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

Μεταπτυχιακή Εργασία

Σχεδιασμός και Κατασκευή Παθητικού Μηχανισμού Έξι Βαθμών Ελευθερίας για Συγκράτηση Ρομπότ με Πόδια επάνω σε Κυλιόμενο Διάδρομο

Άννα-Μαρία Παρθενάκη

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2016

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός παθητικού μηχανισμού πολλαπλών βαθμών ελευθερίας για τη συγκράτηση ρομπότ με πόδια που κινούνται πάνω σε κυλιόμενο διάδρομο.

Τα ρομπότ με πόδια που αναπτύσσονται στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, είναι κυρίως τετράποδα και μονόποδα ρομπότ με βασικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού τους, την επιρροή από τη φύση (Biomimetics). Για το λόγο αυτό, το βάδισμα κάθε ενός από αυτά εστιάζει σε διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, την αποφυγή εμποδίων ή την ισορροπία τους σε δύσβατα εδάφη. Μετά την κατασκευή των ρομπότ, κατά την πρωταρχική φάση της κίνησής τους, η διαδικασία των πειραμάτων που διεξάγονται σε εργαστηριακό επίπεδο, αφορά την κίνησή τους (βάδισμα / τρέξιμο) πάνω σε κυλιόμενο διάδρομο με δυνατότητα οριζόντιας και υπό κλίση κίνησης. Ως εκ τούτου, υπάρχει η ανάγκη μηχανισμού στήριξης των ρομπότ πάνω στο διάδρομο που στόχο έχει τόσο την ασφάλεια του κινούμενου ρομπότ, όσο και την εξασφάλιση συγκεκριμένων βαθμών ελευθερίας που μεταβάλλονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος και τον τύπο του ρομπότ. Έτσι, κατά το στάδιο του σχεδιασμού, διατυπώνονται εξαρχής τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές του μηχανισμού.

Ο μηχανισμός που τελικά κατασκευάζεται, έχει έξι βαθμούς ελευθερίας με δυνατότητα μεταβολής αυτού του αριθμού ανάλογα με το πείραμα. Τα χαρακτηριστικά που συνδυάζει είναι η μεταβλητότητα, η προσαρμοστικότητα ανάλογα με τον τύπο του ρομπότ, η απλότητα στον σχεδιασμό του, η ασφάλεια, η αντοχή και η ελαχιστοποίηση της μάζας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα στάδια του ορισμού της ανάγκης, της σύλληψης της ιδέας, του λεπτομερούς σχεδιασμού και της κατασκευής.

Αρχικά μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν υπάρχοντες μηχανισμοί που έχουν κατασκευαστεί για αντίστοιχους σκοπούς. Στη συνέχεια, ορίστηκαν οι βασικές προδιαγραφές της κατασκευής και μια πρώτη προσέγγιση με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έπειτα, διαμορφώθηκαν δύο βασικές εναλλακτικές οι οποίες και αξιολογήθηκαν με βάση τις προδιαγραφές και τις ανάγκες του προβλήματος από τις οποίες μια επιλέχθηκε για κατασκευή. Ακολούθησε ο λεπτομερής σχεδιασμός της επιλεγμένης λύσης που περιλαμβάνει μελέτη στοιχείων, διαστασιολόγηση, τριδιάστατο σχεδιασμό, μελέτη υλικών και ανάλυση φορτίων, με σκοπό τη δημιουργία ενός λειτουργικού πρωτοτύπου. Στη συνέχεια αξιολογείται το πρωτότυπο και βελτιώνεται κατασκευαστικά σε διάφορα στάδια.

Abstract

This thesis addresses the design and fabrication of a passive mechanism with multiple degrees of freedom which is used as a restraint mechanism for legged robots running on a treadmill.

The legged robots which are being built at the Control Systems Laboratory mostly belong to the category of quadruped robots. A leg is also being developed separately and can be used as a monopod robot. The design of these robots is highly influenced by nature (Biomimetic). According to that, each one is designed with different characteristics in order to run with very high speed or walking while avoiding obstacles etc. A first step in the legged robots experimental research is their running / walking on a treadmill which can be placed on the horizontal plane or in an inclination. Therefore, there is need for a restraint mechanism for the robot in order to be safeguarded in case of a fall but also to be able to adjust to different robot sizes and to different experiment requirements. For this reason, the characteristics of the mechanism (specifications, demands, restrictions) are designated at the stage of the initial design.

The final design has six degrees of freedom and the capability to be reformed easily in order to change that number according to the demands of the experiment (e.g. up / down – forward / back – pitch – roll: open & the rest dofs: locked). This design incorporates the characteristics of variability (one mechanism, many different experiments), adjustability (one mechanism, many different robots), design simplicity, safeguarding of the robot in case of fall, strength according to the applied loads but also low mass. The process which is followed integrates the stages of the description of the problem, the idea building, the design and the fabrication.

At the beginning, existing mechanisms are studied and assessed against the problem's demands. After that the specifications, requirements and restrictions of the problem are collected in detail and according to these, two initial designs are developed. These designs are assessed and tested by a mathematical method but also by a quick prototype fabrication in order to choose the final design and construction. The final design incorporates in detail dimensioning, parts study, 3d design and assembly, material study, loads analysis and static simulations. As an outcome of this study, a prototype is fabricated, which is assessed and tested against specifications. A continuous improvement process follows, in which the prototype is optimized.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ Ευάγγελο Παπαδόπουλο που τόσο κατά τη διδασκαλία του μαθήματος Μηχανοτρονικών Συστημάτων αλλά ειδικότερα κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας με καθοδήγησε, μου έδωσε τη δυνατότητα να αποκτήσω χρήσιμες και ενδιαφέρουσες γνώσεις και ακόμα να αποτελέσω μέρος της εξαιρετικής ομάδας του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.

Ακόμα, ευχαριστώ όλη την ομάδα αυτή και ιδιαιτέρως τους υποψήφιους διδάκτορες Κ. Κουτσούκη και Κ. Μαχαιρά για την εξαιρετικά πολύτιμη βοήθειά τους και τη συνεργασία. Ιδιαιτέρως επίσης ευχαριστώ τον διδάκτορα Νίκο Γαλάνη και τον Μηχ. Μηχανικό Γιώργο Παπαστεργίου που μοιράστηκαν μαζί μου τις γνώσεις τους σε κατασκευαστικά θέματα και με υποστήριξαν στα στάδια της κατασκευής.

Περιεχόμενα

Περίληψη **2**

Abstract **3**

Ευχαριστίες **4**

Περιεχόμενα **5**

Κατάλογος Σχημάτων **8**

Κατάλογος Πινάκων **14**

1 Εισαγωγή **15**

1.1 Σκοπός Εργασίας 15

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τετράποδα ρομπότ – Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά 15

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για συστήματα στήριξης ρομπότ με πόδια 19

1.3.1 Υποσύστημα με χρήση βραχίονα και άρθρωσης 20

1.3.2 Σύστημα στήριξης με μηχανισμό επιπεδοποίησης και κυλιόμενο διάδρομο 23

1.3.3 Συστήματα στήριξης γερανογέφυρας 24

1.4 Μελέτη υπαρχόντων μηχανισμών 25

1.5 Δομή Εργασίας 27

2 Στοιχεία Θεωρίας **28**

2.1 Εισαγωγή 28

2.2 Μηχανισμός και στοιχεία μηχανισμών 28

2.2.1 Κινηματικές αλυσίδες και απλές αρθρώσεις 29

2.2.2 Βαθμός ελευθερίας μηχανισμού / κινητικότητα, κριτήριο K-G 30

2.3 Στοιχεία αντοχής υλικών – Κάμψη, σχεδιασμός και συντελεστής ασφαλείας 31

2.3.1 Τάσεις στη δοκό 32

2.3.2 Παραμορφώσεις στη δοκό 33

2.3.3 Μέγιστη τάση στη διατομή 33

2.3.4 Αποτελεσματικότητα δοκών διαφόρων σχημάτων 34

2.3.5 Συντελεστής ασφαλείας 35

3 Συστήματα σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή και λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης Solidworks **36**

3.1 CAD / CAM 36

3.1.1 Ορισμός και τεχνολογία σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή – CAD 36

3.1.2 Εργαλεία CAD για τη σχεδιομελέτη και προσομοίωση 37

3.1.3 Μοντελοποίηση – Σχεδίαση – Προσομοίωση 38

3.1.4 Ανάλυση 38

3.1.5 Εργαλεία CAM για την παραγωγή 41

3.2 Σχεδιασμός, μελέτη και κατασκευή στο λογισμικό Solidworks 41

3.2.1 Τριδιάστατος σχεδιασμός Solidworks: διαμόρφωση εξαρτήματος (part) και συναρμολόγηση σε assembly. 41

3.3 Στατική ανάλυση και προσομοίωση στο λογισμικό Solidworks 44

3.4 CAD / CAM στο λογισμικό Solidcam 47

4 Μελέτη και σχεδιασμός μηχανισμού στήριξης 49
4.1 Εισαγωγή 49
4.2 Περιγραφή κυλιόμενου διαδρόμου 49
4.3 Απαιτήσεις, προδιαγραφές και περιορισμοί 50
4.4 Πρώτο λειτουργικό σχέδιο / εναλλακτική 52
4.4.1 Σχεδιασμός 52
4.4.2 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης εμπρός / πίσω (f / b) 54
4.4.3 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης πάνω / κάτω (u / d) 56
4.4.4 Υλοποίηση περιστροφής pitch 56
4.4.5 Υλοποίηση περιστροφής roll 56
4.4.6 Αξιολόγηση σχεδιασμού 57
4.5 Δεύτερο λειτουργικό σχέδιο / εναλλακτική 57
4.5.1 Σχεδιασμός 58
4.5.2 Αξιολόγηση λύσης 60
4.5.3 Σύγκριση των δύο λύσεων για επιλογή μιας για κατασκευή 60
4.5.4 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης εμπρός / πίσω (f /b) και κατασκευαστικές βελτιώσεις 61
4.5.5 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης πάνω / κάτω (u / d) και κατασκευαστικές βελτιώσεις 62
4.5.6 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης δεξιά / αριστερά (l / r) και κατασκευαστικές βελτιώσεις 65
4.5.7 Υλοποίηση περιστροφών roll yaw και κατασκευαστικές βελτιώσεις 68
4.5.8 Υλοποίηση της περιστροφής pitch 70
4.5.9 Μηχανισμός συγκράτησης του ρομπότ για την προστασία του από πτώση 72
4.6 Κατασκευή μηχανισμού 74
4.6.1 Κατασκευή πρωτοτύπου 74
4.6.2 Αξιολόγηση και ορισμός βελτιώσεων 76
4.7 Τελική κατασκευή 77
5 Προσομοιώσεις / πειράματα στατικής ανάλυσης μηχανικών μερών κατασκευής 80
5.1 Στατική ανάλυση μηχανικών μερών κατασκευής 80
5.1.1 Άσκηση ροπής στις οριζόντιες ράβδους του pitch – προσομοίωση σε τεμάχιο 80
5.1.2 Άσκηση μετατοπισμένου φορτίου σε πλευρικά πλακίδια σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό – προσομοίωση σε συναρμολόγημα 81
5.1.3 Άσκηση μετατοπισμένου φορτίου σε ράβδο σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό – προσομοίωση σε τεμάχιο 82
5.1.4 Άσκηση ροπής στον κάθετο άξονα σύνδεσης της κατασκευής με το gimbal – προσομοίωση σε τεμάχιο 84
5.1.5 Άσκηση ροπής στον άξονα του gimbal – προσομοίωση σε τεμάχιο 85
5.1.6 Άσκηση ροπής στρέψης σε μηχανισμό l / r – προσομοίωση σε συναρμολόγημα 86
5.1.7 Άσκηση κάθετης δύναμης σε μηχανισμό l / r – προσομοίωση σε συναρμολόγημα 87
5.2 Πειράματα και συγκριτική μελέτη 88
5.2.1 Διερεύνηση λύσης για οριζόντια ράβδο ράβδο σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό 88
5.2.2 Διερεύνηση λύσης για άξονα σύνδεσης του gimbal με τον μηχανισμό 91
5.2.3 Διερεύνηση λύσης για άξονα του gimbal 92

5.2.4 Διερεύνηση λύσης για συναρμολόγημα του β.ε. l / r 93
5.2.5 Διερεύνηση λύσης για σύστημα συγκράτησης σε περίπτωση πτώσης 94

6 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία 98

6.1 Συμπεράσματα 98
6.2 Μελλοντική εργασία 98

7 Βιβλιογραφία 99

8 Παράρτημα Α 101

8.1 Κατασκευή συστήματος προσαρμογής παλμογεννήτριας στην άτρακτο του κινητήρα περιστροφής του τυμπάνου του κυλιόμενου διαδρόμου 101
8.1.1 Διαδικασία που ακολουθήθηκε 101
8.1.2 Στάδιο 1: Διαστασιολόγηση 101
8.1.3 Στάδιο 2: Ιδέα 102
8.1.4 Στάδιο 3: Σχεδιασμός 103
8.1.5 Στάδιο 4: Κατασκευή 103
8.1.6 Στάδιο 5: Πειράματα 104
8.1.7 Στάδιο 6: Βελτιώσεις 104
8.2 Πίνακας εξαρτημάτων τελικής κατασκευής 104

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Phony (1967), Walking Truck (‘60) και TITAN (‘80). 15

Σχήμα 1-2. Τετράποδο του Leg Lab του MIT, BigDog της Boston Dynamics, LittleDog της Boston Dynamics. 16

Σχήμα 1-3. Scout II και το πρώτο τετράποδο του Ε.Μ.Π. 17

Σχήμα 1-4. Τετράποδα ρομπότ. 17

Σχήμα 1-5. Τετράποδο ρομπότ Cheetah (MIT). 17

Σχήμα 1-6. Cheetahroid robot. 18

Σχήμα 1-7. Διάγραμμα κόστους μεταφοράς (COT) σε συνάρτηση με τη μάζα του σώματος για διάφορα ζώα και ρομπότ. 19

Σχήμα 1-8. Περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα z, όχι πλήρης περιστροφή γύρω από x και y. 20

Σχήμα 1-9. Περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα z, όχι πλήρης περιστροφή γύρω από x και y, όμως μεγαλύτερη από Σχήμα 1-8. 21

Σχήμα 1-10. Περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα z και y. 21

Σχήμα 1-11. Η άρθρωση είχε τοποθετηθεί σε σχέση με το έδαφος – σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση Δχ είναι σχετικά μικρή. 21

Σχήμα 1-12. Η άρθρωση είχε τοποθετηθεί σε σχέση με το σώμα του ρομπότ – σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση Δχ είναι μεγαλύτερη. 22

Σχήμα 1-13. Απλοποιημένος σχεδιασμός με μετατόπιση των αξόνων, λόγω μετατόπισής του βραχίονα. 22

Σχήμα 1-14. Μετατόπιση προσανατολισμού του ρομπότ όταν μετατοπίζεται ο βραχίονας (boom) από τον κάθετο άξονα περιστροφής. 22

Σχήμα 1-15. Χρήση μονής δοκού. Το ρομπότ κινείται εφαπτόμενο σε σφαιρική επιφάνεια. 23

Σχήμα 1-16. Χρήση μηχανισμού παραλληλογράμμου. Το ρομπότ κινείται εφαπτόμενο σε επιφάνεια που μοιάζει με τόρο. 23

Σχήμα 1-17. Matsouka’s running robot. 24

Σχήμα 1-18. Χρήση γραμμικών ρουλεμάν. 24

Σχήμα 1-19. Σύστημα γερανογέφυρας. 25

Σχήμα 1-20. Σύστημα στήριξης Cheetah του πανεπιστημίου MIT. 26

Σχήμα 1-21. Σύστημα στήριξης τετράποδου του πανεπιστημίου της Osaka. 26

Σχήμα 1-22. Σύστημα στήριξης Cheetah της Boston Dynamics. 26

Σχήμα 1-23. Σύστημα στήριξης του δίποδου Raptor της Kaist. 27

Σχήμα 1-24. Σύστημα στήριξης του ανθρωπόμορφου του Un. of Texas. 27

Σχήμα 2-1. Παράδειγμα μηχανισμού διωστήρα – στρόφαλου και εξαίρεση. 28

Σχήμα 2-2. Παράδειγμα απλής κατασκευής. 28

Σχήμα 2-3. Είδη κινηματικών αλυσίδων (ανοιχτή, κλειστή και μικτή). 29

Σχήμα 2-4. Διάφοροι τύποι συνδέσμων ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων τους. 29

Σχήμα 2-5. Οι έξι απλές αρθρώσεις. 29

Σχήμα 2-6. Παράδειγμα υπολογισμού του mobility σύμφωνα με το κριτήριο K-G για μηχανισμό που κινείται στο επίπεδο. 30

Σχήμα 2-7. Παραδείγματα χαρακτηρισμού μηχανισμού / κατασκευής ανάλογα με το βαθμό ελευθερίας τους. 31

Σχήμα 2-8. (α) Καθαρή κάμψη σε απλή δοκό. (β) Καθαρή κάμψη σε πρόβολο. 31

Σχήμα 2-9. Πρόβολος σε σύνθετη κάμψη. 32
Σχήμα 2-10. Απλή δοκός σε σύνθετη κάμψη τριών σημείων. 32
Σχήμα 2-11. Βέλος κάμψης απλής δοκού. 32
Σχήμα 2-12. Καμπυλότητα δοκού. 33
Σχήμα 2-13. Ορθογωνική και κυκλική εγκάρσια διατομή. 34
Σχήμα 2-14. Ελαστική ροπή αντίστασης ορθογωνικών διατομών ίσου εμβαδού. 34
Σχήμα 2-15. Διατομή διπλού «Τ». 35
Σχήμα 3-1. Κύκλος ανάπτυξης και στάδια επεξεργασίας 37
Σχήμα 3-2. Παράδειγμα θερμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. 39
Σχήμα 3-3. Engineering analysis με σύστημα CAE. 39
Σχήμα 3-4. Στάδια διαδικασίας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. 40
Σχήμα 3-5. Επίπεδα / Planes. 42
Σχήμα 3-6. Τα βασικά sketch. 42
Σχήμα 3-7. Boss / Base Features: extruded, revolved και swept με τα αντίστοιχα sketch τους. 43
Σχήμα 3-8. Extruded cut feature σε υπάρχοντα όγκο και το αντίστοιχο sketch του. 43
Σχήμα 3-9. Παράδειγμα συναρμολογήματος από 3 parts με βασικά mates. 43
Σχήμα 3-10. Παράδειγμα συναρμολογήματος με χρήση mechanical mates (rack pinion & hinge mate). 44
Σχήμα 3-11. Παράδειγμα στατικής ανάλυσης δοκού που υπόκειται σε κάμψη. 47
Σχήμα 3-12. Στάδια αρχικοποίησης του μοντέλου προς κατεργασία. 48
Σχήμα 3-13. Παράμετροι αρχικοποίησης. 48
Σχήμα 3-14. Solidcam operations. 48
Σχήμα 4-1. Κινητήρας MS 100L 2-4 και inverter M200-022 49
Σχήμα 4-2. Κινητήρας FC80-4 και inverter SINAMIS G110. 50
Σχήμα 4-3. Κυλιόμενος διάδρομος – αρχική κατασκευή. 50
Σχήμα 4-4. Περιορισμός καθ΄ ύψος. 51
Σχήμα 4-5. Μεταβλητότητα καθ΄ ύψος. 51
Σχήμα 4-6. Επιτρεπτές κινήσεις σε μηχανισμό στήριξης MIT Cheetah. 52
Σχήμα 4-7. Κάγκελα πλευρικά του διαδρόμου για τη στήριξη της ράγας κύλισης. 53
Σχήμα 4-8. Σχεδιασμός όπως διαμορφώνεται για πείραμα τριών β.ε. 53
Σχήμα 4-9. Σχέδιο σε πρόσοψη για την περιγραφή του αρθρωτού συστήματος. Το ρομπότ στηρίζεται στην κεντρική ράβδο, και η περιστροφή roll (γύρω από άξονα x) δίνεται από τις στροφικές αρθρώσεις. Καθώς το ρομπότ περιστρέφεται κατά roll, στρέφονται αντίστοιχα με παθητικό τρόπο και οι αρθρώσεις. 53
Σχήμα 4-10. Σχεδιασμός αρθρωτού μηχανισμού με τέσσερις στροφικές και δύο πρισματικές αρθρώσεις. 54
Σχήμα 4-11. Σχεδιασμός όπως διαμορφώνεται για πείραμα τεσσάρων β.ε. 54
Σχήμα 4-12. Υπολογισμός κατά προσέγγιση της ροπής που ασκεί το ρομπότ σε περίπτωση πτώσης στο γραμμικό ρουλεμάν του συστήματος γραμμικών οδηγών. 55
Σχήμα 4-13. Γραμμικός οδηγός της εταιρίας MISUMI που χρησιμοποιήθηκε. 55
Σχήμα 4-14. Τελική μορφή διαδρόμου. 55
Σχήμα 4-15. Εξαρτήματα της εταιρίας MISUMI. 56
Σχήμα 4-16. Σύστημα αρθρωτής αλυσίδας από δύο στροφικές και μια πρισματική άρθρωση. Οι στροφικές αρθρώσεις αποτελούνται από knuckle joints της εταιρίας MISUMI, ενώ η πρισματική σχεδιάζεται εξ’ αρχής για το σκοπό αυτό. 56

Σχήμα 4-17. Σφαιρική άρθρωση που επιλέγεται. 57
Σχήμα 4-18. Πρωτότυπο σε μακέτα. 57
Σχήμα 4-19. Άξονες (x,y,z) και οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας – περιστροφικοί και γραμμικοί. 58
Σχήμα 4-20. Πρώτη προσέγγιση μηχανισμού στήριξης που συνδέεται με τετράποδο ρομπότ. Χρησιμοποιείται gimbal για το roll και το yaw. Το pitch, δίνεται με την περιστροφή του ρομπότ γύρω από τη συμπαγή ράβδο που διαπερνά το κέντρο βάρους του (άξονας y). Το f /b δίνεται από τους γραμμικούς οδηγούς που έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος του κυλιόμενου διαδρόμου. Το u / d δίνεται από sliding parts που τοποθετούνται πλευρικά του ρομπότ και έχουν τη δυνατότητα να προσαρτώνται στους γραμμικούς οδηγούς σε διαφορετικά σημεία, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να αλλάξουν τη θέση τους ανάλογα με το μέγεθος του ρομπότ. Το l /r δίνεται από μηχανισμό τύπου γραμμικού ρουλεμάν. 59
Σχήμα 4-21. (α) Roll - Yaw ελεύθερα. (β) Roll ελεύθερο – Yaw κλειδωμένο με χρήση πείρου. (γ) Roll – Yaw κλειδωμένα με χρήση τριών πείρων. 59
Σχήμα 4-22. Πρωτότυπο σε μακέτα. 60
Σχήμα 4-23. Τελική μορφή συστήματος στήριξης των γραμμικών οδηγών. 61
Σχήμα 4-24. Τριδιάστατος σχεδιασμός, διαστασιολόγηση και κατασκευή τραπεζιού κύλισης συστήματος u / d. 62
Σχήμα 4-25. Εξάρτημα σύνδεσης τραπεζιού κύλισης και γραμμικού οδηγού. 63
Σχήμα 4-26. Γραμμικοί οδηγοί με ρουλεμάν για τετράγωνες ράγες. 63
Σχήμα 4-27. Γραμμικά ρουλεμάν ανοιχτά για υποστηριζόμενες ράγες. 64
Σχήμα 4-28. Υπολογισμός ροπής για την επιλογή του καταλληλότερου μηχανισμού από τις δύο παραπάνω εναλλακτικές. 64
Σχήμα 4-29. Προδιαγραφές πρώτης εναλλακτικής: γραμμικά ρουλεμάν για τετράγωνες ράγες, της εταιρίας HIWIN, σειρά HGW. 65
Σχήμα 4-30. Προδιαγραφές δεύτερης εναλλακτικής: ρουλεμάν ανοιχτά για υποστηριζόμενες στρογγυλές ράγες. Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση ο κατασκευαστής δεν δίνει προδιαγραφές για ροπές, παρά μόνο για στατικό και δυναμικό κάθετο φορτίο. 65
Σχήμα 4-31. Σύνδεσμος και δοκός σύνδεσης με οπές για το β.ε. l / r. 65
Σχήμα 4-32. Δοκός τετραγωνικής διατομής και cam followers. 66
Σχήμα 4-33. Προφίλ αλουμινίου 20x20 και ειδικά ρουλεμάν κύλισης. 66
Σχήμα 4-34. Προδιαγραφές cam followers της εταιρίας MISUMI και μοντέλο που επιλέγεται. 66
Σχήμα 4-35. Γραμμικό ρουλεμάν και μπάρες ακριβείας της εταιρίας Misumi. 67
Σχήμα 4-36. Χρήση ζεύγους γραμμικών ρουλεμάν – αξόνων για εξασφάλιση μόνο ενός β.ε. 67
Σχήμα 4-37. Διάταξη που κατασκευάζεται για το l / r. 68
Σχήμα 4-38. Πλακίδιο πάχους 5mm από Al 7075 T6, για τη σύνδεση με τα blocks των γραμμικών οδηγών του u / d. 68
Σχήμα 4-39. Αρχική μορφή gimbal. Αποτελείται από τρείς πλάκες που ενώνονται σε σχήμα «Π» και άξονα που αποτελείται επίσης από τρία συνδεδεμένα κομμάτια. 69
Σχήμα 4-40. Σχεδιασμός και κατασκευή gimbal. 69
Σχήμα 4-41. Υπολογισμός διαστάσεων αυλακίου. 70
Σχήμα 4-42. Τελική μορφή μηχανισμού. Το pitch προκύπτει από την περιστροφή του ρομπότ γύρω από τις οριζόντιες ράβδους με τη βοήθεια των ρουλεμάν. 71
Σχήμα 4-43. Αντικατάσταση ρουλεμάν με shaft support για κλείδωμα του pitch. 71
Σχήμα 4-44. Πλευρικές πλάκες για σύνδεση. Μετατοπίζοντας παράλληλα τη μια πλάκα σε σχέση με την άλλη και ευθυγραμμίζοντας τις οπές ο χρήστης βιδώνει τις δύο πλάκες, ρυθμίζοντας έτσι το επιθυμητό τελικό μήκος. 72

Σχήμα 4-45. Προσαρμοστικότητα κατασκευής. Παρίσταται το μονόποδο ρομπότ του εργαστηρίου. Η κατασκευή προσαρμόζεται στις διαστάσεις του ρομπότ που φέρει. Για το πλάτος, βιδώνονται τα shaft collars της εικόνας κατά μήκος της ράβδου του gimbal. 72

Σχήμα 4-46. Ράγες, εξάρτημα στήριξης από το ταβάνι και ράουλο κύλισης που κινείται μέσα στο προφίλ της ράγας για να φέρει την τροχαλία για τα συρατόσχοινα που συγκρατούν το ρομποτ. 73

Σχήμα 4-47. Στήριξη ραγών και σύστημα συγκράτησης ρομπότ. Με μπλε χρώμα τα χωροταξικά όρια του εργαστηρίου – τοποθέτηση του διαδρόμου σε σχέση με τοίχους. 73

Σχήμα 4-48. Προδιαγραφές προμηθευτή για επιλογή μοντέλου ράγας. Ανάλογα με το φορτίο, επιλέγεται από την καμπύλη η αντίστοιχη σειρά προφίλ και η προτεινόμενη απόσταση A μεταξύ των πακτώσεων. 74

Σχήμα 4-49. Μηχανικές ιδιότητες κράματος Al 7075 T6. 75

Σχήμα 4-50. Κατασκευή gimbal στην εργαλειομηχανή: CAD / CAM διαδικασία. 75

Σχήμα 4-51. Τελική μορφή πρωτότυπης κατασκευής. 76

Σχήμα 4-52. Τελική μορφή άξονα gimbal. 77

Σχήμα 4-53. Πρόσοψη μηανισμού επάνω στο διάδρομο. 77

Σχήμα 4-54. Πλαϊνή όψη μηχανισμού και γραμμικοί οδηγοί για β.ε. u / d. 78

Σχήμα 4-55. Ανοιχτοί β.ε. roll και yaw. 78

Σχήμα 4-56. Κάτοψη μηχανισμού, γραμμικά ρουλεμάν και δοκοί ακριβείας για l / r – ανοιχτός β.ε. yaw, l /r κλειδωμένο. 79

Σχήμα 4-57. Αυλάκια (slots) για κύλιση των cam follower και gimbal. 79

Σχήμα 5-1. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης ράβδου για το pitch. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο. 80

Σχήμα 5-2. (α) Ράβδος Φ12 από Al 7075 T6, 30Nm ροπή και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που πακτώνεται η ράβδος με τη χρήση των shaft supports Φ12. (β) Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505 Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 99 Mpa < 505 Mpa. 81

Σχήμα 5-3. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης πλευρικών πλακιδίων σύνδεσης του ρομπότ, roll. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο. 81

Σχήμα 5-4. (α) Assembly πλακιδίων από Al 7075 T6, 900N remote load και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται τα πλακίδια με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505 Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 145 Mpa < 505 Mpa. 82

Σχήμα 5-5. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης οριζόντιας ράβδου σύνδεσης του ρομπότ, roll. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο. 83

Σχήμα 5-6. (α) Ράβδος Φ15 από Al 7075 T6, 900N remote load και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται τα πλακίδια με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 437Mpa < 505Mpa. (γ) Resultant displacement: μέγιστο βέλος κάμψης στο σημείο έδρασης με τα πλευρικά πλακίδια περίπου 7mm. (δ) FoS: κατά μήκος σχεδόν ολόκληρης της ράβδου ο συντελεστής ασφαλείας βρίσκεται αρκετά κοντά στο 1. 84

Σχήμα 5-7. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης άξονα Φ15 για το κλείδωμα του yaw. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο. 84

Σχήμα 5-8. (α) Ράβδος Φ15 και πείρος Φ10 από Al 7075 T6, 225Nm ροπή και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που πακτώνεται ο άξονας με τη χρήση των shaft supports

Φ15 και ακόμα θεωρείται ο πείρος πακτωμένος μέσα στο gimbal. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 326Mpa < 505Mpa. (γ) FoS: κατά μήκος σχεδόν ολόκληρου του άξονα ο συντελεστής ασφαλείας βρίσκεται αρκετά κοντά στο 1. 85

Σχήμα 5-9. Gimbal και άξονας που εξετάζεται σε περίπτωση κλειδώματος του roll. 85

Σχήμα 5-10. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης άξονα Φ20 για το κλείδωμα του yaw. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο. 86

Σχήμα 5-11. (α) Ράβδος Φ20 και πείροι Φ8 από Al 7075 T6, 150Nm ροπή και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που πακτώνονται οι πείροι μέσα στο gimbal. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 150Mpa < 505Mpa. 86

Σχήμα 5-12. (α) Συναρμολόγημα για το l / r, 30Nm ροπή σε ελεύθερο άξονα και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται οι άξονες Φ8 με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 565Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 184Mpa < 505Mpa. (γ) Resultant displacement: μέγιστο βέλος κάμψης κατά τον κατακόρυφο άξονα στα ακρότατα σημεία του πλακιδίου σύνδεσης των γραμμικών ρουλεμάν περίπου 3.9mm. 87

Σχήμα 5-13. (α) Συναρμολόγημα για το l / r, 200N κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο πρόσδεσης του υπόλοιπου συστήματος και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται οι άξονες ακριβείας Φ8 1.1191 με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 565Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 275Mpa < 505Mpa. (γ) Resultant displacement: μέγιστο βέλος κάμψης κατά τον κατακόρυφο άξονα στα σημεία του πλακιδίου σύνδεσης των γραμμικών ρουλεμάν περίπου 4.7mm. 88

Σχήμα 5-14. Εξέταση επιλογής ράβδου τετραγωνικής διατομής 12x12mm Al 7075 T6 – απορρίπτεται λόγω αυξημένου βέλους κάμψης. 89

Σχήμα 5-15. Εξέταση επιλογής κούφιας ράβδου τετραγωνικής διατομής 15x15mm Al 7075 T6 – απορρίπτεται γιατί δεν μπορεί να προμηθευτεί από την αγορά. 90

Σχήμα 5-16. Εξέταση επιλογής κούφιας ράβδου τετραγωνικής διατομής 15x15mm Al 6063 – απορρίπτεται λόγω αστοχίας υλικού στο δεδομένο φορτίο. 90

Σχήμα 5-17. Εξέταση επιλογής ράβδου τετραγωνικής διατομής 15x15mm Al 7075 T6 – απορρίπτεται λόγω κατασκευαστικών δυσλειτουργιών από το τετράγωνο προφίλ. 91

Σχήμα 5-18. Gimbal: Άξονας σύνδεσης με μηχανισμό (yaw) και κεντρικός άξονας (roll). 91

Σχήμα 5-19. Εξέταση επιλογής άξονα Φ12 με πείρο Φ8 Al 7075 T6 – απορρίπτεται λόγω αστοχίας. 92

Σχήμα 5-20. Αρχικός σχεδιασμός άξονα gimbal – απορρίπτεται λόγω αστοχίας. 92

Σχήμα 5-21. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N σε αρχικό σχεδιασμό. 93

Σχήμα 5-22. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N αυξάνοντας την απόσταση των ράβδων. 93

Σχήμα 5-23. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N αυξάνοντας τα set των γραμμικών ρουλεμάν. 94

Σχήμα 5-24. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N αυξάνοντας τα set των γραμμικών ρουλεμάν και την απόσταση των ράβδων. 94

Σχήμα 5-25. Υπολογισμός οριζόντιας δύναμης που προκύπτει στη ράγα, αν δεχθούμε ότι το εύρος κίνησης του ρομπότ προς τα δεξιά ή αριστερά είναι περίπου 10cm. 95

Σχήμα 5-26. Παραδοχές σχεδιασμού για τις ανάγκες της προσομοίωσης: αρχικός σχεδιασμός και απλοποιημένος. 96

Σχήμα 5-27. Κάθετο ομοιόμορφο φορτίο 900N. Η κατασκευή δείχνει να αντέχει. 96

Σχήμα 5-28. Κάθετο φορτίο 900N σε εσωτερική επιφάνεια. Πακτώσεις ανά 1m. Η κατασκευή δείχνει να αστοχεί. 97

Σχήμα 5-29. Οριζόντιο φορτίο 90N σε εσωτερική επιφάνεια. Πακτώσεις ανά 1m. Η κατασκευή δείχνει να αστοχεί. 97
Σχήμα 8-1. Παλμογεννήτρια HEDL 5640 #A13 της εταιρίας Avago. 101
Σχήμα 8-2. Κυλιόμενος διάδρομος, κινητήρας περιστροφής τυμπάνου και τύμπανο. 101
Σχήμα 8-3. Διαστασιολόγηση κατασκευής. 102
Σχήμα 8-4. Αποτύπωση στο λογισμικό solidworks: Coupler τυμπάνου, shaft support και άξονας που κατασκευάζονται. 102
Σχήμα 8-5. Στήριξη encoder σε σταθερό σημείο. 103
Σχήμα 8-6. Coupler. 103
Σχήμα 8-7. Σταυρός. 103
Σχήμα 8-8. Τοποθέτηση κομματιών και αισθητήρα – τελική κατασκευή. 104

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Η γεωμετρία των βασικών στοιχείων 38
Πίνακας 4-1. Χαρακτηριστικά κινητήρα ταχύτητας διαδρόμου. 49
Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικά κινητήρα ανύψωσης διαδρόμου. 50
Πίνακας 4-3. Πίνακας ανάλυσης σταθμισμένου μέσου για τις δύο εναλλακτικές. 61
Πίνακας 8-1. Αναλυτικός πίνακας εξαρτημάτων κατασκευής 105

1 Εισαγωγή

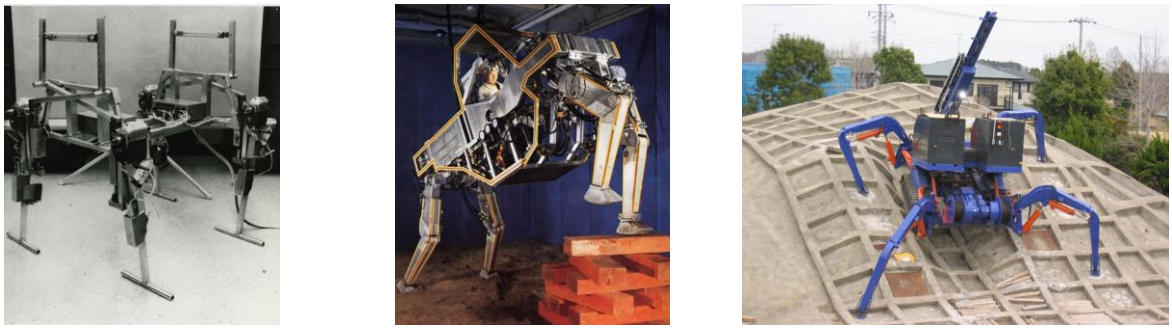
1.1 Σκοπός Εργασίας

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων των ρομπότ με πόδια που αναπτύσσονται στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Πρόκειται για πειράματα που σκοπό έχουν την κίνηση των ρομπότ πάνω σε κυλιόμενο διάδρομο. Η κίνηση αυτή μπορεί να έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος. Για παράδειγμα μπορεί να είναι επιταχυνόμενη ή σταθερής ταχύτητας, σε οριζόντιο επίπεδο ή υπό κλίση. Ακόμα, μπορεί να απαιτείται να περιορίζονται συγκεκριμένοι βαθμοί ελευθερίας κατά περίπτωση. Οι βαθμοί ελευθερίας που επιτρέπονται σε όλες τις περιπτώσεις πειραμάτων είναι εμπρός/πίσω και πάνω/κάτω, ενώ εκείνοι που κατά περίπτωση θα πρέπει να επιτρέπονται ή να περιορίζονται είναι δεξιά/αριστερά και roll, pitch, yaw. Ταυτόχρονα, μια ακόμα απαίτηση που πρέπει να ικανοποιείται είναι η προστασία του ρομπότ από πτώση.

Επομένως πρόκειται για μια εργασία σχεδιασμού και κατασκευής μηχανισμού που αποτελείται από μηχανικά μέρη που κατασκευάζονται στο εργαστήριο αλλά και από μέρη που επιλέγονται από την αγορά σύμφωνα με τις απαιτήσεις.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τετράποδα ρομπότ – Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά

Στα τέλη του 19ου αιώνα, ξεκινά η μελέτη της κίνησης με πόδια με την εργασία του Muybridge. Παράλληλα, εμφανίζονται και τα πρώτα σχέδια μηχανών ικανών να βαδίζουν. Οι McGhee και Frank το 1967 ανέπτυξαν το πρώτο ελεγχόμενο από υπολογιστή τετράποδο, το Phony και μελέτησαν διάφορους τύπους βηματισμών ως προς την ευστάθειά τους. Μέσα στη ίδια δεκαετία, σχεδιάζεται ένα τετράποδο όχημα, το Walking Truck, από την General Electric. Το τετράποδο αυτό διέθετε υδραυλικούς επενεργητές και άνθρωπο ως οδηγό, και μπορούσε να υπερνικήσει εμπόδια και να εκτελέσει εργασίες σε ανώμαλο έδαφος. Αργότερα, το 1980, κατασκευάζεται ένα τετράποδο όχημα από τον Hirose και την ομάδα του, σηματοδοτώντας την αρχή μιας σειράς τετράποδων ρομπότ με το όνομα TITAN. Τα τετράποδα αυτά, είχαν την ικανότητα να αναρριχώνται σε πλαγιές και σκάλες, υπερπηδώντας ταυτόχρονα εμπόδια. Πρόκειται για μια έρευνα που επικεντρώνεται σε στατικά ευσταθείς τύπους βηματισμών, στους οποίους δηλαδή η προβολή του κέντρου βάρους του ρομπότ περιλαμβάνεται στο πολύγωνο που σχηματίζεται κάθε φορά από τα πόδια που πατούν στο έδαφος. Τέτοια ρομπότ, ενώ βαδίζουν με μεγάλη ευστάθεια ακόμη και σε μεγάλες κλίσεις εδάφους, έχουν χαμηλή ταχύτητα.



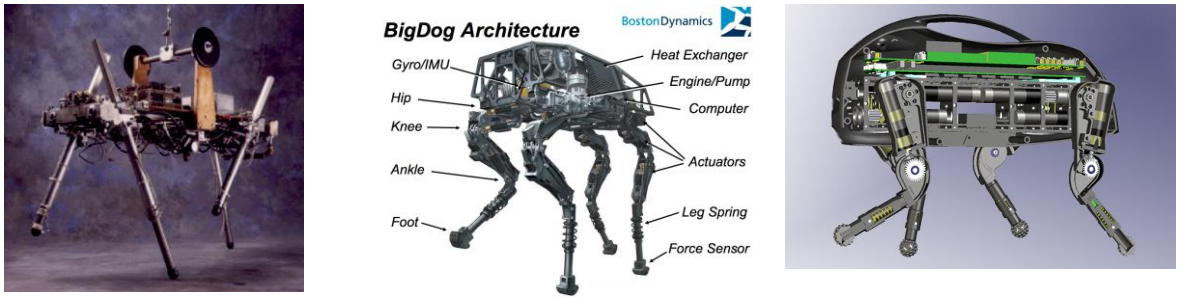
Σχήμα 1-1. Phony (1967), Walking Truck ('60) και TITAN ('80).

Το 1986, ο Raibert παρουσίασε το έργο του πάνω στη δυναμική κίνηση με πόδια. Πρόκειται για την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Leg Lab του MIT, οι οποίοι ανέπτυξαν ένα τετράποδο ρομπότ με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε πόδι, από τους οποίους οι δύο βρίσκονται στην άρθρωση του ισχίου και ο τρίτος κατά μήκος του ποδιού. Οι δύο βαθμοί ελευθερίας του ισχίου είναι στροφικοί, με υδραυλικούς επενεργητές, και τοποθετούν το πόδι του ρομπότ στο εγκάρσιο ή το διαμήκες επίπεδο. Ο

τρίτος βαθμός ελευθερίας είναι πρισματικός στην αξονική διεύθυνση του ποδιού, με υδραυλικό επενεργητή, και αυξομειώνει το μήκος του ποδιού. Το αποτέλεσμα της έρευνας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός από τα πιο εξελιγμένα τετράποδα ρομπότ, το BigDog της Boston Dynamics.

Το BigDog μπορεί να ελέγχει την εμπρόσθια ταχύτητά του, και ενώ κινείται με στατική ευστάθεια, μπορεί να επιτύχει δυναμικό βηματισμό τύπου trot όταν βαδίζει με ταχύτητα όπως αυτή του ανθρώπου. Το ρομπότ αυτό, έχει τέσσερις υδραυλικούς επενεργητές σε κάθε πόδι, ενώ τα ενσωματωμένα στοιχεία υποχωρητικότητας (ενδοτικότητας), απορροφούν τους κραδασμούς και ρυθμίζουν τις δυνάμεις που προέρχονται από το έδαφος. Το BigDog αποτελεί πρότυπο για τα τετράποδα ρομπότ σε εξωτερικούς χώρους. Είναι ωστόσο γενικά ένα βαρύ, ενεργοβόρο, θορυβώδες και σχετικά αργό ρομπότ.

Ένα άλλο στατικά ευσταθές τετράποδο ρομπότ της Boston Dynamics, το LittleDog, αναπτύχθηκε για το πρόγραμμα Learning Locomotion (L2) της DARPA, φέρει 12 βαθμούς ελευθερίας, και χρησιμοποιείται ως πλατφόρμα δοκιμής αλγορίθμων. Τρείς ηλεκτρικοί κινητήρες δίνουν κίνηση σε κάθε πόδι που αποτελείται από ένα ισχίο δύο αξόνων και γόνατο μιας στροφικής άρθρωσης. Το Little dog, οδηγήθηκε με τους κατάλληλους αλγορίθμους σε ασυνεχή και ανώμαλα εδάφη, ωστόσο η ταχύτητα παρέμεινε χαμηλή λόγω της στατικά ευσταθούς κίνησής του.



