



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Ανάπτυξη Ρομποτικής Κεφαλής  
Τύλιξης Ινών για Κατασκευή  
Τεμαχίων από Σύνθετα Υλικά

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΣΑΒΕΛΛΑ ΚΟΥΣΤΑ

Επιβλέπων: Βοσνιάκος Γεώργιος - Χριστόφορος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γ.Χ. Βοσνιάκο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Ν. Μελισσά και τον Φωτεινό Ρογάρη, των οποίων η βοήθεια ήταν καθοριστική για την υλοποίηση της συσκευής.



# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή και την εφαρμογή μιας αυτόνομης ρομποτικής κεφαλής που εκτελεί τη διαδικασία περιέλιξης ινών (κατεργασία με σύνθετα υλικά), με τη βοήθεια ρομποτικού βραχίονα 6 βαθμών ελευθερίας και βηματικού κινητήρα που περιστρέφει το καλούπι προς κατεργασία.. Κατά τη διάρκεια της τύλιξης οι ίνες τοποθετούνται στο καλούπι με μία επαναλαμβανόμενη γεωμετρία σχηματίζοντας πολλαπλές συμπαγείς στρώσεις.

Πρωταρχικός σκοπός ήταν η μοντελοποίηση του ρομπότ Stäubli RX90L στο χώρο του Solidworks και η δοκιμή του στο Motion Analysis, με ευθεία κινηματική. Ο έλεγχος της κίνησης πραγματοποιείται ορίζοντας φυσικούς περιορισμούς στο Solidworks. Η ανάλυση που έγινε δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθεί ο χρήστης τη μετατόπιση οποιουδήποτε σημείου του ρομπότ με τη βοήθεια ενός εργαλείου στο Motion Analysis, το Plot Displacement.

Με βάση τη μοντελοποίηση παρατηρήθηκαν οι περιορισμοί στις κινήσεις του ρομποτικού βραχίονα οι οποίοι οδήγησαν στην μελέτη τριών συσκευών. Η πρώτη συσκευή που αναπτύχθηκε στοχεύει στο συνδυασμό της με έναν ενσωματωμένο κινητήρα ο οποίος δεν θα έχει περιορισμό περιστροφών όπως έχει ο ρομποτικός βραχίονας, και με αυτόν τον τρόπο θα επιτυγχάνεται η κάλυψη του ακίνητου καλουπιού από τις αναγκαίες στρώσεις νήματος. Η δεύτερη συσκευή αποτελείται από δύο μέρη, όπου το πρώτο ενσωματώνεται στο ρομπότ και το δεύτερο σε μία σταθερή βάση. Το σταθερό κομμάτι περιέχει το σύστημα τάσης του νήματος και τον κύλινδρο αποθήκευσής του. Ο σκοπός της δεύτερης συσκευής είναι η κατεργασία μεγάλων καλουπιών και για αυτό δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του κυλίνδρου με το νήμα. Η τρίτη συσκευή η οποία και υλοποιήθηκε επιτυχώς έχει την ιδιαιτερότητα πέρα από το να ελέγχει την τάση

του νήματος να προσφέρει μια δικλείδα ασφαλείας στην περίπτωση που αυτό χαλαρώσει.

Καθοριστική είναι επίσης η γωνία υπό την οποία θα γίνει η περιέλιξη και η φορά των ινών, για αυτό το λόγο γράφτηκε ένας κώδικας ο οποίος καθορίζει την μετατόπιση της κεφαλής καθώς και την κλίση στον κατακόρυφο διαμήκη και εγκάρσιο άξονα. Ο προγραμματισμός έγινε στη γλώσσα V+ μιας και είναι αυτή που «διαβάζει» ο ελεγκτής του βραχίονα. Τέλος, η δοκιμή έγινε στο εργαστήριο με χειροκίνητη περιστροφή του καλουπιού.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
1. Εισαγωγή .....	9
1.1 Ρομπότ.....	10
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	10
1.1.2 Ρομποτική .....	13
1.1.3 Περιγραφή των ρομπότ .....	14
1.1.4 Ρομποτικός βραχίονας Stäubli RX90 .....	22
1.2 Filament winding .....	24
1.2.1 Διαδικασία περιέλιξης ινών.....	24
1.2.2 Τύποι ινών.....	26
1.2.3 Μέθοδοι περιέλιξης ινών.....	30
1.2.4 Είδη καλουπιών .....	33
2. Ανάλυση του Προβλήματος.....	36
2.1 Σκοπός της συσκευής .....	36
2.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες.....	36
2.3 Ανάγκες και Προδιαγραφές .....	39
3. Αρχικός Σχεδιασμός.....	41
3.1 Λύση Πρώτη .....	41
3.2 Λύση Δεύτερη.....	43
3.3 Λύση Τρίτη.....	47

4. Σχεδιασμός και Κατασκευή της Μηχανολογικής Διάταξης .....	49
4.1 Σκελετός Κεφαλής.....	49
4.2 Σύστημα ελατηρίων .....	52
4.3 Σύστημα αντίστασης.....	56
4.4 Εργαλεία Εργαστηρίου .....	64
5. Διαδρομή της Κεφαλής .....	69
5.1 Εναπόθεση νήματος.....	69
5.2 Κατάστρωση πορείας .....	73
5.2.1 Επαγωγικός κινητήρας .....	74
5.3 Αρθρώσεις στο Solidworks .....	75
5.4 Motion Analysis.....	79
5.5 Προγραμματισμός στη γλώσσα V+.....	86
6. Επίλογος.....	90
6.1 Συμπεράσματα .....	90
6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	91
Βιβλιογραφία.....	92
Παράρτημα.....	96
Π. Α' Κινηματική .....	96
Π. Β' Ελαστική Γραμμή .....	102
Π. Γ' Κώδικας V+.....	105



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, όπου και κατασκευάστηκε το κάθε κομμάτι της τελικής συσκευής.

Η εργασία αφορά τη μελέτη και την κατασκευή μιας συσκευής που λαμβάνει χώρα σε κατεργασίες με σύνθετα υλικά. Η συσκευή αυτή είναι μια μηχανική κεφαλή, κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο για να τοποθετείται σε οποιοδήποτε ρομποτικό βραχίονα και να εκτελείται η διαδικασία της περιέλιξης ινών σε ένα καλούπι.

Αρχικά, θα αναλυθεί το απαραίτητο υπόβαθρο όσον αφορά τα ρομπότ και τη διαδικασία περιέλιξης ινών, και στη συνέχεια ο σχεδιασμός των μηχανολογικών διατάξεων, ο τρόπος κατασκευής, η μελέτη της κίνησης στο περιβάλλον του Solidworks, αλλά και ο προγραμματισμός του ρομποτικού βραχίονα.

Για τη διεξαγωγή της κατασκευής της ρομποτικής κεφαλής, αρχικά έγινε διερεύνηση ως προς τους μηχανισμούς που υπάρχουν μέχρι σήμερα και του τρόπου λειτουργίας τους, καθώς και ως προς την επιλογή κατάλληλων υλικών και συνθηκών. Ο τρόπος κατεργασίας καθορίζει το αποτέλεσμα του τελικού προϊόντος, για αυτό και δόθηκε βάση στις ιδιότητες του κάθε υλικού και στα αποτελέσματα που επιφέρει η κάθε μέθοδος περιέλιξης: ελικοειδής πολική και περιφερειακή, καθώς και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναγράφονται οι ανάγκες και οι προδιαγραφές που είναι απαραίτητο να έχει η τελική κατασκευή σύμφωνα με τις ανάγκες του εργαστηρίου και τις αγορές. Στις υπάρχουσες τεχνολογίες που μελετήθηκαν

παρατηρήθηκε ότι πράγματι λείπει από την αγορά μία συσκευή που με μηχανικό τρόπο θα προσδίδει ένταση στο νήμα και ταυτόχρονα θα έχει τη δυνατότητα διατήρησης αυτής της τάσης σε περίπτωση απότομης αλλαγής κατεύθυνσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τρεις προτεινόμενες λύσεις και εξηγείται η χρήση τους η οποία είναι διαφορετική σύμφωνα με τις ανάγκες του τελικού προϊόντος. Η πρώτη λύση είναι για αρκετά μικρές και πολύπλοκες κατασκευές, η δεύτερη για την παραγωγή απλών και μεγάλων κομματιών και η τρίτη λύση, η οποία και υλοποιήθηκε, είναι η ενδιάμεση λύση των παραπάνω δύο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επεξηγείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή της ρομποτικής κεφαλής, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, τα εργαλεία, καθώς και ο ακριβής μηχανισμός της.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η μοντελοποίηση του ρομποτικού βραχίονα στο χώρο του CAD προγράμματος(Solidworks), χρησιμοποιώντας φυσικούς περιορισμούς για να οριοθετηθεί η εμβέλεια των αρθρώσεων. Όπως εξηγείται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, οι αρθρώσεις έχουν περιορισμένη κίνηση, και έτσι ο καθορισμός της πορείας που πρέπει να ακολουθήσει το εργαλείο γίνεται πιο πολύπλοκος. Στη συνέχεια η κίνηση γράφεται στη γλώσσα V+ που είναι συμβατή με το ρομποτικό βραχίονα και πραγματοποιείται η κατεργασία.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και οι μελλοντικές επεκτάσεις.

## 1.1 Ρομπότ

### 1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

*Ρομπότ (ουσ.)*1923, από την αγγλική μετάφραση του θεατρικού έργου «R.U.R.» («*Rossumovi Univerzální Roboti* » γραμμένο το 1920 από τον Κάρελ Τσάπεκ (1890-1938). Προέρχεται από την τσέχικη λέξη robotnik (σκλάβος), robota (αναγκαστική εργασία, υποχρεωτική υπηρεσία, καταναγκαστικό έργο). Αυτή η σλάβικη λέξη είναι κοντινή με τη γερμανική λέξη Arbeit (δουλειά) καθώς : robotnik (σκλάβος),

robotiti (δουλεύω), rabota αρχαία τσέχικα (υποτέλεια), rabu (δούλος) από την άλλη στα παλαιά γερμανικά η «δουλειά» ήταν arabeit, οπότε και ομόριξη (rab) με τη λέξη rabu.



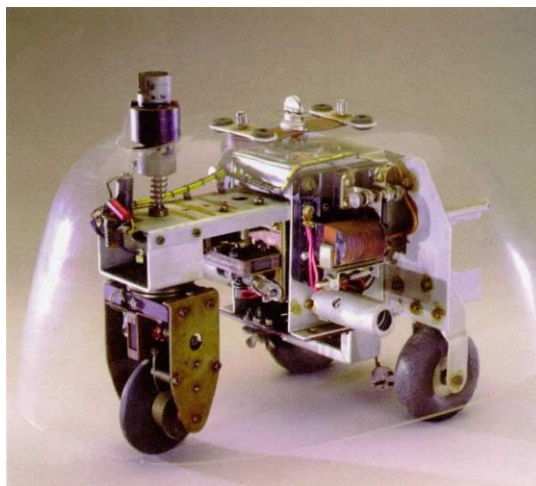
Σχήμα 1.1: Αφίσες του θεατρικού έργου R.U.R.

Στις 25 Ιανουαρίου του 1921 ανέβηκε για πρώτη φορά το θεατρικό έργο R.U.R στο Εθνικό Θέατρο της Πράγας. Η λέξη «Ρομπότ» ακούστηκε πρώτη φορά στην τότε, Τσεχοσλοβακία. Το 1923 που το έργο μεταφράστηκε στα Αγγλικά και σε άλλες τριάντα γλώσσες, ο νέος ορισμός καθιερώθηκε διεθνώς.

Η ιδέα ενός ανθρωπόμορφου τεχνητού μηχανήματος είναι αρκετά παλιά. Ήδη από την ελληνική μυθολογία υπάρχουν αρκετές φανταστικές ιστορίες με ανδροειδή ή ρομπότ. Ο Τάλως από όλα τα ανθρωπόμορφα είναι περισσότερο συναφής με την ιδέα ενός ρομπότ. Πρόκειται για έναν θεόρατο «άνθρωπο» φτιαγμένο εξ ολοκλήρου από χαλκό που σφυρηλάτησε ο Ήφαιστος για να προστατέψει την Κρήτη. Ωστόσο, ο ίδιος ο Τσάπεκ ανέφερε πως πηγή έμπνευσης των δικών του ρομπότ ήταν ο εβραϊκός μύθος του Γκόλεμ που εμφανίστηκε κατά τον 16ο αιώνα στην Πράγα. Το Γκόλεμ ήταν ένα ανθρωπόμορφο πλάσμα φτιαγμένο από πηλό ή λάσπη, ελεγχόταν από έναν άνθρωπο και χρησιμοποιούνταν εναντίον των εχθρών.

Άλλοι πρόδρομοι των σύγχρονων ρομπότ είναι οι εξής:

- Ο Αρχύτας ο Ταραντίνος (428-347 π.Χ.) λέγεται πως κατασκεύασε μία ιπτάμενη μηχανή (πετομηχανή ή περιστέρα) που κινούνταν με ατμό και μπορούσε να διανύσει απόσταση μέχρι και 200m.
- Ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων (≈150-100 π.Χ.) είναι ο αρχαιότερος αυτοματισμός που σώζεται ως σήμερα (Αρχ. Μουσείο Αθηνών). Μπορούσε να προβλέψει τις θέσεις των πλανητών.
- Ο Έρωαν ο Αλεξανδρεύς (≈10-70 μ.Χ.) κατασκεύασε το πρώτο προγραμματιζόμενο ρομπότ, ένα αυτοκινούμενο τρίκυκλο.
- Ο Άραβας Al-Jazari (1136-1206 μ.Χ.) κατασκεύασε το πρώτο ανθρωποειδές ρομπότ, ένα προγραμματιζόμενο τυμπανιστή.
- Ο Ιταλός Leonardo da Vinci (1452-1519 μ.Χ.) σχεδίασε (και ίσως κατασκεύασε) ένα ανθρωποειδές ρομπότ με πανοπλία. Το ρομπότ μπορούσε να ανασηκώνεται και να κινεί τα χέρια και το κεφάλι του. Είναι το παλαιότερο σχέδιο ανθρωποειδούς ρομπότ που σώζεται ως σήμερα.
- Το 1898 ο Σέρβος Nikola Tesla παρουσίασε το πρώτο τηλεχειριζόμενο πλοίο.
- Το 1930 η εταιρία Westinghouse Electric Corporation (Η.Π.Α.) κατασκευάζει το ανθρωποειδές ρομπότ Elektro που μπορούσε να μιλά, να περπατά, και να καπνίζει.
- Το 1948 κατασκευάζεται το πρώτο αυτόνομο ρομπότ Elsie στο πανεπιστήμιο του Bristol (Αγγλία), που κινούνταν με βάση ερεθίσματα που λάμβανε από αισθητήρες φωτός.



Σχήμα 1.2: Αυτόνομο ρομπότ Elsie του Grey Walter

## 1.1.2 Ρομποτική

Η ρομποτική, ως επιστήμη και τεχνολογία, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την επιστήμη των υπολογιστών, του αυτομάτου ελέγχου, της ηλεκτρολογίας, της μηχανολογίας, της επεξεργασίας σημάτων και της ηλεκτρονικής. Στο εύρος του αντικειμένου της ρομποτικής περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός (*design*), η δομική διάταξη (*structural disposition*), καθώς και εφαρμογή και χρήση (*application*) των ρομπότ σε διάφορες εργασίες. Αναπόσπαστο τμήμα του τελευταίου είναι φυσικά η μελέτη, ανάπτυξη, συστηματική περιγραφή και διαχείριση του δυναμικού διαδραστικότητας ρομπότ–περιβάλλοντος και ιδιαίτερα ρομπότ–ανθρώπου. Ως εκ τούτου, σημαντικό ρόλο στην ρομποτική κατέχει και η προσέγγιση των παραπάνω ζητημάτων από τη σκοπιά της ηθικής, της ψυχολογίας και της αισθητικής (π.χ. δημιουργία νοημόνων ανθρωπόμορφων ρομπότ, ζητήματα αντικατάστασης εργατών στη βιομηχανία από ρομπότ κ.λπ.). Τα ρομπότ βρίσκουν σήμερα εφαρμογή σε ένα μεγάλο σύνολο εργασιών τόσο βιομηχανικών όσο και της καθημερινότητας. Το μεγαλύτερο ποσοστό των βιομηχανικών εφαρμογών, είτε πρόκειται για βαριές εργασίες (κοπή, βαφή, συναρμολόγηση, συγκόλληση, μεταφορά βαρέων αντικειμένων, παλετοποίηση) είτε για εργασίες μεγάλης ακρίβειας (κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, παραγωγή φαρμάκων, μικρομετρήσεις), επιτελείται από ρομποτικούς χειριστές, οι οποίοι εξασφαλίζουν την ακριβέστερη και ταχύτερη δυνατή εκπόνηση των εργασιών αυτών, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τον κίνδυνο εργατικών ατυχημάτων. Παράλληλα με τις βιομηχανικές εφαρμογές, τα ρομπότ όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται σε ένα πλήθος ιατρικών εργασιών (μικροχειρουργικές επεμβάσεις), εργασιών γραφείου (εξυπηρέτηση πελατών), καθώς και απλών καθημερινών εργασιών (οικιακές δουλειές). Παρότι στην καθημερινή ζωή τα ρομπότ δεν χρησιμοποιούνται ακόμη με την ίδια συχνότητα με την οποία χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, η αυξανόμενη τάση εφαρμογής προτύπων συστηματοποίησης από την τελευταία στην καθημερινότητα έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερου βαθμού αυτοματοποίηση των απλών εργασιών. Έτσι, η χρήση ρομπότ στην καθημερινή ζωή κερδίζει έδαφος, ενώ ταυτόχρονα η ρομποτική τεχνολογία προσανατολίζεται όλο και περισσότερο στη δημιουργία

ρομπότ φιλικών προς τον άνθρωπο. Η παρουσία των ρομποτικών συστημάτων στην ζωή των ανθρώπων αναμένεται να γίνει συχνότερη στο μέλλον. Η όσο το δυνατόν, λοιπόν, ομαλότερη ένταξή τους στην καθημερινότητα, καθώς και η διαχείριση των ποικίλων ζητημάτων ηθικής και κοινωνικού πολιτισμού που αναδύονται από αυτήν, είναι μία από τις προκλήσεις που καλείται η ανθρωπότητα να αντιμετωπίσει επιτυχώς.

Θεμέλια της ρομποτικής τεχνολογίας αποτελούν οι τεχνολογίες τού ψηφιακού ελέγχου (Numerical Control) - μεθόδου προγραμματισμού εργαλειομηχανών για την εκτέλεση περίπλοκων κατεργασιών - και της τηλεχειρικής (tele-cherics) - μεθόδου χρήσεως μηχανικών βραχιόνων για την εξ αποστάσεως εκτέλεση λεπτών χειρωνακτικών χειρισμών σε επικίνδυνα αντικείμενα ή σε επικίνδυνους για τον άνθρωπο χώρους. Ένα ρομπότ μπορεί να εμφανίζει φυσικές ή λειτουργικές ομοιότητες με τον άνθρωπο, αλλά μπορεί και όχι. Κατά γενικό κανόνα, όσο πιο περίπλοκη και εξειδικευμένη είναι η μηχανή τόσο μεγαλύτερη και η πιθανότητα χαρακτηρισμού της ως ρομπότ.

### 1.1.3 Περιγραφή των ρομπότ

Ως ρομπότ χαρακτηρίζεται κάθε ελεγχόμενη από υπολογιστή μηχανή που μπορεί να εκτελέσει εργασίες τις οποίες κάνει ο άνθρωπος. Τα ρομπότ της πρώτης γενιάς δεν είχαν ικανότητα υπολογισμού και αίσθησης, ενώ τα ρομπότ της δεύτερης γενιάς διαθέτουν περιορισμένη υπολογιστική ικανότητα. Τα ρομπότ της τρίτης γενιάς διαθέτουν «νοημοσύνη» (είναι όπως λέμε «έξυπνα ρομπότ») και μπορούν να λύνουν προβλήματα και να παίρνουν αποφάσεις κατά τη διάρκεια της εργασίας τους. Τις ικανότητες αυτές αποκτούν με τεχνικές «τεχνητής νοημοσύνης» και «αίσθησης».

Ένας μηχανισμός σαν το αυτόνομο ρομπότ περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα μέρη :

- Ένα μηχανολογικό υποσύστημα, το οποίο ενσωματώνει τη δυνατότητα του ρομπότ για εκτέλεση έργου. Το υποσύστημα αυτό αποτελείται από

μηχανισμούς που επιτρέπουν στο ρομπότ να κινείται, όπως αρθρώσεις, συστήματα μετάδοσης κίνησης, επενεργητές-κινητήρες, οδηγούς κλπ.

- Ένα υποσύστημα αίσθησης, μέσω του οποίου το ρομπότ συγκεντρώνει πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τόσο το ίδιο όσο και το περιβάλλον. Το υποσύστημα αυτό εκτός των άλλων είναι υπεύθυνο για την αποδοχή των εξωτερικών εντολών, την επεξεργασία τους, τη μετάφρασή τους σε ηλεκτρική ισχύ που θα δοθεί στους κινητήρες του ρομπότ, καθώς επίσης και για την παραγωγή σημάτων εξόδου που θα πληροφορούν για την κατάσταση του συστήματος. Στο υποσύστημα αίσθησης περιλαμβάνονται όργανα μετρήσεως, αισθητήρες, ηλεκτρονικά στοιχεία κλπ..
- Ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο συνδυάζει κατάλληλα την αίσθηση με τη δράση, έτσι ώστε το ρομπότ να λειτουργεί αποτελεσματικά και με τον επιθυμητό τρόπο.

Οι πέντε βασικές κατηγορίες ρομπότ είναι:

- Βιομηχανικά ρομπότ
- Κινητά ρομπότ
- Ιατρικά ρομπότ
- Τηλερομπότ
- Κοινωνικά ρομπότ

### **Βιομηχανικά ρομπότ**

Τα βιομηχανικά ρομπότ (ή ρομποτικοί βραχίονες) έχουν τη μορφή ενός ανθρώπινου βραχίονα με αρθρώσεις (ώμο, αγκώνα, καρπό) και παλάμη (αρπάγη/δαγκάνα, δάκτυλα). Η επιλογή του τύπου της κίνησής τους (γραμμική, κυλινδρική, σφαιρική, αρθρωτή) εξαρτάται από το είδος της εργασίας που πρέπει να εκτελέσουν. Εργασίες που εκτελούνται από τα βιομηχανικά ρομπότ είναι: φόρτωμα/ξεφόρτωμα μηχανών, συναρμολόγηση, συγκόλληση, πρεσάρισμα, βαφή, γυάλισμα, κοκ.

Η κίνηση των συνδέσμων ενός βραχίονα εξαρτάται από το είδος της άρθρωσης που βρίσκεται στην αρχή τους. Έτσι, ένας σύνδεσμος μπορεί να εκτελεί

γραμμική κίνηση αν η άρθρωση στην αρχή του είναι πρισματική ή ολίσθησης είτε να εκτελεί περιστροφική κίνηση αν η συγκεκριμένη άρθρωση είναι στρωφική. Το είδος, λοιπόν, των αρθρώσεων ενός βραχίονα καθώς και ο αριθμός τους (βαθμοί ελευθερίας ρομπότ – *DOF*) καθορίζουν το είδος κίνησης που μπορεί να εκτελεί το ρομπότ και κατ' επέκταση την καταλληλότητά του για ένα συγκεκριμένο έργο. Συνεπώς, τα βιομηχανικά ρομπότ διακρίνονται σε:



Σχήμα 1.6: Καρτεσιανά, κυλινδρικά και σφαιρικά/πολικά ρομπότ.

- **καρτεσιανά** (*Cartesian robots*), τα οποία περιλαμβάνουν τρεις πρισματικές αρθρώσεις και κινούνται γραμμικά κατά τους τρεις άξονες του χώρου,
- **κυλινδρικά** (*Cylindrical robots*), τα οποία έχουν δύο γραμμικές και μία στρωφική άρθρωση. Τα κυλινδρικά ρομπότ περιστρέφονται γύρω από τη βάση τους και κινούνται γραμμικά σε οριζόντια και κατακόρυφα επίπεδα,
- **σφαιρικά ή πολικά** (*Spherical robots*), τα οποία έχουν δύο στρωφικές και μία γραμμική άρθρωση. Τα ρομπότ αυτά έχουν μια στρεφόμενη βάση, ένα ανυψούμενο στέλεχος και ένα τηλεσκοπικό βραχίονα που κινείται μέσα και έξω.



Σχήμα 1.7: Αρθρωτά και SCARA ρομπότ.



- **αρθρωτά** (*Articulated robots*), τα οποία έχουν μόνο στροφικές αρθρώσεις. Τα αρθρωτά ρομπότ αποτελούνται από τρεις συνδέσμους που ενώνονται με στροφικές αρθρώσεις και είναι τοποθετημένοι πάνω σε μία στρεφόμενη βάση. Το τελικό στοιχείο δράσης προσαρμόζεται στο άκρο (*καρπός*) του τελευταίου συνδέσμου του βραχίονα και συνήθως μπορεί να εκτελέσει τρεις διαφορετικές στροφικές κινήσεις (στροφή, κύλιση και ανύψωση). Δομικά, τα αρθρωτά ρομπότ ομοιάζουν στο ανθρώπινο χέρι περισσότερο από οποιαδήποτε άλλα βιομηχανικά ρομπότ.
- **SCARA** (*Selective Compliance Articulated Robot Arm*), τα οποία είναι συνδυασμός των κυλινδρικών και των αρθρωτών ρομπότ.

Τέλος, οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να ταξινομηθούν επιπλέον με βάση τον τύπο κίνησής τους σε ρομπότ **σημείου προς σημείο** (τα ρομπότ κινούνται μεταξύ συγκεκριμένων σημείων, η ακολουθία των οποίων είναι αποθηκευμένη στον υπολογιστή του ρομπότ) και σε ρομπότ **συνεχούς δρόμου** (τα ρομπότ διαγράφουν μια συνεχόμενη τροχιά, η οποία είναι αποθηκευμένη στον υπολογιστή του ρομπότ). Επειδή δε, στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με ρομποτικούς βραχίονες, παντού στα επόμενα κεφάλαια με τον όρο *ρομπότ* θα αναφερόμαστε μόνο σε ρομποτικούς βραχίονες σταθερής βάσης.


### **Κινούμενα ρομπότ**

Τα κινούμενα ρομπότ είναι αυτά τα ρομποτικά συστήματα που μπορούν να μετακινήσουν όλα τα μέρη τους (και τη βάση) χάρη ειδικών συστημάτων προώθησης (τροχοί, προπέλες, μηχανικά πόδια, jets κ.λπ.). Τα ρομπότ του είδους αυτού, που καλούνται «κινούμενοι ρομποτικοί χειριστές», χρησιμοποιούνται για προσφορά υπηρεσιών, όπως μεταφορά υγειονομικού και λοιπού υλικού στα νοσοκομεία, μεταφορά φαρμάκων σε μεγάλες φαρμακαποθήκες, συλλογή φρούτων από δέντρα, κούρεμα προβάτων, κ.ο.κ. Χρησιμοποιούνται επίσης σε υποθαλάσσιες έρευνες για τη συλλογή οργανισμών, καθιζημάτων και άλλων αντικειμένων σε βάθη ωκεανών που είναι απαγορευτικά για τον άνθρωπο, αλλά και σε έρευνες στο εσωτερικό ηφαιστειών.

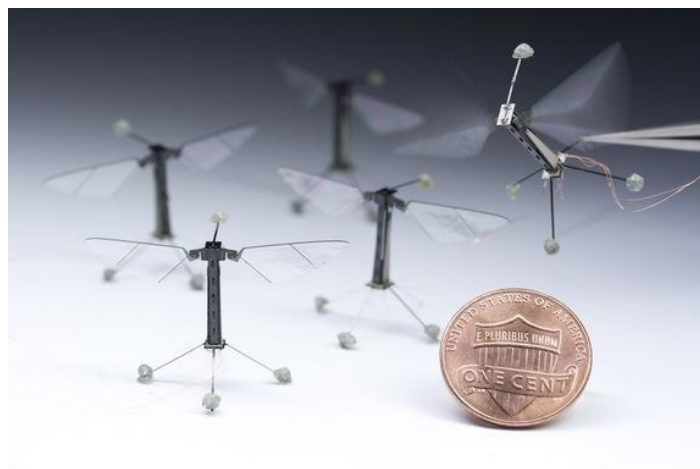


Σχήμα 1.3: Αυτόματο έντροχο ρομπότ, Curiosity (rover) της NASA



<p><b>MOVE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 25 Degrees of Freedom</li> <li>✓ Smooth and precise coreless motors controlled by software</li> <li>✓ Complex movement capabilities</li> </ul>		<p><b>SENSE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2 HD camera</li> <li>✓ 4 microphones</li> <li>✓ 8 Force Sensing Resistors (FSR)</li> <li>✓ Inertial Center</li> <li>✓ 2 Bumpers, 4 Sonars</li> </ul>
<p><b>INTERACT</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2 loudspeakers</li> <li>✓ Multiples LEDs</li> <li>✓ Tactile Sensors</li> <li>✓ Prehensile Hands</li> <li>✓ Infrared Sensors</li> <li>✓ WIFI Connexion</li> </ul>		<p><b>« Think »</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Intel Atom 1,6 GHz CPU</li> <li>✓ 1Gb Mb RAM</li> <li>✓ 8 Gb Flash Memory</li> <li>✓ Software Suite</li> </ul>

Σχήμα 1.4: Δύο βαδίζοντα ρομπότ: Τετράποδο Wildcat Robot (πάνω) και ανθρωποειδής NAO Robot (κάτω).



Σχήμα 1.5: Το εναέριο ρομπότ Harvard RoboBee

### **Ιατρικά ρομπότ**

Τα ιατρικά ρομπότ διακρίνονται σε «μακρο-ρομπότ» (χειρουργικά ρομπότ, ρομπότ αποκατάστασης ΑΜΕΑ, αυτόνομες ρομποτικές καρτέκλες) και «μικρο-ρομπότ» (για καθοδηγούμενη από εικόνες χειρουργική, ελάχιστης επέμβασης/ενδοσκοπική χειρουργική, αγγειοπλαστική, εμβολισμός (γέμισμα) εγκεφαλικών ανευρυσμάτων κ.α.). Τα ιατρικά ρομπότ ενισχύονται σημαντικά από τηλεχειριστές και εικονική πραγματικότητα, ιδιαίτερα όταν ο ασθενής δεν μπορεί να μεταφερθεί στον τόπο του ειδικευμένου χειρουργού (τραυματίες πολέμου, ασθενείς απομακρυσμένων νησιών κ.λπ.). Ένα ιατρικό ρομπότ ευρείας χρήσης είναι το χειρουργικό ρομπότ Da Vinci [1].



**Σχήμα 1.8: Χειρουργικό ρομπότ Da Vinci.**

### **Τηλερομπότ**

Τα τηλερομπότ συνδυάζουν τηλεχειρισμό από τον άνθρωπο και αυτονομία και μπορούν να λειτουργήσουν τόσο σε ημιδομημένα όσο και σε πλήρως αδόμητα περιβάλλοντα. Μπορούν να εκτελούν μη επαναλαμβανόμενες εργασίες χωρίς να έχουν τέλεια γνώση του χώρου εργασίας τους. Το μεγαλύτερο πρόβλημά τους είναι οι μεταβαλλόμενες χρονικές καθυστερήσεις ανάμεσα στο ρομπότ και το χειριστή, που οφείλονται κυρίως στα συστήματα επικοινωνίας. Οι κυριότερες εφαρμογές τους είναι οι ιατρικές, οι υποθαλάσσιες και οι διαστημικές εφαρμογές.

### **Κοινωνικά ρομπότ**

Κοινωνικό ρομπότ είναι ένα αυτόνομο ρομπότ που επικοινωνεί και αλληλοεπιδρά με τον άνθρωπο ακολουθώντας κανόνες κοινωνικής συμπεριφοράς τους οποίους έχει διδαχθεί και μάθει.

