

1. Εισαγωγή και στόχος μηχανολογικού σχεδιασμού

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη, τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός αρθρωτού ρομποτικού βραχίονα έξι βαθμών ελευθερίας (6-DOF), με έμφαση στον μηχανολογικό σχεδιασμό και στη μηχανική του συμπεριφορά υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Ο ρομποτικός βραχίονας προορίζεται για εφαρμογές γενικής χρήσης, όπως χειρισμό αντικειμένων και πειραματική έρευνα, με στόχο την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας, μηχανικής ακαμψίας και λειτουργικής ευελιξίας, διατηρώντας ταυτόχρονα χαμηλό κόστος κατασκευής.

Βασική σχεδιαστική απαίτηση του συστήματος αποτελεί η δυνατότητα χειρισμού ωφέλιμου φορτίου (payload) έως **2 kg** στο άκρο του βραχίονα, σε πλήρη χωρική κίνηση. Η απαίτηση αυτή επηρεάζει άμεσα τον μηχανολογικό σχεδιασμό, καθώς καθορίζει τα αναπτυσσόμενα φορτία και ροπές στους συνδέσμους και στις αρθρώσεις του μηχανισμού, καθώς και τις απαιτήσεις αντοχής και ακαμψίας των επιμέρους δομικών στοιχείων.

Η φιλοσοφία σχεδίασης του ρομποτικού βραχίονα βασίζεται στις αρχές της **αρθρωτής (modular) μηχανικής αρχιτεκτονικής** και της **κατασκευής μέσω προσθετικών μεθόδων (3D printing)**. Κάθε βασικό δομικό τμήμα του βραχίονα σχεδιάζεται ως ανεξάρτητο μηχανικό module, το οποίο περιλαμβάνει το φέρον σώμα, τα στοιχεία έδρασης, τα σημεία σύνδεσης με τους γειτονικούς συνδέσμους και τη μηχανική διεπαφή με το σύστημα κίνησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ευκολότερη επανασχεδίαση, αντικατάσταση ή βελτιστοποίηση επιμέρους τμημάτων χωρίς την ανάγκη ανακατασκευής του συνόλου του μηχανισμού.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση υλικών κατάλληλων για τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως πολυμερή θερμοπλαστικά (π.χ. PLA+, ABS και ενισχυμένα σύνθετα υλικά), τα οποία επιλέγονται με βάση τις μηχανικές απαιτήσεις κάθε εξαρτήματος. Η επιλογή των υλικών δεν γίνεται ενιαία για όλα τα μέρη, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με το επίπεδο καταπόνησης, τη γεωμετρία και τον λειτουργικό ρόλο κάθε συνδέσμου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής αντοχής, βάρους και ευκολίας κατασκευής.

Ο μηχανολογικός σχεδιασμός του ρομποτικού βραχίονα δεν περιορίζεται στη γεωμετρική διαμόρφωση των επιμέρους εξαρτημάτων, αλλά ενσωματώνει στοιχεία μηχανικής ανάλυσης και βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη οι αναπτυσσόμενες

ροπές στις αρθρώσεις, τα σενάρια μέγιστης φόρτισης (worst-case loading conditions), καθώς και η κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων. Στο πλαίσιο αυτό, αξιοποιούνται τεχνικές γενετικού σχεδιασμού (generative design), οι οποίες επιτρέπουν την παραγωγή ελαφριών αλλά μηχανικά αποδοτικών γεωμετριών, προσαρμοσμένων στις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και στους κατασκευαστικούς περιορισμούς.

Η μηχανολογική μελέτη του βραχίονα αποτελεί θεμελιώδη συνιστώσα του συνολικού συστήματος και επηρεάζει άμεσα τόσο τον ηλεκτρολογικό όσο και τον λογισμικό σχεδιασμό. Η ακαμψία της δομής, η ακρίβεια των αρθρώσεων και η μηχανική συμπεριφορά υπό δυναμική φόρτιση καθορίζουν τις απαιτήσεις του συστήματος ελέγχου, την επιλογή των ενεργοποιητών και την επίδοση των αλγορίθμων κίνησης. Κατά συνέπεια, ο μηχανολογικός σχεδιασμός αντιμετωπίζεται ως η βάση πάνω στην οποία δομούνται όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα του ρομποτικού βραχίονα.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μηχανολογική ανάπτυξη του ρομποτικού βραχίονα, ξεκινώντας από την αρχιτεκτονική των βαθμών ελευθερίας και την αρθρωτή δομή του συστήματος, συνεχίζοντας με τη διαδικασία σχεδίασης των μηχανικών μερών, την επιλογή υλικών και τη μελέτη των συστημάτων μετάδοσης κίνησης, και καταλήγοντας στην ανάλυση φορτίων, την αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής και την κατασκευαστική διαδικασία μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2. Αρχιτεκτονική ρομποτικού βραχίονα

2.1 Διάταξη βαθμών ελευθερίας (6-DOF)

Ο ρομποτικός βραχίονας που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία διαθέτει **έξι βαθμούς ελευθερίας (6 Degrees of Freedom – 6 DOF)**, επιτρέποντας την πλήρη χωρική τοποθέτηση και προσανατολισμό του τελικού ενεργοποιητή (end-effector) εντός του τρισδιάστατου χώρου. Η επιλογή διάταξης 6-DOF αποτελεί καθιερωμένη πρακτική σε βιομηχανικούς και ερευνητικούς ρομποτικούς βραχίονες, καθώς εξασφαλίζει ανεξάρτητο έλεγχο τόσο της θέσης όσο και του προσανατολισμού του άκρου εργασίας.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος ακολουθεί σειριακή διάταξη αρθρώσεων, όπου κάθε βαθμός ελευθερίας αντιστοιχεί σε μία περιστροφική άρθρωση. Η συνολική διάταξη των βαθμών ελευθερίας μπορεί να διακριθεί λειτουργικά σε τρία κύρια τμήματα: τη βάση, τον κύριο βραχίονα (arm) και τον καρπό (wrist).