Σχήμα 1-2. Τετράποδο του Leg Lab του MIT, BigDog της Boston Dynamics, LittleDog της Boston Dynamics.

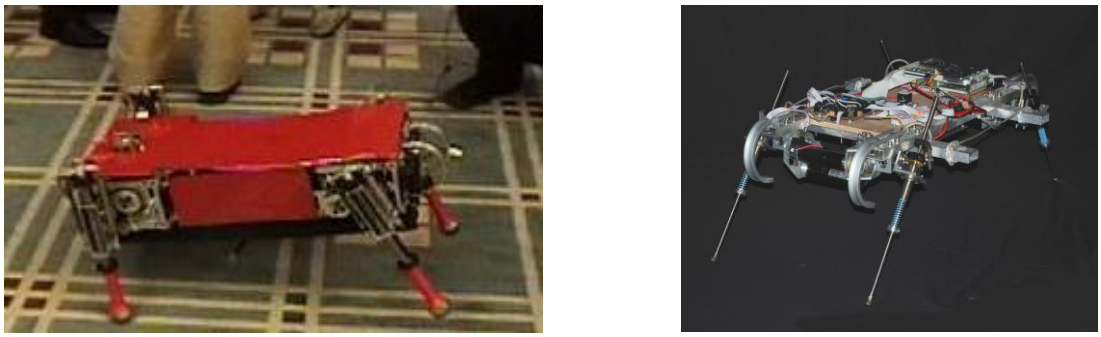
Μια διαφορετική προσέγγιση από σχεδιαστικής άποψης αποτελεί το τετράποδο Scout II και αυτό του Ε.Μ.Π., που συνδυάζει ένα κατάλληλα σχεδιασμένο μηχανικό σύστημα με συμμορφούμενα (compliant) πόδια που κινούνται με ένα μόνο κινητήρα ανά πόδι, και απλούς νόμους ελέγχου που βασίζονται στη φυσική δυναμική του μηχανικού συστήματος. Εντούτοις, οι παράμετροι του ελεγκτή καθορίζονται μέσα από μια χρονοβόρα διαδικασία δοκιμών προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα.

Ενώ το τετράποδο ρομπότ του Ε.Μ.Π. έχει παρόμοια μορφή, το σχήμα και το μέγεθος του καθορίστηκαν μέσω συστηματικής μεθοδολογίας βελτιστοποίησης, η οποία αναπτύχθηκε από τους Chatzakos και Papadopoulos. Επιπρόσθετα, οι Cherouvim και Papadopoulos σχεδίασαν έναν καινοτόμο ελεγκτή με βάση την δυναμική του μοντέλου, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται εμπειρική ρύθμιση των παραμέτρων, δηλαδή τα κέρδη ελέγχου υπολογίζονται μία φορά και δεν απαιτούνται αλλαγές ως συνάρτηση της επιθυμητής ταχύτητας. Ο ελεγκτής είναι σχεδιασμένος να επιτυγχάνει την επιθυμητή ταχύτητα και το επιθυμητό ύψος αναπήδησης, χρησιμοποιώντας έναν επενεργητή ανά πόδι, ενώ ταυτόχρονα η γωνία pitch του σώματος διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Και τα δύο αυτά ρομπότ φέρουν ευθεία πόδια, χωρίς δυνατότητα δυναμικά ελεγχόμενης συμμόρφωσης. Συνεπώς έχουν περιορισμένες δυνατότητες αποφυγής εμποδίων, ενώ το άκαμπτο σώμα τους θέτει περιορισμούς στην ταχύτητα που μπορούν να επιτύχουν.

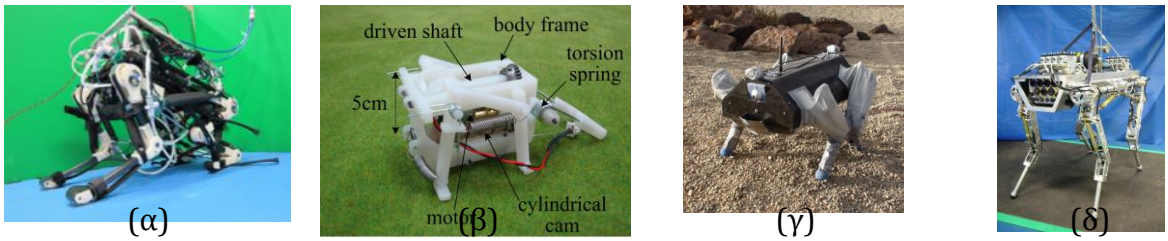
Οι Yamada et al., παρουσίασαν ένα νέο τετράποδο ρομπότ, του οποίου ο σχεδιασμός προσπαθεί να μιμηθεί ακόμη περισσότερο βιολογικά συστήματα, και εμπνέεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ σώματος και νευρικού συστήματος (Σχήμα 1-4α). Το ρομπότ αυτό, χρησιμοποιεί δέκα τεχνητούς πνευματικούς μύες.

Οι Zhang et al., παρουσιάζουν ένα τετράποδο ρομπότ διαστάσεων 10cm × 5cm × 5cm και μάζας 52g που φέρει μόνο έναν DC κινητήρα και με κατάλληλο σύστημα μετάδοσης κίνησης (οδοντωτοί τροχοί, 2 περιστροφικά ελατήρια και έκκεντρα) μπορεί να βαδίζει με ταχύτητα 1.43 mm/s αλλά και να πηδά σε ύψος 33 cm (Σχήμα 1-4β). Με την ανάπτυξη των ρομπότ όπως αυτές του Autonomous

System Lab του ETH (Σχήμα 1-4γ) και του Advanced Robotics Department του IIT [20] (Σχήμα 1-4δ), γίνονται προσπάθειες να γίνει ένα βήμα προς τα εμπρός σε σύγκριση με τα LittleDog και BigDog αντίστοιχα.

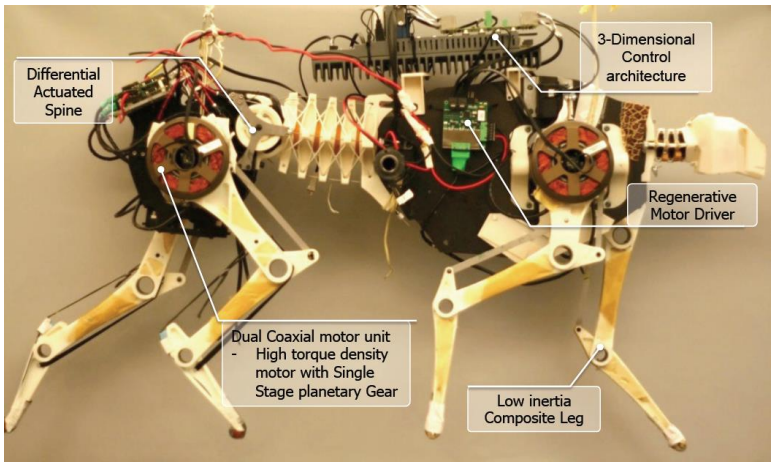


Σχήμα 1-3. Scout II και το πρώτο τετράποδο του Ε.Μ.Π.

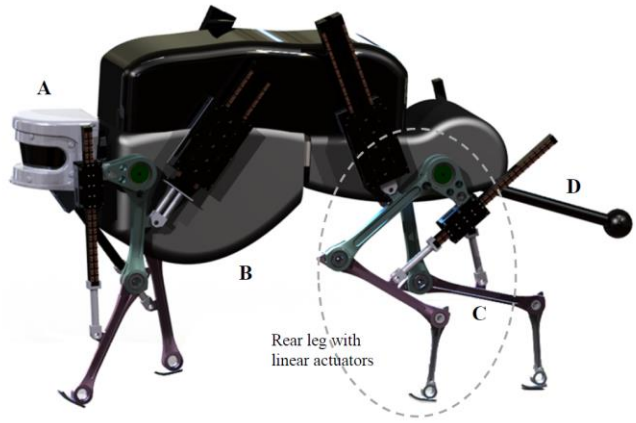


Σχήμα 1-4. Τετράποδα ρομπότ.

Σήμερα, ισχυρό ερευνητικό ενδιαφέρον συγκεντρώνουν τα τετράποδα ρομπότ πολύ υψηλής ταχύτητας. Σε αντίθεση με τα συμβατικά ρομπότ με πόδια, για να επιτύχουν εντυπωσιακά υψηλές ταχύτητες, τα τετράποδα τύπου cheetah (Σχήμα 1-5) χρειάζονται επενεργητές μεγάλης ισχύος, ικανούς να απελευθερώνουν μεγάλες ροπές σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Ένα ακόμη απαραίτητο στοιχείο, είναι η γρήγορη απόκριση των συστημάτων προκειμένου να επιτυγχάνεται πολύ γρήγορη κίνηση, αλλά και άμεση αντιμετώπιση των διαφόρων διαταραχών. Τέλος, το βάρος και το μέγεθος του συστήματος επενέργησης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονοι επενεργητές με δυσκολία καλύπτουν μερικές από αυτές τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Παράλληλη, γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης μέσω αλλαγών στους επενεργητές όπως αυτούς που ενσωματώθηκαν στο ρομπότ Cheetahroid (Σχήμα 1-6).



Σχήμα 1-5. Τετράποδο ρομπότ Cheetah (MIT).



Σχήμα 1-6. Cheetahroid robot.

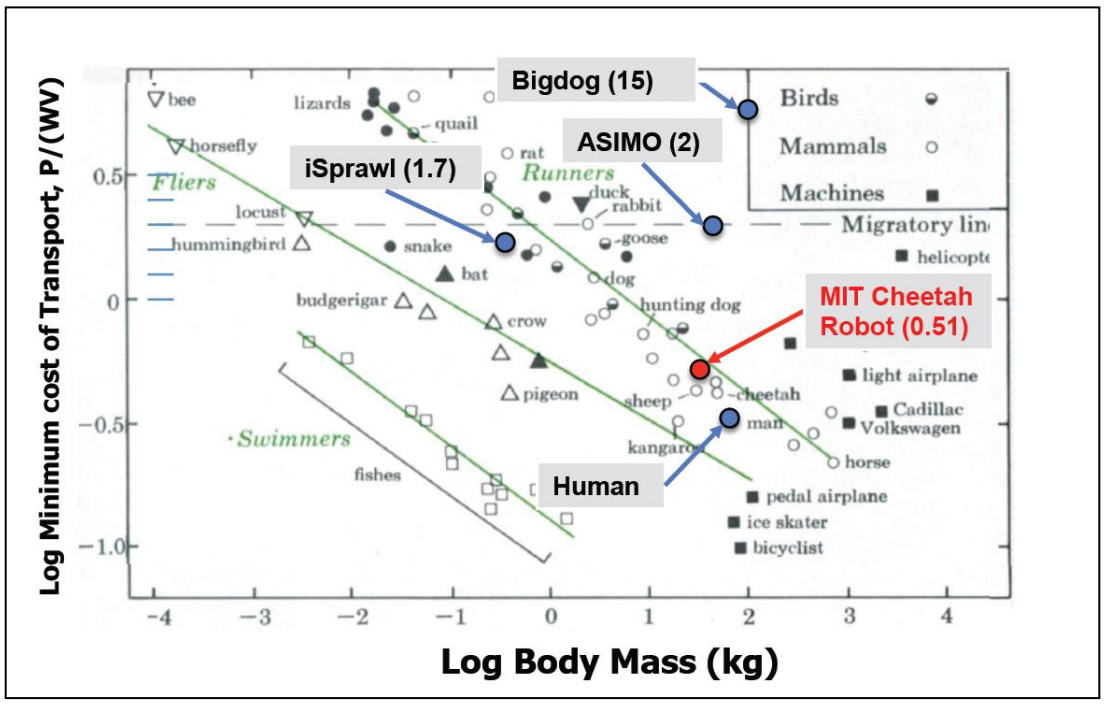
Τα τελευταία χρόνια, έχει παρουσιαστεί επιτυχώς η ευσταθής κίνηση σε ρομπότ με πόδια σε ομαλά και μη εδάφη. Εντούτοις, η ενεργειακή απόδοση των ρομπότ αυτών είναι ακόμη σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των ζώων αντίστοιχης μάζας. Τα συνολικό κόστος μεταφοράς (cost of transport ή COT) ή αλλιώς η ειδική αντίσταση (specific resistance ή SR), ένας ευρέως διαδεδομένος δείκτης απόδοσης στα ρομπότ και στα ζώα με πόδια, δίνεται από τον λόγο της καταναλισκόμενης ισχύος με το γινόμενο βάρους ταχύτητας. Συγκρινόμενο με αυτό των ζώων, το COT των ρομπότ με πόδια, όπως ο ASIMO (COT=2) και το BigDog (COT=15) είναι σημαντικά υψηλότερο.

Λαμβάνοντας υπόψη πως η ηλεκτρομηχανική μετατροπή είναι πολύ πιο αποδοτική από την μετατροπή βιολογικής ενέργειας σε μηχανική, φαίνεται πως ο σχεδιασμός των σύγχρονων ρομπότ είναι μη αποδοτικός σε διάφορα σημεία. Για το λόγο αυτόν, οι Seok et al., μελετούν τους τρεις κύριους τρόπους με τους οποίους χάνεται ενέργεια σε ένα τετράποδο ρομπότ και προτείνουν κάποιες σχεδιαστικές αρχές που ελαχιστοποιούν την χαμένη αυτή ενέργεια. Ο σχεδιασμός αυτός εφαρμόζεται επιτυχώς στο ρομπότ MIT Cheetah ενώ με πειράματα συγκρίνεται το COT του με αντίστοιχα τετράποδα ζώα. Ένα σημαντικό συμπέρασμα της μελέτης αυτής είναι ότι η περισσότερη ενέργεια χάνεται στις αντιστάσεις των κινητήρων. Για το λόγο αυτό, ένας νέος κινητήρας μπαίνει σε φάση ανάπτυξης από την ομάδα με στόχο την αντικατάσταση των υπαρχόντων επενεργειών του ρομπότ και τη μείωση του COT μόλις στο 0.33.

Η μοντελοποίηση και ο σχεδιασμός των τετράποδων ρομπότ που αναφέρθηκαν, όπως παρατηρείται, συνδέεται άμεσα με τους στόχους του κάθε συστήματος. Έτσι, άλλες είναι οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για κίνηση με μεγάλες ταχύτητες και υψηλή ενεργειακή απόδοση (π.χ. αρθρωτό σώμα), και άλλες για κίνηση σε ανώμαλα και ασυνεχή εδάφη (π.χ. μεγαλύτερη υποχωρητικότητα και περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας στα πόδια). Το βασικότερο ίσως στοιχείο του σχεδιασμού είναι ο αριθμός και το είδος των βαθμών ελευθερίας του ρομπότ (επενεργούμενοι ή παθητικοί). Όσο αυξάνονται οι βαθμοί ελευθερίας το σύστημα αποκτά μεγαλύτερη ευελιξία, αλλά ταυτόχρονα γίνεται βαρύτερο, πιο ενεργοβόρο και εμφανίζει αυξημένη πολυπλοκότητα σε προγραμματιστικό και κατασκευαστικό επίπεδο.

Μια δεύτερη σχεδιαστική παράμετρος μεγάλης σημασίας αφορά στο είδος των επενεργητών του ρομπότ. Συγκεκριμένα, το σύστημα επενέργησης μπορεί να περιλαμβάνει ηλεκτρικούς, υδραυλικούς, ή πνευματικούς κινητήρες. Πλεονεκτήματα των υδραυλικών και των πνευματικών αποτελούν ο υψηλός λόγος της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος εγκατάστασης (πυκνότητα ισχύος), και η δυνατότητα παραγωγής υψηλής ροπής σε μικρές ταχύτητες με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση μειωτήρων. Εντούτοις, οι πνευματικοί επενεργητές δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές ελέγχου θέσης μεγάλης ακρίβειας λόγω της συμπιεστότητας του μέσου. Οι υδραυλικοί επενεργητές παρουσιάζουν μειονεκτήματα όπως είναι ο συνολικός χαμηλός βαθμός απόδοσης, οι αυξημένες ανάγκες συντήρησης, η αναγκαιότητα επιπρόσθετων στοιχείων (π.χ. αντλία και δεξαμενή) και οι ιδιαίτερες δυσκολίες κατασκευής σε μικρές διαστάσεις. Ωστόσο οι κινητήρες αυτοί είναι ιδιαίτερα ασφαλείς σε επικίνδυνα περιβάλλοντα και ενδείκνυνται κυρίως για χρήση σε ρομπότ που διαχειρίζονται μεγάλα φορτία. Τέλος, οι ηλεκτρικοί επενεργητές, οι οποίοι απαντώνται συχνότερα σε

εφαρμογές ρομποτικής, χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος, μεγάλη ποικιλία προϊόντων, εύκολη συντήρηση, και υψηλό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 1-7. Διάγραμμα κόστους μεταφοράς (COT) σε συνάρτηση με τη μάζα του σώματος για διάφορα ζώα και ρομπότ.

Τα δυναμικά μοντέλα που αφορούν ρομπότ με πόδια είναι συστήματα ανοιχτής αλυσίδας μορφής δέντρου που υπόκεινται σε μεταβλητούς με το χρόνο περιορισμούς, αφού τα πόδια δεν βρίσκονται σε διαρκή επαφή με το έδαφος. Συνιστούν έντονα μη γραμμικά συστήματα, ενώ είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί η αλληλεπίδρασή τους με το άγνωστο περιβάλλον. Οι μέθοδοι μοντελοποίησης τέτοιων ρομπότ μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη, η επαφή με το έδαφος ορίζεται ως περιορισμός (άρθρωση στο σημείο επαφής με το έδαφος), αυξάνοντας έτσι τις δυνάμεις των περιορισμών ανάλογα με τον αριθμό των ποδιών (προσέγγιση εξαρτημένη από τη φάση). Το αποτέλεσμα είναι ένας συνδυασμός ανοιχτών και κλειστών κινηματικών αλυσίδων για τις διαφορετικές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης ποδιών – εδάφους. Έτσι, διαφορετικές εξισώσεις περιγράφουν τη δυναμική για κάθε φάση της κίνησης (π.χ. διπλή φάση εδάφους, φάση πτήσης κ.λπ.). Στη δεύτερη κατηγορία, το ρομπότ μοντελοποιείται ως ένα σύστημα μορφής δέντρου με κινητή βάση, όπου η αλληλεπίδραση με το έδαφος μοντελοποιείται μέσω εξωτερικά ασκούμενων δυνάμεων και ροπών (προσέγγιση ανεξάρτητη της φάσης). Τέλος, για το έδαφος χρησιμοποιείται συνήθως ένα βισκοελαστικό μοντέλο (ελατήριο - αποσβεστήρας) για τις κάθετες δυνάμεις και ένα μοντέλο τριβής (π.χ. Coulomb) για τις οριζόντιες.

Συνολικά πάντως, τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα τείνουν να είναι απλά, π.χ. χρησιμοποιούνται απλά υποδείγματα (templates), με αποτέλεσμα τη δυσκολία ταύτισης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των πειραμάτων. Αυτό όμως γίνεται συνήθως αποδεκτό, λόγω της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας της δυναμικής τέτοιων ρομπότ.

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για συστήματα στήριξης ρομπότ με πόδια

Η ανάπτυξη της κίνησης των ρομπότ με πόδια στο τριδιάστατο επίπεδο, συνήθως ξεκινά από το βασικό επίπεδο κίνησης σε δύο διαστάσεις με την χρήση ενός βραχίονα (boom) ή ενός μηχανισμού που εξασφαλίζει την κίνηση στο επίπεδο (planarizing mechanism). Το πιο σύνηθες σύστημα στήριξης, ένας βραχίονας με ένα κεντρικό σημείο περιστροφής (pivot point), περιορίζει το ρομπότ να κινείται πάνω στην επιφάνεια μιας σφαίρας, ανάλογα με τον αριθμό και τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας

του pivot. Η επιθυμητή ευθύγραμμη τροχιά κίνησης του ρομπότ, μπορεί να προσεγγιστεί κάνοντας χρήση ενός βραχίονα με αρκετά μεγάλο μήκος. Σε περιπτώσεις όπου ο χώρος είναι περιορισμένος ή είναι απαραίτητη η καλύτερη προσέγγιση της ευθύγραμμης τροχιάς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί planarizing system, παρόλο που σε αυτή την περίπτωση η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνεται λόγω του ότι είναι απαραίτητη η χρήση κυλιόμενου διαδρόμου.

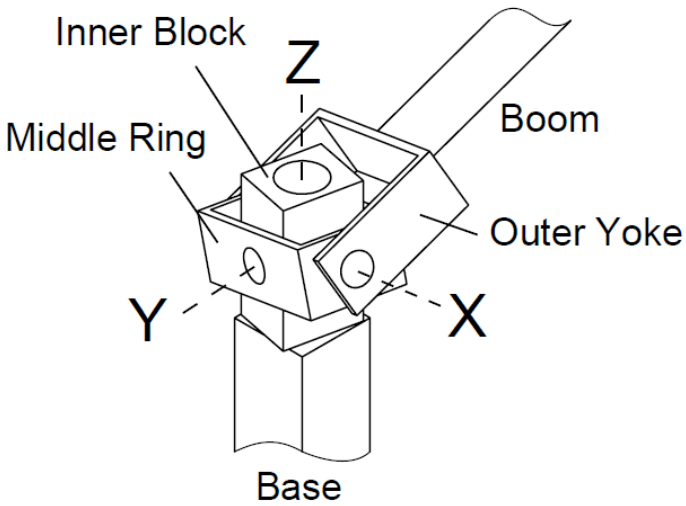
Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται παραδείγματα από projects με ρομπότ με πόδια και τα σχεδιαστικά στοιχεία που αφορούν την στήριξή τους στο πειραματικό στάδιο. Έτσι, παρουσιάζονται υπό-συστήματα που περιλαμβάνουν βραχίονες, στροφικές αρθρώσεις, planarizing συστήματα, συστήματα στήριξης από το ταβάνι.

“Βάδιση”, ορίζεται η κίνηση του ρομπότ, όταν αυτό πάντα έχει ένα από τα δύο πόδια στο έδαφος, ενώ “τρέξιμο”, όταν όλα τα πόδια είναι εκτός δαπέδου.

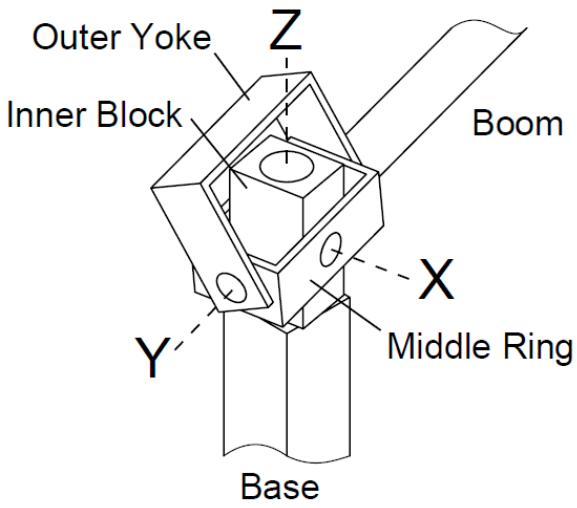
1.3.1 Υποσύστημα με χρήση βραχίονα και άρθρωσης

Όταν το σύστημα στήριξης περιλαμβάνει τη χρήση βραχίονα, το ρομπότ κατά την κίνησή του, διαγράφει την τροχιά ενός ολόκληρου κύκλου, επομένως ο κάθετος άξονας z της άρθρωσης γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ο βραχίονας, είναι εκείνος που εξασφαλίζει την περιστροφή των 360°. Οι κινήσεις pitch και up/down, που εξασφαλίζονται από τους άλλους δύο άξονες περιστροφής x και y, ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος, μπορεί να μην επιτρέπουν την πλήρη περιστροφή. Αυτό εξαρτάται από το σχεδιασμό και την υλοποίηση της άρθρωσης (gimbal) που χρησιμοποιείται (Σχήμα 1-8, Σχήμα 1-9, Σχήμα 1-10).

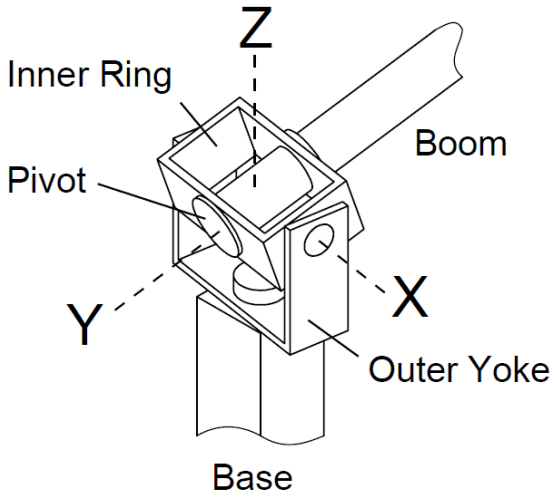
Κατά την κίνησή του, το ρομπότ ακολουθεί κυκλική. Λόγω της αλλαγής του μήκους του ποδιού όταν αυτό έρχεται σε επαφή με το έδαφος, το πόδι αναγκάζεται σε μεταβολή της τροχιάς του προκειμένου να μην παραμορφωθεί η άρθρωση που συνδέει το ρομπότ με το βραχίονα (Δx Σχήμα 1-11 και Σχήμα 1-12). Το μέγεθος της μεταβολής αυτής, εξαρτάται από το ύψος στο οποίο τοποθετείται η άρθρωση (pivot joint). Για να ελαχιστοποιηθεί η μεταβολή αυτή, η άρθρωση θα πρέπει να τοποθετηθεί κατά το δυνατόν χαμηλότερα σε σχέση με το έδαφος όπως στο Σχήμα 1-11. Σε αυτή την περίπτωση όμως, gimbal όπως στο Σχήμα 1-9 και στο Σχήμα 1-10, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.



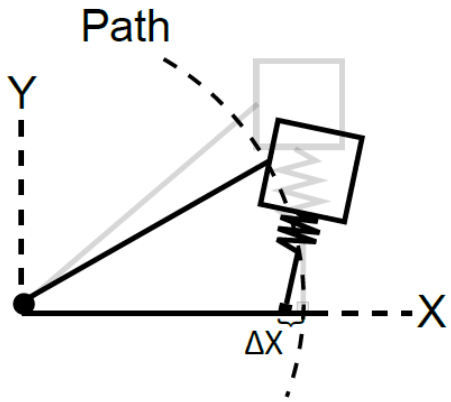
Σχήμα 1-8. Περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα z, όχι πλήρης περιστροφή γύρω από x και y.



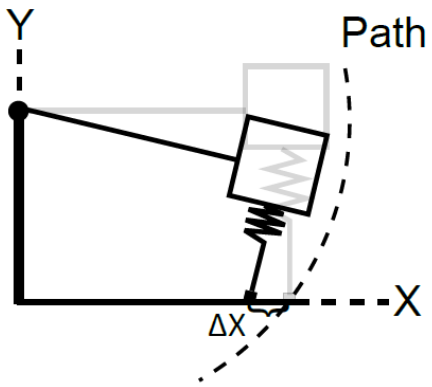
Σχήμα 1-9. Περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα z, όχι πλήρης περιστροφή γύρω από x και y, όμως μεγαλύτερη από Σχήμα 1-8.



Σχήμα 1-10. Περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα z και y.

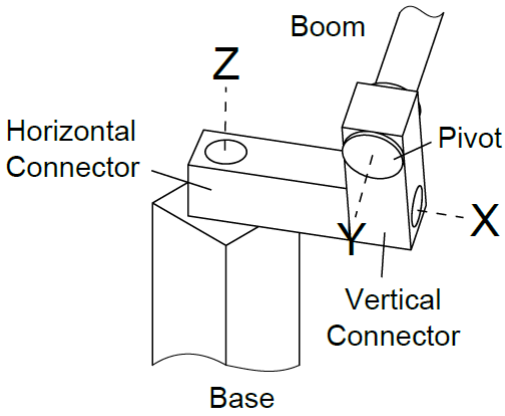


Σχήμα 1-11. Η άρθρωση είχε τοποθετηθεί σε σχέση με το έδαφος – σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση Δχ είναι σχετικά μικρή.

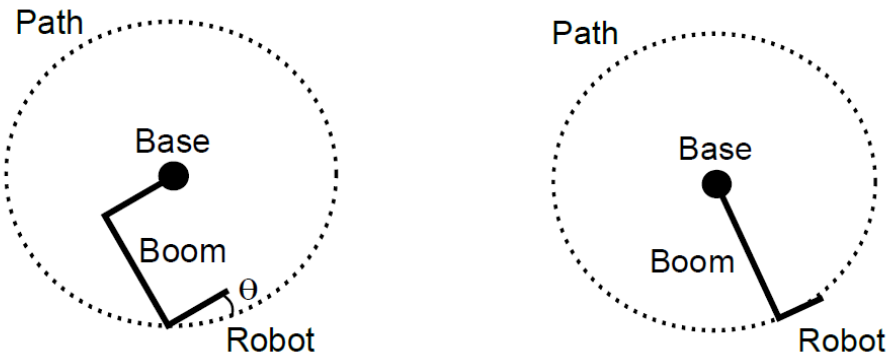


Σχήμα 1-12. Η άρθρωση είχε τοποθετηθεί σε σχέση με το σώμα του ρομπότ – σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση Δχ είναι μεγαλύτερη.

Όταν χρησιμοποιείται τέτοιου είδους άρθρωση, η τοποθέτηση των αξόνων είναι σημαντική. Η μετατόπιση των αξόνων όπως στο Σχήμα 1-13 , μπορεί να απλοποιήσει το σχεδιασμό του gimbal. Παρ' όλα αυτά, μετατοπίζοντας τον άξονα Y (άξονας περιστροφής του βραχίονα που δίνει το pitch), μετατοπίζεται και ο προσανατολισμός του ρομπότ σε σχέση με την κυκλική τροχιά (Σχήμα 1-14).



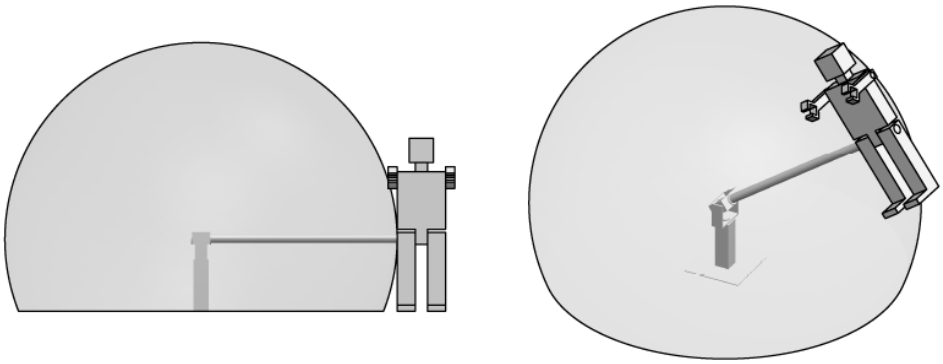
Σχήμα 1-13. Απλοποιημένος σχεδιασμός με μετατόπιση των αξόνων, λόγω μετατόπισής του βραχίονα.



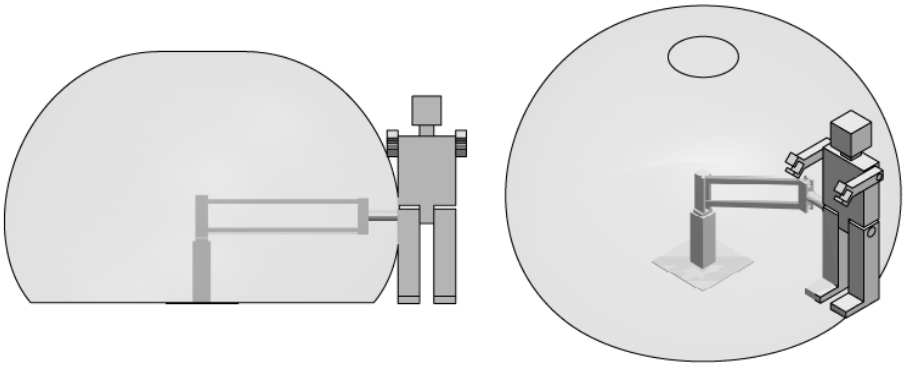
Σχήμα 1-14. Μετατόπιση προσανατολισμού του ρομπότ όταν μετατοπίζεται ο βραχίονας (boom) από τον κάθετο άξονα περιστροφής.

Η μορφή του βραχίονα (boom arm), μπορεί να αποτελείται είτε από μια μονή δοκό (Σχήμα 1-15) είτε από μηχανισμό τεσσάρων ράβδων (four bar linkage) (Σχήμα 1-16). Ένα σύνηθες πρόβλημα με τη

χρήση των μονών δοκών, είναι η κάμψη. Η δοκός είναι ένα επίμηκες ευθύγραμμο στοιχείο, δηλαδή με μεγάλο μήκος σε σχέση με το ύψος και το πλάτος της, στο οποίο ασκείται και / ή μόνο εγκάρσια φόρτιση. Υπόκειται δηλαδή και / ή μόνο σε κάμψη και επομένως ο άξονας της δοκού παραμορφώνεται σε μια καμπύλη. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με τη χρήση δοκών με μεγαλύτερες διαμέτρους, είτε με την χρήση σωλήνων από ανθρακονήματα. Ακόμα ένα πρόβλημα μπορεί να αποτελέσει η πλευρική ολίσθηση του ποδιού όταν ο βραχίονας έχει μικρό μήκος. Σε αυτή την περίπτωση, για βελτίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηχανισμός παραλληλογράμμου (four bar linkage), όπου εξασφαλίζεται η παραλληλία του ρομπότ με τον κάθετο άξονα.



Σχήμα 1-15. Χρήση μονής δοκού. Το ρομπότ κινείται εφαπτόμενο σε σφαιρική επιφάνεια.



Σχήμα 1-16. Χρήση μηχανισμού παραλληλογράμμου. Το ρομπότ κινείται εφαπτόμενο σε επιφάνεια που μοιάζει με τόρο.

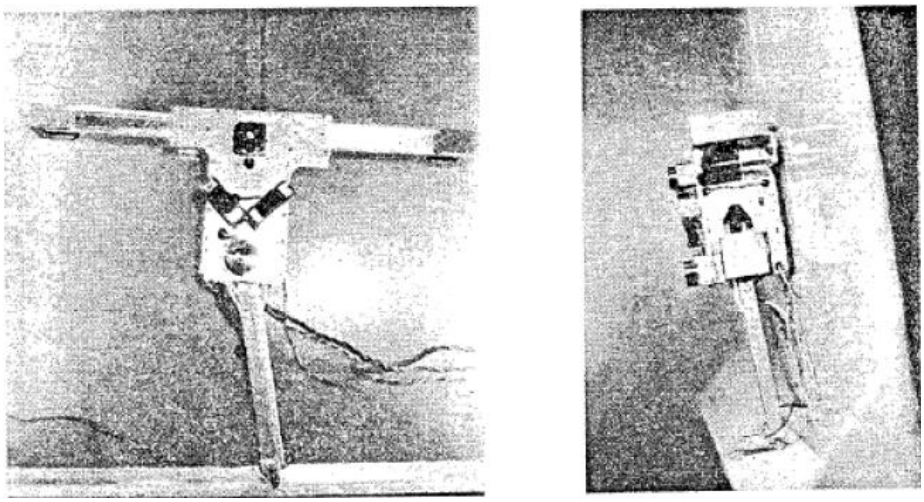
Τα μειονεκτήματα της χρήσης συστημάτων στήριξης όπως αυτό είναι ότι σε περιπτώσεις ρομπότ που έχουν ζεύγη ποδιών, το εσωτερικό ζεύγος ποδιών επιβαρύνεται περισσότερο («μεταφέρει μεγαλύτερο βάρος»), ενώ το εξωτερικό διανύει μεγαλύτερη απόσταση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αν αντί για τη στήριξη με boom arm και gimbal, χρησιμοποιηθεί ένας μηχανισμός επιπεδοποίησης και κυλιόμενος διάδρομος.

1.3.2 Σύστημα στήριξης με μηχανισμό επιπεδοποίησης και κυλιόμενο διάδρομο

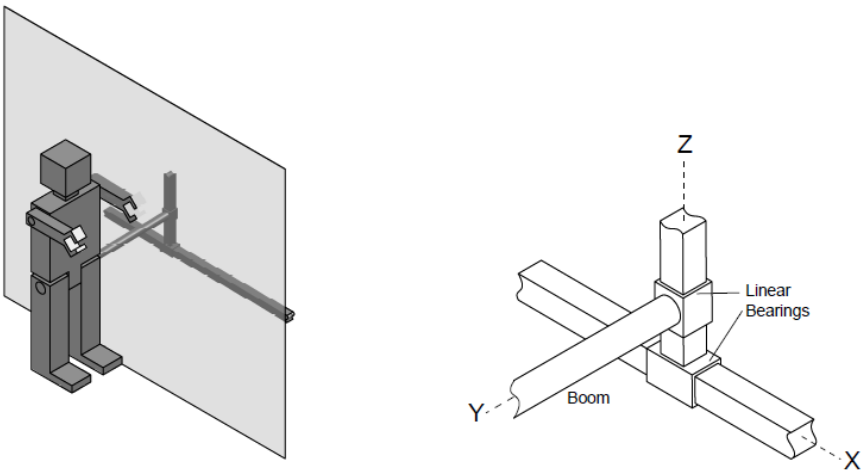
Το πρώτο ρομπότ με πόδια (Matsouka's running robot Σχήμα 1-17), στηρίχθηκε σε έναν αρκετά απλό μηχανισμό επιπεδοποίησης (planarizing mechanism) και κινούνταν πάνω σε τράπεζα με κλίση 10° από το οριζόντιο επίπεδο. Η κύλισή του εξασφαλίζεται με χρήση ρουλεμάν για μείωση των τριβών και ομαλή κίνηση. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να ελαχιστοποιηθούν οι τριβές όπως η χρήση αέρα με τραπέζια που μοιάζουν με αυτά του air hockey. Ακόμα, για την εξασφάλιση της κίνησης του ρομπότ κατά μήκος του κυλιόμενου διαδρόμου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γραμμικά ρουλεμάν όπως στο Σχήμα 1-18 (χρησιμοποιούνται στο MIT Leg lab, Vrije University κ.α.).

Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας λύσης, περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση της μετατόπισης του ποδιού στο οριζόντιο επίπεδο και την αποφυγή του φαινομένου εμφάνισης των φυγόκεντρων δυνάμεων όταν το ρομπότ κινείται σε κυκλική τροχιά. Ακόμα, σε μια τέτοια λύση δεν υπάρχουν απαιτήσεις χώρου μεγάλου μεγέθους.

Τα μειονεκτήματα είναι η ενδεχόμενη μεταβολή της δυναμικής του ρομπότ από αυξημένη μάζα και δυνάμεις τριβών.



Σχήμα 1-17. Matsouka's running robot.

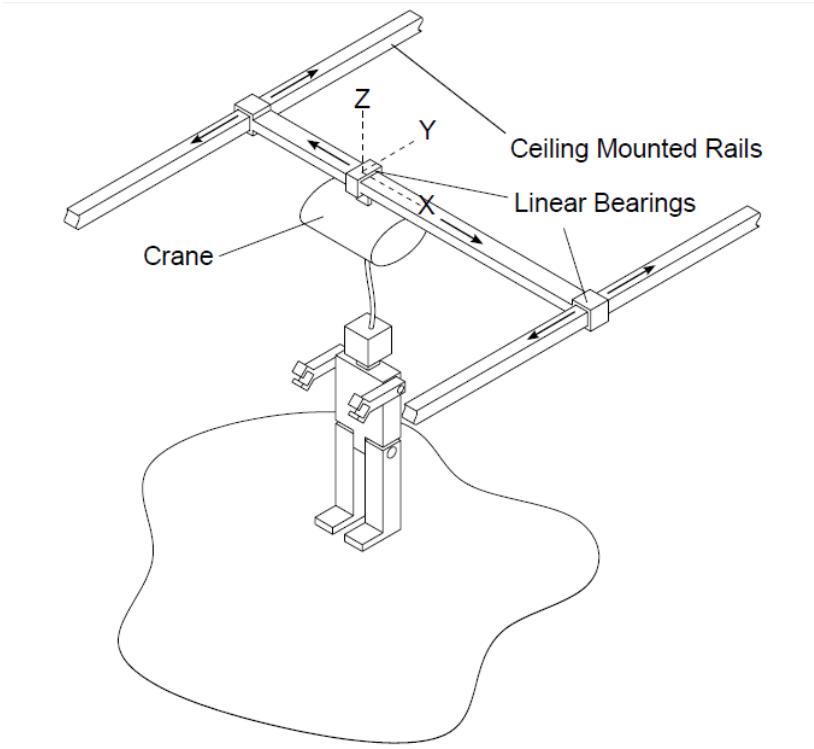


Σχήμα 1-18. Χρήση γραμμικών ρουλεμάν.

1.3.3 Συστήματα στήριξης γερανογέφυρας.

Ακόμα ένας τρόπος στήριξης κινούμενων ρομπότ είναι αυτός που βασίζεται στο ταβάνι και περιλαμβάνει σύστημα γερανογέφυρας όπου το ρομπότ έχει τη δυνατότητα κίνησης στις 3 διαστάσεις (Σχήμα 1-19). Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα «ακολουθεί» το ρομπότ και είτε είναι ενεργητικό (και άρα επενεργούμενο), είτε παθητικό. Το ενεργητικό σύστημα είτε ελέγχεται αυτόματα, είτε με τηλεχειρισμό, ενώ στην περίπτωση του παθητικού, το ρομπότ μεταφέρει το μηχανισμό ή την κίνηση του μηχανισμού υποβοηθά κάποιος χειριστής (χρησιμοποιούνται σε Technical University of Munich, University of Tokyo, Toyota, Honda κ.α.).

Τα μειονεκτήματα σε αυτή την περίπτωση είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε χώρο και ο περιορισμός της κίνησης πάνω/κάτω.

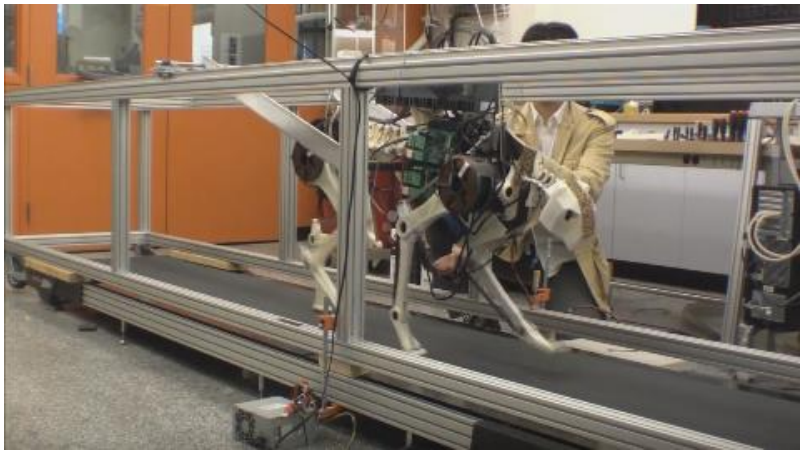


Σχήμα 1-19. Σύστημα γερανογέφυρας.