Εν συντομία, τα ρομπότ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορες μεθόδους ανάλογα με:

- το μέγεθος (μικρά, μεγάλα)
- το είδος παροχής ισχύος (ηλεκτρικά, πνευματικά, υδραυλικά)
- τη γενιά σχεδιασμού (πρώτη, δεύτερη ή τρίτη γενιά)
- τη δυνατότητα κίνησης (σταθερής βάσης, κινούμενα)
- το περιβάλλον εργασίας (επίγεια, εναέρια, υποβρύχια, διαστημικά)
- τη μορφή και τον εξωτερικό σχεδιασμό (ρομποτικοί βραχίονες, ανθρωποειδή, κ.λπ.) τον αριθμό αρθρώσεων και το είδος των ελεγκτών των κινητήρων τους (στους ρομποτικούς βραχίονες)

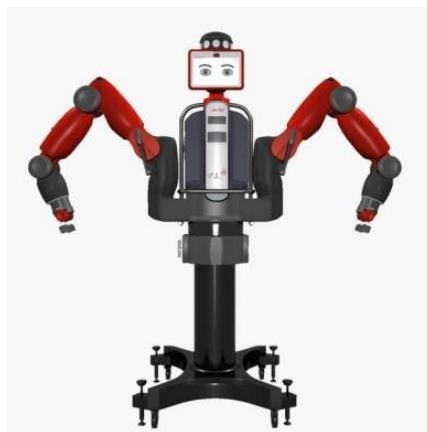
### **Κατηγοριοποίηση ρομπότ ως προς την εξέλιξή τους**

Η γενιά σχεδιασμού (*design generation*) είναι ενδεικτική του επιπέδου της τεχνολογίας ενός ρομπότ στο σύνολό της. Έτσι έχουμε ρομπότ :

- **πρώτης γενιάς** (*first generation*). Τα ρομπότ αυτά ήταν τα πρώτα που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιούσαν σταθερά σειριακά προγράμματα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται επαναπρογραμματισμός τους πριν να μπορέσουν να εκτελέσουν μία διαφορετική εργασία. Δε διέθεταν αισθητήρες και ο όποιος έλεγχος γινόταν μέσω ενός κλειστού βρόχου συστήματος ελέγχου. Το Ultimate της Unimation είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ρομπότ πρώτης γενιάς.
- **γενιάς 1.5** (*1.5 generation*). Χρησιμοποιώντας αισθητήρες και συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου (σερβομηχανισμοί), τα ρομπότ αυτά μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες καταστάσεις, δεν μπορούν όμως να διορθώσουν μόνα τους το πρόβλημα και χρειάζονται ανθρώπινη παρέμβαση. Τα ρομπότ της γενιάς 1.5 είναι αυτά που σήμερα κυριαρχούν στο χώρο της βιομηχανίας.
- **δεύτερης γενιάς** (*second generation*). Δεν χρησιμοποιούνται ακόμη στη βιομηχανία. Η χρήση οπτικών συστημάτων, σε συνδυασμό με καλύτερα συστήματα κίνησης, καθώς και η εκτεταμένη χρησιμοποίηση “ευφυέστερων” επεξεργαστών και συστημάτων αναγνώρισης φωνητικών

προτύπων, επεκτείνουν τη χρησιμότητα και την ευελιξία των ρομποτικών συστημάτων, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα λήψης αποφάσεων και πραγματοποίησης μικρών διορθώσεων και προσαρμογών στους χειριστές από τα ρομπότ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ρομπότ δεύτερης γενιάς είναι το εξερευνητικό όχημα της NASA που εστάλη στον πλανήτη Άρη (*Mars Exploration Spirit Rover*).

- **γενιάς 2.5 (2.5 generation).** Τα ρομπότ αυτά αποτελούν την άμεση εξέλιξη των πιο σύγχρονων σημερινών βιομηχανικών ρομπότ στο άμεσο μέλλον. Οι λειτουργίες των κινητήρων των ρομπότ αυτών εμφανίζουν έναν βαθμό “ευφυΐας” και αυξημένες πολύπλοκες “δεξιότητες”. Οι αποκρίσεις σε διεγέρσεις των αισθητήρων τους θα παράγουν τον έλεγχο της κίνησής τους. Έτσι, όταν μια αρχική ακολουθία βημάτων παρέχεται στα ρομπότ σχετικά με την επιθυμητή εργασία, αυτά θα είναι σε θέση να αποφασίσουν το πλάνο ενεργειών που θα ακολουθήσουν για να αποπερατώσουν το έργο τους.
- **τρίτης γενιάς (third generation).** Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα ρομπότ που εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλο δείκτη ευφυΐας (Σχήμα 1.9). Έχοντας στη διάθεσή τους μόνο γενικές πληροφορίες επί των εργασιών που πρέπει να εκτελέσουν θα μπορούν να αποφασίσουν ποιος είναι ο καλύτερος τρόπος για να δράσουν προς επιτυχή ολοκλήρωση του έργου τους. Τα ρομπότ αυτά βρίσκονται ακόμη σε στάδιο έρευνας και πειραματικών σχεδιασμών.



Σχήμα 1.9: Το ρομπότ τρίτης γενιάς, Baxter.

## Το μέλλον των ρομπότ

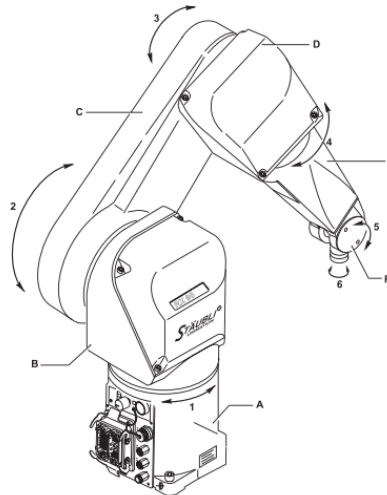
Τα σύγχρονα ρομπότ έχουν μηχανικές και νοητικές ικανότητες που προηγουμένως ανήκαν στη σφαίρα επιστημονικής φαντασίας. Η ανάπτυξή τους θα συνεχίσει να επεκτείνεται με ολοένα νέα είδη ρομπότ κατάλληλα για τη βιομηχανία, την επιστήμη και την καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Η έρευνα και ανάπτυξη προς την κατεύθυνση αυτή συνεχίζεται αδιάκοπα έχοντας ως βασική προτεραιότητα την ασφάλεια και άνεση του ανθρώπου και την απαλλαγή του από δύσκολες, επίπονες και επικίνδυνες εργασίες.

### 1.1.4 Ρομποτικός βραχίονας Stäubli RX90

Ο βραχίονας αποτελείται από τμήματα ή μέλη διασυνδεδεμένα με αρθρώσεις. Κάθε σύνδεσμος περιλαμβάνει έναν άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται δύο μέλη. Η κίνηση των αρθρώσεων του ρομπότ, παράγεται από κινητήρες χωρίς ψήκτρεις (brushless motors) συζευγμένους με γωνιοαναλυτές (resolvers).

Αυτή η εύρωστη και αξιόπιστη συναρμολόγηση, σε συνδυασμό με ένα σύστημα καταμέτρησης, του επιτρέπει τη γνώση της απόλυτης θέσης του ρομπότ οποιαδήποτε στιγμή. Είναι αρκετά ευέλικτος και είναι σε θέση να εκτελέσει μια ποικιλία εφαρμογών, όπως χειρισμός φορτίων (handling of loads), συναρμολόγηση (assembly), διαδικασιών (process) κόλλησης σφαιριδίων (application of adhesive beads), ελέγχου/επιβεβαίωσης (control/check), καθώς και εφαρμογές χώρων εκκένωσης (clean room applications).

Όπως αναφέρθηκε, ο βραχίονας αυτός μπορεί να καλύψει μια ποικιλία εφαρμογών. Από τις παραδοσιακές εφαρμογές ηλεκτροστατικών μεθόδων τα ρομπότ βαφής της Stäubli, μπορούν να καλύψουν όλες τις απαιτήσεις φινιρίσματος σε ένα πολύ ευρύ φάσμα βιομηχανιών όπως: πλαστικών και μεταλλικών κομματιών για κινητήρες μηχανών, κατασκευής ποδηλάτων, ξυλείας, αγροτικού εξοπλισμού, αεροδιαστημικής κ.α. Τα διάφορα μέλη του βραχίονα είναι: base (A), the shoulder (B), the arm (C), the elbow (D), the forearm (E) and the wrist (F).



Σχήμα 1.10: Ρομποτικός βραχίονας Staubli του εργαστηρίου

Χαρακτηριστικά	
Βαθμοί Ελευθερίας	6
Εγκατάσταση	Πάτωμα/Οροφή
Μάζα	112 kg
Μέγιστη Ταχύτητα Εργασίας	11 m/s
Χαμηλή Ταχύτητα για Χειροκίνητη Λειτουργία με το Χειριστήριο	Καρτεσιανή Λειτουργία: 250 mm/s Περιστροφική Λειτουργία: 10% της ονομαστικής ταχύτητας
Max Καρτεσιανή Ταχύτητα	1.5m/s
Ελεγκτής	CS7

Ωφέλιμο Φορτίο	
Στην Ονομαστική Ταχύτητα	6 kg
Σε Μειωμένη Ταχύτητα	9 kg

Περιβάλλον Εργασίας	
Θερμοκρασία Λειτουργίας	+5°C έως +40°C
Υγρασία	30% έως 95% max χωρίς συμπύκνωση (σύμφωνα με το πρότυπο NF EN 60 204-1)
Υψόμετρο	2000m max

Αρθρωση	1	2	3	4	5	6
Εύρος (°)	320	275	285	540	225	540
Εύρος Εργασίας(°)	A=±160	B=±137.5	C=±142.5	D=±270	E=+120,- 105	F=±270
Ονομαστική	236	200	286	401	320	580

<b>Ταχύτητα(°/s)</b>						
<b>Μέγιστη</b>	356	356	296	409	480	1125
<b>Ταχύτητα(°/s)</b>						
<b>Γωνιακή</b>	0.87	0.87	0.72	1	1.17	2.75
<b>Ανάλυση(°·10<sup>-3</sup>)</b>						

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά robot Stäubli RX90.

Το συναρμολόγημα του βραχίονα περιέχει τη μηχανοκίνηση, τα φρένα, τους μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης, δεσμίδες καλωδίων, το πνευματικό και ηλεκτρικό κύκλωμα για το χρήστη, καθώς και το σύστημα αντιστάθμισης.

Το απλής κατασκευής, συναρμολόγημα του βραχίονα RX90 αποτελείται από σταθερή και εγκιβωτισμένη δομή (προστασία IP με το πρότυπο NF EN 60529), για να το προστατεύει από εξωτερικές παρεμβάσεις. Ο σχεδιασμός του βασίζεται σε μονάδες μετάδοσης: JCS (Stäubli Combined Joint) χρησιμοποιούμενος στις αρθρώσεις 1, 2, 3 και 4. Ο καρπός (wrist) αποτελείται από τις αρθρώσεις 5 και 6. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ο βραχίονας έχει ενσωματωμένο σύστημα αντιστάθμισης ελατηρίου, το οποίο του προσδίδει ένα ελκυστικό σύστημα χαμηλού βάρους .

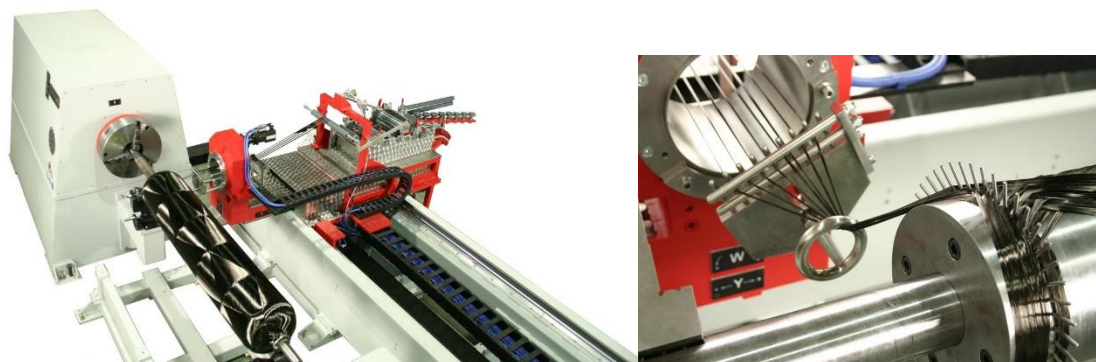
## 1.2 Filament winding

### 1.2.1 Διαδικασία περιέλιξης ινών

Η τύλιξη ινών είναι μία μέθοδος κατασκευής τεμαχίων από σύνθετα υλικά. Αποτελεί μία αρκετά ευέλικτη και επιδέξια διεργασία. Ίνες οι οποίες είναι προεμποτισμένες ή εμβαπτισμένες σε ρητίνη αμέσως πριν την τύλιξη, τυλίγονται γύρω από ένα περιστρεφόμενο καλούπι. Το σχήμα του καλουπιού αντιστοιχεί στην εσωτερική γεωμετρία του παραγόμενου προϊόντος. Οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος αλλάζουν ανάλογα με: την επιλογή της ίνας, τη ρητίνη, την τάση του νήματος και τη γωνία της τύλιξης. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για κατασκευή τεμαχίων με γραμμικό άξονα περιστροφής όπως δεξαμενές πίεσης, σωλήνες, μπαστούνια του γκολφ, περιβλήματα πυραύλων, πύργοι μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ζάντες ποδηλάτων, άτρακτοι αεροσκαφών, κατάρτια ιστιοφόρων. Παρόλο που



για αρκετό χρονικό διάστημα παράγονταν μόνο τέτοιας μορφής αντικείμενα, η τύλιξη ινών χρησιμοποιείται πλέον και για την παραγωγή αντικειμένων σε μορφή T (ταυ), με καμπύλες ή άλλες κατασκευές με μη συμμετρικά σχήματα.



Σχήμα 1.14: Μηχανή περιέλιξης ινών, άξονες κίνησης, περιστρεφόμενο καλούπι, δακτύλιος εναπόθεσης νήματος.

Για την παραγωγή ενός τεμαχίου με τύλιξη ινών δημιουργείται ένα πρόγραμμα CNC με τη βοήθεια διαθέσιμων λογισμικών όπως Cadfil, CADMAC, CADFIBER/CADWIND, CompositaD κ.ά., το οποίο έπειτα εκτελείται από τη μηχανή τύλιξης ινών. Τα βασικά χαρακτηριστικά των λογισμικών είναι κοινά και δεν προσφέρουν επιλογές για τον έλεγχο της διεργασίας πέρα από το γραφικό περιβάλλον του χρήστη-Graphical User Interface (GUI). Ο περιορισμός αυτός αποτελεί πρόβλημα για τις βιομηχανικές εταιρείες όταν πρόκειται για τεμάχιο το οποίο ξεφεύγει από τις συνήθεις γεωμετρίες και το σχήμα του δεν ταιριάζει με τα προφίλ λύσεων ενσωματωμένα στο λογισμικό. Το αποτέλεσμα είναι η επέμβαση στον κώδικα του ήδη υπάρχοντος λογισμικού για να προσαρμοστεί με την εκάστοτε ανάγκη παραγωγής.

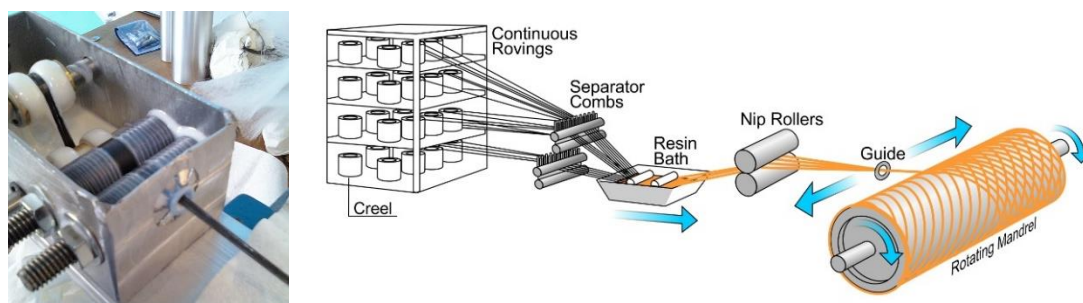
Ακόμη μία πρόκληση της τύλιξης ινών είναι η τρισδιάστατη μοντελοποίηση και ανάλυση. Η μοντελοποίηση ενός τεμαχίου μεγάλης ακρίβειας με τη μέθοδο της τύλιξης ινών με στρώσεις είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα. Η κατάλληλη διαδικασία παραγωγής του τεμαχίου μελετάται με εξειδικευμένο λογισμικό, διαφορετικά το αποτέλεσμα θα είναι μία φτωχή προσέγγιση.

Η τύλιξη ινών είναι μία πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία, όπου τυλίγονται συνεχώς ίνες γύρω από ένα περιστρεφόμενο καλούπι. Κατά τη διάρκεια της τύλιξης οι ίνες τοποθετούνται στο καλούπι με μία επαναλαμβανόμενη

γεωμετρία σχηματίζοντας διάφορες στρώσεις. Λόγω της αυτοματοποίησης καθίσταται κατάλληλη για διεργασίες υψηλής ακρίβειας. Ελέγχοντας την επιλογή των ινών και της ρητίνης, την τάση του νήματος και την διαδρομή της ίνας πάνω στο καλούπι, επηρεάζονται οι μηχανικές ιδιότητες και η ακρίβεια του τελικού προϊόντος.[12]

## 1.2.2 Τύποι ινών

Οι ίνες τυλίγονται με συνεχή τρόπο γύρω από το καλούπι, εκτός από τη σπάνια περίπτωση που χρειαστεί αλλαγή της ανέμης. Όπως και να έχει οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού κομματιού δεν θα επηρεαστούν. Τα πιο συνηθισμένα υλικά περιέλιξης είναι ίνες άνθρακα ή υάλου. Τα νήματα είναι προεμποτισμένα σε ρητίνη (prepreg) ή υγρά νήματα που εμποτίζονται επιτόπου πριν την τύλιξη (wet winding).



Σχήμα 1.15: Νήμα που εμβαπτίζεται σε ρητίνη

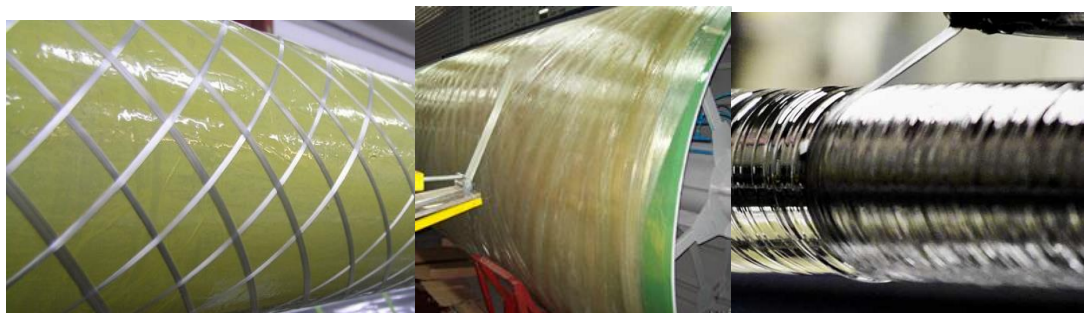
Τύπος ίνας	Τάση Εφελκυσμού (GPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση κατά την αστοχία (%)	Πυκνότητα ( $g/cm^3$ )	Συντελ. Θερμικής διαστολής ( $10^{-6}/K$ )	Διάμετρος ίνας ( $\mu m$ )
<b>Glass</b>						
E-Glass	3.45	75.84	4.7	2.58	4.9-6	5-20
S-2 Glass	4.48	86.87	5.6	2.48	2.9	5-10
Quartz	3.38	68.95	5	2.15	0.5	9
<b>Organic</b>						
Kevlar 29	3.62	82.74	4	1.44	-0.2	12
Kevlar 49	3.79	131	2.8	1.44	-0.2	12
Kevlar 149	3.45	186.16	2	1.47	-0.2	12
Spectra 1000	3.10	172.37	0.7	0.97	-----	27
<b>PAN Based Carbon</b>						
Standard Modulus	3.45-4.83	220.63-241.32	1.5-2.2	1.8	-0.4	6-8

Intermediate Modulus	4.14-6.21	275.79-296.47	1.3-2	1.8	-0.6	5-6
High Modulus	4.14-5.52	344.74-448.16	0.7-1	1.9	-0.75	5-8
<b>Pitch Based Carbon</b>						
Low Modulus	1.38-3.10	172.37-241.32	0.9	1.9	-----	11
High Modulus	1.90-2.76	379.21-620.53	0.5	2	-0.9	11
Ultra High Modulus	2.41	689.48-965.27	0.3	2.2	-1.6	10

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες ινών από σύνθετα υλικά.

Η τύλιξη ινών με προεμποτισμένα νήματα (prepreg) προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα απ' ό,τι αυτή με το υγρό νήμα (wet winding) για την παρούσα εργασία. Πρώτα απ' όλα τα προεμποτισμένα νήματα επιτρέπουν τον έλεγχο της περιεκτικότητας σε ρητίνη μιας κατασκευής με αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού κατεργασμένου κομματιού να είναι πιο ομαλές και προβλέψιμες. Επίσης, οι ίνες κατανομούνται ταχύτερα και η παραγωγή αυξάνει. Η μέθοδος prepreg διατηρεί πιο καθαρή επιφάνεια εργασίας με σημαντικά μειωμένους περιβαλλοντικούς κινδύνους για τους χειριστές, καθώς έχει μικρή έως μηδαμινή εκπομπή πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile Organic Compound) και ενώσεων που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος (Ozone Depleting Compounds). Έτσι δικαιολογείται το αυξημένο κόστος με τη χρήση των προεμποτισμένων νημάτων. Τα prepregs αποθηκεύονται στην κατάψυξη και δυστυχώς έχουν μικρό χρόνο ζωής σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η εταιρεία Thiookol έχει εφεύρει μία οικογένεια νημάτων που μπορούν να διατηρηθούν στο περιβάλλον για τουλάχιστον ένα έτος.

Τα υγρά νήματα εμποτισμένα σε ρητίνη συμβάλλουν στο χαμηλότερο κόστος των πρώτων υλών και στην πιο απλή αποθήκευση. Ωστόσο η ταχύτητα απόθεσης των ινών είναι χαμηλότερη και λιγότερο ακριβής. Πολλές κατασκευές με υγρά νήματα χρειάζονται επιπλέον κατεργασία του εξαρτήματος πριν από την τελική, για την αποτροπή διάχυσης επιπλέον ρητίνης. Το μειονέκτημα είναι μεγαλύτερος χρόνος για την υλοποίηση και ο χρονοβόρος καθαρισμός των μηχανημάτων.



Σχήμα 1.16: Ίνες υάλου, αραμιδίου και άνθρακα.

Οι ίνες υάλου είναι οι επικρατέστερες μιας και έχουν χαμηλό κόστος, είναι εύκολες στο χειρισμό, έχουν καλές ιδιότητες κρούσης και αντοχής, μέτρο ελαστικότητας 72-85 GPa και είναι συμβατές με συστήματα εποξειδικής ρητίνης. Για βιομηχανικά προϊόντα επιλέγεται ο τύπος υαλονήματος E-glass. Για αεροδιαστημικά και υψηλής απόδοσης δοχεία πίεσης χρησιμοποιείται ο τύπος S-2 glass, διότι έχει υψηλότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας. Συνήθως τα πλέγματα περιέχουν μεταξύ 400 και 1000 μεμονωμένα υαλονήματα τα οποία έχουν προσαρμοστεί για εύκολο χειρισμό και έχουν κατεργαστεί ώστε να βελτιστοποιείται η σύνδεση με τη μήτρα-καλούπι. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση ταινιών αντί για νήματα μειώνει το χρόνο παραγωγής μιας και η επιφάνεια του καλουπιού καλύπτεται ταχύτερα. Επιπλέον ανόργανες ίνες που χρησιμοποιούνται επιτυχώς αποτελούνται από αλουμίνα, ανθρακοπυρίτιο ή χαλαζία [20].

Κατά τη διάρκεια της περιέλιξης ινών τα νήματα υπόκεινται σε μία συστροφή καθώς βγαίνουν από την ανέμη και τοποθετούνται στο περιστρεφόμενο ή και όχι καλούπι. Σε εμπορικές εφαρμογές θεωρείται αποδεκτή η συστροφή στα νήματα ώστε να απλουστεύεται ο χειρισμός τους, στην αεροδιαστημική βιομηχανία ωστόσο και σε άλλες κρίσιμες εφαρμογές προτιμώνται νήματα χωρίς συστροφή για να επιτυγχάνονται υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

Επίσης χρησιμοποιούνται ίνες αραμιδίου (Kevlar) σε τεμάχια με μεγαλύτερες καταπονήσεις εφελκυσμού μιας και έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τις ίνες υάλου, αλλά το μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν μικρή αντοχή σε θλίψη και διάτμηση [17].

Τέλος οι ίνες άνθρακα είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που απαιτείται η μέγιστη απόδοση. Έχουν χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο τα ανθρακονήματα είναι πολύ πιο ακριβά από ότι οι ίνες υάλου ή αραμιδίου [2].

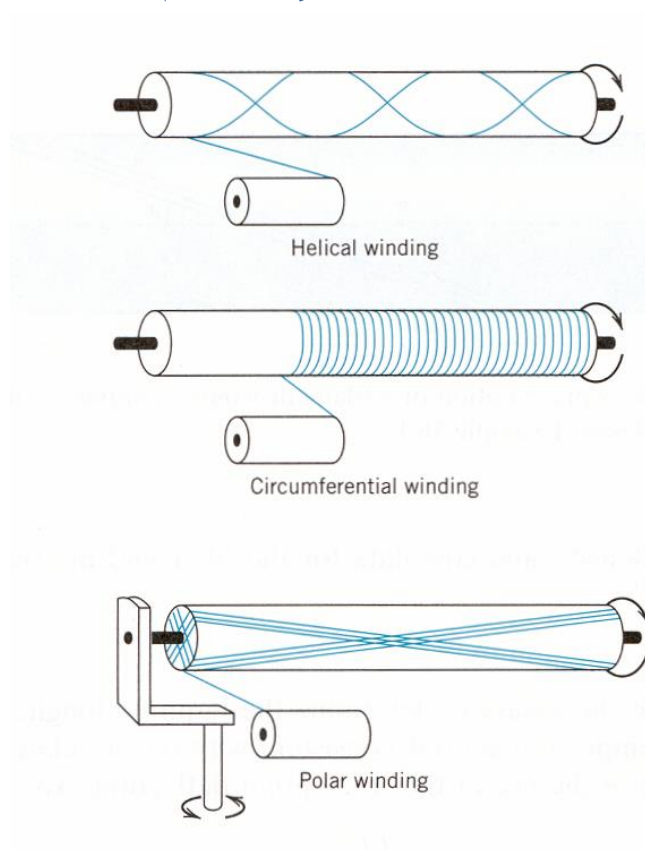
Για την παραγωγή διαφόρων ειδών σύνθετων προϊόντων, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της τάσης των ινών [8]. Η απαιτούμενη τάση εξαρτάται άμεσα από το είδος και υλικό των ινών που χρησιμοποιείται, από τη διάμετρο του κομματιού και από τον προσανατολισμό των ινών. Το βασικό σύστημα που χρησιμοποιείται για τον παραπάνω έλεγχο είναι ο έλεγχος της ανέμης με το νήμα από Ηλεκτρονικό Υπολογιστή [25]. Αυτό το σύστημα παρέχει ακριβή επιμέρους ελεγχόμενη τάση της κάθε ίνας [14]. Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος γίνεται με μηχανικά ελεγχόμενο σύστημα μεταξύ δύο επιφανειών τριβής.

Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν τη δυνατότητα για βελτιστοποίηση κατασκευών.

Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι:

- Η χαμηλή πυκνότητα, η υψηλή αντοχή και το μεγάλο μέτρο ελαστικότητας έχουν ως αποτέλεσμα κατασκευές ανθεκτικές και ελαφριές.
- Η κατασκευή είναι ακόμη πιο ανθεκτική όταν οι ίνες έχουν την κατεύθυνση της βασικής καταπόνησης.
- Το τελικό προϊόν είναι πολύ ανθεκτικό σε διάβρωση και σε αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος.
- Καλύτερες ιδιότητες σε ταλαντώσεις με συντονισμό και απόσβεση.
- Πολύ χαμηλή θερμική διαστολή.
- Πολύ καλή αντοχή σε κόπωση.
- Χρήση σε κατασκευές υψηλής ασφαλείας για απορρόφηση ενέργειας.

### 1.2.3 Μέθοδοι περιέλιξης ινών



Σχήμα 1.17: Ελικοειδής, περιφερειακή και πολική περιέλιξη νήματος

#### Ελικοειδής περιέλιξη (Helical winding)

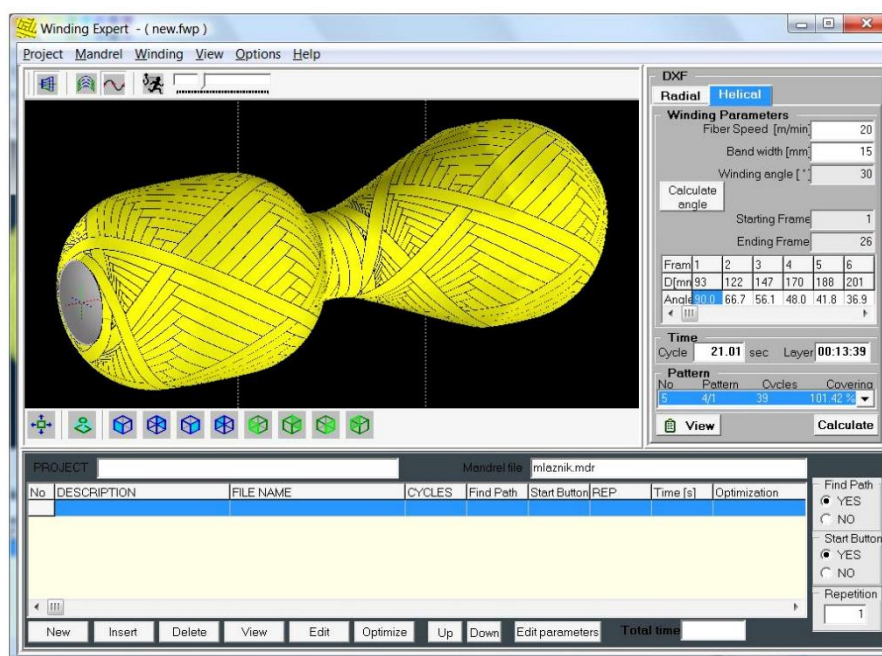
Στην ελικοειδή περιέλιξη χρησιμοποιούνται γωνίες που κυμαίνονται από 5° έως 80°. Είναι αναγκαίο, ανάλογα με τη γωνία περιέλιξης, το καλούπι να περιστραφεί αρκετές φορές μέχρι να καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνειά του. Μερικές φορές το κατώτατο όριο είναι μεταξύ 10°-15° λόγω ολίσθησης στα άκρα τις ατράκτου που στηρίζουν το καλούπι. Ωστόσο για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός τοποθετούνται προσωρινοί πείροι στα άκρα της ατράκτου. Η γωνία περιέλιξης μπορεί να εκφρασθεί ως

$$\alpha = \frac{v}{\pi DN}$$

Όπου  $\alpha$  η γωνία της έλικας,  $v$  η ταχύτητα σάρωσης κατά μήκος του καλουπιού σε m/sec,  $D$  η διάμετρος της ανέμης σε m (meters),  $N$  η ταχύτητα περιστροφής του κομματιού σε rev/sec [16]. Για να μένει σταθερή η γωνία  $\alpha$  πρέπει να ρυθμίζεται

είτε το  $\nu$  είτε το  $N$  για να αντισταθμιστεί η αλλαγή στη  $D$ . Συνήθως η μηχανή τύλιξης ινών έχει έξι άξονες περιστροφής:

- Περιστροφή καλουπιού: Είναι συνήθως σταθερή κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας τύλιξης.
- Παλινδρομικός οδηγός νήματος: Και αυτός σταθερός, μόνο που συνήθως υπόκειται σε μία επιβράδυνση στις δύο άκρες του καλουπιού, όπου αλλάζει και κατεύθυνση.
- Οριζόντια εγκάρσια πρόωση: Αυτή η κίνηση χρησιμοποιείται στα άκρα του καλουπιού όπου η κεφαλή τοποθέτησης νήματος πρέπει να έρθει πιο κοντά.
- Κάθετη εγκάρσια πρόωση: Συνεργάζεται με την οριζόντια εγκάρσια πρόωση για την βέλτιστη τοποθέτηση νήματος.
- Περιστροφή κεφαλής: Διατηρεί σε σωστό προσανατολισμό την κορδέλα ή το νήμα.
- Ταλάντωση στον κατακόρυφο άξονα (yaw). Προσδιορίζει τη γωνία περιέλιξης.



Σχήμα 1.18: Λογισμικό Winding Expert™

Για την κατάλληλη διαδρομή του νήματος χρειάζεται η δημιουργία G κώδικα ώστε να γίνεται ο πλήρης έλεγχος των αξόνων ανεξάρτητα από τους μικροεπεξεργαστές τους. Οι περισσότερες εκσυγχρονισμένες μηχανές φέρουν

προγράμματα που γίνεται η προσομοίωση της κατεργασίας πριν την αρχή της διαδικασίας. Οι μηχανές περιέλιξης νήματος περιέχουν επίσης αυτόματα συστήματα που ελέγχουν την τάση στο νήμα.