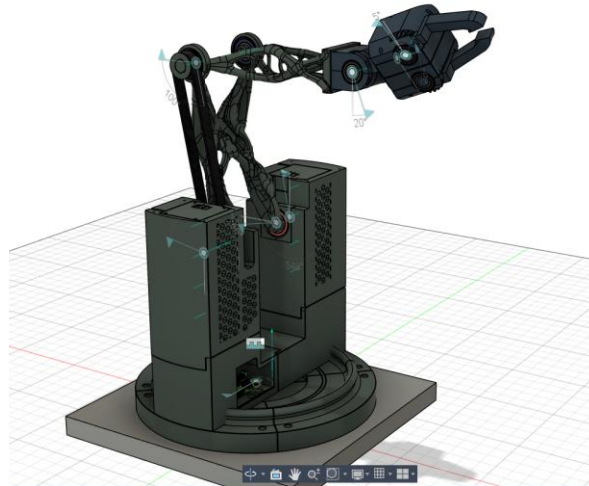
Ο πρώτος βαθμός ελευθερίας αφορά την **περιστροφή της βάσης** γύρω από κατακόρυφο άξονα. Η άρθρωση αυτή επιτρέπει την οριζόντια σάρωση του χώρου εργασίας και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό εύρος λειτουργίας του βραχίονα. Η μηχανολογική σχεδίαση της βάσης οφείλει να εξασφαλίζει αυξημένη ακαμψία, καθώς η συγκεκριμένη άρθρωση φέρει το βάρος όλων των υπερκείμενων συνδέσμων και του ωφέλιμου φορτίου.

Ο δεύτερος και ο τρίτος βαθμός ελευθερίας αντιστοιχούν στις αρθρώσεις του **ώμου** και του **αγκώνα** αντίστοιχα. Οι δύο αυτές αρθρώσεις αποτελούν τον κύριο μηχανισμό τοποθέτησης του άκρου του βραχίονα στον χώρο και είναι υπεύθυνες για τη ρύθμιση της απόστασης και του ύψους του end-effector σε σχέση με τη βάση. Οι αναπτυσσόμενες ροπές στις συγκεκριμένες αρθρώσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες, ειδικά υπό συνθήκες μέγιστης έκτασης του βραχίονα και πλήρους ωφέλιμου φορτίου. Ως εκ τούτου, η γεωμετρία, η επιλογή υλικών και η διάταξη των μηχανικών στοιχείων των αρθρώσεων αυτών αποτελούν κρίσιμα σημεία του μηχανολογικού σχεδιασμού.

Οι τρεις τελευταίοι βαθμοί ελευθερίας συνθέτουν τον **καρπό του ρομποτικού βραχίονα**, επιτρέποντας την ανεξάρτητη ρύθμιση του προσανατολισμού του end-effector. Η διάταξη αυτή συνήθως υλοποιείται μέσω διαδοχικών περιστροφικών αρθρώσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε κινήσεις τύπου roll, pitch και yaw. Ο ρόλος του καρπού είναι καθοριστικός για εφαρμογές χειρισμού αντικειμένων, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της στάσης του εργαλείου ή της δαγκάνας χωρίς μεταβολή της θέσης του άκρου στον χώρο.

Η επιλογή σειριακής αρχιτεκτονικής 6-DOF συνεπάγεται αυξημένες μηχανικές απαιτήσεις, καθώς τα φορτία και οι ροπές μεταφέρονται αθροιστικά από τον τελικό ενεργοποιητή προς τη βάση. Παρά το μειονέκτημα αυτό, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την απλότητα του μηχανικού σχεδιασμού, τη δυνατότητα αρθρωτής κατασκευής και τη συμβατότητα με καθιερωμένες μεθόδους κινηματικής και ελέγχου.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το πλήρες μηχανολογικό μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα, στο οποίο επισημαίνονται οι έξι βαθμοί ελευθερίας και η αντίστοιχη άρθρωση κάθε άξονα κίνησης. Η διάταξη αυτή αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία αναπτύσσεται η υπόλοιπη μηχανολογική σχεδίαση, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης φορτίων, της βελτιστοποίησης των δομικών στοιχείων και της κατασκευαστικής διαδικασίας.



2.2 Modular σχεδίαση μηχανικής δομής (αρθρωτά υποσυστήματα – “Bones”)

Η μηχανολογική αρχιτεκτονική του ρομποτικού βραχίονα βασίζεται στην αρχή της **αρθρωτής (modular) σχεδίασης**, σύμφωνα με την οποία το σύστημα διαχωρίζεται σε επιμέρους μηχανικά υποσυστήματα, τα οποία σχεδιάζονται, αναλύονται και βελτιστοποιούνται σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα υποσυστήματα αυτά αναφέρονται ως *Bones* και αντιστοιχούν στους βασικούς φέροντες συνδέσμους και στις αρθρώσεις του βραχίονα.

Κάθε Bone αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μηχανολογικό module, το οποίο περιλαμβάνει:

- το φέρον δομικό σώμα,
- τις επιφάνειες σύνδεσης με γειτονικούς συνδέσμους,
- τις έδρες για την ενσωμάτωση εδράνων ή αξόνων περιστροφής,
- καθώς και τη μηχανική διεπαφή με το σύστημα μετάδοσης κίνησης και τον ενεργοποιητή.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποσύνδεση του συνολικού μηχανικού προβλήματος σε επιμέρους υποπροβλήματα μικρότερης κλίμακας. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση φορτίων, η επιλογή υλικών και η γεωμετρική βελτιστοποίηση μπορούν να πραγματοποιηθούν ξεχωριστά για κάθε Bone, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές συνθήκες καταπόνησης που επικρατούν στη συγκεκριμένη θέση του βραχίονα.

