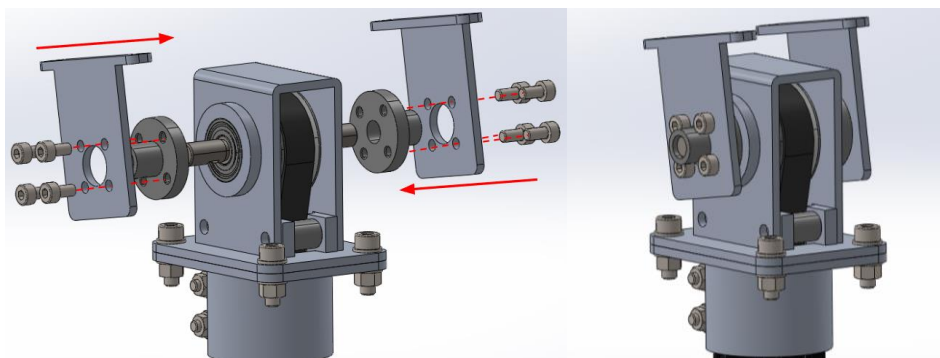
### 3.3.4 Δεύτερος Σύνδεσμος

Ο δεύτερος σύνδεσμος (βλ. Σχήμα 3-43), ουσιαστικά συνδέεται με την έξοδο της δεύτερης τροχαλίας του ιμάντα χρονισμού, μέσω του άξονα που τη στηρίζει. Η σύζευξη του συνδέσμου με τον άξονα, όμοια με το κόπλερ του τρίτου κινητήρα, επιτυγχάνεται με κοχλίες ασφάλισης, χρησιμοποιώντας το υποστηρικτικό άξονα που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3-29. Υπενθυμίζεται πως ο άξονας έχει τα κατάλληλα φρεζαρίσματα για την καλύτερη επαφή των κοχλιών ασφάλισης. Στην έξοδο (φλάντζα) των υποστηρικτικών αξόνων, προσδένονται δύο αλουμινένια τμήματα (βλ. Σχήμα 3-44), στα οποία στη συνέχεια συνδέεται ο υπόλοιπος σύνδεσμος.



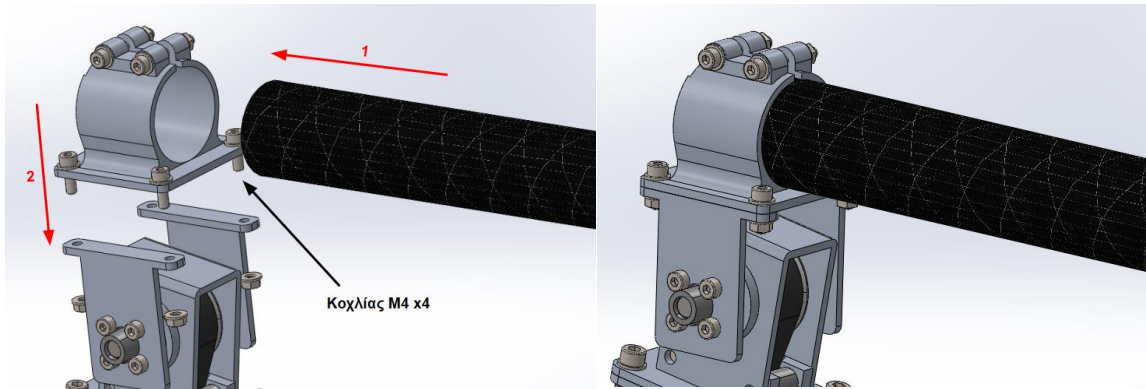


**Σχήμα 3-43.** (Πάνω) Το συναρμολόγημα του δεύτερου συνδέσμου και (κάτω) σε ανεπτυγμένη προβολή.

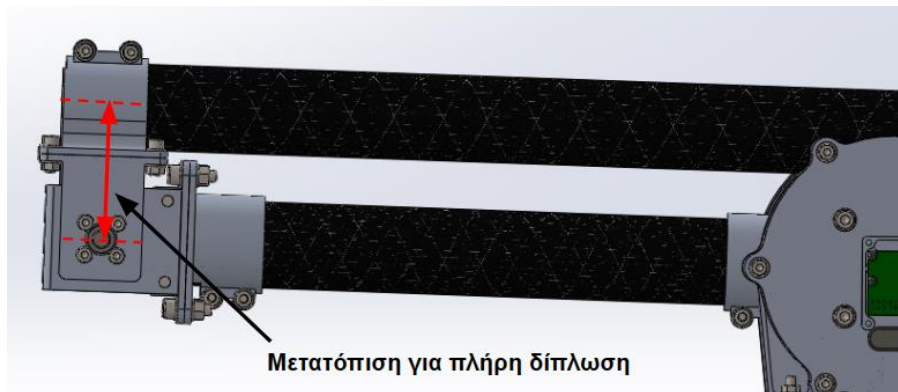


**Σχήμα 3-44.** Συναρμολόγηση του τμήματος σύνδεσης του δεύτερου με τον πρώτο σύνδεσμο.

Για το κύριο σώμα επιλέγεται, όμοια με τον πρώτο σύνδεσμο, σωλήνας ανθρακονήματος, ο οποίος ασφαρίζεται με ένα αντίστοιχο τμήμα σύσφιξης (βλ. Σχήμα 3-45). Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση του πρώτου συνδέσμου, εδώ το τμήμα σύσφιξης σχεδιάστηκε έτσι ώστε ο σωλήνας να αλλάζει διεύθυνση κατά  $90^\circ$ . Έτσι, επιτυγχάνεται μια μετατόπιση (offset) που επιτρέπει την πλήρη δίπλωση του βραχίονα (βλ. Σχήμα 3-46). Καθώς ο βραχίονας δεν διαθέτει μείωση συνεπάγεται πως κατά την παύση λειτουργίας θα υπάρχει ο κίνδυνος λόγω της βαρύτητας οι σύνδεσμοι να περιστρέψουν τους δρομείς των κινητήρων, με αποτέλεσμα την πιθανή σύγκρουση του βραχίονα με το έδαφος. Με τη συμπερίληψη της δίπλωσης, κατά την αποθήκευση ή την αναμονή λειτουργίας, ο βραχίονας θα έχει τη δυνατότητα να στηρίζεται στην κατασκευή του, εξαλείφοντας τον προαναφερθέν κίνδυνο.

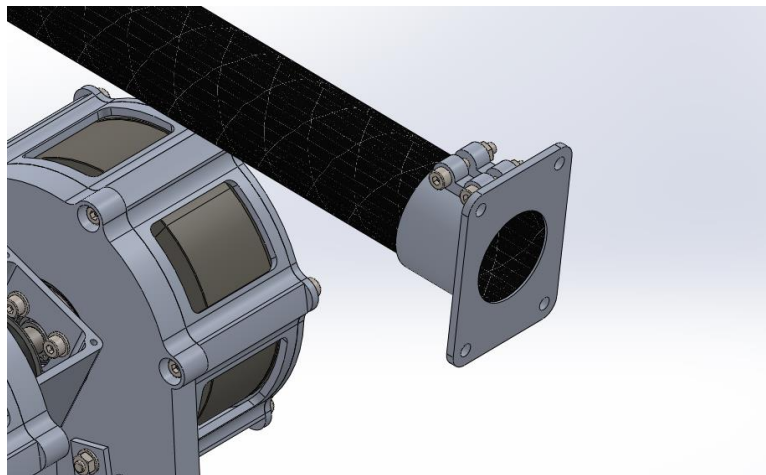


Σχήμα 3-45. Ασφάλιση του κυρίου σώματος του δεύτερου συνδέσμου (σωλήνας ανθρακονήματος) μέσω σύσφιξης.



Σχήμα 3-46. Ο ρομποτικό βραχίονας σε πλήρη δίπλωση.

Τέλος, στο άκρο του συνδέσμου τοποθετείται, ένας μηχανικός αντάπτορας – φλάντζα ο οποίος ενσωματώνεται πάλι μέσω σύσφιξης, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν τυχόν επιθυμητές διατάξεις, όπως αρπάγη (βλ. Σχήμα 3-47).



Σχήμα 3-47. Μηχανικός αντάπτορας – φλάντζα ο οποίος τοποθετείται στο ελεύθερο άκρο του δεύτερου συνδέσμου μέσω σύσφιξης.

### 3.4 Επιλογή Τελικών Διαστάσεων

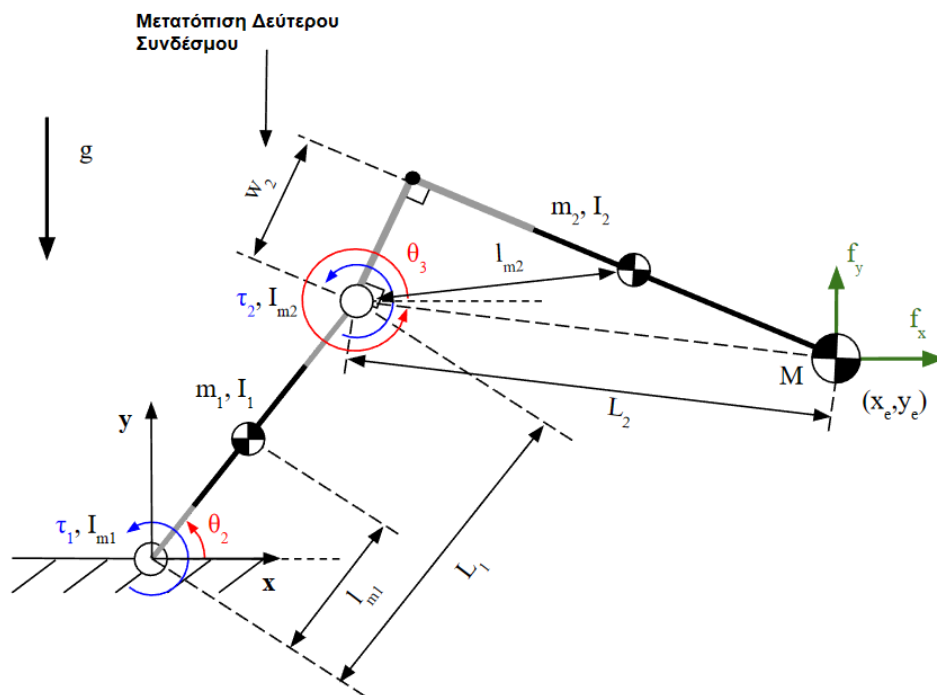
Ένα ερώτημα που τίθεται κατά το σχεδιασμό του βραχίονα, είναι το μήκος των συνδέσμων. Για να απαντηθεί αυτό, διεξάγεται μια θεωρητική ανάλυση, ώστε προκύψει μια τεκμηριωμένη επιλογή. Η επιλογή των μηκών των συνδέσμων είναι σημαντική γιατί επηρεάζει την

λειτουργία του βραχίονα με πολλαπλούς τρόπους, με τους πιο σημαντικούς να είναι το ωφέλιμο φορτίο του βραχίονα και ο χώρος εργασίας του.

Το μοντέλο που ακολουθεί, όπως θα επισημανθεί και στη συνέχεια, χρησιμεύει και σε μεταγενέστερα κομμάτια της διαδικασίας του σχεδιασμού, και συγκεκριμένα στην επιλογή των συνθηκών φόρτισης για την επιλογή των μηχανικών στοιχείων (ιμάντα χρονισμού και εδράνων κύλισης) καθώς και για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

### 3.4.1 Στοιχεία Θεωρίας

Αρχικά, απαιτείται να εξαχθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του βραχίονα. Όμοια με την Ενότητα 2.5, πρώτα σχεδιάζεται το μοντέλο του βραχίονα σε δύο διαστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-48. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια παράλληλη διάταξη κινητήρων, με μόνη διαφορά την προσθήκη της μετατόπισης στο δεύτερο σύνδεσμο.



Σχήμα 3-48. Το μοντέλο του τελικού βραχίονα.

Οι κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις πρακτικά ταυτίζονται με της παράλληλης διάταξης όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.5.1, επομένως παραλείπονται εδώ για εξοικονόμηση χώρου.

### 3.4.2 Προσδιορισμός Μηκών Συνδέσμων

Όπως προαναφέρθηκε, τα μήκη των συνδέσμων,  $L_1$  και  $L_2$ , επηρεάζουν άμεσα τις δυνατότητες του βραχίονα (ωφέλιμο φορτίο) και το χώρο εργασίας του. Αυτά λοιπόν, θα χρησιμοποιηθούν και σαν κριτήρια για την επιλογή των μηκών. Αφού οριστούν τα κριτήρια, εκτελείται μια παραμετρική ανάλυση και επιλέγεται ο συνδυασμός μηκών που κρίνεται ιδανικότερος σε σχέση με τις απαιτήσεις της Ενότητας 2.2.

Ξεκινώντας από τον χώρο εργασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. Ενότητα 2.5), για ένα βραχίονα δύο βαθμών ελευθερίας (με περιστροφικές αρθρώσεις παράλληλων αξόνων περιστροφής) είναι ένας κυκλικός δακτύλιος (βλ. Σχήμα 3-49), όπως προκύπτει εύκολα από



τους περιορισμούς της αντίστροφης κινηματικής, Εξ. (2-18). Καθώς ο βραχίονας θα εργάζεται σε διαμόρφωση elbow-up, εξετάζεται πάλι το δεξί τμήμα του χώρου εργασίας. Σε αυτόν, η ελάχιστη ακτίνα καθορίζεται από τη σχέση

$$R_{\min} = |L_2 - L_1| = \left| \sqrt{w_2^2 - L_2^2} - L_1 \right| \quad (3-1)$$

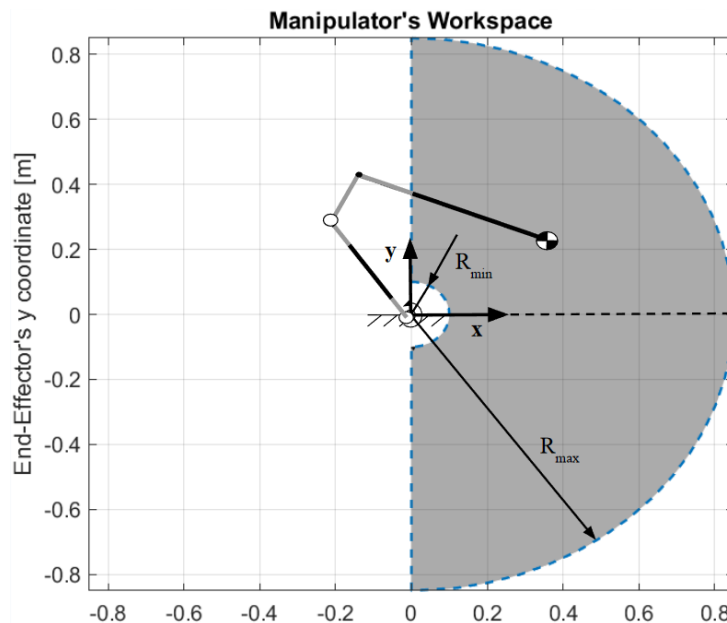
Αντίστοιχα, ορίζεται η εξωτερική ακτίνα του χώρου εργασίας ως

$$R_{\max} = L_2 + L_1 = L \quad (3-2)$$

όπου  $L$  το συνολικό μήκος του βραχίονα. Επιλέγεται λοιπόν, η ποσοτικοποίηση του κριτηρίου να γίνει μέσω της επιφάνειας εργασίας του βραχίονα, η οποία δίνεται από τον τύπο

$$A_{ws} = \frac{\pi}{2} (R_{\max}^2 - R_{\min}^2) \quad (3-3)$$

Ο λόγος που επιλέγεται αυτός ο τρόπος ποσοτικοποίησης αντί για την έκταση του βραχίονα, είναι πως για σταθερό συνολικό μήκος  $L$ , ο χώρος εργασίας μεταβάλλεται αναλόγως τον συνδυασμό μηκών των συνδέσμων. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει εποπτεία όχι μόνο της έκτασης του βραχίονα, αλλά και του χώρου εργασίας. Τέλος, αναφέρεται πως για την αποφυγή των ιδιομορφιών, αγνοούνται τα σημεία που βρίσκονται σε ακτίνα 5% μεγαλύτερη από την  $R_{\min}$  και μικρότερη από την  $R_{\max}$ .



**Σχήμα 3-49. Ο εξεταζόμενος χώρος εργασίας του βραχίονα, για βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο.**

Όσον αφορά το ωφέλιμο φορτίο, δεν είναι προφανές το πότε χαρακτηρίζεται μια τιμή μάζας ως (ονομαστικό ή μέγιστο) ωφέλιμο φορτίο του βραχίονα, καθώς οι δυνατότητες του είναι διαφορετικές σε κάθε σημείο του χώρου εργασίας. Για αυτό το λόγο, επιλέγεται να εξετάζεται η τιμή του (ονομαστικού) ωφέλιμου φορτίου σε στατική φόρτιση για την οποία οι ροπές των κινητήρων στο 75% των σημείων του χώρου εργασίας δεν ξεπερνούν την ονομαστική ροπή τους (3.7 Nm). Μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να αποκτηθεί μια

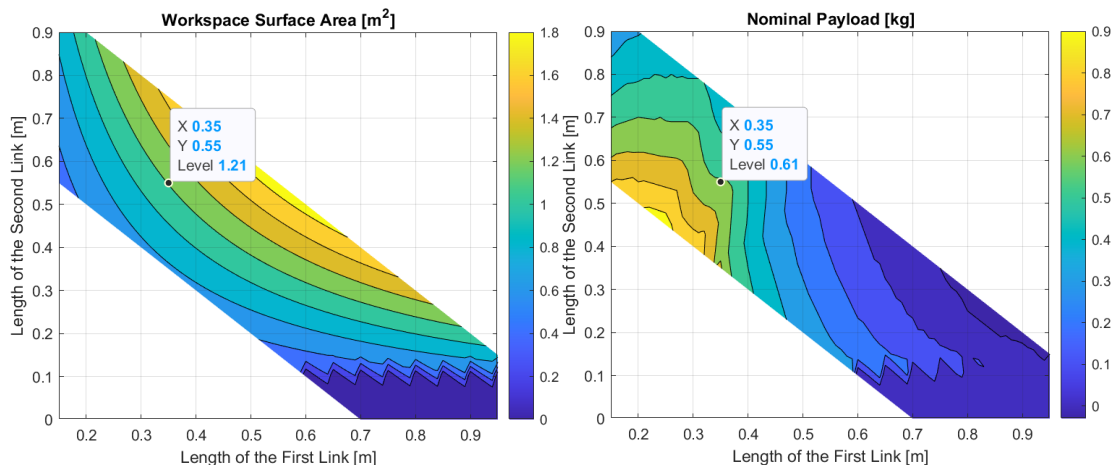
χονδρική αντίληψη των δυνατοτήτων του βραχίονα, που εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης.