### **Περιφερειακή περιέλιξη (Circumferential winding)**

Η ταχύτητα περιστροφής της ανέμης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του βραχίονα περιέλιξης. Μετά από κάθε πλήρη περιστροφή του καλουπιού ο οδηγός μετακινείται τόσο όσο είναι το πάχος του νήματος ώστε οι στρώσεις να είναι η μία δίπλα στην άλλη. Οι ίνες τυλίγονται στο περιστρεφόμενο καλούπι υπό γωνία περίπου 90 μοίρες με τον άξονα του καλουπιού. Συνήθως συνδυάζεται η περιφερειακή με την ελικοειδή περιέλιξη για την παροχή κατάλληλης αντοχής και στιβαρότητας.

### **Πολική περιέλιξη (Polar winding)**

Είναι πιο απλή από την ελικοειδή μιας και χρησιμοποιείται μία σταθερή ταχύτητα και δεν χρειάζεται η περιστροφή του οδηγού.

Είναι η βέλτιστη μέθοδος για σφαιρικές κατασκευές. Με αυτή τη μέθοδο η ζώνη-νήμα περνάει εφαπτομενικά στο άνοιγμα στην μία άκρη του κομματιού, αντιστρέφεται η κατεύθυνση και έπειτα μετακινείται πάλι εφαπτομενικά στο άλλο άκρο του κομματιού. Η εναπόθεση είναι επίπεδη και οι στρώσεις ζώνης-νήματος δίπλα η μία στην άλλη, μιας και ο βραχίονας περιέλιξης σχηματίζει ένα μεγάλο κύκλο κατά τη διάρκεια του περάσματος του. Οι μηχανές πολικής περιέλιξης έχουν δύο άξονες κίνησης, αυτόν του καλουπιού και αυτόν του βραχίονα περιέλιξης.

Με σκοπό να εξασφαλιστούν οι απόλυτες αντοχές στην κατασκευή με την τεχνική περιέλιξης ινών, γίνεται προσπάθεια όλες οι φορτίσεις να δρουν στη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών. Σε μερικές περιπτώσεις αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα, ειδικά σε κομμάτια που δρουν κυρίως περιφερειακές τάσεις (π.χ. κομμάτια που υπόκεινται σε στρέψη). Σε άλλες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σε κλειστά δοχεία πίεσης, αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την κατάλληλη σχεδίαση του ίδιου δοχείου. Για αυτό το λόγο η πλειονότητα των



δοχείων πίεσης τα οποία κατασκευάζονται με την τεχνική περιέλιξης ινών σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν ακραίο τμήμα το οποίο να είναι διαμορφωμένο ελλειπτικά. [4]

## 1.2.4 Είδη καλουπιών



Σχήμα 1.19: Καλούπι προς περιέλιξη

Το περιστρεφόμενο κομμάτι είναι το καλούπι και αντιστοιχεί στην εσωτερική γεωμετρία του τελικού προϊόντος. Τροποποιώντας το καλούπι μπορεί να επηρεαστεί η εσωτερική επιφάνεια και η τραχύτητα. Αντίστοιχα, άλλες φορές είναι απαραίτητη η επιπλέον κατεργασία της εξωτερικής επιφάνειας αφού έχει ολοκληρωθεί η περιέλιξη. Για παράδειγμα σε αεροδυναμικά τεμάχια όπως κομμάτια αεροπλάνων.



Σχήμα 1.20: Ατράκτος του Boeing 787,



Μεταλλικό πτυσσόμενο καλούπι.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μετά τη διαδικασία της τύλιξης ινών το καλούπι πρέπει να αφαιρεθεί από το τελικό προϊόν, εκτός εάν προορίζεται να

αποτελεί μέρος του προϊόντος. Η επιλογή του καλουπιού εξετάζεται με βάση την εκάστοτε κατάσταση, τις ανοχές θερμότητας και τη γεωμετρία. Μερικές επιλογές για τη σύνθεση του καλουπιού περιλαμβάνουν κομμάτια υδατοδιαλυτά (π.χ. από άμμο), από εύτηκτα άλατα, από γύψο, μεταλλικά πτυσσόμενα, φουσκωτά, από κράματα με χαμηλό σημείο τήξης. Μετά τη σκλήρυνση το καλούπι διαλύεται με ζεστό νερό, λιώνει ή τεμαχίζεται σε μικρά κομμάτια για να αφαιρεθεί, ενώ το φουσκωτό καλούπι μπορεί είτε να μην αφαιρεθεί, είτε να εξαχθεί από κάποιο άνοιγμα. Το καταλληλότερο είδος καλουπιού εξαρτάται από τα διάφορα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της διαδικασίας τύλιξης ινών.

Τα σχεδιαστικά κριτήρια που πρέπει να πληροί το καλούπι είναι:

- **Αντοχή και σταθερότητα:** Να είναι σε θέση να αντέχει το βάρος κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας. Να έχει μία θερμοκρασιακή σταθερότητα ακόμη και στις πιο υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της θερμοσκλήρυνσης.
- **Βάρος:** Το βάρος του πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατόν. Όσο πιο βαρύ τόσο πιο δύσκολος ο χειρισμός και πιο αργές οι μεταβολές στη θερμοκρασία του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- **Θερμική διαστολή:** Το καλούπι πρέπει να είναι σε θέση να διαστέλλεται κατά τη θέρμανση ώστε να ασκεί πίεση στο τελικό προϊόν και να συστέλλεται κατά την ψύξη για να αφαιρείται ευκολότερα. Η πίεση βοηθάει στην συμπύκνωση των στρώσεων και την εξάλειψη των κενών μεταξύ τους.
- **Εύκολη αφαίρεση:** Μετά την σκλήρυνση πρέπει να αφαιρείται εύκολα, εκτός εάν στο σχεδιασμό έχει προβλεφθεί η παραμονή του στο εσωτερικό.
- **Κόστος:** Πρέπει να ορισθεί με βάση την πολυπλοκότητα του κομματιού, την τελική του αξία και το πλήθος τους.



Σχήμα 1.21: Επαναχρησιμοποιούμενο καλούπι

Τα επαναχρησιμοποιούμενα καλούπια μπορούν να αποτελούνται από τμήματα ή και όχι. Συνήθως τα καλούπια που αποτελούνται από πολλά τμήματα είναι πιο ακριβά, αλλά χρησιμεύουν για κομμάτια που η γεωμετρία τους δεν επιτρέπει την μονοκόμματη αφαίρεση του καλουπιού. Τα μονοκόμματα καλούπια έχουν στην επιφάνειά τους ένα λεπτό χάρτινο φύλλο με στόχο την ευκολότερη αφαίρεση. Στα υλικά τους συμπεριλαμβάνονται ο χάλυβας, το αλουμίνιο ή άλλα ανθεκτικά υλικά που προσφέρουν τις απαραίτητες διαστολές και συστολές. Τα πολύ μεγάλα καλούπια κατασκευάζονται με εσωτερικά στηρίγματα.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία στην αναδημιουργία των κομματιών. Η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη και συνεχής, μιας και με την τοποθέτηση μιας ανέμης με νήμα (συνεχές νήμα) διεκπεραιώνεται απευθείας η παραγωγή. Ο προσανατολισμός των ινών ορίζεται στην κατεύθυνση των φορτίων (με  $10^\circ$  να είναι η μικρότερη γωνία περιέλιξης). Δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του τεμαχίου, τα νήματα και η ρητίνη χρησιμοποιούνται στην πιο φθηνή τους μορφή σχεδόν σαν πρώτη ύλη.

Στα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνεται η δυσκολία στην αφαίρεση του καλουπιού, καθώς επίσης και το κόστος του καλουπιού, καθώς λόγω πολυπλοκότητας είναι υψηλό.

# Κεφάλαιο 2

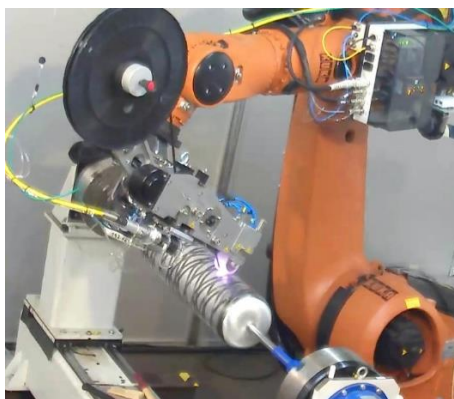
## Ανάλυση του Προβλήματος

### 2.1 Σκοπός της συσκευής

Αρχικά ερευνήθηκε ο σχεδιασμός μηχανοκίνητης συσκευής-κεφαλής του ρομποτικού βραχίονα που θα πραγματοποιεί τύλιξη ινών γύρω από μη αξονοσυμμετρικά τεμάχια κοίλα στο εσωτερικό τους (πχ. σωλήνας με 3 κάμψεις 90 μοιρών σε κάθετα επίπεδα). Η προσέγγιση προσανατολίστηκε ώστε η συσκευή-κεφαλή να περιέχει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα που είναι αναγκαία για την κατεργασία. Συγκεκριμένα, συμπεριλαμβάνει την ανέμη με το νήμα, τον συμπλέκτη τριβής της ανέμης, τους μηχανικούς τεντωτήρες που θα προσδίδουν την υπολειπόμενη τάση, καθώς και το σύστημα προσανατολισμού των ινών.

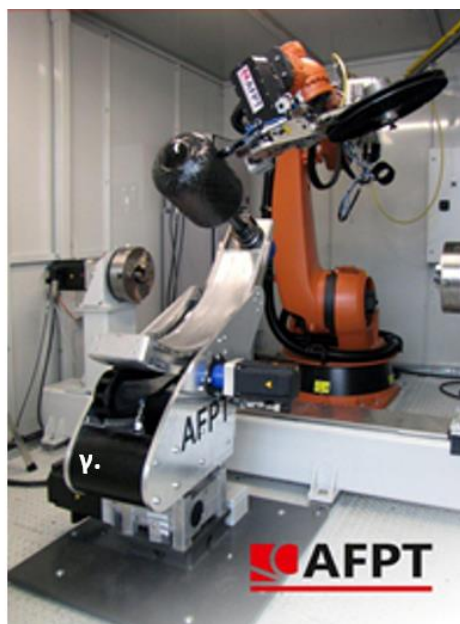
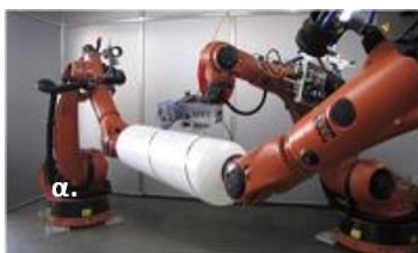
### 2.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες

Με τη βοήθεια του διαδικτύου διαπιστώθηκαν τα είδη συσκευών που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται από ρομποτικούς βραχίονες για τη διαδικασία της τύλιξης ινών.



Σχήμα 2.1: Κεφαλή με λέιζερ από το τεχνικό κέντρο CETIM [21]

Το τεχνικό κέντρο CETIM έχει αναπτύξει πλατφόρμα τύλιξης ινών που κατασκευάζει μεγάλων διαστάσεων κομμάτια από θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (EMC<sup>2</sup> 2013). Έχει ενσωματωμένο ένα σύστημα συγκόλλησης με λέιζερ, η δίοδος του λέιζερ είναι συνδεδεμένη στη ρομποτική κεφαλή με οπτικές ίνες και αναπτύσσει ισχύ 4kW. Η ταχύτητα εναπόθεσης είναι 1Kg θερμοπλαστικού σύνθετου υλικού ανά λεπτό και 1 μέτρο ίνας ανά δευτερόλεπτο.



Σχήμα 2.2: Ρομποτικοί βραχίονες που συνεργάζονται είτε μεταξύ τους, είτε με κινητήρες.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η συνεργασία ρομπότ με περιστρεφόμενα καλούπια. Η τάση του νήματος επιτυγχάνεται με ηλεκτρικούς τεντωτήρες, ενώ το νήμα βρίσκεται πάνω στην κεφαλή. Στο σχήμα (γ.) η μεταλλική βάση περιστρέφεται από έναν κινητήρα και ταυτόχρονα από έναν δεύτερο κινητήρα περιστρέφεται το καλούπι.



Σχήμα 2.4: Αυτοματοποιημένη κεφαλή με 4 μπομπίνες (πηγή: AMRC).

Ο πιο χρησιμοποιημένος ρομποτικός βραχίονας είναι ο KUKA. Συνήθως για αύξηση των βαθμών ελευθερίας σε πολλές εγκαταστάσεις το ρομπότ έχει τη δυνατότητα να κινείται πάνω σε ράγες (Σχήμα 2.5) ή να είναι 7 βαθμών ελευθερίας [10].



Σχήμα 2.5: Ρομπότ Isaac στη NASA.

Στη NASA πρόσφατα κατέφθασε ειδική κεφαλή κατασκευασμένη με χωρητικότητα δώδεκα μπομπίνων για μέγιστη αυτονομία.

Η πιο κοντινή τεχνολογία με αυτή της παρούσας διπλωματικής είναι κεφαλή που αναπτύχθηκε με μηχανικό συμπλέκτη αλλά χωρίς δυνατότητα μετέπειτα επιπλέον τάσης νήματος πέρα από το συμπλέκτη [19].

## 2.3 Ανάγκες και Προδιαγραφές

Παρατηρώντας τα μοντέλα που κυκλοφορούν μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν υπάρχει καμία κεφαλή η οποία να διευκολύνει μικρά εργαστήρια τα οποία έχουν ανάγκη την κατασκευή μικρών κομματιών, με ένα πολύ φθηνό σύστημα διατήρησης της τάσης του νήματος, σε περιπτώσεις που υπάρξει για κάποιο λόγο αλλαγή πορείας του ρομπότ, με αποτέλεσμα τη χαλάρωση του νήματος.

Οι τεχνικές προδιαγραφές σύμφωνα με τις ανάγκες είναι οι εξής:

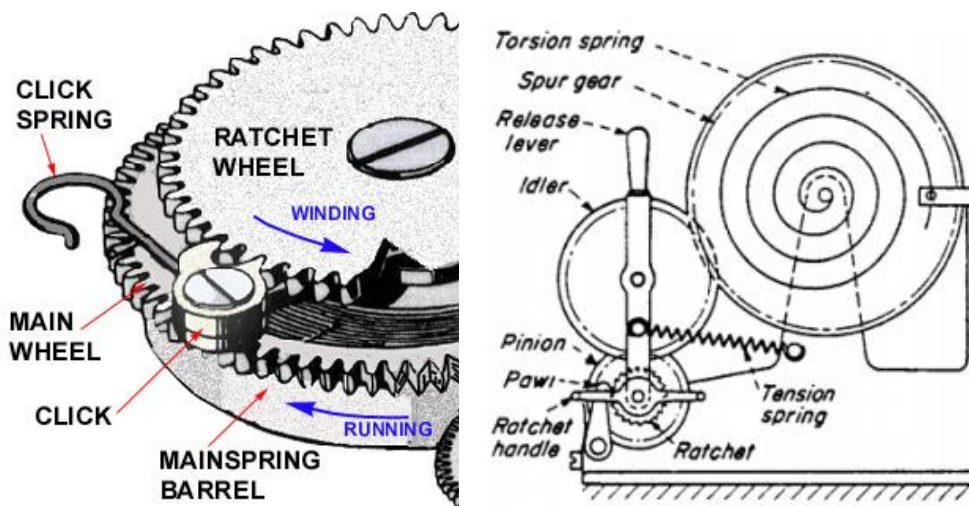
- Αυτόνομη κεφαλή για πλήρη περιστροφή 360 μοιρών.
- Ικανότητα στήριξης ανέμης με νήμα από σύνθετα υλικά.
- Εύκολα αποσπώμενη ανέμη για άμεση αντικατάσταση νέου νήματος.
- Μέγιστο βάρος κεφαλής μαζί με το νήμα  $\leq 5\text{Kg}$ .
- Μικρός όγκος μηχανήματος για μεγαλύτερη ευελιξία γύρω από το καλούπι.
- Να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος.
- Ο πειραματιστής να μη χρειάζεται καθόλου να ασχολείται με την εφαρμογή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.
- Μηχανικό σύστημα για τη διατήρηση τάσης, ανάλογα με τις ανάγκες του τελικού προϊόντος.
- Μηχανικό σύστημα ανάκτησης έκτασης νήματος στην περίπτωση περιίσεως.

# Κεφάλαιο 3

## Αρχικός Σχεδιασμός

Τα πρώτα στάδια σχεδιασμού περιλαμβάνουν τις παρακάτω ιδέες. Πρώτα προτείνεται ένα μηχανικό σύστημα τάσης νήματος και έπειτα μελετάται η αντοχή της κατασκευής με Πεπερασμένα Στοιχεία στο Static Simulation του Solidworks.

Για την απαίτηση της ανάκτησης νήματος με μηχανικό τρόπο δεν βρέθηκε λύση. Η προσέγγιση έγινε με την ιδέα να ενσωματωθεί ένας μηχανισμός καστάνιας με σπιράλ ελατήριο, όπου όταν θα χαλαρώνει η τάση το ελατήριο θα ξετυλίγεται και θα περιστρέφεται η ανέμη με το νήμα από την αντίθετη φορά. Το ελατήριο όμως μπορεί να έχει μόνο περιορισμένες περιστροφές οπότε δε λήφθηκε υπόψιν ως λύση.

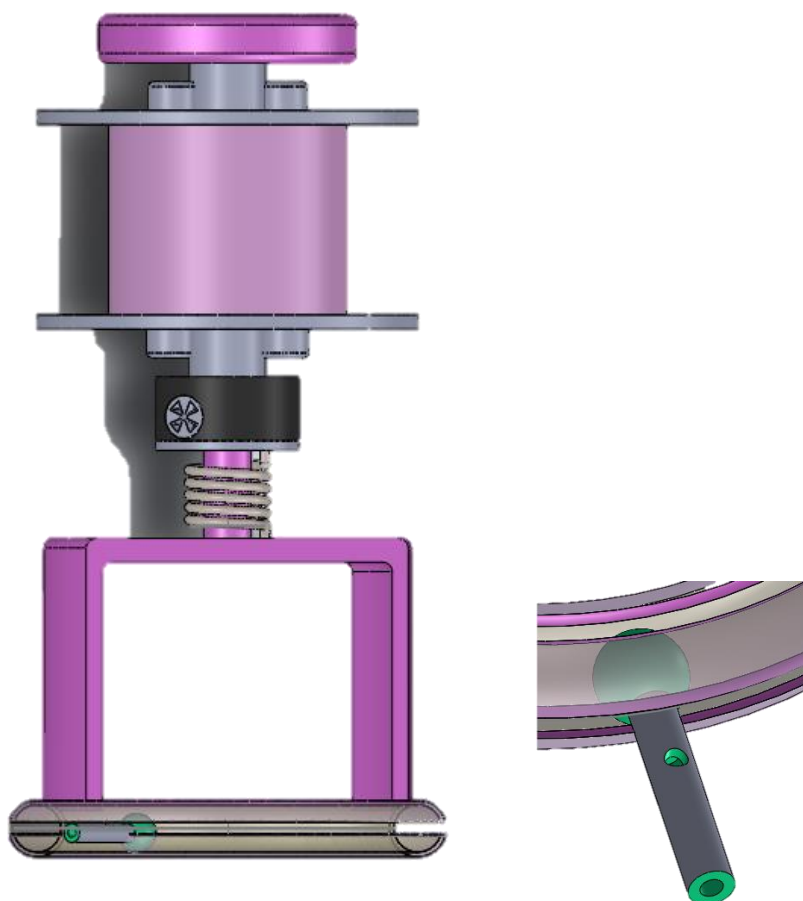


Σχήμα 3.1: Μηχανισμοί καστάνιας με σπιράλ ελατήρια.



### 3.1 Λύση Πρώτη

Η πρώτη κεφαλή έχει ως στόχο, καθώς θα περιστρέφεται γύρω από το κομμάτι το κινούμενο σφαιρίδιο (Σχήμα 3.2), να ακολουθεί την κίνηση του νήματος και έτσι να είναι πάντα προσαρμοσμένο στην τροχιά.



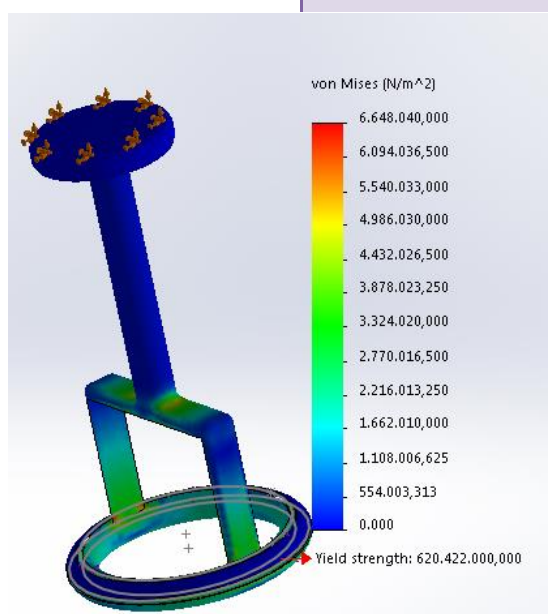
Σχήμα 3.2: Αυτόνομη κεφαλή με εσωτερική σφαίρα διανομής νήματος.

Το νήμα ξετυλίγεται από το καλούπι, εισέρχεται στην οπή που βρίσκεται πάνω στον άξονα που είναι προσαρμοσμένος στο σφαιρίδιο και εξέρχεται από την κάθετη οπή στο άκρο του άξονα (Σχήμα 3.2). Το σύστημα συμπλέκτη που αποτελείται από το μαύρο πλαστικό κύλινδρο, τον αλουμινένιο δίσκο, το ελατήριο και τη βίδα «σκουλήκι», αναλύεται παρακάτω λεπτομερώς. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αυτή τη διάταξη ο πλαστικός κύλινδρος πακτώνεται στο δίσκο που συγκρατεί το καλούπι και το ελατήριο από τη μία μεριά στο σκελετό και από την άλλη στον αλουμινένιο δίσκο. Η διαστασιολόγηση έγινε με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και διεκπεραιώθηκε με τον υπολογισμό τάσεων Von

Mises προσομοιώνοντας τις δυνάμεις που ασκούνται στο μοντέλο. Παρατηρήθηκε σε ποια σημεία η καταπόνηση ήταν μεγαλύτερη από την επιτρεπτή και έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στις διαστάσεις της για να αυξηθεί η αντοχή.

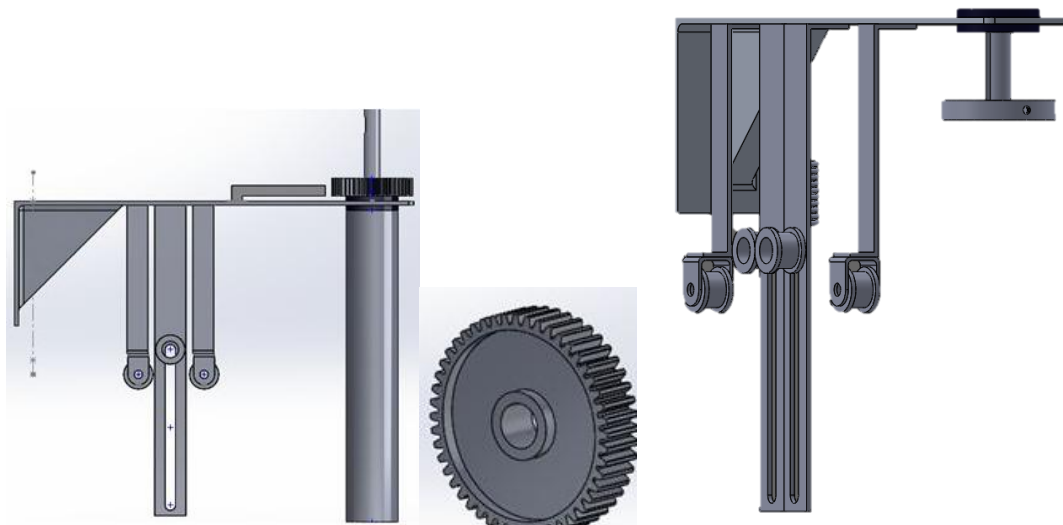
Η τάση καταπόνησης που απεικονίζεται είναι 60N, αλλά δοκιμάστηκε μέχρι και στα 100N όπου η κατασκευή συνέχισε να είναι ασφαλής. Παρατηρείται ότι η τάση διαρροής είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη τάση ( $620\text{MN/m}^2 \gg 6\text{MN/m}^2$ ).

Ιδιότητες (Alloy Steel)	Τιμές	Μονάδες
Elastic Modulus	2.1e+011	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	7.9e+010	N/m <sup>2</sup>
Density	7700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	723825600	N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/m <sup>2</sup>
Yield Strength	620422000	N/m <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.3e-005	/K
Thermal Conductivity	50	W/(m·K)
Specific Heat	460	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

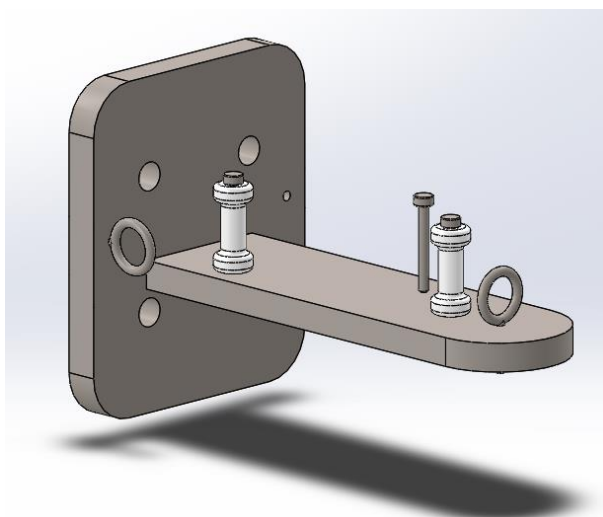


Σχήμα 3.3: Έλεγχος Αντοχής κατά Von Mises

## 3.2 Λύση Δεύτερη



Σχήμα 3.4: Σύστημα για την κάλυψη μεγάλου μεγέθους καλουπιών.



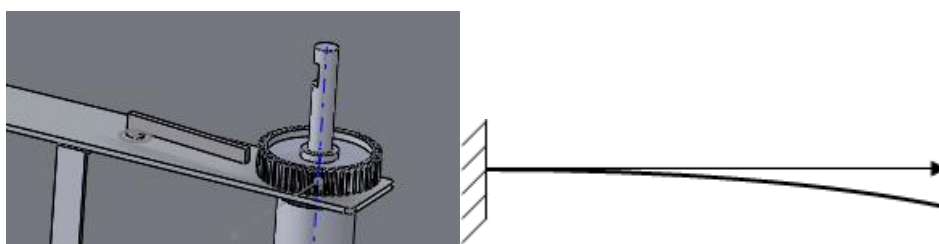
Σχήμα 3.5: Κεφαλή που λαμβάνει το νήμα από το σταθερό σύστημα [13]

Ο δεύτερος τύπος κατασκευής έγινε για την παραγωγή μεγαλύτερων κομματιών. Αρχικά σχεδιάστηκε ένα σύστημα ανάπτυξης τάσης όπου ένα έλασμα ταχυχάλυβα αντιτίθεται στην κίνηση ενός κυλινδρικού γραναζιού. Το γρανάκι αποτελείται από  $Z=50$  οδόντες με ύψος 3.5 χιλιοστά και εξωτερική διάμετρο 78 χιλιοστά, ενώ καταργήθηκε με χρήση τόρνου, ώστε να αφαιρεθεί περιττό υλικό έτσι ώστε να ελαφρύνει η κατασκευή (Σχήμα 3.6). Το γρανάκι είναι στερεωμένο στον άξονα του νήματος με αποτέλεσμα η αντίσταση στην περιστροφή που δημιουργείται από το έλασμα να μεταφέρεται στο νήμα. Καθώς

ξετυλίγεται το νήμα περνάει από τρεις τροχαλίες, οι δύο από τις οποίες είναι σταθερές ενώ η τρίτη μεταβαλλόμενη σε έναν κάθετο άξονα, συνδεδεμένη σε ένα ελατήριο και ένα βαρίδι. Η επιθυμητή τάση νήματος πρέπει να συμπίπτει με το βάρος που τοποθετείται στην κινητή τροχαλία, δηλαδή εάν το νήμα έχει την ορισμένη τάση μπορεί να κρατάει την κινούμενη τροχαλία στο ίδιο ύψος με τις σταθερές. Μόλις χαλαρώσει η τάση η τροχαλία με το βαρίδι θα κινηθεί προς τα κάτω και θα παρασύρει μαζί της την περίσσεια νήματος μέχρι να εξισορροπηθεί το σύστημα. Η θέση της ανέμης με το νήμα επιλέχθηκε να είναι στο κάτω μέρος της διάταξης, έτσι ώστε η κατασκευή να είναι σταθερή, με τις ελάχιστες δυνατές ταλαντώσεις.

Το νήμα περνά από τις τροχαλίες, έπειτα από την κεφαλή πάνω στο ρομπότ πρώτα από την πλαϊνή οπή και μετά από την τελική που διανέμει το νήμα.

Για το έλασμα που αντιτίθεται στην κίνηση του γραναζιού, παρακάτω υπολογίζονται οι διαστάσεις του.



Σχήμα 3.6: Έλασμα που αντιτίθεται στην περιστροφή του οδοντωτού τροχού.

Το σχήμα του παραμορφωμένου άξονα του σώματος ονομάζεται ελαστική γραμμή. Το βέλος κάμψης είναι η μετατόπιση από την αρχική θέση του κάθε σημείου στην τελική (παραμορφωμένη). Η συνάρτηση της κλίσης  $\varphi$  του παραμορφωμένου στοιχείου σε κάθε θέση  $x$  κατά μήκος της δοκού είναι:

$$\varphi(x) = \frac{1}{EI_0} \int M(x) dx + c_1$$

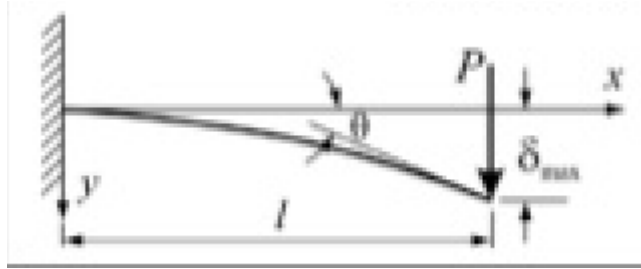
$E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$I_0$  η ροπή αδράνειας

$M(x)$  η ροπή κάμψης για σημείο  $x$  ( $M=Fx$ )

Η ελαστική γραμμή ορίζεται ως :

$$w(x) = \int \varphi(x)dx + c_2$$



$\theta = \frac{Pl^2}{2EI_0}$   $y = \frac{Px^2}{6EI_0}(3l - x)$ , η παραμόρφωση σε κάθε σημείο  $x$  της δοκού,  $\delta_{max} = \frac{Pl^3}{3EI_0}$ , η μέγιστη παραμόρφωση.

$$P = K\delta_{max}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Το έλασμα έχει διαστάσεις  $b=12.3mm$ ,  $h=1.3mm$   $I_0=2.25mm^4$ ,  $\delta_{max} = 5mm$ , με άγνωστο το μήκος  $l$  του ελάσματος για την απαιτούμενη δύναμη των  $P=80N$ . Μέτρο ελαστικότητας  $E$  ταχυχάλυβα 210Gpa.

Κάνοντας τους υπολογισμούς με τα παραπάνω δεδομένα βρίσκεται ότι το μήκος στο οποίο θα πρέπει να στηριχθεί το έλασμα είναι περίπου στα 5 εκατοστά από το ελεύθερο άκρο του ( $l=44.59mm$ ).