Από μηχανολογικής άποψης, τα Bones που βρίσκονται εγγύτερα στη βάση του βραχίονα υπόκεινται σε σημαντικά αυξημένες ροπές και διατμητικές δυνάμεις, καθώς καλούνται να φέρουν όχι μόνο το ωφέλιμο φορτίο των 2 kg, αλλά και το βάρος όλων των υπερκείμενων

συνδέσμων και αρθρώσεων. Αντιθέτως, τα Bones που απαρτίζουν τον καρπό και το άκρο του βραχίονα υπόκεινται σε μικρότερες ροπές, αλλά απαιτούν αυξημένη ακρίβεια και μειωμένη παραμόρφωση, προκειμένου να διασφαλιστεί ο σωστός προσανατολισμός του end-effector.

Η αρθρωτή σχεδίαση επιτρέπει την προσαρμογή της γεωμετρίας και της εσωτερικής δομής κάθε Bone στις τοπικές μηχανικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, σε συνδέσμους υψηλής καταπόνησης δίνεται προτεραιότητα στην αύξηση της ακαμψίας και στη βέλτιστη κατανομή των τάσεων, ακόμη και εις βάρος της αύξησης της μάζας. Αντιθέτως, σε συνδέσμους χαμηλότερης φόρτισης, ο σχεδιασμός εστιάζει στη μείωση του βάρους και της ροπής αδράνειας, προκειμένου να βελτιωθεί η δυναμική απόκριση του συστήματος.

Ένα ακόμη κρίσιμο πλεονέκτημα της modular προσέγγισης είναι η **ευκολία επανασχεδίασης και εξέλιξης του μηχανισμού**. Τυχόν αστοχίες, ανεπιθύμητες παραμορφώσεις ή περιορισμοί στην απόδοση μπορούν να αντιμετωπιστούν με την τροποποίηση ενός συγκεκριμένου Bone, χωρίς να απαιτείται συνολική ανακατασκευή του βραχίονα. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στο πλαίσιο ερευνητικών και εκπαιδευτικών εφαρμογών, όπου η επαναληπτική διαδικασία σχεδίασης–δοκιμής–βελτιστοποίησης αποτελεί βασικό στοιχείο της ανάπτυξης.

Η modular σχεδίαση συνδέεται άμεσα και με την επιλογή της προσθετικής κατασκευής μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Κάθε Bone μπορεί να κατασκευαστεί ανεξάρτητα, με προσαρμοσμένες παραμέτρους εκτύπωσης, υλικά και προσανατολισμό, ανάλογα με τη γεωμετρία και τις μηχανικές απαιτήσεις του. Παράλληλα, η ύπαρξη σαφώς ορισμένων διεπαφών μεταξύ των Bones διευκολύνει τη συναρμολόγηση, την αποσυναρμολόγηση και τη μελλοντική αντικατάσταση επιμέρους εξαρτημάτων.

Συνολικά, η επιλογή αρθρωτής μηχανολογικής αρχιτεκτονικής αποτελεί βασικό σχεδιαστικό άξονα της παρούσας εργασίας και συνεισφέρει καθοριστικά στη λειτουργικότητα, την ευελιξία και τη μελλοντική επεκτασιμότητα του ρομποτικού βραχίονα. Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί ένα σταθερό μηχανολογικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν και να ενσωματωθούν αποτελεσματικά τα ηλεκτρολογικά και λογισμικά υποσυστήματα του συστήματος.

3. Σχεδίαση μηχανικών μερών

3.1 CAD περιβάλλον και σχεδιαστική διαδικασία

Η σχεδίαση των μηχανικών μερών του ρομποτικού βραχίονα πραγματοποιήθηκε σε ολοκληρωμένο τρισδιάστατο περιβάλλον CAD, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων, τη συναρμολόγηση πολύπλοκων μηχανισμών και την ενσωμάτωση εργαλείων ανάλυσης και βελτιστοποίησης. Η επιλογή παραμετρικής σχεδίασης κρίθηκε απαραίτητη, καθώς επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μήκη, πάχη, θέσεις αξόνων) σε μεταγενέστερα στάδια της ανάπτυξης, χωρίς την ανάγκη εκ νέου μοντελοποίησης από την αρχή.

Η σχεδιαστική διαδικασία ακολούθησε **επαναληπτική (iterative) μεθοδολογία**, η οποία μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα βασικά στάδια:

1. Αρχική γεωμετρική σύλληψη (conceptual design)

Σε αυτό το στάδιο καθορίστηκε η βασική γεωμετρία κάθε συνδέσμου, τα σημεία άρθρωσης και οι διεπαφές σύνδεσης μεταξύ των επιμέρους Bones. Η γεωμετρία σχεδιάστηκε αρχικά με απλοποιημένες μορφές, με στόχο την κατανόηση της κινηματικής συμπεριφοράς και της συνολικής διάταξης του μηχανισμού.

2. Συναρμολόγηση και έλεγχος κινηματικής

Τα επιμέρους εξαρτήματα ενσωματώθηκαν σε πλήρες assembly του ρομποτικού βραχίονα, όπου ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία των αρθρώσεων, τα επιτρεπτά εύρη κίνησης και η απουσία μηχανικών παρεμβολών (collisions). Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο, καθώς επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση γεωμετρικών αστοχιών πριν την περαιτέρω ανάλυση.

3. Προσαρμογή γεωμετρίας βάσει μηχανικών απαιτήσεων

Με βάση τις εκτιμώμενες ροπές και φορτίσεις σε κάθε άρθρωση, πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις στη γεωμετρία των φερόντων μερών, όπως αύξηση τοπικών πάχους, ενίσχυση περιοχών σύνδεσης και βελτίωση της κατανομής υλικού σε κρίσιμα σημεία.