Έτσι, για να επιλεγθούν τα τελικά μήκη, επιλέγεται ένα εύρος τιμών για τα μήκη  $L$ ,  $L_1$  (το  $L_2$  ορίζεται ως η διαφορά των άλλων δύο) που κρίνεται ότι ικανοποιούν τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί, και στη συνέχεια υπολογίζεται ο η επιφάνεια του χώρου εργασίας καθώς και το ονομαστικό ωφέλιμο φορτίο για κάθε συνδυασμό μηκών. Συγκεκριμένα, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του συνολικού μήκους του βραχίονα και των αντίστοιχων τιμών των συνδέσμων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} 0.7 &\leq L \leq 1.1 \\ 0.15 &\leq L_1 \leq L - 0.15 \\ L_2 &= L - L_1 \end{aligned} \quad (3-4)$$

όπου το  $L$  εξετάζεται σε διαστήματα 0.05 m, ενώ το  $L_1$  (και άρα και το  $L_2$ ) σε διαστήματα 0.1 m. Η μέγιστη τιμή του  $L_1$  καθορίζεται από την τιμή του  $L$  που εξετάζεται κάθε φορά. Από την ανάλυση αυτή, προκύπτουν δύο διαγράμματα, ένα για το εμβαδόν του χώρου εργασίας και ένα για το ονομαστικό ωφέλιμο φορτίο, συναρτήσει των μηκών των συνδέσμων (βλ. Σχήμα 3-50).

Κρίνεται ως καλή επιλογή, χωρίς να είναι η μοναδική, ο συνδυασμός μηκών  $(L_1, L_2) = (0.35, 0.55)$ ,  $L = 0.9$  m, διότι όπως φαίνεται από τα διαγράμματα στο Σχήμα 3-50, εκτός από το ότι ικανοποιεί τις απαιτήσεις ελάχιστης έκτασης (0.7 m) και ελάχιστου ωφέλιμου φορτίου (0.5 kg), ο βραχίονας έχει ικανό χώρο εργασίας να εργαστεί, συγκρίνοντάς τον με τις υπόλοιπες δυνατές τιμές. Ο Πίνακας 3-3 περιέχει τις τελικές παραμέτρους του βραχίονα.



**Σχήμα 3-50.** (Αριστερά) Το διάγραμμα της επιφάνειας του χώρου εργασίας και (δεξιά) του ωφέλιμου φορτίου, συναρτήσει των μηκών των συνδέσμων. Το χρώμα σε κάθε σημείο αντιπροσωπεύει την τιμή των εξεταζόμενων μεγεθών. Έχουν σημειωθεί τα σημεία που αντιστοιχούν στο συνδυασμό μηκών που επιλέχθηκε.

**Πίνακας 3-3.** Οι τελικές τιμές των παραμέτρων του βραχίονα. Οι συμβολισμοί αντιστοιχούν στο Σχήμα 3-48.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Συνολική Έκταση	$L$	0.9 m
Συνολικό Βάρος	-	4.9 kg
Μάζα Πρώτου Συνδέσμου	$m_1$	0.660 kg

Ροπή Αδράνειας Πρώτου Συνδέσμου (w.r.t CoM)	$I_1$	0.0152 kgm <sup>2</sup>
Μάζα Δεύτερου Συνδέσμου	$m_2$	0.321 kg
Ροπή Αδράνειας Δεύτερου Συνδέσμου (w.r.t CoM)	$I_2$	0.0100 kgm <sup>2</sup>
Μήκος Πρώτου Συνδέσμου	$L_1$	0.35 m
Απόσταση Κέντρου Μάζας Πρώτου Συνδέσμου Από Πρώτη Άρθρωση	$l_1$	0.175 m
Μήκος Δεύτερου Συνδέσμου	$L_2$	0.55 m
Κάθετη Μετατόπιση Δεύτερου Συνδέσμου	$w_2$	0.059 m
Απόσταση Κέντρου Μάζας Δεύτερου Συνδέσμου Από Δεύτερη Άρθρωση	$l_2$	0.137 m
Ροπή Αδράνειας Δρομέα Κινητήρα Πρώτης Άρθρωσης	$I_{m1}$	0.000072 kgm <sup>2</sup>
Ροπή Αδράνειας Δρομέα Κινητήρα Δεύτερης Άρθρωσης	$I_{m2}$	0.000072 kgm <sup>2</sup>
Ωφέλιμο Φορτίο	$M$	Προς εξέταση

### 3.5 Επιδόσεις Βραχίονα και Ανάλυση Κόστους

#### 3.5.1 Επιδόσεις Βραχίονα

Έχοντας φτάσει στην τελική μορφή του ρομπότ, είναι εφικτό να εξαχθούν οι επιδόσεις του βραχίονα, που είναι παρόμοιες με τις προδιαγραφές (specifications) όπως θα δίνονταν από έναν κατασκευαστή. Είναι σημαντικό να γίνει αυτό, αφενός για να υπάρξει μια εκτίμηση των δυνατοτήτων του βραχίονα και αφετέρου διότι από αυτές προσδιορίζονται οι δυσμενέστερες συνθήκες φόρτισης, που χρειάζονται για τον υπολογισμό του ιμάντα χρονισμού και για τη στατική ανάλυση (βλ. Ενότητα 3.6 και 3.7).

Γενικά, οι προδιαγραφές ενός βραχίονα αφορούν, πέρα από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά του, το ωφέλιμο φορτίο, τη γραμμική ταχύτητα και τη γραμμική επιτάχυνση του ΤΣΔ. Για αυτό το σκοπό, εξετάζονται τα εξής ονομαστικά σενάρια λειτουργίας, τα οποία είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.5.2:

- Στατική φόρτιση.
- Γραμμική κίνηση ΤΣΔ.

- Κυκλική κίνηση ΤΣΔ.

Αυτά, εξετάζονται στα πλαίσια της χωρικής ανάλυσης, όπως αυτή έχει περιγραφεί στην Ενότητα 2.5.3. Η εξισώσεις των αντίστοιχων τροχιών έχουν παρουσιαστεί στην Ενότητα 2.5.2.

Από τη στατική φόρτιση μπορεί να βρεθεί το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να κρατήσει σταθερό ο βραχίονας, ενώ από τις επιλεγμένες κινήσεις μπορούν να βρεθούν η μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση του ΤΣΔ. Μάλιστα, τα δύο αυτά μεγέθη μπορούν να υπολογιστούν συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου.

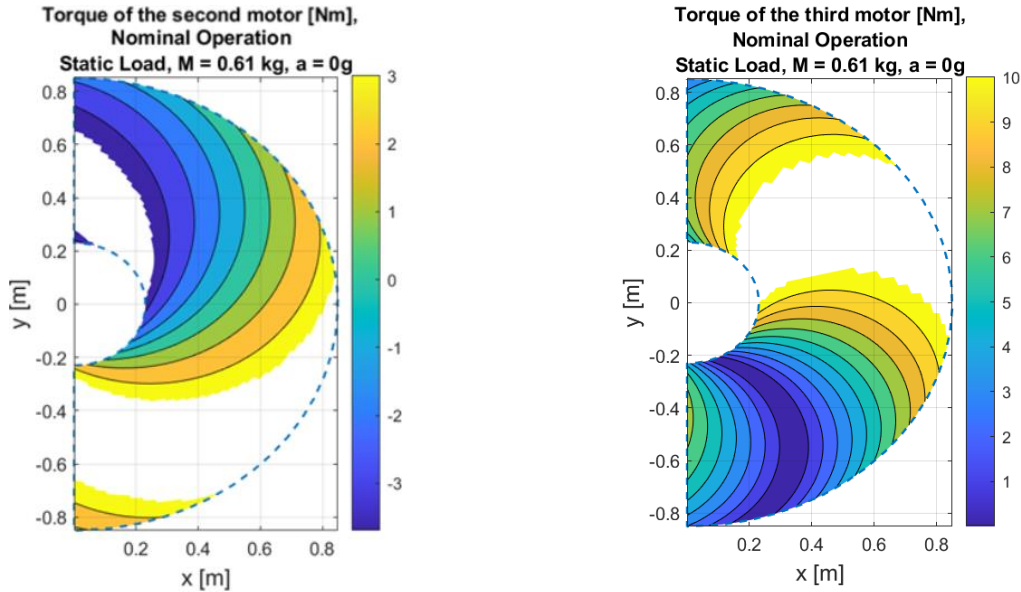
Όσον αφορά το πότε θεωρείται πως η τιμή ενός από τα εξεταζόμενα μεγέθη αποτελεί προδιαγραφή, η τακτική που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή στην επιλογή διαστάσεων της Ενότητας 3.4. Η τιμή του μεγέθους προς εξέταση (ωφέλιμο φορτίο, ταχύτητα, επιτάχυνση) θεωρείται πως είναι η ανώτατη η οποία μπορεί να λάβει το εκάστοτε σενάριο, όταν στο 25% των σημείων του χώρου εργασίας η RMS (ή η απόλυτη σε περίπτωση στατικής φόρτισης) τιμή της ροπής οποιουδήποτε από τους δύο κινητήρες ξεπεράσει την ονομαστική ροπή (3.7 Nm). Ο λόγος που επιλέγεται η RMS ροπή κατά μήκος μιας διαδρομής είναι επειδή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ενεργή ροπή (effective torque), η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από τη ροπή του κινητήρα για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση [20]. Επιπλέον, γίνεται ξεχωριστός έλεγχος σε κάθε τροχιά για την περίπτωση που η (απόλυτη) ροπή σε κάποια χρονική στιγμή ξεπερνάει τη μέγιστη του κινητήρα, κάτι το οποίο δεν μπορεί να φανεί από την RMS τιμή. Μια τέτοια τροχιά θεωρείται πως δεν πληροί τις προδιαγραφές, όπως και αυτές που δεν ικανοποιούν το κριτήριο της RMS που προαναφέρθηκε. Μέσω αυτών των περιορισμών ορίζονται οι ονομαστικές προδιαγραφές του βραχίονα.

Για τις προδιαγραφές περιορισμένης λειτουργίας, ελέγχεται μόνο πότε οι (απόλυτες) ροπές σε μια τροχιά ξεπεράσουν τη μέγιστη ροπή των κινητήρων. Και σε αυτή την περίπτωση η προδιαγραφή ορίζεται όταν το όριο ξεπεραστεί στο 25% των σημείων του χώρου εργασίας. Το ποσοστό 25% και στις δύο περιπτώσεις επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές, αφού τα συμπεράσματα που προέκυψαν κρίθηκαν αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά των δυνατοτήτων του βραχίονα.

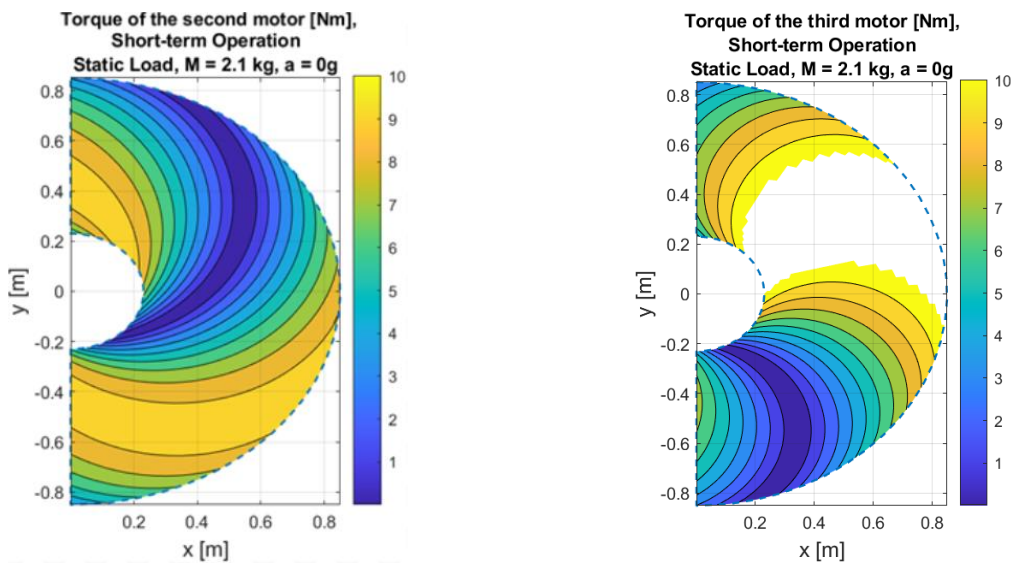
Εφαρμόζοντας την παραπάνω τακτική και βρίσκοντας τις προδιαγραφές συναρτήσει του φορτίου, ουσιαστικά προκύπτουν δύο περιοχές, μια ονομαστικής και μια περιορισμένης λειτουργίας. Αυτές, πρακτικά αντιστοιχούν στις ομώνυμες περιοχές λειτουργίας των κινητήρων. Έτσι, είναι γνωστές οι τιμές των μεγεθών για τις οποίες ο βραχίονας μπορεί να εργάζεται διαρκώς, καθώς και οι τιμές για τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει για περιορισμένο χρόνο.

### **Στατική Φόρτιση**

Από τη στατική φόρτιση προκύπτει η μέγιστη τιμή ωφέλιμου φορτίου ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας του βραχίονα. Στο Σχήμα 3-51 φαίνεται η κατανομή των ροπών των δύο κινητήρων για το ονομαστικό ωφέλιμο φορτίο, ενώ στο Σχήμα 3-52 για το ωφέλιμο φορτίο σε περιορισμένη λειτουργία. Παρατηρείται πως το ωφέλιμο φορτίο για ονομαστική λειτουργία είναι 0.61 kg (όπως βρέθηκε και στην Ενότητα 3.4), ενώ για περιορισμένη λειτουργία 2.1 kg. Σημειώνεται ότι στα σημεία στα οποία υπερβαίνονται τα όρια που έχουν τεθεί, αποδίδεται άσπρο χρώμα.



Σχήμα 3-51. Διαγράμματα ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα για το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (0.61 kg) στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας σε στατική φόρτιση. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή της απόλυτης ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή των κινητήρων.



Σχήμα 3-52. Διαγράμματα ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα για το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (2.1 kg) στην περιοχή περιορισμένης λειτουργίας σε στατική φόρτιση. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή της απόλυτης ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή των κινητήρων.

Γίνονται δύο παρατηρήσεις. Αρχικά, φαίνεται πως υπάρχει διαφοροποίηση στο ποσοστό συμβολής του κάθε κινητήρα ανάλογα με την τιμή του ωφέλιμου φορτίου. Στην περίπτωση των 0.61 kg, ο δεύτερος κινητήρας παραλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης, οπότε σε αυτόν παρουσιάζονται περιοχές με τιμές ροπής μεγαλύτερες των ορίων. Στην περίπτωση των 2.1 kg ισχύει το αντίθετο. Διαπιστώνεται πως όσο αυξάνεται το φορτίο, το μεγαλύτερο κομμάτι της φόρτισης μετατοπίζεται όλο και περισσότερο από το δεύτερο στον τρίτο κινητήρα.

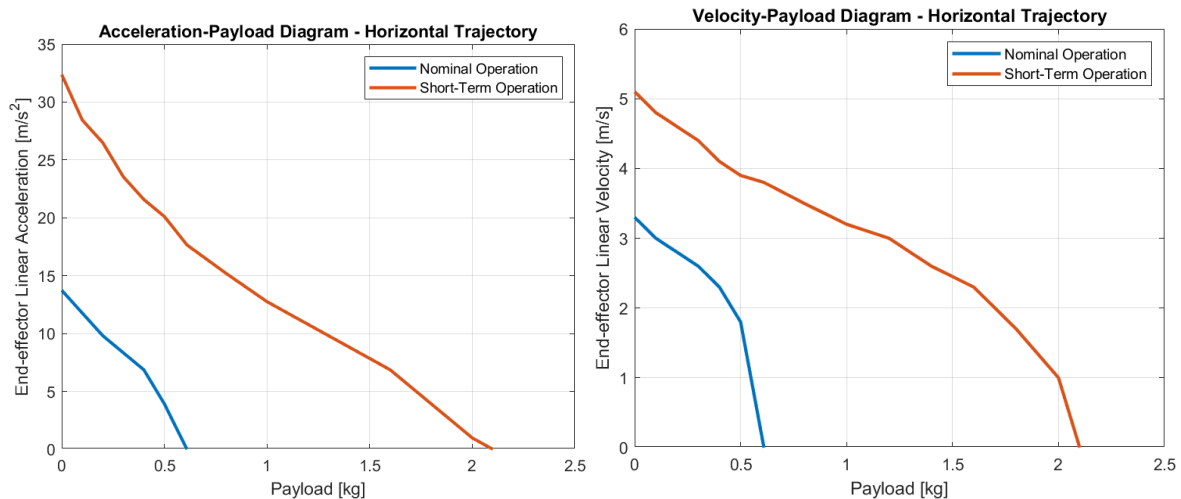
Επιπλέον, παρατηρείται πως σε ό,τι αφορά το δεύτερο κινητήρα, υπάρχουν δύο περιοχές αδυναμίας. Η πρώτη βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη βάση, ενώ η δεύτερη στο

χαμηλότερο και πιο απομακρυσμένο τμήμα του χώρου εργασίας. Ο τρίτος κινητήρας αντιμετωπίζει αυξημένες απαιτήσεις στην περιοχή μπροστά από το βραχίονα.