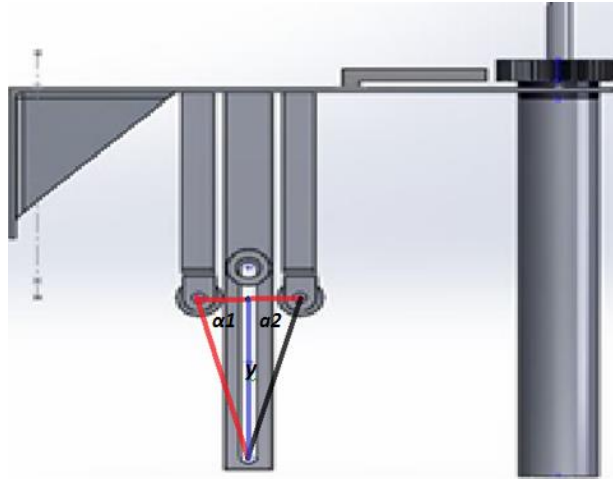
Επίσης οι εμπορικές μπομπίνες νήματος, που μας ενδιαφέρουν για αυτή την περίπτωση, έχουν εσωτερική διάμετρο 76mm και βάρος μικρότερο των 7kg. [27]



Σχήμα 3.7: Συνήθης διάμετρος ανέμης

Για να βρεθεί σε αυτή τη μηχανολογική πρόταση ποιο είναι το μήκος του περισσευόμενου νήματος που μπορεί να τεντώσει το σύστημα τροχαλιών, χρησιμοποιείται το πυθαγόρειο θεώρημα (Κώδικας 3.1). Καθώς ενεργοποιείται το

σύστημα τροχαλιών το βαρίδι αναγκάζει την τροχαλία να μετατοπιστεί κάθετα για μήκος  $y$ , οι οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ των τροχαλιών και της τροχαλίας με το βαρίδι (μεσαία) είναι  $a1$  και  $a2$  αντίστοιχα. Το συνολικό μήκος του τεντωμένου νήματος θα είναι κάθε φορά το άθροισμα των δύο υποτεινουσών μείον των αρχικών μηκών  $a1$  και  $a2$ .



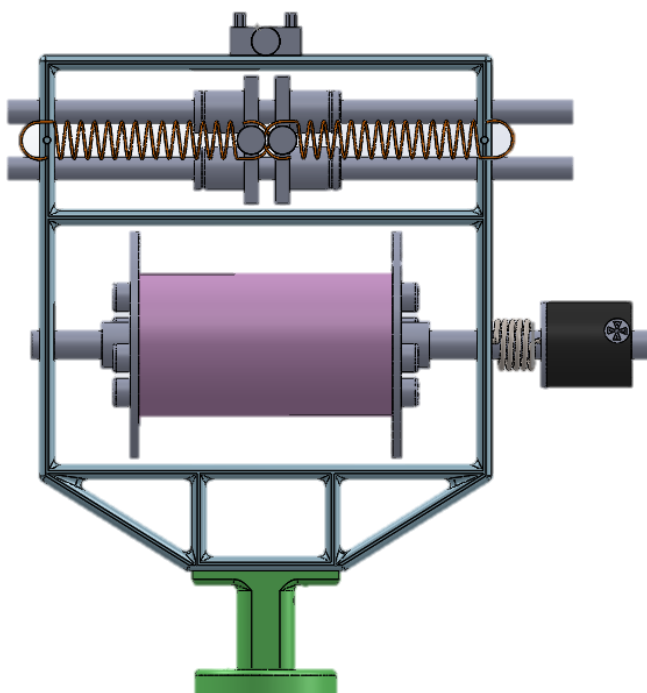
```
%poso mhkos mporei na tentv8ei
a1=32;
a2=32;
y=150; %to y kumenetai apo 0-150mm
ltot=sqrt(y^2+a1^2)+sqrt(y^2+a2^2)-a1-a2
```

Κώδικας 3.1: Πυθαγόρειο Θεώρημα, αποδεκτό μήκος περίσσειας νήματος.



Σχήμα 3.4β: Κατασκευή

### 3.3 Λύση Τρίτη



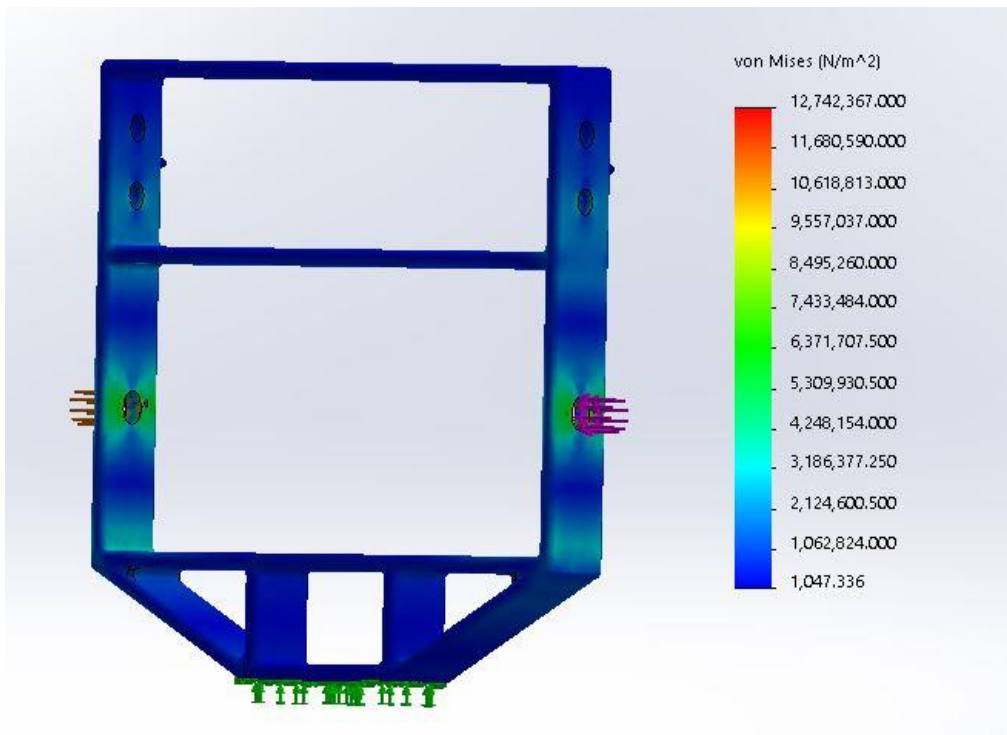
Σχήμα 3.8: Αυτόνομη κεφαλή με ανάκτηση τάσης

Η κεφαλή κατασκευάστηκε από πλαστικό PLA και το συνολικό βάρος μαζί με το σύστημα ελατηρίων και ραούλων είναι 980 γραμμάρια. Η τάση διαρροής βρέθηκε για εκτύπωση με «γραμμές»,  $20 * 10^6 \frac{N}{m^2}$  τουλάχιστον (Σχήμα 4.1), πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από τη μέγιστη καταπόνηση της κεφαλής,  $4 * 10^6 \frac{N}{m^2}$ .

Αυτή η κεφαλή είναι που τελικά κατασκευάστηκε, μιας και πληροί τα περισσότερα από τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά:

- Αυτόνομη κεφαλή (αλλά όχι πλήρη περιστροφή 360 μοιρών).
- Ικανότητα στήριξης ανέμης με νήμα από σύνθετα υλικά.
- Εύκολα αποσπώμενη ανέμη για άμεση αντικατάσταση νέου νήματος.
- Μέγιστο βάρος κεφαλής μαζί με το νήμα  $\leq 5\text{Kg}$ . Η κεφαλή είναι 1 Kg, και το νήμα δεν ξεπερνά τα 4 kg.
- Μικρός όγκος μηχανήματος για μεγαλύτερη ευελιξία γύρω από το καλούπι.
- Χαμηλό κόστος.
- Δε χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας περιέλιξης.

- Μηχανικό σύστημα για τη διατήρηση τάσης, ανάλογα με τις ανάγκες του τελικού προϊόντος.
- Μηχανικό σύστημα ανάκτησης έκτασης νήματος στην περίπτωση περίσσειας, με το σύστημα των δύο ελατηρίων έλξεως (περιορισμένο).



Σχήμα 3.9: Έλεγχος Αντοχής κατά Von Mises. Τάση 45N.



## Κεφάλαιο 4

# Σχεδιασμός και Κατασκευή της Μηχανολογικής Διάταξης

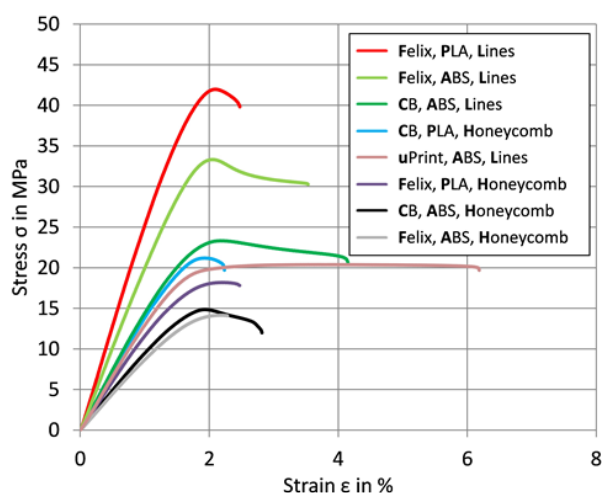
Για να γίνει ο σχεδιασμός της συσκευής λήφθηκαν υπόψιν στοιχεία όπως το οικονομικό συμφέρον του εργαστηρίου, τα εργαλεία και τα υλικά στα οποία υπάρχει πρόσβαση μέσω του εργαστηρίου, η ευκολία της συναρμολόγησης και συντήρησης, η ασφάλεια των χρηστών και όλες οι τεχνικές προδιαγραφές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Αποφασίστηκε να κατασκευαστούν τα περισσότερα εξαρτήματα στον τρισδιάστατο εκτυπωτή και όχι με κάποια εργαλειομηχανή για μεγαλύτερη ευκολία, αυτονομία και ταχύτητα, ενώ για τα εξαρτήματα που θα υπόκειντο σε μεγαλύτερες τάσεις επιλέχτηκε να κατασκευαστούν από αλουμίνιο.

### 4.1 Σκελετός Κεφαλής

Ξεκινώντας από το σκελετό, λόγω επιπλοκών στη στήριξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποφασίστηκε να χωριστεί η εκτύπωση σε δύο κομμάτια. Παρακάτω περιγράφεται η αντιμετώπιση των δυσκολιών εκτύπωσης.

Το μοτίβο εκτύπωσης μπορεί να διαφέρει ως προς τη γεωμετρία κατασκευής (γραμμές ή κυψέλες) ενώ σαν υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν το PLA και το ABS. Ενδεικτικά για τρία διαφορετικά εμπορικά μοντέλα τρισδιάστατων εκτυπωτών παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

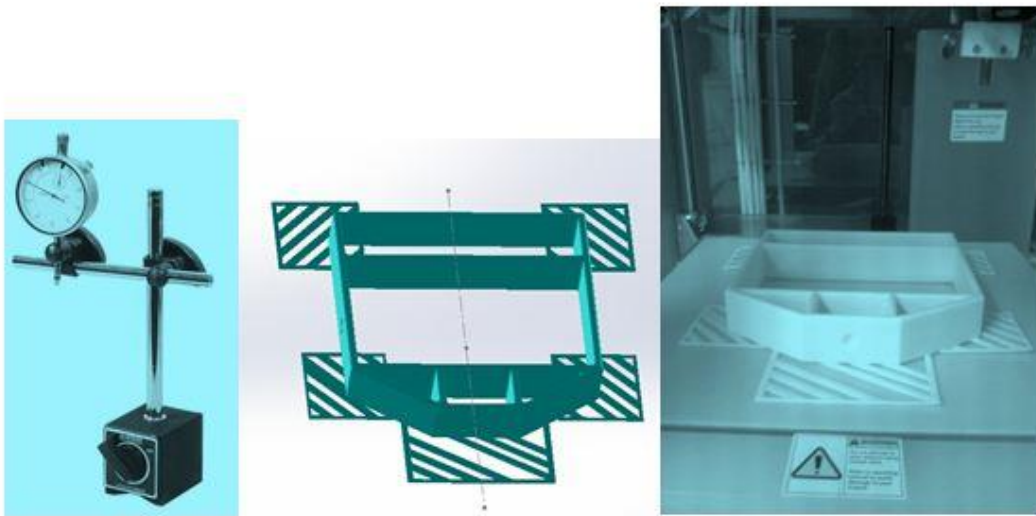


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης [9]

Πρώτο βήμα πριν την εκτύπωση ήταν η ευθυγράμμιση του τραπέζιου (επιφάνεια εκτύπωσης) με τη βοήθεια μετρητικού ρολογιού, έτσι ώστε η κεφαλή εκτύπωσης κατά την κίνηση στο ΧΥ επίπεδο να είναι ευθυγραμμισμένη με την επιφάνεια εκτύπωσης.

Στην πρώτη απόπειρα για τη διαδικασία εκτύπωσης του πρώτου κομματιού (Σχήμα 4.3) του σκελετού της κεφαλής, τοποθετήθηκε στον εκτυπωτή (CubeX) κόλλα στην επιφάνεια του κινούμενου τραπέζιου. Το πλαστικό όμως έχει την τάση να ξεκολλάει από το τραπέζι και να συρρικνώνεται στις γωνίες της κατασκευής λόγω της απότομης θερμοκρασιακής αλλαγής.

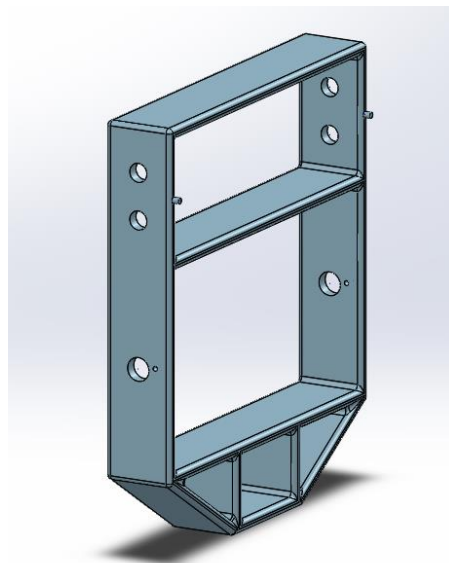
Για το λόγο αυτό, επανασχεδιάστηκε το μοντέλο εκτύπωσης με πρόσθετα στηρίγματα ενός χιλιοστού, σχεδιασμένα στις γωνίες όπου προηγουμένως είχε παρατηρηθεί η ανύψωση του τεμαχίου. Μόλις ολοκληρώθηκε η στρώση των στηριγμάτων (στα πρώτα 40 λεπτά) και ξεκίνησε καθαρά η εκτύπωση του μοντέλου, αυτά κολλήθηκαν με κολλητική ταινία στο τραπέζι για επιπλέον στήριξη (Σχήμα 4.2). Παρόλα αυτά παρατηρήθηκε μια αμελητέα συστολή υλικού σε μία από τις γωνίες. Για να γίνει πιο εύκολη η μετέπειτα κατεργασία σχηματίστηκαν ενδεικτικά βαθουλώματα στα σημεία όπου θα γίνουν οι οπές για τους άξονες και τις βίδες.



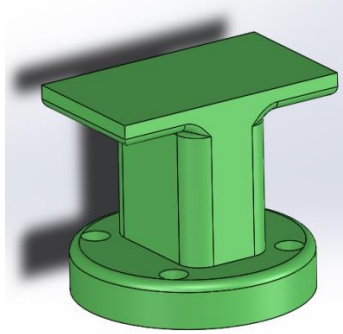
Σχήμα 4.2: Από αριστερά προς δεξιά, μετρητικό ρολόι, σχέδιο σκελετού, τρισδιάστατη εκτύπωση.

Μία επιπλέον λεπτομέρεια που βοηθάει το κομμάτι να μείνει προσκολλημένο, είναι να μην υπάρχουν ρεύματα αέρα στο δωμάτιο, μιας και ο τρισδιάστατος εκτυπωτής CubeX (Σχήμα 4.23) δεν έχει θερμαινόμενο τραπέζι. Η συνολική διάρκεια εκτύπωσης ήταν 17 ώρες με γέμισμα υλικού 50%.

Για το δεύτερο κομμάτι (Σχήμα 4.4) ορίστηκαν στηρίγματα στο λογισμικό KISSLICER το οποίο «διαβάζει» ο τρισδιάστατος εκτυπωτής και επειδή ήταν μικρότερου μεγέθους οι θερμοκρασιακές διαφορές ανά στρώσεις δεν ήταν τόσο μεγάλες, οπότε δεν χρειάστηκε να γίνουν αλλαγές.

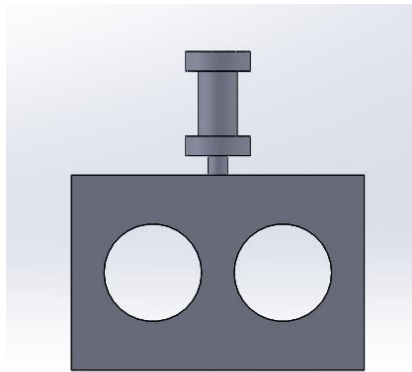


Σχήμα 4.3: Βασικός σκελετός κεφαλής [19]

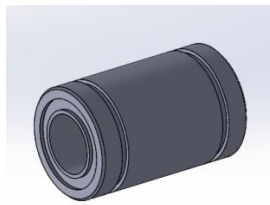


Σχήμα 4.4: Δεύτερο κομμάτι κεφαλής που συνδέεται με το άκρο του ρομπότ

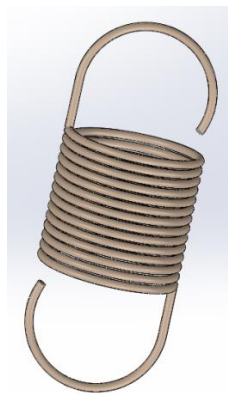
## 4.2 Σύστημα ελατηρίων



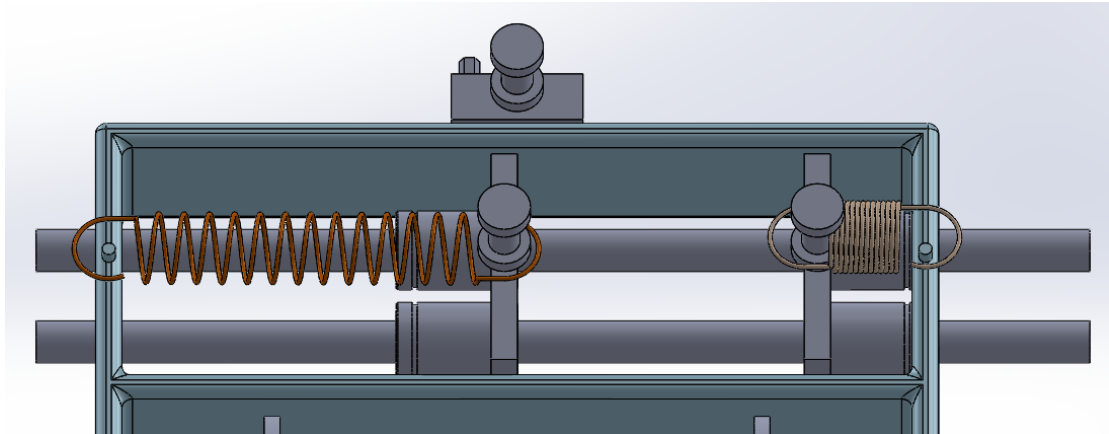
Σχήμα 4.5: Θήκη από αλουμίνιο για τα γραμμικά ρουλεμάν και για στήριξη οδηγό-μπομπίνας.



Σχήμα 4.6: Γραμμικό ρουλεμάν LM8UU.

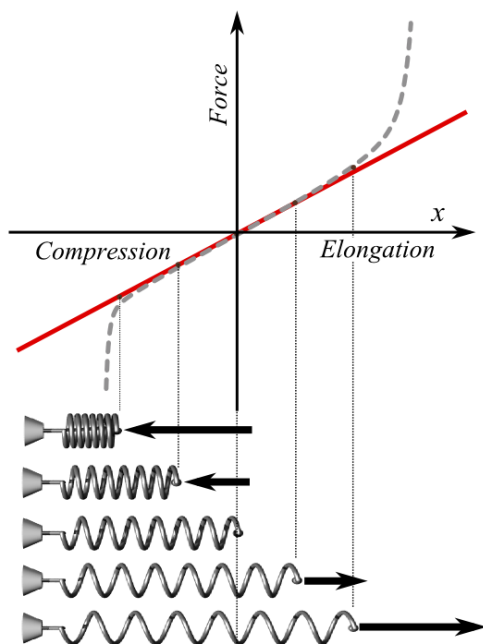


Σχήμα 4.7: Ελατήριο έλξεως.



Σχήμα 4.8: Ελατήριο έλξεως σε μέγιστη θέση (αριστερά) και σε θέση ισορροπίας (δεξιά).

Το σύστημα έχει ως σκοπό να κρατά το νήμα υπό τάση στην περίπτωση που αλλάξει ο προσανατολισμός [11]. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.8, τα γραμμικά ρουλεμάν έχουν τοποθετηθεί στους οδηγούς και συγκρατούνται με τα ελατήρια, σταθεράς  $K = \frac{F}{\Delta x}$ , όπου η δύναμη  $F$  δεν πρέπει να ξεπερνά τη δύναμη που ασκείται από την ανέμη στο σημείο δράσης (σημείο που ξετυλίγεται το νήμα), και  $\Delta x$  η μέγιστη απόσταση μετατόπισης του ελατηρίου.



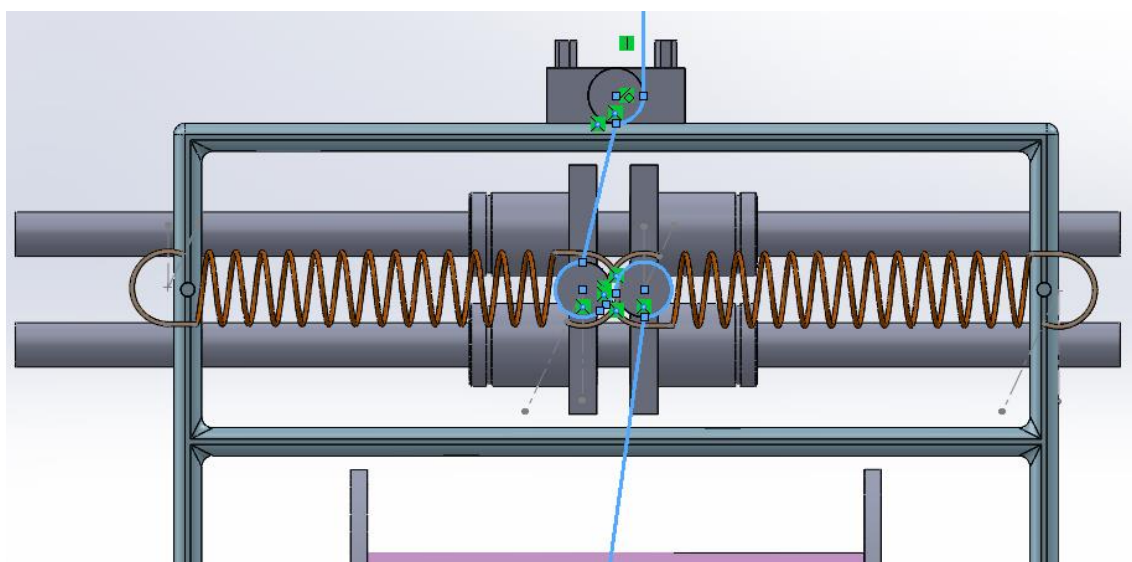
Τα δύο ελατήρια στη θέση ισορροπίας του συστήματος βρίσκονται τεντωμένα και η τάση που ασκεί το ελατήριο είναι ίση με αυτή του νήματος στο τελικό σημείο. Ο έλεγχος αυτός έχει γίνει πρώτα στην ανέμη. Μόλις το νήμα χαλαρώσει τα δύο ελατήρια τραβιούνται πίσω στη φυσική θέση ισορροπίας ελατηρίου (Θέση 2) και όχι του συστήματος (Θέση 1), με αποτέλεσμα το νήμα μην είναι χαλαρό πια και να γίνεται αποκατάσταση της επιθυμητής τάσης.

Για λόγους οικονομίας πάλι, αντικαταστάθηκε η αρχική προσέγγιση γραμμικών βαγονέτων με ράγες, με δύο γραμμικά ρουλεμάν τοποθετημένα παράλληλα σε δύο άξονες για να διατηρηθεί μόνο η γραμμική κίνηση και να εξαλειφθεί η περιστροφική.

Η τιμή 2 γραμμικών ρουλεμάν και οι αντίστοιχες ράγες θα κόστιζαν συνολικά 114€ (Hiwin HGH 15CA Linear Bearing for 15mm rail 50€, Hiwin HGR 15mm rail 160mm long 14€), ενώ η τελική προσέγγιση κόστισε συνολικά 8€(κόστος 4 γραμμικών ρουλεμάν LM8UU).

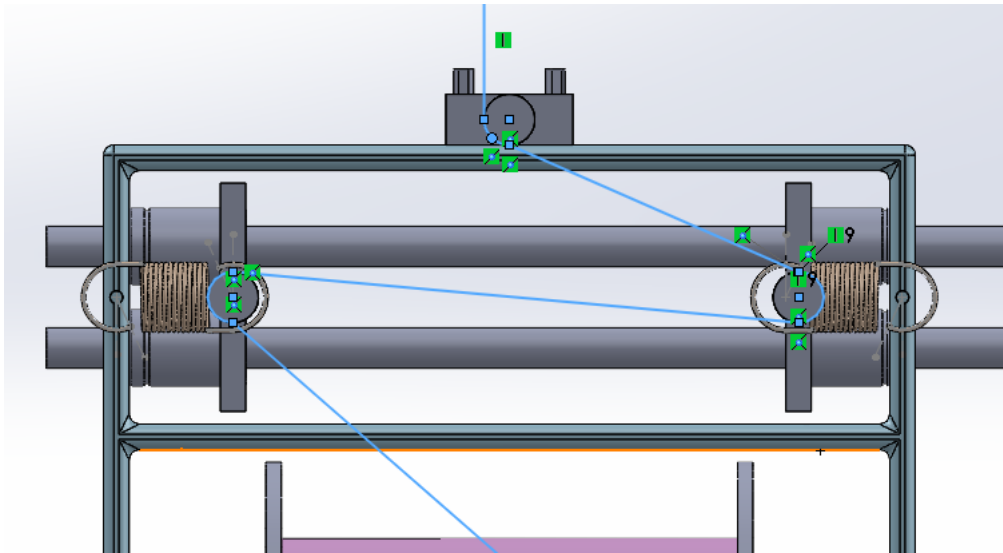


Σχήμα 4.9: Γραμμικό ρουλεμάν για τετράγωνες ράγες



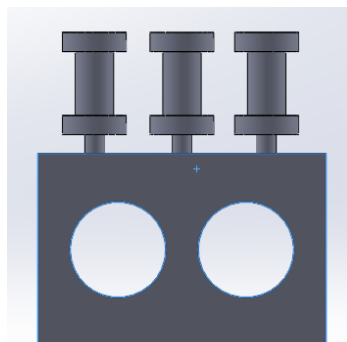
Σχήμα 4.10: Θέση 1. Θέση ισορροπίας τροχαλιών του συστήματος.

Θέση ισορροπίας του συστήματος ορίζεται όταν το νήμα ξετυλίγεται υπό τη σταθερή επιθυμητή τάση, χωρίς να χρειαστεί να ενεργήσουν οι τροχαλίες με τα ελατήρια. Υπενθυμίζεται ότι η δύναμη έλξης των ελατηρίων έχει οριστεί οριακά μικρότερη από τη δύναμη του νήματος που οφείλεται στο συμπλέκτη τριβής. Με την παραπάνω συνθήκη εξασφαλίζουμε ότι οι κινούμενες τροχαλίες δεν θα ξετυλίξουν ποτέ το νήμα από την ανέμη και θα είναι μόνο ο κινητήρας του καλουπιού ο οποίος θα οφείλεται για αυτήν την κίνηση.



Σχήμα 4.11: Θέση 2. Φυσική θέση ισορροπίας.

Το νήμα έχει χαλαρώσει και οι τροχαλίες βρίσκονται στην ακραία θέση. Το μέγιστο μήκος νήματος που μπορεί να τεντωθεί υπολογίστηκε με βοήθεια της τριγωνομετρίας στα 120 χιλιοστά, το οποίο είναι μία καλή λύση μιας και πρόκειται για τύλιξη μικρών τεμαχίων. Για επιπλέον κάλυψη χαλαρωμένου μήκους νήματος μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν στην πάνω πλευρά της «θήκης» των ρουλεμάν επιπλέον τροχαλίες (Σχήμα 4.12) από όπου θα τυλίγεται το νήμα εναλλάξ. Με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερο μήκος νήματος ελέγχεται από το σύστημα τροχαλιών. Το αποτέλεσμα είναι να δίνεται μεγαλύτερη ευχέρεια στην ώρα της επιλογής της πορείας της κεφαλής μιας και δεν υπάρχει ο περιορισμός της ελάχιστης γωνίας των 90 μοιρών στην ήδη υπάρχουσα παρόμοια τεχνολογία [29].



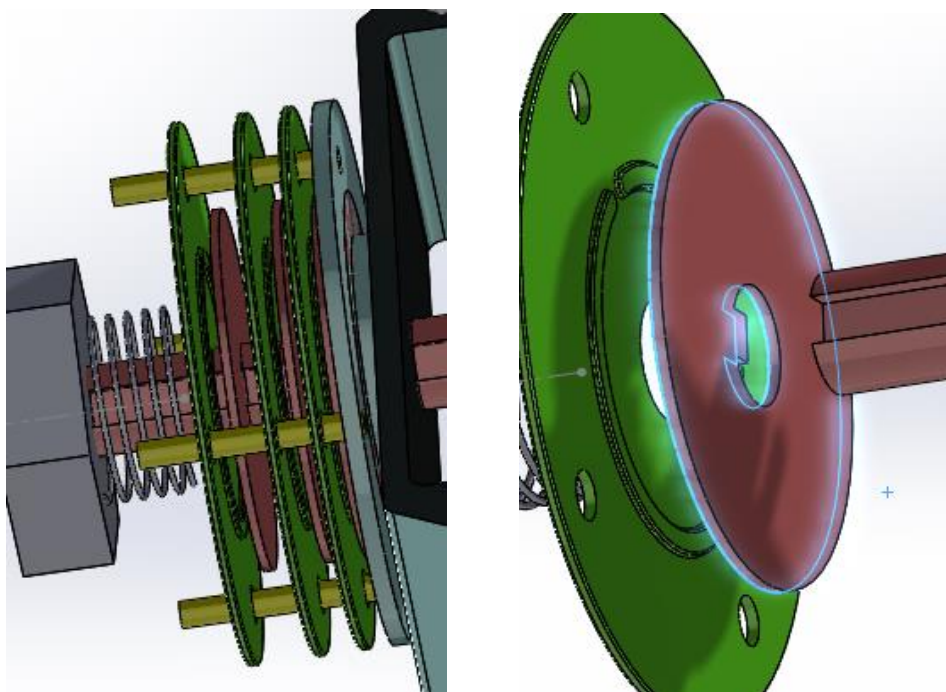
Σχήμα 4.12: Επιπλέον τροχαλίες.

Για να λειτουργήσει ο μηχανισμός ακολουθείται συγκεκριμένη τροχιά (Σχήμα 4.10 και 4.11). Όπως φαίνεται στο σχήμα το νήμα εφάπτεται εναλλάξ πρώτα από

την εξωτερική καμπύλη της αριστερής τροχαλίας και στη συνέχεια από τη μέρινα οδηγηθεί στην κεντρική τροχαλία όπου βρίσκεται ελαφρώς μετατοπισμένη από τον άξονα συμμετρίας (3mm) για να είναι η πλευρά της τροχαλίας όπου καταλήγει το νήμα ακριβώς στο κέντρο της διάταξης [18].

### 4.3 Σύστημα αντίστασης

Το σύστημα στήριξης της ανέμης απαιτεί ένα μηχανικό συμπλέκτη τριβής ξηρό, δηλαδή χωρίς λάδι. Η πρώτη ιδέα ήταν να κατασκευαστεί ένας αυτοσχέδιος μηχανικός συμπλέκτης ολίσθησης. Ένας δίσκος στερεωμένος στο βασικό σκελετό της κεφαλής, στον οποίο δίσκο-βάση θα προσαρμοστούν οι σταθεροί δίσκοι τριβής (δακτυλιοειδής πλάκες) που δεν θα περιστρέφονται με μικρές βίδες που θα διαπερνούν όλους τους σταθερούς δίσκους. Ενδιάμεσα από τους σταθερούς δίσκους τριβής τοποθετούνται οι στρεφόμενοι δίσκοι που είναι πακτωμένοι με τον άξονα και είναι αυτοί που αντιτίθενται στην περιστροφή του άξονα. Ένα ελατήριο συμπιέζεται στο άκρο του μηχανισμού με ένα παξιμάδι ώστε να προσαρμόζεται η τελική ροπή στην επιθυμητή (Σχήμα 4.1).