4. Προετοιμασία για ανάλυση και βελτιστοποίηση

Στο τελικό στάδιο της σχεδίασης CAD, τα μοντέλα προσαρμόστηκαν ώστε να είναι κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση, όπως δομικό έλεγχο ή εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού. Σε αυτό περιλαμβάνεται ο σαφής ορισμός περιοχών που πρέπει να διατηρηθούν (preserve regions) και περιοχών που μπορούν να βελτιστοποιηθούν γεωμετρικά.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το πλήρες συναρμολογημένο CAD μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα, το οποίο αποτελεί τη βάση για όλες τις επόμενες μηχανολογικές αναλύσεις.

(Σχήμα 3.1: Πλήρες CAD assembly του ρομποτικού βραχίονα.)

3.2 Εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού (Generative Design) και δομική βελτιστοποίηση

Για τη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης των φερόντων συνδέσμων του ρομποτικού βραχίονα εφαρμόστηκαν τεχνικές **γενετικού σχεδιασμού (generative design)**, με στόχο την επίτευξη βέλτιστου συνδυασμού ακαμψίας και μειωμένης μάζας. Η χρήση γενετικού σχεδιασμού κρίνεται ιδιαίτερα κατάλληλη σε περιπτώσεις όπου τα φορτία είναι γνωστά, αλλά η βέλτιστη γεωμετρία δεν είναι προφανής μέσω κλασικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων.

Η διαδικασία γενετικού σχεδιασμού βασίζεται στον ορισμό ενός σαφούς **σχεδιαστικού προβλήματος**, το οποίο περιλαμβάνει:

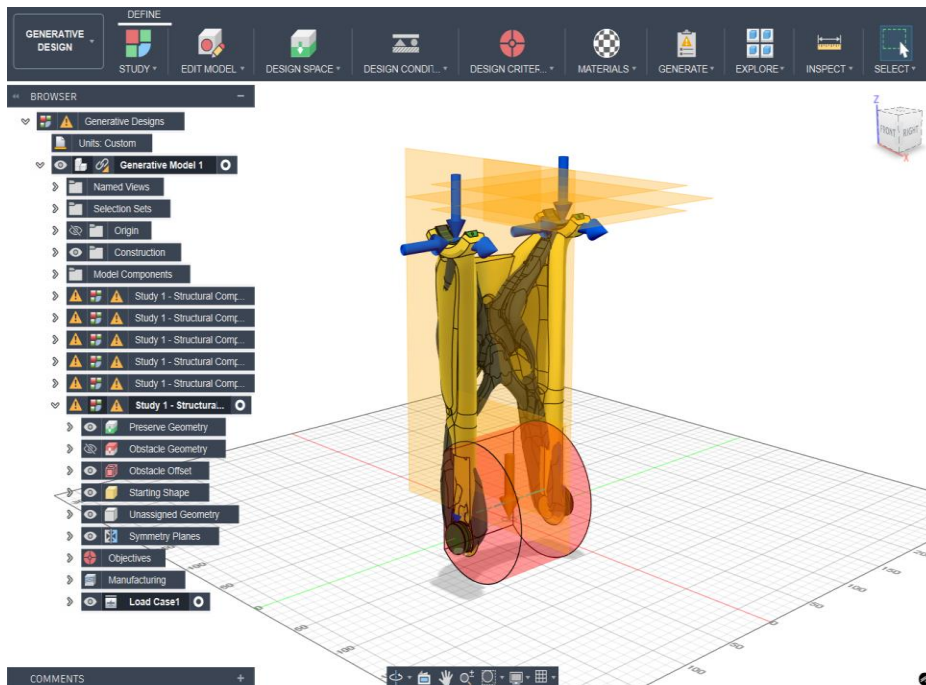
- τις περιοχές γεωμετρίας που πρέπει να διατηρηθούν (preserve geometry),
- τις περιοχές που απαγορεύεται να καταληφθούν από υλικό (obstacle geometry),
- τις συνθήκες στήριξης και φόρτισης,
- καθώς και τους στόχους βελτιστοποίησης, όπως η ελαχιστοποίηση της μάζας ή της παραμόρφωσης.

Στην παρούσα εργασία, ο γενετικός σχεδιασμός εφαρμόστηκε κυρίως σε Bones υψηλής μηχανικής καταπόνησης, όπως συνδέσμους του κύριου βραχίονα, όπου οι αναπτυσσόμενες ροπές λόγω του ωφέλιμου φορτίου των 2 kg είναι σημαντικές. Ως αρχική γεωμετρία (starting shape) χρησιμοποιήθηκε απλοποιημένο φέρον σώμα, το οποίο περιέκλειε τον διαθέσιμο χώρο σχεδίασης και εξασφάλιζε τη σωστή σύνδεση με τα γειτονικά εξαρτήματα.

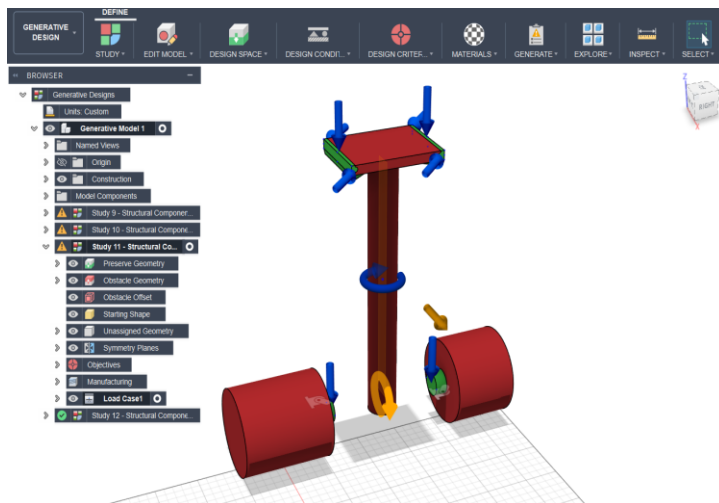
Οι συνθήκες φόρτισης ορίστηκαν με βάση σενάρια μέγιστης καταπόνησης, λαμβάνοντας υπόψη τη δυσμενέστερη θέση του βραχίονα (πλήρης εκτατότητα) και την εφαρμογή του ωφέλιμου φορτίου στο άκρο. Οι στηρίξεις προσομοιώθηκαν μέσω κατάλληλων περιορισμών στις επιφάνειες σύνδεσης των αρθρώσεων, ώστε να αναπαριστούν ρεαλιστικά τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η διαμόρφωση του σχεδιαστικού χώρου, των περιοχών διατήρησης γεωμετρίας και των εφαρμοζόμενων φορτίων για έναν από τους βασικούς συνδέσμους του βραχίονα.