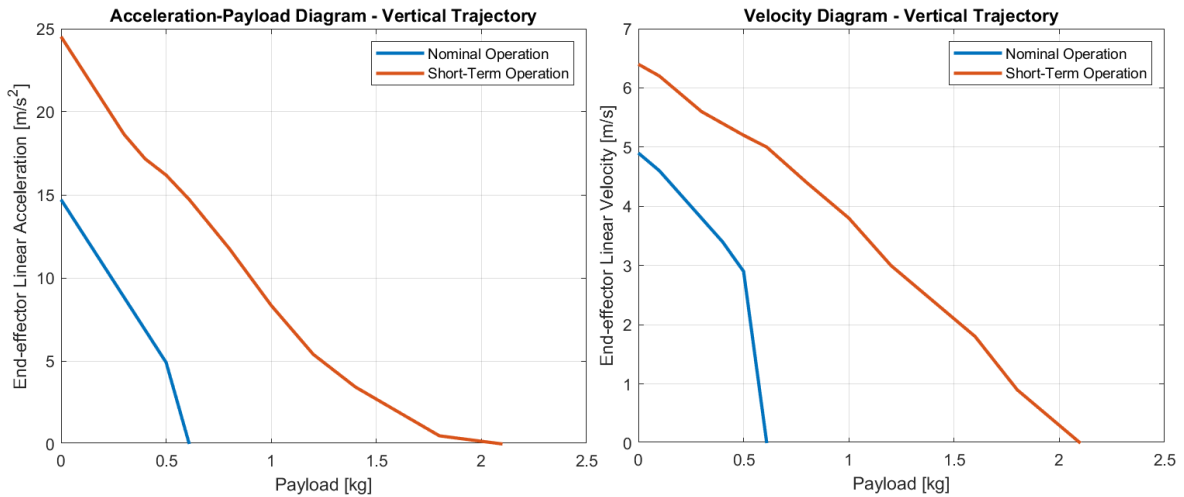
### Ευθύγραμμη Τροχιά ΤΣΔ

Στη επόμενο σενάριο, το ΤΣΔ εκτελεί ευθύγραμμη τροχιά. Όπως και στην Ενότητα 2.5, πρόκειται για τριγωνικό προφίλ ταχύτητας (βλ. Σχήμα 2-18). Έτσι, εξυπηρετείται καλύτερα η αξιολόγηση του βραχίονα καθώς το ΤΣΔ αναπτύσσει τη μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπεται από την επιτάχυνση που του επιβάλλεται. Και εδώ, εξετάζονται ευθύγραμμη οριζόντια (από αριστερά προς τα δεξιά) και ευθύγραμμη κατακόρυφη (από κάτω προς τα πάνω) κίνηση.

Στο Σχήμα 3-53 και Σχήμα 3-54, παρατίθενται τα διαγράμματα γραμμικής ταχύτητας και επιτάχυνσης ΤΣΔ συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου για την κάθε περίπτωση. Διακρίνονται οι προαναφερθείσες περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας. Όπως φαίνεται, το ωφέλιμο φορτίο είναι μέγιστο όταν η ταχύτητα και η επιτάχυνση μηδενίζονται, δηλαδή στη στατική φόρτιση. Λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο τροχιές, η μέγιστη επιτάχυνση που εμφανίζεται σε συνθήκες ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας είναι  $14.7 \text{ m/s}^2$  ( $1.5g$ ) και  $32.3 \text{ m/s}^2$  ( $3.3g$ ) αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη ταχύτητα είναι  $4.9 \text{ m/s}$  και  $6.3 \text{ m/s}$  αντίστοιχα.

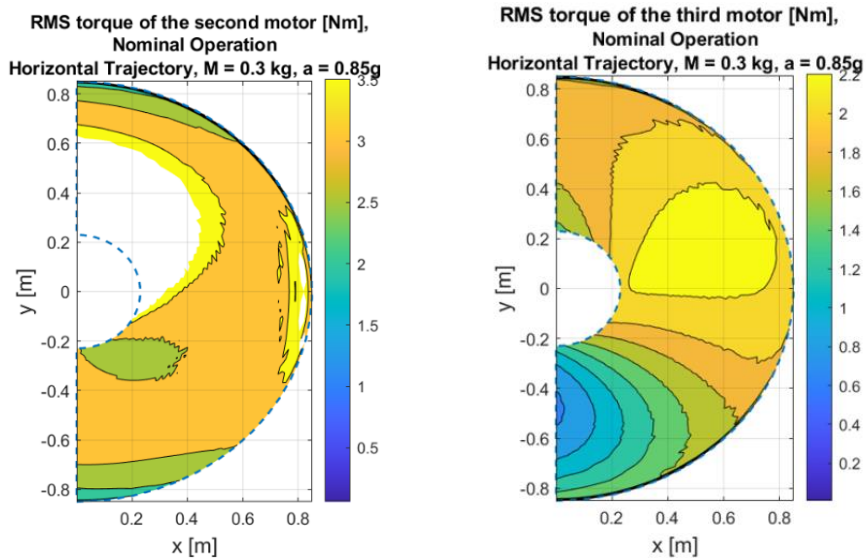


**Σχήμα 3-53.** Διάγραμμα (αριστερά) γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου και (δεξιά) γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου, για ευθύγραμμη οριζόντια τροχιά. Έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που οριοθετούν τις περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας.



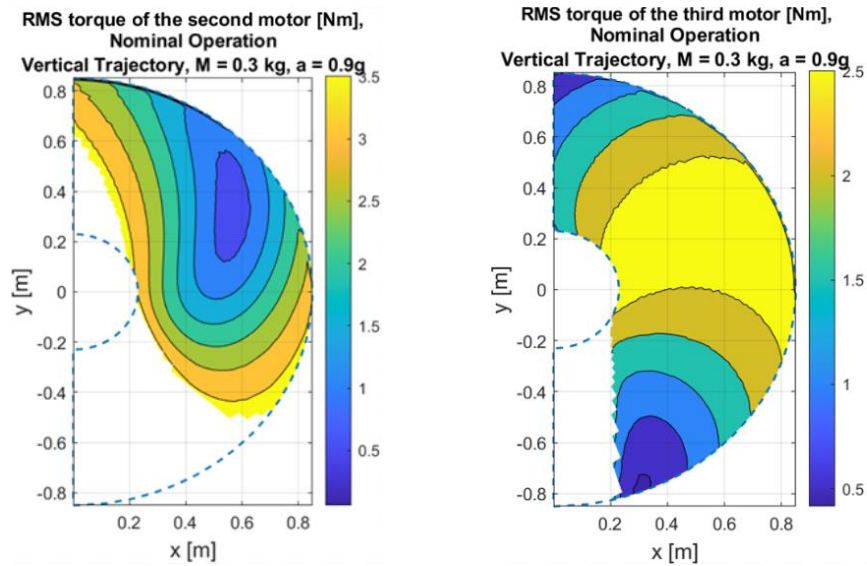
**Σχήμα 3-54.** Διάγραμμα (αριστερά) γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου και (δεξιά) γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου, για ευθύγραμμη κατακόρυφη τροχιά. Έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που οριοθετούν τις περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας.

Εδώ, είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν τα διαγράμματα ροπών λόγω του μεγάλου αριθμού περιπτώσεων. Αντ’ αυτού, παρατίθεται ένα διάγραμμα (RMS ροπής) για κάθε τροχιά, του οποίου η μορφή είναι αντιπροσωπευτική και των υπόλοιπων (βλ. Σχήμα 3-55 και Σχήμα 3-56). Επιλέγεται ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και για τις δύο κινήσεις. Παρατηρείται πως ποιοτικά, παρατηρούνται παρόμοιες τάσεις με την περίπτωση της στατικής φόρτισης, δηλαδή ότι οι απαιτήσεις ροπής του δεύτερου κινητήρα είναι αυξημένες στην περιοχή πάνω από τη βάση του βραχίονα και κάτω δεξιά, ενώ για τον τρίτο κινητήρα στην περιοχή μπροστά από το βραχίονα. Επιπλέον, εν γένει, η απαιτήσεις του δεύτερου κινητήρα είναι μεγαλύτερες από του τρίτου.



**Σχήμα 3-55.** Διαγράμματα RMS ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα, για ευθύγραμμη οριζόντια κίνηση ΤΣΔ, στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 0.85g. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή RMS της ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή του κινητήρα ή/και η μέγιστη απόλυτη ροπή τη μέγιστη ροπή του κινητήρα.

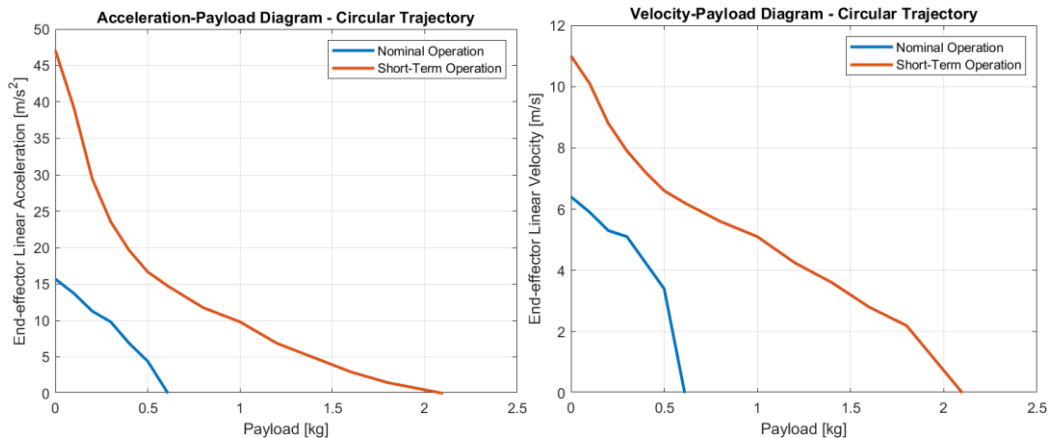




Σχήμα 3-56. Διαγράμματα RMS ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα, για ευθύγραμμη κατακόρυφη κίνηση ΤΣΔ, στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 0.9g. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή RMS της ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή του κινητήρα ή/και η μέγιστη απόλυτη ροπή τη μέγιστη ροπή του κινητήρα.

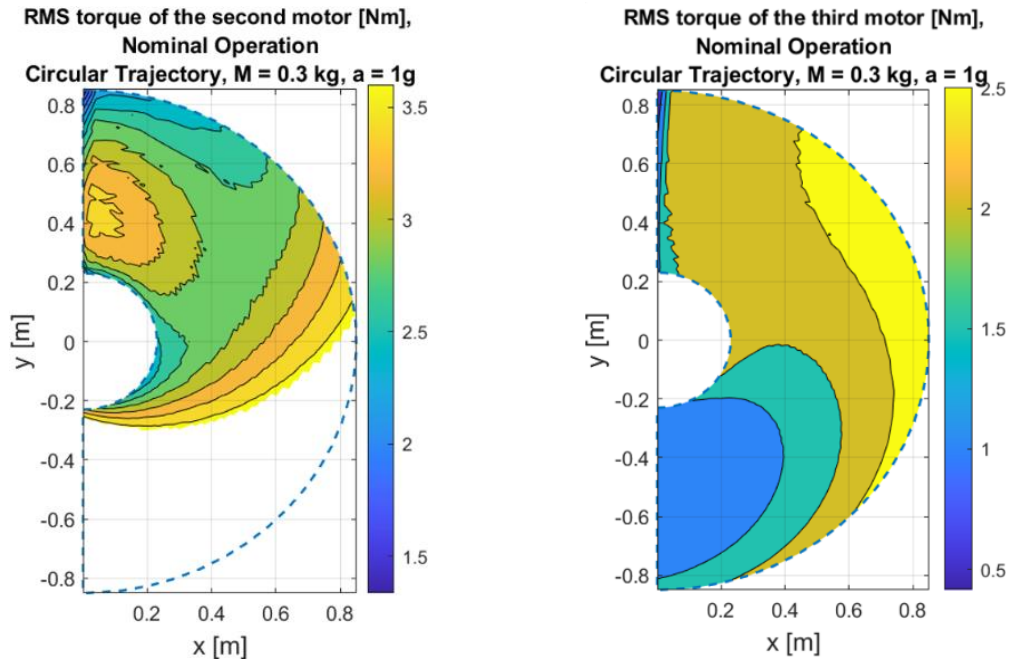
### Κυκλική Κίνηση ΤΣΔ

Τέλος, μελετάται η κυκλική κίνηση του ΤΣΔ, σύμφωνα με την τροχιά που περιεγράφηκε στην Ενότητα 2.5.2. Το Σχήμα 3-57 περιλαμβάνει τα διαγράμματα γραμμικής επιτάχυνσης και ταχύτητας συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου που προέκυψαν για την τροχιά αυτή. Επιπλέον, περιλαμβάνονται διαγράμματα αντιπροσωπευτικά της κατανομής ροπών στην περιοχή ονομαστικής (βλ. Σχήμα 3-58) λειτουργίας για το συγκεκριμένο σενάριο.



Σχήμα 3-57. Διάγραμμα (αριστερά) γραμμικής επιτάχυνσης ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου και (δεξιά) γραμμικής ταχύτητας ΤΣΔ-ωφέλιμου φορτίου, για κυκλική τροχιά. Έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που οριοθετούν τις περιοχές ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας.





Σχήμα 3-58. Διαγράμματα RMS ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα, για κυκλική κίνηση ΤΣΔ, στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, με ωφέλιμο φορτίο 0.3 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 0.9g. Με άσπρο συμβολίζονται τα σημεία που η τιμή RMS της ροπής ξεπερνάει την ονομαστική ροπή του κινητήρα ή/και η μέγιστη απόλυτη ροπή τη μέγιστη ροπή του κινητήρα.

### 3.5.2 Ανάλυση Κόστους

Με βάση τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ο βραχίονας, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του συνολικού κόστους του. Από τις τιμές του Πίνακα 3-4, εκτιμάται πως το συνολικό κόστος των εξαρτημάτων και υλικών ανέρχεται στα 2143.11€ (\$2350.14), το οποίο είναι εντός των προδιαγραφών που ορίστηκαν στην Ενότητα 2.2.4.

Πίνακας 3-4. Κατάλογος εξαρτημάτων (bill of materials) του βραχίονα και οι τιμές του καθενός

Εξάρτημα	Τιμή [€ / \$]	Ποσότητα [-]
Κινητήρας T-Motor R100 KV90	388.50 / 426.90	3
Αισθητήρας Γωνιακής Θέσης AS5074P-TS_EK_AB	15.28 / 16.76	3
ODrive v3.6	254.44 / 279.00	2
Ιμάντας Χρονισμού EV5GT	19.68 / 21.58	1
Τροχαλία GT5	27.48 / 30.13	2
Shaft-Support	14.86 / 16.30	3
Άξονας Μονόπλευρης Μείωσης Διαμέτρου	15.19 / 16.65	1
Άξονας Αμφίπλευρης Μείωσης Διαμέτρου	26.57 / 19.12	1
Έδρανο Κύλισης 61807 – 2RZ	30.13 / 33.31	4
Έδρανο Κύλισης 61900 – 2Z	0.93 / 1.02	4

Έδρανο Κύλισης NK 5/12 TN	2.74 / 3.00	4
Σωλήνας Ανθρακονήματος	40.79 / 50.19 (ανά m)	0.9 m
Αλουμίνιο 7075-t6	~ 20 / 21.93 (ανά kg)	4.5 kg

### 3.5.3 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, αποδεικνύεται πως ο ρομποτικός βραχίονας που σχεδιάστηκε έχει συγκρίσιμες επιδόσεις με άλλους βραχίονες αντίστοιχων εφαρμογών. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το ωφέλιμο φορτίο, η ονομαστική τιμή 0.61 kg και μέγιστη 2.1 kg. Επιπλέον, ανατρέχοντας και στις παραμέτρους του τελικού συστήματος (Πίνακας 3-3), ο βραχίονας έχει ονομαστικό λόγο ωφέλιμου φορτίου προς βάρος 0.12 και μέγιστο 0.42, το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις που τέθηκαν στην Ενότητα 2.2. Εκεί που πραγματικά αναδεικνύονται οι δυνατότητες του ρομποτικού βραχίονα είναι στην ανάπτυξη ταχύτητας, που ξεπερνάει την πλειοψηφία των ήδη υπαρχόντων βραχιόνων, καθώς στην περίπτωση κυκλικής τροχιάς (βλ. Σχήμα 3-57), η γραμμική ταχύτητα του ΤΣΔ είναι κοντά στα 11 m/s. Επομένως, έχει σχεδιαστεί ένα σύστημα που αφενός ικανοποιεί τις σχεδιαστικές απαιτήσεις ως προς τη λειτουργία σε μη δομημένα περιβάλλοντα και το χαμηλό κόστος ενώ ταυτόχρονα έχει συγκρίσιμες δυνατότητες με αυτές των βραχιόνων του εμπορίου.

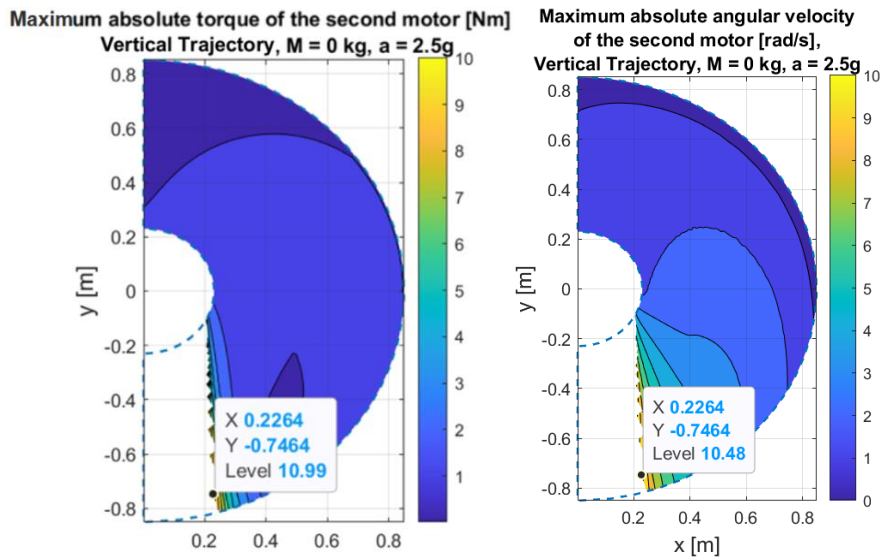
## 3.6 Επιλογή Ιμάντα Χρονισμού

Κατά την επιλογή ενός ιμάντα χρονισμού πρέπει να ληφθούν υπόψη: απαιτήσεις μεταφοράς ισχύος, χάρη οδόντων, γεωμετρικοί περιορισμοί και υλικό. Ως πρώτο βήμα, πρέπει να οριστούν σαφώς οι συνθήκες φόρτισης.