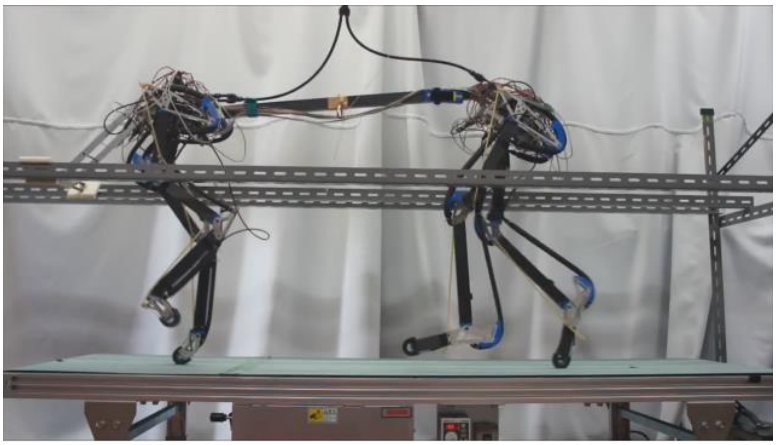
1.4 Μελέτη υπαρχόντων μηχανισμών

Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα βιομιμητικών ρομπότ που έχουν αναπτυχθεί τόσο σε πανεπιστημιακό επίπεδο όσο και από διάφορες εταιρίες. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κεφάλαιο για την μελέτη των μηχανισμών στήριξής τους σε κυλιόμενους διαδρόμους είναι τα εξής:

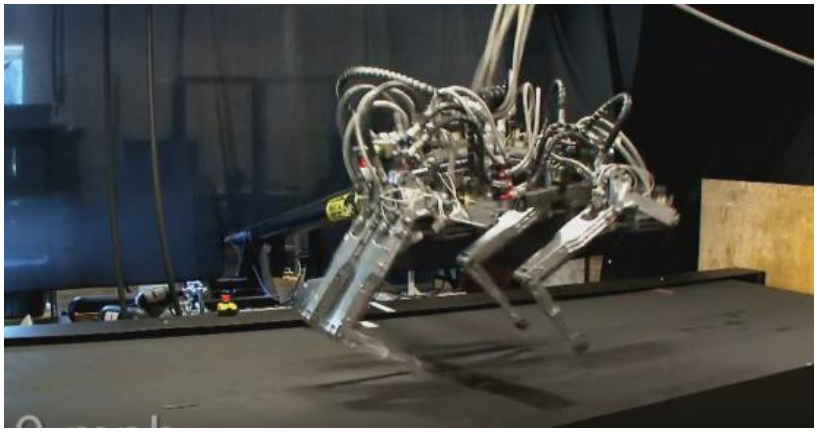
- Το Cheetah του πανεπιστημίου MIT, που στηρίζεται από ένα σύστημα με κάγκελα πλευρικά του διαδρόμου. Πάνω στα κάγκελα, υπάρχουν linear guides για να επιτρέπουν την κίνηση forward / back, ενώ η ασφάλεια του ρομπότ παρέχεται από δοκό που φέρουν πάνω τους τα linear guides. Η κίνηση up / down, εξασφαλίζεται από την περιστροφή των πλευρικών στηριγμάτων του ρομπότ γύρω από τη δοκό συγκράτησης, ενώ η pitch περιστροφή δίνεται από την περιστροφή της μέσης του ρομπότ γύρω από τη δοκό που διαπερνά τη μέση του και το ενώνει με το μηχανισμό συγκράτησης.
- Το πανεπιστήμιο της Osaka, χρησιμοποιεί για το τετράποδό του έναν αντίστοιχο τρόπο με το MIT, αυτή τη φορά τα Al frames αντικαθίστανται απλώς από εξαρτήματα Dexion.
- Το Cheetah της εταιρίας Boston Dynamics, που στηρίζεται σε boom arm με πρισματική άρθρωση και U joint στη βάση του. Έτσι εξασφαλίζονται οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας με τους προηγούμενους.
- Ο Raptor του ινστιτούτου Kaist, κινείται με αντίστοιχο τρόπο όπως και το Cheetah της Boston Dynamics.
- Το ανθρωπόμορφο δίποδο του πανεπιστημίου του Texas, χρησιμοποιεί και αυτό μηχανισμό αντίστοιχο με αυτόν του MIT.



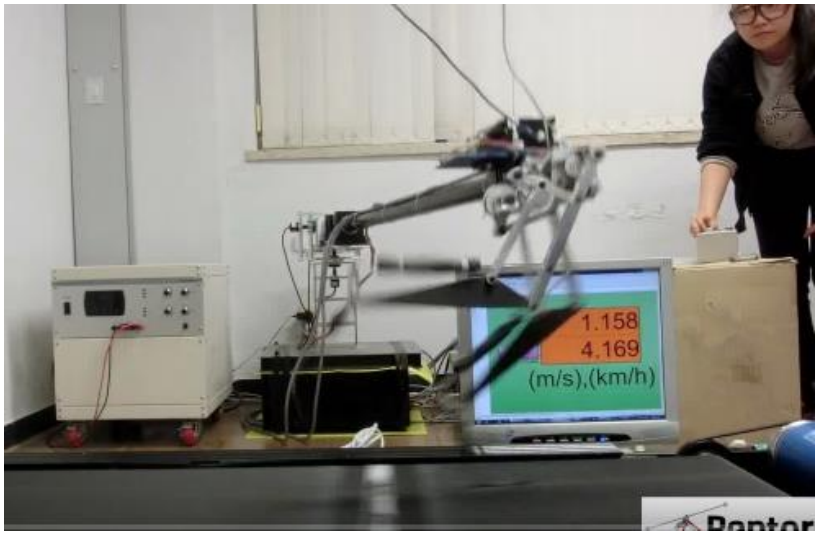
Σχήμα 1-20. Σύστημα στήριξης Cheetah του πανεπιστημίου MIT.



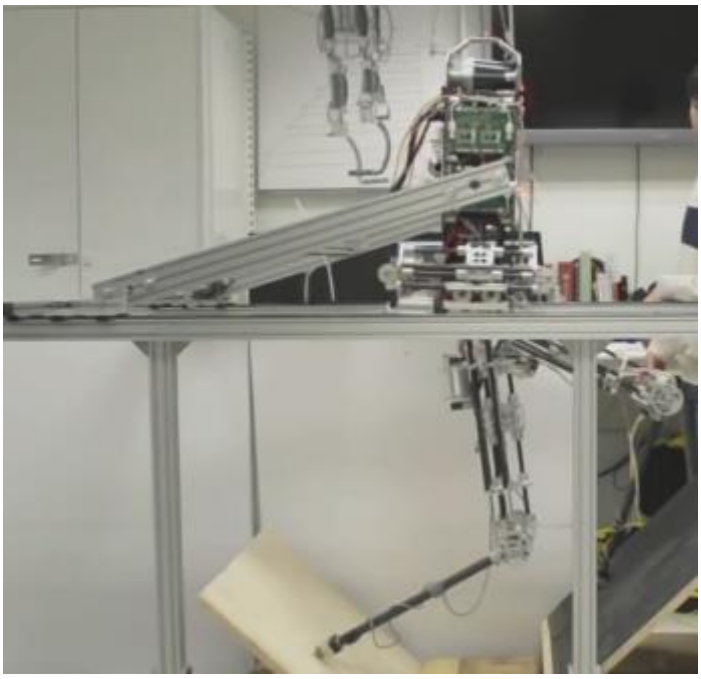
Σχήμα 1-21. Σύστημα στήριξης τετράποδου του πανεπιστημίου της Osaka.



Σχήμα 1-22. Σύστημα στήριξης Cheetah της Boston Dynamics.



Σχήμα 1-23. Σύστημα στήριξης του δίποδου Raptor της Kaist.



Σχήμα 1-24. Σύστημα στήριξης του ανθρωπόμορφου του Un. of Texas.

1.5 Δομή Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται η αναφορά στα στοιχεία θεωρίας πάνω στα οποία βασίστηκε η εργασία. Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται μια εκτενής αναφορά στα συστήματα σχεδιομελέτης και τη θεωρία πίσω από αυτά καθώς και η ανάλυση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που τέθηκε. Το Κεφάλαιο 4 αναφέρεται στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής του μηχανισμού, από το στάδιο της έρευνας, του σχεδιασμού μιας πρώτης λύσης, την ανάπτυξη μιας βελτιωμένης λύσης και τελικά την κατασκευή της. Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα πειράματα και οι προσομοιώσεις που δημιουργήθηκαν για τον έλεγχο της αντοχής της κατασκευής και τη σωστή διαστασιολόγησή της και τέλος στο Κεφάλαιο 6 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική εργασία.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Εισαγωγή

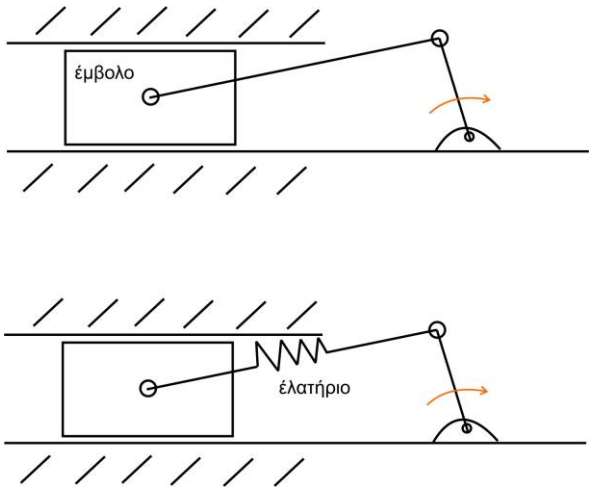
Η φύση της εργασίας αυτής είναι κατασκευαστική. Πρόκειται μάλιστα για τη δημιουργία ενός μηχανισμού διαμορφωμένου σύμφωνα με τις προδιαγραφές και απαιτήσεις που προκύπτουν από τις ανάγκες του ερευνητικού έργου του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Το κομμάτι λοιπόν της θεωρίας περιλαμβάνει τα πεδία εκείνα που μελετήθηκαν στη φάση του σχεδιασμού και της κατασκευής.

2.2 Μηχανισμός και στοιχεία μηχανισμών

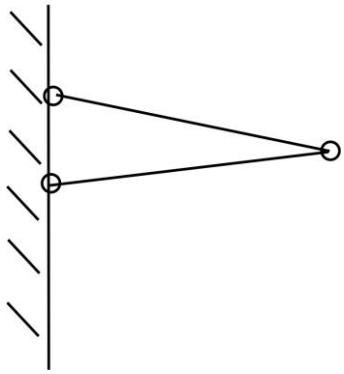
Ο μηχανισμός ορίζεται ως το σύνολο των στερεών σωμάτων που επιτρέπει την πρόβλεψη της κίνησης αυτών αν είναι γνωστή η κίνηση των εισόδων. Αλλιώς, πρόκειται για το συνδυασμό δύο ή περισσοτέρων μηχανικών μερών που ενεργούν συνδυαστικά για να προσφέρουν κίνηση σε ένα σύστημα ή να μετατρέψουν μια μορφή κίνησης σε μια άλλη. Βασικό λοιπόν χαρακτηριστικό του μηχανισμού είναι η δυνατότητά του να κινηθεί.

Η κατασκευή ορίζεται από το ίδιο σύνολο μηχανικών μερών, όμως δεν έχει τη δυνατότητα να κινηθεί.

Στο Σχήμα 2-1 φαίνεται το παράδειγμα ενός μηχανισμού διωστήρα – στρόφαλου. Η πρώτη περίπτωση, αποτελεί έναν μηχανισμό σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό. Ωστόσο, η δεύτερη περίπτωση που αποτελεί μια παρόμοια διάταξη δεν αποτελεί μηχανισμό γιατί για τη μελέτη της απαιτείται ολοκλήρωση εξισώσεων κίνησης (δυναμική).



Σχήμα 2-1. Παράδειγμα μηχανισμού διωστήρα – στρόφαλου και εξαίρεση.

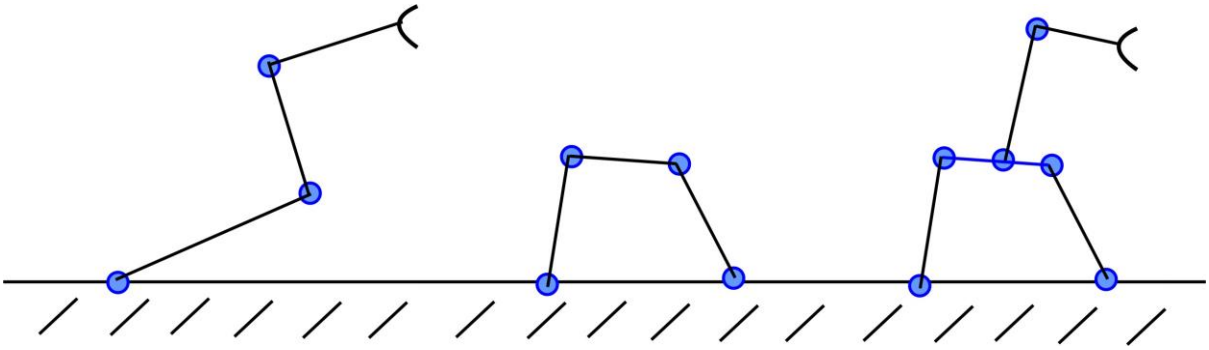


Σχήμα 2-2. Παράδειγμα απλής κατασκευής.

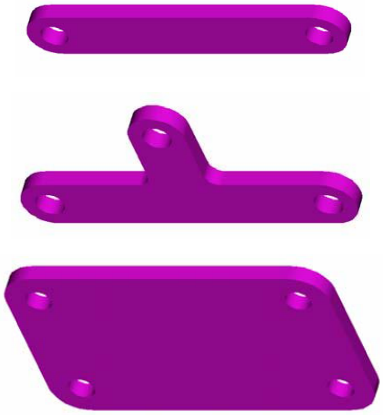
2.2.1 Κινηματικές αλυσίδες και απλές αρθρώσεις

Το βασικό στοιχείο των μηχανισμών είναι οι κινηματικές αλυσίδες (linkages). Αυτές αποτελούνται από ένα σύνολο συνδέσμων (link) και αρθρώσεων (joint). Ο σύνδεσμος είναι ένα στιβαρό σώμα που αποτελείται από 2 κόμβους τουλάχιστον. Ο κόμβος κάθε συνδέσμου προσαρμόζεται σε άλλο σύνδεσμο μέσω της άρθρωσης (Σχήμα 2-4). Υπάρχουν έξι τύποι βασικών αρθρώσεων κάθε μια από τις οποίες έχει και διαφορετικό αριθμό βαθμών ελευθερίας: η στροφική (1 β.ε.), η πρισματική (1 β.ε.), η σφαιρική (3 β.ε.), η κυλινδρική (2 β.ε.), η ελικοειδής (1 β.ε.) και η επίπεδη (3 β.ε.) (Σχήμα 2-5).

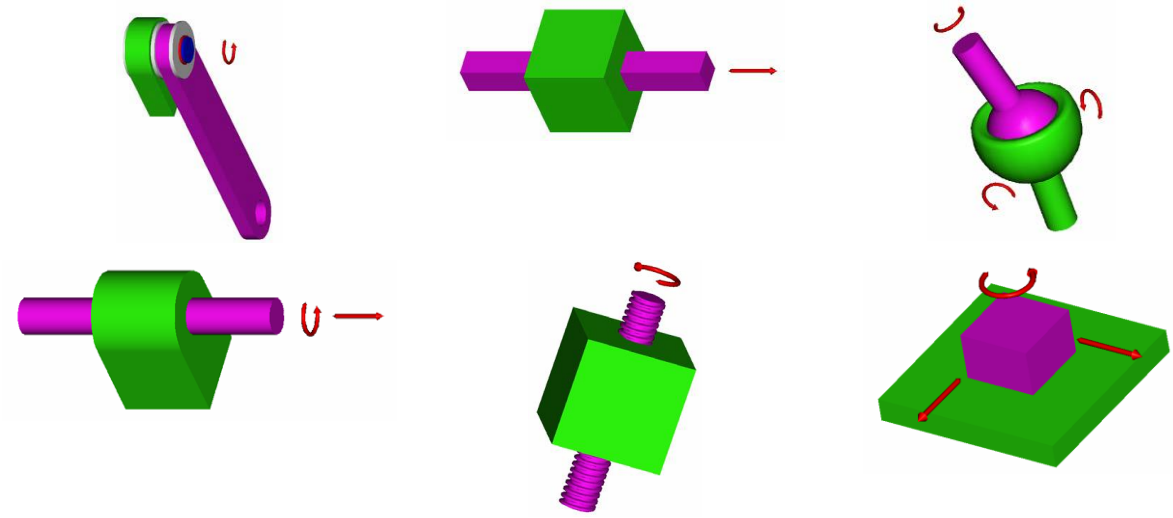
Οι κινηματικές αλυσίδες διαχωρίζονται σε ανοιχτές, κλειστές και μικτές.



Σχήμα 2-3. Είδη κινηματικών αλυσίδων (ανοιχτή, κλειστή και μικτή).



Σχήμα 2-4. Διάφοροι τύποι συνδέσμων ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων τους.



Σχήμα 2-5. Οι έξι απλές αρθρώσεις.

2.2.2 Βαθμός ελευθερίας μηχανισμού / κινητικότητα, κριτήριο K-G

Ένα ακόμα στοιχείο των μηχανισμών, βασικό για την ανάλυσή τους είναι ο βαθμός ελευθερίας / κινητικότητα (mobility). Πρόκειται για τον αριθμό των μεταβλητών που απαιτείται για να οριστεί η θέση του μηχανισμού. Για τον ορισμό της κινητικότητας ενός μηχανισμού χρησιμοποιείται το κριτήριο Kutzbach – Grübler διαφέρει ανάλογα με το αν ο μηχανισμός κινείται στο επίπεδο ή στις τρείς διαστάσεις. Έτσι λοιπόν ορίζονται οι παρακάτω εξισώσεις για το επίπεδο και για τις τρεις διαστάσεις αντίστοιχα:

$$m = 3(n-1) - 2J_1 - J_2 \tag{2-1}$$

$$m = 6(n-1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 - 2J_4 - J_5 \tag{2-2}$$

Όπου,

n: ο αριθμός των σωμάτων σε ένα μηχανισμό (τα σώματα διαχωρίζονται μεταξύ αν μεταξύ τους υπάρχει άρθρωση) συμπεριλαμβανομένης της βάσης

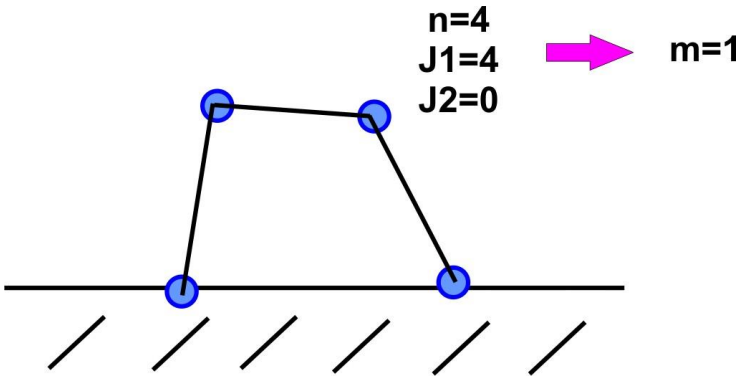
J_i: ο αριθμός των αρθρώσεων με i βαθμό/ούς ελευθερίας

Η τιμή m σε ένα μηχανισμό / κατασκευή μπορεί να ορίσει το είδος του / της. Διακρίνονται λοιπόν οι παρακάτω περιπτώσεις:

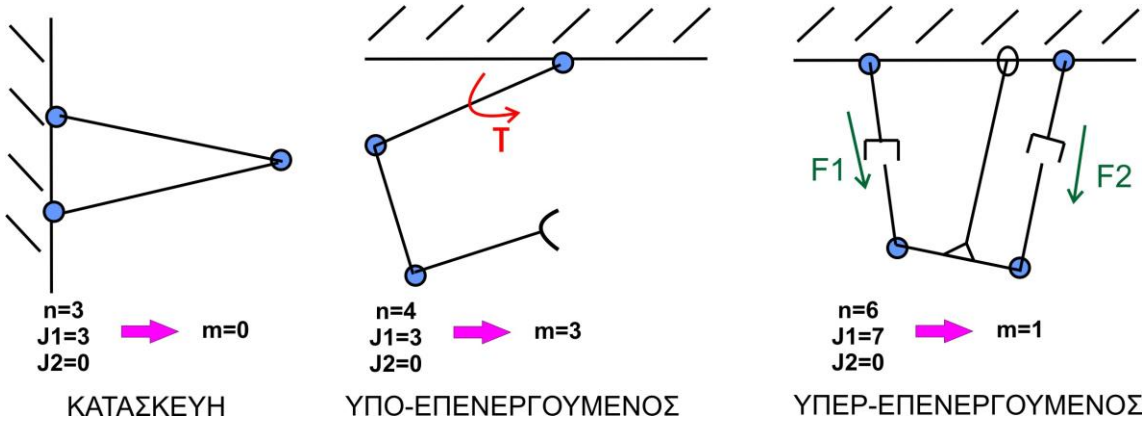
- Αν m ∈ (-∞, -1), πρόκειται για μια απροσδιόριστη κατασκευή. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να επιλυθεί με τις γνωστές εξισώσεις ισορροπίας. Για την επίλυσή της απαιτούνται εξισώσεις του συμβιβαστού των παραμορφώσεων, το πρόβλημα μπορεί να είναι υπερστατικό όπως στην περίπτωση ενός δικτυώματος.
- Αν m=0, πρόκειται για μια κατασκευή
- Αν m ∈ (+1, +∞), πρόκειται για ένα μηχανισμό και άρα μπορεί να κινηθεί.
    - Αν m = αριθμό ελεγχόμενων εισόδων, τότε πρόκειται για απλό μηχανισμό.
    - Αν m > αριθμό ελεγχόμενων εισόδων, τότε πρόκειται για υπό-επενεργούμενο μηχανισμό.
    - Αν m < αριθμό ελεγχόμενων εισόδων, τότε πρόκειται για υπέρ-επενεργούμενο μηχανισμό.

Μερικά παραδείγματα αυτής της μεθόδου, περιγράφονται στο Σχήμα 2-7. Από τον υπολογισμό του κριτηρίου K-G, για την πρώτη περίπτωση προκύπτει η κατασκευή. Για τη δεύτερη περίπτωση, πρόκειται για έναν υπό-επενεργούμενο μηχανισμό, εφ' όσον η επενέργηση στο σύστημα δίνεται μόνο από έναν κινητήρα (τ). Στην τελευταία περίπτωση, έχουμε έναν υπέρ-επενεργούμενο μηχανισμό, πράγμα που υποδεικνύεται από το κριτήριο.

Υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις. Μπορεί από έναν σχεδιασμό να προκύπτει η περίπτωση της κατασκευής λόγω του κριτηρίου, όμως στην πραγματικότητα να κινείται και επομένως να πρόκειται για μηχανισμό. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε περιπτώσεις παράλληλων γεωμετριών.



Σχήμα 2-6. Παράδειγμα υπολογισμού του mobility σύμφωνα με το κριτήριο K-G για μηχανισμό που κινείται στο επίπεδο.



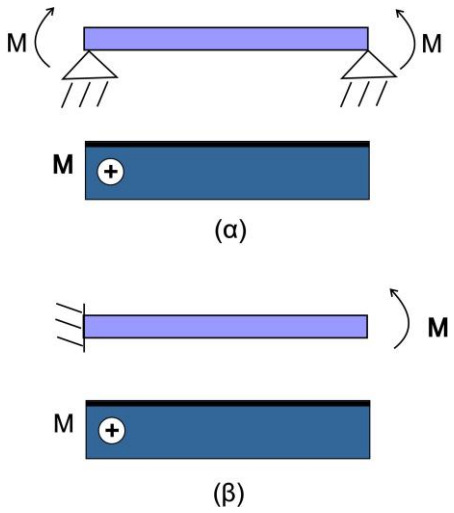
Σχήμα 2-7. Παραδείγματα χαρακτηρισμού μηχανισμού / κατασκευής ανάλογα με το βαθμό ελευθερίας τους.

2.3 Στοιχεία αντοχής υλικών – Κάμψη, σχεδιασμός και συντελεστής ασφαλείας

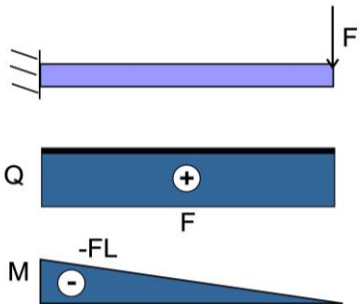
Στην παρούσα εργασία, που πραγματεύεται το σχεδιασμό και την κατασκευή μηχανισμού με έξι β.ε., στο στάδιο της προσομοίωσης και της στατικής ανάλυσης εξετάζονται προσεγγιστικά τα φορτία τα οποία μπορεί να ασκηθούν στο μηχανισμό, προκειμένου ο σχεδιασμός του να γίνει με κατάλληλο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του στην απαίτηση της αντοχής. Κατά κύριο λόγο λοιπόν, εξετάζονται στοιχεία, οι παραμορφώσεις και η αντοχή τους σε εγκάρσια φόρτιση. Σε αυτό το σημείο, τονίζεται ότι εξορισμού η ράβδος θεωρείται ότι δέχεται μόνο αξονικά φορτία (εφελκυσμού / θλίψης), ενώ αντίθετα η δοκός δέχεται κυρίως εγκάρσια φορτία. Ωστόσο, λόγω του ότι τις περισσότερες φορές στην παρούσα εργασία το αντικείμενο προς μελέτη είναι στοιχεία που έχουν πολύ μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος τους, στα κεφάλαια που αφορούν στο σχεδιασμό και την κατασκευή, χρησιμοποιείται καταχρηστικά ο όρος «ράβδος» αντί του όρου «δοκός».

Η δοκός είναι ένα επίμηκες ευθύγραμμο στοιχείο, δηλαδή με μεγάλο μήκος σε σχέση με το ύψος και το πλάτος του, στο οποίο ασκείται μόνο / ή και εγκάρσια φόρτιση. Υπόκειται δηλαδή και / ή μόνο σε κάμψη και επομένως ο άξονας της δοκού παραμορφώνεται σε μια καμπύλη.

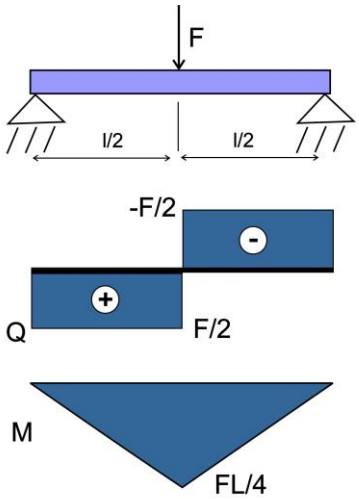
Καθαρή κάμψη έχουμε όταν η δοκός καταπονείται από σταθερή καμπτική ροπή M. Σε αυτή την περίπτωση, δεν έχουμε διατμητικές δυνάμεις (τέμνουσες) Q στη δοκό όπως προκύπτει από τη σχέση $dM/dx=Q$ για M σταθερό. Αντίθετα, σύνθετη κάμψη έχουμε όταν η δοκός καταπονείται από διατμητικές δυνάμεις, δηλαδή $Q\neq 0$ και επομένως η M μεταβάλλεται κατά μήκος της δοκού. Το βέλος κάμψης w της δοκού σε τυχαίο σημείο κατά μήκος της δοκού είναι η μετατόπιση του σημείου από την αρχική θέση κατά την z- διεύθυνση.



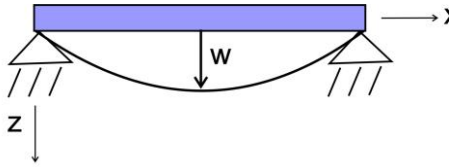
Σχήμα 2-8. (α) Καθαρή κάμψη σε απλή δοκό. (β) Καθαρή κάμψη σε πρόβολο.



Σχήμα 2-9. Πρόβολος σε σύνθετη κάμψη.



Σχήμα 2-10. Απλή δοκός σε σύνθετη κάμψη τριών σημείων.



Σχήμα 2-11. Βέλος κάμψης απλής δοκού.

2.3.1 Τάσεις στη δοκό

Ας θεωρήσουμε μια δοκό σε καθαρή κάμψη όπως στο Σχήμα 2-8(α). Η ροπή συνίσταται από δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις F, έτσι ώστε M=Fl, όπου l η κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο δυνάμεων F. Επομένως αναπτύσσονται εσωτερικές αξονικές δυνάμεις στη δοκό οι οποίες αποκαλύπτονται σε μια εγκάρσια τομή της δοκού επιφάνειας A και έχουν συνισταμένη N ίση με το μηδέν, N=0. Οι διατμητικές τάσεις είναι εξ ορισμού μηδέν στην καθαρή κάμψη.

Θεωρώντας μια στοιχειώδη επιφάνεια dA στην εγκάρσια τομή σε απόσταση z από τον άξονα x. Στην επιφάνεια αυτή, ασκείται μια στοιχειώδης εσωτερική δύναμη $dN=\sigma_{xx}dA$. Επειδή η συνισταμένη εσωτερική δύναμη είναι μηδέν, στην τομή το ολοκλήρωμα της dN πάνω στην A όλης της τομής πρέπει να εξαφανίζεται. Επομένως έχουμε την πρώτη εξίσωση της στατικής:

$$N = \int_A dN = \int_A \sigma_{xx}\, dA \qquad (2\text{-}3)$$

Η δεύτερη εξίσωση στατικής εκφράζει το γεγονός ότι η ροπή που προκύπτει από τις ορθές τάσεις σ_{xx} στη διατομή ισούται με την καμπτική ροπή M. Η στοιχειώδης εσωτερική δύναμη dN που ασκείται στη στοιχειώδη επιφάνεια dA προκαλεί μια στοιχειώδη ροπή dM

$$dM = zdN = z\sigma_{xx}dA \qquad (2\text{-}3)$$

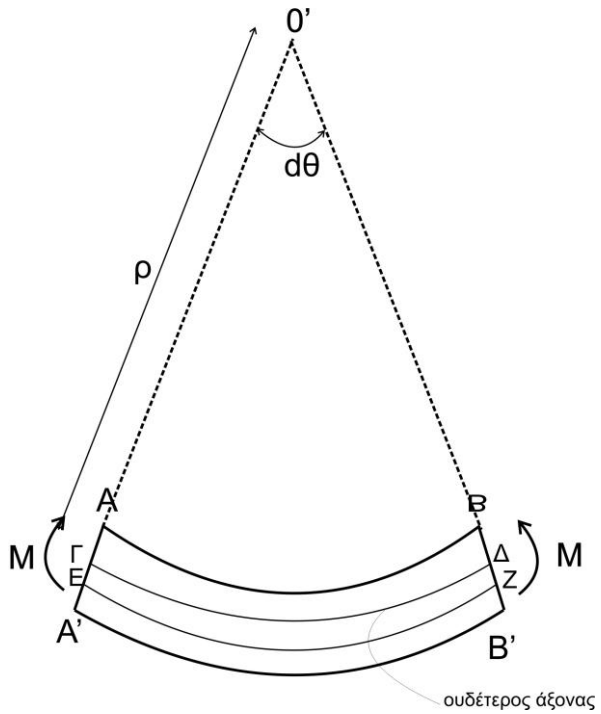
και παίρνοντας το ολοκλήρωμα σε όλη την επιφάνεια A της διατομής έχουμε τη δεύτερη εξίσωση στατικής

$$M = \int_A dM = \int_A z\sigma_{xx} dA \tag{2-4}$$

2.3.2 Παραμορφώσεις στη δοκό

Όταν μια καμπτική ροπή επιβάλλεται στα άκρα της δοκού, ο διαμήκης άξονάς της παραμορφώνεται σε μια καμπύλη (Σχήμα 2-12). Επειδή η δοκός είναι συμμετρική και η καμπτική ροπή εφαρμόζεται στο επίπεδο συμμετρίας, η παραμόρφωση της δοκού γίνεται πάνω στο επίπεδο συμμετρίας που ονομάζεται επίπεδο κάμψης. Η δοκός παραμένει συμμετρική μετά την κάμψη. Για θετική καμπτική ροπή M, η γραμμή AB βραχύνεται, ενώ η A'B΄ επιμηκύνεται. Άρα για M>0, το πάνω μέρος της δοκού είναι σε θλίψη και το κάτω σε εφελκυσμό. Κάπου μεταξύ τους, υπάρχει μια επιφάνεια όπου οι διατμητικές γραμμές δεν αλλάζουν μήκος, δηλαδή ε_{xx}=0. Αυτή η επιφάνεια ονομάζεται ουδέτερη επιφάνεια της δοκού και τέμνει τυχαία εγκάρσια διατομή σε μια ευθεία, την ουδέτερη γραμμή. Η απόσταση ΓΟ' του κέντρου καμπυλότητας από την ουδέτερη επιφάνεια ονομάζεται ακτίνα καμπυλότητας ρ. Η καμπυλότητα κ ορίζεται ως το αντίστροφο της ακτίνας καμπυλότητας ρ.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \tag{2-5}$$



Σχήμα 2-12. Καμπυλότητα δοκού.

Η καμπυλότητα είναι το μέτρο για το πόσο έντονα μια δοκός έχει καμφθεί. Αν η φόρτιση είναι μικρή, η δοκός είναι περίπου ευθεία, η ακτίνα ρ πολύ μεγάλη και η καμπυλότητα κ μικρή. Τα αντίστροφα ισχύουν σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή η φόρτιση είναι μεγάλη.

2.3.3 Μέγιστη τάση στη διατομή

Η μέγιστη σε απόλυτη τιμή τάση στη διατομή παρουσιάζεται στα σημεία που βρίσκονται στη μεγαλύτερη απόσταση c από την ουδέτερη γραμμή και ισούται με

$$|\sigma_{xx}| = \frac{|M|c}{I} = \frac{|M|}{W} \tag{2-6}$$

όπου $W = \frac{I}{c}$, η ελαστική ροπή αντίστασης και εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής και c, η μέγιστη απόσταση μεταξύ των σημείων της εγκάρσιας διατομής της δοκού από την ουδέτερη επιφάνεια.

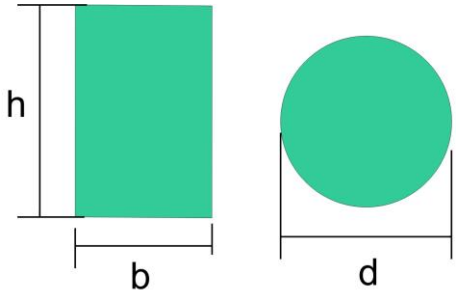
Γενικά οι δοκοί πρέπει να σχεδιάζονται με μεγάλο W, έτσι ώστε να περιορίζονται οι μέγιστες τάσεις στη δοκό για δεδομένη καμπτική ροπή. Η ροπή αδράνειας I και η ελαστική ροπή αντίστασης W, σε δοκούς ορθογωνικής διατομής πλάτους b και ύψους h (Σχήμα 2-13), δίνονται ως εξής:

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \tag{2-7}$$

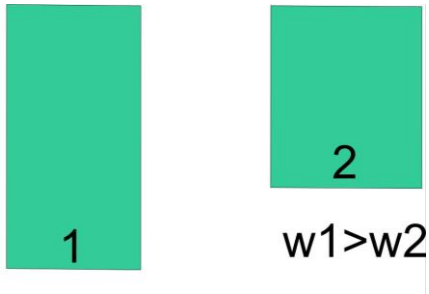
$$W = \frac{1}{6} bh^2 = \frac{1}{6} Ah \tag{2-8}$$

όπου $A = bh$ είναι το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής A.

Επομένως προκύπτει ότι μεταξύ ορθογωνικών δοκών ίδιας διατομής A, τη μεγαλύτερη ροπή αντίστασης W έχει εκείνη με μεγαλύτερο h (Σχήμα 2-14).



Σχήμα 2-13. Ορθογωνική και κυκλική εγκάρσια διατομή.



Σχήμα 2-14. Ελαστική ροπή αντίστασης ορθογωνικών διατομών ίσου εμβαδού.

2.3.4 Αποτελεσματικότητα δοκών διαφόρων σχημάτων

Η αποτελεσματικότητα στην κάμψη εξαρτάται κυρίως από το σχήμα της διατομής. Η αποτελεσματικότερη δοκός είναι εκείνη όπου το υλικό βρίσκεται όσο το δυνατόν μακρύτερα από την ουδέτερη γραμμή. Σαν παράδειγμα, ας συγκριθεί η ελαστική ροπή αντίστασης μιας κυκλικής διατομής διαμέτρου d και μιας τετραγωνικής ίδιου εμβαδού. Για να έχουν και οι δύο διατομές το ίδιο εμβαδό, η πλευρά h της τετραγωνικής διατομής πρέπει να είναι

$$A_{\kappa\upsilon\kappa} = A_{\tau\varepsilon\tau} \rightarrow \pi \frac{d^2}{4} = h^2 \rightarrow h = \frac{d\sqrt{\pi}}{2} \tag{2-9}$$

και από τις

$$W_{\kappa\upsilon\kappa} = \frac{Ad}{8} \tag{2-10}$$

$$W_{\tau\varepsilon\tau} = \frac{Ah}{6} = \frac{Ad\sqrt{\pi}}{12} \tag{2-11}$$

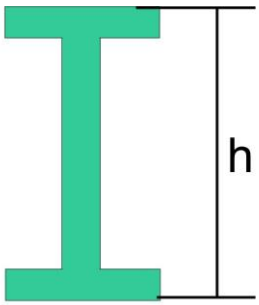
προκύπτει

$$\frac{W_{\tau\varepsilon\tau}}{W_{\kappa\upsilon\kappa}} = \frac{2\sqrt{\pi}}{3} = 1.18 \tag{2-12}$$

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η δοκός με τετραγωνική διατομή είναι αποτελεσματικότερη στην αντίσταση σε κάμψη από ότι η κυκλική επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κύκλος έχει ένα σχετικά μεγάλο εύρος του υλικού κοντά στην ουδέτερη γραμμή. Δοκοί διπλού ταυ έχουν μεγάλο W επειδή ένα μεγάλο μέρος του υλικού τους βρίσκεται μακριά από την ουδέτερη γραμμή (Σχήμα 2-15). Σε τυπικές διατομές διπλού «Τ», η ελαστική ροπή αντίστασης είναι:

$$W \approx \frac{1}{3}Ah \tag{2-13}$$

δηλαδή διπλάσια της αντίστασης μιας ορθογωνικής διατομής ίσου εμβαδού και ύψους.



Σχήμα 2-15. Διατομή διπλού «Τ».

2.3.5 Συντελεστής ασφαλείας

Ένα κατασκευαστικό στοιχείο σχεδιάζεται έτσι ώστε η τάση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (working stress) ή επιτρεπτή τάση (allowable stress) να είναι μικρότερη της οριακής τάσης (ultimate stress) του υλικού κατασκευής. Ο λόγος της οριακής τάσης προς την επιτρεπτή, ονομάζεται συντελεστής ασφαλείας. FS ή FoS (factor of safety).

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_{\varepsilon\pi}} = \frac{\text{οριακή τάση}}{\text{επιτρεπτή τάση}} \tag{2-14}$$

Οι σπουδαιότεροι λόγοι για τους οποίους είναι αναγκαίος ο συντελεστής ασφαλείας είναι οι εξής:

- Η αβεβαιότητα στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και η πιθανότητα κατασκευαστικών ελαττωμάτων.
- Η αβεβαιότητα στις φορτίσεις
- Η αβεβαιότητα στην ανάλυση, λόγω πχ. προσεγγίσεων, απλοποιήσεων κλπ.
- Η ελλιπής συντήρηση και η αποσύνθεση με την πάροδο του χρόνου.

Η επιλογή του συντελεστή ασφαλείας αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα και λαμβάνει υπόψιν θέματα όπως:

- Συμβιβασμούς μεταξύ ασφάλειας, κόστους κατασκευής, βάρους κ.α.
- Σπουδαιότητα του στοιχείου στην κατασκευή και δυνατότητα αντικατάστασής του.
- Απώλεια αξιοπιστίας της κατασκευής.

Γενικά, όσο ακριβέστερος είναι ο σχεδιασμός της κατασκευής, τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ασφαλείας.

3 Συστήματα σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή και λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης Solidworks

3.1 CAD / CAM

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται εκτενής αναφορά στα συστήματα σχεδιασμού. Αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο περιγράφονται όλα τα στάδια της σχεδιαστικής μελέτης για την ανάπτυξη της κατασκευής και στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας σχεδιομελέτης σε πραγματικό σχεδιαστικό περιβάλλον, το περιβάλλον Solidworks.

3.1.1 Ορισμός και τεχνολογία σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή – CAD

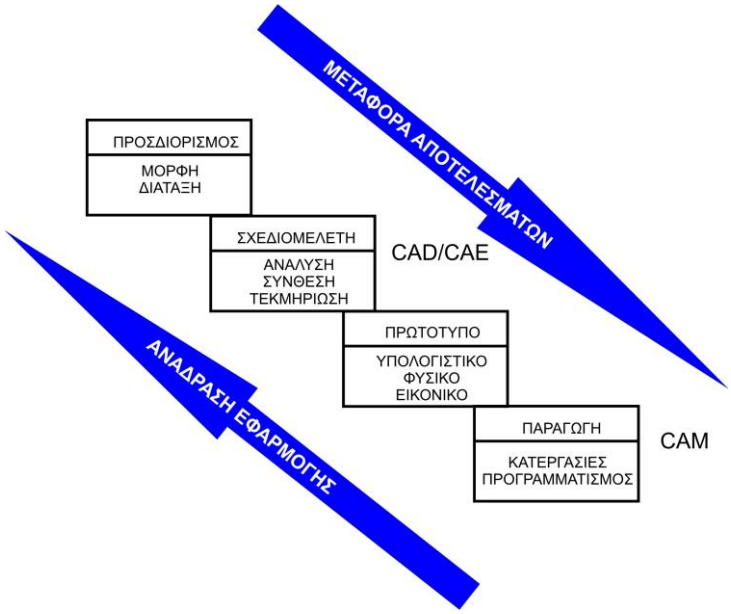
Ως σχεδιομελέτη και παραγωγή με χρήση υπολογιστή ορίζεται η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών σε όλα τα στάδια ανάπτυξης μιας κατασκευής και ιδιαίτερα στη δημιουργία, μεταβολή, ανάλυση, βελτιστοποίηση της μορφής και τον προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών της. Στηρίζεται κυρίως στην τεχνολογία των γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποιήσης, της προσομοίωσης και του ελέγχου των δεδομένων και αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου. Βασικός παράγοντας στη διαδικασία της σχεδίασης είναι η δημιουργία του γραφικού μοντέλου με τα συστήματα μοντελοποίησης CAD για να χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά από κάθετες εφαρμογές όπως:

- Προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών, κυρίως σε μηχανές ψηφιακής καθοδήγησης (CNC), με χρήση των συστημάτων σχεδιασμού παραγωγής με χρήση υπολογιστή (CAM). Τα συστήματα CAM, μπορούν να προσομοιώσουν την κίνηση του κοπτικού εργαλείου της εργαλειομηχανής και να ελέγξουν τη μορφή του μοντέλου και την ακρίβεια της κατεργασίας πριν από την πραγματική εκτέλεση της κατεργασίας.
- Ανάλυση και βελτιστοποίηση μορφής και λειτουργίας με χρήση των συστημάτων μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (CAE / FEA) για μια πληθώρα εφαρμογών όπως τον έλεγχο αντοχής, τη συμπεριφορά σε ροή, την κατεργασιμότητα κ.α. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται γραφικά για αξιολόγηση του αποτελέσματος και βελτιστοποίηση της μορφής ή των λειτουργικών χαρακτηριστικών της κατασκευής ή της κατεργασίας παραγωγής της.
- Ταχεία παραγωγή πρωτοτύπου και παραγωγή του προϊόντος (Rapid Prototyping and Manufacturing). Παραγωγή πρωτοτύπων ή τελικών προϊόντων άμεσα από το τριδιάστατο μοντέλο CAD, με χρήση ειδικών μηχανών και σε μικρή ποσότητα παραγωγής, με σκοπό την παρουσίαση ή τη δοκιμή του πρωτοτύπου.
- Ανάλυση της λειτουργικότητας του πρωτοτύπου με τη χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας, με κύριο στόχο τη μείωση ή ακόμα την εξάλειψη του αριθμού των απαιτούμενων φυσικών πρωτοτύπων καθώς και την αξιολόγηση των τεχνικών λύσεων σε πρώιμο στάδιο.