Bone1.



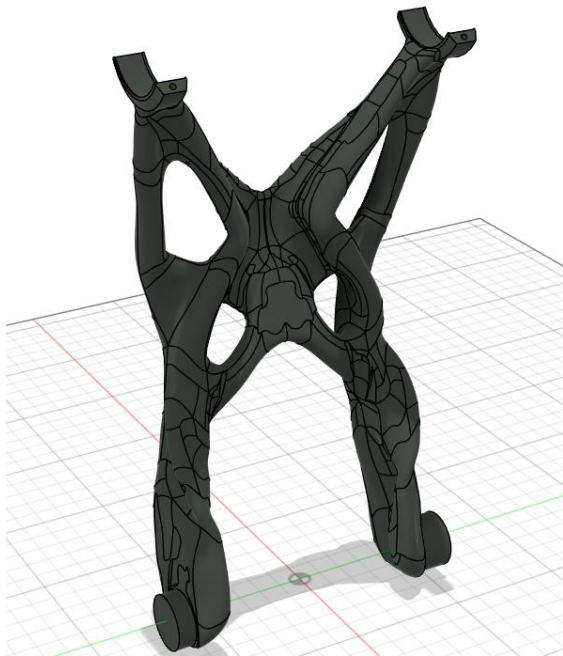
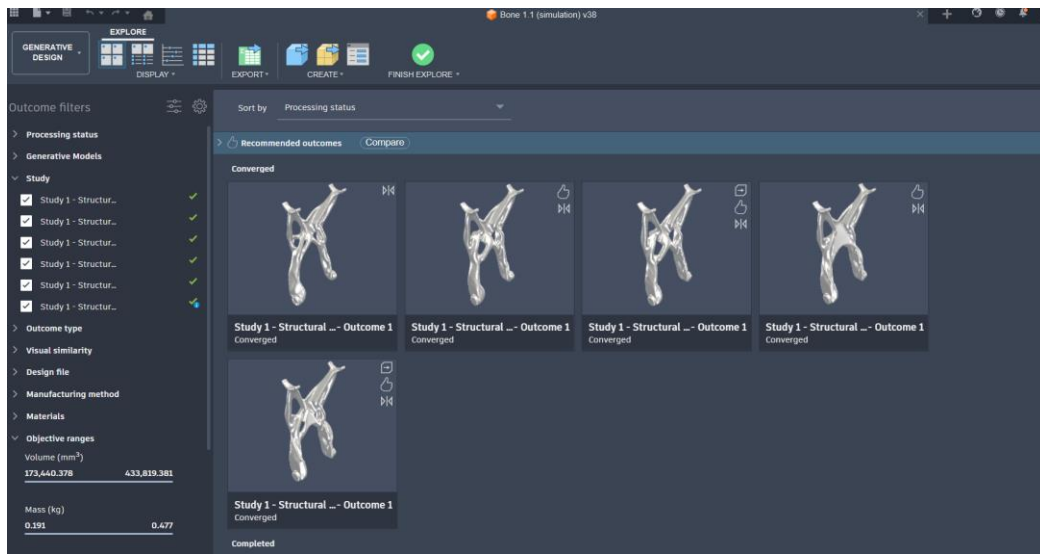
Bone 2.