### Συνθήκες Φόρτισης

Ως συνθήκες φόρτισης, λαμβάνεται το δυσμενέστερο σενάριο στο οποίο μπορεί να κληθεί να λειτουργήσει ο ιμάντας. Λαμβάνοντας υπόψη πως ροπή την οποία μπορεί να μεταφέρει ένας ιμάντας χρονισμού εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα περιστροφής και μάλιστα είναι αντιστρόφως ανάλογη αυτής, το πιο απαιτητικό σενάριο είναι αυτό στο οποίο ασκείται η μέγιστη ροπή των κινητήρων, στη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που θα παρατηρηθεί. Η τελευταία, μπορεί να προσδιοριστεί από τα (ονομαστικά) σενάρια λειτουργίας που εξετάστηκαν στην Ενότητα 3.5.

Βρίσκεται πως αυτές οι δύο συνθήκες ικανοποιούνται ταυτόχρονα στην περίπτωση κατακόρυφης τροχιάς, με το βραχίονα να λειτουργεί σε συνθήκες περιορισμένης λειτουργίας χωρίς ωφέλιμο φορτίο και μέγιστη επιτάχυνση (2.5g) (βλ. Σχήμα 3-54). Αναλυτικότερα, στα διαγράμματα στο Σχήμα 3-59, φαίνεται η μέγιστη (απόλυτη) ροπή και η μέγιστη (απόλυτη) γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα της δεύτερης άρθρωσης. Όπως παρατηρείται, στην τροχιά που έχει αφετηρία το σημείο (0.2264,-0.7464), αναπτύσσεται μέγιστη ροπή κινητήρων (11 Nm) και γωνιακή ταχύτητα 10.48 rad/s (100 rpm), η οποία είναι η μέγιστη μεταξύ όλων σεναρίων μελετήθηκαν στην Ενότητα 3.5.1.



Σχήμα 3-59. (Αριστερά) Η μέγιστη απόλυτη ροπή και (δεξιά) η μέγιστη απόλυτη γωνιακή ταχύτητα του δεύτερου κινητήρα, για ευθύγραμμη κατακόρυφη τροχιά, με ωφέλιμο φορτίο 0 kg και γραμμική επιτάχυνση ΤΣΔ 2.5g. Έχει σημειωθεί το σημείο που είναι η αφετηρία της τροχιάς στην οποία παρατηρείται ταυτόχρονα μέγιστη (απόλυτη) ροπή και γωνιακή ταχύτητα.

Ο προσδιορισμός των φορτίσεων ολοκληρώνεται με την συμπερίληψη της προέντασης. Σύμφωνα με τη βασική θεωρία ιμαντοκινήσεων [21] [49], για να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος μετάδοσης κίνησης, πρέπει πάντοτε να υπάρχει τάση και στον έλκοντα και στον ελκυόμενο κλάδο. Αναλυτικότερα, η μεταφερόμενη δύναμη σε έναν ιμάντα χρονισμού δίνεται από τη σχέση

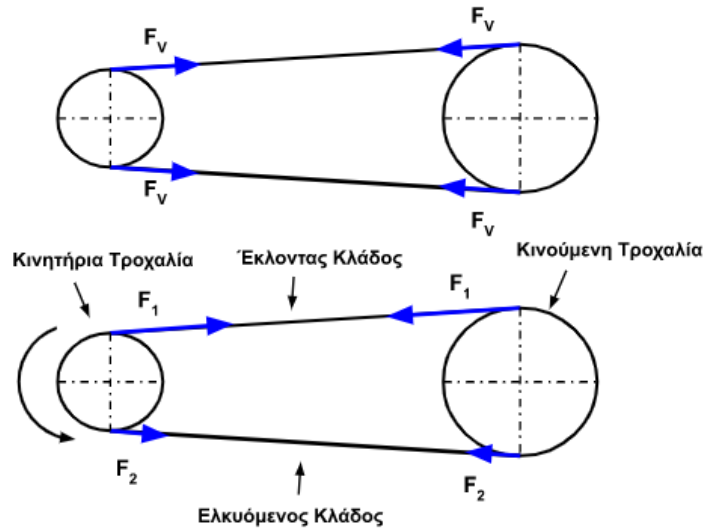
$$F_t = F_1 - F_2 \quad (3-5)$$

όπου  $F_1$  και  $F_2$  η τάση στον έλκοντα και ελκυόμενο κλάδο αντίστοιχα. Επιπλέον, σε έναν ιμάντα χρονισμού με ίσα μήκη κλάδων όπως στην περίπτωση του βραχίονα, εάν  $F_v$  η προένταση, ισχύει

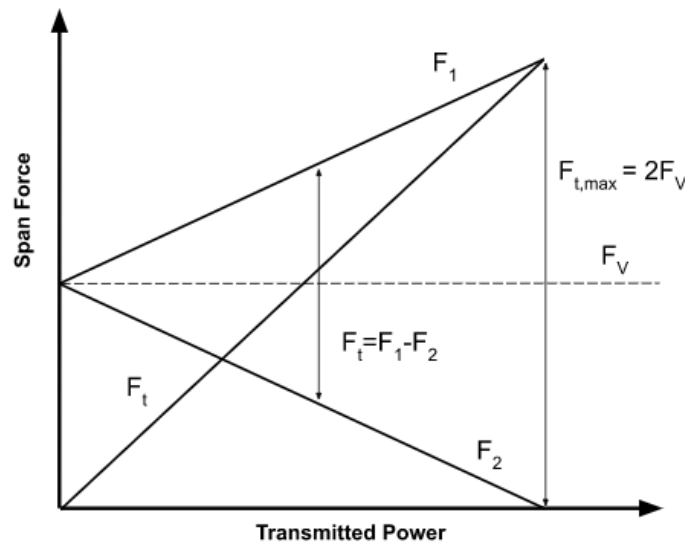
$$F_v = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (3-6)$$

όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-60 και στο Σχήμα 3-61. Η μεταφερόμενη δύναμη του ιμάντα μεγιστοποιείται όταν η δύναμη στον ελκυόμενο κλάδο μηδενιστεί,  $F_2 = 0$ , που σε αυτή την περίπτωση, συνδυάζοντας τις Εξ. (3-5) και (3-6) προκύπτει ότι η προένταση πρέπει να είναι ίση με

$$F_v = \frac{1}{2} F_t \quad (3-7)$$



Σχήμα 3-60. Η κατανομή τάσης στον ιμάντα χρονισμού. (Πάνω) Όταν δεν υπάρχει μεταφορά ισχύος, και στους δύο κλάδους η τάση είναι ίση με την προένταση του ιμάντα. (Κάτω) Κατά τη μετάδοση ροπής, αναπτύσσεται διαφορά τάσης στους δύο κλάδους.

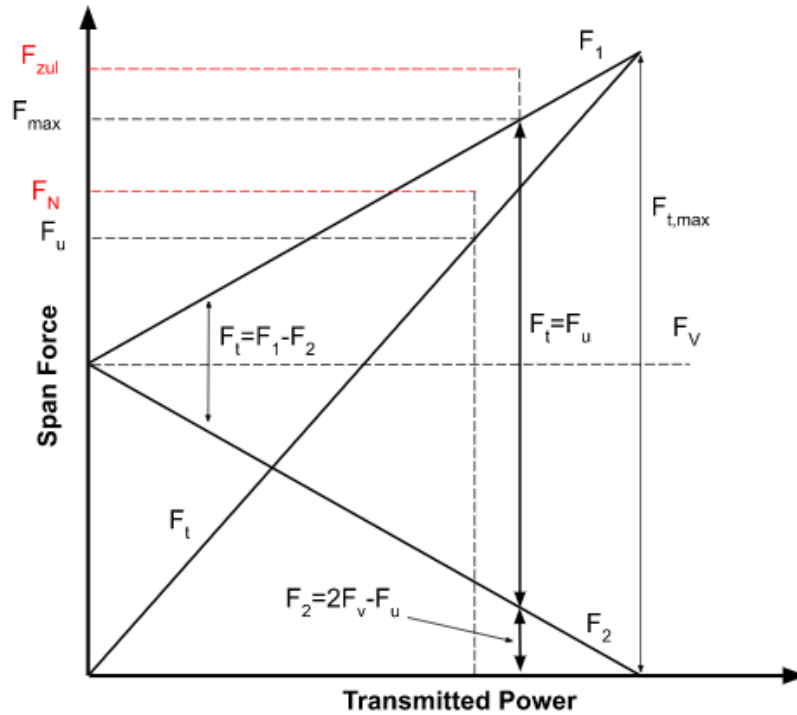


Σχήμα 3-61. Διάγραμμα δυνάμεων σε ιμάντα χρονισμού με ίσα μήκη κλάδων, συναρτήσεως της μεταφερόμενης ισχύος. Με 1 συμβολίζεται ο έλκοντας κλάδος και με 2 ο ελκυόμενος. Όταν δεν μεταφέρεται ισχύς, η δύναμη και στους δύο κλάδους είναι ίση με την προένταση,  $F_v$ . Όταν αρχίσει να μεταφέρεται ισχύς, η τάση στον έλκοντα κλάδο αυξάνεται ενώ στον ελκυόμενο μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό. Όταν μεταφερόμενη δύναμη μεγιστοποιείται, γίνεται ίση με  $2F_v$  ενώ η δύναμη στον ελκυόμενο κλάδο μηδενίζεται.

Επειδή όμως αυτή η περίπτωση δεν είναι αξιόπιστη, καθώς όταν χαλαρώσει πλήρως ένας κλάδος εμφανίζονται μη επιθυμητά φαινόμενα όπως "άλμα" οδόντων στις τροχαλίες, κρίνεται καλύτερη πρακτική η προένταση να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει περίσσεια τάση στον ελκυόμενο κλάδο κατά την μεταφορά της επιθυμητής δύναμης, δηλαδή

$$F_v \geq \frac{1}{2} F_u \quad (3-8)$$

όπου  $F_u$  η επιθυμητή δύναμη. Στο διάγραμμα στο Σχήμα 3-62, αναπαρίσταται η παραπάνω περίπτωση, δηλαδή η προένταση είναι τέτοια ώστε όταν η μεταφερόμενη δύναμη γίνει ίση με τη επιθυμητή, ο ελκόμενος κλάδος βρίσκεται υπό τάση, η οποία μάλιστα είναι ίση με  $F_2 = 2F_v - F_u$ . Η μέγιστη δύναμη οδόντων  $F_N$  και η μέγιστη εφελκυστική δύναμη ενισχυτικών μελών  $F_{zul}$  που έχουν σχεδιαστεί, αναλύονται παρακάτω.



**Σχήμα 3-62.** Διάγραμμα δυνάμεων σε ιμάντα χρονισμού με ίσα μήκη κλάδων. Όταν η μεταφερόμενη δύναμη  $F_t$  γίνει ίση με την επιθυμητή δύναμη  $F_u$ , ο ελκόμενος κλάδος παραμένει υπό τάση  $2F_v - F_u$ . Επιπλέον, έχουν σχεδιαστεί η μέγιστη δύναμη οδόντων  $F_N$  και η μέγιστη εφελκυστική δύναμη ενισχυτικών μελών  $F_{zul}$ , οι οποίες πρέπει να είναι μεγαλύτερες από την  $F_u$  και  $F_{max}$  αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέγεται η περίσσεια τάση να είναι ίση με  $0.2F_u$ . Έτσι, προκύπτει πως η προένταση παίρνει την τιμή

$$F_v = 0.7F_u \quad (3-9)$$

Είναι επίσης σημαντικό να οριστεί η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που εμφανίζεται στον ιμάντα, η οποία είναι ίση με

$$F_{max} = 2F_v \quad (3-10)$$

Η τιμή της μεταφερόμενης δύναμης, εξαρτάται από τη ροπή του κινητήρα και τη διάμετρο της τροχαλίας με τις οποίες σχετίζεται μέσω της σχέσης:

$$F_u = \frac{2\tau}{d_p} \quad (3-11)$$

όπου  $\tau$  η ροπή του κινητήρα και  $d_p$  η διάμετρος της τροχαλίας. Αντίστοιχα, η μέγιστη εφελκυστική δύναμη στον ιμάντα γίνεται

$$F_{max} = 2F_v = 1.4F_u = 2.8 \frac{\tau}{d_p} \quad (3-12)$$

### Επιλογή Ιμάντα Χρονισμού

Οι κατασκευαστές ιμάντων χρονισμού παρέχουν τις προδιαγραφές τους με δύο τρόπους:

- Μέσω της μέγιστης δύναμης οδόντων (tooth shear strength / tensile force transmittable per tooth)  $F_{spez}$  και της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης ενισχυτικών μελών (tensile strength of tensions member / allowable tensile force)  $F_{zul}$ . Το πρώτο μέγεθος καθορίζει τη δύναμη που μπορεί να μεταφέρει ο ιμάντας. Συγκεκριμένα, αυτή ορίζεται ως

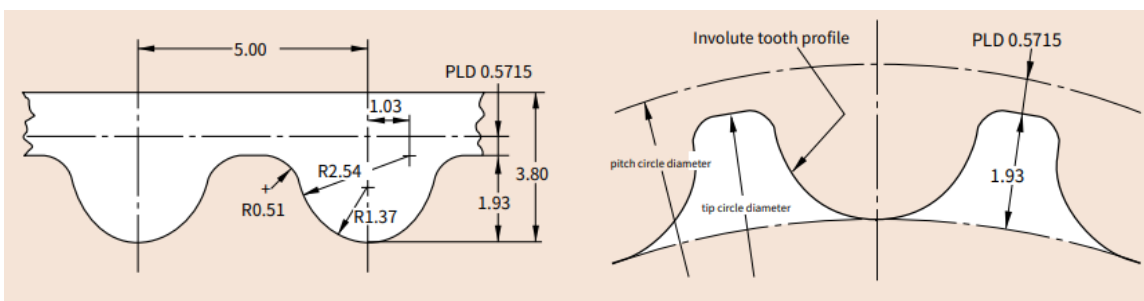
$$F_N = F_{spez} z_{eB} b \quad (3-13)$$

όπου  $z_{eB}$  ο αριθμός ενεργών οδόντων (teeth in mesh) και  $b$  το πλάτος του ιμάντα. Αυτή, είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής και πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή μεταφερόμενη δύναμη  $F_u$ . Η  $F_{zul}$  καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του αθροίσματος μεταφερόμενης δύναμης και της προέντασης ( $F_{max}$ , Εξ. (3-10)) και είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής. Και τα δύο αυτά μεγέθη ( $F_N, F_{zul}$ ) πρέπει να είναι μεγαλύτερα από τις απαιτήσεις της εφαρμογής (βλ. Σχήμα 3-62) [21] [49].

- Μέσω πίνακα δυνατότητας μεταφοράς ισχύος/ροπής/δύναμης (ισοδύναμα μεταξύ τους) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής, του πλάτους του ιμάντα και της διαμέτρου της τροχαλίας. Με αυτό τον τρόπο, ουσιαστικά δίνεται έμμεσα το  $F_{spez}$ , όμως δε δίνεται καμία πληροφορία για το  $F_{zul}$ . Έτσι, κρίνεται πως για να είναι ασφαλής η επιλογή του ιμάντα, η τελευταία πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την  $F_{max}$ , καθώς έτσι συνεπάγεται πως και τα ενισχυτικά μέλη είναι σχεδιασμένα για να αντέχουν τέτοιες καταπονήσεις.

Επιπλέον, δίνεται μεγάλη σημασία στο να διατηρηθεί το μέγεθος του συστήματος μετάδοσης κίνησης (διάμετρος τροχαλίας και πλάτος ιμάντα) όσο το δυνατόν μικρότερο, αφενός για μείωση της μάζας του συστήματος και αφετέρου για ευκολία ενσωμάτωσης στην κατασκευή.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, ως πλέον κατάλληλος ιμάντας χρονισμού κρίνεται ο EV5GT των εταιριών Misumi / Gates Unitta Asia [44] [50], βήματος 5 mm και πλάτους 12 mm, μαζί με τις αντίστοιχες τροχαλίες τύπου GT5 της εταιρείας Misumi [45], διαμέτρου 38.20 mm. Το προφίλ της οδόντωσης του ιμάντα (βλ. Σχήμα 3-63), είναι σχεδιασμένο για ελαχιστοποίηση της χάρης οδόντων, που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές ακριβείας. Ο Πίνακας 3-5 και ο Πίνακας 3-6, περιέχουν συγκεντρωμένα όλα τα χαρακτηριστικά του επιλεγθέντος συστήματος μετάδοσης κίνησης. Οι προδιαγραφές μπορούν να βρεθούν στους σχετικούς καταλόγους των κατασκευαστών [51] [52].



Σχήμα 3-63. Το προφίλ της οδόντωσης (αριστερά) του ιμάντα EV5GT και (δεξιά) της τροχαλίας GT5. Πηγή εικόνας: [52].