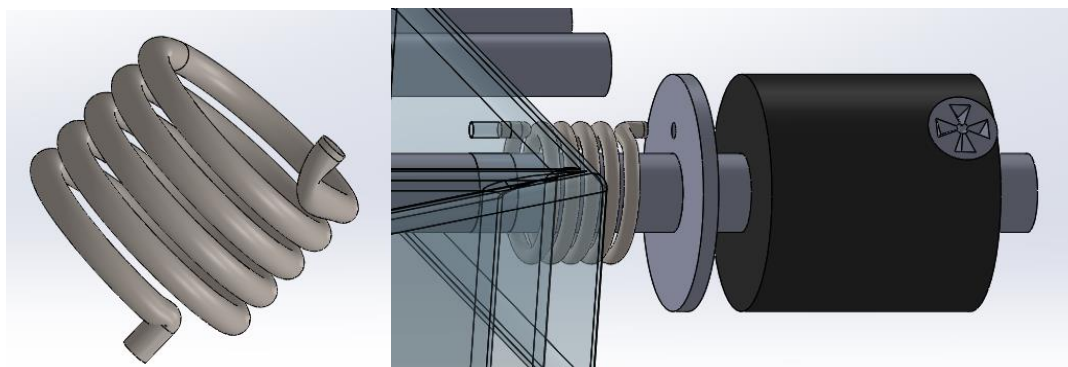
Σχήμα 4.13: Σύστημα σύμπλεξης με πολλαπλούς δίσκους

Οι δίσκοι με τη μεγάλη διάμετρο είναι οι σταθεροί (τριβής) και αυτοί με την πιο μικρή οι κινητοί. Οι σταθεροί δίσκοι προσαρμόζονται με άξονες ώστε να

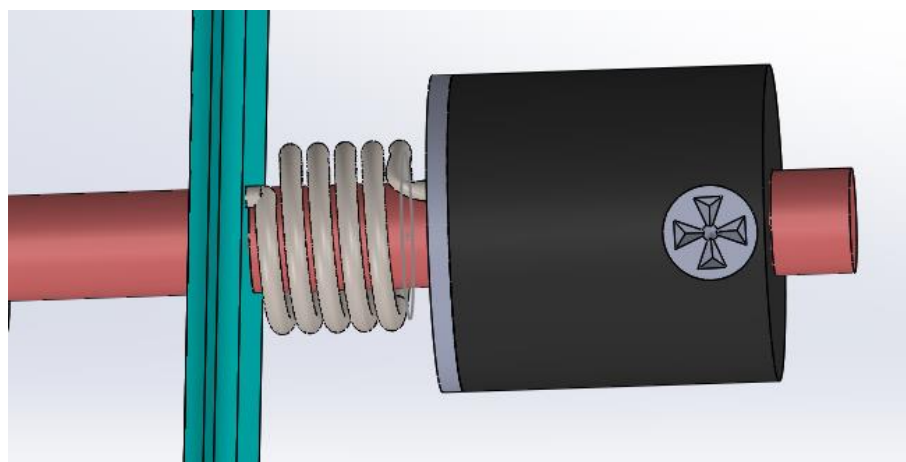


μπορούν να έχουν τη δυνατότητα να μετακινούνται κατά μήκος τους και να αυξομειώνεται η μεταξύ τους πίεση.

Η κατασκευή όμως των δίσκων που θα περιστρέφονται με τον άξονα λόγω πολυπλοκότητας αντικαταστάθηκε από την παρακάτω (Σχήμα 4.15), ως πιο απλή και ελεγχόμενη διάταξη.



Σχήμα 4.14: Ελατήριο πίεσεως, αλουμινένιος δίσκος και πλαστικός κύλινδρος



Σχήμα 4.15: Τελικό σύστημα τάσης

### Επιφάνειες Τριβής

Ένας μεταλλικός δίσκος και ένας πλαστικός κύλινδρος αποτελούν τις δύο επιφάνειες τριβής. Οι επιφάνειες έχουν κατεργαστεί ώστε να υπάρχει αυξημένη τραχύτητα μεταξύ τους. Το ένα άκρο του ελατηρίου ενσωματώνεται στο μεταλλικό δίσκο και το άλλο στο σκελετό της κεφαλής, έτσι ώστε ο δίσκος αυτός να είναι σταθερός (Σχήμα 4.15). Το ελατήριο ασκεί συνεχή πίεση στο μεταλλικό δίσκο, ο οποίος εφάπτεται με τον πλαστικό δίσκο που είναι στερεωμένος στον άξονα της ανέμης, με αποτέλεσμα την ελεγχόμενη περιστροφή του. Αυξάνοντας

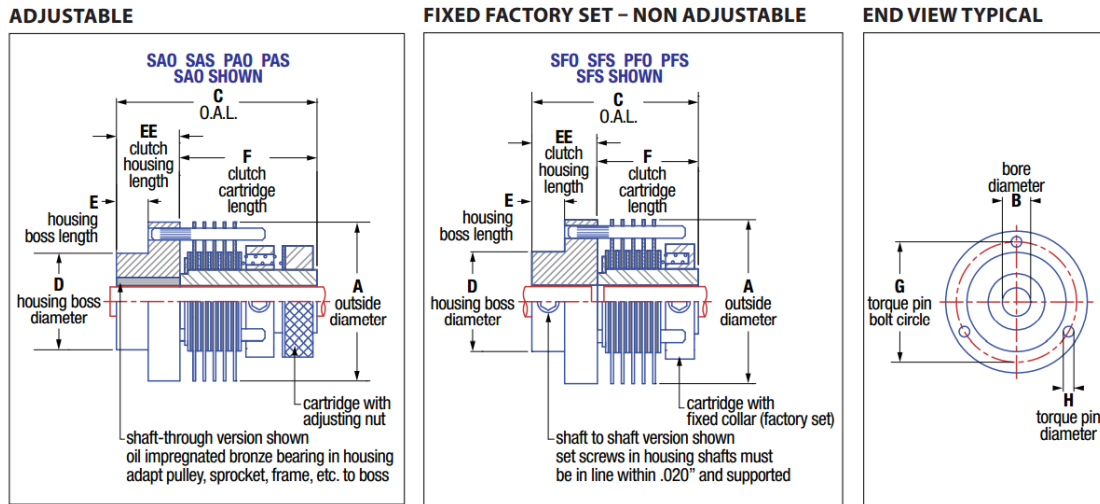
ή μειώνοντας την ακτίνα των δύο επιφανειών τριβής η ροπή μεγαλώνει και μικραίνει αντίστοιχα δημιουργώντας ένα ελεγχόμενο σύστημα. Στην παρούσα εργασία η έξοδος του νήματος έχει τάση 30 N, που οφείλονται στα 50N δύναμη στις επιφάνειες τριβής. Η επιφάνειες τριβής έχουν διάμετρο 30mm και η ανέμη 50mm [8].

Η παραπάνω διάταξη αναπτύχθηκε για να αντικαταστήσει τον υψηλού κόστους μηχανικό συμπλέκτη ολίσθησης όπου από μελέτη που έγινε στην αγορά κοστίζει τουλάχιστον 100€.

Ο μηχανικός συμπλέκτης ολίσθησης ουσιαστικά ελέγχει τη ροπή μεταξύ δύο στοιχείων. Μπορούν να συναντηθούν ως ζεύξη άξονα με άξονα, ή σύνδεση άξονα με τροχαλία, σε εργαλεία, σε διατάξεις με οδοντωτούς τροχούς αλυσοκίνησης. Για να κινηθεί η άτρακτος πρέπει να ξεπεραστεί μία συγκεκριμένη ροπή. Η ροπή ελέγχεται με την πίεση του ελατηρίου που ορίζει την αύξηση ή την ελάττωση της δύναμης στο περικόχλιο ρύθμισης. Το περικόχλιο ελέγχει την πίεση στις πλάκες και τα τακάκια τριβής (Σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.16 Μηχανικός Συμπλέκτης ολίσθησης [26]



Σχήμα 4.17 Μηχανολογικό σχέδιο του Μηχανικού Συμπλέκτη ολίσθησης.

Η εξίσωση της ροπής για τον συμπλέκτη τριβής είναι η εξής:

$$T = \frac{\pi \mu P d_1 N (d_2^2 - d_1^2)}{8}$$

$T$  = ροπή,  $d_1$  = η εσωτερική διάμετρος του κινούμενου δισκίου,  $d_2$  = η εξωτερική διάμετρος του κινούμενου δισκίου,  $N$  = ο αριθμός επιφανειών επαφής των κινούμενων δισκίων

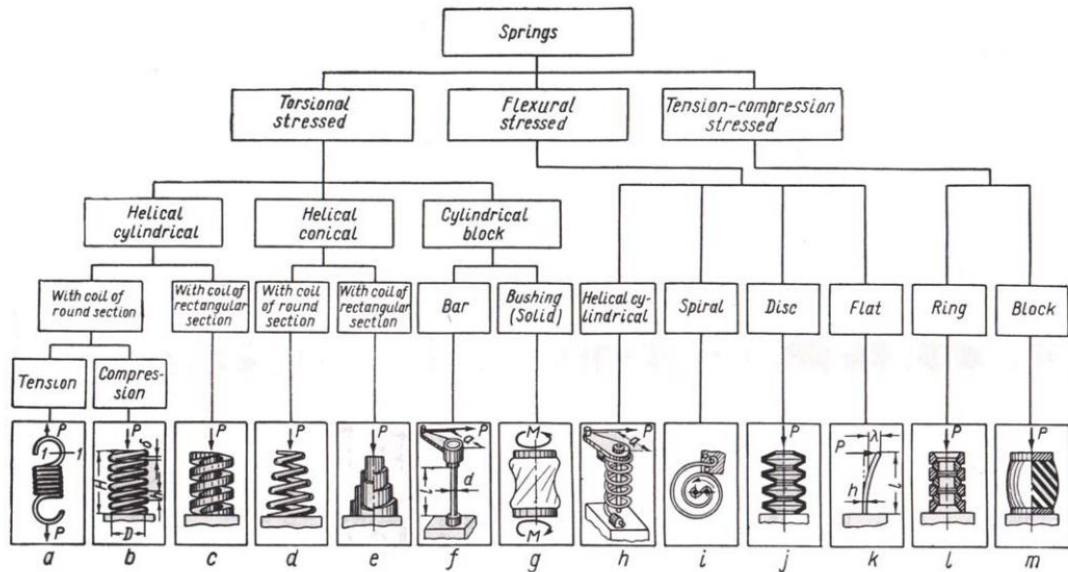
για το υλικό με την υψηλή τριβή καθορίζεται το

$\mu$  = συντελεστής τριβής και  $P$  = μέγιστη τάση.

Παρατηρείται ότι εάν αυξηθεί ο αριθμός των επιφανειών επαφής μπορεί να μικρύνει η διάμετρος των δισκίων. Παρόμοια, αυξάνει η ροπή με τη χρήση ενός υλικού με υψηλότερο συντελεστή τριβής ή μεγαλύτερη τάση.

### Ελατήριο πίεσεως.

Το σύστημα συνεχούς τάσης επιτεύχθηκε με ένα ελατήριο πίεσεως.



Σχήμα 4.18: Τύποι ελατηρίων

Σε ιδανικά θεωρητικά ελατήρια ισχύει απόλυτα ο νόμος του Hooke, δε χάνεται ενέργεια στο περιβάλλον και τα ελατήρια μπορούν πάντα να επιστρέψουν στο αρχικό τους μήκος. Στην πραγματικότητα χάνεται μικρό ποσό ενέργειας στο περιβάλλον ως θερμική ενέργεια, ενώ η παραμόρφωση μπορεί να γίνει μόνιμη. Κάθε ελατήριο έχει κάποια όρια αντοχής, τα οποία αν υπερβούν, το ελατήριο θα παραμορφωθεί ή θα καταστραφεί. Επιπλέον, με την επαναλαμβανόμενη χρήση το υλικό χάνει τις ιδιότητές του λόγω μηχανικής κόπωσης και αν δεν αντικατασταθεί θα καταστραφεί.

Το ελατήριο πίεσεως ασκεί αντίσταση σε θλιπτική δύναμη που εφαρμόζεται αξονικά. Είναι η πιο συνήθης μορφή μεταλλικού ελατηρίου και θεωρείται η πιο αποτελεσματική κατασκευή για την αποθήκευση ενέργειας. Εκτός από τη διαδεδομένη κυλινδρική μορφή του συναντάται και σε σχήμα κώνου, βαρελιού και κλεψύδρας. Τοποθετούνται είτε μέσα σε μια οπή είτε ομοαξονικά με έναν άξονα, όπως και στην κατασκευή της παρούσας κεφαλής. Όταν ασκείται το θλιπτικό φορτίο το ελατήριο τείνει να ωθήσει πίσω το φορτίο και να ισορροπήσει στο αρχικό του μήκος.

Ελατήρια πίεσεως συναντιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, κινητήρες αυτοκινήτων, μεγάλες πρέσες σε μηχανές κουρέματος γκαζόν, σε ιατρικές συσκευές, κινητά τηλέφωνα κ.ά.

Τα κωνικά ελατήρια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μικρό μήκος στη μέγιστη συμπίεση και μεγάλη αντίσταση.

### **Πληροφορίες Μηχανικού Συμπλέκτη**

Οι λεπτοί δίσκοι επικαλύπτονται με ειδικό υλικό που αυξάνει την τριβή (φερμουίτ-φερόντο). (Προτάσεις επιλογής υλικού μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα: [24])

Η σύμπλεξη μπορεί να είναι υγρή ή ξηρή. Αυτό σημαίνει στην πρώτη περίπτωση ότι μεταξύ των δισκίων υπάρχει λάδι που λειτουργεί σαν ψυκτικό και σαν μείωση του θορύβου και στην δεύτερη περίπτωση που δεν υπάρχει λιπαντικό αυξάνεται ο συντελεστής τριβής (πάντα  $<1$ ) το οποίο συνεπάγεται ότι είτε αυξάνεται η ροπή, είτε χρειάζονται λιγότεροι δίσκοι, είτε μικρότεροι σε διάμετρο δίσκοι, με αρνητική συνέπεια την αύξηση θερμοκρασίας.

Παρακάτω βλέπουμε τις απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν :

- Τα δύο υλικά που βρίσκονται σε επαφή πρέπει να έχουν υψηλό συντελεστή τριβής.
- Τα δύο υλικά πρέπει να είναι ανθεκτικά στις φθορές, όπως διάβρωση, αγκίστρωση (γδάρισμα λόγω τριβής), αποκόμιση (εκφλοΐωση). Αντίστοιχα και στις συνθήκες περιβάλλοντος όπως υγρασία σκόνη και πίεση.
- Ο συντελεστής τριβής πρέπει να είναι σταθερός για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και πιέσεων.
- Πρέπει να κατέχουν καλές θερμικές ιδιότητες, υψηλή θερμοχωρητικότητα, καλή θερμική αγωγιμότητα, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως και αντοχή σε υψηλές πιέσεις επαφής.
- Καλή αντοχή σε διάτμηση ώστε να μεταφέρονται οι δυνάμεις τριβής στην κατασκευή.
- Και τέλος να είναι ασφαλή στη χρήση και μη επιβλαβή για το περιβάλλον. (Υλικά πέδησης από ασβέστη δεν είναι πια επιτρεπτά για χρήση συμπλεκτών).

Material Combination	Coefficient of Friction	Column1	Temp.(max)	Pressure (Max)
	Wet	Dry	Deg.C	MPa
Cast Iron/Cast Iron	0,05	0,15-0,20	300	0,8
Cast Iron/Steel	0,06	0,15-0,20	300	0,8-1,3
Hard Steel/Hard Steel	0,05	0,15-0,20	300	0,7
Wood/Cast Iron-steel	0,16	0,2-0,35	150	0,6
Leather/Cast Iron-steel	0,12-0,15	0,3-0,5	100	0,25
Cork/Cast Iron- Steel	0,15-0,25	0,3-0,5	100	0,1
Felt/Cast Iron- Steel	0,18	0,22	140	0,06
Woven Asbestos/Cast Iron- Steel	0,1-0,2	0,3-0,6	250	0,7
Moulded Asbestos/Cast Iron- Steel	0,08-0,12	0,2-0,5	250	1
Impregnated Asbestos/Cast Iron- Steel	0,12	0,32	350	1.0
Carbon-graphite/Cast Iron- Steel	0,05-0,1	0,25	500	2.1
Kelvar/Cast Iron- Steel	0,05-0,1	0,35	325	3

Πίνακας 4.1: Συνδυασμός υλικών σύμπλεξης.

Αμα επιλεχτεί για παράδειγμα carbon-graphite με cast iron-steel όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα θα τεθούν οι τιμές 0.25 στο συντελεστή τριβής μ (διότι η σύμπλεξη είναι ξηρή) και 2.1MPa στο P. Εάν τοποθετηθούν 2 δίσκοι τριβής το N (αριθμός επιφανειών τριβής) θα πάρει την τιμή 4 και η ροπή θα είναι ίση με 2.4Nm που σημαίνει για ακτίνα ανέμης 50mm η τάση νήματος είναι 49.5N. Ανάλογα με την επιθυμητή τάση στο νήμα αλλάζουμε είτε τα υλικά είτε των αριθμό των δίσκων τριβής.

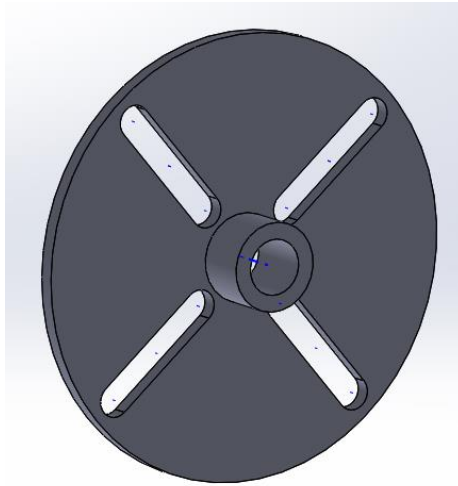
Ουσιαστικά πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

$$T_{νήμα} \geq T_{σύμπλεξη}$$

$$F_{νήμα} R_{καρούλι} \geq \frac{\pi \mu P d_1 N (d_2^2 - d_1^2)}{8}$$

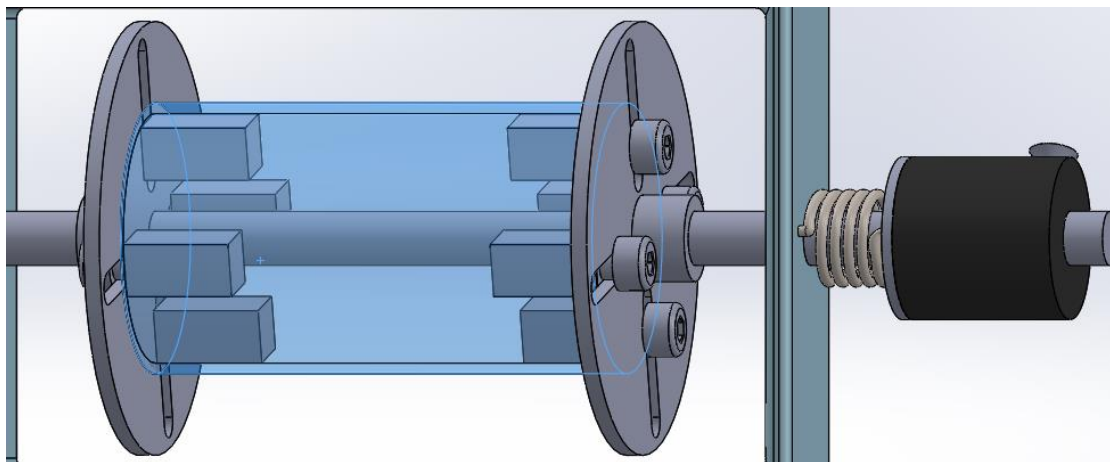
### Στήριξη ανέμης

Η ανέμη με το νήμα μπορεί να στηριχθεί με διάφορους τρόπους και εξαρτάται σε τι μορφή θα το προμηθευτούμε. Συνήθως αποθηκεύεται γύρω από ένα κυλινδρικό χαρτόνι. Ο τρόπος στήριξης του κυλίνδρου γίνεται μεταξύ δύο δίσκων (Σχήμα 4.19) και τεσσάρων εσωτερικών στηριγμάτων που εφάπτονται εσωτερικά στη διάμετρο της ανέμης (Σχήμα 4.20)



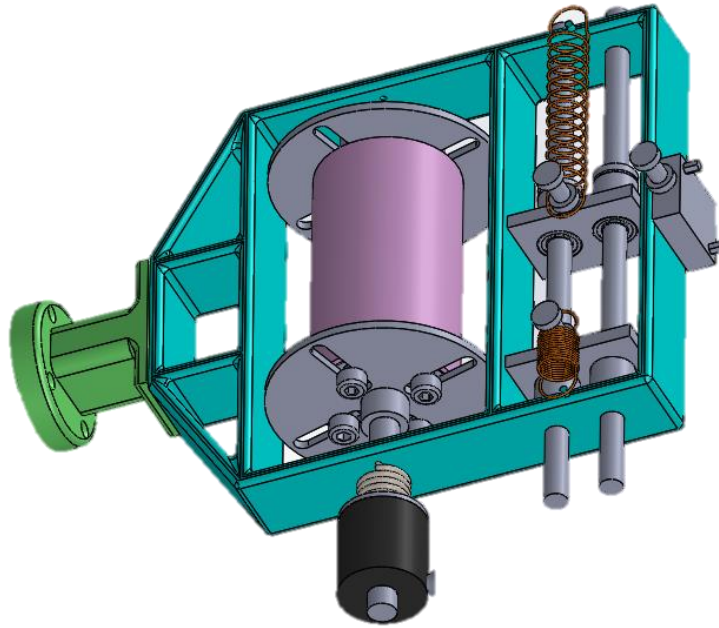
**Σχήμα 4.19:** Δίσκος από αλουμίνιο για στήριξη της ανέμης με το νήμα

Ο δίσκος διαμορφώθηκε με τέτοιον τρόπο ώστε να προσαρμόζονται διαφορετικών διαμέτρων μπομπίνες. Επίσης ρυθμίζεται η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων για διαφορετικά μήκη, η έρευνα αγοράς ωστόσο που έγινε έδειξε ότι οι πιο δημοφιλείς διάμετροι είναι μεταξύ 50 και 75 χιλιοστά, μεγέθη που καθόρισαν τις διαστάσεις της κεφαλής.

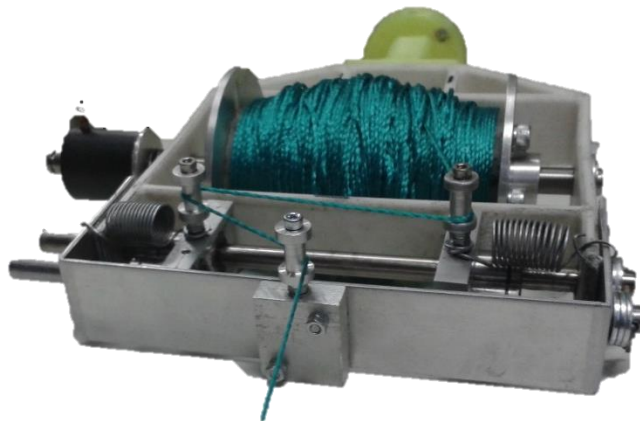


**Σχήμα 4.20:** Στήριγμα ανέμης

Τα παραλληλεπίπεδα στηρίγματα κόπηκαν στην κορδέλα κοπής (Σχήμα 4.30), και το εσωτερικό σπείρωμα έγινε με σπειροτόμο (Σχήμα 4.29). Τα στηρίγματα τοποθετούνται εφαπτομενικά στην εσωτερική επιφάνεια της ανέμης και βιδώνονται στους δίσκους, ενώ παράλληλα στην οριζόντια επιφάνεια τους βιδώνεται άλλη μία βίδα που καθιστά την ανέμη πακτωμένη στους δύο δίσκους.



Σχήμα 4.21: Συνολική διάταξη της κεφαλής.

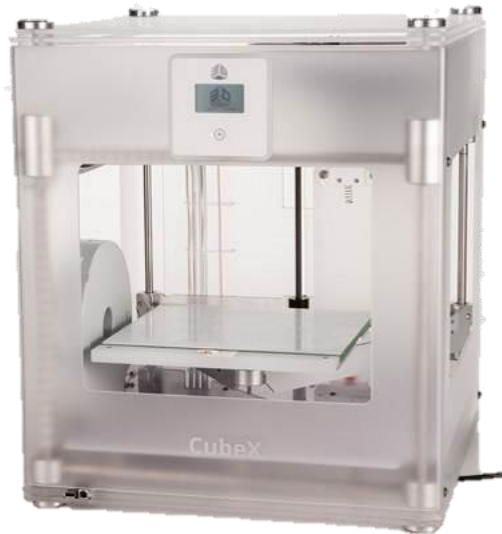


Σχήμα 4.22: Κατασκευή πραγματοποιημένη στο εργαστήριο.

## 4.4 Εργαλεία Εργαστηρίου

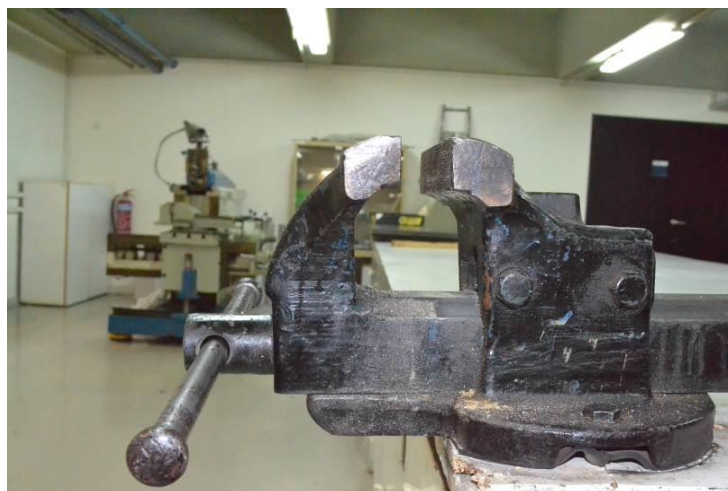
Τα εργαλεία του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της προαναφερθείσας διάταξης περιγράφονται στη συνέχεια:





Σχήμα 5.23: Τρισδιάστατος εκτυπωτής CubeX.

•**Τρισδιάστατος εκτυπωτής CubeX (Σχήμα 4.23):** χρησιμοποιήθηκε με την εισαγωγή αρχείων επεξεργασμένων στο λογισμικό KISSlicer το οποίο δημιουργεί τον G-code. Είναι ένας επιτραπέζιος εκτυπωτής χωρίς θερμαινόμενη επιφάνεια εργασίας. Η συνήθης διαδικασία που ακολουθείται για την εκτύπωση είναι ο έλεγχος της απόστασης της κεφαλής από το τραπέζι, ώστε να μην είναι ούτε πολύ κοντά ούτε πολύ μακριά. Όταν είναι πολύ κοντά η κεφαλή, πιέζει το υλικό, ενώ όταν είναι μακριά το υλικό ψύχεται πρόωρα, και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα δεν είναι το επιθυμητό. Σημαντικό είναι επίσης να τοποθετείται κόλλα, αλλά με μέτρο γιατί και εδώ η υπέρβαση στην ποσότητα της κόλλας καταστρέφει την ποιότητα της εκτύπωσης.



Σχήμα 4.24: Μέγγενη

- **Μέγγενη (Σχήμα 4.24):** χρησιμοποιήθηκε σε πολλά στάδια της κατασκευής, χρησιμεύει για τη σταθερή στήριξη μικρών κομματιών που είναι δύσκολο να σταθεροποιηθούν με άλλο τρόπο.



Σχήμα 4.25: Κάθετο δρόπανο για δημιουργία οπών.

- **Κάθετο δρόπανο (Σχήμα 4.25):** εξασφαλίζει την καθετότητα της οπής. Περιέχει μία μέγγενη για να εξασφαλίζεται και η ακρίβεια της θέσης της οπής.



Σχήμα 4.26: Τόρνος εργαστηρίου

- **Τόρνος (Σχήμα 4.26):** η λειτουργία του είναι να αφαιρεί υλικό με ειδικό εργαλείο γύρω από ένα περιστρεφόμενο άξονα. Χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των δίσκων στήριξης της ανέμης (Σχήμα 4.19), για τον πλαστικό κύλινδρο τριβής (Σχήμα 4.15), για τις κατευθυντήριες τροχαλίες (Σχήμα 4.10) κ.ά.



Σχήμα 4.27: Ψαλίδι κοπής λαμαρίνας

- Ψαλίδι κοπής (Σχήμα 4.27): όπως διαπιστώνεται από την ονομασία χρησιμεύει στην κοπή φύλλων σιδήρου.



Σχήμα 4.28: Τροχός λείανσης

- Τροχός λείανσης (Σχήμα 4.28): τελειοποιήθηκαν όλα τα κατεργασμένα κομμάτια.



Σχήμα 4.29: Σπειροτόμος (κολαούζο).

- Σπειροτόμος (Σχήμα 4.29): δημιουργήθηκαν σπειρώματα στα μεταλλικά παραλληλεπίπεδα στηρίγματα της ανέμης (Σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.30: Κορδέλα-Πριόνι κοπής, περιστροφικής κίνησης.

- **Κορδέλα-Πριόνι κοπής (Σχήμα 4.30):** με τη βοήθεια αυτού του μηχανήματος κόπηκαν οι μεταλλικές «θήκες» των γραμμικών ρουλεμάν και τα παραλληλεπίπεδα στηρίγματα της ανέμης.



Σχήμα 4.31: Φρέζα HAAS TM1

- **Φρέζα HAAS TM1 (Σχήμα 4.31):** χαράχτηκαν οι διαμήκεις οπές των μεταλλικών δίσκων όπου βιδώνονται τα παραλληλεπίπεδα στηρίγματα της ανέμης. (Σχήμα 4.19)

# Κεφάλαιο 5

## Διαδρομή της Κεφαλής

### 5.1 Εναπόθεση νήματος

Για τον έλεγχο του Stäubli RX90 εκτός από το τερματικό υπάρχει κονσόλα με απλές ενδείξεις για να γίνεται εύκολη μετατόπιση των μελών του βραχίονα. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να χειρίζεται τις αρθρώσεις (Joint), το εργαλείο (Tool - αρχή των αξόνων στο ύψος της άρθρωσης 6 εκεί που βιδώνεται το εργαλείο), ή και το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων (World - αρχή των αξόνων στο κέντρο του δεύτερου κομματιού B).



Σχήμα 5.1: Κονσόλα χειροκίνητου ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα

Μία τρισδιάστατη περιγραφή της διαδρομής τοποθέτησης νήματος είναι επιτεύξιμη με το συγχρονισμό των σχετικών κινήσεων του ρομπότ και του καλουπιού. Η κεφαλή τροφοδοσίας νήματος είναι αυτή που αντιπροσωπεύει την απόληξη του ρομπότ και προγραμματίζεται η κίνησή της με βάση τις συντεταγμένες του «εργαλείου(Tool)». Η αυτόνομη κεφαλή που υλοποιήθηκε είναι για την κατασκευή μικρότερων και πιο πολύπλοκων κομματιών, από σύνθετα υλικά. Είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να ελέγχει την τάση του νήματος,

την ταχύτητα και τη διαδρομή. Είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε οποιοδήποτε ρομποτικό βραχίονα. Επιπλέον έχει έναν σταθερό, σχετικά μικρό σκελετό για να αυξάνεται η επιδεξιότητα του ρομπότ και να ελαττώνεται η πιθανότητα σύγκρουσης.

### Διαστασιολόγηση ανέμης

Οι διατάσεις της ανέμης προσαρμόζονται ανάλογα :

- (i) Με τις διαστάσεις του καλουπιού και του νήματος
- (ii) Με τις ροπές που αναπτύσσονται
- (iii) Με το είδος νήματος (prepreg ή wet winding)
- (iv) Με τα επιπλέον εξαρτήματα στην κεφαλή

(i) Για να υπολογιστεί το χωρίο της κεφαλής όπου θα τοποθετείται η ανέμη με το νήμα, πρέπει να βρεθεί το συνολικό μήκος νήματος που θα χρησιμοποιηθεί για την ολοκληρωμένη κατασκευή ενός τεμαχίου. Μελετήθηκε η χωρητικότητα για την κατασκευή ενός κομματιού με τις διαστάσεις: 20mm διάμετρος, 250mm μήκος, και διάμετρο νήματος 0.20mm [32]. Για κάθε μία πλήρη κάλυψη της επιφάνειας του καλουπιού το μήκος νήματος θα είναι:

$$x_{filament} = 2\pi R_{part} \frac{1}{D_{filament}} x_{part}$$

$x_{filament}$ : μήκος νήματος

$R_{part}$ : ακτίνα καλουπιού

$D_{filament}$ : διάμετρος νήματος

$x_{part}$ : μήκος καλουπιού

Μια ολοκληρωμένη κατεργασία συνήθως απαιτεί τέσσερις επικαλύψεις, και με αυτό το δεδομένο, εκτελώντας την παραπάνω πράξη το συνολικό μήκος νήματος που θα χρειαστεί είναι 314m ( $314 \cdot 10^3$ mm).