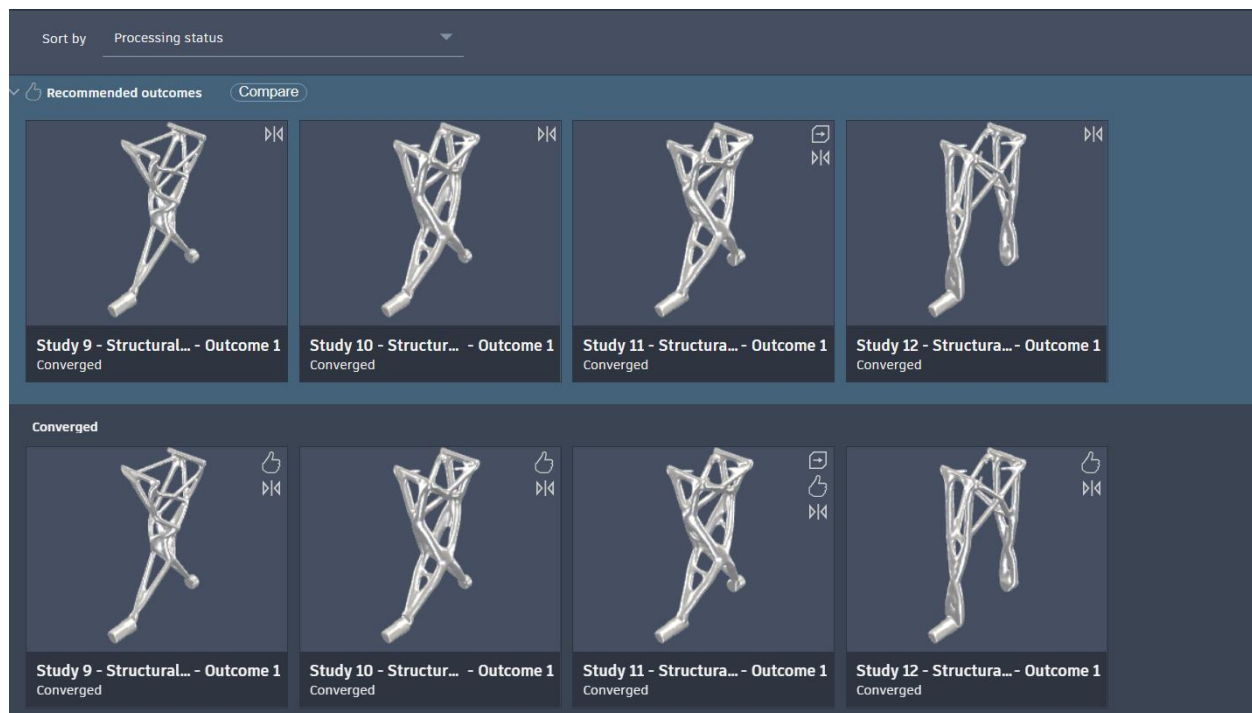


(Σχήμα 3.2: Ορισμός σχεδιαστικού χώρου, περιοχών διατήρησης και φορτίσεων για εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού.)

Τα αποτελέσματα του γενετικού σχεδιασμού περιλαμβάνουν πολλαπλές εναλλακτικές γεωμετρίες, οι οποίες ικανοποιούν τους ίδιους μηχανικούς περιορισμούς αλλά παρουσιάζουν διαφορετική κατανομή υλικού και συνολική μάζα. Οι προτεινόμενες λύσεις συγκρίθηκαν με βάση κριτήρια όπως η μηχανική ακαμψία, η ευκολία κατασκευής μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης και η συμβατότητα με τη συνολική αρχιτεκτονική του βραχίονα.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα γενετικού σχεδιασμού για επιλεγμένο Bone, όπου διακρίνεται η οργανική κατανομή του υλικού σε περιοχές υψηλής καταπόνησης και η αφαίρεσή του από περιοχές μειωμένης μηχανικής σημασίας.





(Σχήμα 3.3: Ενδεικτικά αποτελέσματα γενετικού σχεδιασμού για φέρον σύνδεσμο του ρομποτικού βραχίονα.)

Η τελική γεωμετρία που επελέγη δεν αποτελεί άμεση εξαγωγή ενός αποτελέσματος γενετικού σχεδιασμού, αλλά προϊόν μηχανολογικής κρίσης και περαιτέρω επεξεργασίας, ώστε να ικανοποιεί τόσο τις μηχανικές απαιτήσεις όσο και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς της προσθετικής κατασκευής. Με τον τρόπο αυτό, ο γενετικός σχεδιασμός αξιοποιήθηκε ως εργαλείο υποστήριξης της σχεδιαστικής διαδικασίας και όχι ως αυτόματη αντικατάστασή της.

4. Ανάλυση φορτίων και μηχανικών καταπονήσεων

4.1 Ανάλυση φορτίων και ροπών (payload 2 kg)

Η ανάλυση φορτίων και ροπών αποτελεί κρίσιμο στάδιο του μηχανολογικού σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα, καθώς καθορίζει τις απαιτήσεις αντοχής, ακαμψίας και διαστασιολόγησης των φερόντων συνδέσμων και των αρθρώσεων. Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση πραγματοποιείται με βάση **συντηρητικά σενάρια μέγιστης καταπόνησης (worst-case loading conditions)**, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του συστήματος υπό όλες τις προβλεπόμενες συνθήκες.

4.1.1 Υποθέσεις και παραδοχές ανάλυσης

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης υιοθετούνται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Το ωφέλιμο φορτίο (payload) στο άκρο του βραχίονα ισούται με

$$m_p = 2 \text{ kg}$$

- Η επιτάχυνση της βαρύτητας λαμβάνεται ίση με

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

- Οι σύνδεσμοι του βραχίονα θεωρούνται άκαμπτοι σε πρώτο επίπεδο ανάλυσης.
- Η ανάλυση πραγματοποιείται αρχικά σε **στατική μορφή**, αγνοώντας δυναμικά φαινόμενα (επιταχύνσεις, ταλαντώσεις), τα οποία εξετάζονται σε επόμενο στάδιο σχεδιασμού.
- Η δυσμενέστερη θέση του βραχίονα θεωρείται εκείνη της **πλήρους εκτατότητας**, όπου οι σύνδεσμοι βρίσκονται σε ευθυγραμμισμένη διάταξη και οι ροπές στις αρθρώσεις μεγιστοποιούνται.

4.1.2 Υπολογισμός εφαρμοζόμενης δύναμης στο άκρο

Η δύναμη που ασκείται στο άκρο του βραχίονα λόγω του ωφέλιμου φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$F_p = m_p \cdot g$$

και αριθμητικά:

$$F_p = 2 \cdot 9.81 = 19.62 \text{ N} \quad F_{p=2} \cdot 9.81 = 19.62 \sim \text{N}$$

Η δύναμη αυτή θεωρείται ότι εφαρμόζεται κατακόρυφα προς τα κάτω στο σημείο σύνδεσης του end-effector με τον τελευταίο σύνδεσμο του βραχίονα.

4.1.3 Υπολογισμός ροπών στις αρθρώσεις

Έστω ότι ο ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από n σειριακά συνδεδεμένους συνδέσμους με μήκη L_1, L_2, \dots, L_n . Στην περίπτωση πλήρους εκτατότητας, η ροπή που αναπτύσσεται στην άρθρωση i λόγω του ωφέλιμου φορτίου προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$M_i = F_p \cdot \sum_{k=i}^n L_k \quad M_i = F_p \cdot \sum_{k=i}^n L_k$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει το γεγονός ότι κάθε άρθρωση καλείται να φέρει τη ροπή που προκαλείται από το φορτίο σε απόσταση ίση με το άθροισμα των μηκών όλων των υπερκείμενων συνδέσμων.