Το στάδιο της σχεδιομελέτης περιλαμβάνει τον ακριβή προσδιορισμό της μορφής της κατασκευής, τη μελέτη, την ανάπτυξη και την τεκμηρίωσή του. Ολοκληρώνεται σε δύο κύκλους, οι οποίοι όμως δεν είναι ανεξάρτητοι και είναι η σύνθεση και η ανάλυση. Στη σύνθεση γίνεται η μοντελοιποίηση και προσομοίωση της κατασκευής. Δημιουργείται η μορφή του κάθε εξαρτήματος και όλης της συναρμολόγησης και γίνεται προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας (CAD). Στην ανάλυση υλοποιείται η προσομοίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής όπου χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης (CAE). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της μελέτης και στην τροποποίηση της μορφής της κατασκευής. Στο τέλος γίνεται η τεκμηρίωση της μελέτης με σχέδια, έντυπα, μοντέλα κ.α.

Ο κύκλος ανάπτυξης δεν αποτελεί σειριακή διαδικασία εκτέλεσης διαφόρων σταδίων. Αντίθετα, υπάρχει μεταφορά αποτελεσμάτων υπό τη μορφή των σχεδίων και αρχείων από το ένα στάδιο στο

επόμενο, ανάδραση αποτελεσμάτων προς τα προηγούμενα στάδια και παράλληλη εκτέλεση των διαφόρων σταδίων. Αυτή η μεθοδολογία ονομάζεται παράλληλη μηχανική (concurrent engineering).



Σχήμα 3-1. Κύκλος ανάπτυξης και στάδια επεξεργασίας

3.1.2 Εργαλεία CAD για τη σχεδιομελέτη και προσομοίωση

Τα εργαλεία CAD που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ανάπτυξης και παραγωγής μιας κατασκευής κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Εργαλεία σύλληψης της κατασκευής: σχεδιασμός και αντίστροφη σχεδίαση. Ονομάζονται και συστήματα CAID (Computer Aided Industrial Design) ή CAS (Computer Aided Styling). Εφαρμόζονται κυρίως για σχεδίαση, μοντελοποίηση και προσομοίωση χωρίς να ενδιαφέρει το χρήστη η ακρίβεια του δημιουργούμενου μοντέλου και χωρίς να υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για κάθετες εφαρμογές.
- Εργαλεία για σχεδίαση, μοντελοποίηση με απόδοση της ακριβούς μορφής των αντικειμένων, δημιουργίας συναρμολογήσεων και προσομοίωσης. Αποτελούν και τον κύριο κορμό των συστημάτων σχεδιομελέτης και είναι τα συστήματα CAD. Η έμφαση στα συστήματα αυτά, είναι στην ακρίβεια και στην πληρότητα του μοντέλου, γιατί αυτό θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια σε όλες τις κάθετες εφαρμογές.
- Εργαλεία για ανάλυση συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας: είναι συστήματα μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis - CAE).
- Εργαλεία για μελέτη και προσομοίωση παραγωγής. Οι κατεργασίες για την παραγωγή του προϊόντος προγραμματίζονται με τα συστήματα σχεδιασμού κατεργασιών με χρήση υπολογιστή – CAPP και ο προγραμματισμός των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησής με τα συστήματα παραγωγής με χρήση υπολογιστή – CAM.
- Εργαλεία για ειδικές εφαρμογές, όπως μελέτη ανοχών, επικοινωνίας με άλλα συστήματα σχεδιασμού κλπ.
- Εργαλεία δημιουργίας πλασματικού πρωτοτύπου και της πλασματικής παραγωγής που συνδυάζουν τα συστήματα σχεδιομελέτης και παραγωγής με τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας. Κάνουν χρήση ειδικού εξοπλισμού και λογισμικού και χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το πρωτότυπο ή την παραγωγή και τη συναρμολόγηση της κατασκευής.

3.1.3 Μοντελοποίηση – Σχεδίαση – Προσομοίωση

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως στη λεπτομερή μελέτη του προϊόντος, που περιλαμβάνει τη δημιουργία της τελικής μορφής της κατασκευής σε ψηφιακή μορφή, τη συναρμολόγηση της και την κινηματική ανάλυση. Στο στάδιο αυτό απαιτείται να έχουμε ακριβή και έγκυρη μοντελοποίηση. Η έμφαση εδώ είναι στην ακρίβεια των υπολογισμών και σε θέματα όπως ανοχές, πάχος τοιχωμάτων, γωνίες κλίσης, αποστάσεις ασφαλείας κλπ. Η γεωμετρία πρέπει να είναι κλειστή και η απεικόνιση να είναι με στερεά και όχι με επιφάνειες, με δυνατότητα δημιουργίας συναρμολόγησης, απόδοσης της κίνησης, καλά γραφικά και σύνδεση με κάθετες εφαρμογές. Αποτελούν την πλειοψηφία των εμπορικών εφαρμογών και στον τομέα αυτό υπάρχουν τα περισσότερα συστήματα (Catia και Solidworks (DASSAULT), Pro Engineer (PTC), Inventor (Autodesk) κ.α.).

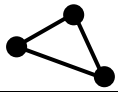
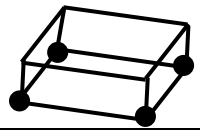
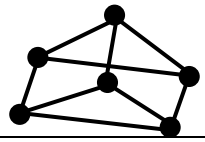
Το κάθε εξάρτημα της κατασκευής σχεδιάζεται ανεξάρτητα. Η σχεδίαση αυτή μπορεί να είναι εξ' αρχής, να προέρχεται από αναθεώρηση παλαιών μοντέλων τα οποία τροποποιούνται για να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις ή μπορεί να προέρχεται από το στάδιο του βιομηχανικού σχεδιασμού ή της αντίστροφης μηχανικής. Στη συνέχεια, ορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων. Οι σχέσεις αυτές μπορεί να είναι μεταξύ των διαστάσεων, των σχετικών θέσεων, των συνδέσμων κλπ. Τα περισσότερα συστήματα είναι παραμετρικά και έτσι ο ορισμός των σχέσεων αυτών είναι αρκετά εύκολος. Στη συνέχεια δημιουργείται η συναρμολόγηση των υποσυστημάτων και της τελικής κατασκευής.

3.1.4 Ανάλυση

Η ανάλυση γίνεται με ειδικά προγράμματα ανάλυσης που βασίζονται στα πεπερασμένα στοιχεία και αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής. Πρόκειται για ειδικευμένα προγράμματα βελτιστοποίησης ανάλογα με το υλικό και το είδος της εφαρμογής (ροή, θερμότητα, αντοχή, έγχυση κλπ.). Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να διαχειριστούμε κάθε μορφής γεωμετρία του αντικειμένου, όλα τα υλικά από τα οποία μπορεί να αποτελείται, όλες τις οριακές συνθήκες φόρτισης στις οποίες υπόκειται. Στα προβλήματα στα οποία δεν υφίστανται αναλυτικές εξισώσεις επίλυσης μπορεί να εφαρμοστεί η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, που επιτυγχάνει μια προσεγγιστική λύση, επιλύοντας γνωστές εξισώσεις στα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία έχουμε διαιρέσει το αντικείμενο και στη συνέχεια συνθέτει τις επιμέρους λύσεις για να επιλύσει το οριακό πρόβλημα.

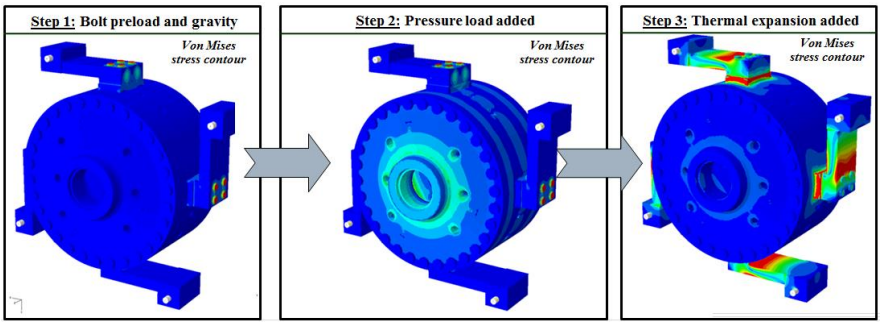
Στη λειτουργία του συστήματος, μια βασική επιλογή που κάνει κάθε χρήστης είναι η επιλογή του είδους των στοιχείων που θα χρησιμοποιήσει για να ενώσει τους κόμβους που θα ορίσει το μοντέλο (Πίνακας 3-1). Ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει διάφορα στοιχεία για την επίλυση του προβλήματος. Για καθεμιά κατηγορία, μπορούν να υπάρξουν πολλές παραλλαγές ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων που απαιτούνται για τον ορισμό τους.

Πίνακας 3-1. Η γεωμετρία των βασικών στοιχείων

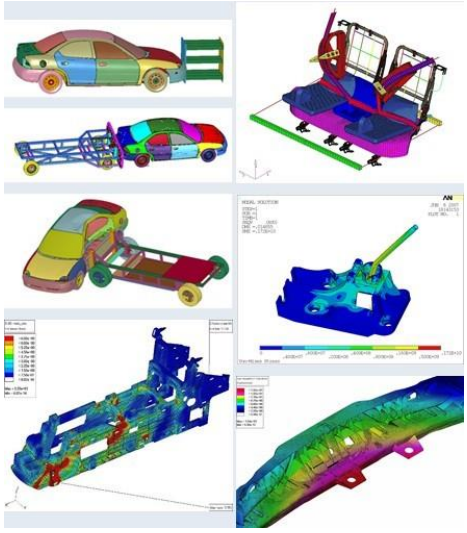
Διάσταση	Είδος στοιχείου	Γεωμετρία
Σημείο	Μάζα	
Γραμμή	Ελατήριο, Δέσμη, ράβδος, διάκενο	
Επιφάνεια	Ομογενής 2Δ, αξονοσυμμετρικό, επίπεδο κέλυφος	
Καμπύλη επιφάνεια	Κέλυφος	
Όγκος	Ομοιογενής 3Δ	

Συνήθως κάθε σύστημα μοντελοποίησης διαθέτει έναν τελικό επεξεργαστή (post processor) που χωρίζει το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία. Το μοντέλο αυτό τροφοδοτείται από το σύστημα ανάλυσης που διαθέτει έναν προ επεξεργαστή (pre processor) για να διαβάζει το μοντέλο. Η προ επεξεργασία που ορίζεται από το χρήστη, περιλαμβάνει:

- Τον τύπο της ανάλυσης (στατική, δυναμική ανάλυση κατασκευών, ταλαντώσεις, ανάλυση κάμψης, θερμικής ανάλυση κλπ.)
- Επιλογή του είδους του υλικού με τις ιδιότητές του. Η επιλογή αυτή γίνεται μετά τη δημιουργία των στοιχείων. Σε κάθε ένα από τα στοιχεία προσδιορίζονται οι ιδιότητες του υλικού και οι οριακές συνθήκες, ενώ μπορούν να αναλυθούν και αντικείμενα που αποτελούνται από διάφορα υλικά. Οι ιδιότητες αυτές είναι συνήθως το μέτρο Young και ο λόγος Poisson, το όριο διαρροής και γενικά όλες οι μηχανικές ιδιότητες.
- Δημιουργία κόμβων. Στο αντικείμενο ορίζεται μια σειρά σημείων, κόμβοι που όταν συνδεθούν μεταξύ τους θα μας δώσουν στοιχεία.
- Δημιουργία στοιχείων από τη σύνδεση των κόμβων. Εδώ, βασική απαίτηση είναι να μην υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των στοιχείων και να είναι μόνον εφαπτόμενα. Το σύνολο των κόμβων με τα στοιχεία αποτελούν το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν επαφίεται στην κρίση του μηχανικού. Ο γενικός κανόνας είναι ότι όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα της ανάλυσης αλλά και τόσο πιο χρονοβόρα η επίλυση και αυξημένη η υπολογιστική ισχύς.
- Εφαρμογή των οριακών συνθηκών και των φορτίων. Το φορτίο μπορεί να είναι σημειακό (δύναμη, ροπή κ.α.) ή κατανεμημένο (κατανεμημένη δύναμη, ροπή, ροή θερμότητας κ.α.)



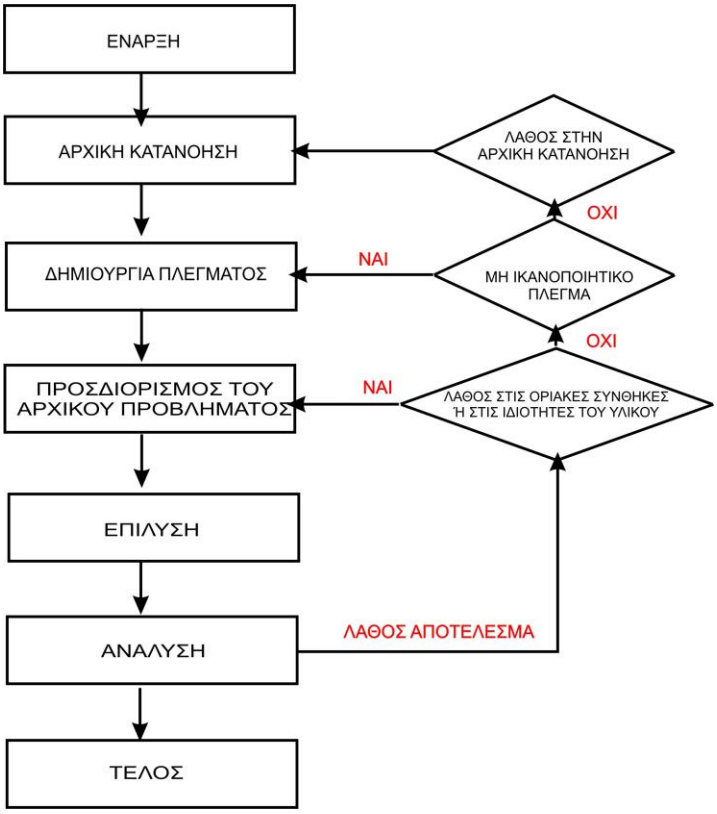
Σχήμα 3-2. Παράδειγμα θερμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 3-3. Engineering analysis με σύστημα CAE.

Η όλη διαδικασία που ακολουθεί ο μηχανικός στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελείται από τα παρακάτω στάδια:

1. Αρχική κατανόηση. Έχει κατανοήσει το σχήμα του αντικειμένου, το πρόβλημα, τη συμπεριφορά του στις φορτίσεις, τα φορτία που ασκούνται. Ακόμα θα πρέπει να συλλέξει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και ανάλογα με τις απαιτήσεις να επιλέξει το κατάλληλο.
2. Δημιουργία πλέγματος. Στο στάδιο αυτό, ο μηχανικός πρέπει να αποφασίσει για τον αριθμό των κόμβων και των στοιχείων, να διακρίνει τις ζώνες που θα παρουσιάσουν απότομες αλλαγές στη ζητούμενη παράμετρο και άρα που απαιτούν πυκνότερο πλέγμα.
3. Προσδιορισμός του αριθμητικού προβλήματος. Οι φορτίσεις και οι οριακές συνθήκες που έχει κατανοήσει ο μηχανικός στο πρώτο στάδιο πρέπει να κωδικοποιηθούν σε αυτό το στάδιο. Το μέγεθος και η θέση κάθε φόρτισης ή συνθήκης θα πρέπει να αποδοθούν σε κόμβους. Ο pre processor, παράγει συνήθως εκτός από τους κόμβους, τα στοιχεία και τις ιδιότητες των υλικών, τις οριακές συνθήκες, τα φορτία και δημιουργεί και το αντίστοιχο αρχείο.
4. Επίλυση. Το αρχείο του πλέγματος εισάγεται αυτόματα στον κώδικα ανάλυσης FEA για την επίλυση. Ο κώδικας δημιουργεί τους πίνακες των στοιχείων, υπολογίζει τις τιμές στους κόμβους και καταχωρεί τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα είναι κυρίως σε αριθμητική μορφή και συνίσταται από τις τιμές της ζητούμενης παραμέτρου σε όλους τους κόμβους του πλέγματος και τα παράγωγά της (πχ. μετατόπιση κόμβων και τάσεις στα στοιχεία, θερμοκρασία κόμβου και ροή θερμότητας στο στοιχείο).
5. Ανάλυση. Τα αποτελέσματα επεξεργάζονται από τον τελικό επεξεργαστή και παρουσιάζονται σε γραφική μορφή. Η επεξεργασία είναι αυτόματη και δεν απαιτεί παρεμβολή του χρήστη. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να οδηγήσουν σε αναθεώρηση τόσο του αριθμητικού προβλήματος, όσο και του πλέγματος σε περίπτωση που οι υποθέσεις δεν είναι σωστές, ή ακόμα και σε αλλαγή στη διαστασιολόγηση ή τη μορφή του αντικειμένου προς ανάλυση.



Σχήμα 3-4. Στάδια διαδικασίας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

3.1.5 Εργαλεία CAM για την παραγωγή

Αποτελούν τη δεύτερη μεγάλη ομάδα εφαρμογών και τα προγράμματα αυτά συνήθως παρέχονται από τον προμηθευτή των συστημάτων CAD και μαζί αποτελούν τις εφαρμογές CAD/CAM. Η επικοινωνία μεταξύ ενός συστήματος CAD και ενός CAM είναι άμεση και δεν απαιτεί κάποιου είδους μετάφραση ή επεξεργασία.

Η μελέτη και ο προγραμματισμός των κατεργασιών είναι ένα πολύ σημαντικό στάδιο, στο οποίο αποφασίζεται σε σημαντικό βαθμό και η χρονική απόδοση της κατεργασίας. Αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ της μελέτης του αντικειμένου και της παραγωγής του. Βασίζεται στις προδιαγραφές του αντικειμένου, μορφή, χαρακτηριστικά, διαστάσεις, ανοχές, τελική επιφάνεια και υλικό για να δημιουργήσει κατάλληλη ακολουθία κατεργασιών στις αντίστοιχες μηχανές. Η ακολουθία αυτή περιλαμβάνει την προετοιμασία της μηχανής, της πρώτης ύλης (material stock), το σχεδιασμό των οδηγών και των σφικτήρων, τις συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση), τα εργαλεία κοπής και τα στάδια συναρμολόγησης. Όλα αυτά προσδιορίζουν το χρόνο και το κόστος της κοπής.

Στις κατεργασίες κοπής διακρίνουμε δύο κατηγορίες κατεργασιών. Την εκχόνδριση (roughing) και την αποπεράτωση (finishing). Στην εκχόνδριση μας ενδιαφέρει η γρήγορη αποβολή του υλικού ώστε να προσεγγιστούν οι διαστάσεις της τελικής επιφάνειας, ενώ στην αποπεράτωση, η ακριβής απόδοση της γεωμετρίας και των ανοχών. Από την κατηγορία της κατεργασίας αλλά και από τη φύση αυτής (φρεζάρισμα προσώπου, εσωτερικό / εξωτερικό προφίλ, 3d επιφάνεια), εξαρτάται και η δημιουργία των συνθηκών κοπής (εργαλείο, ταχύτητες κλπ.).

3.2 Σχεδιασμός, μελέτη και κατασκευή στο λογισμικό Solidworks

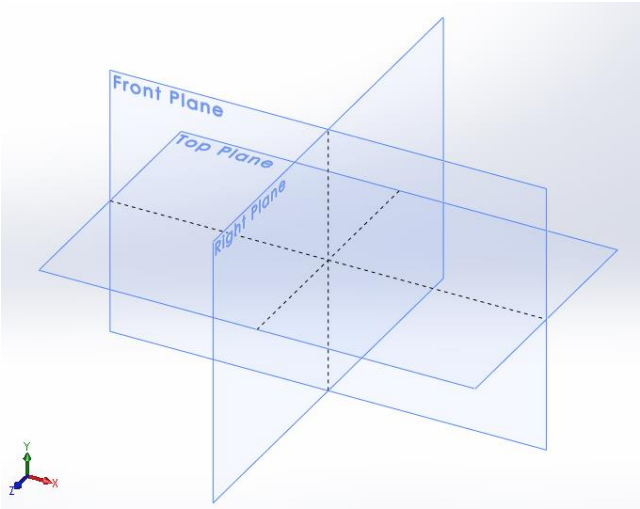
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πακέτων σχεδιομελέτης και ανάλυσης αποτελεί το λογισμικό Solidworks. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο παραμετρικό πακέτο τριδιάστατου σχεδιασμού που χρησιμοποιείται κυρίως από μηχανικούς και βιομηχανικούς σχεδιαστές. Στην ενότητα αυτή, γίνεται λόγος για την τρισδιάστατη σχεδίαση στο λογισμικό αυτό, την στατική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και τέλος την διαδικασία διαμόρφωσης του προγράμματος για τη δημιουργία του πραγματικού εξαρτήματος μέσα από το λογισμικό Solidworks.

3.2.1 Τριδιάστατος σχεδιασμός Solidworks: διαμόρφωση εξαρτήματος (part) και συναρμολόγηση σε assembly.

Για την κατανόηση και την εκτέλεση ενός τριδιάστατου σχεδιασμού, αρκεί πρώτα να αναλυθούν τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν τη διαδικασία αυτή. Τα βασικά στοιχεία λοιπόν είναι το επίπεδο (plane), το σχέδιο (sketch) και τα χαρακτηριστικά (features).

Τα sketch μπορούν να είναι είτε διδιάστατα είτε τρισδιάστατα. Η πιο διαδεδομένη διαδικασία είναι να χρησιμοποιούνται σχέδια δύο διαστάσεων. Αμέσως μόλις ο χρήστης επιλέξει τη δημιουργία sketch, θα πρέπει να ορίσει plane πάνω στο οποίο θα το διαμορφώσει. Αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντικό μιας και ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει τον προσανατολισμό του κάθε στοιχείου του εξαρτήματός του έχοντας στο μυαλό του εξαρχής την τελική μορφή του. Τα planes είναι τα τρία βασικά επίπεδα που ορίζονται από το σύστημα αξόνων x,y,z και ονομάζονται front, right, top (Σχήμα 3-5).

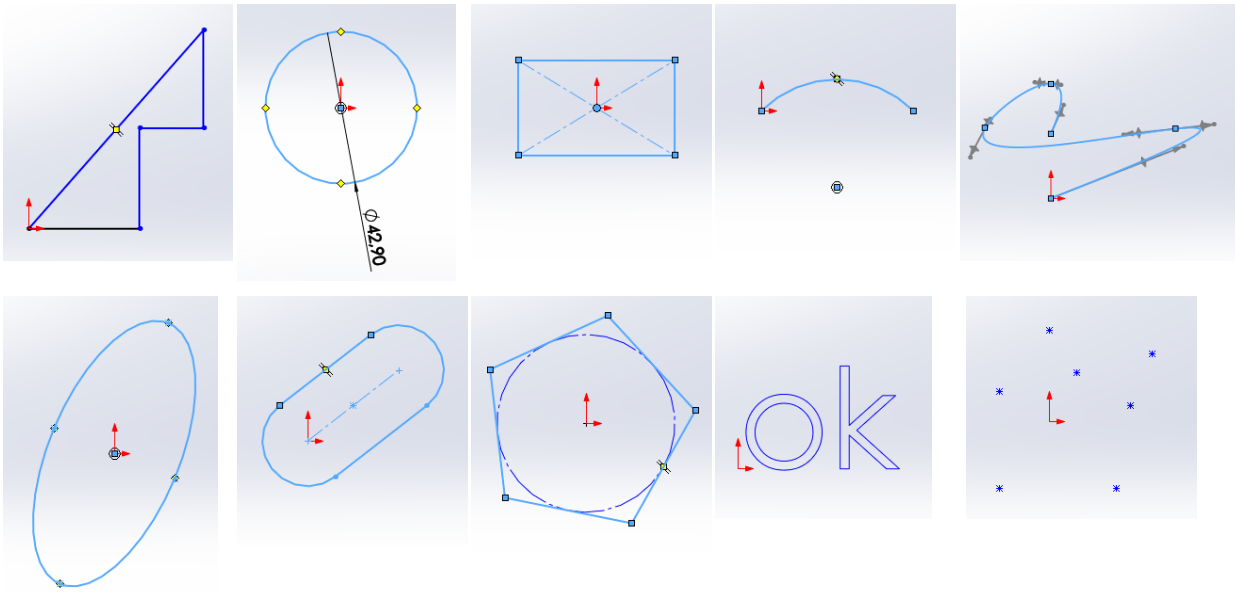
Αμέσως μετά τον ορισμό του plane, ακολουθεί ο σχεδιασμός του sketch στο plane που επιλέχθηκε. Τα βασικά sketch είναι: η γραμμή (line), ο κύκλος (circle), το ορθογώνιο (rectangle), το τόξο (3 point arc), η έλλειψη (ellipse), η Spline, το slot, το πολύγωνο (polygon), το σχέδιο κειμένου όπου ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει σε sketch ένα κείμενο, το σημείο (point) και το plane όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει ένα επίπεδο σε ένα τριδιάστατο στοιχείο.



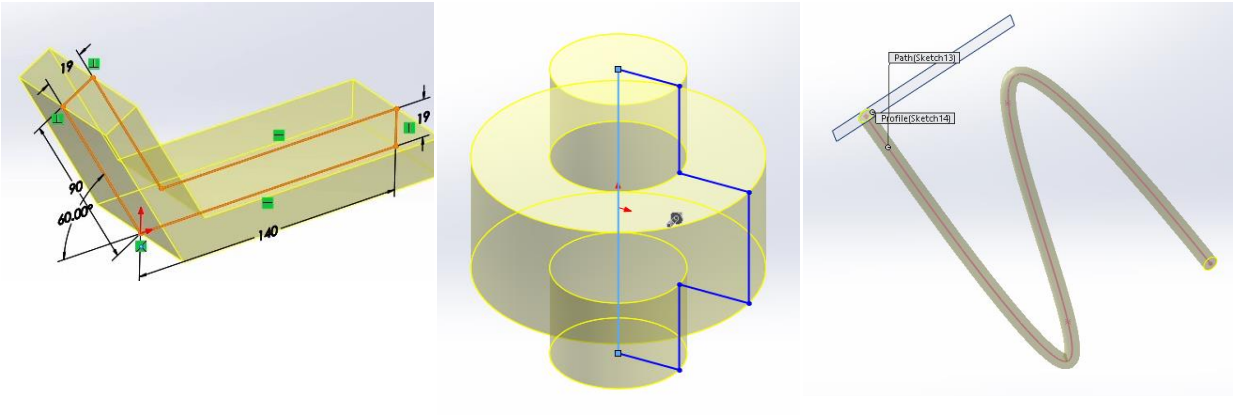
Σχήμα 3-5. Επίπεδα / Planes.

Στη συνέχεια θα πρέπει ο χρήστης να δώσει μορφή στο διδιάστατο σχέδιο. Αυτό γίνεται με χρήση των χαρακτηριστικών (features). Αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον αν το σχέδιο επιθυμείται να μετατραπεί σε εξέχοντα όγκο (boss / base features) ή αν το σχέδιο βρίσκεται ήδη πάνω σε όγκο και επιθυμείται να τον τμήσει κατά το διαμορφωμένο σχέδιο (cut features). Τα βασικά features είναι extruded, revolved, swept, lofted, boundary.

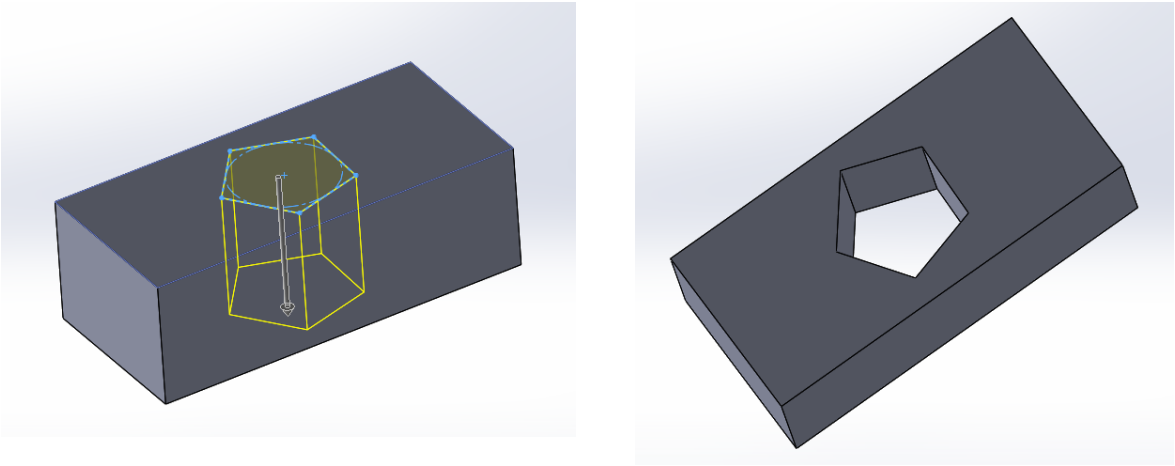
Ακόμα ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό του Solidworks είναι η δημιουργία συναρμολογήσεων (assembly). Στο assembly, εισάγονται διαφορετικά εξαρτήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις (mates), για να προκύψει η συναρμολογημένη δομή. Άρα εδώ, το βασικό χαρακτηριστικό είναι οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων, τα mates. Για να μπορέσει να λειτουργήσει η σχέση, θα πρέπει να στοιχεία να είναι σχεδιασμένα με ακρίβεια. Για παράδειγμα, αν επιθυμείται να εισαχθεί ένας κύλινδρος μέσα σε μια οπή ενός εξαρτήματος (concentric mate), θα πρέπει ο κύλινδρος και η οπή να έχουν την ίδια διάμετρο. Οι βασικές σχέσεις είναι: coincident, parallel, perpendicular, tangent, concentric, distance, angle. Υπάρχουν όμως και μηχανικές σχέσεις που δίνουν αρκετά μεγάλη ευελιξία τη συναρμολόγηση όπως cam, slot, hinge, gear, rack pinion, screw, universal joint (Σχήμα 3-10).



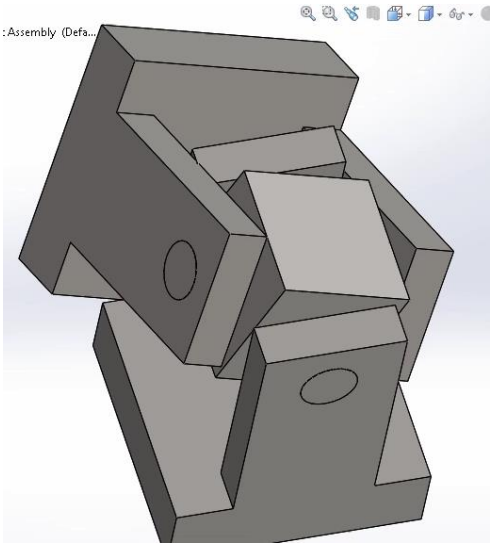
Σχήμα 3-6. Τα βασικά sketch.



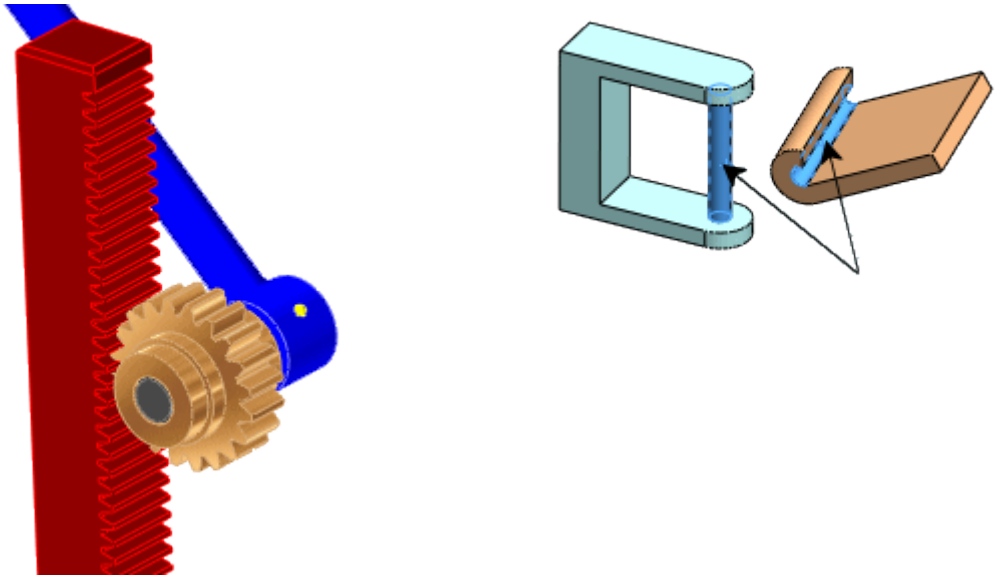
Σχήμα 3-7. Boss / Base Features: extruded, revolved και swept με τα αντίστοιχα sketch τους.



Σχήμα 3-8. Extruded cut feature σε υπάρχοντα όγκο και το αντίστοιχο sketch του.



Σχήμα 3-9. Παράδειγμα συναρμολογήματος από 3 parts με βασικά mates.

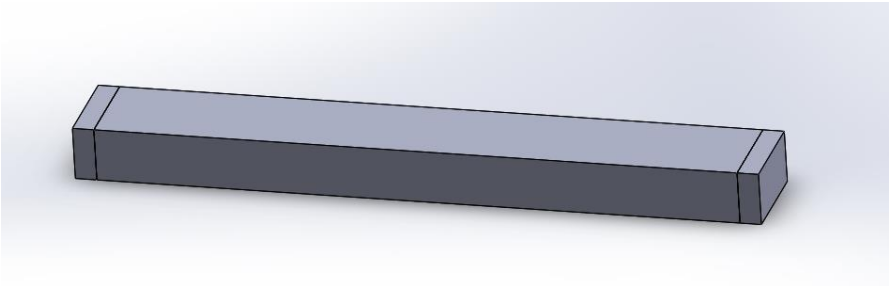


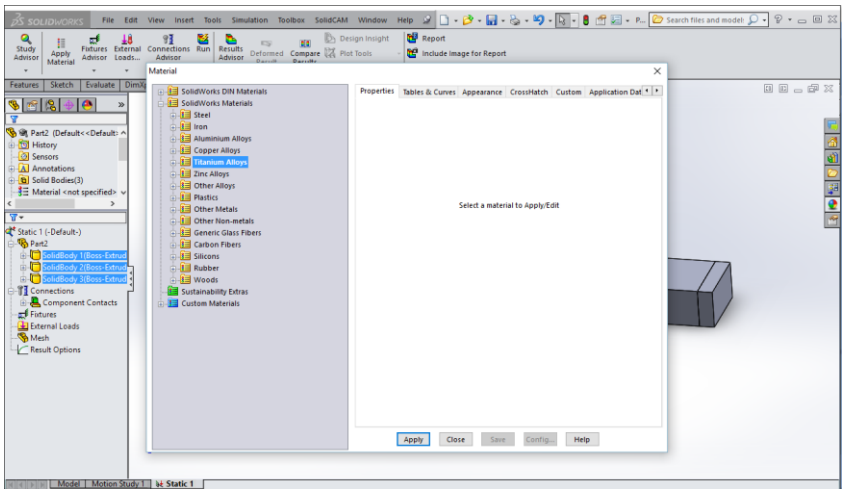
Σχήμα 3-10. Παράδειγμα συναρμολογήματος με χρήση mechanical mates (rack pinion & hinge mate).

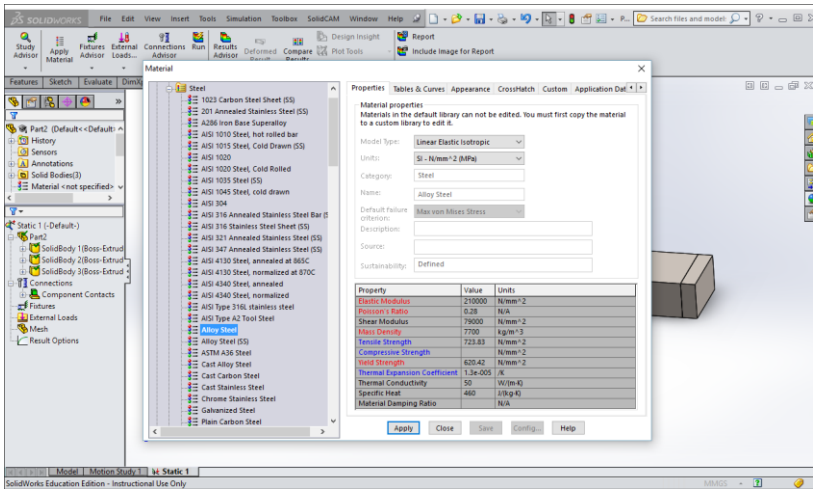
3.3 Στατική ανάλυση και προσομοίωση στο λογισμικό Solidworks

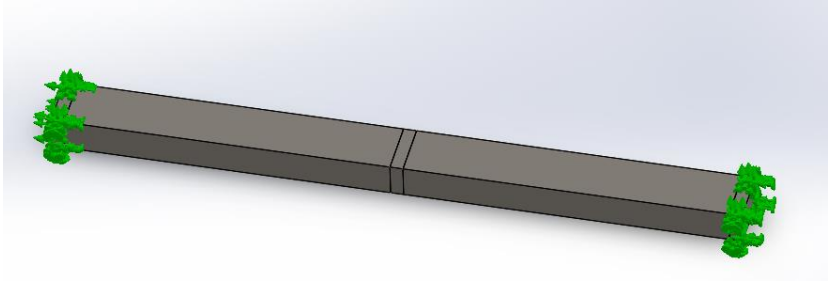
Το λογισμικό Solidworks έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί προσομοιώσεις (simulations) των εξής κατηγοριών (studies analysis):static, thermal, frequency, drop test, fatigue, pressure vessel design, sub modeling, nonlinear, linear design. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η στατική ανάλυση (static analysis) και η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω (Σχήμα 3-11).

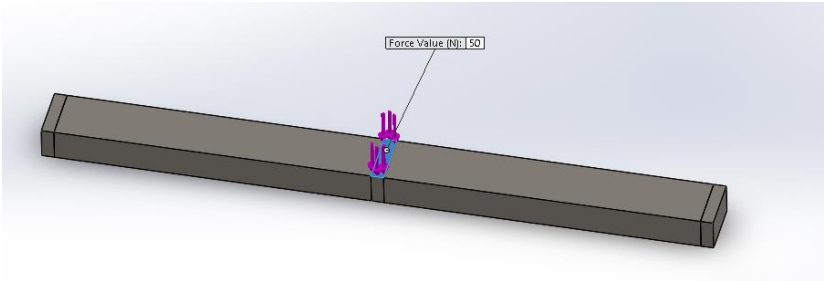
1. Ορισμός υλικού του κάθε εξαρτήματος. Το λογισμικό παρέχει μια ευρεία γκάμα υλικών από μέταλλα, πλαστικά κ.α. στη βιβλιοθήκη του. Ακόμα όμως μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει το δικό του υλικό αν γνωρίζει τις μηχανικές ιδιότητές του.
2. Δημιουργία connections. Εδώ ο χρήστης ορίζει τον τύπο με τον οποίο δύο εξαρτήματα (components) είναι συνδεδεμένα: component contact (ορίζει την μεταξύ τους τριβή ή ανοχή), spring, pin, bolt, bearing, spot welds, rigid connection.
3. Δημιουργία fixtures. Εδώ ο χρήστης ορίζει τις επιφάνειες εκείνες που έχουν κάποια σύνδεση όπως πάκτωση, κύλιση (fixed, roller / slider, hinge).
4. Ορισμός εξωτερικών φορτίων. Εδώ δημιουργούνται τα φορτία τα οποία μπορεί να είναι: force, torque, pressure, gravity, centrifugal, bearing load, temperature, remote load, distributed mass.
5. Δημιουργία πλέγματος (create mesh). Αυτό το στάδιο είναι το στάδιο όπου δημιουργείται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων αυτόματα από το λογισμικό. Εδώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μόνος του το πλέγμα ή να ορίσει την πυκνότητα του αυτόματα από το λογισμικό.
6. Προσομοίωση (run mesh). Εδώ γίνεται η τελική προσομοίωση σύμφωνα με τις παραμέτρους που ορίστηκαν και ο χρήστης παίρνει σαν έξοδο τα εξής διαγράμματα (plots): stress, displacement, strain και FoS.