Η ανέμη εξετάστηκε για διαστάσεις: 50mm διάμετρος, 90mm μήκος.

Για τις διαστάσεις του παραπάνω νήματος σε κάθε στρώση η διάμετρος αυξάνεται κατά 0.4mm οπότε και η έκταση νήματος που καλύπτει μία στρώση, αλλάζει:

$$x_{filament} = 2\pi R_{shaft\_r} \frac{1}{D_{filament}} x_{shaft\_r}$$

Όπου το  $R_{shaft\_r}$  είναι η ακτίνα της ανέμης (reel) που αυξάνεται κατά 0.2mm ανά στρώση νήματος. Για την εύρεση του αριθμού των στρώσεων στην ανέμη γίνεται 0 παρακάτω υπολογισμός στη Matlab:

```
R=25; %aktina anemhs
do=0.5; %diametros nhmatos
L=90; %mhkos anemhs
a=0; %a8roisma mhkwn nhmatos

for i=1:40
x=do*2*pi*(2*R+i)*L;
a=a+x;
end
```

Όταν η ανέμη έχει επικαλυφθεί 40 φορές βρέθηκε ότι φέρει νήμα 319 μέτρων, το οποίο καλύπτει τις απαιτήσεις των 314 μέτρων για να ολοκληρωθεί η επικάλυψη του καλουπιού. Η εξωτερική διάμετρος της ανέμης που φέρει το πλήρες νήμα πριν την κατεργασία θα είναι:

$$\frac{1}{2}(2R_{shaft\_min} + i) = R_{shaft\_max}$$

$$R_{shaft\_max}=45\text{mm}$$

(ii) Η ροπή είναι  $T=F \cdot R$ , και επηρεάζεται άμεσα από την ακτίνα, δηλαδή από την απόσταση στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη [28]. Επιθυμούνται μικρές διακυμάνσεις στις δυνάμεις για μία ομαλότερη περιέλιξη, οπότε επιθυμείται η ακτίνα της ανέμης να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, ώστε το νήμα που θα την περικλείει να μην αλλάζει πολύ την ακτίνα δράσης (ακτίνα με κέντρο τον άξονα της ανέμης, είναι το σημείο όπου το νήμα που ξετυλίγεται χάνει την επαφή με την ανέμη για να τυλίξει το καλούπι). Δηλαδή αντί για ακτίνα ανέμης 5 χιλιοστά και ακτίνα σημείου δράσης 35 χιλιοστά, να είναι αντίστοιχα 25 και 45 χιλιοστά.

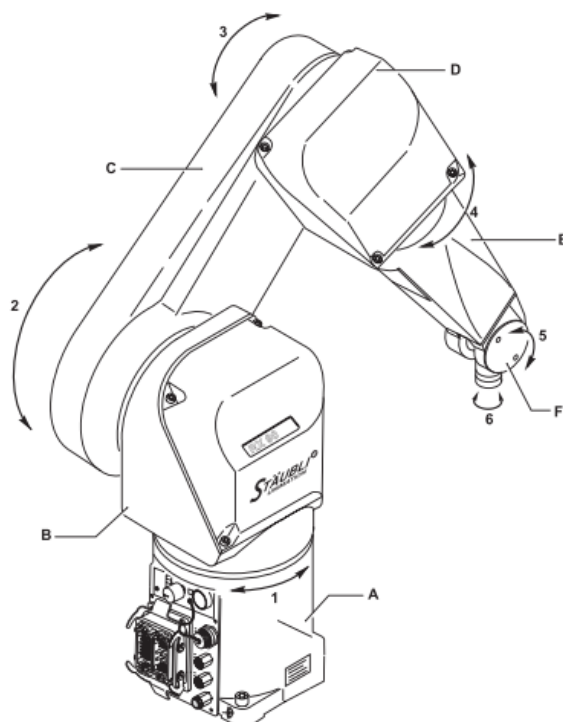
(iii) Το σύστημα παροχής νήματος για προεμποτισμένα νήματα είναι ελαφρώς διαφορετικό από ότι η παροχή του υγρού νήματος. Οι απαιτήσεις αναγράφονται παρακάτω.

- Στα προεμποτισμένα νήματα η τάση πρέπει να είναι υψηλότερη από ότι στα υγρά νήματα.
- Απαιτούνται ράουλα για την ολοκληρωμένη διαδρομή ινών.
- Η κεφαλή παροχής είναι είτε μηχανοκίνητη είτε έχει τη δυνατότητα να στρέφεται.
- Δεν απαιτείται σύστημα εξαγωγής σωματιδίων ή καπνού.

(iv) Απαραίτητα εξαρτήματα είναι οι εντατήρες που καθορίζουν και σταθεροποιούν την τάση στην ανέμη και κατ' επέκταση στο τεμάχιο. Κάθε αλλαγή κατεύθυνσης εγκυμονεί την πιθανότητα να χαλαρώσει το νήμα. Εάν αυτό συμβεί οι επιπτώσεις θα εμφανιστούν στο τελικό προϊόν μιας και προκαλούνται ανομοιομορφίες. Υπάρχει κίνδυνος το κομμάτι να σπάσει ή να αποδυναμωθεί, και να χαλάσει η συμμετρία προκαλώντας κενά ή βαθουλώματα. Επίσης αναγκαία είναι τα ράουλα που φροντίζουν για την ομαλή διαδρομή του νήματος ώστε να αποτρέψουν το νήμα συστραφεί (ειδικά εάν χρησιμοποιείται ταινία). Το υλικό των ραούλων πρέπει να είναι αντικολλητικό όπως τεφλόν, τεφλόν με γυάλινο ή χάλκινο εσωτερικό (πιο ανθεκτικό από σκέτο τεφλόν), αλουμίνιο ή χάλυβας με επικάλυψη από τεφλόν. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανοξειδωτος χάλυβας και αλουμίνιο χωρίς επικάλυψη με χαμηλότερη όμως αποτελεσματικότητα. Για την αποδοτικότερη χρήση των ραούλων απαιτείται αντιτριβικός δακτύλιος ή ρουλεμάν.

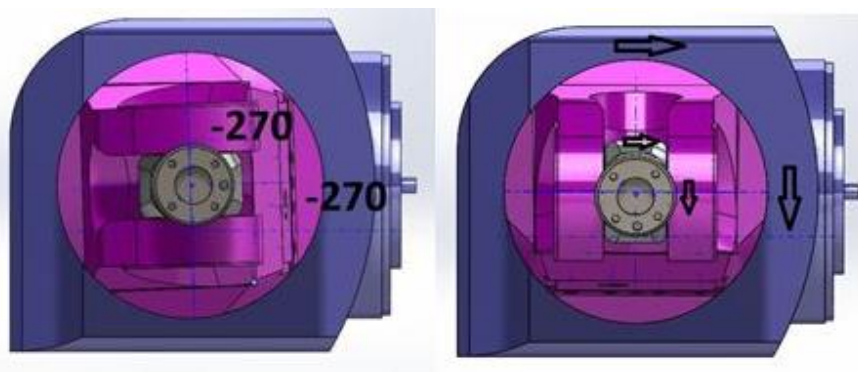


## 5.2 Κατάστρωση πορείας



Σχήμα 5.2: Ρομποτικός βραχίονας Stäubli

Πρώτα γίνεται μια αρχική διερεύνηση της συνολικής περιστροφής που μπορεί να διανύσει η κεφαλή. Επομένως μελετώνται οι αρθρώσεις 4 και 6 που ευθύνονται για την περιστροφή. Ο ρομποτικός βραχίονας Stäubli RX90L σε αυτές τις αρθρώσεις έχει εμβέλεια  $\pm 270^\circ$ . Η συνολική εμβέλεια και των δύο επομένως είναι  $1080^\circ$  δηλαδή μπορούν να γίνουν  $1080/360=3$  περιστροφές ίδιας φοράς. Αρχικά οι αρθρώσεις 4 και 6 είναι τοποθετημένες στις  $0^\circ$ . Στη συνέχεια τοποθετούνται αντίστοιχα και οι δύο στις  $270^\circ$  ή  $-270^\circ$  για να ξεκινήσει η περιστροφή από εκείνο το σημείο και να επιτευχθεί η τελική εμβέλεια των  $1080^\circ$ .



Σχήμα 5.3: Περιστροφή αρθρώσεων 4 και 6

Η παραπάνω περιορισμένη εμβέλεια περιστροφής είναι εμπόδιο για τη συνεχή ομόρροπη κίνηση που είναι επιθυμητή για τη συνεχή τοποθέτηση ινών, με αποτέλεσμα, εκτός από τους κινητήρες του ίδιου του ρομπότ, να απαιτείται ένας επιπλέον εξωτερικός κινητήρας που είτε θα περιστρέφει το καλούπι στο οποίο θα τυλίγεται το νήμα είτε θα περιστρέφει την κεφαλή.

### 5.2.1 Επαγωγικός κινητήρας

Η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα βασίζεται στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα στο στάτη (σταθερό τύλιγμα) και το δρομέα (τύλιγμα άξονα). Το πεδίο αυτό διαρρέει το διάκενο μεταξύ στάτη και ρότορα (δρομέα) και δημιουργεί ροή ρεύματος στα τυλίγματα του ρότορα. Αυτή παράγει μία δύναμη στο ρότορα, καθώς το ρεύμα αλληλοεπιδρά με το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την κίνηση του άξονα του κινητήρα. Ωστόσο, αν ο ρότορας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με το περιστρεφόμενο πεδίο, δεν θα υπάρχει μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, άρα δεν θα υπάρχει ροπή. Κατά συνέπεια ο ρότορας πρέπει να περιστρέφεται λίγο πιο αργά από το περιστρεφόμενο πεδίο, έτσι ώστε να παράγεται πάντα ροπή. Αυτή η διαφορά ταχύτητας ονομάζεται ολίσθηση.

Η ταχύτητα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι περίπου ανάλογη της συχνότητας ( $f$ ) του περιστρεφόμενου πεδίου της τροφοδοσίας. Υποθέτοντας ότι το  $K$  αντιπροσωπεύει τα δεδομένα μηχανικής σχεδίασης του κινητήρα, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$n = K * f$$

Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να μεταβληθεί η ταχύτητα πρέπει να μεταβληθεί η συχνότητα τροφοδοσίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μαγνητική ροή στον κινητήρα εξαρτάται από την αναλογία μεταξύ τάσης και συχνότητας:

$$\Phi = \frac{V}{f}$$

Η ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα είναι επίσης ανάλογη της μαγνητικής ροής.

$$M = K * \Phi$$

Η ροπή λοιπόν του κινητήρα είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη μαγνητική ροή και καθορίζεται τόσο από την τάση όσο και από τη συχνότητα του. Έτσι, η ταχύτητα του κινητήρα εξαρτάται από την επιβαλλόμενη συχνότητα, όπως και από την οργάνωση των τυλιγμάτων.

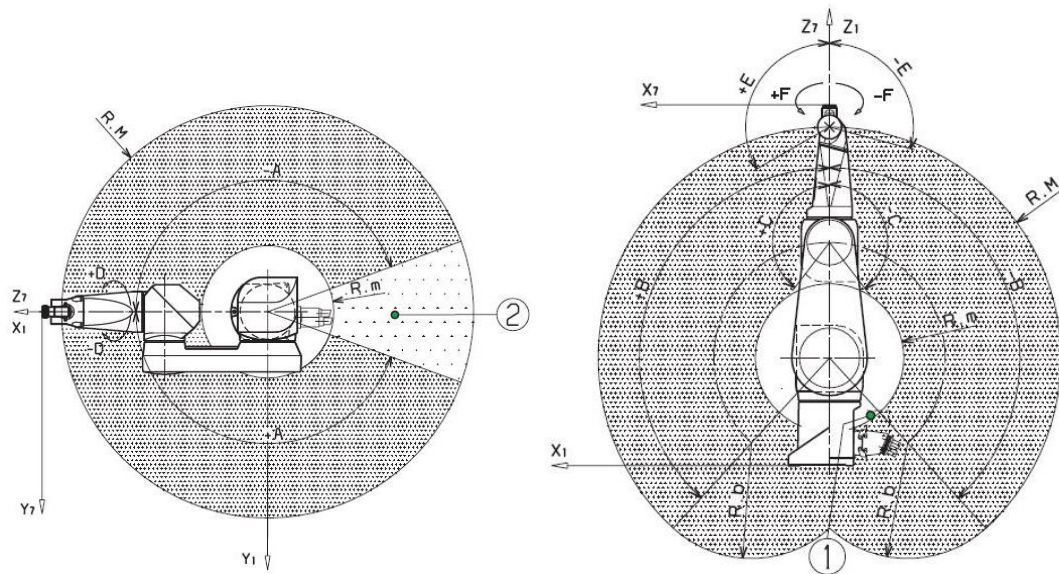
Σύμφωνα με τις παραπάνω πληροφορίες, μπορεί να καταστεί δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα και επομένως της ταχύτητας περιέλιξης ινών.

## 5.3 Αρθρώσεις στο Solidworks

Στη συνέχεια μελετάται η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα Stäubli RX90L. Για να γίνει αυτό πρέπει να ορισθούν στο σχεδιασμό με χρήση υπολογιστή (CAD), οι περιορισμοί στην περιστροφή των διαφορετικών αρθρώσεων που συνθέτουν το ρομπότ. Δίνονται από τον κατασκευαστή τα όρια των αρθρώσεων.

Όρια Αρθρώσεων						
Αρθρωση	1	2	3	4	5	6
Εύρος (°)	320	275	285	540	225	540
Όρια (°)	±160	±137.5	±142.5	±270	-105, 120	±270

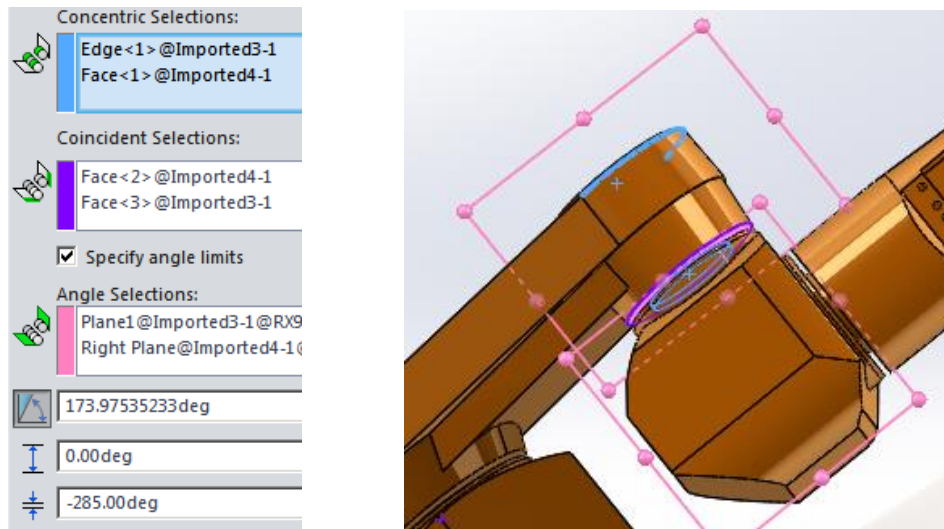
Τα όρια των αρθρώσεων καθορίζουν το χώρο εργασίας του βραχίονα. Ως χώρος εργασίας ορίζεται ο χώρος στον οποίο μπορεί να βρεθεί το τελικό σημείο δράσης με οποιονδήποτε προσανατολισμό.



Σχήμα 5.4: Χώρος εργασίας του ρομπότ Staubli RX90.

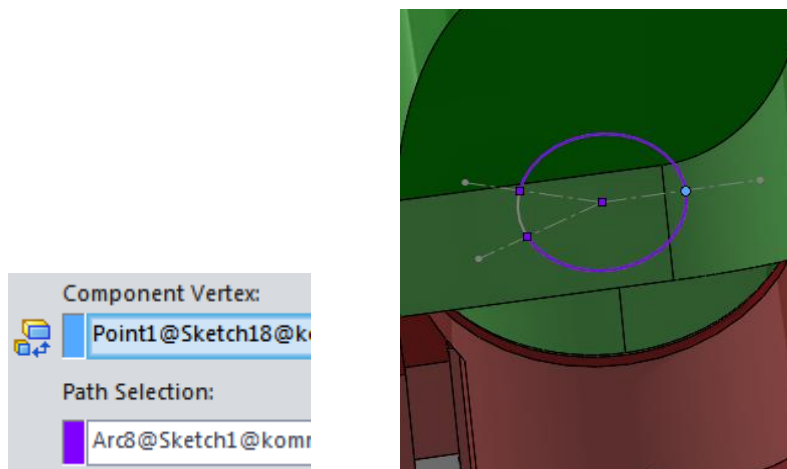
Πρώτα θα αναφερθούν δύο τρόποι προς αποφυγή μιας και το λογισμικό παρουσίασε πρόβλημα και δεν τηρούσε τις επιλεγμένες συνεργασίες μεταξύ των κομματιών (mates). Στις συνεργασίες αυτές επιλέγονται επιφάνειες, άξονες, σχέδια, ακμές κ.ά, ώστε να δημιουργούνται συσχετισμοί μεταξύ των κομματιών.

Η πρώτη επιλογή ήταν να συνεργαστούν τα κομμάτια με το «hinge mate» (Σχήμα 5.5) με επιλογή των δύο επιφανειών που δημιουργούν την άρθρωση ως ομόκεντρες και εφαπτόμενες και σαν εύρος περιστροφής τη συνθήκη του κατασκευαστή. Για να ορισθεί το εύρος συσχετίστηκαν δύο επίπεδα των δύο κομματιών της άρθρωσης αντίστοιχα όπου στο σημείο ισορροπίας του ρομπότ (αρχικοποιημένες αρθρώσεις), τα δύο επίπεδα ταυτίζονται. Παρακάτω παρίσταται η άρθρωση 3.



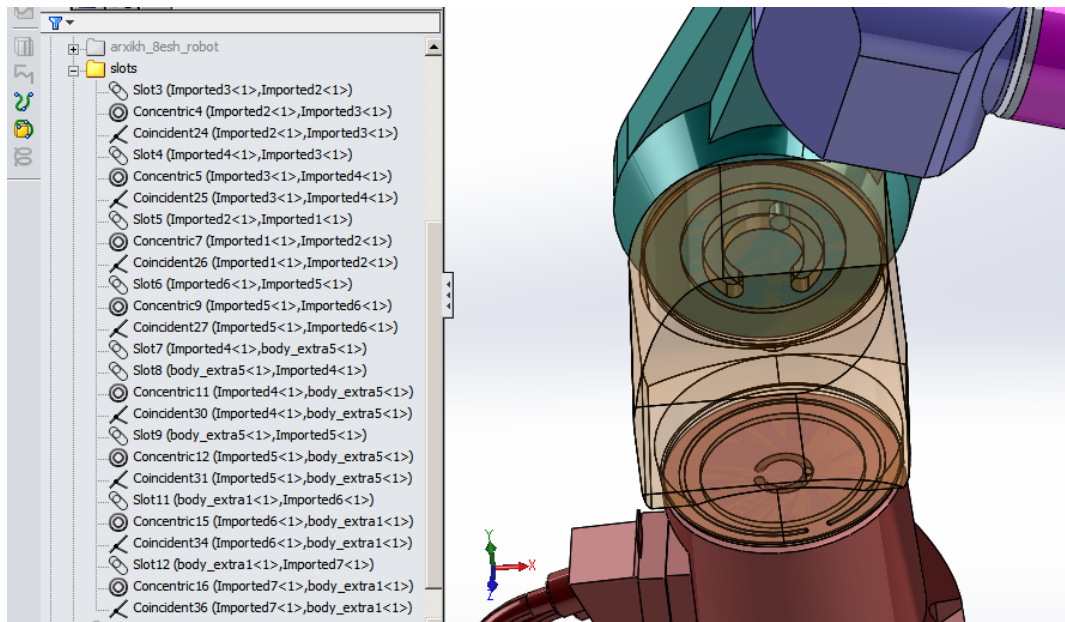
Σχήμα 5.5: Συνεργασία (Hinge Mate) στην Άρθρωση 3.

Η επόμενη τεχνική προσέγγισης ήταν με το «path mate». Δηλαδή σχεδιάζεται στο ένα κομμάτι της άρθρωσης το τόξο κύκλου που αντιστοιχεί στο εύρος κίνησης και στο άλλο κομμάτι ένα σημείο που θα πρέπει να ακολουθεί αυτή τη διαδρομή (path).



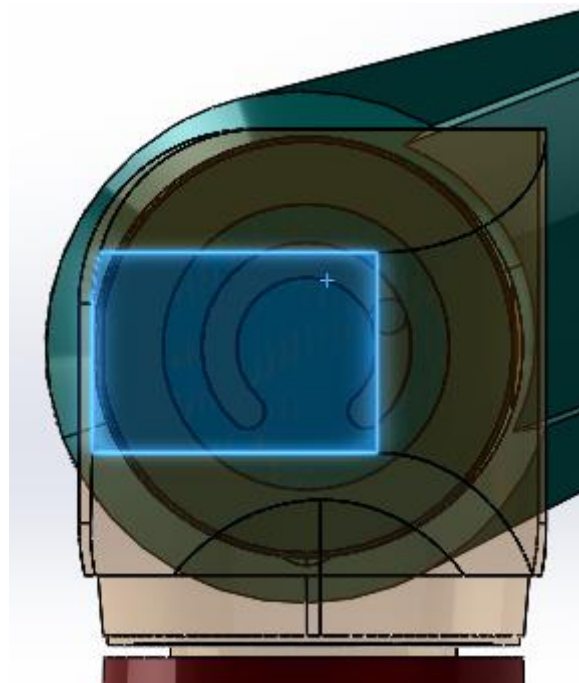
Σχήμα 5.6: Συνεργασία (Path Mate) στην Άρθρωση 1

Τέλος οι περιορισμοί λειτούργησαν μόνο όταν τα όρια που δόθηκαν ήταν φυσικοί περιορισμοί, όχι νοητοί όπως οι προηγούμενοι, μιας και το SOLIDWORKS είναι ένα πρόγραμμα που αντιλαμβάνεται τους περιορισμούς σαν φυσικά αίτια. Χρησιμοποιήθηκε εν τέλει το «slot mate» (διαθέσιμο στις εκδόσεις Solidworks 2014 και έπειτα). Σχεδιάστηκαν στα δύο ενωμένα κομμάτια, αντίστοιχα, για κάθε άρθρωση, μία αύλακα και ένας κύλινδρος που θα μετακινείται μέσα στην αύλακα. Η αύλακα έχει τόξο το εύρος κίνησης της άρθρωσης.



Σχήμα 5.7: Συνεργασία (Slot Mate) στην Άρθρωση 2 και 3.

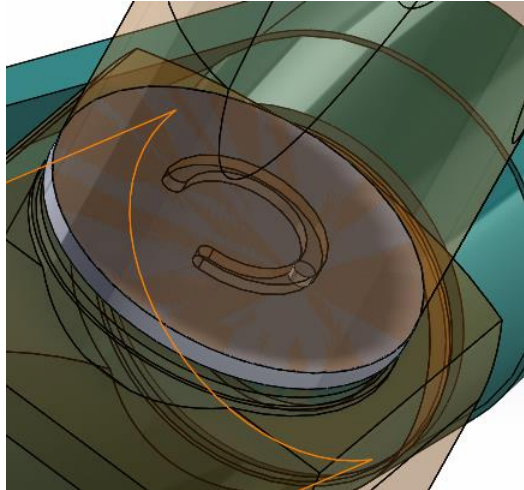
Για κάθε άρθρωση ορίστηκαν τρία «mates»: Slot , Concentric και Coincident. Τα «slots» σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτύχουμε το εύρος κίνησης που ορίζει ο κατασκευαστής.



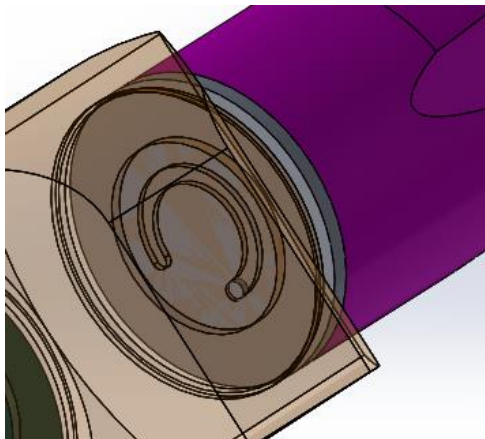
Σχήμα 5.8: Άρθρωση 2

Το επόμενο πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπισθεί ήταν στις αρθρώσεις που υπερβαίνουν τις 360° , συγκεκριμένα οι αρθρώσεις 4 και 6 που έχουν εύρος 540°.

Για να δημιουργηθεί με φυσικά εμπόδια το εύρος των 540° διαιρέθηκε η κίνηση σε δύο μέρη. Κόπηκαν συγκεκριμένου μεγέθους κυλινδρικοί δίσκοι των κομματιών και στη συνέχεια προστέθηκαν, αφού τροποποιήθηκαν, με αύλακα από τη μία πλευρά και με έναν προεξέχοντα κύλινδρο από την άλλη, για να καλυφθούν οι απαιτήσεις που ορίζει το «slot mate». Ουσιαστικά χωρίστηκε η εμβέλεια διά δύο, σε 270°.



Σχήμα 5.9: Δίσκος στην άρθρωση 4 ενωμένος με το κομμάτι 5 (forearm)



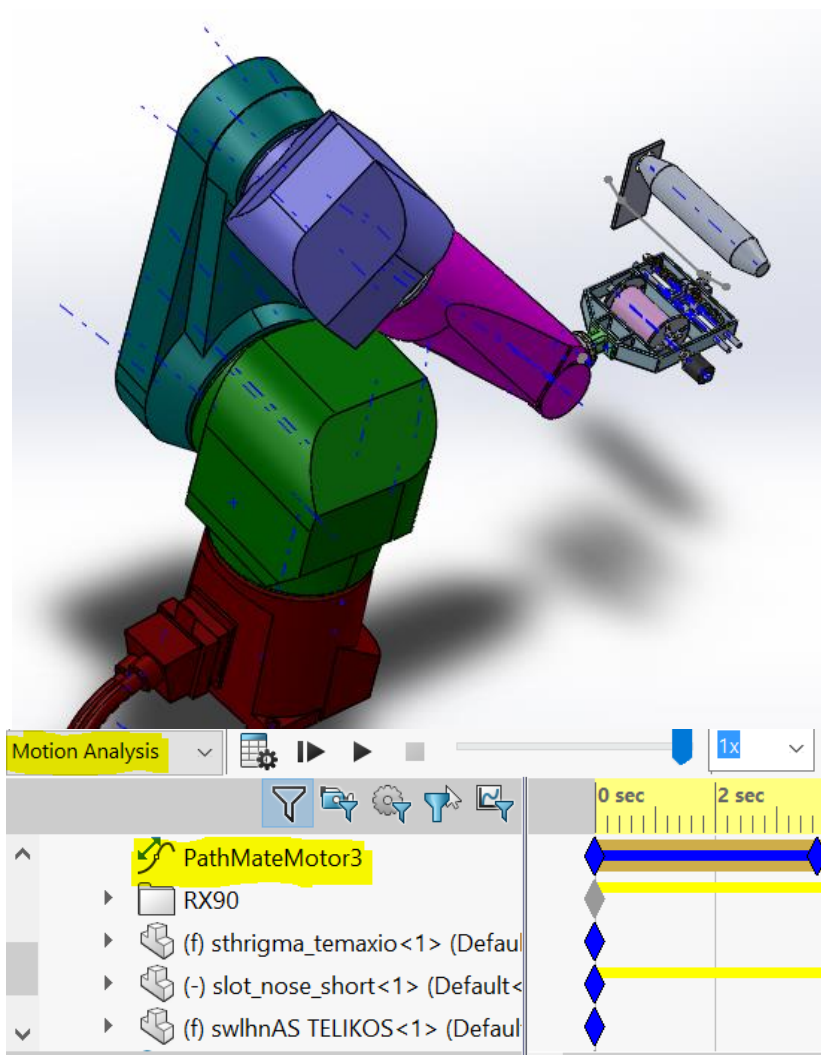
Σχήμα 5.10: Δίσκος στην άρθρωση 4 ενωμένος με το κομμάτι 4 (elbow)

## 5.4 Motion Analysis

Όλοι οι περιορισμοί πρέπει να είναι φυσικοί, οπότε σχεδιάζονται τα απαραίτητα κομμάτια που θα εξυπηρετήσουν την επιθυμητή κίνηση. Έπειτα σημειώνεται η

κίνηση της κάθε άρθρωσης για να εισαχθεί μέσω της γλώσσας V+ στο ρομποτικό βραχίονα [22].

Διεκπεραιώνεται πρώτα η προσομοίωση στο Motion Analysis (Solidworks Professional Edition Tools, Add-Ins...). Σχεδιάζεται η διαδρομή και χρησιμοποιείται η εντολή «fit spline», ώστε η χαραγμένη πορεία, παρόλο που αποτελείται από διαφορετικές ευθείες γραμμές ή καμπύλες, να αναγνωρίζεται από το πρόγραμμα ως μία.