**Πίνακας 3-5. Τα χαρακτηριστικά του ιμάντα χρονισμού EV5GT.**

Εταιρεία	Τύπος	Πλάτος [mm]	Μήκος [mm]	Αριθμός Οδόντων	Μάζα [kg]	$F_u$ [N]	$F_{max}$ [N]	$F_N@100$ rpm [N]	$F_{zul}$ [N]
Misumi / Gates Unitta Asia	EV5GT	12	815	163	0.039	575.9	806.3	631.1	$\geq 874$

**Πίνακας 3-6. Τα χαρακτηριστικά της τροχαλίας GT5.**

Εταιρεία	Τύπος	Διάμετρος [mm]	Πλάτος [mm]	Αριθμός Οδόντων	Υλικό	Βάρος [kg]
Misumi	GT5	35.02	12	22	Κράμα Αλουμινίου – Σειρά 2000	0.051

Παρατηρείται πως ο ιμάντας EV5GT, για τον οποίο δεν υπάρχει πληροφορία σχετικά με το  $F_{zul}$ , μπορεί να διαχειριστεί μεταφερόμενη δύναμη της τάξης των 870 N, που είναι υψηλότερη από τα 806 N της εφαρμογής. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για τη μετάδοση ισχύος στο βραχίονα.

### 3.7 Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Ο σχεδιασμός ολοκληρώνεται με την εκτέλεση στατικής ανάλυσης του βραχίονα, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται το λογισμικό SolidWorks Simulation.

Οι αναλύσεις γίνονται για κάθε κύριο συναρμολόγημα, όπως αυτά περιεγράφηκαν στην Ενότητα 3.3, δηλαδή: Σταθερή Βάση, Περιστρεφόμενη Βάση, Πρώτος Σύνδεσμος και Δεύτερος Σύνδεσμος. Οι παρακάτω παραδοχές είναι κοινές για όλες τις αναλύσεις:

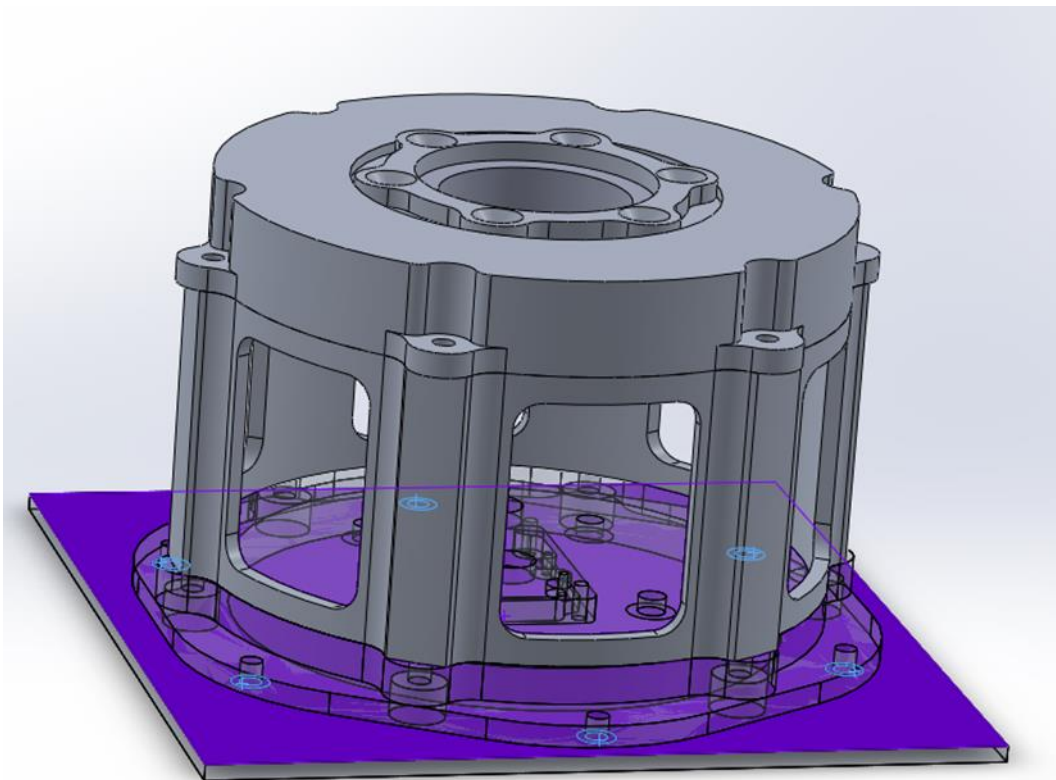
- Για την απόκτηση αποτελεσμάτων αυξημένης ακρίβειας, θεωρείται πως οι συνθήκες επαφής μεταξύ των εξαρτημάτων είναι τύπου μη-εισχώρησης (Global contact: No penetration).
- Δεν συμπεριλαμβάνονται οι κοχλίες στις αναλύσεις, για μείωση του υπολογιστικού φορτίου. Για να αναπαρασταθεί η σύνδεση με κοχλίες, σε όποιους συνδυασμούς εξαρτημάτων είναι παρούσα, θεωρείται πως τα εξαρτήματα είναι ενωμένα (bonded) σε μια κυκλική περιοχή διαμέτρου ίσης με το κεφάλι του κάθε κοχλία, γύρω από την αντίστοιχη οπή. Για να γίνει πιο κατανοητή αυτή η θεώρηση παρατίθεται το Σχήμα 3-64.
- Τα έδρανα κύλισης αντικαθίστανται με δακτυλίους ίσων διαστάσεων, για την μείωση του υπολογιστικού κόστους.

Τέλος, ο Πίνακας 3-7 περιλαμβάνει τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

**Πίνακας 3-7. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.**

Υλικό	Μέτρο	Όριο	Όριο	Λόγος	Πυκνότητα
-------	-------	------	------	-------	-----------

	Ελαστικότητα [GPa]	Διαρροής [MPa]	Θραύσης [MPa]	Poisson	[kg/m <sup>3</sup> ]
Ανοξείδωτος Χάλυβας	200	170	515	0.28	7800
Κράμα Αλουμινίου 7075 – T6	72	505	570	0.33	2810
Ανθρακόνημα (Roll Wrapped) [43]	90	630	750	0.14	1687



**Σχήμα 3-64.** Η αναπαράσταση της κοχλιοσύνδεσης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Με μπλε χρώμα συμβολίζονται οι κυκλικές επιφάνειες γύρω από τις οπές στο κάτω μέρος της βάσης, με διάμετρο ίση με του κεφαλιού των κοχλιών, οι οποίες ορίζονται ως bonded με την πάνω επιφάνεια της πλάκας που αντιπροσωπεύει το έδαφος, συμβολισμένη με μωβ χρώμα.

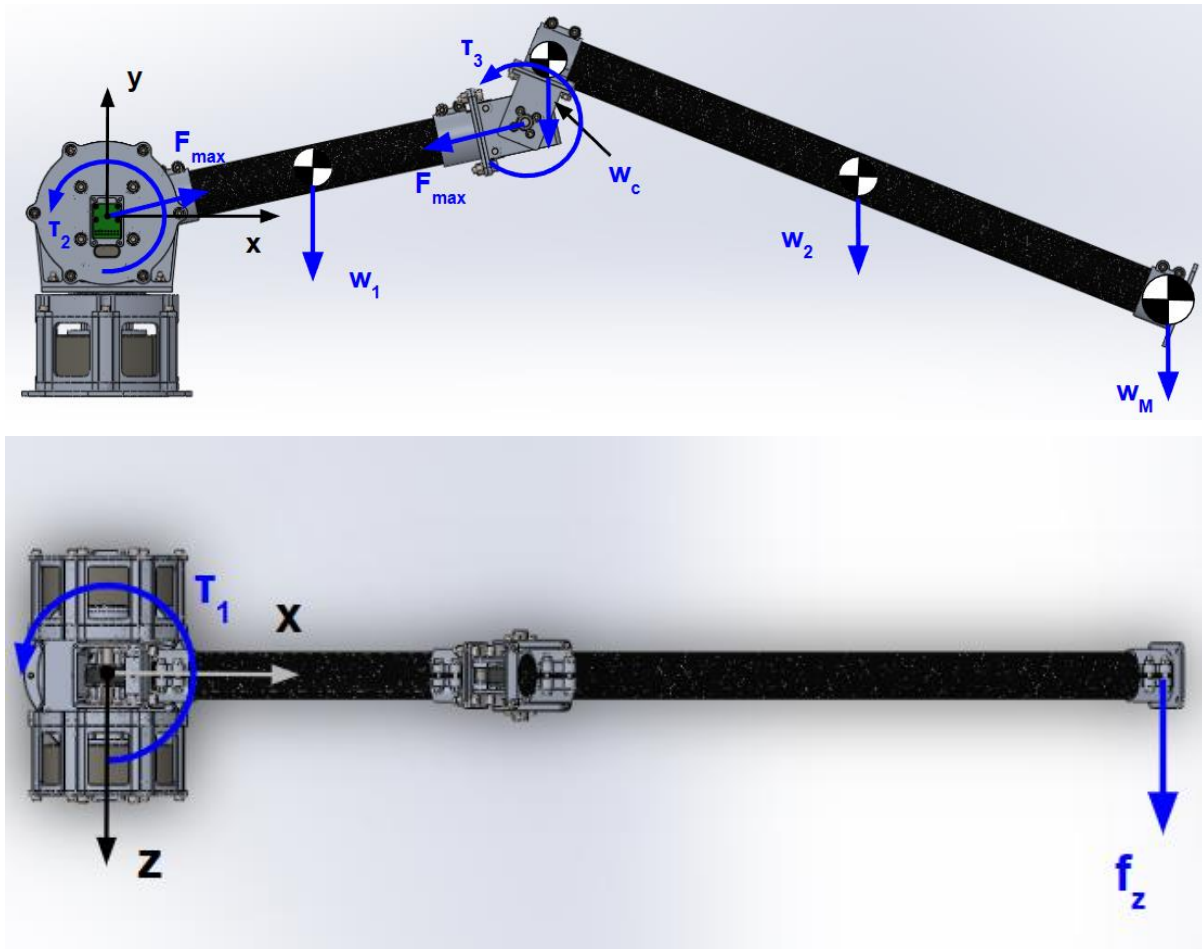
### Συνθήκες Φόρτισης

Όμοια με τον ιμάντα χρονισμού, πρέπει να οριστούν και εδώ οι συνθήκες φόρτισης, οι οποίες προκύπτουν με βάση το δυσμενέστερο σενάριο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει ο βραχίονας.

Συγκεκριμένα, θεωρείται πως μέσω του πρώτου BE ο βραχίονας ασκεί μια οριζόντια δύναμη στο περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα ο δεύτερος και ο τρίτος BE αντισταθμίζουν το βάρος των συνδέσμων και του ωφέλιμου φορτίου στο ΤΣΔ (βλ. Σχήμα 3-65). Ο προσδιορισμός των συνθηκών φόρτισης επιλέγεται να ξεκινήσει από τους δύο τελευταίους βαθμούς ελευθερίας, καθώς αυτοί καθορίζουν τη διαμόρφωση του βραχίονα και άρα την



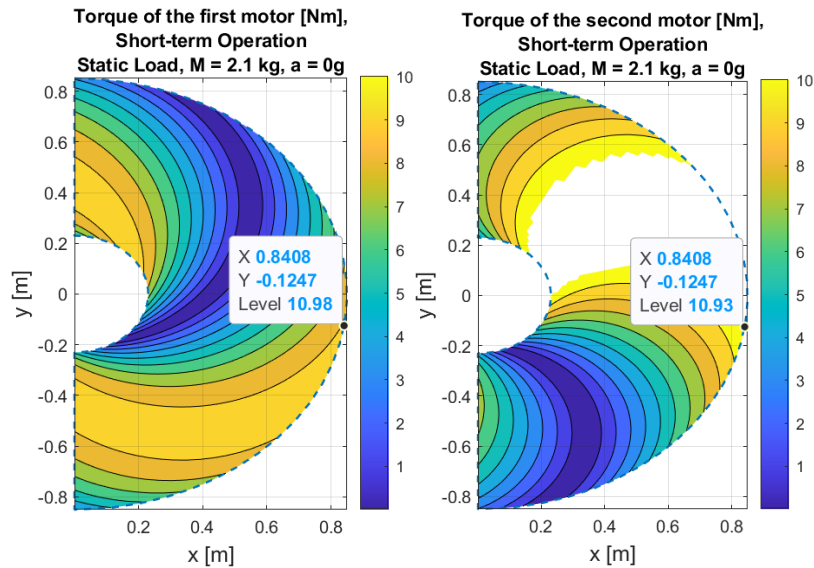
απόσταση του ΤΣΔ από τη βάση, ώστε στη συνέχεια να προκύψει η δύναμη που δημιουργείται από τη ροπή του πρώτου βαθμού ελευθερίας.



**Σχήμα 3-65. Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στην κατασκευή του βραχίονα.**

Αφού οι κινητήρες του δεύτερου και τρίτου ΒΕ στη στατική φόρτιση διαχειρίζονται το βάρος του ωφέλιμου φορτίου, το δυσμενέστερο σενάριο προκύπτει όταν αυτό μεγιστοποιείται. Με βάση την Ενότητα 3.5.1, η μέγιστη τιμή του είναι 2.1 kg, για την οποία προκύπτουν τα διαγράμματα ροπών στο χώρο εργασίας για την κάθε άρθρωση, τα οποία παρατίθενται και εδώ για λόγους πληρότητας (βλ. Σχήμα 3-66). Όπως φαίνεται, οι πιο απαιτητικές συνθήκες φόρτισης παρουσιάζονται όταν ο βραχίονας βρίσκεται σε πλήρη έκταση. Συγκεκριμένα, όταν το ΤΣΔ βρίσκεται στο σημείο (0.8408,-0.1247), απαιτείται η μέγιστη ροπή και των δύο κινητήρων για να διατηρηθεί σταθερό το ωφέλιμο φορτίο και επομένως

$$\tau_2 = \tau_3 = 11Nm \quad (3-14)$$



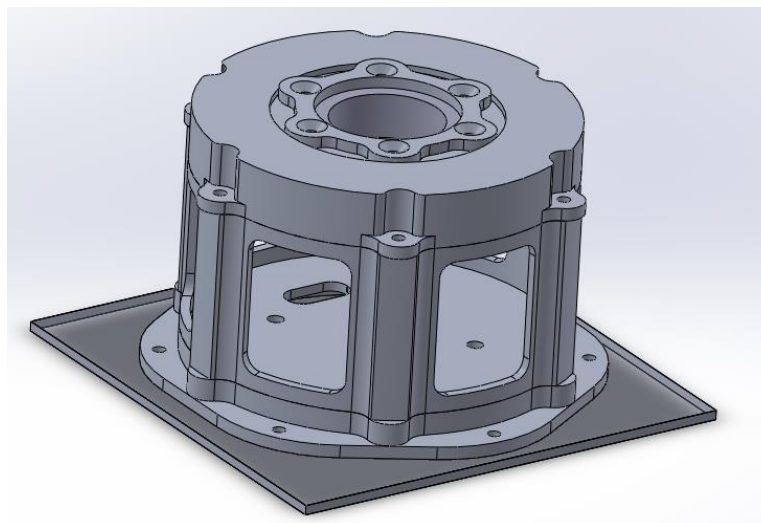
Σχήμα 3-66. Διαγράμματα ροπής (αριστερά) δεύτερου και (δεξιά) τρίτου κινητήρα για το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (2.1 kg) στην περιοχή περιορισμένης λειτουργίας σε στατική φόρτιση. Έχουν σημειωθεί τα σημεία στα οποία μεγιστοποιείται η ροπή των κινητήρων.

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας ως δεδομένο πως ο κινητήρας της πρώτης άρθρωσης ασκεί τη μέγιστη ροπή του, δηλαδή  $\tau_1 = 11 Nm$ , μπορεί να προσδιοριστεί η οριζόντια δύναμη που ασκείται από το βραχίονα στο περιβάλλον ως

$$f_z = \frac{\tau_1}{0.8404} = 13.1 N \quad (3-15)$$

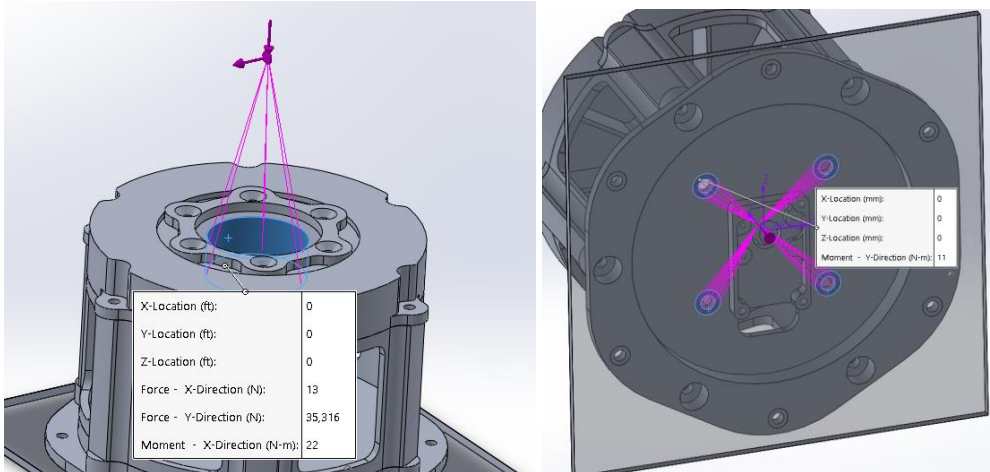
### 3.7.1 Σταθερή Βάση

Η μορφή που λαμβάνει το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία παρατίθεται στο Σχήμα 3-67. Έχουν αφαιρεθεί ο κινητήρας και το κόπλερ, αφού δεν συνεισφέρουν δομικά. Όπως παρατηρείται, έχει προστεθεί ένα σώμα (πλάκα) που αντιπροσωπεύει το σημείο έδρασης ολόκληρου του βραχίονα και έχει οριστεί ως άκαμπτο (rigid) και το κάτω μέρος του είναι πακτωμένο (fixed geometry).