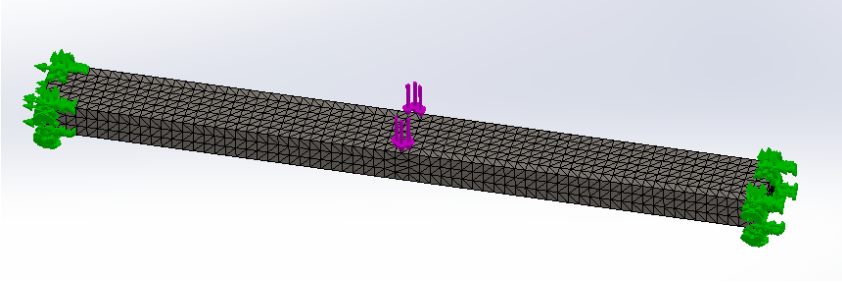


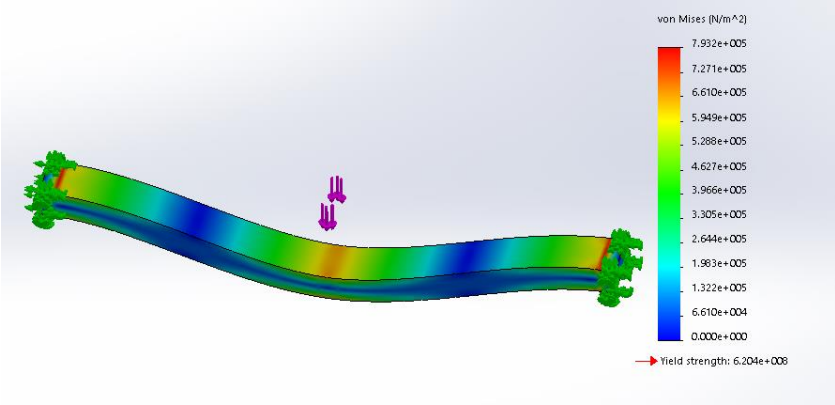

Material
SolidWorks DIN Materials
SolidWorks Materials
Steel
Iron
Aluminium Alloys
Copper Alloys
Titanium Alloys
Zinc Alloys
Other Alloys
Plastics
Other Metals
Other Non-metals
Generic Glass Fibers
Carbon Fibers
Silicons
Rubber
Woods
Sustainability Extras
Custom Materials
Properties
Tables & Curves
Appearance
CrossHatch
Custom
Select a material to Apply/Edit
Apply
Close
Save
Help

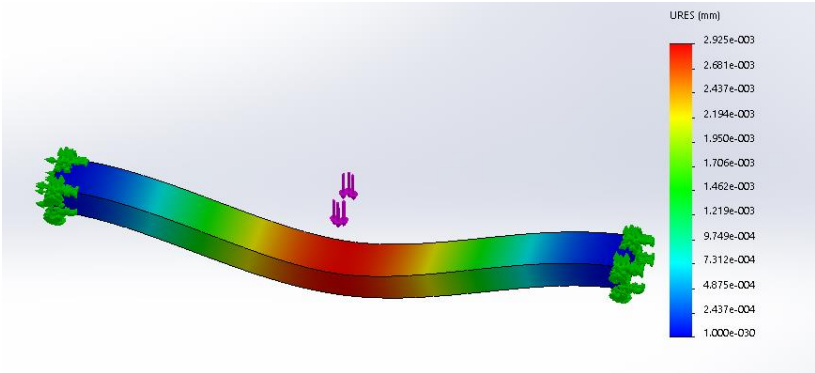

Material
Steel
1023 Carbon Steel Sheet (SS)
201 Annealed Stainless Steel (SS)
A286 Iron Base Superalloy
AISI 1010 Steel, hot rolled bar
AISI 1015 Steel, Cold Drawn (SS)
AISI 1020
AISI 1020 Steel, Cold Rolled
AISI 1035 Steel (SS)
AISI 1045 Steel, cold drawn
AISI 304
AISI 316 Annealed Stainless Steel Bar
AISI 316 Stainless Steel Sheet (SS)
AISI 321 Annealed Stainless Steel (SS)
AISI 347 Annealed Stainless Steel (SS)
AISI 4130 Steel, annealed at 865C
AISI 4130 Steel, normalized at 870C
AISI 4340 Steel, annealed
AISI 4340 Steel, normalized
AISI Type 316L stainless steel
AISI Type A2 Tool Steel
Alloy Steel
Alloy Steel (SS)
ASTM A36 Steel
Cast Alloy Steel
Cast Carbon Steel
Cast Stainless Steel
Chrome Stainless Steel
Galvanized Steel
Plain Carbon Steel
Properties
Tables & Curves
Appearance
CrossHatch
Custom
Material properties
Materials in the default library can not be edited. You must first copy the material to a custom library to edit it.
Model Type: Linear Elastic Isotropic
Units: SI - N/mm^2 (MPa)
Category: Steel
Name: Alloy Steel
Default failure criterion: Max von Mises Stress
Description:
Source:
Sustainability: Defined
Property | Value | Units
Elastic Modulus | 210000 | N/mm^2
Poisson's Ratio | 0.28 | N/A
Shear Modulus | 79000 | N/mm^2
Mass Density | 7700 | kg/m^3
Tensile Strength | 723.83 | N/mm^2
Compressive Strength | | N/mm^2
Yield Strength | 620.42 | N/mm^2
Thermal Expansion Coefficient | 1.3e-005 | /K
Thermal Conductivity | 50 | W/(m·K)
Specific Heat | 460 | J/(kg·K)
Material Damping Ratio | | N/A
Apply
Close
Save
Help
SolidWorks Education Edition - Instructional Use Only

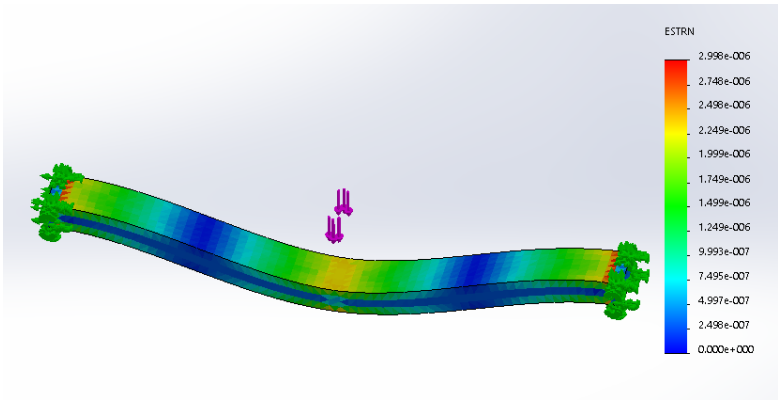


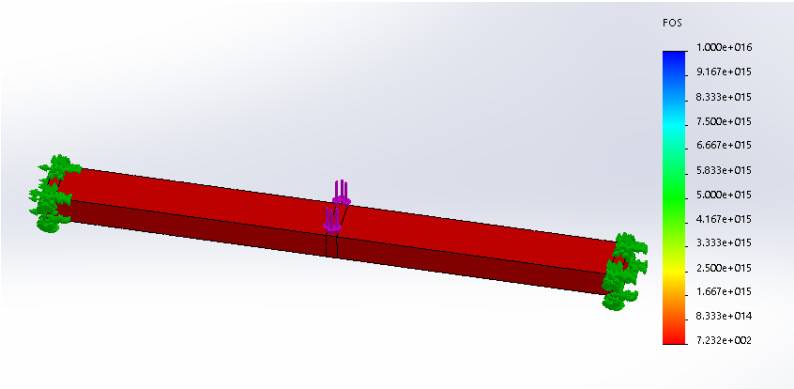

Force Value (N): 50




von Mises (N/m^2)
7.932e+005
7.271e+005
6.610e+005
5.949e+005
5.288e+005
4.627e+005
3.966e+005
3.305e+005
2.644e+005
1.983e+005
1.322e+005
6.610e+004
0.000e+000
Yield strength: 6.204e+008


URES (mm)
2.925e-003
2.681e-003
2.437e-003
2.194e-003
1.950e-003
1.706e-003
1.462e-003
1.219e-003
9.749e-004
7.312e-004
4.875e-004
2.437e-004
1.000e-030


ESTRN
2.998e-006
2.748e-006
2.498e-006
2.249e-006
1.999e-006
1.749e-006
1.499e-006
1.249e-006
9.993e-007
7.495e-007
4.997e-007
2.498e-007
0.000e+000



Σχήμα 3-11. Παράδειγμα στατικής ανάλυσης δοκού που υπόκειται σε κάμψη.

3.4 CAD / CAM στο λογισμικό Solidcam

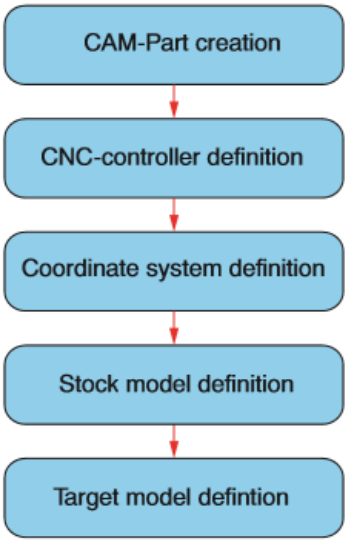
Το Solidcam είναι το CAD / CAM λογισμικό που τρέχει μέσα στο Solidworks για τη δημιουργία του κώδικα (g code) που εισάγεται στην εργαλειομηχανή για την κατασκευή. Υπάρχει η δυνατότητα τόσο για κατεργασίες φρεζαρίσματος όσο και τόρνευσης (milling, turning). Εδώ γίνεται μια αναφορά στις διαδικασίες φρεζαρίσματος.

Το φρεζάρισμα μπορεί να είναι: 2.5d milling ή 3d milling. Στην πρώτη περίπτωση, η κοπή έχει να κάνει με ένα διδιάστατο σχέδιο που κόβεται σε κάποιο βάθος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση πρόκειται για μια τρισδιάστατη επιφάνεια που προκύπτει από το σχέδιο. Η βασική διαδικασία αρχικοποίησης περιγράφεται στο Σχήμα 3-12.

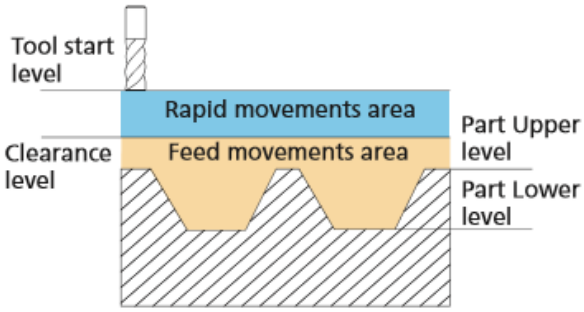
Αφού οριστεί η μορφή του τελικού κομματιού (δηλαδή το σχεδιασμένο στο Solidworks εξάρτημα) και το αρχικό στοκ υλικού από το οποίο θα δημιουργηθεί, δημιουργούνται τα operations για τα στάδια κατεργασίας έτσι ώστε να προκύψει το κάθε feature του εξαρτήματος. Αυτά μπορεί να είναι τα εξής (Σχήμα 3-14):

- face milling operation
- profile operation
- pocket operation
- slot operation
- T slot operation
- drilling operation
- contour 3d operation
- thread milling operation

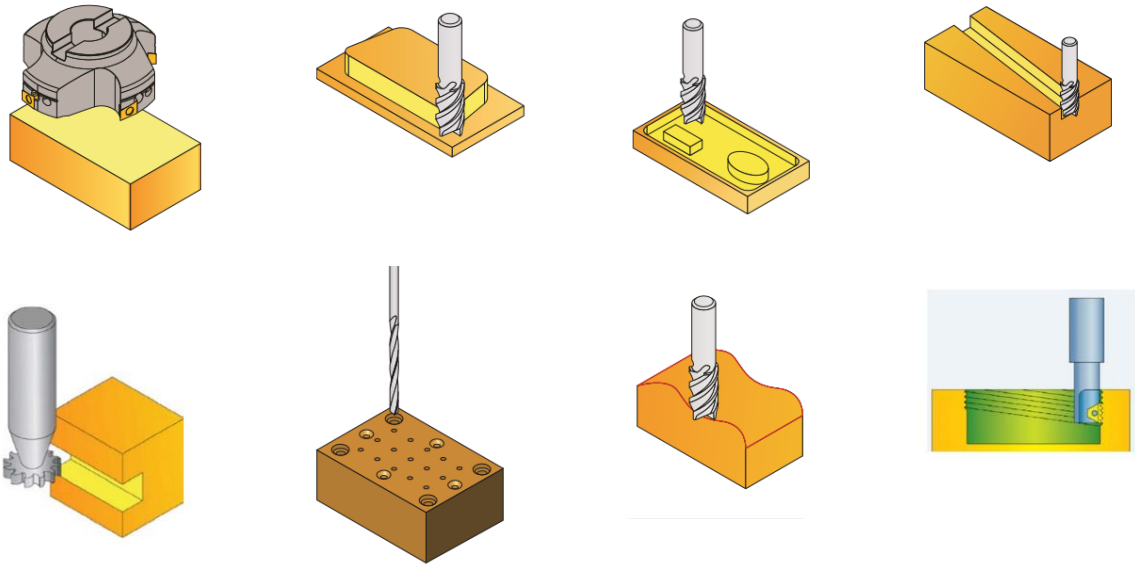
Στην συνέχεια, ορίζονται τα εργαλεία για κάθε operation καθώς και οι συνθήκες κατεργασίας (spindle speed, federate, stepdown κ.α.) στο πεδίο “technology” του αρχείου solidcam. Έτσι, για κάθε operation, διαμορφώνεται ένα toolpath, που θα δημιουργήσει την τελική επιφάνεια.



Σχήμα 3-12. Στάδια αρχικοποίησης του μοντέλου προς κατεργασία.



Σχήμα 3-13. Παράμετροι αρχικοποίησης.



Σχήμα 3-14. Solidcam operations.

4 Μελέτη και σχεδιασμός μηχανισμού στήριξης

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελείται από την αναλυτική περιγραφή του υπάρχοντος εξοπλισμού του εργαστηρίου, τον ορισμό των βασικών προδιαγραφών, την ανάπτυξη εναλλακτικών σχεδιασμών σύμφωνα με τις απαιτήσεις, την επιλογή και κατασκευή της καταλληλότερης εναλλακτικής, τον αναλυτικό σχεδιασμό και τις συνεχείς βελτιώσεις που ακολουθούν. Ακόμα, τη μελέτη στοιχείων και τη διαδικασία κατασκευής των μερών που αποτελούν τον μηχανισμό.

4.2 Περιγραφή κυλιόμενου διαδρόμου

Ο κυλιόμενος διάδρομος που αποτελεί εξοπλισμό του εργαστηρίου, έχει μήκος έξι μέτρα και διαθέτει δύο τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες: ο πρώτος (μοντέλο MS 100L 2-4 της εταιρίας XIUSHI) επενεργεί για την περιστροφή του κύριου τυμπάνου του ιμάντα, άρα ο έλεγχός του αφορά στον έλεγχο της ταχύτητας του διαδρόμου (μέγιστη ταχύτητα 10m/s), ενώ ο δεύτερος (μοντέλο FC80-4 της εταιρίας Electro Adda) επενεργεί για την περιστροφή ατέρμονα κοχλία και άρα την κίνηση ειδικής τροχήλατης βάσης στο κάτω μέρος του διαδρόμου που επιτυγχάνει την ανύψωση του διαδρόμου στην επιθυμητή κλίση (μέγιστη κλίση 20°).

Οι δύο κινητήρες είναι συνδεδεμένοι με μειωτήρες στροφών. Ο διάδρομος διαθέτει επίσης δύο inverters (μοντέλο M200-022 της εταιρίας EMERSON για την οδήγηση του κινητήρα ταχύτητας και μοντέλο SINAMICS G110 της εταιρίας SIEMENS για την οδήγηση του κινητήρα κλίσης) για τη μετατροπή της ενέργειας συνεχούς ρεύματος από το τροφοδοτικό σε εναλλασσόμενο και άρα την οδήγηση των κινητήρων.

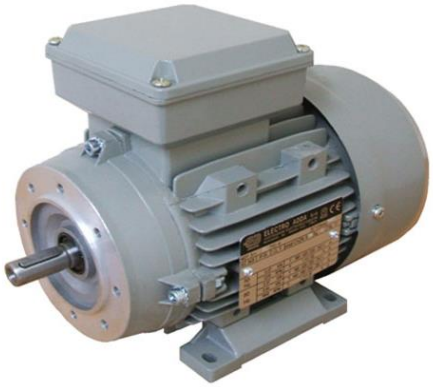
Πίνακας 4-1. Χαρακτηριστικά κινητήρα ταχύτητας διαδρόμου.

MS 100L 2-4	
Ονομαστική Ισχύς [KW]	3.0
Ρεύμα 400V [A]	6.78
Ονομαστικές Στροφές [rpm]	1430
Αριθμός πόλων	4
Συντελεστής Ισχύος (cosφ)	0.82
Συχνότητα Λειτουργίας [Hz]	50

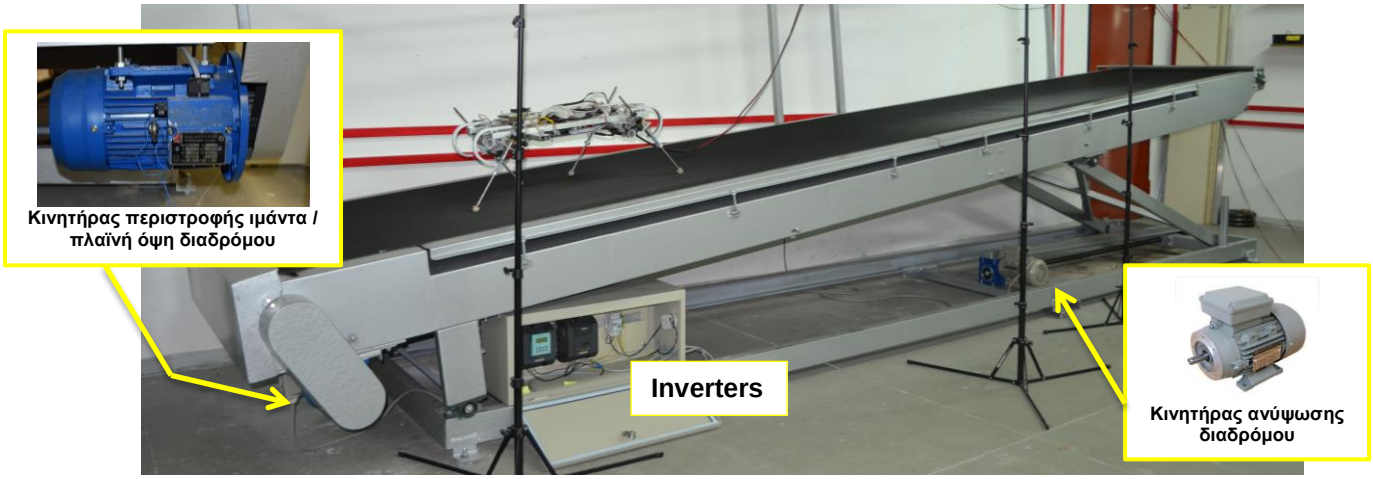
Σχήμα 4-1. Κινητήρας MS 100L 2-4 και inverter M200-022.

Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικά κινητήρα ανύψωσης διαδρόμου.

FC80-4	
Ονομαστική Ισχύς [KW]	1.1
Τύπος σχεδίασης κατά DIN	B14
Ονομαστικές Στροφές [rpm]	1390
Αριθμός πόλων	4
Συντελεστής Ισχύος (cosφ)	0.78
Συχνότητα Λειτουργίας [Hz]	50



Σχήμα 4-2. Κινητήρας FC80-4 και inverter SINAMIS G110.



Σχήμα 4-3. Κυλιόμενος διάδρομος – αρχική κατασκευή.

4.3 Απαιτήσεις, προδιαγραφές και περιορισμοί

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, αναπτύσσονται διαφορετικά ρομπότ καθένα από τα οποία σχεδιάζεται με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Παραδείγματος χάριν, ρομπότ που μιμείται τη μορφολογία του cheetah και εστιάζει σε τρέξιμο σε πολύ υψηλές ταχύτητες ή ρομπότ που στόχο έχει την αποφυγή εμποδίων και το βάδισμα σε δύσβατα εδάφη. Για τις ανάγκες της μελέτης της κίνησης, βασικό στοιχείο είναι η μορφολογία, ο σχεδιασμός και ο έλεγχος του ποδιού, επομένως εκτός από τα τετράποδα ρομπότ, αναπτύσσεται και μονόποδο για τις ανάγκες της μελέτης αυτής. Ως εκ τούτου, τα πειράματα των ρομπότ, μπορεί να διαφέρουν σε απαιτήσεις όπως στους βαθμούς ελευθερίας που πρέπει να επιτρέπονται κατά την κίνησή τους, στην ταχύτητα που βαδίζει ή τρέχει το ρομπότ και τέλος στη μορφή και στην κλίση του εδάφους.

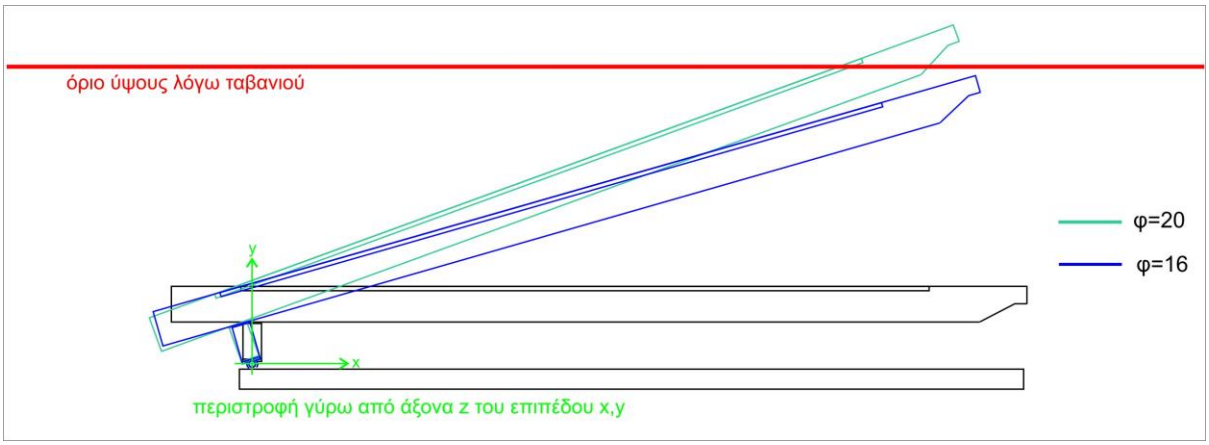
Επομένως, το πρόβλημα που διαμορφώνεται είναι η δημιουργία ενός κοινού μηχανισμού στήριξης που όμως να μεταβάλλεται ανάλογα με το ρομπότ που συγκρατεί και τις απαιτήσεις του πειράματος. Άρα η μεταβλητότητα του πρέπει να αφορά τόσο στο σχήμα του για να προσαρμόζεται σε ρομπότ διαφορετικών μεγεθών όσο και στους βαθμούς ελευθερίας του (mobility μηχανισμού) για να προσαρμόζεται στις ανάγκες του πειράματος.

Τελικά, οι προδιαγραφές που ορίζονται σύμφωνα με το πρόβλημα συνοψίζονται ως εξής:

- Προσαρμοστικότητα (μία κατασκευή – πολλά διαφορετικά ρομπότ).
- Μεταβλητότητα (μια κατασκευή – πολλά διαφορετικά πειράματα).
- Ασφάλεια (προστασία ρομπότ από πτώση και περιορισμός τους στα όρια του ιμάντα).
- Ελαχιστοποίηση μαζών (η συνολική μάζα του μηχανισμού δεν πρέπει να ξεπερνά τη συνολική μάζα των μπαταριών που θα έφερε το ρομπότ αν κινούνταν ελεύθερα).
- Αντοχή (κατάλληλος σχεδιασμός και μελέτη εξαρτημάτων ώστε να αποφευχθεί η αστοχία).

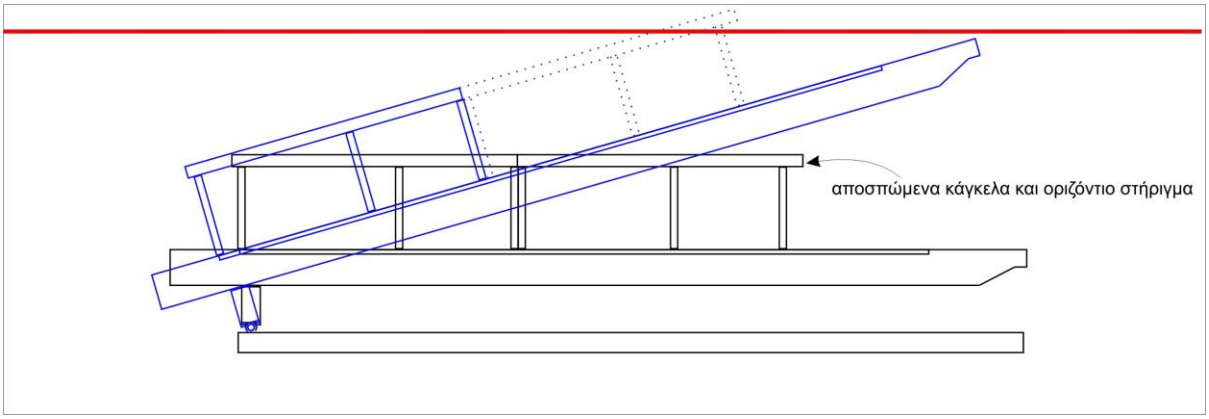
Καθοριστικός παράγων για τον κατάλληλο σχεδιασμό και την τελική επιλογή της λύσης είναι και οι υπάρχοντες περιορισμοί. Αυτοί αφορούν κυρίως το χώρο του εργαστηρίου και συνοψίζονται ως εξής:

- Περιορισμός κατά πλάτος του διαδρόμου (πλευρικά του διαδρόμου και κατά μήκος αυτού).
- Περιορισμός καθ΄ ύψος (η μέγιστη κλίση στην οποία μπορεί να τεθεί ο διάδρομος είναι 16° - Σχήμα 4-4).



Σχήμα 4-4. Περιορισμός καθ΄ ύψος.

Βάσει των περιορισμών αποκλείονται εξ αρχής οι υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν boom arms όπως η λύση της Boston Dynamics (λόγω περιορισμού κατά πλάτος). Ακόμα, λόγω του γεγονότος ότι σε κάποια πειράματα ο διάδρομος απαιτείται να τοποθετηθεί υπό κλίση, η κατασκευή που θα φτιαχτεί θα πρέπει να μπορεί να μεταβάλλεται για την αποφυγή της σύγκρουσης (Σχήμα 4-5).



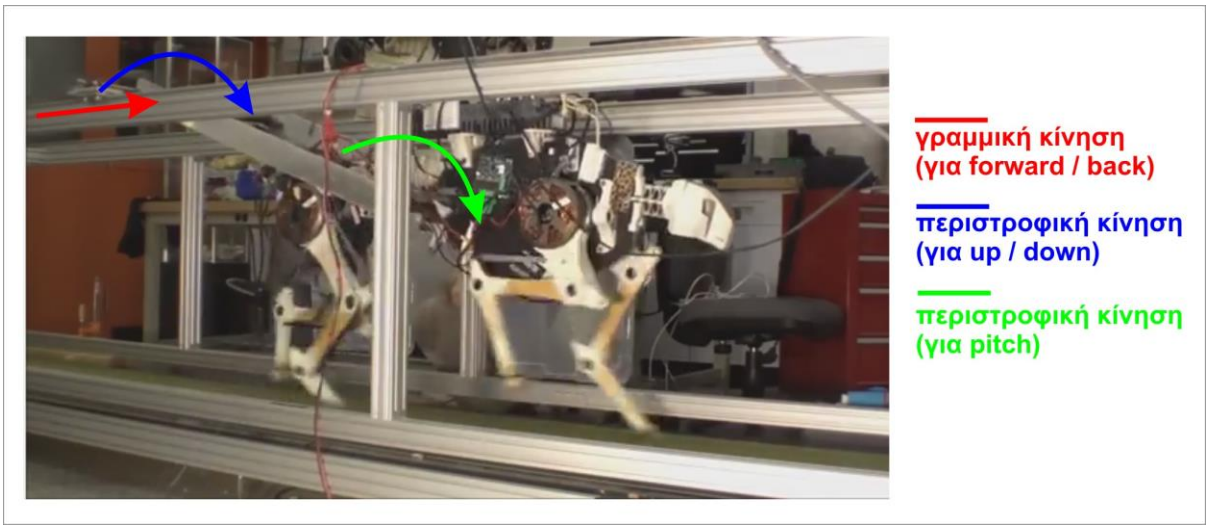
Σχήμα 4-5. Μεταβλητότητα καθ΄ ύψος.

4.4 Πρώτο λειτουργικό σχέδιο / εναλλακτική

Ύστερά από εκτενή μελέτη γύρω από το σχεδιασμό του μηχανισμού και σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουν οριστεί, διαμορφώνεται ένα πρώτο σχέδιο το οποίο περιγράφεται παρακάτω και στη συνέχεια αξιολογείται σε σχέση με τις προδιαγραφές που έχουν οριστεί από την ανάλυση του προβλήματος. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στην γενική ιδέα που χρησιμοποιείται στο Cheetah του MIT (Σχήμα 1-20). Ωστόσο, διαμορφώνεται διαφορετικά στην περίπτωση που οι απαιτήσεις σε βαθμούς ελευθερίας είναι αυξημένες. Πρόκειται για μια κατασκευή που μεταμορφώνεται και αλλάζει μηχανικά μέρη ανάλογα με το πείραμα.

4.4.1 Σχεδιασμός

Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για το Cheetah του MIT, επιτρέπει 3 βαθμούς ελευθερίας (β.ε.) στο ρομπότ. Συγκεκριμένα, οι επιτρεπτές κινήσεις είναι forward / back (f / b), up / down (u / d) και pitch (Σχήμα 4-6). Σύμφωνα με την το κριτήριο Grubler – Kutzbach και την Εξίσωση (2-2) για το mobility, ο μηχανισμός διαθέτει 3 β.ε., εφόσον n=4 και J_1=3.

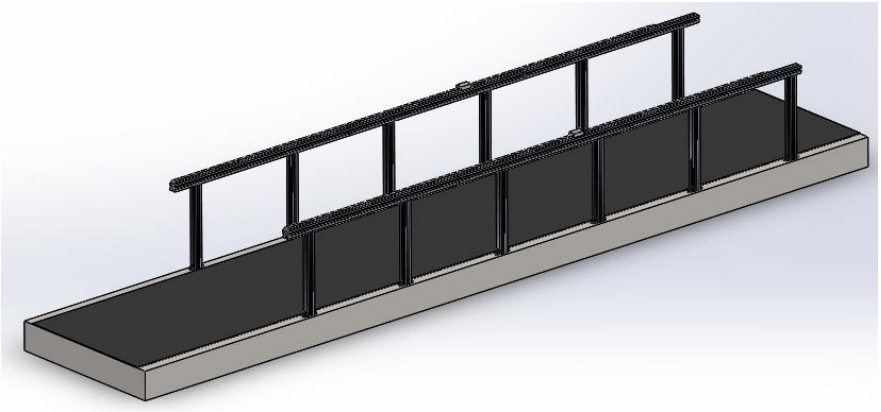


Σχήμα 4-6. Επιτρεπτές κινήσεις σε μηχανισμό στήριξης MIT Cheetah.

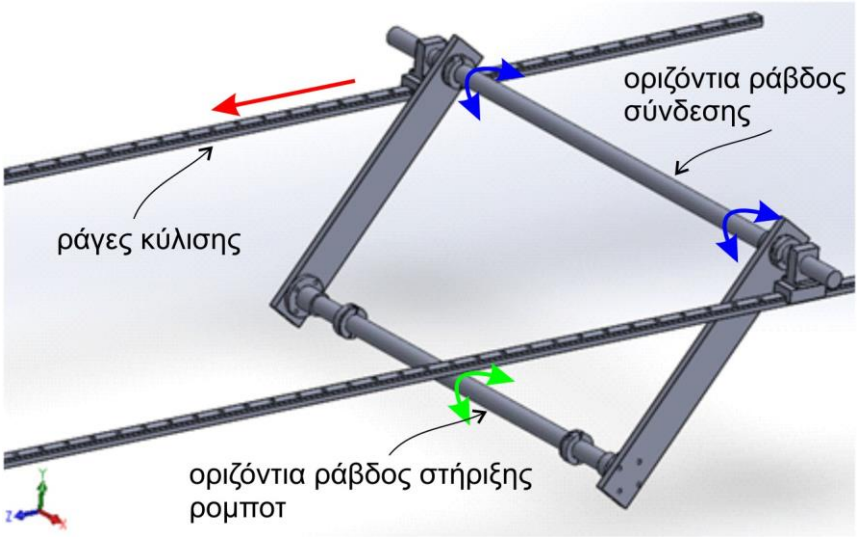
Η ίδια ακριβώς λογική αναπτύσσεται σε αυτό το πρώτο λειτουργικό σχέδιο για την περίπτωση του πειράματος με απαιτήσεις σε αυτούς τους β.ε. Επιλέγεται λοιπόν ως σύστημα επιπεδοποίησης, η τοποθέτηση κάγκελων πλευρικά του διαδρόμου και κατά μήκος αυτού, όπου στηρίζεται ράγα κύλισης για την γραμμική κίνηση f / b (Σχήμα 4-7). Το ρομπότ «κρεμιέται» από μια διάταξη σχήματος «Π», και με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η προστασία του από πτώση αλλά και ο περιορισμός του εντός των ορίων του διαδρόμου. Το ρομπότ έχει τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από την οριζόντια ράβδο που στηρίζεται για την εξασφάλιση του pitch, ενώ όλος ο μηχανισμός μπορεί να περιστραφεί γύρω από την βασική οριζόντια ράβδο που συνδέει τα δύο άκρα. Ο σχεδιασμός διαμορφώνεται όπως στο Σχήμα 4-8.

Για τις απαιτήσεις πειράματος με μεγαλύτερη ευελιξία, και απελευθέρωση τεσσάρων β.ε. (f / b, u /d, pitch, roll), ο σχεδιασμός διαμορφώνεται ως εξής: Ο κύριος σκελετός παραμένει ως έχει, ενώ στη θέση της ράβδου στήριξης του ρομπότ, τοποθετείται αρθρωτό σύστημα με τέσσερις στροφικές αρθρώσεις και δύο πρισματικές για την απελευθέρωση του roll (Σχήμα 4-10). Σε αυτή την περίπτωση για την εξασφάλιση της στήριξης του ρομπότ και την ευθυγράμμισή του, χρησιμοποιείται ακόμα ένα σύστημα σύνδεσης που τοποθετεί σφαιρική άρθρωση στο πάνω μέρος του ρομπότ για τη σύνδεσή του με τον υπόλοιπο μηχανισμό και άρα την προστασία του από πτώση, χωρίς όμως να περιορίζονται οι κινήσεις.

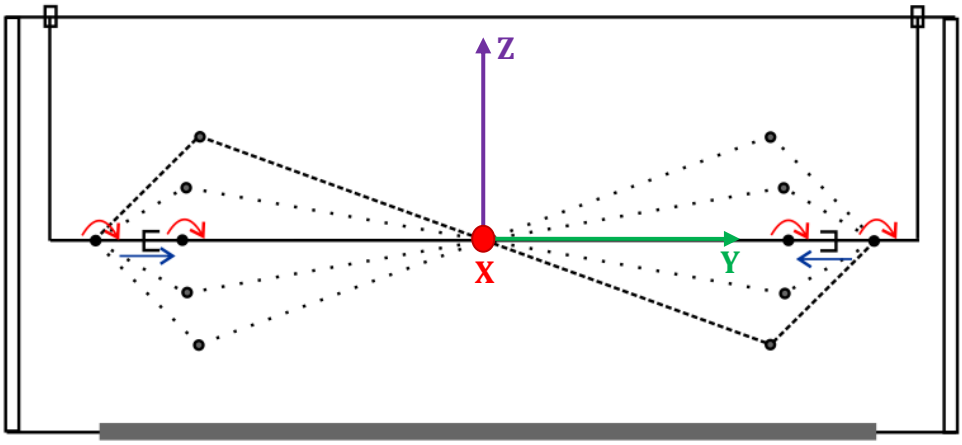
Στην περίπτωση που το ρομπότ επιθυμείται να κινείται χωρίς κανέναν περιορισμό παρά μόνο την εξασφάλιση κίνησής του εντός των ορίων του διαδρόμου και την προστασία του από πτώση, παραμένει μόνον το σύστημα με τη σφαιρική άρθρωση.



Σχήμα 4-7. Κάγκελα πλευρικά του διαδρόμου για τη στήριξη της ράγας κύλισης.

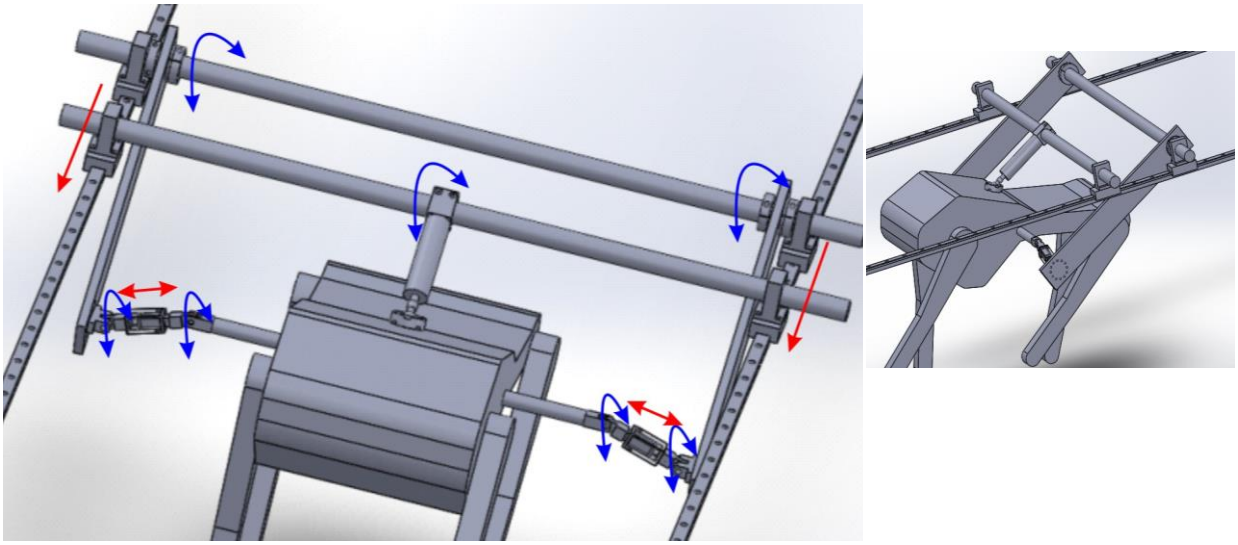


Σχήμα 4-8. Σχεδιασμός όπως διαμορφώνεται για πείραμα τριών β.ε.



Σχήμα 4-9. Σχέδιο σε πρόσοψη για την περιγραφή του αρθρωτού συστήματος. Το ρομπότ στηρίζεται στην κεντρική ράβδο, και η περιστροφή roll (γύρω από άξονα x) δίνεται από τις στροφικές αρθρώσεις. Καθώς το ρομπότ περιστρέφεται κατά roll, στρέφονται αντίστοιχα με παθητικό τρόπο και οι αρθρώσεις.

Σχήμα 4-10. Σχεδιασμός αρθρωτού μηχανισμού με τέσσερις στροφικές και δύο πρισματικές αρθρώσεις.



Σχήμα 4-11. Σχεδιασμός όπως διαμορφώνεται για πείραμα τεσσάρων β.ε.

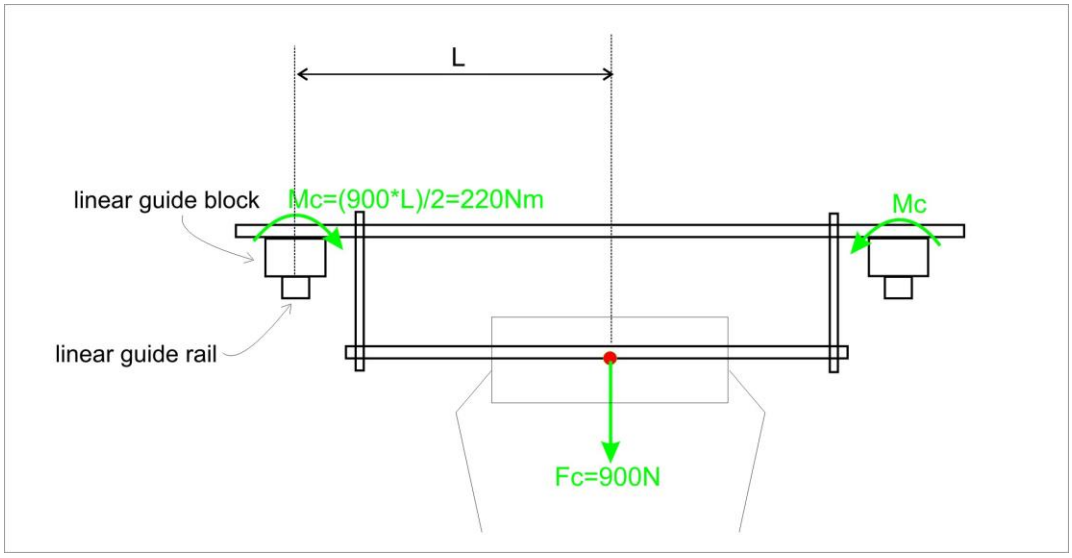
4.4.2 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης εμπρός / πίσω (f / b)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η υλοποίηση της γραμμικής κίνησης f / b επιτυγχάνεται με χρήση ράγας, πάνω στην οποία τοποθετείται γραμμικό ρουλεμάν για τη στήριξη και σύνδεση του μηχανισμού. Τέτοιου είδους συστήματα υπάρχουν στην αγορά με τη μορφή έτοιμου συναρμολογήματος (γραμμικοί οδηγοί - linear guides) σε μεγάλη ποικιλία ανάλογα με τύπο της εφαρμογής και τις απαιτήσεις σε φορτία. Η ράγα αυτή είναι στηριγμένη πάνω σε κάγκελα τοποθετημένα κατά μήκος του διαδρόμου.

Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος γραμμικών οδηγών, λαμβάνεται υπόψιν, η ιδιότητα του συστήματος να μπορεί να προστατέψει το ρομπότ σε περίπτωση πτώσης. Δεδομένου ότι το ρομπότ μπορεί να ζυγίζει 30kg, η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκεί στο σύστημα μπορεί να φτάνει και το τριπλάσιο του βάρους του και άρα τα 900N. Επομένως, σύμφωνα με το Σχήμα 4-12 και αν L≈500mm, θα πρέπει να επιλεγεί σύστημα γραμμικών οδηγών που να μπορέσει να υποστηρίζει τις ροπές αυτές.

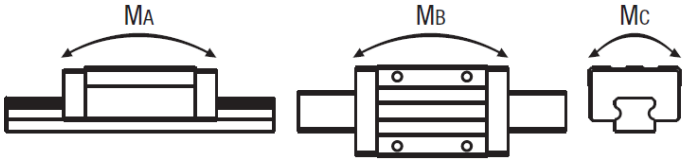
Μετά από εκτενή μελέτη, επιλέγονται οι γραμμικοί οδηγοί της εταιρίας MISUMI με τα χαρακτηριστικά του πίνακα στο Σχήμα 4-13.

Για την υποστήριξη των γραμμικών οδηγών, χρησιμοποιούνται προφίλ αλουμινίου διατομής 50x50mm. Κατά μήκος του διαδρόμου τοποθετούνται κάθετα κάγκελα από το ίδιο υλικό (Σχήμα 4-14).

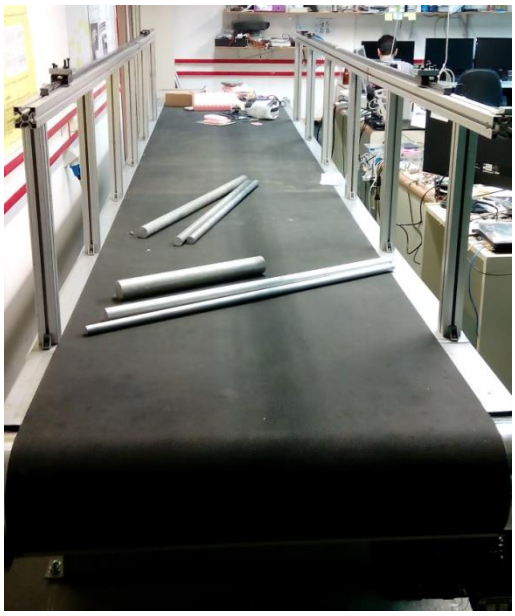


Σχήμα 4-12. Υπολογισμός κατά προσέγγιση της ροπής που ασκεί το ρομπότ σε περίπτωση πτώσης στο γραμμικό ρουλεμάν του συστήματος γραμμικών οδηγών.

H	Basic Load Rating		Allowable Static Moment		Mass	
	C (Dynamic) kN	Co (Static) kN	MA / MB N • m	Mc N • m	Block kg Standard	Block kg Wide
24	8.6	14.2	69	98	0.20	0.25
28	12.5	21.3	155	232	0.30	0.35
33	20.2	34.5	275	393	0.45	0.60



Σχήμα 4-13. Γραμμικός οδηγός της εταιρίας MISUMI που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4-14. Τελική μορφή διαδρόμου.

4.4.3 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης πάνω / κάτω (u / d)

Εφόσον η κατασκευή που στηρίζει το ρομπότ έχει τη μορφή «Π», και άρα τίθεται υπό γωνία εν όσο τη μεταφέρει το ρομπότ, η γραμμική κίνηση u / d επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφής του «Π» γύρω από τη ράβδο σύνδεσης (Σχήμα 4-8).

Η ράβδος σύνδεσης ενώνεται με το τραπέζι του γραμμικού οδηγού με χρήση ειδικών shaft support της εταιρίας MISUMI, ενώ η ομαλή περιστροφή του «Π» γύρω από τη ράβδο σύνδεσης για αντιστάθμιση των τριβών, επιτυγχάνεται με χρήση ρουλεμάν. Για να αποφευχθεί η κίνηση του πλαισίου δεξιά και αριστερά χρησιμοποιούνται ειδικά shaft collars όπως στο Σχήμα 4-8.

Σχήμα 4-15. Εξαρτήματα της εταιρίας MISUMI.