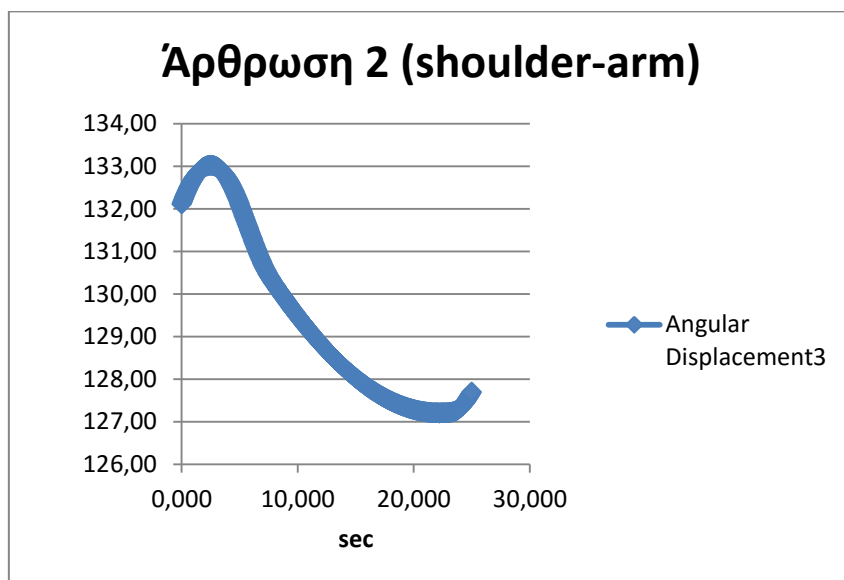
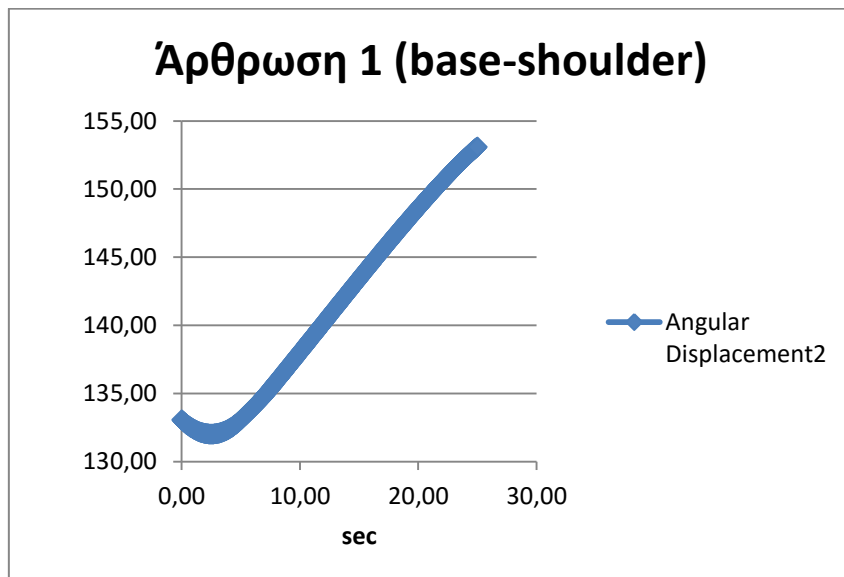


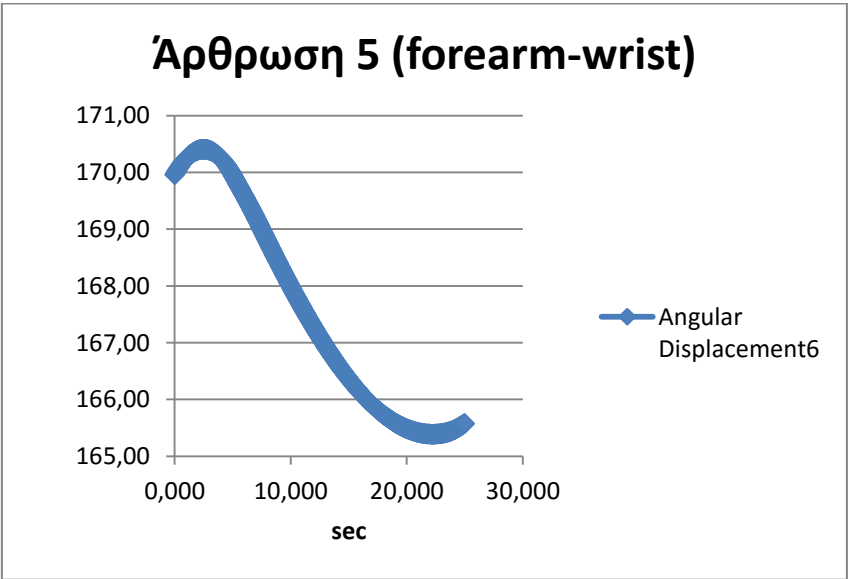
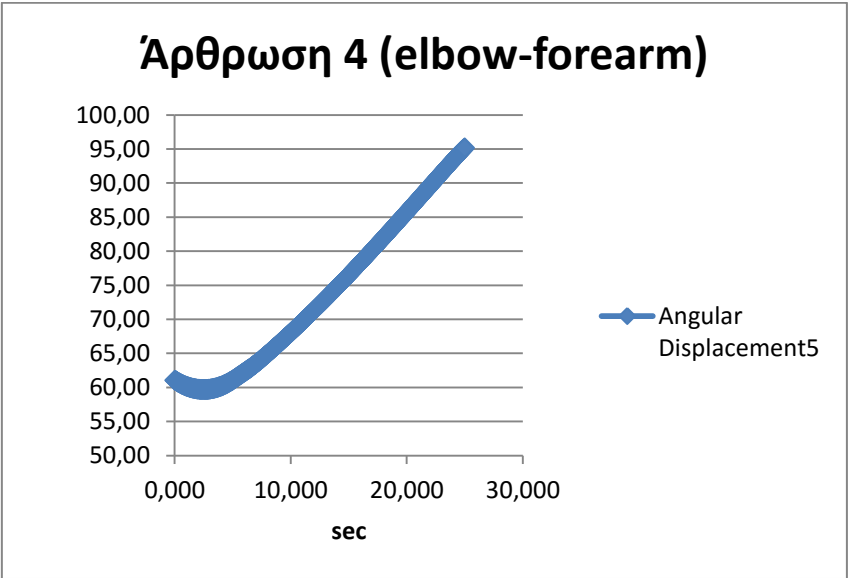
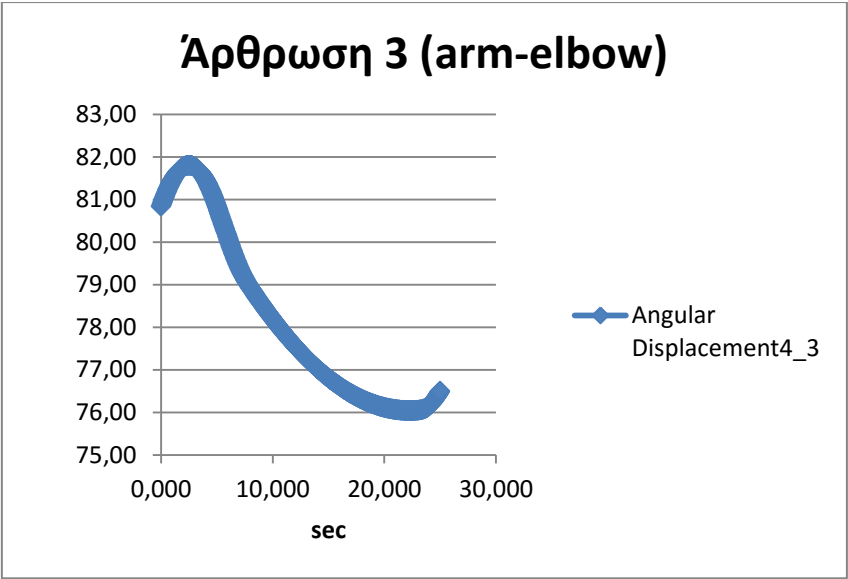
Σχήμα 5.11: Motion Analysis για τη διαδρομή (γκρι γραμμή) της κεφαλής

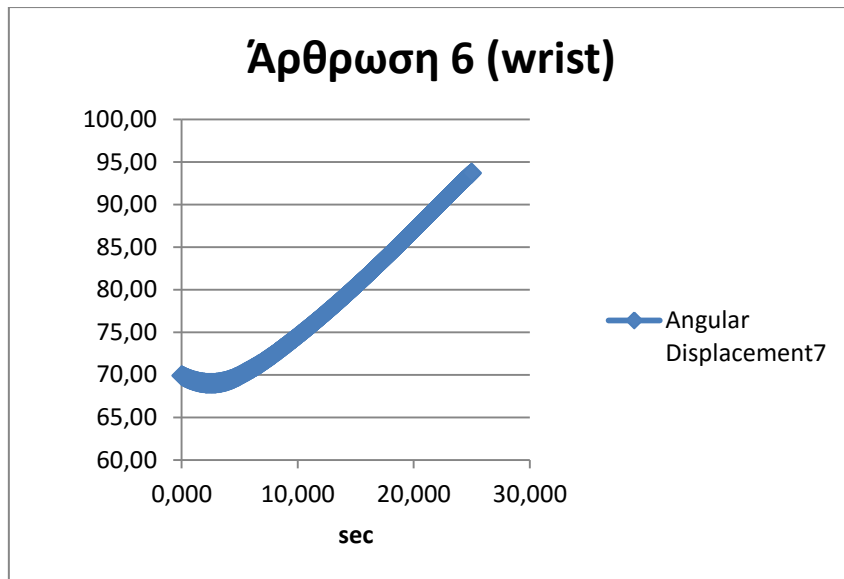
Η κεφαλή έχει συνδεθεί ώστε να είναι η οριζόντια πλευρά της παράλληλη στο έδαφος και η μπροστινή επιφάνεια παράλληλη στο περιστρεφόμενο καλούπι. Η γραμμή πορείας σχεδιάστηκε σε απόσταση για να μην υπάρξει σύγκρουση μεταξύ της κεφαλής και του καλουπιού.



Στη συνέχεια αναλύεται η κάθε κίνηση των αρθρώσεων κατά τη μετακίνηση. Στα διαγράμματα, στον άξονα των Χ φαίνεται ο χρόνος σε δευτερόλεπτα, ενώ στον άξονα των Υ η γωνία μεταξύ των δύο κομματιών της άρθρωσης σε μοίρες. Παρέχεται επίσης το φύλλο Excel το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγχρονιστούν όλες οι κινήσεις των αρθρώσεων και να περαστούν σε κώδικα V+.

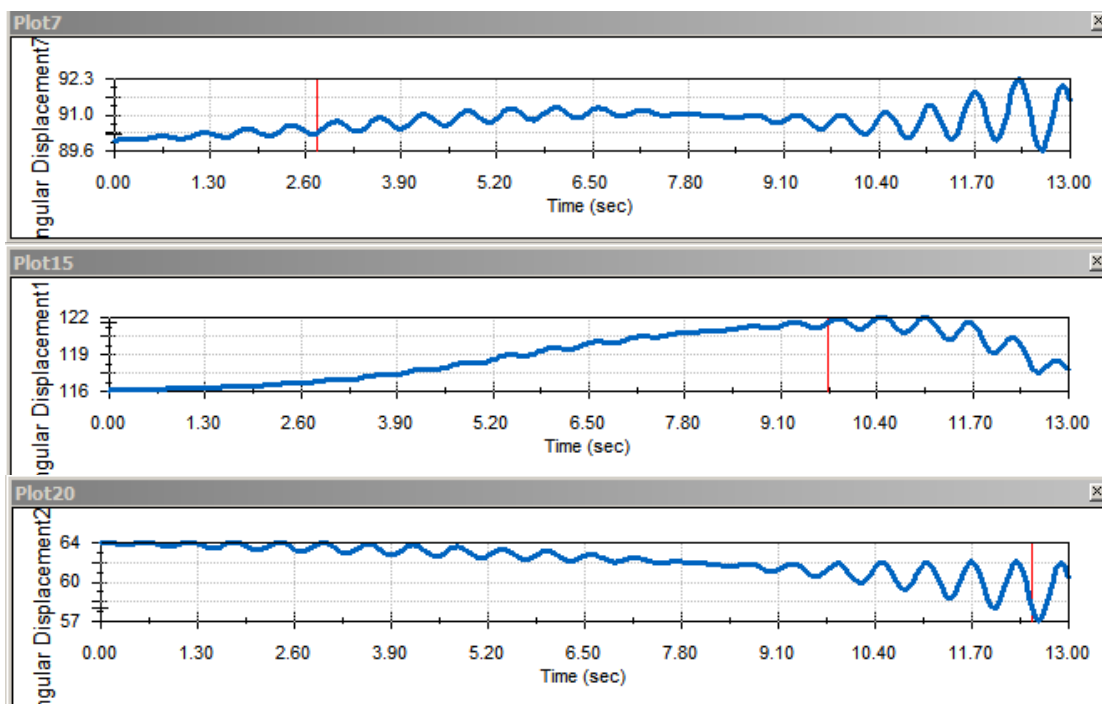






Διάγραμμα 5.1: Κίνηση των αρθρώσεων Γωνιακή μετατόπιση (σε μοίρες) – Χρόνος (σε δευτερόλεπτα)

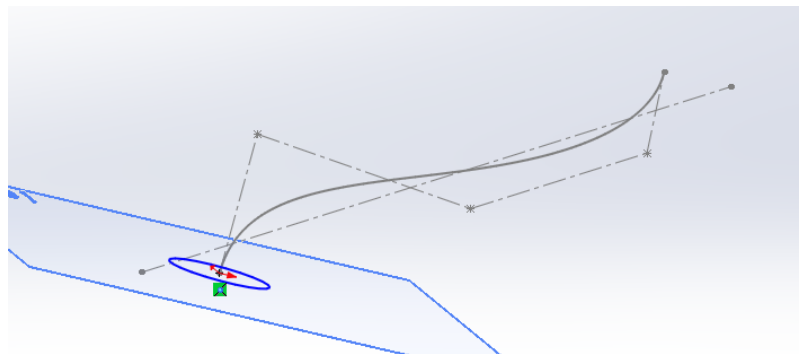
Άλλος ένας τρόπος για να ακολουθήσει το ρομπότ την επιθυμητή τροχιά και να συγχρονιστεί η κίνηση αυτόματα είναι να τοποθετηθούν δύο κινητήρες. Ένας path motor ώστε η ακμή να ακολουθήσει τη διαδρομή της spline και ένας rotary motor για να κάνει το καλούπι την περιστροφική κίνηση. Αυτό δημιουργεί αυτόματα μία κίνηση αρκετά ανώμαλη, γεμάτη ταλαντώσεις, πράγμα που δεν εξυπηρετεί το σκοπό της κατεργασίας.



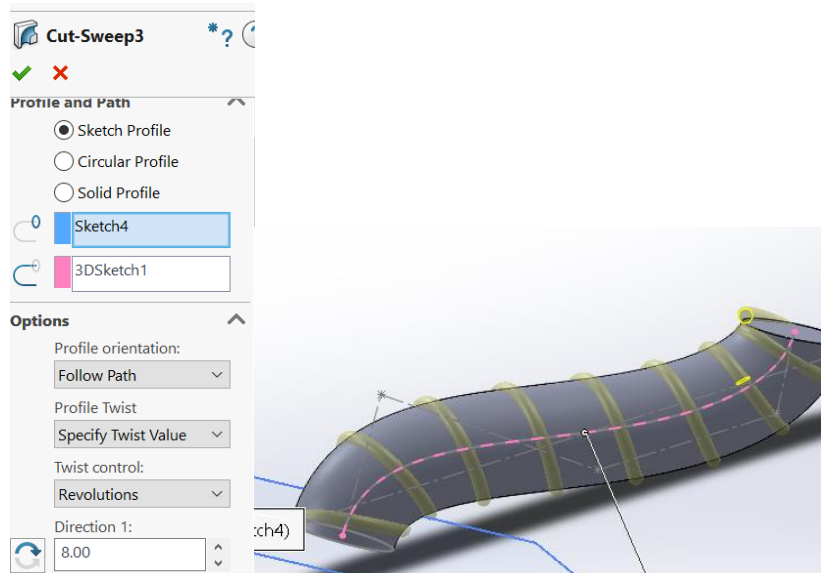
Διάγραμμα 5.2: Χρήση δύο κινητήρων, αποτελέσματα κίνησης στις αρθρώσεις 2, 3, 5

Μία ράβδος με σφαιρική απόληξη προεξέχει από το τελευταίο μέλος τον καρπό (F) (Σχήμα 5.15). Για να ακολουθήσει τη διαδρομή και να μπορεί να καθοριστεί η κατεύθυνση της κεφαλής είναι καλύτερο να δημιουργηθούν όπως έχει αναφερθεί οι φυσικοί περιορισμοί (Σχήμα 5.13)

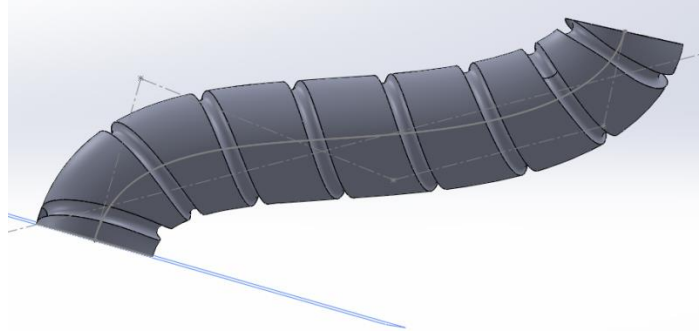
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο σωλήνας σχεδιάστηκε με «path» μία καμπύλη «spline», όπου ένας κύκλος με την επιθυμητή διάμετρο ακολουθεί τη διαδρομή (Σχήμα 5.12). Για την καμπύλη γύρω από το σωλήνα χρειάστηκε πρώτα να δημιουργηθεί ένα «3D Sketch» για να είναι δυνατόν η «spline» να χρησιμοποιηθεί στο «Swept Cut» (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.12: Σχέδιο σωλήνα. Καμπύλη spline και διάμετρος.

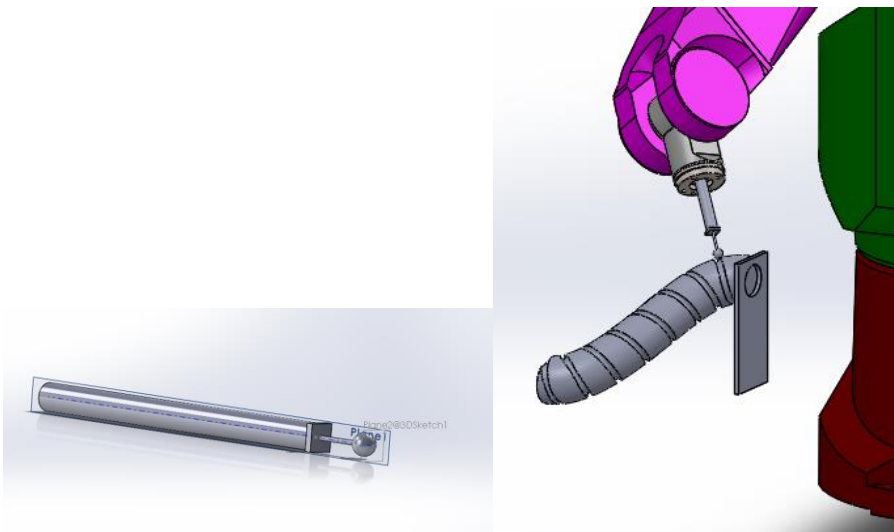


Σχήμα 5.13: Swept Cut επιλογή με ελίκωση 8 περιστροφών.



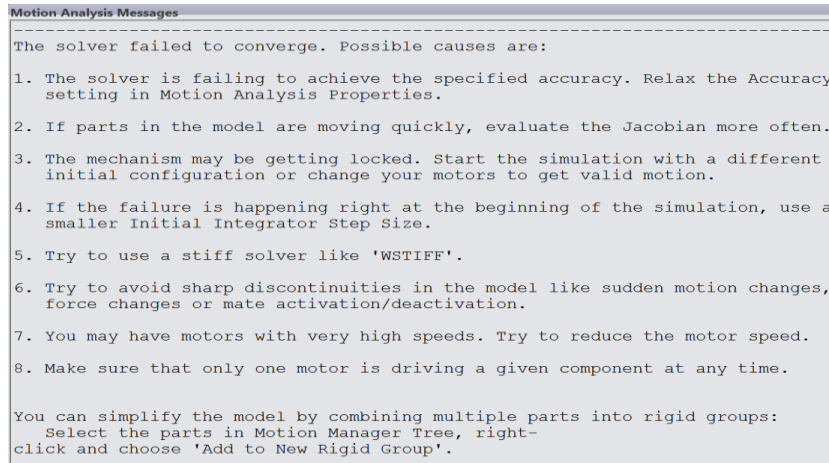
Σχήμα 5.14: Σωλήνας σχεδιασμένος με τους φυσικούς περιορισμούς.

Στο «motion analysis» πρέπει να ορίζονται τα «solid bodies» για να μην εισχωρεί το ένα «part» στο άλλο.



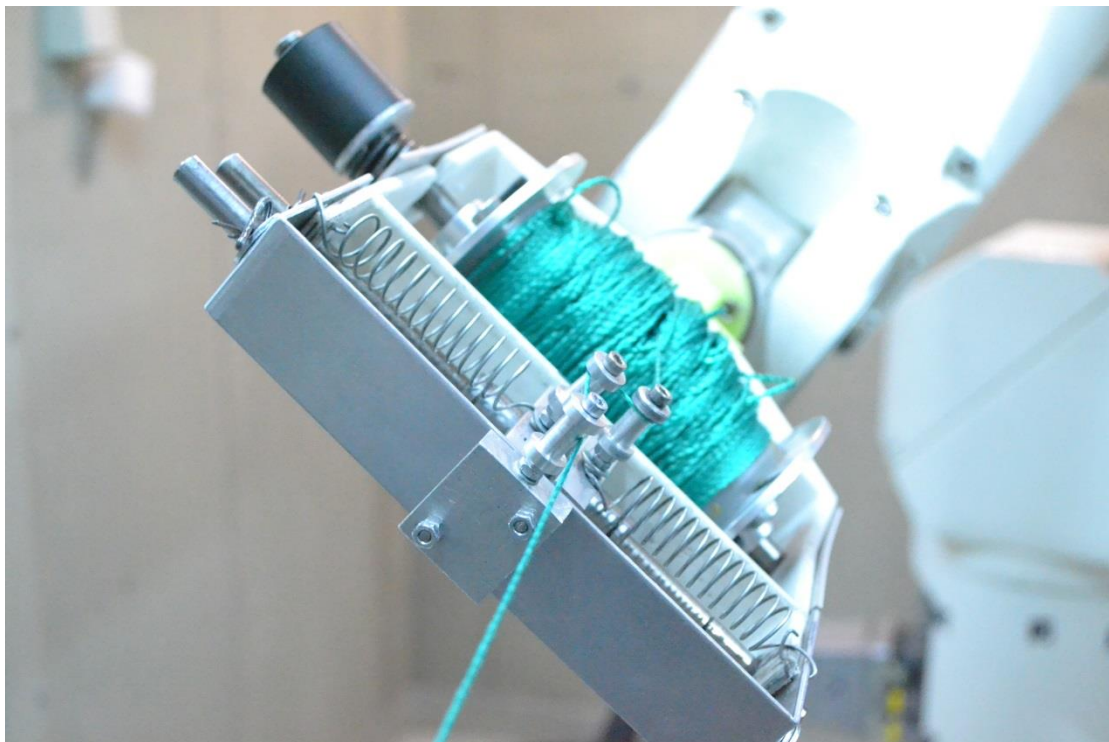
Σχήμα 5.15: Η ράβδος πάνω στη χαραγμένη διαδρομή.

Το Solidworks χρησιμοποιεί τον «solver» ADAMS (Αυτοματοποιημένη Δυναμική Ανάλυση Μηχανολογικών Συστημάτων), το οποίο είναι ένα λογισμικό για Δυναμική προσομοίωση εξοπλισμένο με τους αριθμητικούς επιλυτές Fortran και C++. Σε τέτοιου είδους πολύπλοκες κινήσεις ο ADAMS δεν μπορεί να βρει λύση στις εξισώσεις μιας και υπάρχουν πάρα πολλοί περιορισμοί (solid bodies, path mates, slot mates κ.ά.) (Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.16: Μήνυμα από το λογισμικό ADAMS.

## 5.5 Προγραμματισμός στη γλώσσα V+



Σχήμα 5.17: Κεφαλή συναρμολογημένη στο βραχίονα

Η γλώσσα προγραμματισμού V+ καθιστά δυνατό τον καθορισμό της τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα σε πραγματικό χρόνο. Ο βραχίονας ελέγχεται από τον Η/Υ ή/και παράλληλα από την κονσόλα χειροκίνητου ελέγχου (Σχήμα 5.1). Η V+ παρέχει όλες τις απαραίτητες εντολές για να μετακινηθεί ο βραχίονας με την επιθυμητή κίνηση. Ένα από τα πλεονεκτήματα είναι η απλότητα στη χρήση,

μιας και όλες οι εντολές μπορούν να εκτελεστούν από την οθόνη του τερματικού και έπονται της εντολής «**DO**».

Χρήσιμες εντολές για την παρούσα εργασία είναι οι παρακάτω:

- **SPEED:** θέτει το ποσοστό της ονομαστικής ταχύτητας του ρομπότ
- **READY:** μετακινεί τις αρθρώσεις του ρομπότ στη θέση ελάχιστης καταπόνησης των αρθρώσεων (standard configuration)
- **DISABLE POWER:** τερματισμός λειτουργίας
- **MOVE:** κίνηση με κυκλική παρεμβολή από το αρχικό προς το τελικό σημείο
- **MOVES:** κίνηση με γραμμική παρεμβολή από το αρχικό προς το τελικό σημείο
- **BREAK:** διακόπτει την εκτέλεση του προγράμματος
- **DELAY:** υπάρχει καθυστέρηση για μία καθορισμένη περίοδο χρόνου
- **HERE:** βγάζει στο τερματικό την ακριβή θέση της παρούσας στιγμής , είτε των 6 αρθρώσεων μέσω της εντολής «DO HERE #A», είτε του εργαλείου μέσω της εντολής «DO HERE A» τα x, y, z και yaw, pitch, roll.
- **TRANS:** ορίζει τη νέα θέση του εργαλείου του ρομπότ και συντάσσεται ως «TRANS (X, Y, Z, y, p, r) ».
- **#PPOINT:** ορίζει τη νέα θέση των αρθρώσεων του ρομπότ «#PPOINT (J1, J2, J3, J4, J5, J6)».
- **SET:** επιτρέπει στο χειριστή να δώσει όνομα θέσης σε οποιοσδήποτε συντεταγμένες επιθυμεί, είτε για το εργαλείο (TOOL) είτε για τις αρθρώσεις (JOINT) και συντάσσεται ως «SET thesi1= TRANS (X, Y, Z, y, p, r) » ή εναλλακτικά «SET #thesi1= #PPOINT (J1, J2, J3, J4, J5, J6) ».
- **ABOVE:** δίνει εντολή στη επόμενη κίνηση του βραχίονα, ο αγκώνας (D) (Σχήμα 5.2), να βρίσκεται πάνω από το επίπεδο που ορίζουν ο ώμος (B) και ο καρπός (F)

Ένα πρόβλημα που συναντήθηκε χωρίς να μπορεί να αντιμετωπιστεί, ήταν η εφαρμογή σταθερής ταχύτητας ειδικά εάν δίνονται ενδιάμεσα σημεία στην κίνηση. Το παραπάνω ήταν αδύνατο μιας και οι κινητήρες από το ένα σημείο στο άλλο έχουν αυτόματα επιτάχυνση και επιβράδυνση που δεν μπορεί να επηρεαστεί από το χειριστή. Σε μικρές κατεργασίες όπως στην παρούσα εργασία η ταχύτητα του βραχίονα θα είναι κατά μήκος του καλουπιού 80mm/sec. [5]

Αρχικά γίνεται η **προετοιμασία παραθύρου**:

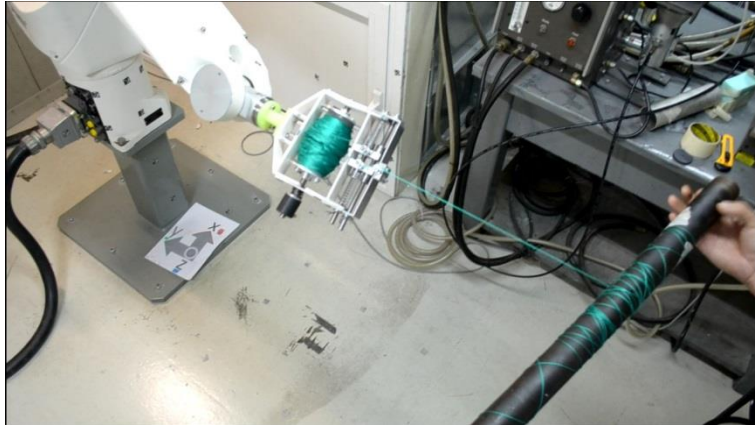
- **Setup** → **Window** → **Scroll Buffer** → επιλέγεται και πληκτρολογείται ένας μεγάλος αριθμός γραμμών, όπως π.χ. 10.000 lines για να υπάρχει μεγάλη χωρητικότητα γραμμών στο τερματικό (έτσι ώστε να βελτιωθεί η εποπτεία και γνώση των προηγούμενων εντολών).
- **Setup** → **Serial Port** → **Transmit Delay 1msec/char**. Αν χρειαστεί να φορτωθούν δεδομένα από ένα txt, επιλέγεται αυτή η καθυστέρηση για να μπορούν να φορτωθούν άρτια όλα τα δεδομένα.

Στη συνέχεια η **συγγραφή του κώδικα**:

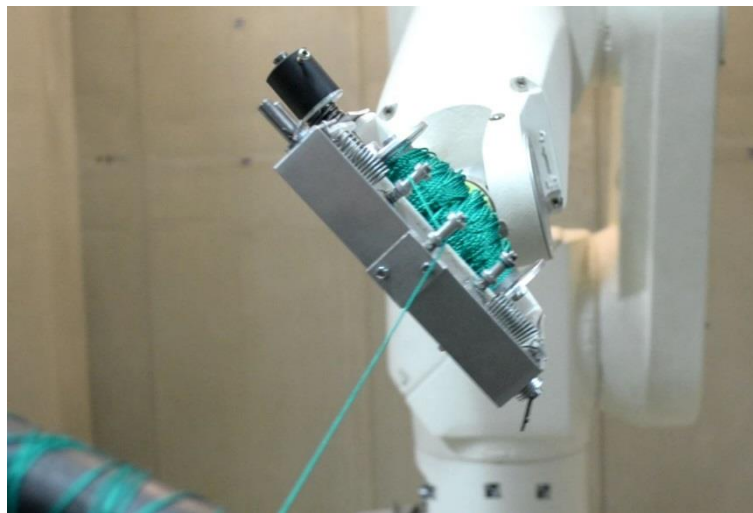
- **SEE όνομα\_προγράμματος**: αυτή η εντολή αφορά τη δημιουργία προγραμμάτων. Αν το πρόγραμμα υπάρχει τότε θα το ανοίξει, αλλιώς αν δεν υπάρχει θα δημιουργηθεί.
- Επιλέγεται το **πλήκτρο "i"** για να μπω στην Insert Mode και να επεξεργαστεί ο κώδικας. Μόλις ολοκληρωθεί η επεξεργασία για να βγω πατώ τα πλήκτρα:
- **ESCAPE + F4**
- **EXECUTE όνομα\_προγράμματος**: εκτελείται ο κώδικας που γράφτηκε [Π.3]

Ο κώδικας στην παρούσα διπλωματική εργασία γράφτηκε για να εκτελείται ελικοειδής περιέλιξης υπό γωνία (η γωνία εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της κεφαλής και του καλουπιού). Οι συντεταγμένες αλλάζουν ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα του καλουπιού. [30,31]

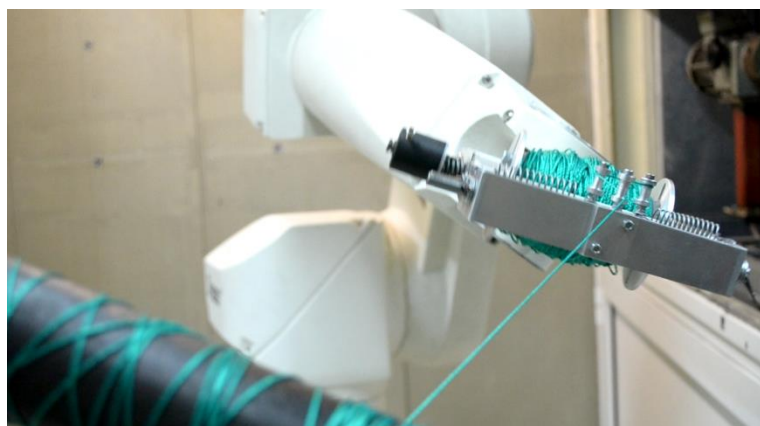




Σχήμα 5.18: Περιέλιξη καλουπιού



Σχήμα 5.19: Τροχαλίες απομακρυσμένες, διατηρούν την τάση νήματος



Σχήμα 5.20: Τροχαλίες κατά τη διαδικασία περιέλιξης

# Κεφάλαιο 6

## Επίλογος

### 6.1 Συμπεράσματα

Από την τελική λειτουργία που πραγματοποιήθηκε ήταν εφικτό να γίνουν αισθητά τα τελικά συμπεράσματα.

Ήταν πολύ ευχάριστο το γεγονός ότι η συσκευή λειτούργησε κανονικά με την πρώτη δοκιμή χωρίς να χρειαστεί να γίνουν αλλαγές στο τρόπο που λειτουργεί ο μηχανισμός, καθώς τα αποτελέσματα ως προς τα κύρια ζητούμενα που τέθηκαν εξαρχής, ήταν ικανοποιητικά.

Κάθε πρωτότυπο μοντέλο συσκευής όμως, όπως το συγκεκριμένο, έχει κάποια λάθη, κυρίως όσον αφορά το σχεδιασμό του. Τα σχεδιαστικά αυτά λάθη έγιναν αντιληπτά κυρίως κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης αλλά και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της σε πραγματικές συνθήκες. Τα κύρια λάθη που εντοπίστηκαν ήταν:

- Μη επαρκής ανθεκτικότητα σκελετού για μεγάλες τάσεις στις δύο απέναντι επιφάνειες.
- Δυσκολία στην ευθυγράμμιση των οπών των αξόνων.
- Μη επαρκής χώρος για την τοποθέτηση βιδών.

Το πρώτο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε βιδώνοντας αλουμινένιες ενισχύσεις, ώστε να μοιράζεται η φόρτιση και να μην επιβαρύνεται πολύ το πλαστικό πλαίσιο (Σχήμα 6.1).

Το δεύτερο πρόβλημα λύθηκε σχεδιάζοντας ενδεικτικές κωνικές οπές στο CAD που μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση ολοκληρώθηκαν με το δρόπανο (Σχήμα 4.25).

Το τρίτο εμπόδιο ξεπεράστηκε αφού κατεργάστηκαν οι κεφαλές των βιδών στον τόρνο και έτσι μειώθηκε η διάμετρος τους.



Σχήμα 6.1: Μεταλλικές ενισχύσεις

Όσον αφορά το τσόκ που βρίσκεται στο θάλαμο ψεκασμού του Εργαστηρίου, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία της τύλιξης ινών, μιας και απαιτείται ένας κινητήρας ελεγχόμενων στροφών. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται η αντικατάστασή του από έναν βηματικό κινητήρα.