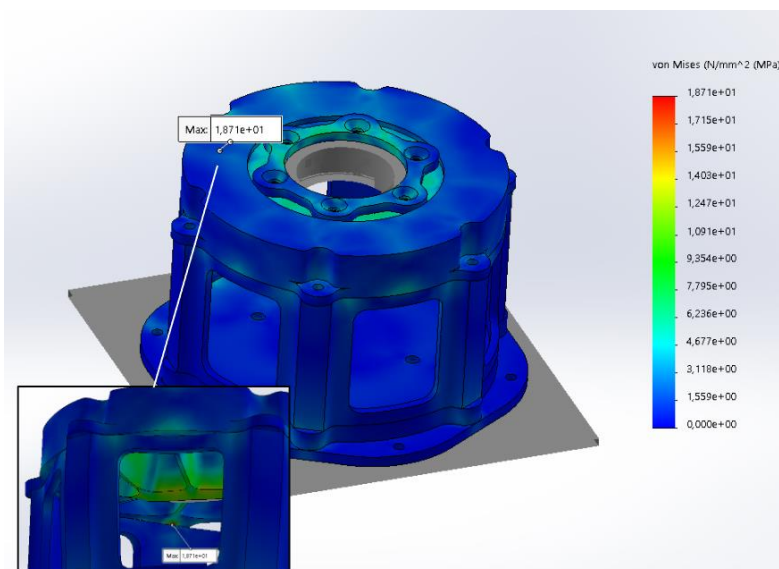
Σχήμα 3-67. Η μορφή που λαμβάνει το συναρμολόγημα της σταθερής βάσης για την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.

Η σταθερή βάση παραλαμβάνει όλα τα φορτία που ασκούνται στο βραχίονα, δηλαδή τις ροπές των κινητήρων, την οριζόντια δύναμη  $f_z$ , καθώς και το βάρος της υπόλοιπης κατασκευής, μαζί με το ωφέλιμο φορτίο. Από αυτά, τα βάρη, το ωφέλιμο φορτίο και οι ροπές των κινητήρων της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης, θεωρείται ότι ασκούνται στο εσωτερικό των εδράνων κύλισης, ενώ η ροπή του πρώτου κινητήρα ασκείται σε επιφάνειες που έχουν δημιουργηθεί γύρω από τις οπές των κοχλιών που τον στηρίζουν, ακολουθώντας τη βασική θεωρία κοχλιοσυνδέσεων, που υπαγορεύει πως όλα τα φορτία των κοχλιών παραλαμβάνονται μέσω της προέντασης (βλ. Σχήμα 3-68).



**Σχήμα 3-68.** Ο τρόπος εφαρμογής των φορτίων στη σταθερή βάση. (Αριστερά) Τα φορτία της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> άρθρωσης, η οριζόντια δύναμη  $f_z$  και το βάρος της υπόλοιπης κατασκευής ασκούνται

Στο Σχήμα 3-69 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες από το όριο διαρροής των υλικών (Πίνακας 3-7), επομένως η σταθερή βάση δεν κινδυνεύει να αστοχήσει. Το σημείο στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι γύρω από μια από τις κοχλιοσυνδέσεις μεταξύ του άνω τμήματος της βάσης και του κελύφους του άξονα, η οποία όμως δεν αποτελεί κίνδυνο για την δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

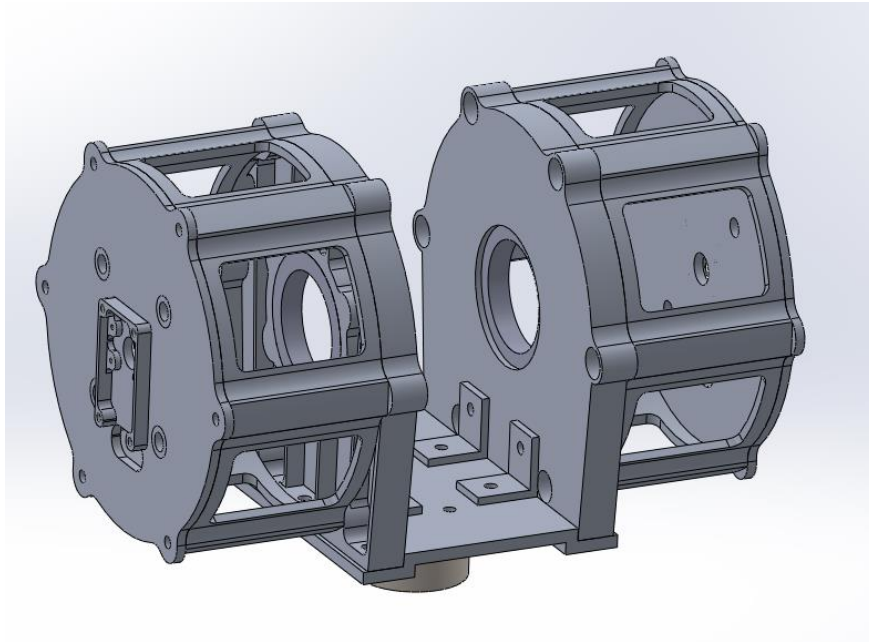


**Σχήμα 3-69.** Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στην σταθερή βάση, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, που

εμφανίζεται γύρω από μια από τις κοχλιοσυνδέσεις μεταξύ του άνω τμήματος της βάσης και του κελύφους του κινητήρα.

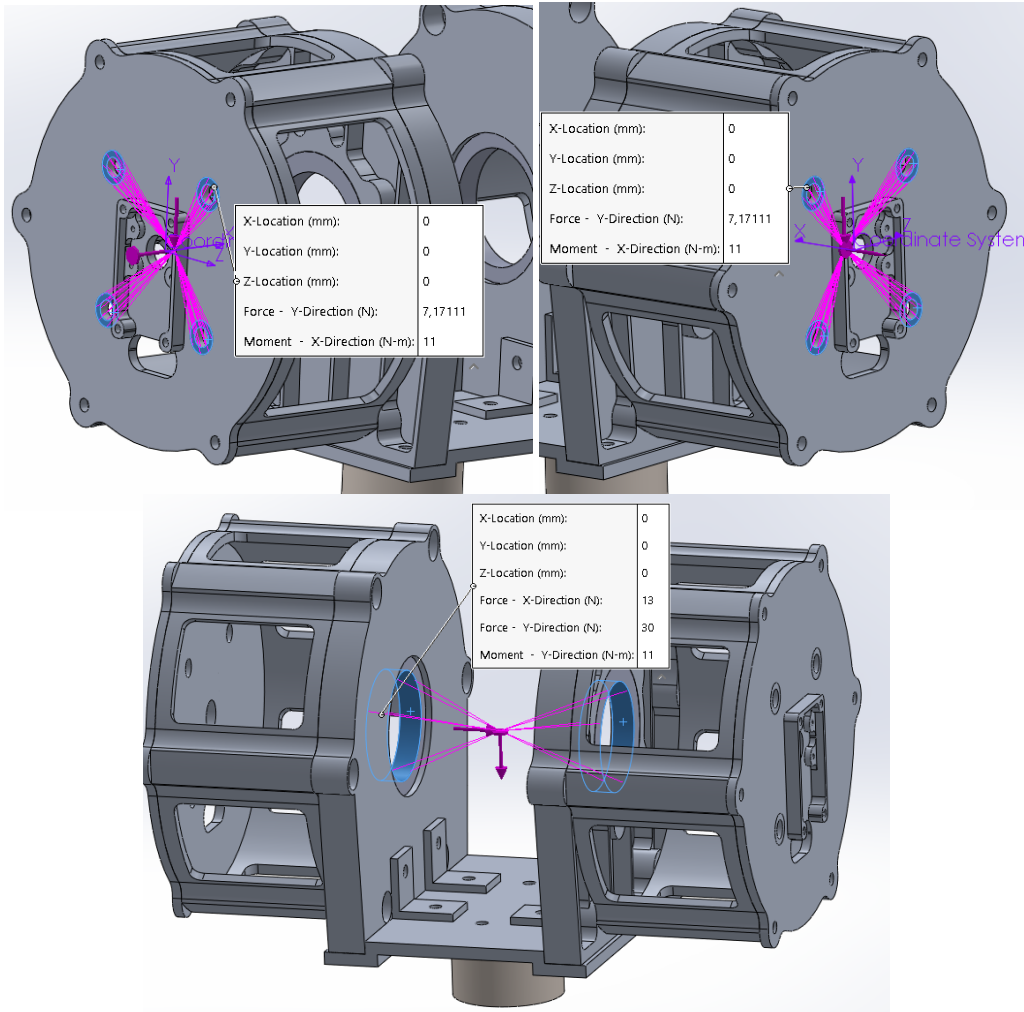
### 3.7.2 Περιστρεφόμενη Βάση

Στο Σχήμα 3-70 παρουσιάζεται η μορφή της περιστρεφόμενης βάσης για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Αντίστοιχα με τη σταθερή βάση, έχουν αφαιρεθεί οι κινητήρες και τα κόπλερ, ενώ τα έδρανα κύλισης έχουν αντικατασταθεί με άκαμπτους δακτυλίους ίδιων διαστάσεων.

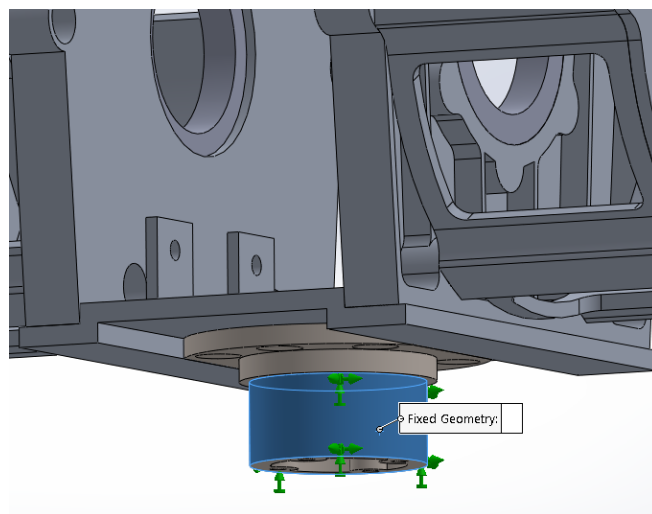


**Σχήμα 3-70.** Η μορφή που λαμβάνει το συναρμολόγημα της περιστρεφόμενης βάσης για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Στην περιστρεφόμενη βάση ασκούνται οι ροπές όλων των κινητήρων, το βάρος των κινητήρων της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης, η οριζόντια δύναμη  $f_z$  και η μάζα των συνδέσμων και του ωφέλιμου φορτίου (βλ. Σχήμα 3-71). Όπως και στη σταθερή βάση, οι ροπή των κινητήρων θεωρείται ότι ασκείται στην επιφάνεια κάτω από τους κοχλίες που το συγκρατούν, όπως και το βάρος τους σε αυτή την περίπτωση. Η ροπή του πρώτου κινητήρα μεταφέρεται στο συναρμολόγημα μέσω του πρώτου συνδέσμου και επομένως ασκείται στο εσωτερικό των εδράνων κύλισης στα οποία εδράζεται. Στο ίδιο σημείο ασκούνται και η οριζόντια δύναμη  $f_z$ , όπως και τα βάρη. Η έδραση του εν λόγω συναρμολογήματος ισοδυναμεί με μια πάκτωση στην εξωτερική πλευρά του χαλύβδινου άξονα (βλ. Σχήμα 3-72).



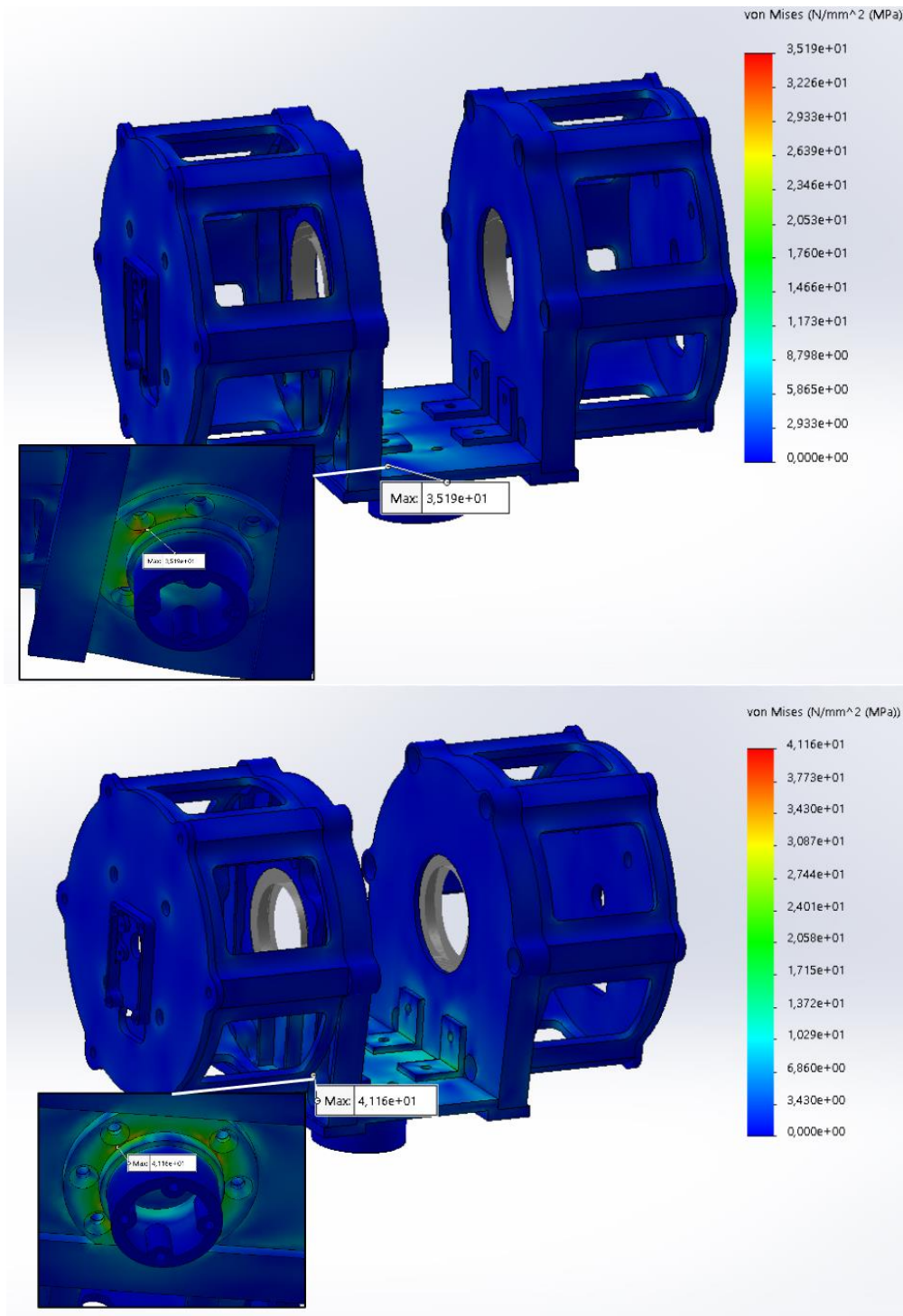
**Σχήμα 3-71.** Ο τρόπος εφαρμογής των φορτίων στην περιστρεφόμενη βάση. Η ροπή και το βάρος των κινητήρων ασκούνται στις επιφάνειες γύρω από τους κοχλίες που τους συγκρατούν, ενώ το βάρος των συνδέσμων, η ροπή του πρώτου κινητήρα και η οριζόντια δύναμη  $f_z$  στο εσωτερικό των εδράνων κύλισης.



**Σχήμα 3-72.** Η πάκτωση στην εξωτερική πλευρά του άξονα της περιστρεφόμενη βάσης, που αντιπροσωπεύει τη στήριξη της στα έδρανα κύλισης της σταθερής βάσης.



Εξετάστηκαν δύο σενάρια, με τις ροπές των κινητήρων να ασκούνται προς την ίδια και την αντίθετη φορά. Στο Σχήμα 3-73 παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Όμοια με τη σταθερή βάση, οι τάσεις που προκύπτουν είναι πολύ χαμηλότερες από το όριο διαρροής των υλικών που χρησιμοποιούνται, επομένως μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια.



**Σχήμα 3-73.** Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στην περιστρεφόμενη βάση, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises, με τις ροπές των κινητήρων της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης να ασκούνται με την (πάνω) ίδια και (κάτω) αντίθετη φορά. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, όπου και στις δύο περιπτώσεις

εμφανίζεται γύρω από μια από τις κοχλιοσυνδέσεις μεταξύ του χαλύβδινου άξονα και της συνδετικής πλάκας.

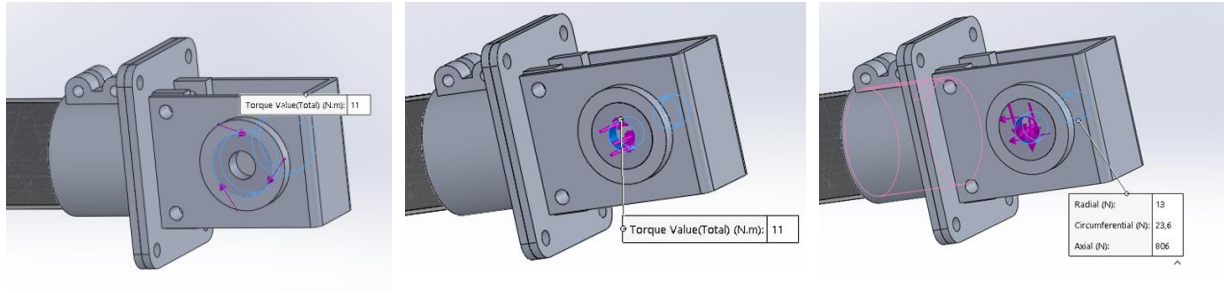
### 3.7.3 Πρώτος Σύνδεσμος

Για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, από το συναρμολόγημα του πρώτου συνδέσμου παραλείπεται το σύστημα μετάδοσης ιμάντα-τροχαλιών-αξόνων-εντατήρων κίνησης, αφού δεν συμβάλει δομικά στο σύστημα. Οι συνθήκες επαφής των τμημάτων σύσφιξης με το σωλήνα ανθρακονήματος είναι η μόνη περίπτωση που τίθενται ως σύζευξη (bonded), σε αντίθεση με τη μη-εισχώρηση των υπόλοιπων εξαρτημάτων, καθώς κρίνεται πως με αυτό τον τρόπο αντιπροσωπεύεται καλύτερα η λειτουργία τους χωρίς να αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος. Τα έδρανα κύλισης κατά τα γνωστά έχουν αντικατασταθεί με άκαμπτους δακτυλίους ίσων διαστάσεων. Η τελική μορφή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-74.