Για παράδειγμα, στην άρθρωση του ώμου (δεύτερος βαθμός ελευθερίας), η αναπτυσσόμενη ροπή είναι:

$$M_{\text{shoulder}} = F_p \cdot (L_2 + L_3 + \dots + L_n) \quad M_{\text{shoulder}} = F_p \cdot (L_2 + L_3 + \dots + L_n)$$

Αντίστοιχα, στην άρθρωση της βάσης (πρώτος βαθμός ελευθερίας), η ροπή μεγιστοποιείται και δίνεται από:

$$M_{\text{base}} = F_p \cdot (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \quad M_{\text{base}} = F_p \cdot (L_1 + L_2 + \dots + L_n)$$

Η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει ότι οι αρθρώσεις που βρίσκονται πλησιέστερα στη βάση υπόκεινται σε σημαντικά αυξημένες ροπές σε σύγκριση με εκείνες του καρπού, γεγονός που δικαιολογεί την ανάγκη για αυξημένη ακαμψία και μηχανική ενίσχυση των αντίστοιχων Bones.

4.1.4 Συνεισφορά ιδιοβάρους των συνδέσμων

Πέραν του ωφέλιμου φορτίου, στις αρθρώσεις του βραχίονα συνεισφέρει και το **ιδιοβάρος των συνδέσμων**. Έστω ότι ο σύνδεσμος j έχει μάζα m_j και το κέντρο

μάζας του βρίσκεται σε απόσταση d_{jd_jd} από την άρθρωση $i\bar{i}$. Η πρόσθετη ροπή λόγω ιδιοβάρους δίνεται από:

$$M_{i,j} = m_j \cdot g \cdot d_{jM_{i,j}} = m_j \cdot g \cdot d_{jM_{i,j}}$$

Η συνολική ροπή στην άρθρωση $i\bar{i}$ προκύπτει ως άθροισμα:

$$M_{total} = F_p \cdot \sum_{k=i}^n L_k + \sum_{j=i}^n m_j \cdot g \cdot d_{jM_{i,j}} = F_p \cdot \sum_{k=i}^n L_k + \sum_{j=i}^n m_j \cdot g \cdot d_{jM_{i,j}}$$

Η συνεισφορά του ιδιοβάρους καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε συνδέσμους μεγάλου μήκους ή αυξημένης μάζας, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τις σχεδιαστικές αποφάσεις σχετικά με τη μείωση του βάρους μέσω γεωμετρικής βελτιστοποίησης και γενετικού σχεδιασμού.

4.1.5 Worst-case σενάρια καταπόνησης

Για λόγους ασφαλούς διαστασιολόγησης, εξετάζονται τα ακόλουθα worst-case σενάρια:

- πλήρης εκτατότητα του βραχίονα σε οριζόντια διάταξη,
- εφαρμογή του μέγιστου ωφέλιμου φορτίου,
- στατική καταπόνηση χωρίς υποβοήθηση από δυναμικά φαινόμενα (π.χ. επιταχύνσεις προς αντίθετη κατεύθυνση).

Τα σενάρια αυτά οδηγούν σε μεγιστοποίηση των ροπών κάμψης στους φέροντες συνδέσμους και στις αρθρώσεις, και χρησιμοποιούνται ως βάση για τη διαστασιολόγηση των μηχανικών μερών και την εφαρμογή δομικής ανάλυσης στα επόμενα στάδια της μελέτης.

4.1.6 Σχέση ανάλυσης φορτίων με τον μηχανολογικό σχεδιασμό

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φορτίων και ροπών αξιοποιούνται άμεσα στον μηχανολογικό σχεδιασμό του ρομποτικού βραχίονα, καθώς:

- καθορίζουν τις περιοχές αυξημένης μηχανικής καταπόνησης,
- ορίζουν τις απαιτήσεις αντοχής των φερόντων Bones,
- και αποτελούν είσοδο για την εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού και δομικής βελτιστοποίησης.

Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση φορτίων λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ της θεωρητικής μηχανικής θεμελίωσης και της πρακτικής υλοποίησης του μηχανολογικού σχεδιασμού.

5. Κατασκευαστική διαδικασία μέσω προσθετικής κατασκευής (3D Printing)

5.1 Επιλογή μεθόδου κατασκευής και αιτιολόγηση

Η κατασκευή των μηχανικών μερών του ρομποτικού βραχίονα πραγματοποιήθηκε μέσω **προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing)** και συγκεκριμένα με τη μέθοδο της **τρισδιάστατης εκτύπωσης θερμοπλαστικών υλικών (Fused Filament Fabrication – FFF)**. Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου υπαγορεύτηκε από το χαμηλό κόστος, την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων και τη δυνατότητα άμεσης επανασχεδίασης και επανεκτύπωσης επιμέρους εξαρτημάτων.

Η προσθετική κατασκευή ευθυγραμμίζεται άμεσα με τη φιλοσοφία της αρθρωτής σχεδίασης που υιοθετήθηκε στον μηχανολογικό σχεδιασμό του βραχίονα. Κάθε Bone μπορεί να κατασκευαστεί ανεξάρτητα, επιτρέποντας τη σταδιακή βελτίωση της γεωμετρίας και την αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών χωρίς σημαντικό κατασκευαστικό κόστος.