## 6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, ως προς τις παρακάτω κατευθύνσεις:

- Την κατασκευή του σκελετού από αλουμίνιο για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και στιβαρότητα με κατεργασία αποβολής υλικού (Σχήμα 4.31)
- Την αγορά μηχανικού συμπλέκτη τριβής. Στα πλεονεκτήματα του συμπεριλαμβάνονται η ομαλή συνεχής ολίσθηση, η μεγάλη διάρκεια ζωής (20 – 30 εκατ. περιστροφές), καθώς και το εύρος ροπής (0.06-84 Nm).
- Το συγχρονισμό του βηματικού κινητήρα και του ρομποτικού βραχίονα. Θα μπορούσε να στηθεί ένα ελεγχόμενο σύστημα με βάση ένα από τα ήδη υπάρχοντα λογισμικά που έχουν αναφερθεί, όπως Cadfil, CADMAC,

CADFIBER/CADWIND, CompositicaD μεταξύ του ρομπότ και του περιστρεφόμενου καλουπιού. Αυτό σημαίνει ότι με το συγχρονισμό αυτών των δύο, θα επιτευχθεί η επιθυμητή περιέλιξη με τις απαιτούμενες ιδιότητες. Τέλος, στην κεφαλή μπορεί να τοποθετηθεί ένα επιπλέον κινητηράκι, το οποίο θα ελέγχει την τάση του νήματος.

# Βιβλιογραφία

- [1]: A.A. Kracht, «A Linear Base Articulated Robot Arm for Surgical Endoscopy», *Master Thesis*, North Carolina State University, 2006.
- [2]: F.W. DuVall, «Cost comparisons of Wet Filament Winding versus Prepreg Filament Winding for Type II and Type IV CNG Cylinders», *SAMPLE JOURNAL*, Vol. 37, No. 1, pp. 38-42, 2001.
- [3]: S.T. Peters, «Composite Filament Winding», *ASM International*, 2011.
- [4]: D. Tabuchi, T. Sajima, T. Doi, H. Onikura, O. Ohnishi, S. Kurokawa και T. Miura, «Development of a Filament-Winding Machine Based on Internal Heating by a High-Temperature Fluid for Composite Vessels», *Sensors and Materials*, Vol. 23, No. 6, pp.347-358, MYO Tokyo, 2011.
- [5]: M. Päßler, R. Schledjewski, «Filament Winding with Increased Efficiency», Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Germany, [www.ivw.uni-kl.de](http://www.ivw.uni-kl.de), 2012.
- [6]: H. Chen, N. Xi, Y. Chen και J. Dahl, «CAD-GUIDED SPRAY GUN TRAJECTORY PLANNING OF FREE-FORM SURFACES IN MANUFACTURING» in *Journal of Advanced Manufacturing Systems* Vol. 2, No. 1, pp. 47-69, 2003.
- [7]: Y. Lu και D. Liu, «Kinematics Analysis and Simulation on Transfer Robot with Six Degrees of Freedom», *Sensors & Transducers*, Vol. 176, Issue 8, pp. 285-289, 2014.
- [8]: H. T. Hahn και S. S. Lee, «The Stress Development During Filament Winding of Thick Cylinders», *Composites Manufacturing*, Vol. 4, No. 3, pp. 147-156, 1993.
- [9]: E. Ebel, T. Sinnemann, «Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties», *Navigation*, Vol. 1, pp. 2, 2014.

- [10]: M. Quigley, A. Asbeck και A. Y. Ng, «A Low-cost Compliant 7-DOF Robotic Manipulator», *In Robotics and Automation (ICRA), International Conference on IEEE*, pp. 6051-6058, 2011.
- [11]: L. Carrino, W. Polini, L. Sorrentino, «Influence of winding speed on winding tension in robotized filament winding of complex-shape parts», *in Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 10*, pp. 1574-1581, 2005.
- [12]: T. Imamura, K. Akamine, S. Honda, K. Tetashima και H. Takemoto, «Modeling and Tension Control of Filament Winding Process», *IFAC Proceedings Vol. 35, No. 1*, pp. 13-18, 2002.
- [13]: <http://www.designboom.com/architecture/robotically-fabricated-carbon-and-glass-fibre-pavilion-by-icd-itke/>
- [14]: N. Akkus, G. Genc, C. Girgin, «Control of the Pretension in Filament Winding Process», *Acta Mechanica et Automatica, Vol. 2, No. 3*, pp. 5-10, 2008.
- [15]: E. Papadopoulos and K. Kyriakopoulos, «Introduction to Robotics», *Σημειώσεις μαθημάτων Ε.Μ.Π.*, 2004.
- [16]: I. Skjærholt, «Integration Tools for Design and Process Control of Filament Winding», *Master of Science in Product Design and Manufacturing*, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [17] : P. Karpuz, «Mechanical Characterization of Filament Wound Composite Tubes by Internal Pressure Testing», *Doctoral dissertation*, Middle East Technical University, 2005.
- [18]: S. T. Lindsay, A. K. Lefler, C. Oliver, P. Hicken, «Towpreg Winding Delivery System Optimization», *σημειώσεις της TCR™ Prepregs*, USA.
- [19]: L. Carrino, W. Polini, L. Sorrentino, «Modular Structure of a New Feed-Deposition Head for a Robotized Filament Winding Cell», *Composites Science and Technology, Vol. 63, No. 15*, pp. 2255-2263, 2003.

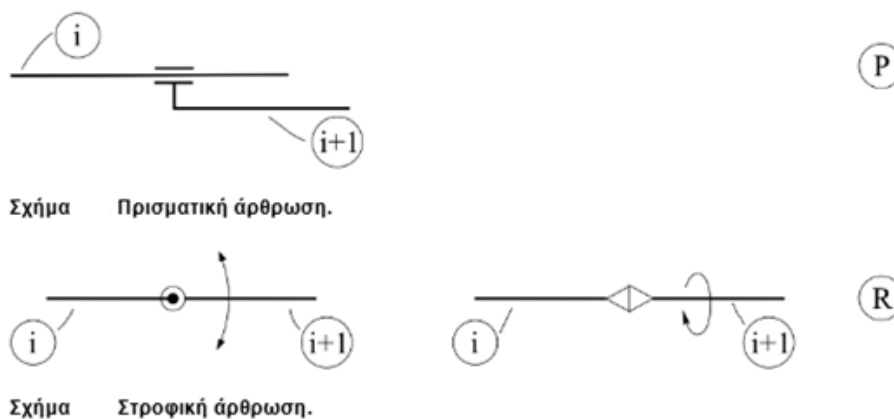
- [20]: N. E. Harry, «Clean Filament Winding: Process Optimization», *Doctoral dissertation*, University of Birmingham, 2012.
- [21]: [http://www.cetim.fr/en/News/Headlines/Headlines/High-performance-filament-winding?WT.mc\\_id=Lettre-cetim\\_2013-11-21](http://www.cetim.fr/en/News/Headlines/Headlines/High-performance-filament-winding?WT.mc_id=Lettre-cetim_2013-11-21)
- [22]: A. Anglani, F. Nucci, A. Spagnolo, «Filament Winding: Simulation for Robotic Cell Design», *In ESM*, pp. 603-608, 2002.
- [23]: <http://hackaday.com/2015/07/14/weaving-carbon-fiber-with-a-kuka-robot/>
- [24]: <http://www.frenossaulea.com/friction/?q=materialaplicacio&ap=Car%20/%20motor cycle%20competition%20clutches&id=en>
- [25]: <http://izumiinternational.com/creel/index.htm>
- [26]: <http://www.dynatect.com/mechanical-motion-control/slip-clutches/mechanical>
- [27]: <http://zoltek.com/products/panex-35/> , eBay πωλητές, <http://www.ixperial.net/>
- [28]: A. Agah-Tehranit, H. Teng, «Analysis of fiber motion during wet filament winding of composite cylinders with arbitrary thickness», *International Journal of Solids and Structures Vol. 29, No. 21*, pp. 2649-2668, 1992.
- [29]: W. Polini, L. Sorentino, «Winding Trajectory and Winding Time in Robotized Filament Winding of Asymmetric Shape Parts», *Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 39, No. 15*, pp. 1391-1411, 2005.
- [30]: Μάνου Ε., «Προγραμματισμός Ρομπότ σε Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας με τη βοήθεια Μαγνητικού Αισθητήρα Έξι Βαθμών Ελευθερίας», *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2015
- [31]: Adept Technology Inc, « V+ Language User' s Guide », Version 12.1, 1997
- [32]: <http://www.easycomposites.co.uk/#!/fabric-and-reinforcement/carbon-fibre-reinforcement/carbon-fibre-tow/carbon-fibre-tow-12k.html>

# Παράρτημα

## Π. Α' Κινηματική

Η κινηματική είναι ο κλάδος της φυσικής που ασχολείται με την κίνηση των στερεών σωμάτων, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι δυνάμεις ή οι ροπές που προκαλούν αυτή την κίνηση. Η κινηματική κατέχει σημαντικό ρόλο στη ρομποτική, όχι μόνο για τον υπολογισμό του δυναμικού μοντέλου του βραχίονα, αλλά επίσης ως απαραίτητη προϋπόθεση για το σχεδιασμό της κίνησης, την ανάλυση ιδιόμορφων σημείων και για τη μετατροπή των συστημάτων (από αρθρώσεις σε καρτεσιανό σύστημα).

Τα σειριακά ρομπότ αποτελούνται από έναν αριθμό άκαμπτων δικτύων συνδεδεμένα με αρθρώσεις. Τα ρομπότ αυτά είναι συνήθως πρισματικά (prismatic) και στροφικά (revolute), διαμορφώνονται με ορθογωνικές, τεμνόμενες ή παράλληλες αρθρώσεις προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα της κατασκευής, μιας και η κατασκευή άρθρωσης με πολλούς βαθμούς ελευθερίας και ο έλεγχος της με κάποιον επενεργητή είναι δύσκολη. Η διακλάδωση της κινηματικής ανάλυσης στα σειριακά ρομπότ είναι η ευθεία και αντίστροφη κινηματική.



Σχήμα 2.11: Αρθρώσεις άκαμπτων δικτύων



Μεταβλητή άρθρωσης: Η σχετική γωνία ή μετατόπιση μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων,  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$

Ευθεία Κινηματική: Εύρεση της θέσης-προσανατολισμού του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα (ή οποιουδήποτε άλλου σημείου ή σώματος) συναρτήσει των μεταβλητών των αρθρώσεων, σχηματικά  $q \rightarrow x_E$ . Οι μεταβλητές για τις στροφικές αρθρώσεις είναι οι γωνίες μεταξύ των συνδέσμων και για τις πρισματικές οι μετατοπίσεις των συνδέσμων.

Με τη βοήθεια της μεθόδου Denavit – Hartenberg δημιουργείται μία συστηματική παραγωγή πινάκων  $\mathbf{A}$  που συνδέουν τη θέση και τον προσανατολισμό ενός συνδέσμου ως προς το προηγούμενο (θέση και προσανατολισμός σταθερού σημείου ή σώματος).

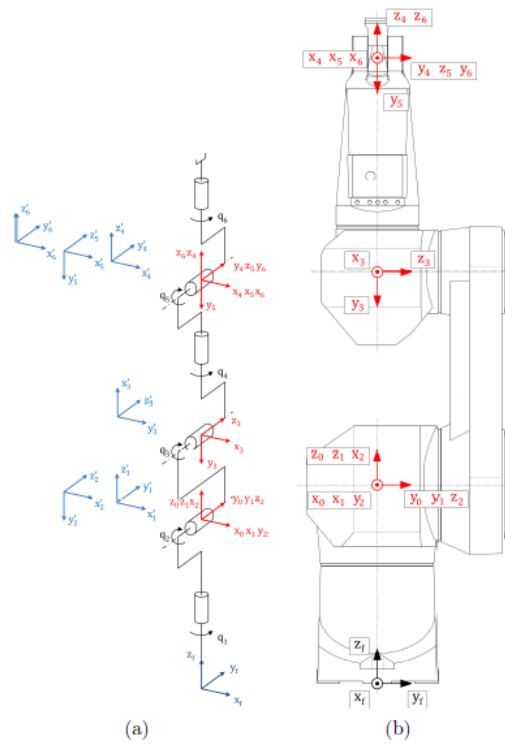
Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δομή τριών αλυσίδων ή κλειστής κινηματικής αλυσίδας (υπάρχουν περιορισμοί και στα δύο άκρα της).

$$A_i^{i-1}(q_i) = A_{i'}^{i-1} A_i^{i'} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & \alpha_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i & -\sin \theta_i d_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & \cos \alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

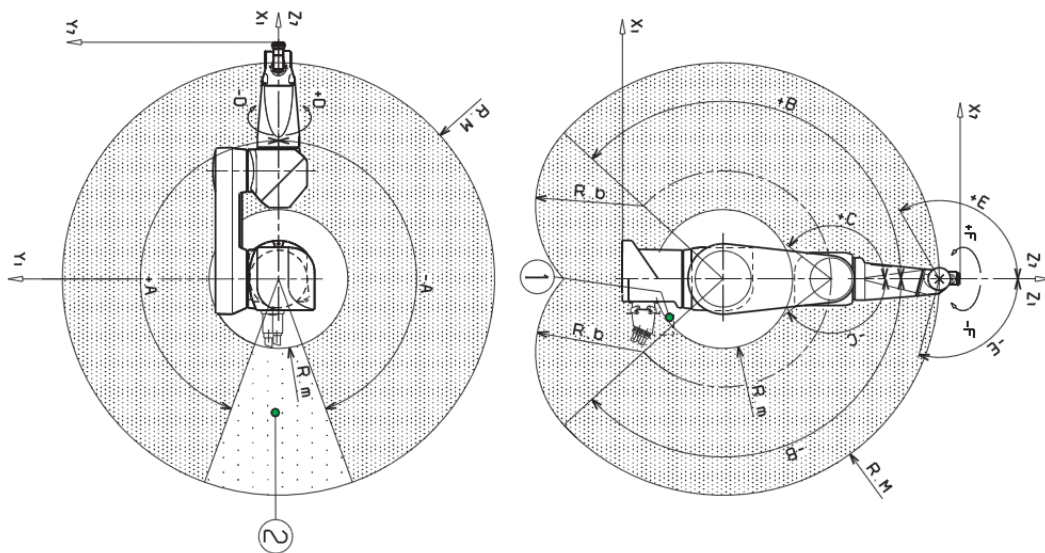
Όπου  $\alpha_i$  και  $d_i$  είναι οι μετατοπίσεις κατά X και Z άξονα αντίστοιχα, ενώ  $\alpha_i$  και  $\theta_i$  οι περιστροφές γύρω από X και Z επίσης [15].

Denavit-Hartenberg parameters of the RX 90

Transformation	$\alpha$ [rad]	a[m]	d[m]	$\theta$ [rad]
foot $\rightarrow$ 1	0	0	0.42	$\theta_1$
1 $\rightarrow$ 2	$-\pi/2$	0	0	$\theta_2 - \pi/2$
2 $\rightarrow$ 3	0	0.45	0	$\theta_3 + \pi/2$
3 $\rightarrow$ 4	$\pi/2$	0	0.45	$\theta_4$
4 $\rightarrow$ 5	$-\pi/2$	0	0	$\theta_5$
5 $\rightarrow$ 6	$\pi/2$	0	0	$\theta_6$



Σχήμα 2.12: (α) Κινηματική δομή του βιομηχανικού ρομπότ με σταθερό σύστημα συντεταγμένων προσαρμοσμένο στο σύνδεσμο. (β) Τοποθεσία του συστήματος συντεταγμένων



Σχήμα 2.13: Κάτοψη του ρομπότ Staubli RX90.

Αντίστροφη Κινηματική: Η εύρεση των μεταβλητών αρθρώσεων που αντιστοιχεί σε κάποια θέση και προσανατολισμό του τελικού σημείου δράσης ή άλλου

σημείου-σώματος. Σχηματικά  $x_E \rightarrow q$ . Χαρακτηριστικά: Η λύση δεν υπάρχει πάντα. Υπάρχει πιθανότητα πολλαπλών λύσεων. Οι λύσεις είναι κλειστής μορφής (αλγεβρική, γεωμετρική) και αριθμητικές.

Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις κινηματικής ενέργειας για κάθε σύνδεσμο του Stäubli RX90 [7].

- Link 1

$$\begin{aligned}
 m_1 &= m_{l_1} + m_{m_1} + m_{m_2} \\
 \bar{I}_1 &= \bar{I}_{l_1} + \bar{I}_{m_1} + \bar{I}_{m_2} \\
 \omega_{m_1} &= \omega_1 - k_{r_1} \dot{q}_1 z_1 \\
 \omega_{m_2} &= \omega_1 - k_{r_2} \dot{q}_2 z_2 \\
 \mathcal{T}_1 &= \frac{1}{2} m_1 \dot{q}^T J_P^{(C_1)T} J_P^{(C_1)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_O^{(C_1)T} R_1 \bar{I}_1^1 R_1^T J_O^{(C_1)} \dot{q} \\
 &\quad - \frac{1}{2} k_{r_1} I_{m_1 zz} \dot{q}^T e_1 z_1^T J_O^{(C_1)} \dot{q} - \frac{1}{2} k_{r_1} I_{m_1 zz} \dot{q}^T J_O^{(C_1)T} z_1 e_1^T \dot{q} \\
 &\quad + \frac{1}{2} k_{r_1}^2 I_{m_1 zz} \dot{q}^T e_1 e_1^T \dot{q} \\
 &\quad + \frac{1}{2} k_{r_2} I_{m_2 zz} \dot{q}^T e_2 z_2^T J_O^{(C_1)} \dot{q} + \frac{1}{2} k_{r_2} I_{m_2 zz} \dot{q}^T J_O^{(C_1)T} z_2 e_2^T \dot{q} \\
 &\quad + \frac{1}{2} k_{r_2}^2 I_{m_2 zz} \dot{q}^T e_2 e_2^T \dot{q}
 \end{aligned}$$

- Link 2

$$\begin{aligned}
 m_2 &= m_{l_2} \\
 \bar{I}_2 &= \bar{I}_{l_2} \\
 \mathcal{T}_2 &= \frac{1}{2} m_2 \dot{q}^T J_P^{(C_2)T} J_P^{(C_2)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_O^{(C_2)T} R_2 \bar{I}_2^2 R_2^T J_O^{(C_2)} \dot{q}
 \end{aligned}$$

- Link 3

$$\begin{aligned}
m_3 &= m_{l_3} + m_{m_3} + m_{m_3} \\
\bar{I}_3 &= \bar{I}_{l_3} + \bar{I}_{m_3} + \bar{I}_{m_3} \\
\omega_{m_3} &= \omega_3 - k_{r_3} \dot{q}_3 z_3 \\
\omega_{m_4} &= \omega_4 - k_{r_4} \dot{q}_4 z_4 \\
\mathcal{T}_3 &= \frac{1}{2} m_3 \dot{q}^T J_P^{(C_3)T} J_P^{(C_3)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_O^{(C_3)T} R_3 \bar{I}_3^3 R_3^T J_O^{(C_3)} \dot{q} \\
&\quad - \frac{1}{2} k_{r_3} I_{m_3 \ z_3} \dot{q}^T e_3 z_3^T J_O^{(C_3)} \dot{q} - \frac{1}{2} k_{r_3} I_{m_3 \ z_3} \dot{q}^T J_O^{(C_3)T} z_3 e_3^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_3}^2 I_{m_3 \ z_3} \dot{q}^T e_3 e_3^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_4} I_{m_4 \ z_4} \dot{q}^T e_4 z_4^T J_O^{(C_3)} \dot{q} + \frac{1}{2} k_{r_4} I_{m_4 \ z_4} \dot{q}^T J_O^{(C_3)T} z_4 e_4^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_4}^2 I_{m_4 \ z_4} \dot{q}^T e_4 e_4^T \dot{q}
\end{aligned}$$

- Link 4

$$\begin{aligned}
m_4 &= m_{l_4} + m_{m_5} + m_{m_6} \\
\bar{I}_4 &= \bar{I}_{l_4} + \bar{I}_{m_5} + \bar{I}_{m_6} \\
\omega_{m_5} &= \omega_4 - k_{r_5} \dot{q}_5 z_4 \\
\omega_{m_6} &= \omega_4 - k_{r_6} (\dot{q}_5 + \dot{q}_6) z_4 \\
\mathcal{T}_4 &= \frac{1}{2} m_4 \dot{q}^T J_P^{(C_4)T} J_P^{(C_4)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_O^{(C_4)T} R_4 \bar{I}_4^4 R_4^T J_O^{(C_4)} \dot{q} \\
&\quad - \frac{1}{2} k_{r_5} I_{m_5 \ z_4} \dot{q}^T e_5 z_4^T J_O^{(C_4)} \dot{q} - \frac{1}{2} k_{r_5} I_{m_5 \ z_4} \dot{q}^T J_O^{(C_4)T} z_4 e_5^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_5}^2 I_{m_5 \ z_4} \dot{q}^T e_5 e_5^T \dot{q} \\
&\quad - \frac{1}{2} k_{r_6} I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T e_5 z_4^T J_O^{(C_4)} \dot{q} - \frac{1}{2} k_{r_6} I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T J_O^{(C_4)T} z_4 e_5^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_6}^2 I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T e_5 e_5^T \dot{q} \\
&\quad - \frac{1}{2} k_{r_6} I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T e_6 z_4^T J_O^{(C_4)} \dot{q} - \frac{1}{2} k_{r_6} I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T J_O^{(C_4)T} z_4 e_6^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_6}^2 I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T e_6 e_6^T \dot{q} \\
&\quad + \frac{1}{2} k_{r_6}^2 I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T e_5 e_6^T \dot{q} + \frac{1}{2} k_{r_6}^2 I_{m_6 \ z_4} \dot{q}^T e_6 e_5^T \dot{q}
\end{aligned}$$

- Link 5

$$m_5 = m_{l_5}$$

$$\bar{I}_5 = \bar{I}_{l_5}$$

$$\mathcal{T}_5 = \frac{1}{2} m_5 \dot{q}^T J_P^{(C_5)^T} J_P^{(C_5)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_O^{(C_5)^T} R_5 \bar{I}_5 R_5^T J_O^{(C_4)} \dot{q}$$

- Link 6

$$m_6 = m_{l_6}$$

$$\bar{I}_6 = \bar{I}_{l_6}$$

$$\mathcal{T}_6 = \frac{1}{2} m_6 \dot{q}^T J_P^{(C_6)^T} J_P^{(C_6)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_O^{(C_6)^T} R_6 \bar{I}_6 R_6^T J_O^{(C_6)} \dot{q}$$

$\omega_{m_i}$  = Angular velocity of the motor mounted on the connection element  $i$

$\dot{q}$  = Angular velocities in the robot axes

The kinetic energy of the robotic arm can be expressed:

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T B(q) \dot{q}, B(q) \text{ is a } (6 \times 6) \text{ inertia matrix}$$

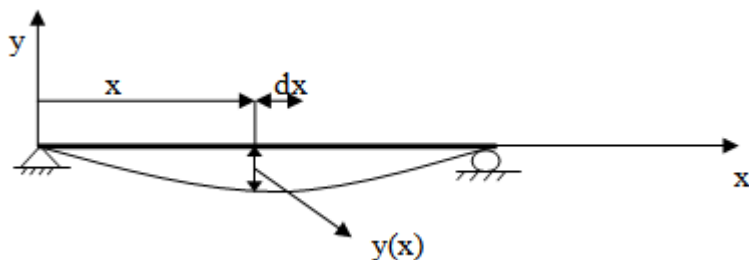
$J_p, J_o$  = Jacobian matrices of the augmented links  $i$

$$\omega_{m_{i+1}} = \omega_i + z_{m_{i+1}} k_{r_{i+1}} q_{m_{i+1}} \text{ and } \dot{q}_{i+1} = e^T_{i+1} \dot{q}$$

## Π. Β' Ελαστική Γραμμή

### Κάμψη Δοκών – Ελαστική Γραμμή

Σαν ελαστική γραμμή δοκού ορίζεται ο παραμορφωμένος ουδέτερος άξονας της δοκού ή αλλιώς η γραμμή των βυθίσεων της δοκού.



Απειροστό τμήμα της δοκού μεταξύ  $x$  και  $x+dx$

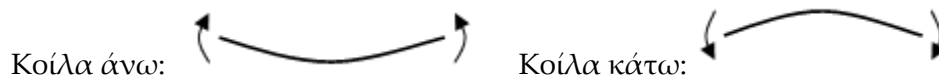
$\rho$ ακτίνα καμπυλότητας $\frac{1}{\rho} = \frac{y''}{[1+(y')^2]^{3/2}} \approx y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$
---

$$\left. \begin{aligned} dx &= \rho d\theta \\ dx + \Delta dx &= (\rho + c) d\theta \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{dx + \Delta dx}{dx} = \frac{\rho + c}{\rho} \Rightarrow 1 + \frac{\Delta dx}{dx} = 1 + \frac{c}{\rho} \Rightarrow \frac{\sigma_c}{E} = \frac{1}{\rho} c \Rightarrow \frac{Mc}{EI_z} = \frac{d^2y}{dx^2} c$$

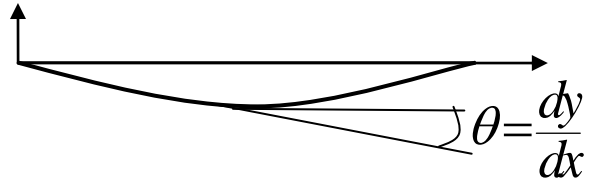
$\Rightarrow \therefore \frac{M}{EI_z} = \frac{d^2y}{dx^2}$  Εξίσωση ελαστικής γραμμής

$M > 0 \rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} > 0 \Rightarrow$  Η ελαστική γραμμή στρέφει τα κοίλα άνω.

$M < 0 \rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} < 0 \Rightarrow$  Η ελαστική γραμμή στρέφει τα κοίλα κάτω.



Κλίση ελαστικής γραμμής:



Υπολογισμός ελαστικής γραμμής

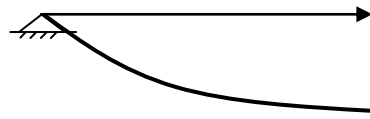
$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI_z} \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \int \frac{M}{EI_z} dx + c_1 \Rightarrow y(x) = \int \left[ \int \frac{M}{EI_z} dx \right] dx + c_1 x + c_2$$

Οι  $C_1$  και  $C_2$  προσδιορίζονται από οριακές συνθήκες:



Πάκτωση:

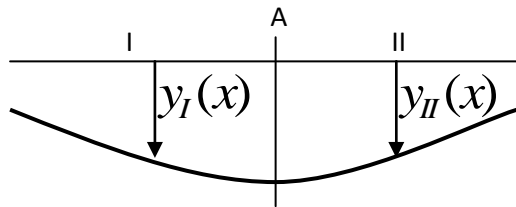
$$y'(0) = \frac{dy}{dx}(0) = 0$$



Άρθρωση ή κύλιση:

$$y(0) = 0$$

Αν δυο τμήματα της δοκού έχουν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ή φυσικές ιδιότητες, τότε η βύθιση υπολογίζεται για τα επιμέρους τμήματα και οι πρόσθετες σταθερές ολοκλήρωσης προσδιορίζονται από τις συνθήκες συνέχειας στα κοινά σημεία.



Πρέπει:  $y_I(A) = y_{II}(A)$  και  $\frac{dy_I}{dx}(A) = \frac{dy_{II}}{dx}(A)$

Παράδειγμα

$EI$  σταθερό

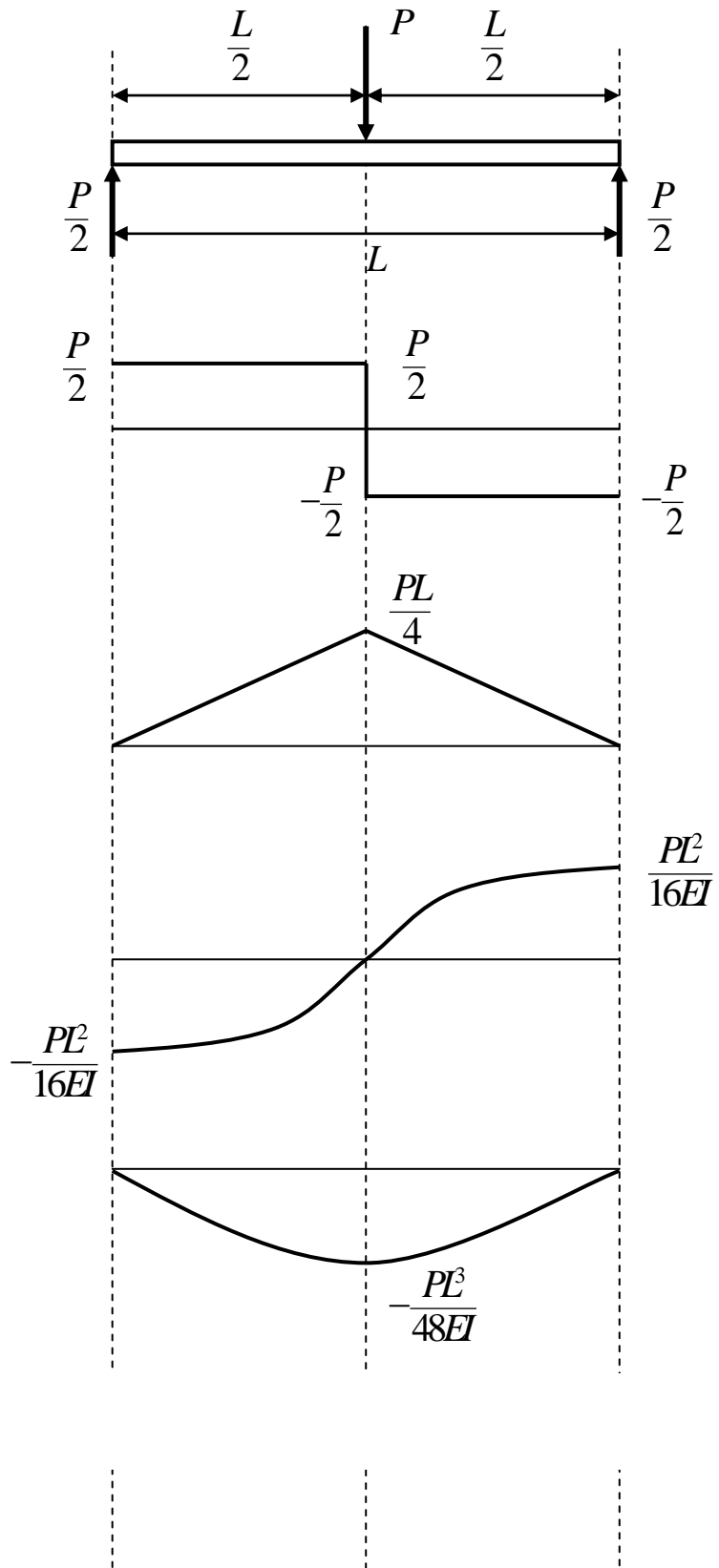
Φορτίο:  $-w \equiv \frac{dV}{dx} = EI \frac{d^4y}{dx^4}$

Διάτμηση:  $V = \frac{DM}{dx} = EI \frac{d^3y}{dx^3}$

Ροπή:  $M = EI \frac{d^2y}{dx^2}$

Παραμόρφωση (Βύθιση):  $y$

Κλίση:  $\theta = \frac{dy}{dx}$





Υπολογισμός βύθισης  $y$

$$M = \frac{P}{2}x \Rightarrow EI \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P}{2}x \Rightarrow$$

$$\Rightarrow EI \frac{dy}{dx} = \frac{P}{4}x^2 + c_1 \Rightarrow \quad (1)$$

$$\Rightarrow EIy = \frac{P}{12}x^3 + c_1x + c_2 \quad (2)$$

Συνοριακές συνθήκες:  $\begin{cases} y(0) = 0 \rightarrow c_2 = 0 \\ \frac{dy}{dx}\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \rightarrow c_1 = -\frac{PL}{16} \end{cases}$

Τελικά:

$$(1) \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI} \left( \frac{P}{4}x^2 - \frac{PL}{16} \right) \rightarrow \begin{cases} x=0, \frac{dy}{dx}(0) = -\frac{PL}{16EI} \\ x=\frac{L}{2}, \frac{dy}{dx}\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \end{cases}$$

$$(2) \Rightarrow y = \frac{1}{EI} \left( \frac{P}{12}x^3 - \frac{PL}{16}x \right) \rightarrow \begin{cases} x=0, y(0) = 0 \\ x=\frac{L}{2}, y\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{PL^3}{48EI} \end{cases}$$

## Π. Γ' Κώδικας V+

```
program FIL_ONE()
```

```
FOR t= 100 TO 1 STEP -1
```

```
    SET A1= TRANS (300, -900, 200, 90, -90, 45)
```

```
    SET B1= TRANS (-200, -900, 200, 90, -90, 45)
```

```
    SET A2= TRANS (-200, -900, 200, 90, -90, -45)
```

```
    SET B2= TRANS (300, -900, 200, 90, -90, -45)
```

```
    MOVES A1
```

```
    MOVES B1
```

```
    MOVES A2
```

```
    MOVES B2
```

```
END
```