4.4.4 Υλοποίηση περιστροφής pitch

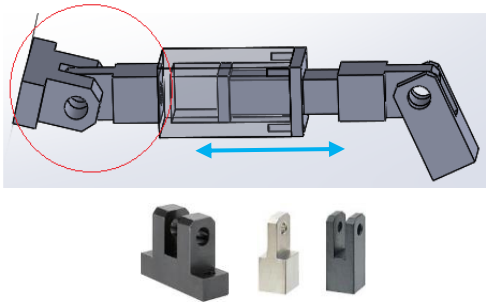
Η περιστροφή pitch, πραγματοποιείται στο σημείο σύνδεσης του ρομπότ με την κατασκευή, γύρω από την οριζόντια ράβδο στήριξης. Η ράβδος αυτή διαπερνά το ρομπότ κατά τον οριζόντιο άξονα y κατά προσέγγιση στο κέντρο βάρους του. Η έδραση του ρομπότ για τη μείωση των τριβών γίνεται με χρήση ρουλεμάν κυλινδρικής μορφής, ενώ η εξασφάλιση της ευθυγράμμισης του ρομπότ εντός των ορίων του διαδρόμου γίνεται επίσης με χρήση shaft collars που τοποθετούνται κατά μήκος της ράβδου στήριξης πλευρικά του ρομπότ ανάλογα με το μέγεθός του.

4.4.5 Υλοποίηση περιστροφής roll

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να επιτευχθεί η περιστροφή roll, η οριζόντια συμπαγής ράβδος στήριξης αντικαθίσταται από μια κινηματική αλυσίδα με έξι β.ε., ενώ προστίθεται ακόμα μια στήριξη στο πάνω μέρος του ρομπότ με σφαιρική άρθρωση.

Το αρθρωτό, περιλαμβάνει στροφικές αρθρώσεις που υλοποιούνται με knuckle joints της MISUMI και πρισματικές αρθρώσεις που σχεδιάζονται εξ αρχής και κατασκευάζονται στο μηχανουργείο του εργαστηρίου (Σχήμα 4-16).

Για την εξασφάλιση της ευθύγραμμης πορείας του ρομπότ αλλά και για την προστασία του από πτώση, διαμορφώνεται δευτερεύων μηχανισμός που συνδέεται με το ρομπότ με σφαιρική άρθρωση ούτως ώστε να προστατεύεται το ρομπότ από πτώση χωρίς να περιορίζονται οι β.ε. του. Η σφαιρική άρθρωση είναι της εταιρίας Myostat Motion. Επιλέγεται κατάλληλο μοντέλο ούτως ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το μέγιστο φορτίο των 900Nπου υπολογίστηκαν ως περίπου το τριπλάσιο του βάρους του μεγαλύτερου ρομπότ. Έτσι τελικώς επιλέχθηκε το μοντέλο SRJ016C με αντοχή σε μέγιστο δυναμικό φορτίο 1170N (Σχήμα 4-17).



Σχήμα 4-16. Σύστημα αρθρωτής αλυσίδας από δύο στροφικές και μια πρισματική άρθρωση. Οι στροφικές αρθρώσεις αποτελούνται από knuckle joints της εταιρίας MISUMI, ενώ η πρισματική σχεδιάζεται εξ' αρχής για το σκοπό αυτό.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

MODEL	BASIC LOAD RATINGS		RECOMMENDED PERMISSIVE LOADS				WEIGHT	MAXIMUM SWING ANGLE
	C (N)	Co (N)	Compressive (N)	Tensile (N)	Radial (N)	Moment (N-m)	(kg)	
SRJ004C	128	100	102	38.4	64	0.64	0.015	±15°
SRJ006C	320	280	256	96	160	1.84	0.036	±30°
SRJ008C	490	540	392	147	245	3.92	0.06	±30°
SRJ012C	720	770	576	216	360	7.20	0.18	±30°
SRJ016C	1170	1300	936	351	585	18.7	0.37	±30°
SRJ024C	2840	3920	2272	852	1420	59.6	0.93	±30°
SRJ032C	5800	8820	4640	1740	2900	174	2.30	±30°
SRJ048C	10600	16000	8480	3180	5300	413	6.73	±30°

C(N) basic dynamic load rating Co(N) basic static load rating

Σχήμα 4-17. Σφαιρική άρθρωση που επιλέγεται.

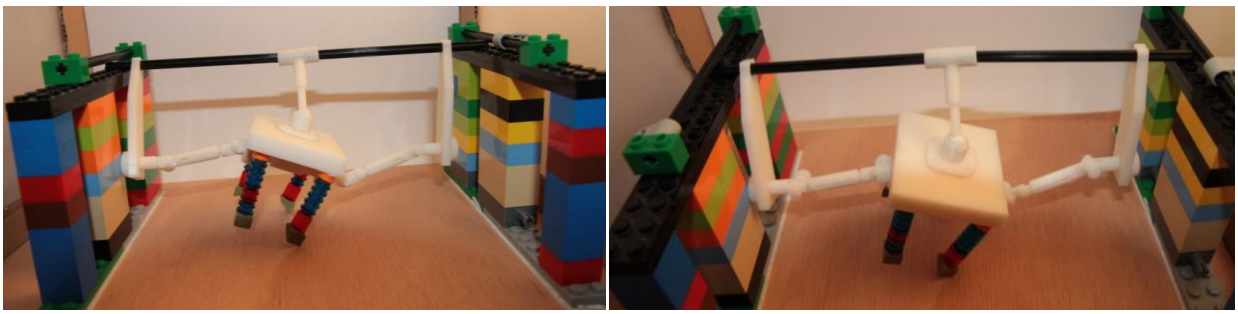
4.4.6 Αξιολόγηση σχεδιασμού

Παραπάνω παρουσιάστηκε και αναλύθηκε η πρώτη λειτουργική λύση στο πρόβλημα. Στο στάδιο αυτό και πριν τον αναλυτικό σχεδιασμό, τη διαστασιολόγηση, τη στατική ανάλυση φορτίων και την τελική κατασκευή, ο σχεδιασμός αυτός αξιολογήθηκε σε σχέση με τις προδιαγραφές προκειμένου να αποφασιστεί αν θα κατασκευαστεί ή αντ' αυτής θα προταθεί διαφορετική λύση.

Μετά τον αρχικό σχεδιασμό και τη σύλληψη της ιδέας, προκειμένου να εξεταστεί η λειτουργικότητα της κατασκευής, κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο σε μινιατούρα με όλα τα κομμάτια του σχεδίου τρισδιάστατα εκτυπωμένα ή κατασκευασμένα με Lego. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε μια μακέτα του συστήματος που εξασφαλίζει μια περαιτέρω επισκόπηση της κατασκευής και όχι μόνο οπτικοποίησή της από το λογισμικό CAD.

Τα πλεονεκτήματα του σχεδιασμού αυτού είναι ότι το ρομπότ προστατεύεται από πτώση από τον ίδιο το μηχανισμό και άρα δεν υπάρχει η ανάγκη χρήσης επιπλέον συστήματος για το σκοπό αυτό και ακόμα ότι η γωνία roll παίρνει πεπερασμένες τιμές ανάλογα με τη γεωμετρία και διαστασιολόγηση της πρισματικής άρθρωσης.

Τα μειονεκτήματα είναι η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό, η μη άμεση μεταβλητότητα λόγω του ότι για διαφορετικό πείραμα, απαιτείται σχετικά μεγάλη αλλαγή στην κατασκευή (αφαίρεση συμπαγούς ράβδου και τοποθέτηση αρθρωτού) και τέλος ότι δεν ικανοποιείται η προδιαγραφή της μεταβλητότητας δεδομένου του ότι μπορεί να υποστηρίξει μόνο δύο περιπτώσεις β.ε.



Σχήμα 4-18. Πρωτότυπο σε μακέτα.

4.5 Δεύτερο λειτουργικό σχέδιο / εναλλακτική

Στο σημείο αυτό και μετά την αξιολόγηση της πρώτης λύσης, διαμορφώθηκε η δεύτερη εναλλακτική λύση. Ο σχεδιασμός αυτής της λύσης αποτελεί μια διαφορετική προσέγγιση, που αναπτύχθηκε εξ' αρχής και άρα δεν βασίζεται σε κάτι που υπάρχει, ωστόσο αποτελείται από μια σύνθεση των περισσοτέρων στοιχείων που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 1.3. Έτσι, ο μηχανισμός αυτός συνδυάζει gimbal που σχεδιάζεται και διαμορφώνεται αποκλειστικά για την κατασκευή αυτή, γραμμικά

ρουλεμάν (linear bearings) για την υλοποίηση των γραμμικών κινήσεων και ακόμα σύστημα προστασίας από πτώση παρόμοιας λογικής με το σύστημα γερανογέφυρας που παρουσιάστηκε.

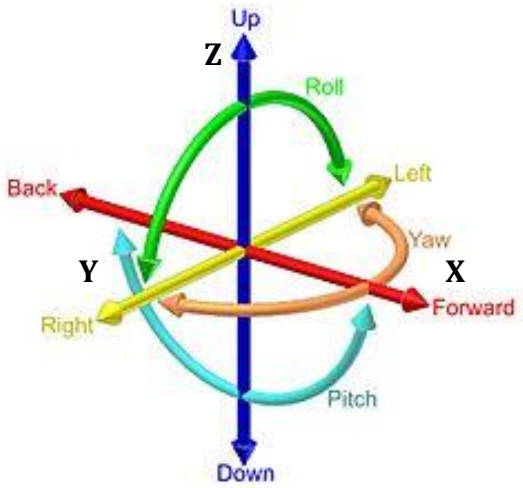
Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η γενική ιδέα του σχεδιασμού, η σύγκριση μεταξύ των δύο εναλλακτικών για την επιλογή της καταλληλότερης που ακολουθεί την αξιολόγηση της λύσης αυτής καθώς και η υλοποίηση του κάθε β.ε. Ακόμα παρουσιάζονται αναλυτικά στα στάδια των κατασκευαστικών βελτιώσεων.

4.5.1 Σχεδιασμός

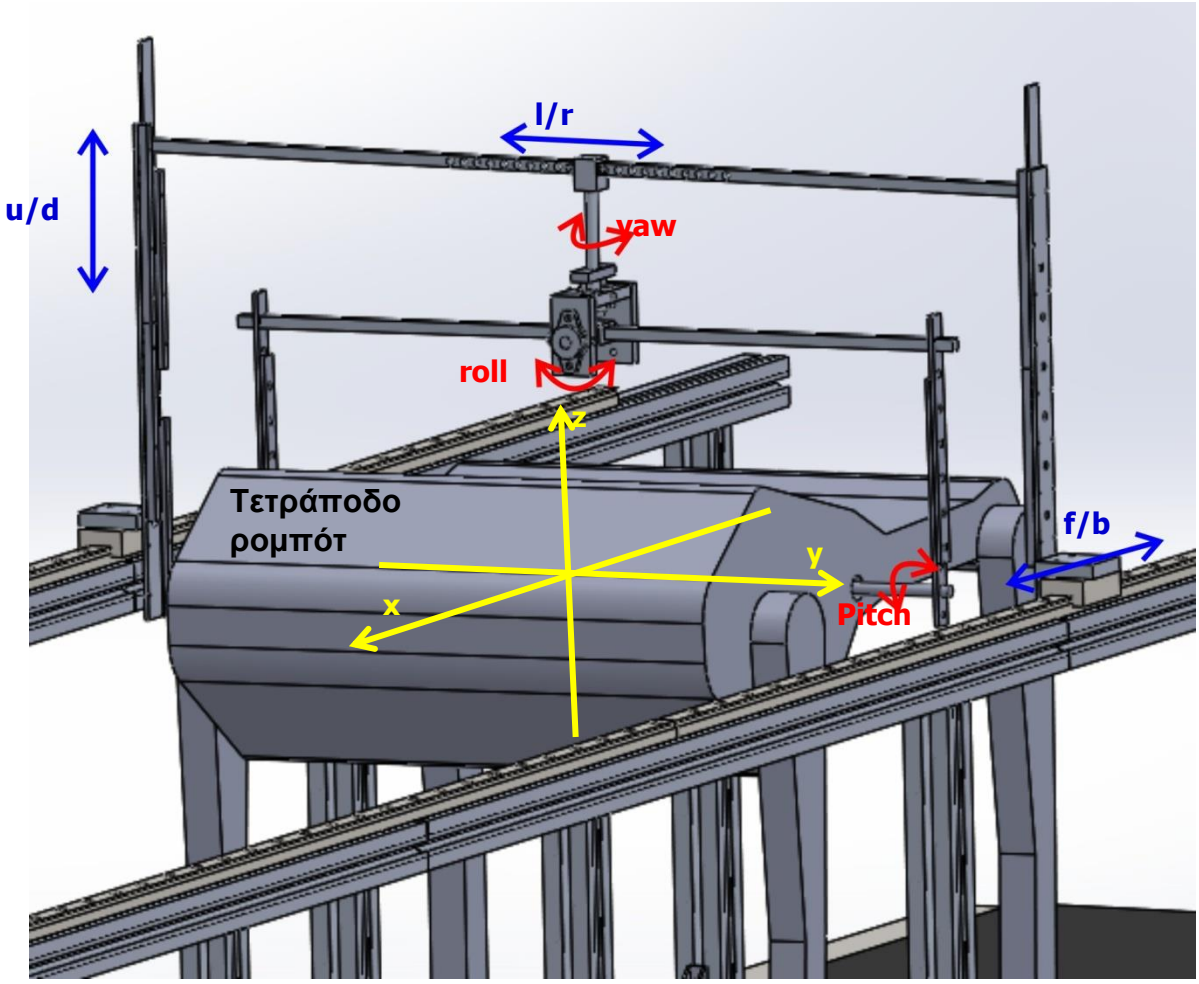
Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, η λύση αυτή συνθέτει αρκετά διαφορετικά στοιχεία για να επιτύχει την βέλτιστη δυνατή κάλυψη όλων των προδιαγραφών που τέθηκαν εξ' αρχής. Βασικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού, είναι ότι δίνει τη δυνατότητα έξι β.ε., δηλαδή επιτρέπει στο ρομπότ να κινείται σε όλο το φάσμα των τριών διαστάσεων στην «ελεύθερη» του μορφή (Σχήμα 4-19). Έτσι σχεδιάζεται ειδικό gimbal που δίνει στην κατασκευή δύο β.ε., το roll και το yaw. Το ρομπότ συνδέεται με το gimbal με ορθογωνικό πλαίσιο κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε να μεταβάλλει το σχήμα και το μέγεθός του ανάλογα με το ρομπότ που «κουμπώνει» επάνω του. Η γραμμική κίνηση f / b επιτυγχάνεται με τον τρόπο που αναλύθηκε στην Ενότητα 4.4.2, ενώ για την κίνηση u / d, χρησιμοποιείται τελικά η ίδια ακριβώς λογική.

Βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να υπάρχει στην κατασκευή είναι η δυνατότητα να «κλειδώνουν» κάποιοι β.ε. Στο σχεδιασμό αυτό μπορούν να κλειδώνουν / ελευθερώνονται το l /r, roll, pitch, yaw. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: το roll και το yaw, που δίνονται από το gimbal κλειδώνουν με τη χρήση πείρων που διαπερνούν του άξονες περιστροφής όπως στο Σχήμα 4-21. Το l / r επίσης με χρήση πείρων που διαπερνούν τις οπές του άξονα, ενώ το pitch, κλειδώνει αντικαθιστώντας έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) με σφικτήρες. Όλα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενες ενότητες, όπου περιγράφονται οι υλοποιήσεις των β.ε.

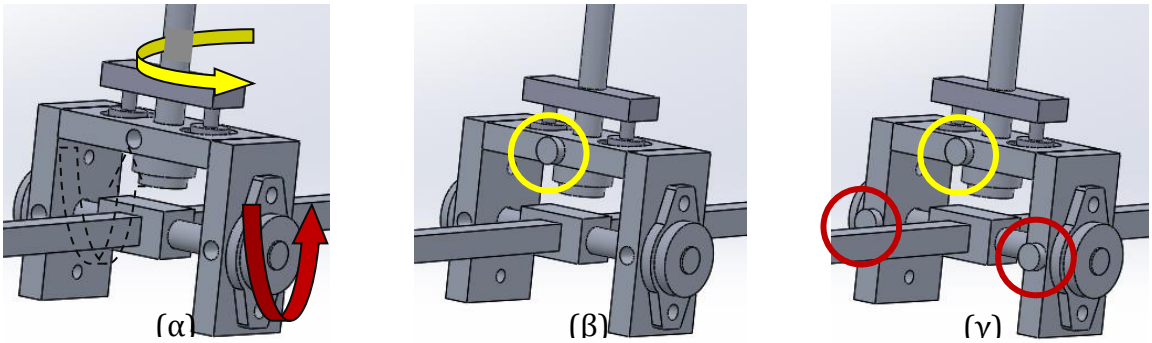
Σύμφωνα με το Σχήμα 4-20 και την Εξίσωση (2-2), το mobility του μηχανισμού είναι m= 6, εφόσον n= 6, J_1 =4 και J_2= 1.



Σχήμα 4-19. Άξονες (x,y,z) και οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας – περιστροφικοί και γραμμικοί.



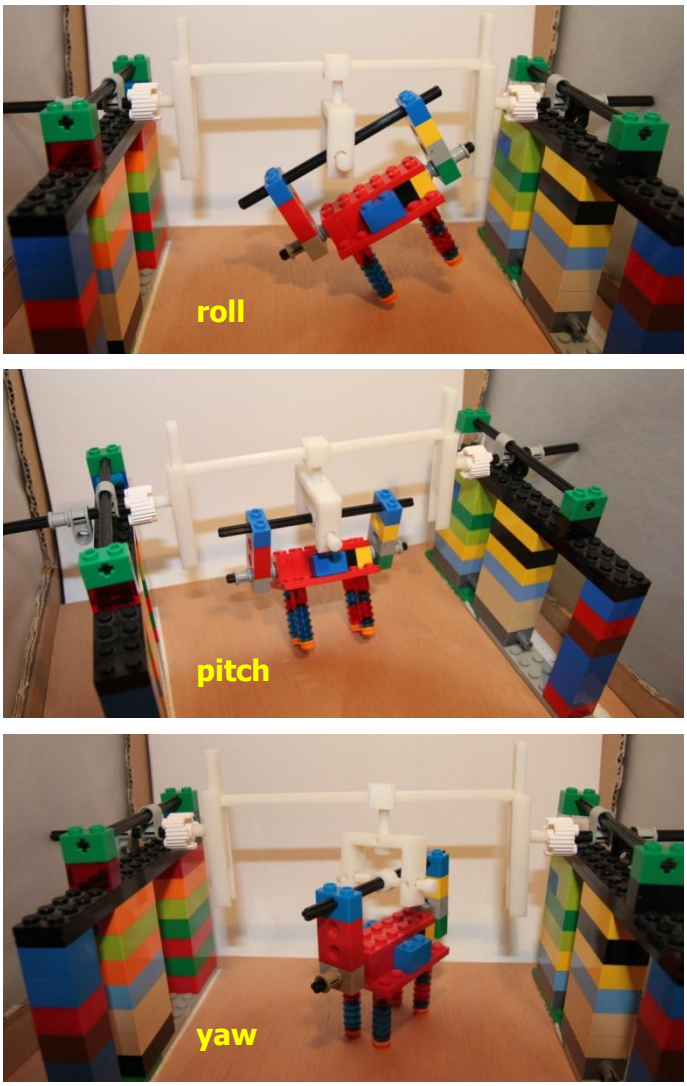
Σχήμα 4-20. Πρώτη προσέγγιση μηχανισμού στήριξης που συνδέεται με τετράποδο ρομπότ. Χρησιμοποιείται gimbal για το roll και το yaw. Το pitch, δίνεται με την περιστροφή του ρομπότ γύρω από τη συμπαγή ράβδο που διαπερνά το κέντρο βάρους του (άξονας y). Το f /b δίνεται από τους γραμμικούς οδηγούς που έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος του κυλιόμενου διαδρόμου. Το u / d δίνεται από sliding parts που τοποθετούνται πλευρικά του ρομπότ και έχουν τη δυνατότητα να προσαρτώνται στους γραμμικούς οδηγούς σε διαφορετικά σημεία, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να αλλάξουν τη θέση τους ανάλογα με το μέγεθος του ρομπότ. Το l /r δίνεται από μηχανισμό τύπου γραμμικού ρουλεμάν.



Σχήμα 4-21. (α) Roll - Yaw ελεύθερα. (β) Roll ελεύθερο – Yaw κλειδωμένο με χρήση πείρου. (γ) Roll – Yaw κλειδωμένα με χρήση τριών πείρων.

4.5.2 Αξιολόγηση λύσης

Στο σημείο αυτό, αφού έχει παρουσιαστεί η γενική ιδέα του σχεδιασμού της δεύτερης λειτουργικής λύσης και πριν τον αναλυτικό σχεδιασμό και την κατασκευή, παρουσιάζεται η αξιολόγηση της. Όπως και στην πρώτη λειτουργική λύση, κατασκευάστηκε τριδιάστατο μοντέλο – μακέτα για αποτελεσματικότερη επισκόπηση και παρουσίαση (Σχήμα 4-22).



Σχήμα 4-22. Πρωτότυπο σε μακέτα.

Τελικά, τα πλεονεκτήματα της λύσης αυτής είναι ότι έχει έξι β.ε., ενώ μπορεί να αλλάξει τη μεταβλητότητά της με εύκολο τρόπο, χωρίς αντικαταστάσεις ολόκληρων δομών. Ο σχεδιασμός είναι σχετικά απλός και καινοτόμος. Ακόμα, μπορεί εξίσου εύκολα να αλλάξει διαστάσεις ανάλογα με το μέγεθος του ρομπότ.

Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι ότι απαιτείται επιπλέον στήριξη από το ταβάνι για την προστασία από πτώση.

4.5.3 Σύγκριση των δύο λύσεων για επιλογή μιας για κατασκευή

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο εναλλακτικών λύσεων ως προς τις προδιαγραφές που τέθηκαν και τελικά η επιλογή της λύσης που κατασκευάζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ολικού κριτηρίου.

Σε κάθε κριτήριο δίνεται ένα βάρος w_i ανάλογα με το πόσο σημαντικό είναι για το τελικό αποτέλεσμα. Για κάθε εναλλακτική λύση δίνεται μια βαθμολογία σε κάθε κριτήριο ανάλογα με το πόσο ικανοποιεί το κριτήριο αυτό. Η βαθμολογία αυτή βρίσκεται σε μια κλίμακα που ορίζεται στο πρόβλημα.

Τέλος δημιουργείται η συνάρτηση χρησιμότητας για κάθε εναλλακτική λύση από την οποία επιλέγεται τελικά η καταλληλότερη (εξίσωση 4-1). Το πρόβλημα λοιπόν ορίζεται ως εξής: x_1, x_2 οι εναλλακτικές 1 και 2. Τα κριτήρια είναι οι προδιαγραφές που αναλύθηκαν στην ενότητα 4.3 και τα αντίστοιχα βάρη τους $w_{1,2,3,4,5}$. Οι βαθμολογίες y_j βρίσκονται μέσα στην κλίμα [1-5].

$$V(x_i) = \sum_1^m w_j y_j \tag{4-1}$$

όπου x_i η εναλλακτική λύση $i \in [1,2\ldots n]$

y_j η βαθμολογία για το κριτήριο $j \in [1,2\ldots m]$

w_j το βάρος κάθε κριτηρίου

Πίνακας 4-3. Πίνακας ανάλυσης σταθμισμένου μέσου για τις δύο εναλλακτικές.

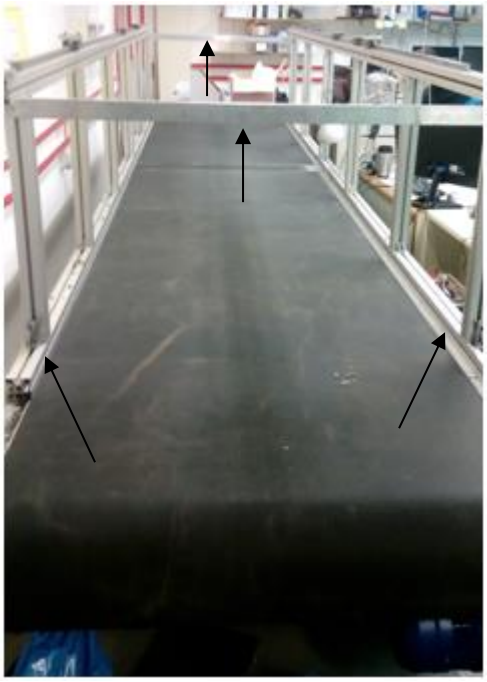
y_i / x_i	Προσαρμοστικότητα w_1 = 20%	Μεταβλητότητα w_2 = 20%	Ασφάλεια w_3 = 25%	Ελαχιστοποίηση μαζών w_4 = 17.5%	Αντοχή w_5 = 17.5%	$V(x_i)$
x_1	3	2	4	2.5	4.5	3.225
x_2	5	5	3	2.5	4	3.887

Τελικά επιλέγεται η λύση 2 προς κατασκευή εφόσον $V(x_2) > V(x_1)$.

4.5.4 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης εμπρός / πίσω (f /b) και κατασκευαστικές βελτιώσεις

Η υλοποίηση της γραμμικής αυτής κίνησης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παραμένει ως έχει όπως στην Ενότητα 4.4.2, ωστόσο μετά τη συναρμολόγηση των προφίλ αλουμινίου και την τοποθέτηση των γραμμικών οδηγών πάνω σε αυτά, παρατηρήθηκε έντονη ταλάντωση κατά την άσκηση κάποιου φορτίου ενδεικτικά σε κάποιο από τα φορεία. Αυτό δεν είναι αποδεκτό αν συνυπολογιστεί το ήδη μεγάλο εύρος ταλαντώσεων που θα προκαλεί το κινούμενο ρομπότ, που στόχος είναι να απορροφά ο μηχανισμός.

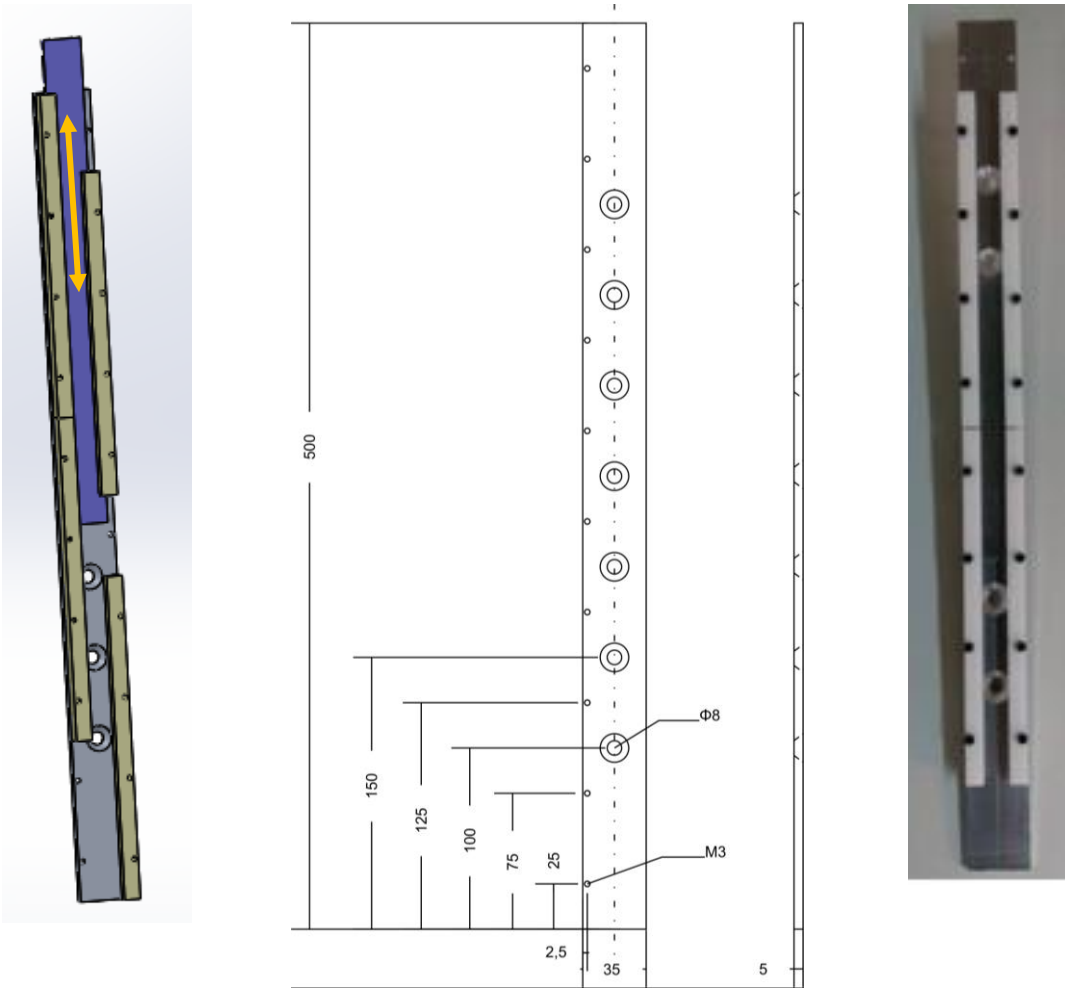
Η κατασκευαστική βελτίωση αφορά στην ενίσχυση του συστήματος με επιπλέον στήριξη στο οριζόντιο επίπεδο κατά μήκος του ιμάντα και κάθετα σε αυτόν με χρήση προφίλ αλουμινίου, ώστε να περιορίζονται κατά το δυνατόν οι ταλαντώσεις (Σχήμα 4-23).



Σχήμα 4-23. Τελική μορφή συστήματος στήριξης των γραμμικών οδηγών.

4.5.5 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης πάνω / κάτω (u / d) και κατασκευαστικές βελτιώσεις

Ο αρχικός σχεδιασμός των εξαρτημάτων για την υλοποίηση της γραμμικής κίνησης αυτής περιλαμβάνει στοιχεία που κατασκευάζονται στο μηχανουργείο του εργαστηρίου. Πρόκειται για ένα σύστημα που αποτελείται από τραπέζι κύλισης και πλάκα κύλισης. Το τραπέζι κύλισης είναι κατασκευασμένο από Al 7075 T6 και τρισδιάστατα εκτυπωμένα στοιχεία και η πλάκα κύλισης επίσης από Al 7075 T6. Βασικός στόχος είναι τόσο η ελαχιστοποίηση των τριβών μεταξύ των μερών (εύκολη κύλιση πλάκας πάνω στο τραπέζι), όσο και η αντοχή, η ακρίβεια στην κίνηση και ταυτόχρονα η ελαχιστοποίηση της μάζας. Για το λόγο αυτό η διαστασιολόγηση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η μάζα χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή της κατασκευής σε φορτία. Χαρακτηριστικό σημείο του σχεδιασμού είναι οι τρύπες κατά μήκος του τραπεζιού κύλισης που στόχο έχουν τη δυνατότητα να μπορεί να ενωθεί με το τραπέζι κύλισης των γραμμικών οδηγών σε διαφορετικά ύψη ανάλογα με μέγεθος του ρομπότ. Το τραπέζι κύλισης συνδέεται με το τραπέζι του γραμμικού οδηγού με εξάρτημα επίσης κατασκευασμένο από Al 7075 T6.



Σχήμα 4-24. Τριδιάστατος σχεδιασμός, διαστασιολόγηση και κατασκευή τραπεζιού κύλισης συστήματος u / d.

Κατά την κατασκευή του πρωτοτύπου αυτού και τη συναρμολόγησή του με τα υπόλοιπα κομμάτια, παρατηρήθηκε αστοχία στην ακρίβεια της κίνησης και αυξημένες τριβές, πράγμα που εξηγείται λόγω των ανοχών από την κατασκευή των εξαρτημάτων σε φρέζα χειρός. Για το λόγο αυτό, ακολούθησε κατασκευαστική βελτίωση που αφορά στην αντικατάσταση του «χειροποίητου» αυτού συστήματος με έτοιμο σύστημα γραμμικής κίνησης.

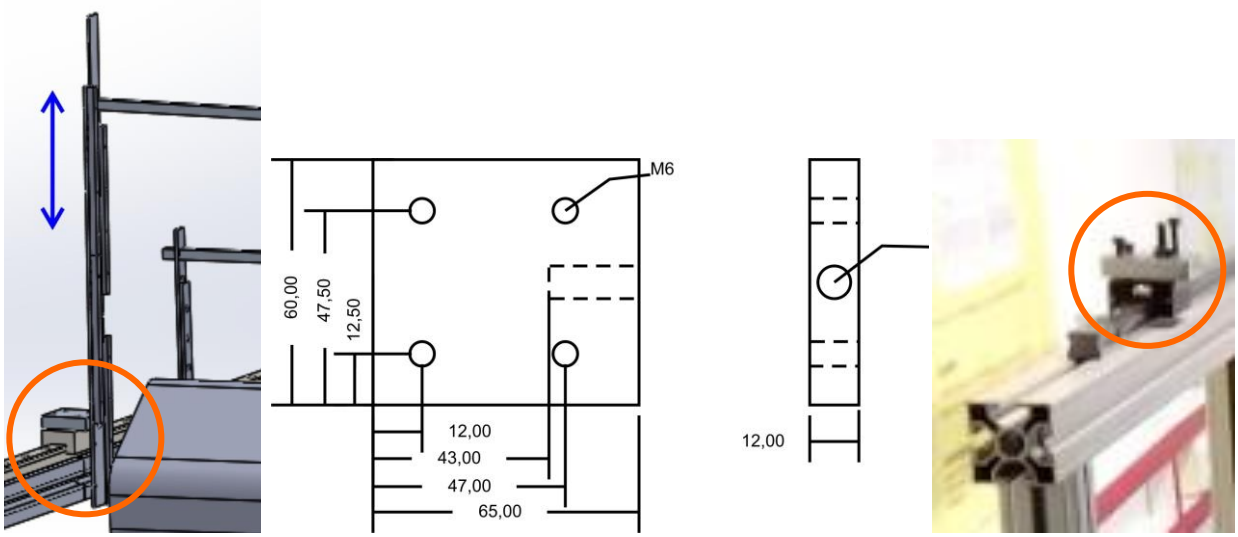
Για το σκοπό αυτό εξετάστηκε η λύση συστήματος γραμμικών οδηγών που μπορεί είτε να έχει τη μορφή των γραμμικών οδηγών που χρησιμοποιήθηκαν για το β.ε. f / b, δηλαδή γραμμικά ρουλεμάν

για τετράγωνες ράγες (Σχήμα 4-26), είτε τη μορφή γραμμικών ρουλεμάν για στρογγυλές ράγες (Σχήμα 4-27). Για την επιλογή της μίας από τις δύο λύσεις εξετάστηκαν και πάλι τα κριτήρια της αξιοπιστίας του εξαρτήματος σε σχέση με τις αντοχές, την ακρίβεια της κίνησης αλλά και την ελαχιστοποίηση του βάρους. Και πάλι η παραδοχή που γίνεται αφορά σε μια δύναμη τριπλάσια του βάρους του μεγαλύτερου ρομπότ:

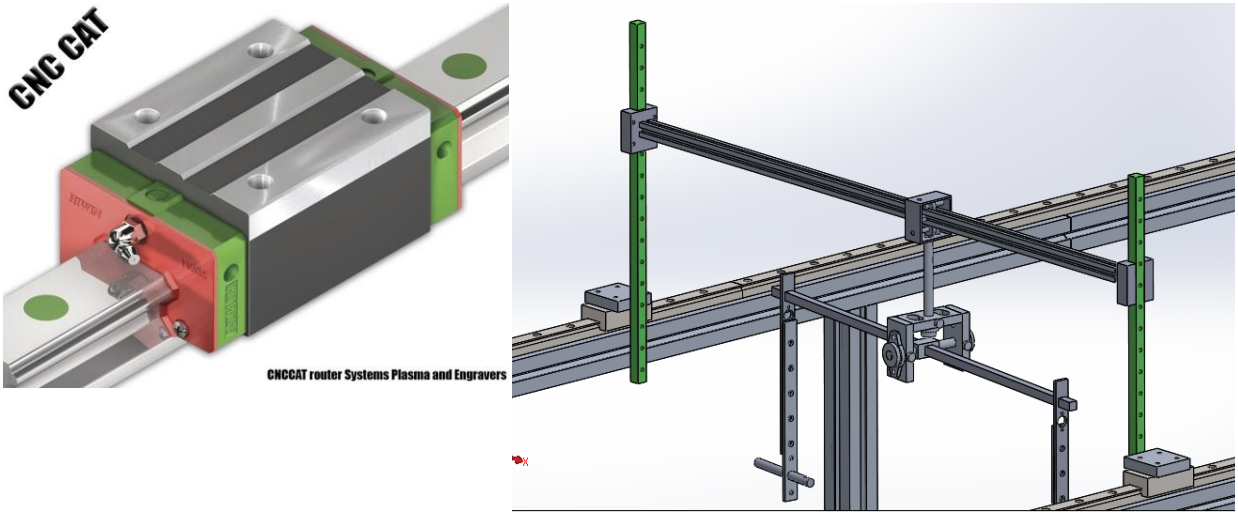
$$(3*30Kg)=90Kg\approx900N \qquad (4\text{-}2)$$

Από τις δύο παραπάνω εναλλακτικές προτιμάται τελικά η πρώτη για τους εξής λόγους:

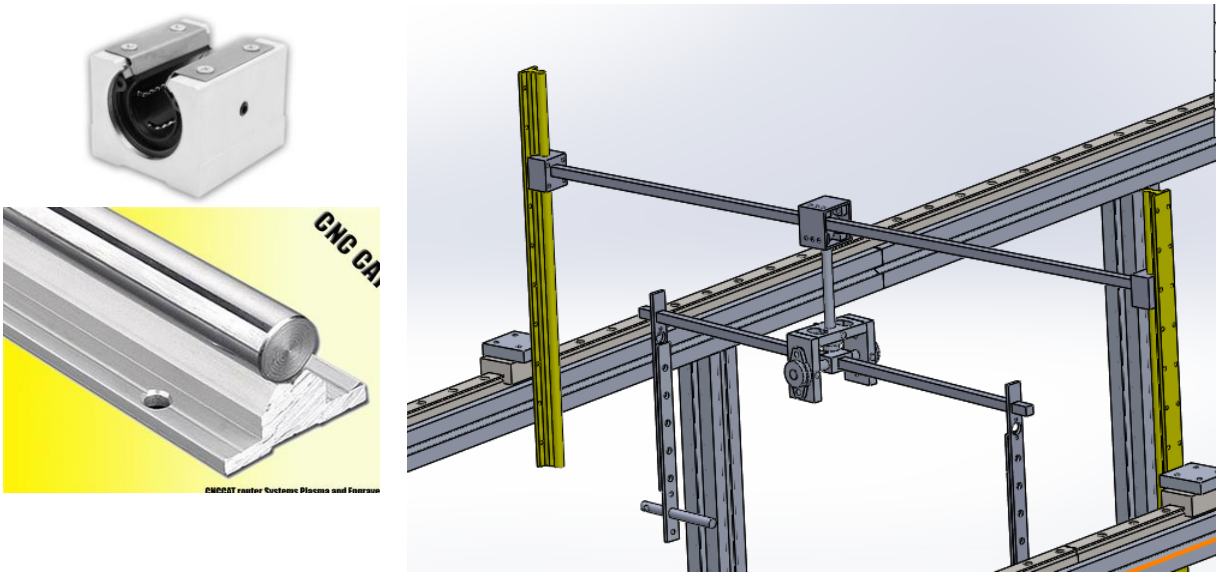
- Ο κατασκευαστής δίνει προδιαγραφές για τις ροπές, πράγμα που δίνει μεγαλύτερη αξιοπιστία στη λύση αυτή. Σύμφωνα με το Σχήμα 4-28, στην ενδεχόμενη άσκηση του φορτίου των 900N που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση, οι ροπές που μπορεί να ασκηθούν σε κάθε σημείο είναι της τάξης των 200Nm. Επομένως οι προδιαγραφές του κατασκευαστή (Σχήμα 4-29), αποδεικνύουν ότι η επιλογή αυτή καλύπτει την απαίτηση της αντοχής.
- Η λύση αυτή δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στην κίνηση με τη χρήση ενός γραμμικού οδηγού σε κάθε πλευρά. Διαφορετικά, αν επιλεγόταν η δεύτερη λύση, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ζεύγος ραγών σε κάθε πλευρά. Αυτό θα είχε σαν συνέπεια την αύξηση του βάρους της κατασκευής.



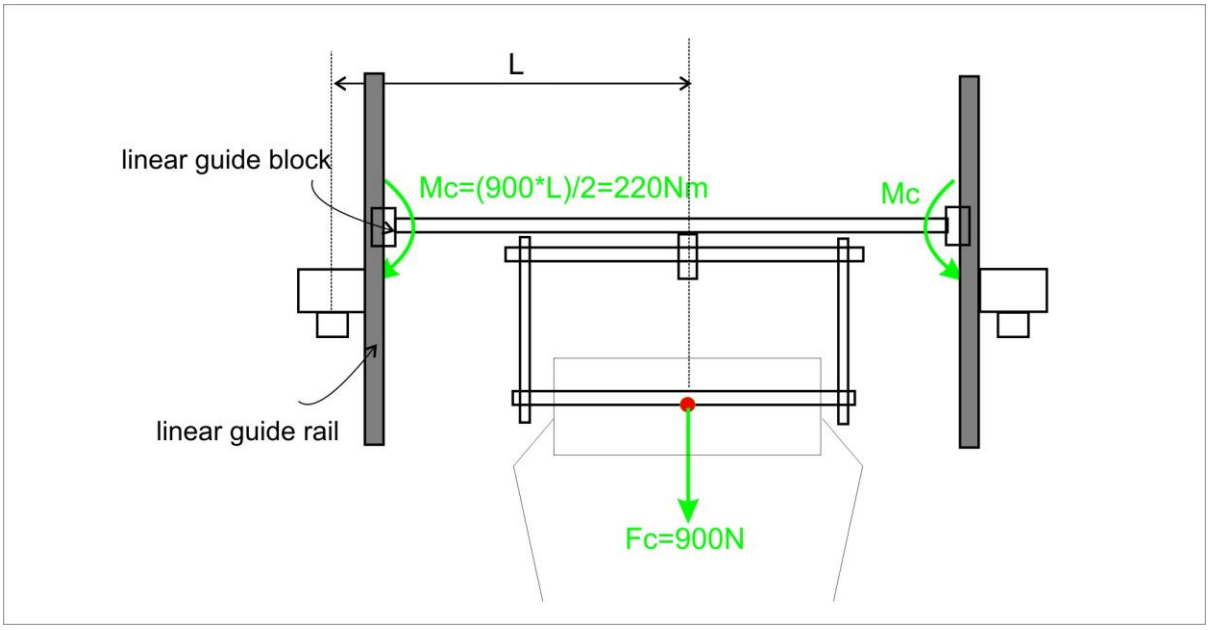
Σχήμα 4-25. Εξάρτημα σύνδεσης τραπεζιού κύλισης και γραμμικού οδηγού.



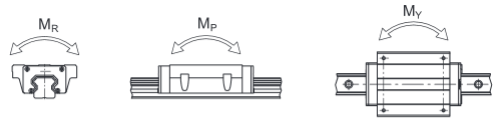
Σχήμα 4-26. Γραμμικοί οδηγοί με ρουλεμάν για τετράγωνες ράγες.



Σχήμα 4-27. Γραμμικά ρουλεμάν ανοιχτά για υποστηριζόμενες ράγες.



Σχήμα 4-28. Υπολογισμός ροπής για την επιλογή του καταλληλότερου μηχανισμού από τις δύο παραπάνω εναλλακτικές.