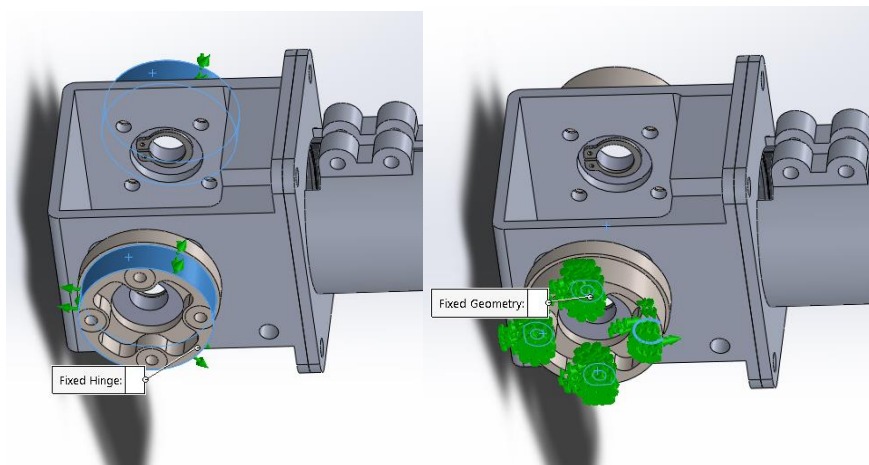


**Σχήμα 3-74.** Η διαμόρφωση του πρώτου συνδέσμου για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Όσον αφορά τις φορτίσεις, τοποθετούνται στο άνω άκρο του βραχίονα, ενώ στο κάτω οι στηρίξεις. Ασκούνται η ροπή του πρώτου και δεύτερου κινητήρα, η οριζόντια δύναμη  $f_z$ , η δύναμη του ιμάντα χρονισμού, το βάρος του δεύτερου συνδέσμου και του ωφέλιμου φορτίου, οι οποίες θεωρείται ότι εφαρμόζονται στα έδρανα κύλισης της άνω τροχαλίας (βλ. Σχήμα 3-75). Για τις στηρίξεις, η έδραση του συνδέσμου στα ρουλεμάν της περιστρεφόμενη βάσης αντιπροσωπεύεται από μια άρθρωση (hinge joint) και η περιστροφή του συνδέσμου περιορίζεται με την τοποθέτηση μιας πάκτωσης στο σημείο που προσδένεται στο σύνδεσμο του δεύτερου κινητήρα. (βλ. Σχήμα 3-76).

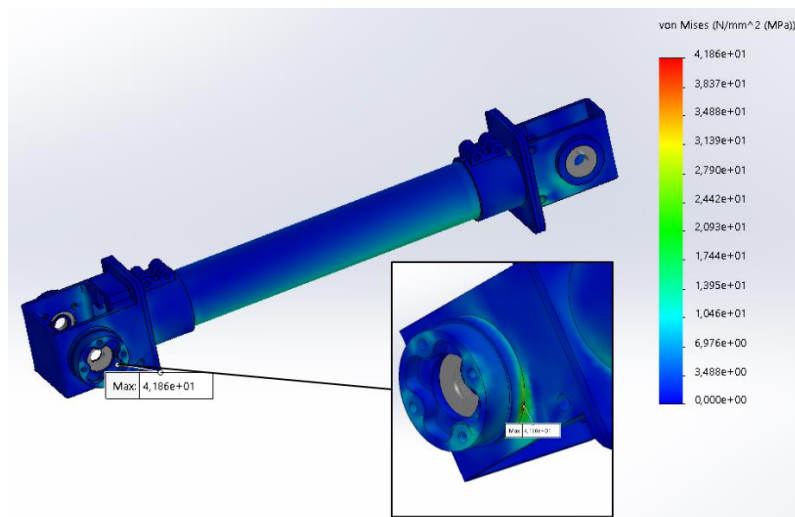


Σχήμα 3-75. Τα φορτία που ασκούνται στον πρώτο σύνδεσμο. Αριστερά φαίνεται η ροπή του δεύτερου κινητήρα, στο κέντρο η ροπή του πρώτου κινητήρα και δεξιά τα βάρη, η δύναμη από τον ιμάντα χρονισμού και η οριζόντια δύναμη  $F_z$ .



Σχήμα 3-76. Οι στηρίξεις του πρώτου συνδέσμου. (Αριστερά) Η έδραση στα ρουλεμάν της περιστρεφόμενης βάσης αντιπροσωπεύεται από μια άρθρωση, ενώ (δεξιά) η ακινητοποίηση λόγω του κινητήρα από μια πάκτωση στο σημείο σύνδεσης.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3-77, οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι αρκετά χαμηλότερες από το όριο διαρροής των υλικών, επομένως ο πρώτος σύνδεσμος δεν κινδυνεύει να αποχθήσει.

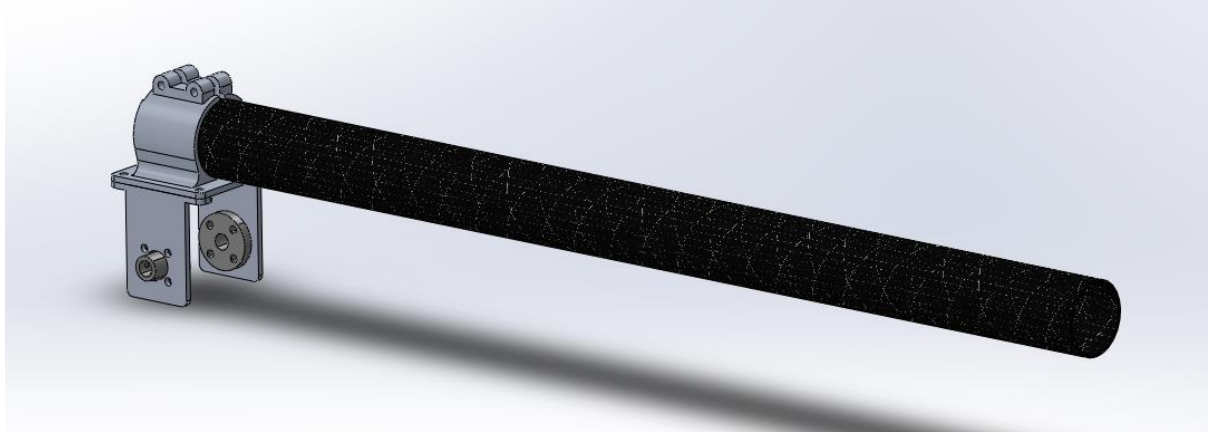


Σχήμα 3-77. Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στον πρώτο σύνδεσμο, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, όπου εμφανίζεται στο σημείο επαφής του άξονα με το κάτω συνδετικό τμήμα.



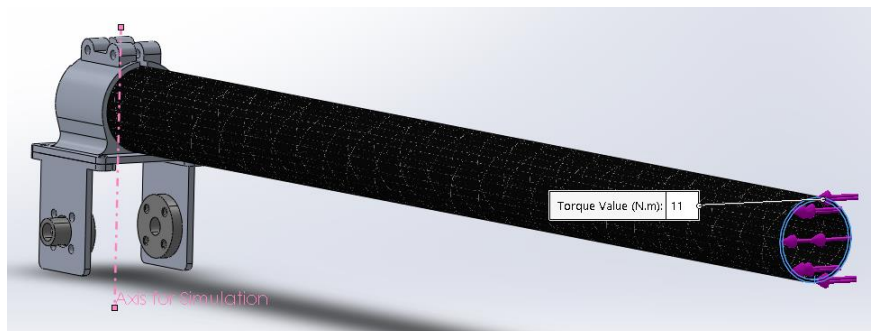
### 3.7.4 Δεύτερος Σύνδεσμος

Το τελευταίο τμήμα προς μελέτη είναι ο δεύτερος σύνδεσμος. Η διαμόρφωσή του για την προσομοίωση φαίνεται στο Σχήμα 3-78. Οι παραδοχές σε σχέση με το τμήμα σύσφιξης ταυτίζονται με αυτές του πρώτου συνδέσμου. Τα φορτία θεωρούνται πως ασκούνται στο ΤΣΔ (ελεύθερο άκρο του συνδέσμου), ενώ οι στηρίξεις στην άρθρωση.

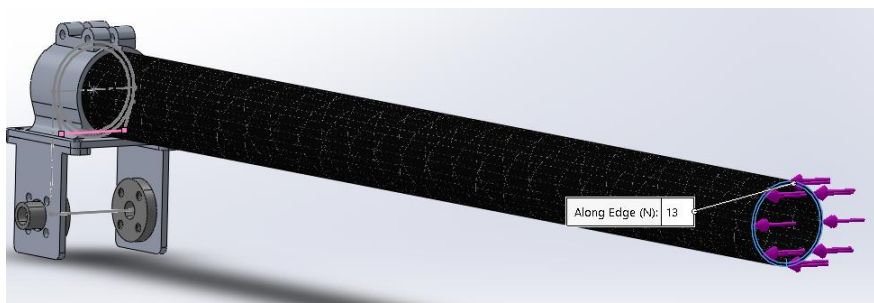


Σχήμα 3-78. Η διαμόρφωση του δεύτερου συνδέσμου για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

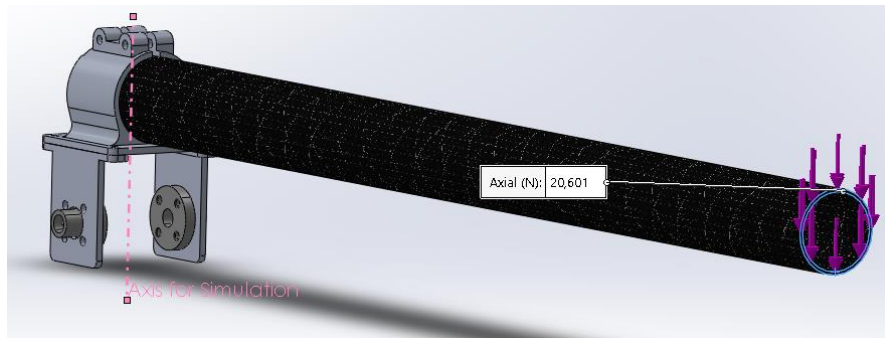
Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο σύνδεσμο ασκούνται οι ροπές του πρώτου και τρίτου κινητήρα, η οριζόντια δύναμη  $f_z$  και το βάρος του ωφέλιμου φορτίου (βλ. Σχήμα 3-79). Η έδραση αντιπροσωπεύεται από μια πάκτωση στο εσωτερικό των υποστηρικτικών αξόνων (βλ. Σχήμα 3-80).



(α)

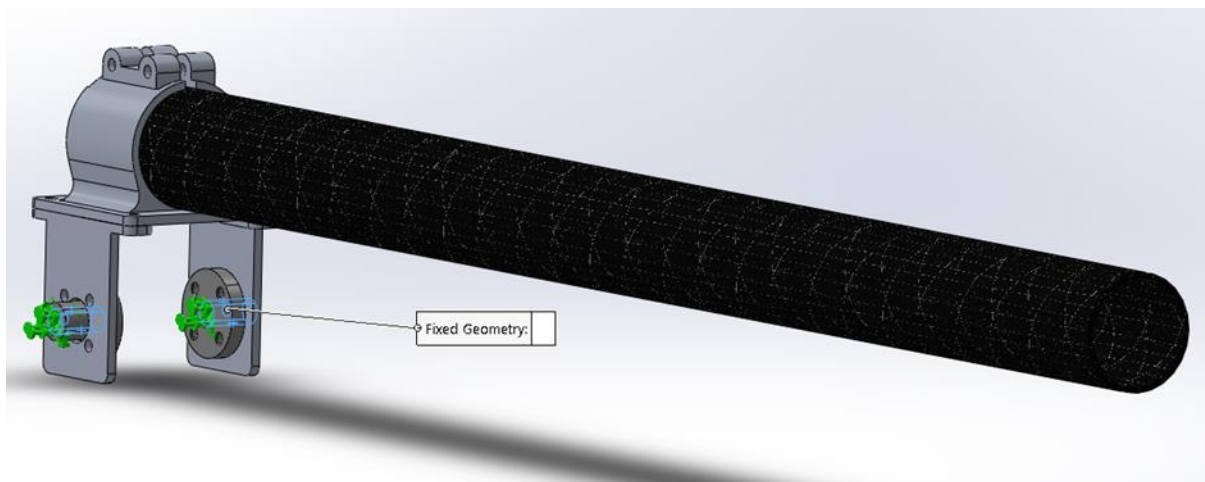


(β)



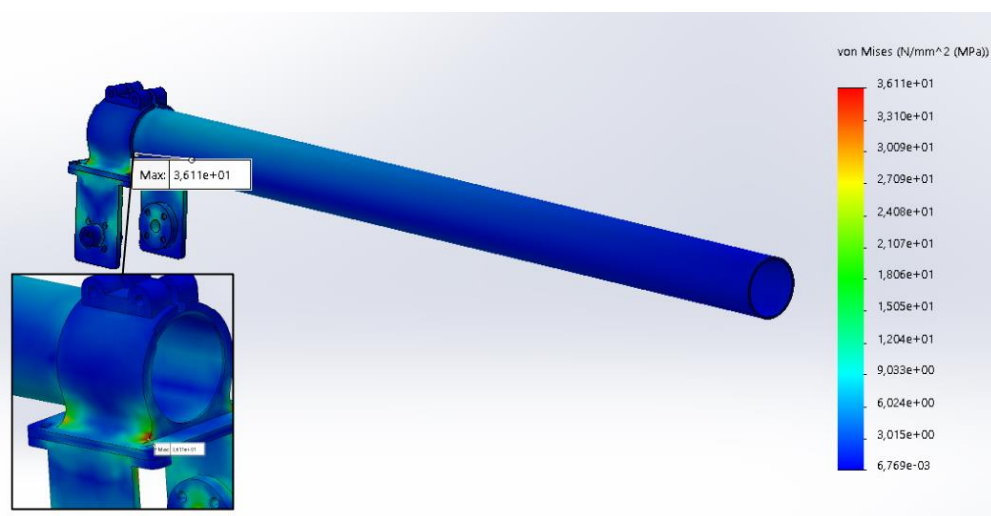
(γ)

Σχήμα 3-79. Η φόρτιση του δεύτερου συνδέσμου από (α) τη ροπή του 1<sup>ου</sup> κινητήρα, (β) τη δύναμη  $f_z$  και (γ) το ωφέλιμο φορτίο.



Σχήμα 3-80. Η έδραση του δεύτερου συνδέσμου μέσω πάκτωσης στο εσωτερικό των shaft-supports.

Από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3-81, φαίνεται πως, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, δεν τίθεται ζήτημα αστοχίας κάποιου εξαρτήματος.



Σχήμα 3-81. Διάγραμμα τάσεων που αναπτύσσονται στον πρώτο σύνδεσμο, σύμφωνα με το κριτήριο von Mises. Κάτω αριστερά φαίνεται η περιοχή μέγιστων τάσεων, όπου εμφανίζεται στη βάση του τμήματος σύσφιξης.

## 4 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζεται η παρούσα εργασία και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν. Επιπλέον, παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική εργασία πάνω στο συγκεκριμένο θέμα.

### 4.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της εργασίας που παρουσιάστηκε, σχεδιάστηκε ένας ενδοτικός βραχίονας τριών βαθμών ελευθερίας χαμηλούς κόστους, προοριζόμενος για βιομηχανικά περιβάλλοντα ο οποίος όμως έχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης και συνεργασίας με ανθρώπους. Στόχος ήταν ο σχεδιασμός ενός συστήματος το οποίο να μπορεί να λειτουργήσει μέσω ελέγχου δύναμης, αντιδρώντας και προσαρμόζοντας έτσι τη συμπεριφορά του σε εξωτερικές διαταραχές, εισάγοντας όμως τον επιπλέον περιορισμό του χαμηλού κόστους, με σκοπό την ενίσχυση της προσπάθειας διάθεσης των εν λόγω ρομποτικών συστημάτων στο ευρύ κοινό.

Αρχικά, μετά από μια σύντομη παρουσίαση των ήδη υπαρχόντων ρομποτικών βραχιόνων που ικανοποιούν κάποιους ή όλους τους περιορισμούς του προβλήματος, ορίστηκαν με σαφήνεια οι σχεδιαστικές απαιτήσεις του συστήματος. Στη συνέχεια, κατηγοριοποιώντας το βραχίονα σε κύρια υποσυστήματα (σύστημα επενέργειας, μηχανική δομή, σύστημα μετάδοσης κίνησης), αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν οι κυρίαρχες λύσεις που ικανοποιούν τις απαιτήσεις που τέθηκαν, για το καθένα ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα συστήματα επενέργειας και συγκρίθηκαν οι εναλλακτικές σε θέματα χαμηλής μηχανικής εμπέδησης, εύρους ζώνης, πυκνότητας ροπής και κόστους και εξήχθη το συμπέρασμα πως η μέθοδος επενέργειας άμεσης μετάδοσης ικανοποιεί στο μεγαλύτερο βαθμό όλες τις απαιτήσεις. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η μηχανική δομή του βραχίονα και η τοποθέτηση των επενεργητών σε σχέση με τις αρθρώσεις. Επιλέχθηκε η ανθρωπομορφική δομή λόγω του αυξημένου χώρου εργασίας και της μηχανικής αξιοπιστίας της. Όσον αφορά την τοποθέτηση των κινητήρων, συγκρίθηκαν η σειριακή και η παράλληλη διάταξη. Στα πλαίσια αυτής της σύγκρισης, αναπτύχθηκαν τα μοντέλα (κινηματικές και δυναμικές (μέθοδος Euler-Lagrange) εξισώσεις) των δύο περιπτώσεων και στη συνέχεια αντιπαραβάλλοντας τις ικανότητες των δύο βραχιόνων ως προς το ωφέλιμο φορτίο για διάφορα ονομαστικά σενάρια λειτουργίας (στατική φόρτιση, ευθύγραμμη οριζόντια και κατακόρυφη τροχιά ΤΣΔ, κυκλική τροχιά ΤΣΔ), ο παράλληλος μηχανισμός αξιολογήθηκε ως ο καταλληλότερος για την εφαρμογή. Επιπλέον, καθώς η παράλληλη διάταξη συνεπάγεται την τοποθέτηση του κινητήρα του αγκώνα απομακρυσμένα από την άρθρωση, ήταν επιτακτική η υιοθέτηση ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης. Ως κατάλληλη επιλογή κρίθηκε ο ιμάντας χρονισμού, λόγω των καλών επιδόσεων του σε εφαρμογές ακριβείας, υψηλού βαθμού απόδοσης και απλής διαδικασίας εγκατάστασης.