5.2 Παράμετροι εκτύπωσης και σχεδιαστικές προσαρμογές

Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, οι παράμετροι επιλέχθηκαν με βάση τις μηχανικές απαιτήσεις κάθε εξαρτήματος και τη θέση του στον βραχίονα. Ειδικότερα, ελήφθησαν υπόψη:

- το **ποσοστό πλήρωσης (infill)**, το οποίο αυξήθηκε σε φέροντα μέρη υψηλής καταπόνησης,
- το **πάχος τοιχωμάτων (perimeters)**, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αντοχή σε κάμψη,
- ο **προσανατολισμός εκτύπωσης**, με στόχο τη βελτιστοποίηση της αντοχής κατά τις κύριες διευθύνσεις φόρτισης.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη σχεδίαση περιοχών σύνδεσης, όπως οπές για βίδες και έδρες εδράνων, οι οποίες τροποποιήθηκαν γεωμετρικά ώστε να λαμβάνουν υπόψη τις

ανοχές της προσθετικής κατασκευής και να μειώνουν την ανάγκη εκτεταμένης μετεπεξεργασίας.

5.3 Κατασκευαστικοί περιορισμοί και πρακτικά ζητήματα

Παρά τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η μέθοδος συνοδεύεται από συγκεκριμένους περιορισμούς, οι οποίοι ελήφθησαν υπόψη στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Ενδεικτικά, οι ανομοιογένειες στην αντοχή μεταξύ των στρώσεων (anisotropy), η πιθανότητα παραμορφώσεων κατά την ψύξη και οι περιορισμοί στην ακρίβεια διαστάσεων επηρέασαν τη διαμόρφωση της τελικής γεωμετρίας των εξαρτημάτων.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων, εφαρμόστηκαν συντηρητικές σχεδιαστικές επιλογές, όπως η αποφυγή πολύ λεπτών τοιχωμάτων, η ενίσχυση κρίσιμων περιοχών και η πρόβλεψη ανοχών στις διεπαφές συναρμολόγησης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η λειτουργική αξιοπιστία του μηχανισμού, ακόμη και υπό τις εγγενείς αβεβαιότητες της προσθετικής κατασκευής.

5.4 Συναρμολόγηση και αξιολόγηση κατασκευής

Μετά την εκτύπωση, τα επιμέρους μηχανικά μέρη συναρμολογήθηκαν σε πλήρες σύστημα, επιτρέποντας την πρακτική αξιολόγηση της γεωμετρικής ακρίβειας, της συναρμογής και της μηχανικής συμπεριφοράς του βραχίονα. Η διαδικασία συναρμολόγησης ανέδειξε σημεία όπου απαιτούνται περαιτέρω βελτιώσεις, όπως προσαρμογές ανοχών ή τοπική ενίσχυση εξαρτημάτων, τα οποία τροφοδοτούν την επόμενη επαναληπτική φάση σχεδίασης.

Η κατασκευαστική διαδικασία, σε συνδυασμό με την αρθρωτή σχεδίαση, επιτρέπει την ταχεία μετάβαση από το θεωρητικό μηχανολογικό μοντέλο σε λειτουργικό πρωτότυπο, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητα της επιλεγμένης προσέγγισης για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

6. Τρέχουσα κατάσταση και μελλοντικές μηχανολογικές βελτιώσεις

Στο παρόν στάδιο της ανάπτυξης, ο μηχανολογικός σχεδιασμός του ρομποτικού βραχίονα έχει ολοκληρωθεί σε επίπεδο λειτουργικού πρωτοτύπου. Έχει υλοποιηθεί η βασική αρθρωτή αρχιτεκτονική των έξι βαθμών ελευθερίας, έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί τα κύρια φέροντα μηχανικά μέρη, ενώ έχει πραγματοποιηθεί αρχική αξιολόγηση της συναρμογής και της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Η εφαρμογή παραμετρικής σχεδίασης και γενετικού σχεδιασμού επέτρεψε την ανάπτυξη γεωμετρικών προσαρμοσμένων στις μηχανικές απαιτήσεις κάθε συνδέσμου, ενώ η χρήση προσθετικής κατασκευής κατέστησε δυνατή τη γρήγορη επαναληπτική βελτίωση των επιμέρους εξαρτημάτων. Παράλληλα, η διαδικασία συναρμολόγησης ανέδειξε πρακτικά ζητήματα, όπως ανοχές σύνδεσης και τοπικές ανάγκες ενίσχυσης, τα οποία αποτελούν πολύτιμη ανατροφοδότηση για τα επόμενα στάδια σχεδιασμού.

Σε μελλοντικό στάδιο της εργασίας, προγραμματίζεται η περαιτέρω βελτίωση της μηχανολογικής δομής μέσω λεπτομερούς ανάλυσης αντοχής και παραμορφώσεων, καθώς και η βελτιστοποίηση επιμέρους συνδέσμων με βάση πραγματικά δεδομένα λειτουργίας. Οι βελτιώσεις αυτές αναμένεται να ενισχύσουν την ακρίβεια, την ακαμψία και τη συνολική αξιοπιστία του ρομποτικού βραχίονα.

7. Συμπεράσματα μηχανολογικού μέρους

Στο μηχανολογικό μέρος της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκε η ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδίασης και ανάπτυξης ενός αρθρωτού ρομποτικού βραχίονα έξι βαθμών ελευθερίας, με στόχο τη διαχείριση ωφέλιμου φορτίου έως 2 kg και τη λειτουργία σε τρισδιάστατο χώρο. Ο σχεδιασμός βασίστηκε σε αρχές αρθρωτής αρχιτεκτονικής, παραμετρικής σχεδίασης και προσθετικής κατασκευής, επιτρέποντας την ευέλικτη και επαναληπτική εξέλιξη του μηχανισμού.

Η ανάλυση φορτίων και η εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού συνέβαλαν στον εντοπισμό κρίσιμων περιοχών καταπόνησης και στη βελτίωση της κατανομής υλικού στους φέροντες συνδέσμους. Παράλληλα, η κατασκευαστική διαδικασία μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης απέδειξε την καταλληλότητά της για την υλοποίηση λειτουργικών πρωτοτύπων με χαμηλό κόστος και αυξημένη σχεδιαστική ευελιξία.