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)			Dimensions of Block (mm)														Dimensions of Rail (mm)							Mounting Bolt for Rail	Basic Dynamic Load Rating	Basic Static Load Rating	Static Rated Moment			Weight	
	H	H_1	N	W	B	B_1	C	L_1	L	K_1	K_2	G	M	T	T_1	H_2	H_3	W_R	H_R	D	h	d	P	E	(mm)	C(kN)	C_0(kN)	M_R kN-m	M_P kN-m	M_Y kN-m	Block kg	Rail kg/m
HGW15CA	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	4.85	5.3	M5	6	8.9	3.95	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45
HGW20CA	30	4.6	21.5	63	53	5	40	50.5	77.5	10.25	6	12	M6	8	10	6	6	20	17.5	9.5	8.5	6	60	20	M5x16	17.75	27.76	0.27	0.20	0.20	0.40	2.21
HGW20HA								65.2	92.2	17.6																21.18	35.90	0.35	0.35	0.35	0.52	
HGW25CA	36	5.5	23.5	70	57	6.5	45	58	84	10.7	6	12	M8	8	14	6	5	23	22	11	9	7	60	20	M6x20	26.48	36.49	0.42	0.33	0.33	0.59	3.21
HGW25HA								78.6	104.6	21																32.75	49.44	0.56	0.57	0.57	0.80	
HGW30CA	42	6	31	90	72	9	52	70	97.4	14.25	6	12	M10	8.5	16	6.5	10.8	28	26	14	12	9	80	20	M8x25	38.74	52.19	0.66	0.53	0.53	1.09	4.47
HGW30HA								93	120.4	25.75																47.27	69.16	0.88	0.92	0.92	1.44	

Σχήμα 4-29. Προδιαγραφές πρώτης εναλλακτικής: γραμμικά ρουλεμάν για τετράγωνες ράγες, της εταιρίας HIWIN, σειρά HGW.

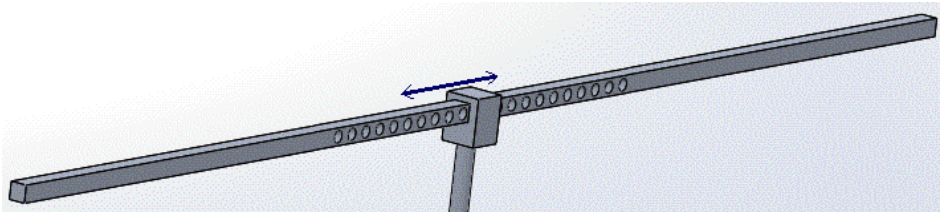
DIMENSIONS OF SBR BEARING BLOCKS

MODEL NO.	SHAFT DIAMETER	MAIN DIMENSIONS								MOUNTING DIMENSIONS				BASIC LOAD RATING		WEIGHT(kg)
		h	E	W	L	F	T	h1	θ	B	C	S	l	c(kgf)	Co(kgf)	
SBR12UU	12	17	20	40	39	27.6	8	8.5	80°	28	26	M5	10	52	79	0.10
SBR16UU	16	20	22.5	45	45	33	9	10	80°	32	30	M5	10	59	91	0.15
SBR20UU	20	23	24	48	50	39	11	10	60°	35	35	M6	12	88	140	0.20
SBR25UU	25	27	30	60	65	47	14	11.5	60°	40	40	M6	12	100	160	0.45

Σχήμα 4-30. Προδιαγραφές δεύτερης εναλλακτικής: ρουλεμάν ανοιχτά για υποστηριζόμενες στρογγυλές ράγες. Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση ο κατασκευαστής δεν δίνει προδιαγραφές για ροπές, παρά μόνο για στατικό και δυναμικό κάθετο φορτίο.

4.5.6 Υλοποίηση γραμμικής κίνησης δεξιά / αριστερά (l / r) και κατασκευαστικές βελτιώσεις

Η γραμμική κίνηση αυτή, προκύπτει από την κύλιση συνδέσμου που συνδέει το gimbal με την οριζόντια δοκό. Σκοπός εδώ είναι η ύπαρξη ενός β.ε., επομένως θα πρέπει ο σύνδεσμος να κυλά γύρω από την δοκό χωρίς να περιστρέφεται γύρω από αυτήν. Για το λόγο αυτό, στο πρωτότυπο, επιλέγεται δοκός τετραγωνικής διατομής, όπως στο Σχήμα 4-31. Κατά μήκος της, διαμορφώνονται οπές, έτσι ώστε με τη χρήση πείρου να δίνεται η δυνατότητα στο μηχανισμό να κινείται δεξιά και αριστερά σε εύρος που ορίζεται από το χρήστη ανάλογα με το που θα το τοποθετήσει τους πείρους. Το υλικό που επιλέγεται είναι και πάλι αλουμίνιο 7075 T6.

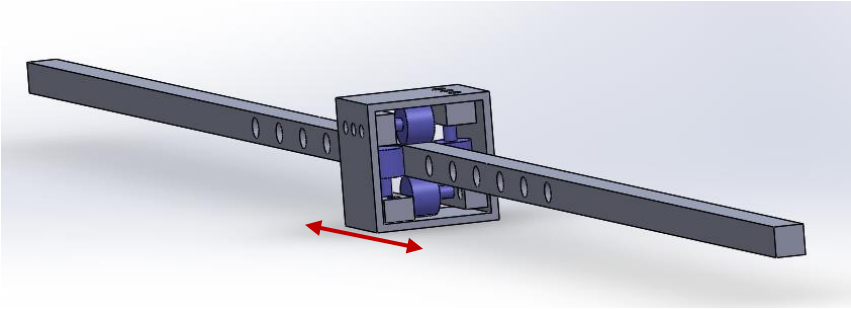


Σχήμα 4-31. Σύνδεσμος και δοκός σύνδεσης με οπές για το β.ε. l / r.

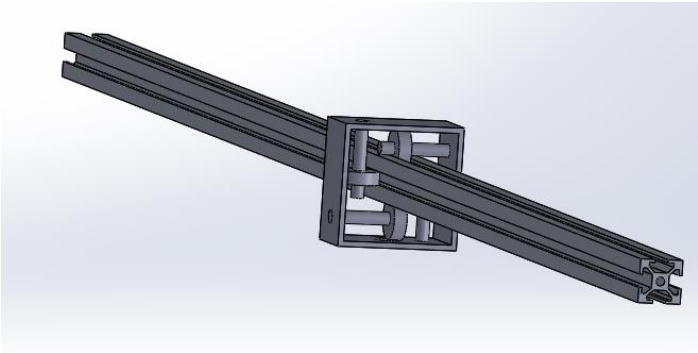
Στο στάδιο αυτό και μετά την κατασκευή, παρατηρήθηκε αστοχία ως προς την κύλιση του εξαρτήματος, λόγω αυξημένων τριβών αλλά και λόγω ανοχών. Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη για ύπαρξη μιας πιο αξιόπιστης δομής ως προς την κύλιση.

Σε πρώτη φάση έγινε μια προσπάθεια βελτίωσης της υπάρχουσας κατασκευής με αλλαγή στο σχεδιασμό του συνδέσμου. Ο σύνδεσμος αυτή τη φορά περιλαμβάνει στο εσωτερικό του ειδικά cam followers όπως στο Σχήμα 4-32. Με τον τρόπο αυτό, η κύλισή του γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ενώ αντισταθμίζονται σημαντικά οι τριβές. Τα cam follower, είναι επιλεγμένα από το εμπόριο με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν τις προδιαγραφές αντοχής (Σχήμα 4-34), ενώ τα υπόλοιπα εξαρτήματα είναι σχεδιασμένα και πάλι εξαρχής και το υλικό τους είναι Al 7075 T6.

Εναλλακτικά, προτάθηκε ακόμα μια λύση ίδιας λογικής, αυτή τη φορά όμως αντί για δοκό σύνδεσης τετραγωνικής διατομής, χρησιμοποιήθηκε προφίλ αλουμινίου 20x20 ενώ αντί για cam followers, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ρουλεμάν κύλισης για το προφίλ αυτά (Σχήμα 4-33).



Σχήμα 4-32. Δοκός τετραγωνικής διατομής και cam followers.



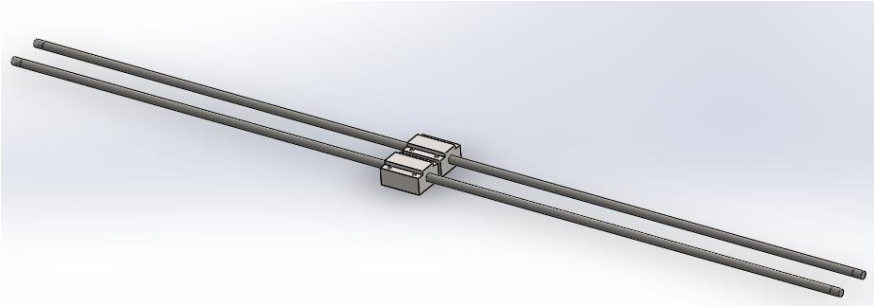
Σχήμα 4-33. Προφίλ αλουμινίου 20x20 και ειδικά ρουλεμάν κύλισης.

d-D	General								Heavy Load						
	Basic Dynamic Load Rating C (kN)	Basic Static Load Rating Cor (kN)	Max. Allowable Load (kN)	Track Load Capacity (kN)		Max. Rotational Speed (rpm)		Mass (g)	Basic Dynamic Load Rating C (kN)	Basic Static Load Rating Cor (kN)	Max. Allowable Load (kN)	Track Load Capacity (kN)		Rotational Speed Limit (with Seal) (rpm)	Mass (g)
				Crowned	Flat	With Seal	No Seal					Crowned	Flat		
3-10	1.47	1.18	0.36	0.37	1.37	32900	47000	4.5	-	-	-	-	-	-	-
4-12	2.06	2.05	0.78	0.47	1.76	25900	37000	7.5	-	-	-	-	-	-	-
5-13	3.14	2.77	1.42	0.53	2.25	20300	29000	10.5	-	-	-	-	-	-	-
6-16	3.59	3.58	2.11	1.08	3.43	17500	25000	18.5	6.94	8.50	2.11	1.08	3.43	4400	19
8-19	4.17	4.65	4.73	1.37	4.02	14000	20000	28.5	8.43	11.20	4.73	1.37	4.02	3480	29
10-22	5.33	6.78	5.81	1.67	4.70	11900	17000	45	9.42	14.30	5.81	1.67	4.70	2880	46
10-26				2.06	5.49			60	9.42	14.30	5.81	2.06	5.49		61
12-30	7.87	9.79	9.37	2.45	7.06	9800	14000	95(105)	13.40	19.80	9.37	2.45	7.06	2320	107
12-32				2.74	7.45			105(115)	13.40	19.80	9.37	2.74	7.45		117
16-35	12.0	18.30	17.30	3.14	11.2	7000	10000	170(205)	20.60	37.60	17.30	3.14	11.20	1800	207
18-40	14.7	25.2	26.1	3.72	14.4	5950	8500	250(295)	-	-	-	-	-	-	-
20-52	20.7	34.8	32.1	8.23	23.2	4900	7000	460(525)	-	-	-	-	-	-	-

Σχήμα 4-34. Προδιαγραφές cam followers της εταιρίας MISUMI και μοντέλο που επιλέγεται.

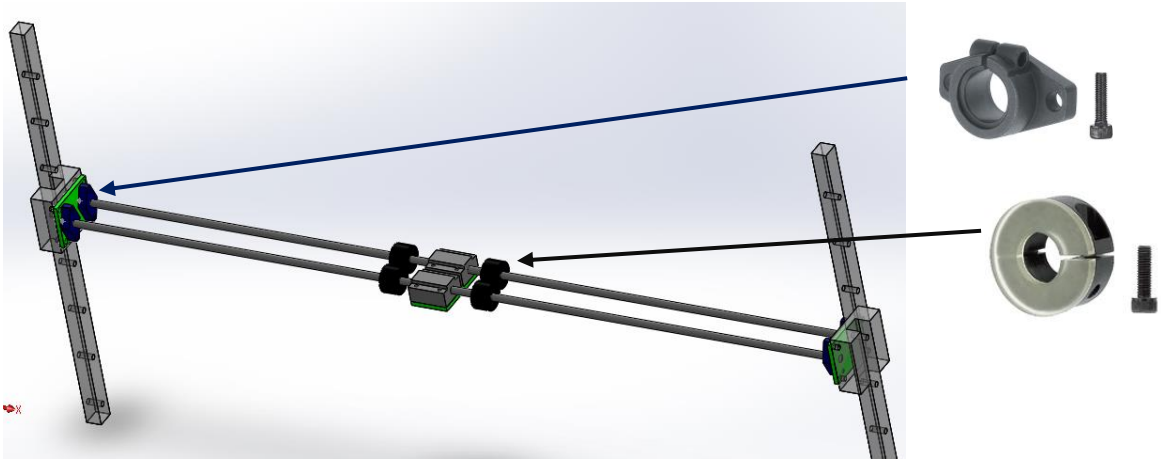
Ακόμα μια εναλλακτική που προτάθηκε, είναι αυτή που περιλαμβάνει δοκό κυκλικής διατομής και γραμμικό ρουλεμάν (Σχήμα 4-35). Η λύση αυτή δίνει το πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα σε σχέση με αντιστάθμιση των τριβών μιας και πρόκειται για ειδικά διαμορφωμένες δοκούς ακριβείας από χάλυβα με επίστρωση χρωμίου. Ωστόσο, δεδομένου ότι το ζητούμενο είναι ο σύνδεσμος να κυλά γύρω κατά μήκος της δοκού και όχι να περιστρέφεται γύρω από αυτήν, σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ζεύγος από δοκούς και γραμμικά ρουλεμάν όπως στο Σχήμα 4-36. Η λύση αυτή τελικά επιλέχθηκε για κατασκευή, ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος υλοποίησης της γραμμικής κίνησης l / r. Για τη διαστασιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων ακολουθήθηκε διαδικασία πειραμάτων και στατικών προσομοιώσεων στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks που περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες Ενότητες.

Σχήμα 4-35. Γραμμικό ρουλεμάν και μπάρες ακριβείας της εταιρίας Misumi.

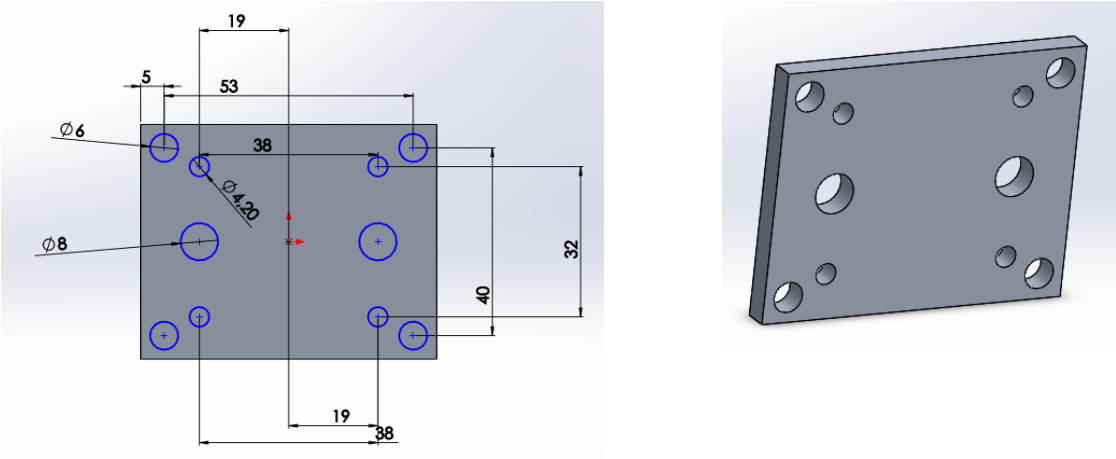


Σχήμα 4-36. Χρήση ζεύγους γραμμικών ρουλεμάν – αξόνων για εξασφάλιση μόνο ενός β.ε.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από δοκούς κυκλικής διατομής Φ8 και γραμμικά ρουλεμάν (Σχήμα 4-35). Για την κατάλληλη σύνδεση της διάταξης τόσο με τη διάταξη u / d, όσο και με το gimbal, χρησιμοποιούνται ειδικά shaft support άλλα και εξαρτήματα κατασκευασμένα στο μηχανουργείο του Εργαστηρίου. Για τον περιορισμό του l / r (κλείδωμα & ξεκλείδωμα) τοποθετούνται shaft collars πλευρικά των γραμμικών ρουλεμάν, τα οποία βιδώνονται σε απόσταση που ορίζει ο χρήστης ανάλογα με το πείραμα και το εύρος κίνησης που επιθυμείται (Σχήμα 4-37).



Σχήμα 4-37. Διάταξη που κατασκευάζεται για το l / r.



Σχήμα 4-38. Πλακίδιο πάχους 5mm από Al 7075 T6, για τη σύνδεση με τα blocks των γραμμικών οδηγών του u / d.

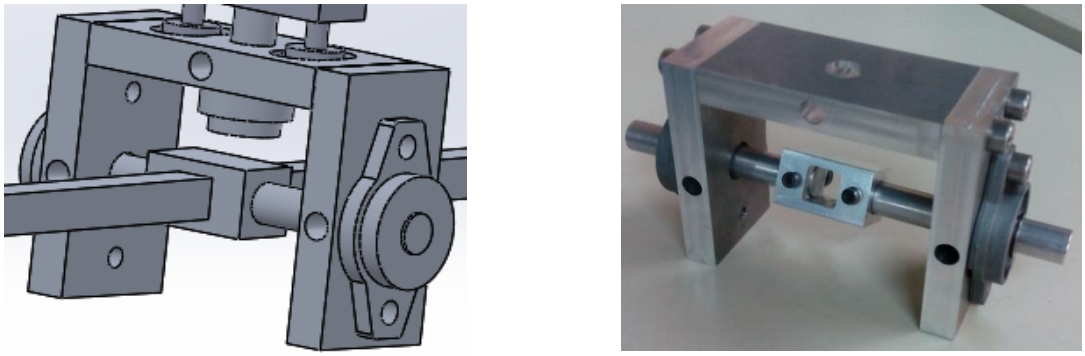
4.5.7 Υλοποίηση περιστροφών roll yaw και κατασκευαστικές βελτιώσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι περιστροφικές κινήσεις roll και yaw, προκύπτουν από ειδικά σχεδιασμένο και κατασκευασμένο gimbal, η αρχική μορφή και λειτουργία του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 4-21. Σε αυτό το σχέδιο, το gimbal αποτελείται από τρείς βασικές πλάκες από Al 7075 T6 που ενώνονται σε σχήμα «Π». Οι πλάκες αυτές αλλά και τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης είναι κατασκευασμένα σε φρέζα χειρός (Σχήμα 4-39). Το αποτέλεσμα έχει αυξημένη μάζα και ακόμα παρουσιάζει κάποιες αστοχίες σε σχέση με την ακρίβεια στην κίνηση που θα έπρεπε να προσφέρει, η οποία αποδίδεται στο γεγονός της ύπαρξης των ανοχών λόγω. Για το σκοπό αυτό, ακολουθούν βελτιώσεις που έχουν να κάνουν τόσο με το σχεδιασμό του gimbal όσο και με τον σχεδιασμό των επιμέρους εξαρτημάτων του αλλά και τον τρόπο κατασκευής τους.

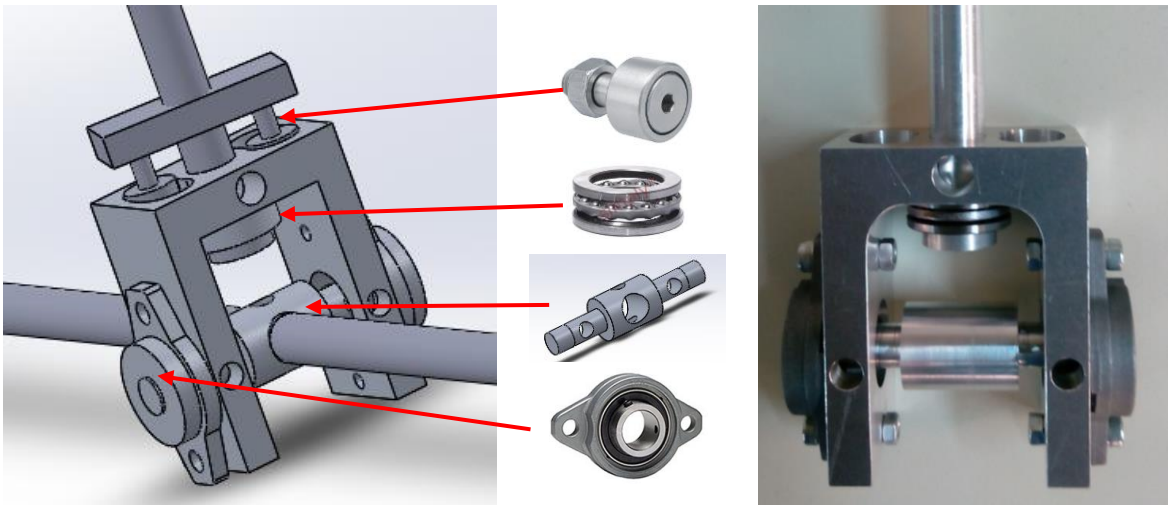
Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη σε σχήμα «Π», επανασχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η μάζα του κατά το δυνατό, ούτως ώστε να μην διακινδυνεύεται η αντοχή του. Το σχέδιο αυτό κατασκευάστηκε σε εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου του Εργαστηρίου και όχι σε φρέζα χειρός, πράγμα που προσδίδει μεγαλύτερη αξιοπιστία στην ακρίβεια των κινήσεων που προκύπτουν από τη σύνδεση της διάταξης σύνδεσης του ρομπότ με το gimbal. Ακόμα, το εξάρτημα που λειτουργεί ως άξονας περιστροφής για το roll, βελτιώθηκε μια και κατασκευάστηκε τελικά εξολοκλήρου σε τόρνο, επομένως αποτελείται από ένα συμπαγές σώμα και όχι από τρία διαφορετικά. Έτσι η περιστροφή του μέσα στα ρουλεμάν, πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια. Τέλος, εγκαταλείφτηκε η λογική της δοκού τετραγωνικής διατομής (η διατομή αυτή χρησιμοποιήθηκε εξ αρχής

για την αποφυγή της περιστροφής της μέσα στο εξάρτημα συγκράτησής της), η οποία αντικαταστάθηκε από δοκό κυκλικής διατομής Φ15.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ο μηχανισμός είναι να προστατεύει το ρομπότ από πλήρη περιστροφή yaw, στην περίπτωση που αυτός ο β.ε. είναι ελεύθερος. Επομένως, ναι μεν επιθυμείται το κλείδωμα / ξεκλείδωμα του yaw, ωστόσο αυτό πρέπει να περιορίζεται σε ένα εύρος ασφαλείας. Το εύρος ασφαλείας αυτό δίνεται στις ±15°. Για το σκοπό αυτό στον άξονα περιστροφής z εφαρμόζονται πλευρικά δύο cam followers τα οποία κινούνται μέσα σε ειδικά διαμορφωμένα αυλάκια (slots) στο οριζόντιο επίπεδο του gimbal. Τέλος, για τη μείωση των τριβών, χρησιμοποιήθηκαν αξονικά και ακτινικά έδρανα κύλισης της εταιρίας SKF. Τα εξαρτήματα αυτά φαίνονται στο Σχήμα 4-40.



Σχήμα 4-39. Αρχική μορφή gimbal. Αποτελείται από τρείς πλάκες που ενώνονται σε σχήμα «Π» και άξονα που αποτελείται επίσης από τρία συνδεδεμένα κομμάτια.



Σχήμα 4-40. Σχεδιασμός και κατασκευή gimbal.

Ο σχεδιασμός και υπολογισμός των διαστάσεων του αυλακιού, έγινε λαμβάνοντας υπ όψιν τις διαστάσεις του cam follower (εξωτερική διάμετρος 16mm) αλλά και την προδιαγραφή των ±15° για την ελευθερία στην περιστροφή yaw, που δίνεται αρχικά. Επομένως σύμφωνα με το Σχήμα 4-41, και το νόμο των ημιτόνων παίρνουμε το παρακάτω σύστημα. Σύμφωνα με τη λύση του παρακάτω συστήματος,

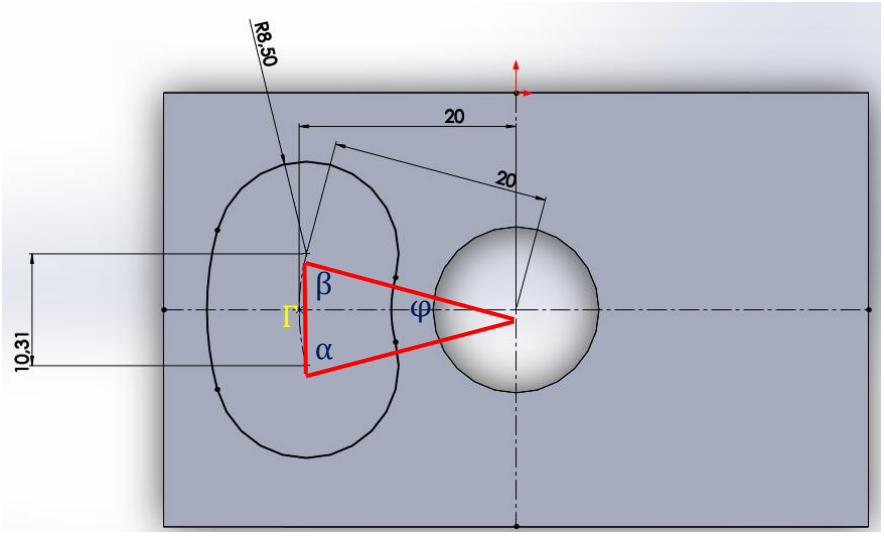
$$\varphi = 15 + 15 = 30 \tag{4-3}$$

$$\frac{sin30}{\Gamma} = \frac{sin\beta}{20} = \frac{sin\alpha}{20} \tag{4-4}$$

$$\alpha = \beta \tag{4-5}$$

$$\alpha + \beta + 30 = 180 \tag{4-6}$$

Άρα από τις (4-3), (4-4), (4-5) και (4-6) παίρνουμε τελικά Γ=10.3mm.



Σχήμα 4-41. Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιού.

4.5.8 Υλοποίηση της περιστροφής pitch

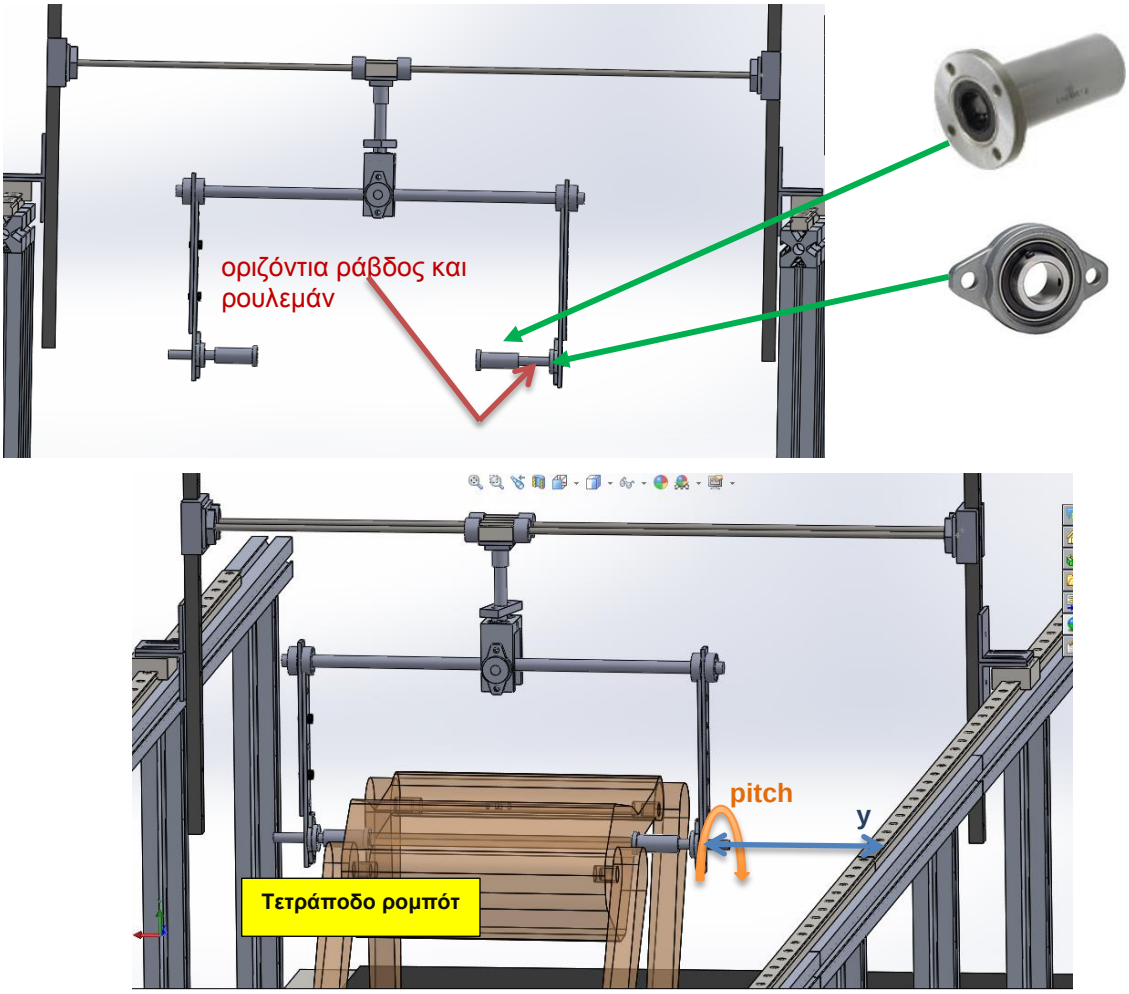
Η υλοποίηση της περιστροφικής κίνησης pitch, επιτυγχάνεται με σχετικά απλό τρόπο και έχει ως εξής: το ρομπότ συνδέεται με το μηχανισμό στήριξης στο σημείο της μέσης και όσο το δυνατό πιο κοντά στο κέντρο βάρους του. Ο μηχανισμός σύνδεσής του περιλαμβάνει δύο ράβδους κυκλικής διατομής Φ12 από Al 7075 T6 που τοποθετούνται με κατάλληλο τρόπο ώστε να ταυτίζονται με τον άξονα y, επομένως η προέκτασή τους να «διαπερνά» πλευρικά το ρομπότ και να περνά από το κ.β. του. Έτσι το ρομπότ περιστρέφεται γύρω από τις ράβδους αυτές δίνοντας το β.ε. pitch (Σχήμα 4-42). Για την ομαλή περιστροφή γύρω από τους άξονες, χρησιμοποιείται ειδικό ρουλεμάν (flanged linear bushing) της εταιρίας MISUMI.

Στην περίπτωση που επιθυμείται ο β.ε. pitch να απομονωθεί (κλείδωμα), το ρουλεμάν αντικαθίσταται από shaft support, το οποίο πακτώνει τις ράβδους πάνω στο σώμα του ρομπότ και επομένως καταργείται η περιστροφή και ο β.ε. (Σχήμα 4-43).

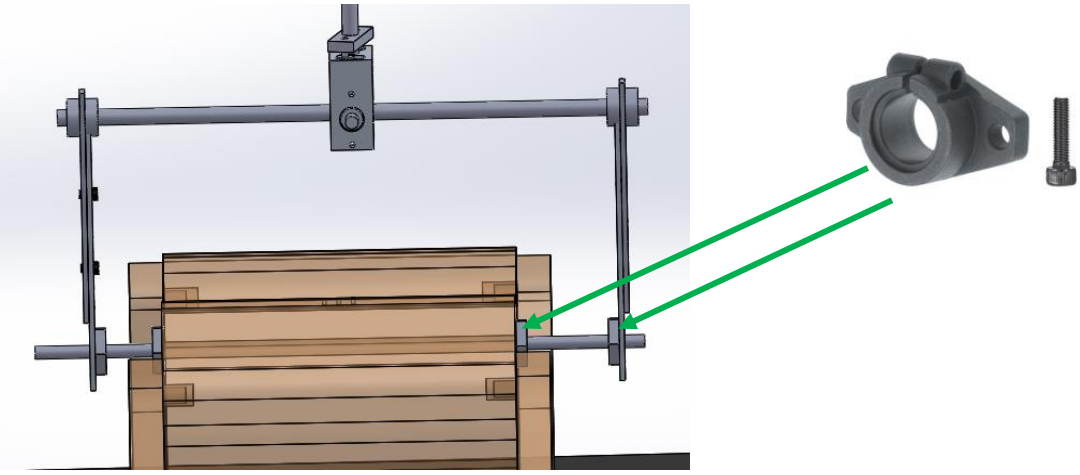
Σημαντικό στοιχείο στο στάδιο αυτό, είναι ο τρόπος σύνδεσης του μηχανισμού με το ρομπότ. Εφόσον έχει τεθεί εξ αρχής η προδιαγραφή της προσαρμοστικότητας (μια κατασκευή – πολλά διαφορετικά ρομπότ), θα πρέπει ο μηχανισμός να έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει τις διαστάσεις του ανάλογα με το μέγεθος του ρομπότ που εφαρμόζεται πάνω του.

Επομένως, θα πρέπει τα κάθετα πλευρικά στοιχεία που ενώνουν τον άξονα y με τη ράβδο του gimbal, να είναι μεταβλητού μήκους. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο πλάκες που συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα για να αποτελέσουν μια συμπαγή πλάκα με δυνατότητα μεταβολής του μήκους της πλάκας αυτής ανάλογα με τον τρόπο που συνδέονται οι δύο επιμέρους (Σχήμα 4-44).

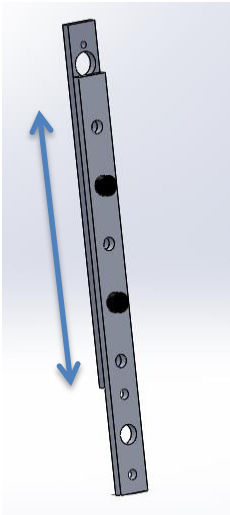
Ακόμα, η διάσταση που θα πρέπει να ρυθμίζεται είναι κατά πλάτος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά shaft collars που ενώνουν την οριζόντια ράβδο του gimbal με τις πλευρικές πλάκες, τα οποία ανάλογα με το πλάτος του ρομπότ, βιδώνονται κατά μήκος της ράβδου αυτής στο επιθυμητό πλάτος (Σχήμα 4-45).



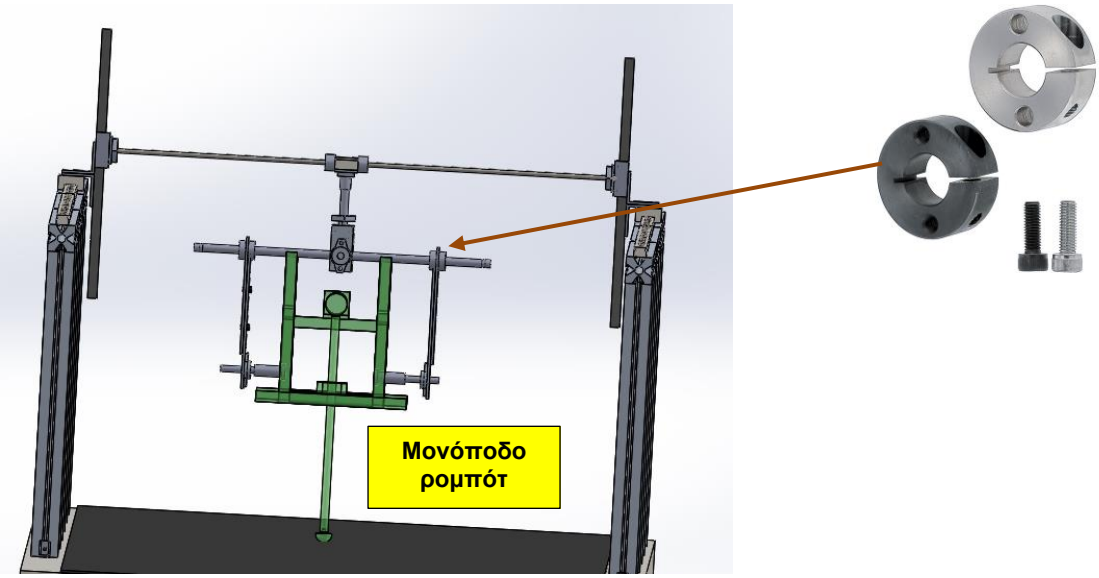
Σχήμα 4-42. Τελική μορφή μηχανισμού. Το pitch προκύπτει από την περιστροφή του ρομπότ γύρω από τις οριζόντιες ράβδους με τη βοήθεια των ρουλεμάν.



Σχήμα 4-43. Αντικατάσταση ρουλεμάν με shaft support για κλείδωμα του pitch.



Σχήμα 4-44. Πλευρικές πλάκες για σύνδεση. Μετατοπίζοντας παράλληλα τη μια πλάκα σε σχέση με την άλλη και ευθυγραμμίζοντας τις οπές ο χρήστης βιδώνει τις δύο πλάκες, ρυθμίζοντας έτσι το επιθυμητό τελικό μήκος.



Σχήμα 4-45. Προσαρμοστικότητα κατασκευής. Παρίσταται το μονόποδο ρομπότ του εργαστηρίου. Η κατασκευή προσαρμόζεται στις διαστάσεις του ρομπότ που φέρει. Για το πλάτος, βιδώνονται τα shaft collars της εικόνας κατά μήκος της ράβδου του gimbal.

4.5.9 Μηχανισμός συγκράτησης του ρομπότ για την προστασία του από πτώση

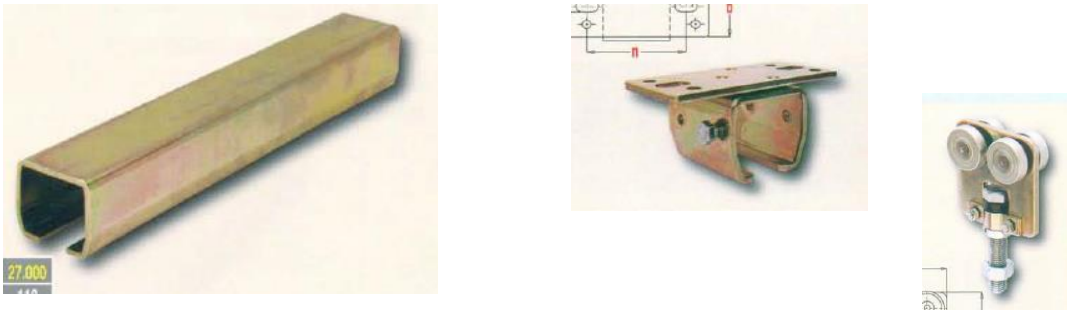
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο παραπάνω μηχανισμός δεν εξασφαλίζει την ασφάλεια του ρομπότ σε περίπτωση πτώσης. Αυτό γιατί θα έπρεπε να κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο που θα αυξανόταν αρκετά το συνολικό φορτίο (μάζα κατασκευής). Για το σκοπό αυτό σχεδιάζεται σύστημα με σιδηρόδρομο που πακτώνεται στο ταβάνι του χώρου του εργαστηρίου και παράλληλα με τον κυλιόμενο διάδρομο. Ο σιδηρόδρομος αυτός φέρει ένα σύστημα από τροχαλίες που συνδέονται με το ρομπότ με συρματόσχοινα. Ανάλογα με το ύψος του ρομπότ αλλά και το εύρος της κίνησής του στο κάθετο επίπεδο (β.ε. u / d), ρυθμίζεται το μήκος του συρματόσχοινου μέσα από τις τροχαλίες. Έτσι, σε περίπτωση πτώσης, το συρματόσχοινο συγκρατεί το ρομπότ σε ύψος ασφαλείας πάνω από το διάδρομο χωρίς παράλληλα να περιορίζει το εύρος κίνησής του προς τα πάνω ή κάτω.

Το πλεονέκτημα της λύσης αυτής είναι ότι μπορεί να υπερδιαστασιολογηθεί προκειμένου να παρέχει μεγάλο συντελεστή ασφαλείας της κατασκευής για την εξασφάλιση της προστασίας του

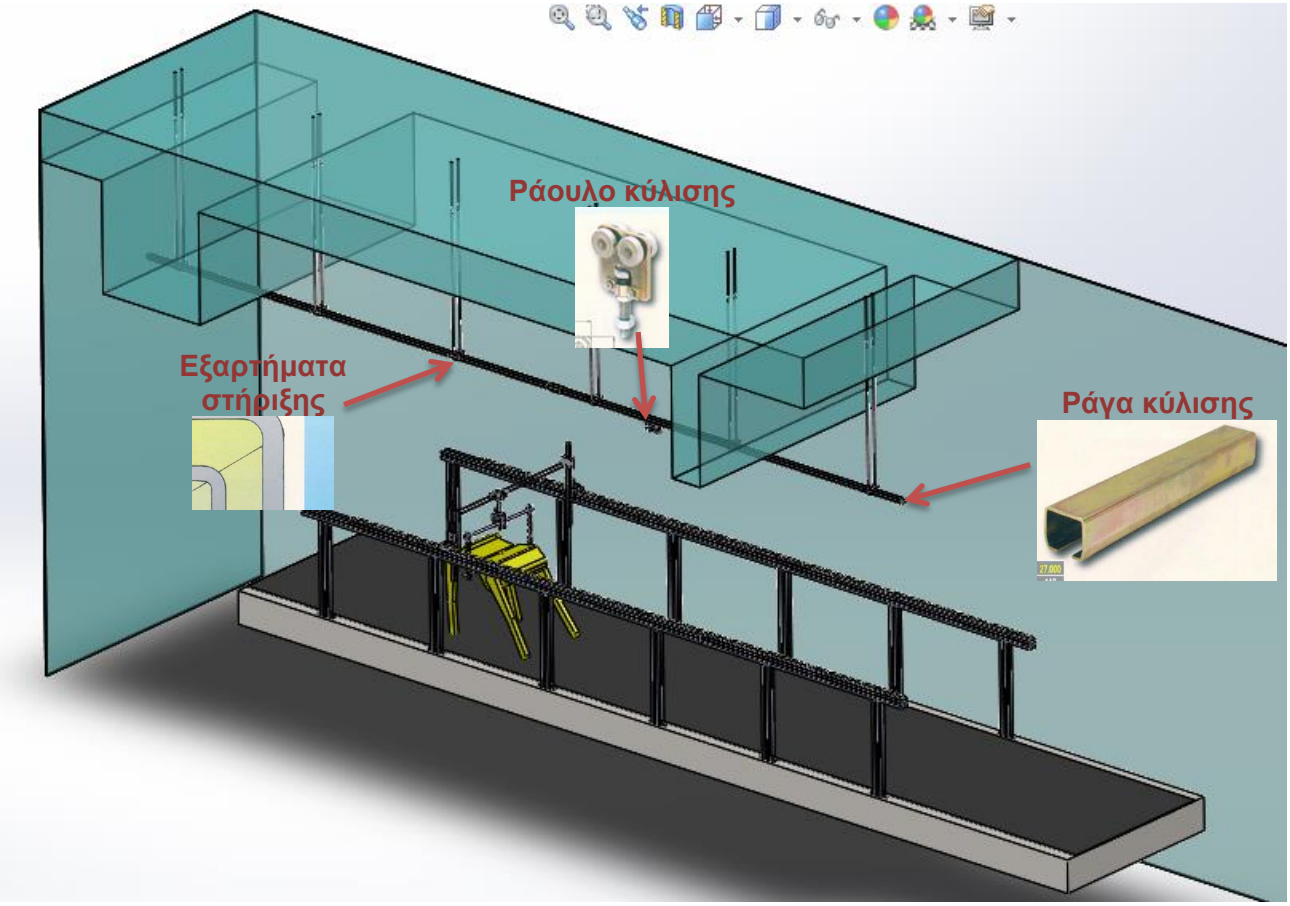
ρομπότ, χωρίς να επηρεάζει το φορτίο πάνω του (παράγων που έχει τεθεί προς ελαχιστοποίηση από τις προδιαγραφές), μιας και πακτώνεται στο ταβάνι.