Στη συνέχεια, ακολούθησε ο σχεδιασμός του ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος υπάκουε στις σχεδιαστικές αποφάσεις που λήφθηκαν. Αρχικά, επιλέχθηκε ο BLDC κινητήρας T-Motor R100 KV90, λόγω της πολύ υψηλής πυκνότητας ροπής του και του χαμηλού κόστους του, σε συνδυασμό με το σύστημα οδήγησης ODrive v3.6, το οποίο μπορεί να διαχειριστεί τα πολύ υψηλά ρεύματα που πρόκειται να αναπτυχθούν. Το τρισδιάστατο σχέδιο υλοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks. Για την πλειοψηφία των εξαρτημάτων της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν υλικά υψηλής ειδικής αντοχής και συγκεκριμένα κράμα αλουμινίου 7075-t6 και ανθρακόνημα, με εξαίρεση τα σημεία στα οποία υπήρχε συναρμογή

με έδρανο κύλισης για τα οποία χρησιμοποιήθηκε ανοξειδωτος χάλυβας για μείωση της φθοράς. Δόθηκε βάση στην ελαχιστοποίηση της αιωρούμενης μάζας καθώς όπως αποδείχθηκε ήταν κρίσιμη για το εύρος ελέγχου δύναμης του συστήματος και άρα για την ενδοτικότητα. Επίσης, σχεδιάστηκε σύστημα τάνυσης για τον ιμάντα χρονισμού ώστε αυτός να διέρχεται από το εσωτερικό του πρώτο συνδέσμου, μειώνοντας τον όγκο της κατασκευής. Η επιλογή των τελικών τιμών των γεωμετρικών παραμέτρων (μήκη συνδέσμων) έγινε μέσω παραμετρικής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, εξήχθη το μοντέλο (κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις) του βραχίονα και μέσω προγράμματος που αναπτύχθηκε στο MATLAB υπολογίστηκε το ωφέλιμο φορτίο και η επιφάνεια του χώρου εργασίας για διάφορους συνδυασμούς μηκών. Επιλέχθηκε ο συνδυασμός που ικανοποιούσε ταυτόχρονα τις απαιτήσεις του χώρου εργασίας και ωφέλιμου φορτίου. Στη συνέχεια, εκτιμήθηκαν οι επιδόσεις του βραχίονα σε θέματα ωφέλιμου φορτίου, ανάπτυξης γραμμικής ταχύτητας και επιτάχυνσης ΤΣΔ καθώς και το συνολικό κόστος του συστήματος. Προέκυψε πως το τελικό σύστημα έχει βάρος 4.9 kg, ονομαστικό και μέγιστο ωφέλιμο φορτίο 0.61 kg και 2.1 kg αντίστοιχα, ενώ μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα έως και 11 m/s. Ο λόγος ωφέλιμου φορτίου προς βάρος προκύπτει 0.12 και 0.42 για συνθήκες ονομαστικής και περιορισμένης λειτουργίας αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι συγκρίσιμες με τους ήδη υπάρχοντες βραχίονες του εμπορίου. Επιπλέον, το κόστος ανέρχεται στα 2000€. Έτσι, το σύστημα που σχεδιάστηκε ικανοποιούσε ταυτόχρονα τους περιορισμούς για ενδοτικότητα (έλεγχος δύναμης), ικανό ωφέλιμο φορτίο και χαμηλό κόστος. Τέλος, εκτελέστηκε στατική ανάλυση στο λογισμικό SolidWorks Simulation με βάση τα δυσμενέστερα σενάρια λειτουργίας, μέσω της οποίας επιβεβαιώθηκε πως ο βραχίονας θα μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια.

## 4.2 Μελλοντική Εργασία

Στα πλαίσια βελτίωσης και επέκτασης της παρούσας εργασίας προτείνονται τα εξής:

- Προσθήκη μείωσης στο σύστημα για αύξηση του ωφέλιμου φορτίου. Χρειάζεται εκτενής μελέτη καθώς όπως έγινε κατανοητό, είναι δυνατή η διατήρηση της ιδιοδεκτικότητας ακόμα και με την προσθήκη μείωσης, αλλά είναι περίπλοκο πρόβλημα με την ταυτόχρονη διατήρηση χαμηλού κόστους.
- Σχεδιασμός καρπού – τριών επιπλέον βαθμών ελευθερίας.
- Ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου του βραχίονα. Προτείνεται το open-source περιβάλλον Gazebo σε συνδυασμό με το ROS, ή το Simulink του MATLAB.
- Κατασκευή του βραχίονα. Καθώς είναι διαθέσιμο το σχέδιο και τα εξαρτήματα, είναι εφικτή η κατασκευή του συστήματος για την διεξαγωγή πειραμάτων για:
  - Επιβεβαίωση υπολογισμένων προδιαγραφών / επιδόσεων.
  - Ακρίβεια / Επαναληψιμότητα.
  - Σχήματα ελέγχου βασισμένα σε έλεγχο θέσης και παρακολούθηση τροχιάς.
  - Σχήματα ελέγχου βασισμένα σε έλεγχο δύναμης, όπως έλεγχος εμπέδησης (impedance control).

## 5 Βιβλιογραφία

- [1] “UR5e,” *Clearpath Robotics*. <https://store.clearpathrobotics.com/products/ur5e> (accessed Apr. 06, 2023).
- [2] “KUKA LBR iiwa 14 R820,” *Man + Machines*. <https://manplushmachines.com/cobot-comparison/kuka-lbr-iiwa-14-r820/> (accessed Jul. 04, 2023).
- [3] “Cobots,” *Unchained Robotics*. <https://unchainedrobotics.de/category/robot/cobot> (accessed Apr. 12, 2023).
- [4] D. V. Gealy *et al.*, “Quasi-Direct Drive for Low-Cost Compliant Robotic Manipulation,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, May 2019, pp. 437–443. doi: 10.1109/ICRA.2019.8794236.
- [5] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, Ch. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck, and G. Hirzinger, “The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 376–385, Aug. 2007, doi: 10.1108/01439910710774386.
- [6] M. Quigley, A. Asbeck, and A. Ng, “A low-cost compliant 7-DOF robotic manipulator,” in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China: IEEE, May 2011, pp. 6051–6058. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980332.
- [7] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics*. in *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. London: Springer London, 2009. doi: 10.1007/978-1-84628-642-1.
- [8] S. Kalouche, “GOAT: A legged robot with 3D agility and virtual compliance,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC: IEEE, Sep. 2017, pp. 4110–4117. doi: 10.1109/IROS.2017.8206269.
- [9] S. D. Eppinger and W. P. Seering, “Three Dynamic Problems in Robot Force Control,” p. 8.
- [10] “WAMDataSheet\_02.2011.pdf.”
- [11] K. Gen, “> ROS, MATLAB® and Simulink® packages > Closed-loop , low-level control at 1kHz > Advanced programming in C++ and Python environments > Gazebo and MoveIt simulation environments > Intuitive web app connects from any desktop or mobile device”.
- [12] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell, “Design of HyQ – a hydraulically and electrically actuated quadruped robot,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 225, no. 6, pp. 831–849, Sep. 2011, doi: 10.1177/0959651811402275.
- [13] W. T. (William T. Townsend, “The effect of transmission design on force-controlled manipulator performance,” Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1988. Accessed: May 28, 2022. [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/14366>
- [14] H. Asada and K. Youcef-Toumi, *Direct-drive robots: theory and practice*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1987.
- [15] B. Katz, J. D. Carlo, and S. Kim, “Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, May 2019, pp. 6295–6301. doi: 10.1109/ICRA.2019.8793865.
- [16] S. Seok, A. Wang, D. Otten, and S. Kim, “Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, Oct. 2012, pp. 1970–1975. doi: 10.1109/IROS.2012.6386252.
- [17] H. Asada and T. Kanade, “Design of Direct-Drive Mechanical Arms,” *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 105, no. 3, pp. 312–316, Jul. 1983, doi: 10.1115/1.3269106.
- [18] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing, and S. Kim, “MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid: IEEE, Oct. 2018, pp. 2245–2252. doi: 10.1109/IROS.2018.8593885.
- [19] “spot-arm.pdf.” Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/inline-files/spot-arm.pdf>
- [20] “DC-EC-Key-Information-14-EN-42-50.pdf.” Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/root/8815460712478/DC-EC-Key-Information-14-EN-42-50.pdf?attachment=true](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8815460712478/DC-EC-Key-Information-14-EN-42-50.pdf?attachment=true)
- [21] R. Perneder and I. Osborne, *Handbook Timing Belts*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-17755-2.

- [22] S. cubillos Ramirez, “Wire Rope User s Manual AISI”, Accessed: Jul. 04, 2023. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/25550714/Wire\\_Rope\\_User\\_s\\_Manual\\_AISI](https://www.academia.edu/25550714/Wire_Rope_User_s_Manual_AISI)
- [23] J. K. Salisbury, *Compact Cable Transmission with Cable Differential*. 1993.
- [24] J. W. Sensinger, S. D. Clark, and J. F. Schorsch, “Exterior vs. interior rotors in robotic brushless motors,” in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China: IEEE, May 2011, pp. 2764–2770. doi: 10.1109/ICRA.2011.5979940.
- [25] S. Seok, A. Wang, D. Otten, and S. Kim, “Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, Oct. 2012, pp. 1970–1975. doi: 10.1109/IROS.2012.6386252.
- [26] “Iflight Ipower Ex-8 Ex8108 105kv 6-12s Brushless Motor Multirotor Motor High Efficiency For Mit Mini Cheetah Robot Dog Backflips - Parts & Accs - AliExpress.” <https://www.aliexpress.com/i/32982236672.html> (accessed Apr. 11, 2023).
- [27] “iPower GBM110-150T Brushless Gimbal Motor,” *Aerialpixels*. <https://aerialpixels.com/shop/motors/brushless-gimbal-motors/iflight-rc-ipower-brushless-gimbal-motors/ipower-gbm110-150t-brushless-gimbal-motor/> (accessed Apr. 11, 2023).
- [28] “R100 KV90\_R Series Outrunning Torque Motor\_Robot Dynamics\_T-MOTOR Store-Official Store for T-motor drone motor,ESC,Propeller.” <https://store.tmotor.com/goods.php?id=945> (accessed May 05, 2022).
- [29] “TQ-RoboDrive | ILM-E85x26,” *TQ*. <https://www.tq-group.com/en/products/tq-robodrive/servo-kits/ilm-e85x26/> (accessed Apr. 11, 2023).
- [30] T. Elery, S. Rezazadeh, C. Nesler, and R. D. Gregg, “Design and Validation of a Powered Knee–Ankle Prosthesis With High-Torque, Low-Impedance Actuators,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 36, no. 6, pp. 1649–1668, Dec. 2020, doi: 10.1109/TRO.2020.3005533.
- [31] “U10 KV80\_U Efficiency Type\_U Type\_Motors\_Multirotor\_T-MOTOR Store-Official Store for T-motor drone motor,ESC,Propeller.” <https://store.tmotor.com/goods.php?id=360> (accessed Apr. 11, 2023).
- [32] “Bldc Control Driver | Cheetah Controller | Odrive Controller | Bldc Controller - Mini - Aliexpress.” <https://www.aliexpress.com/item/1005001809102045.html?gatewayAdapt=glo2ita> (accessed Apr. 12, 2023).
- [33] “moteus r4.11 controller – mjbots Robotic Systems.” <https://mjbots.com/products/moteus-r4-11> (accessed Apr. 12, 2023).
- [34] “ODrive,” *ODrive*. <https://odriverobotics.com> (accessed Apr. 12, 2023).
- [35] “ODrive v3.6,” *ODrive Europe*. <https://eu.odriverobotics.com/shop/odrive-v36> (accessed May 16, 2022).
- [36] *Best BLDC Controller: ODrive vs MIT Mini Cheetah vs Moteus (MJBots)*, (2021). Accessed: Apr. 12, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Wb1gsJ4K4pM>
- [37] “ODrive MOSFET temperature rise measurements using the onboard thermistor - General,” *ODrive Community*, Aug. 11, 2018. <https://discourse.odriverobotics.com/t/odrive-mosfet-temperature-rise-measurements-using-the-onboard-thermistor/972> (accessed May 05, 2022).
- [38] “Getting Started — ODrive Documentation 0.0 documentation.” <https://docs.odriverobotics.com/v/latest/getting-started.html> (accessed May 20, 2022).
- [39] “AS5047P-TS\_EK\_AB.pdf.” Accessed: May 17, 2022. [Online]. Available: [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Austriamicrosystems%20PDFs/AS5047P-TS\\_EK\\_AB.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Austriamicrosystems%20PDFs/AS5047P-TS_EK_AB.pdf)
- [40] “AS5047P-TS\_EK\_AB,” *Digi-Key Electronics*. <https://www.digikey.com/en/products/detail/ams-osram/AS5047P-TS-EK-AB/5452344> (accessed Mar. 23, 2023).
- [41] “Rolling Bearings | SKF.” Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: [https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000\\_1-EN\\_tcm\\_12-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000_1-EN_tcm_12-121486.pdf)
- [42] “Shaft Supports - Flanged Mount, Through or Tapped Mounting Holes | MISUMI | MISUMI.” [https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110300010440/?list=PageCategory&curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110300010440%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a%2260%22%7d&Tab=wysiwyg\\_area\\_0](https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110300010440/?list=PageCategory&curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110300010440%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a%2260%22%7d&Tab=wysiwyg_area_0) (accessed Mar. 26, 2023).
- [43] “Carbon Fibre Tubes - Easy Composites.” <https://www.easycposites.co.uk/carbon-fibre-tube> (accessed Apr. 07, 2023).

- [44] “Drawing/Specifications | EV5GT Timing Belt - Super High Torque | MISUMI | MISUMI.” [https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110302652240/?curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110302652240%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a60%2c%2200000029789%22%3a%22nvd00000000000005%22%2c%2200000010880%22%3a%22mig0000000606065%22%2c%22jp000006702%22%3a%22mig0000000317340%22%2c%22typeCode%22%3a%22GBN%23%23%23EV5GT%22%2c%22cadType%22%3a%22%22%2c%22fixedInfo%22%3a%22innerCode%3aMDM00002004577%7c12%22%7d&Tab=wysiwyg\\_area\\_0](https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110302652240/?curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110302652240%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a60%2c%2200000029789%22%3a%22nvd00000000000005%22%2c%2200000010880%22%3a%22mig0000000606065%22%2c%22jp000006702%22%3a%22mig0000000317340%22%2c%22typeCode%22%3a%22GBN%23%23%23EV5GT%22%2c%22cadType%22%3a%22%22%2c%22fixedInfo%22%3a%22innerCode%3aMDM00002004577%7c12%22%7d&Tab=wysiwyg_area_0) (accessed Sep. 24, 2022).
- [45] “GT5 Timing Belt Pulley - High Torque | MISUMI | MISUMI.” <https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110302193650/?curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110302193650%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a60%2c%2200000029798%22%3a%22nvd00000000000002%22%2c%2200000029802%22%3a%22mig00000001419589%22%2c%2200000029803%22%3a%22a%22%2c%2200000029800%22%3a%2200000029800.b!00029%22%2c%2200000029801%22%3a%22c%22%2c%2200000331156%22%3a%2210%22%2c%22fixedInfo%22%3a%22MDM00002004905110302193650-1441527301-1255582820834473477%7c63%22%7d&Tab=preview> (accessed Sep. 24, 2022).
- [46] “Motor shafts / stepped on one side / machining selectable from MISUMI | MISUMI.” <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/11030098730/?CategorySpec=00000431092%3a%3ab> (accessed Apr. 07, 2023).
- [47] “Motor shafts / two-sided offset / machining selectable from MISUMI | MISUMI.” <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110300098820/> (accessed Apr. 07, 2023).
- [48] Ι. Βάλβης, “Θερμική μελέτη, σχεδιαμός και κατασκευή συστήματος ηλεκτρικού κινητήρα και ενσωματωμένου πλανητικού μειωτήρα για επενέργεια των αρθρώσεων ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας,” Dec. 2020, doi: 10.26240/heal.ntua.20248.
- [49] “The Two Types of Timing Belt Strength.” <https://www.brecoflex.com/blog/the-two-types-of-timing-belt-strength> (accessed Dec. 28, 2022).
- [50] “パワーグリップ® EV ベルト | GATES UNITTA ASIA | ゲイツ・ユニッタ・アジア株式会社,” *GATES UNITTA ASIA | ゲイツ・ユニッタ・アジア株式会社 | Just another WordPress site*, Jun. 28, 2016. <https://www.unitta.co.jp/products/industry/power/ev> (accessed Apr. 02, 2023).
- [51] “Misumi - Selection of Timing Belts.” Accessed: Sep. 07, 2022. [Online]. Available: <https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2010/p3515-3536.pdf>
- [52] “Gates Unitta Asia Timing Belt Catalogue (Japanese).” Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: [https://www.unitta.co.jp/data/support/pdf/dendo\\_cat\\_b02\\_2022/dendo\\_cat\\_b02\\_15\\_014\\_087.pdf](https://www.unitta.co.jp/data/support/pdf/dendo_cat_b02_2022/dendo_cat_b02_15_014_087.pdf)