Επιπλέον η λύση αυτή εξασφαλίζει την τοποθέτηση του ρομπότ πάνω στον κυλιόμενο διάδρομο από το χρήστη με ασφάλεια. Το μήκος της ράγας ξεπερνά το όριο του κυλιόμενου διαδρόμου, έτσι ώστε το ρομπότ να δένεται με τα συρματόσχοινα πάνω στη ράγα σε σημείο εκτός διαδρόμου. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των τροχαλιών, ο χρήστης ανεβάζει το ρομπότ πάνω στο διάδρομο και το «οδηγεί» για πρόσδεση στο μηχανισμό των έξι β.ε.

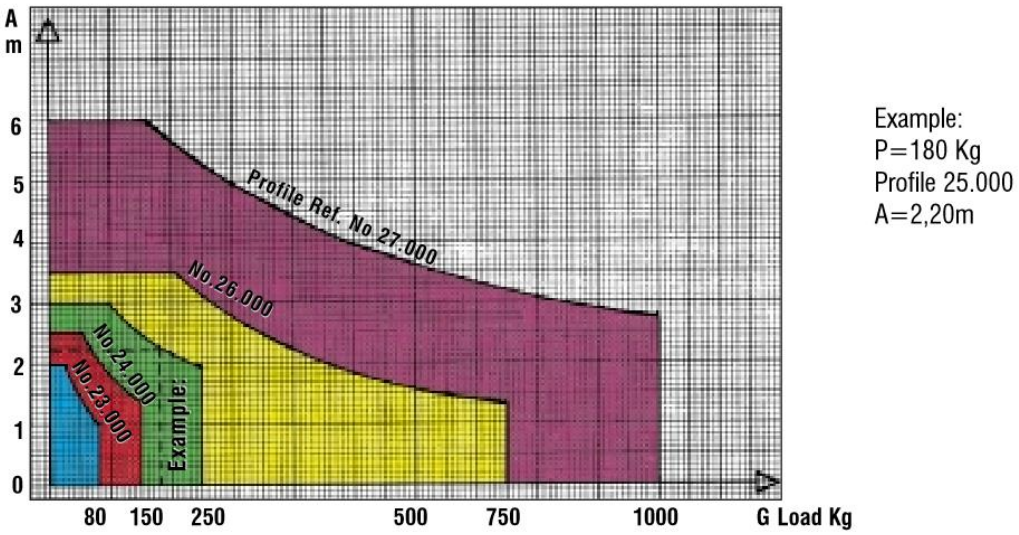
Τα μηχανικά μέρη που χρησιμοποιούνται είναι ράγες της εταιρίας Niko Track, καθώς και τα αντίστοιχα εξαρτήματα τους (Σχήμα 4-46). Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος, γίνεται αναφορά στις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Σύμφωνα με αυτές (Σχήμα 4-48), επιλέγεται η σειρά 24000 και η απόσταση μεταξύ των πακτώσεων περίπου 1.8m, με δεδομένο το φορτίο των 90kg → 900N.



Σχήμα 4-46. Ράγες, εξάρτημα στήριξης από το ταβάνι και ράουλο κύλισης που κινείται μέσα στο προφίλ της ράγας για να φέρει την τροχαλία για τα συρματόσκοινα που συγκρατούν το ρομπότ.



Σχήμα 4-47. Στήριξη ραγών και σύστημα συγκράτησης ρομπότ. Με μπλε χρώμα τα χωροταξικά όρια του εργαστηρίου – τοποθέτηση του διαδρόμου σε σχέση με τοίχους.



Σχήμα 4-48. Προδιαγραφές προμηθευτή για επιλογή μοντέλου ράγας. Ανάλογα με το φορτίο, επιλέγεται από την καμπύλη η αντίστοιχη σειρά προφίλ και η προτεινόμενη απόσταση A μεταξύ των πακτώσεων.

4.6 Κατασκευή μηχανισμού

Στην ενότητα αυτή, γίνεται λόγος για την κατασκευή των εξαρτημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω, τη συναρμολόγηση των μηχανικών μερών αλλά και την αξιολόγηση του τελικού αποτελέσματος. Ακολουθεί και πάλι μια διαδικασία βελτιώσεων πάνω στην ήδη υπάρχουσα κατασκευή, ενώ παρουσιάζεται η συγκριτική μελέτη των εναλλακτικών βελτιώσεων.

4.6.1 Κατασκευή πρωτοτύπου

Το σχεδιασμό που περιγράφηκε παραπάνω ακολουθεί η κατασκευή ενός ολοκληρωμένου πρωτοτύπου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μηχανισμός περιλαμβάνει στοιχεία σχεδιασμένα εξ' αρχής και κατασκευασμένα στο μηχανουργείο του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου είτε με χειροκίνητη φρέζα / τόρνο είτε με αριθμητικά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή. Ακόμα, για τις ανάγκες της αποτύπωσης της μακέτας, εφαρμόστηκε και η πρακτική της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τέλος, χρησιμοποιούνται και εξαρτήματα από την αγορά.

Τα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν είναι φτιαγμένα από αλουμίνιο 7075 T6. Πρόκειται για κράμα αλουμινίου που έχει υποστεί βαφή. Το κράμα αυτό, έχει αυξημένη αντοχή και παράλληλα αρκετά χαμηλή πυκνότητα, πράγμα που το καθιστά αρκετά αξιόπιστο για κατασκευές όπου απαιτείται τόσο η αυξημένη αντοχή όσο και η ελαχιστοποίηση της μάζας (Σχήμα 4-49).

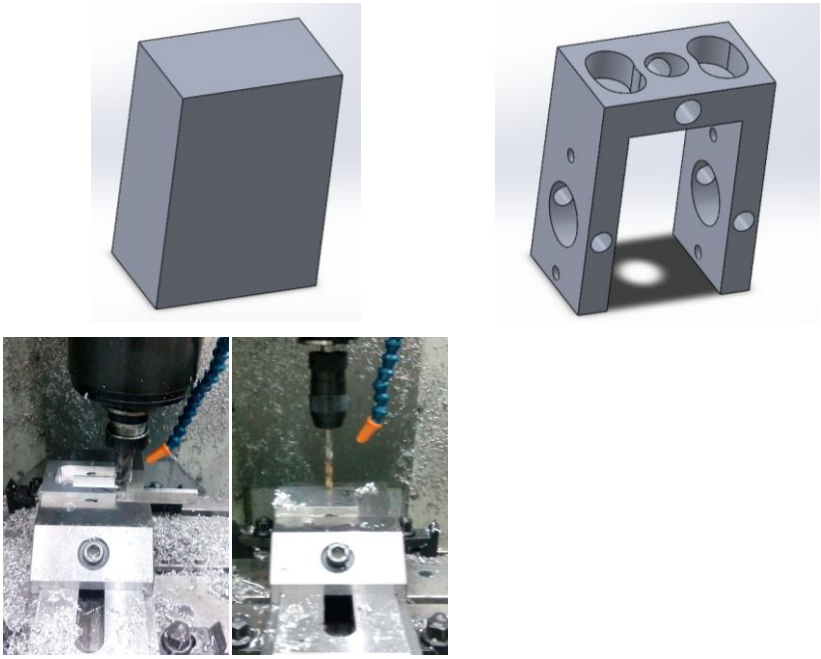
Η διαδικασία της βαφής, συναντάται κυρίως στην επεξεργασία χάλυβα. Απλή βαφή ή βαφή είναι η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, που περιλαμβάνει ένα στάδιο θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα (ωστενιτοποίηση) σε θερμοκρασία ίδια με αυτή της πλήρους ανοπτήσεως και ένα ακόλουθο στάδιο απότομης ψύξης, με βάπτιση του χάλυβα σε κάποιο μέσο ψύξης (αλατόνερο, νερό, λάδι, αέρας). Στόχος της βαφής είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού (σκληρότητα, αντοχή), που απαιτούνται για τη λειτουργία του (π.χ. εργαλεία κοπής, καλούπια διαμόρφωσης, κ.λπ.). Έτσι, ένας χάλυβας με αρχική σκληρότητα 150-250 HV μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα πάνω από750-800 HV, έπειτα από βαφή**.**

Το gimbal που σχεδιάστηκε για να επιτρέπει τους δύο β.ε. στο ρομπότ, κατασκευάστηκε στην εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου *Hass Minimill*. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού είναι το *Solidworks* και για την δημιουργία του g κώδικα και τον προγραμματισμό των toolpath για την κοπή το *Solidcam*. Το πλεονέκτημα του λογισμικού αυτού Solidcam είναι ότι «τρέχει» απ' ευθείας μέσα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα όπου διαμορφώνεται το αρχικό σχέδιο. Εφαρμόστηκαν κατεργασίες αποπεράτωσης προσώπου (face mill), διάτρησης καθώς

και κατεργασίες διαμόρφωσης προφίλ εσωτερικά με χρήση «ποκέτας» (pocket). Ο συνολικός χρόνος κατεργασίας διαμορφώνεται στις 5 ώρες συμπεριλαμβανομένων των τεσσάρων αλλαγών στη θέση του κομματιού προς κατεργασία πάνω στην εργαλειομηχανή για την κατεργασία κάθε πλευράς με το κατάλληλο toolpath.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.81 g/cc	0.102 lb/in³	AA; Typical
Mechanical Properties			
Hardness, Brinell	150	150	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	191	191	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	53.5	53.5	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	87	87	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	175	175	Converted from Brinell Hardness Value
Ultimate Tensile Strength	572 MPa	83000 psi	AA; Typical
Tensile Yield Strength	503 MPa	73000 psi	AA; Typical
Elongation at Break	11 %	11 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
Elongation at Break	11 %	11 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
Modulus of Elasticity	71.7 GPa	10400 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Poisson's Ratio	0.33	0.33	
Fatigue Strength	159 MPa	23000 psi	AA; 500,000,000 cycles completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
Fracture Toughness	20 MPa-m½	18.2 ksi-in½	K(IC) in S-L Direction
Fracture Toughness	25 MPa-m½	22.8 ksi-in½	K(IC) in T-L Direction
Fracture Toughness	29 MPa-m½	26.4 ksi-in½	K(IC) in L-T Direction
Machinability	70 %	70 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	26.9 GPa	3900 ksi	
Shear Strength	331 MPa	48000 psi	AA; Typical

Σχήμα 4-49. Μηχανικές ιδιότητες κράματος Al 7075 T6.



Σχήμα 4-50. Κατασκευή gimbal στην εργαλειομηχανή: CAD / CAM διαδικασία.

Μια ακόμα τεχνολογία κατασκευής που εφαρμόστηκε, είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση για τα κομμάτια της μακέτας που κατασκευάστηκε. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, αποτελεί τεχνολογία ταχείας

προτυποποίησης (rapid prototyping). Αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό σε συνδυασμό με το σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής είναι οι λόγοι που επιλέχθηκε μια τέτοια μέθοδος κατασκευής για το σκοπό της αποτύπωσης ενός πρωτότυπου σχεδίου πολύ πριν την κατασκευή του, με στόχο να εξεταστεί η λειτουργικότητά του. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο τριδιάστατος εκτυπωτής του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου *U Print*, ενώ το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του προγράμματος εκτύπωσης, είναι το *Catalyst*. Μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση, ακολούθησε διαδικασία αφαίρεσης του συμπληρωματικού υλικού που διαμορφώνεται κατά την εκτύπωση μαζί με το μοντέλο για λόγους καλύτερης στατικότητας κατά την εκτύπωση. Πρόκειται για τοποθέτηση του κομματιού μέσα σε λουτρό νερού θερμοκρασίας μέχρι και 75 βαθμών κελσίου και ειδικού χημικού. Συνολικά ο χρόνος εκτύπωσης και αποπεράτωσης στο λουτρό ανήλθε σε 11 ώρες.

Παρακάτω φαίνεται η μορφή της τελικής κατασκευής που κατασκευάστηκε και συναρμολογήθηκε μετά τις αρχικές βελτιώσεις. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αρκετά βελτιωμένο σε σχέση με το αρχικό, ωστόσο επιδέχεται κατασκευαστικών βελτιώσεων όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Σχήμα 4-51. Τελική μορφή πρωτότυπης κατασκευής.

4.6.2 Αξιολόγηση και ορισμός βελτιώσεων

Η κατασκευή που προέκυψε έχει αρκετά βελτιωμένα χαρακτηριστικά που προέρχονται από τις βελτιώσεις κάθε κομματιού του μηχανισμού ξεχωριστά όπως αναλύθηκαν παραπάνω. Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν σε ακρίβεια στην κίνηση, στιβαρότητα, μείωση των τριβών και βελτίωση των ανοχών από κατεργασίες.

Σε αυτό το στάδιο, ορίζονται κάποια ακόμα σημεία που χρειάζονται βελτίωση. Κατά τη συναρμολόγηση, παρατηρήθηκε έντονη παραμόρφωση στις ράβδους των γραμμικών ρουλεμάν για την κίνηση l / r, σε άσκηση ροπής στρέψης αλλά και κάθετου φορτίου.

Για τη βελτίωση της παραμόρφωσης στη ροπή στρέψης και σε κάθετο φορτίο, προτάθηκε η αναδιαμόρφωση του μηχανισμού με τις ράβδους με διαφορετικές εναλλακτικές όπως αναλύονται στην Ενότητα 5.2.4. Η βελτίωση του μηχανισμού αυτού αφορά στην εναλλακτική που προτείνεται στην Ενότητα 5.1.6 και στην 5.1.7.

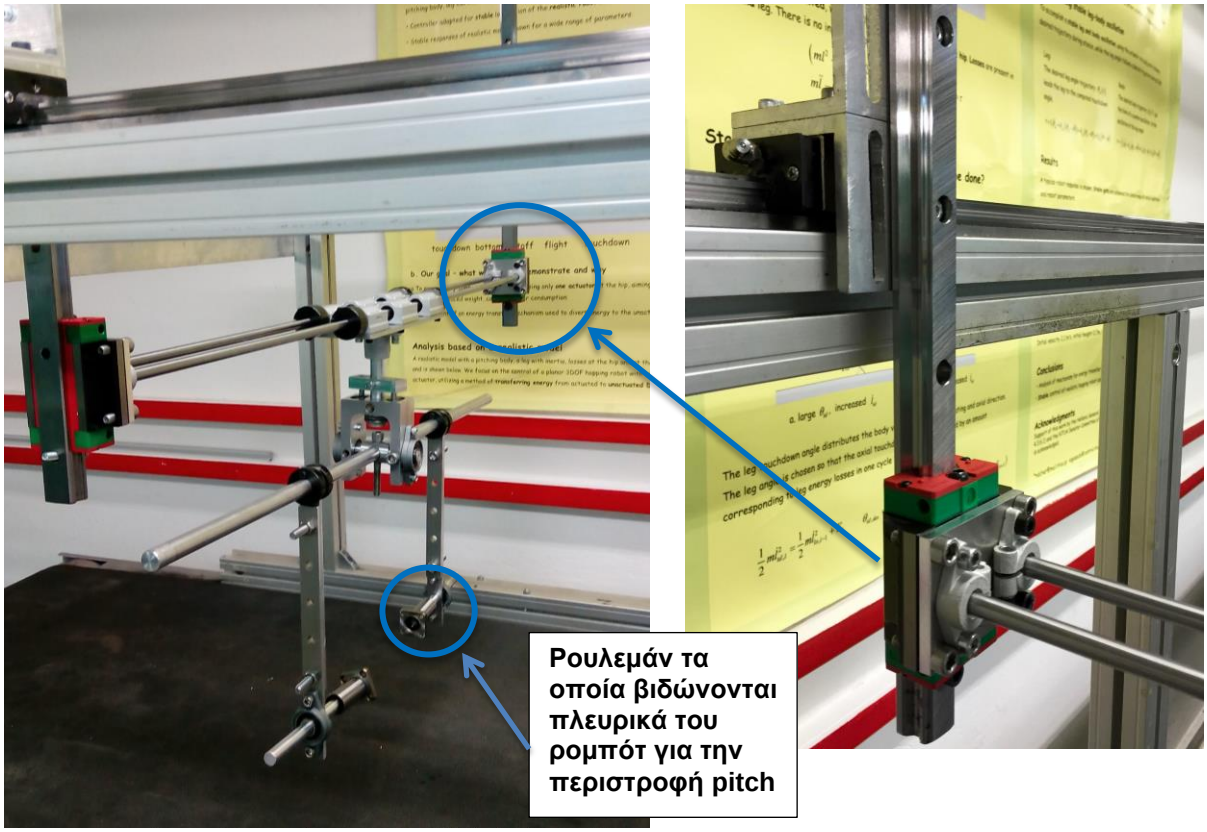
Ακόμα, βελτιώθηκε σχεδιαστικά και κατασκευαστικά από άποψης αντοχής ο κεντρικός άξονας του gimbal σύμφωνα με τα στοιχεία στην Ενότητα 5.1.5. Η βελτίωση του άξονα φαίνεται στο Σχήμα 4-52.

Σχήμα 4-52. Τελική μορφή άξονα gimbal.

4.7 Τελική κατασκευή

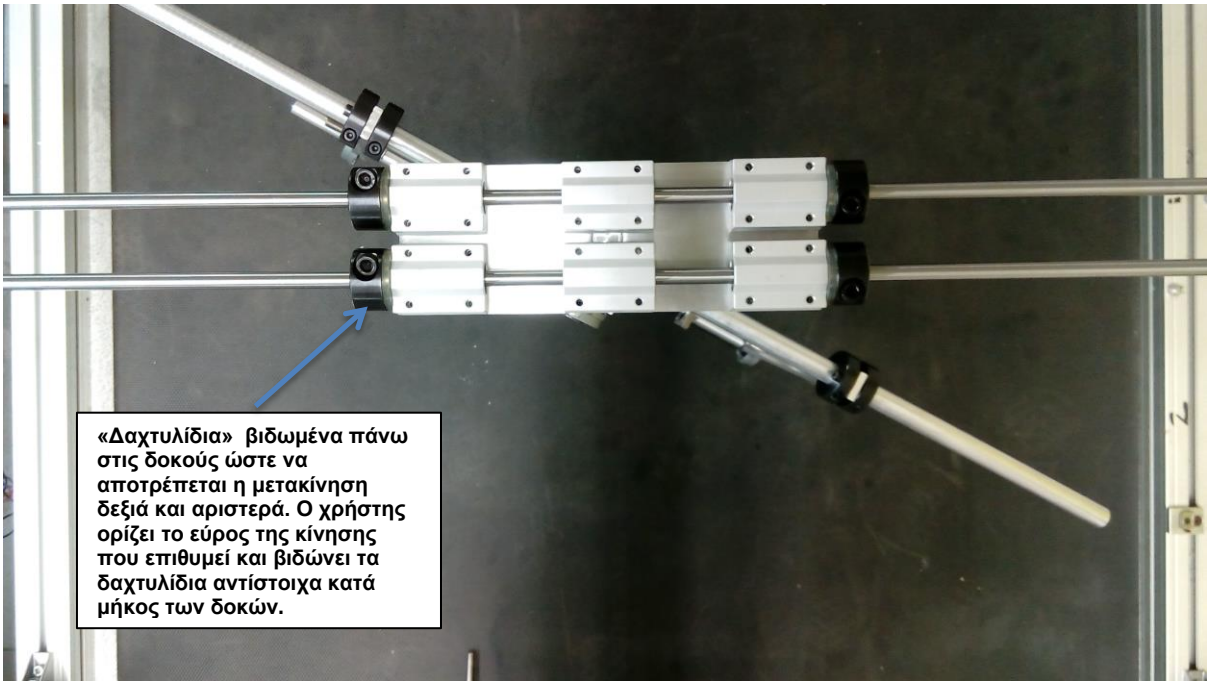
Η τελική κατασκευή όπως προέκυψε από την σχεδιομέλετη, τη μελέτη αντοχής των εξαρτημάτων αλλά και τις λειτουργικές βελτιώσεις φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

Σχήμα 4-53. Πρόσοψη μηχανισμού επάνω στο διάδρομο.

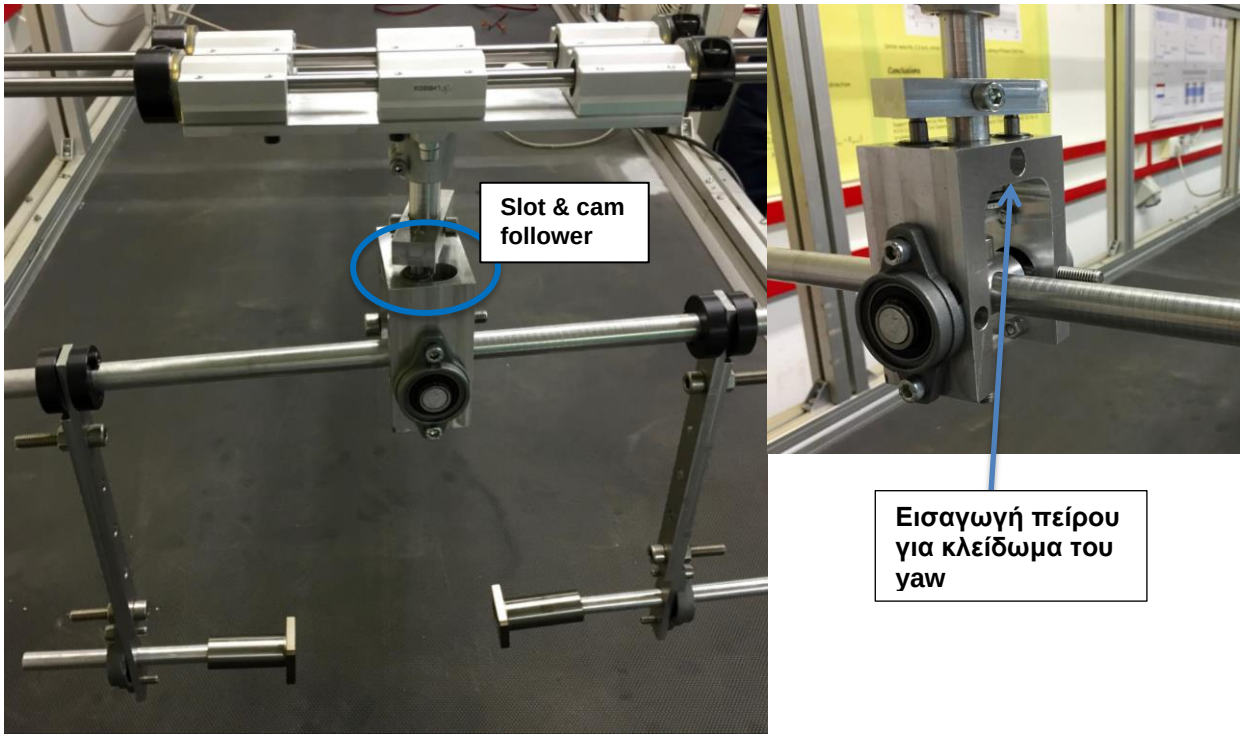


Σχήμα 4-54. Πλαϊνή όψη μηχανισμού και γραμμικοί οδηγοί για β.ε. u / d.

Σχήμα 4-55. Ανοιχτοί β.ε. roll και yaw.



Σχήμα 4-56. Κάτοψη μηχανισμού, γραμμικά ρουλεμάν και δοκοί ακριβείας για l / r – ανοιχτός β.ε. yaw, l /r κλειδωμένο.



Σχήμα 4-57. Αυλάκια (slots) για κύλιση των cam follower και gimbal.

5 Προσομοιώσεις / πειράματα στατικής ανάλυσης μηχανικών μερών κατασκευής

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται αναφορά στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας που περιλαμβάνει στατική ανάλυση των μερών της κατασκευής στο λογισμικό πακέτο Solidworks. Η ανάλυση αυτή γίνεται για τα μηχανικά μέρη που κατασκευάζονται στο εργαστήριο και ακόμα για κάποια εξαρτήματα που συνθέτουν το μηχανισμό, για το οποία δεν αρκούν οι προδιαγραφές του προμηθευτή.

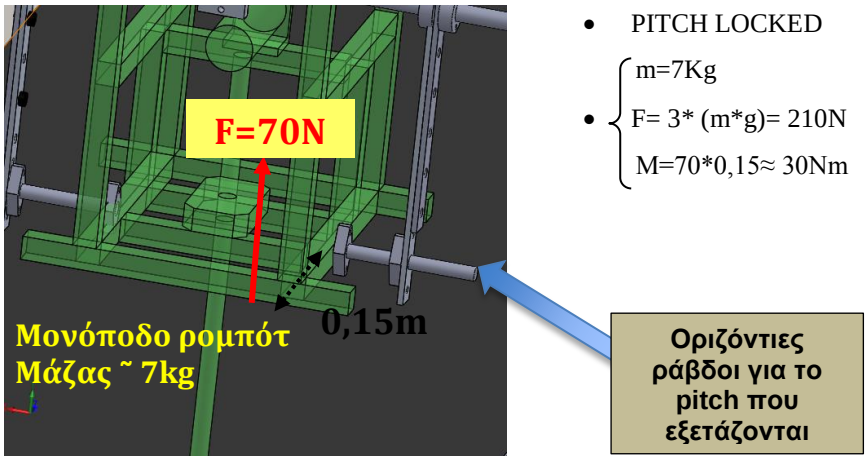
5.1 Στατική ανάλυση μηχανικών μερών κατασκευής

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία της στατικής ανάλυσης. Τα κομμάτια του μηχανισμού εξετάζονται είτε καθένα ανεξάρτητα, είτε σε συναρμολόγημα, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί, ότι για τις ανάγκες της προσομοίωσης στο λογισμικό, γίνονται κάποιες παραδοχές κατά περίπτωση. Τα σενάρια που εξετάζονται αφορούν στη μελέτη της καταπόνησης στο χειρότερο σενάριο, όπως θα λέγαμε. Άρα εδώ εισάγεται πλέον η λογική της μελέτης στον ήδη διαστασιολογημένο σχεδιασμό του πιο «επιβαρυμένου» ενδεχόμενου φορτίου που μπορεί να ασκηθεί σε κάθε κομμάτι του μηχανισμού. Οι αναλύσεις που παρουσιάζονται εδώ, αφορούν στα τελικά στοιχεία του μηχανισμού και όχι στις αναλύσεις που μελετήθηκαν σε πρότερο στάδιο διαμόρφωσης των μερών, οι οποίες τελικά οδήγησαν σε βελτιώσεις και αλλαγές σχεδιασμού και διαστασιολόγησης, με τελική επιλογή τα μέρη που εξετάζονται εδώ.

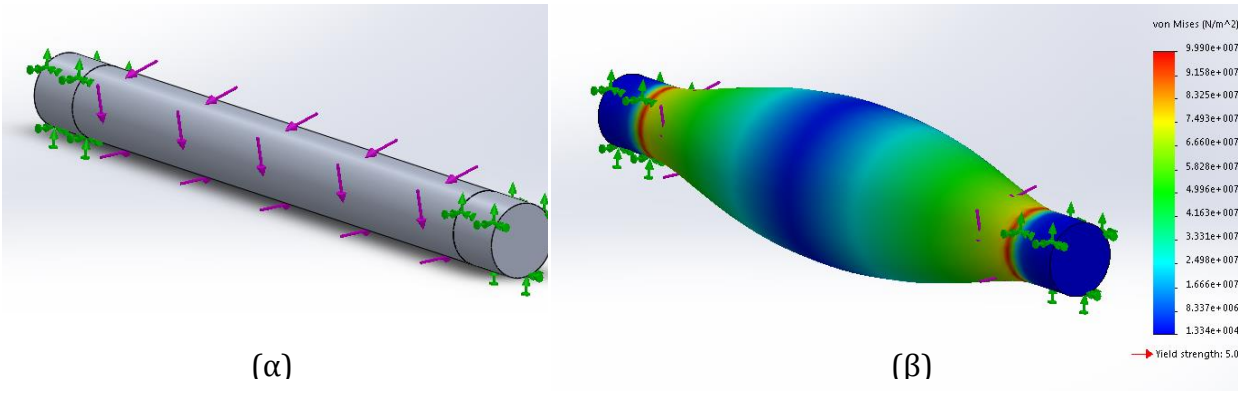
5.1.1 Άσκηση ροπής στις οριζόντιες ράβδους του pitch – προσομοίωση σε τεμάχιο

Ξεκινώντας από το κομμάτι σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό, εκείνο που πρέπει να αναλυθεί είναι οι πλευρικές ράβδοι που «διαπερνούν» οριζόντια το ρομπότ και συνδέονται με αυτό με ρουλεμάν. Σε αυτό το σημείο δίνεται ο β.ε. pitch (Σχήμα 4-42). Εκείνο που εξετάζεται είναι η αντοχή της ράβδου σε περίπτωση κλειδώματος του μηχανισμού και άρα σε άσκηση μιας αντίστοιχης ροπής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε περίπτωση κλειδώματος του pitch, οι ενέργειες που απαιτούνται είναι η αντικατάσταση των ρουλεμάν με shaft supports, έτσι ώστε να αποφεύγεται η περιστροφή του ρομπότ γύρω από τις ράβδους και να επιτυγχάνεται η πάκτωση τους με το ρομπότ.

Οι παραδοχές που γίνονται εδώ αφορούν στο μέγεθος του φορτίου. Δεδομένου ότι η κατασκευή θα πρέπει να υποστηρίζει κλείδωμα του pitch κυρίως για το μονόποδο ρομπότ του εργαστηρίου, το οποίο είναι κατά πολύ ελαφρύτερο από τα τετράποδα, οι προσομοιώσεις γίνονται για την αντίστοιχη ροπή υπολογισμένη όπως στο Σχήμα 5-1.Τελικά η προσομοίωση, αφορά στην άσκηση ροπής M=30Nm στη ράβδο Φ12 (Σχήμα 5-2).



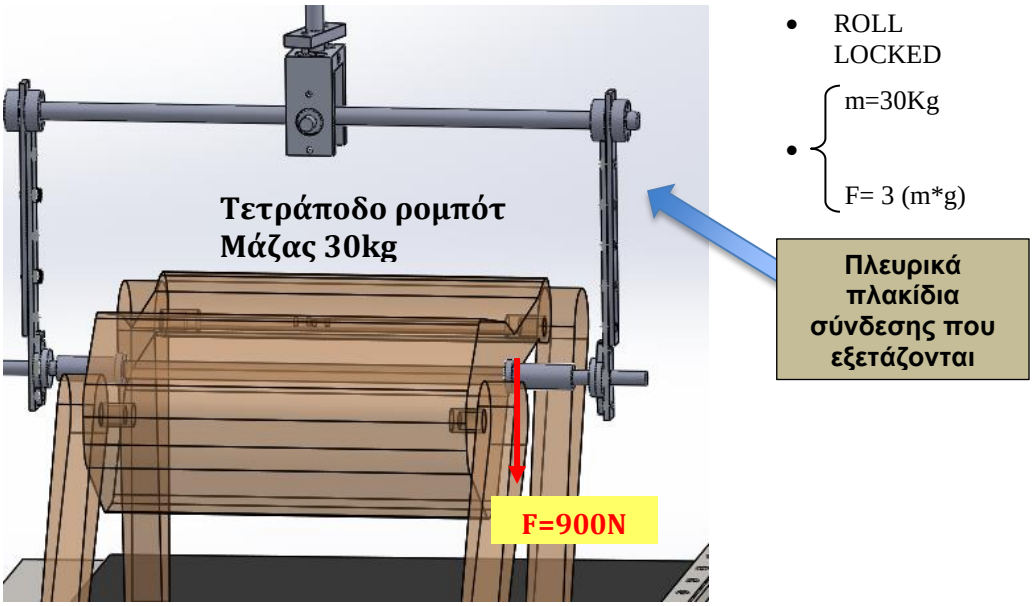
Σχήμα 5-1. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης ράβδου για το pitch. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο.



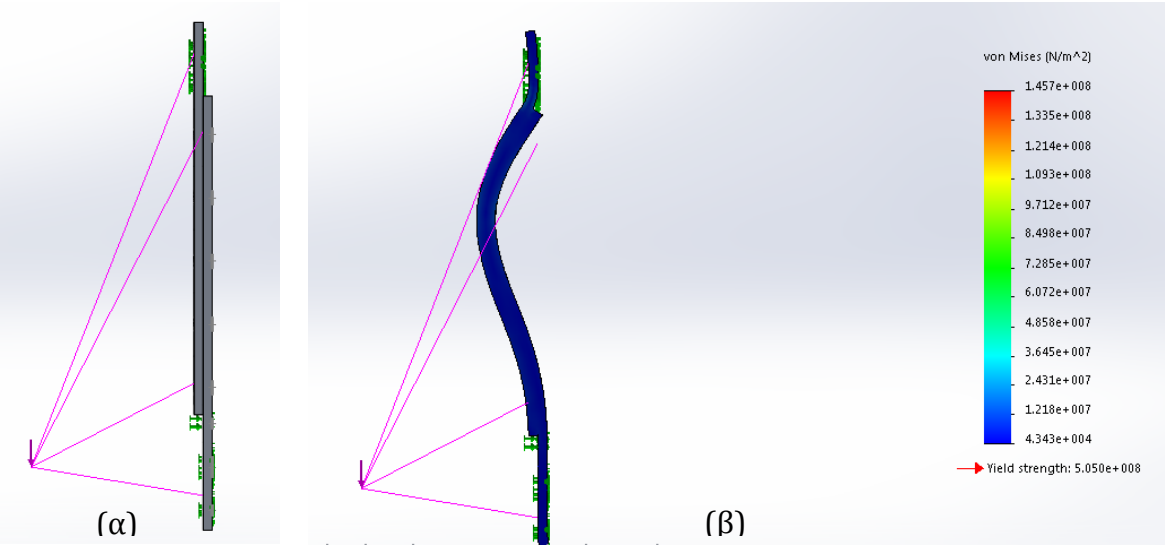
Σχήμα 5-2. (α) Ράβδος Φ12 από Al 7075 T6, 30Nm ροπή και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που πακτώνεται η ράβδος με τη χρήση των shaft supports Φ12. (β) Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505 Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 99 Mpa < 505 Mpa.

5.1.2 Άσκηση μετατοπισμένου φορτίου σε πλευρικά πλακίδια σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό – προσομοίωση σε συναρμολόγημα

Η μελέτη συνεχίζεται με τα πλευρικά κάθετα πλακίδια από Al 7075 T6. Εδώ στόχος είναι να μελετηθεί η καταπόνηση των πλακιδίων σε άσκηση της κάθετης δύναμης από το ρομπότ, στο ενδεχόμενο κλειδώματος του roll (Σχήμα 5-3). Το φορτίο που ασκείται είναι ένα “remote load” στο σημείο όπου συνδέεται το ρομπότ με το μηχανισμό και άρα μπορεί να ασκήσει την κάθετη δύναμη για το roll. Εδώ οι παραδοχές έχουν τεθεί σύμφωνα με την ικανοποίηση του κριτηρίου της προσαρμοστικότητας (ένας μηχανισμός - πολλά διαφορετικά ρομπότ) και άρα το σενάριο αφορά στο ενδεχόμενο της άσκησης του φορτίου αυτού από το βαρύτερο και μεγαλύτερο σε διαστάσεις ρομπότ του εργαστηρίου που μπορεί να ζυγίζει μέχρι και 30kg.



Σχήμα 5-3. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης πλευρικών πλακιδίων σύνδεσης του ρομπότ, roll. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο.



Σχήμα 5-4. (α) Assembly πλακιδίων από Al 7075 T6, 900N remote load και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται τα πλακίδια με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505 Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 145 Mpa < 505 Mpa.

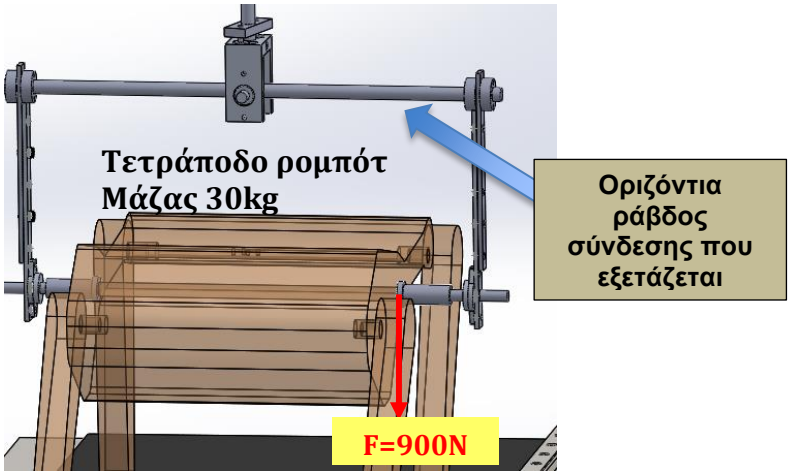
5.1.3 Άσκηση μετατοπισμένου φορτίου σε ράβδο σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό – προσομοίωση σε τεμάχιο

Η ράβδος Φ15 από Al 7075 T6 που συνδέει τα πλευρικά πλακίδια και άρα το ρομπότ με το gimbal, είναι από τα πιο σημαντικά και «ευαίσθητα» στοιχεία του μηχανισμού. Αυτό γιατί, την επηρεάζει άμεσα το κλείδωμα του roll με το αρκετά μεγάλο φορτίο των 900N, απαιτείται από τον σχεδιασμό να έχει σχετικά μεγάλο μήκος και ταυτόχρονα μικρή διάμετρο προκειμένου να μην αυξηθεί κατά πολύ η συνολική μάζα της κατασκευής. Πρόκειται επομένως για μια ράβδο (σώμα το μήκος του οποίου είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερο των άλλων διαστάσεών του) που όμως της ασκούνται εγκάρσια φορτία.

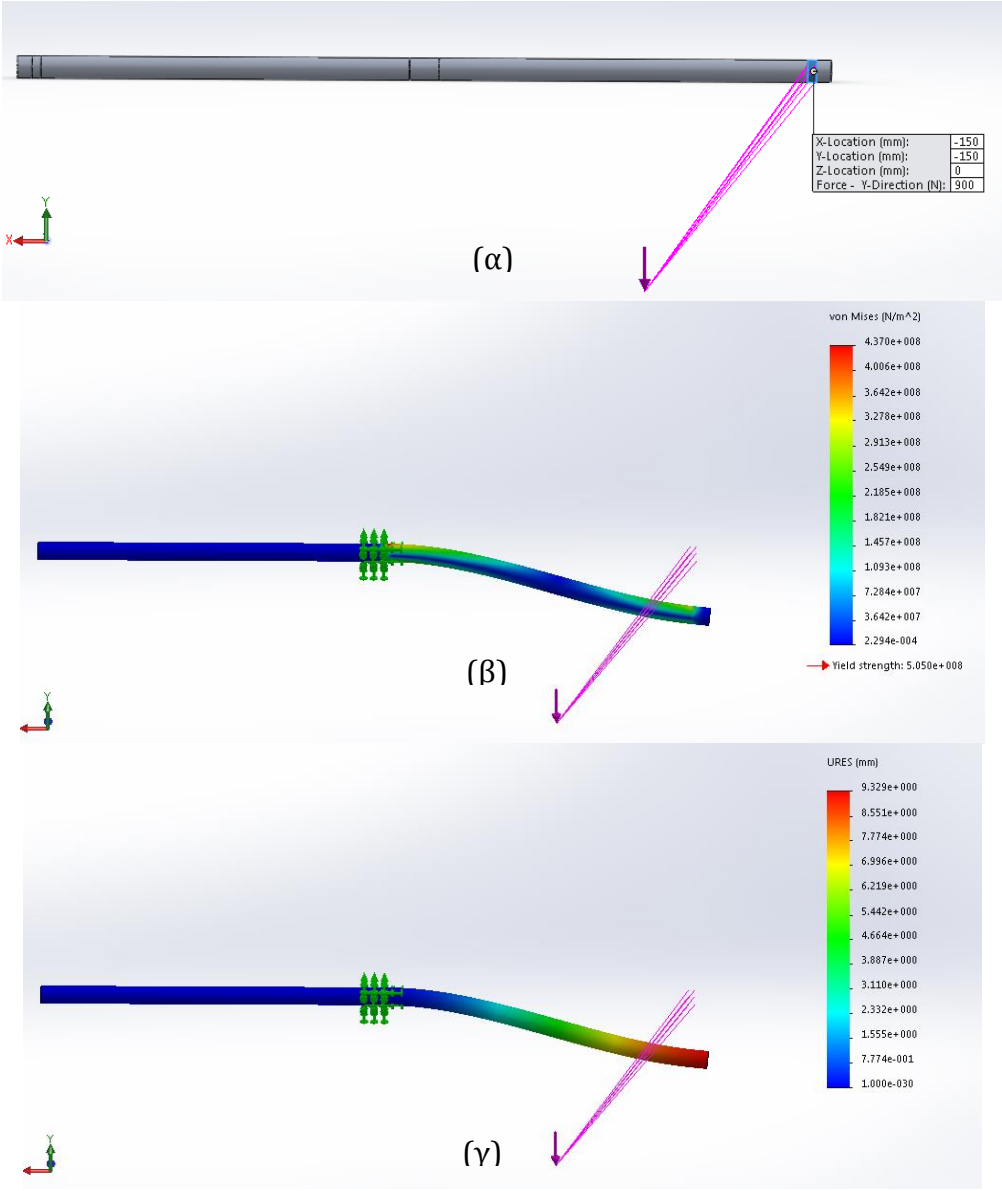
Και εδώ οι παραδοχές έχουν τεθεί σύμφωνα με την ικανοποίηση του κριτηρίου της προσαρμοστικότητας (ένας μηχανισμό πολλά διαφορετικά ρομπότ) και άρα το σενάριο αφορά στο ενδεχόμενο της άσκησης του φορτίου αυτού από το βαρύτερο και μεγαλύτερο σε διαστάσεις ρομπότ του εργαστηρίου που μπορεί να ζυγίζει μέχρι και 30kg. Έτσι το σενάριο που εξετάζεται είναι ένα “remote load” όπως αυτό στην Ενότητα 5.1.2. Οι παραδοχές είναι οι ίδιες όπως και στο Σχήμα 5-3, αυτή τη φορά αλλάζει το τεμάχιο καθώς και το reference point της προσομοίωσης.

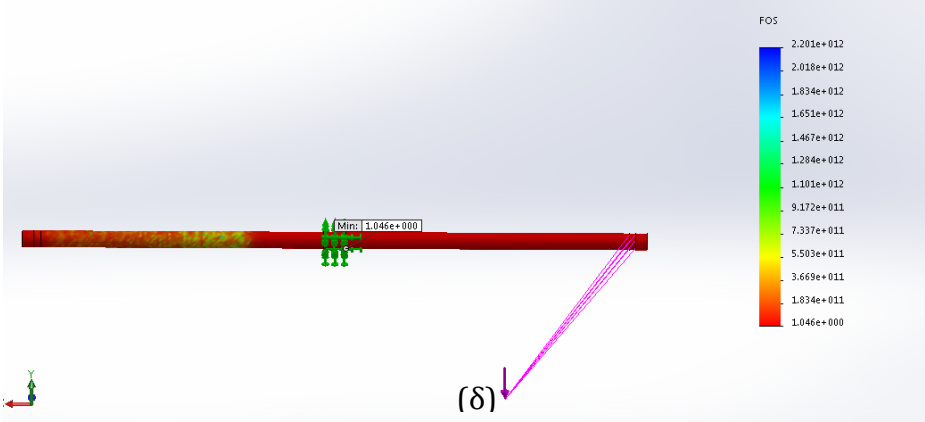
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης που φαίνεται στο Σχήμα 5-6, δείχνει ναι μεν ότι ο το τεμάχιο δεν αστοχεί, ωστόσο όμως το γεγονός ότι η μέγιστη τάση von misses είναι σχετικά κοντά στο όριο διαρροής του υλικού (διαφορά περίπου 70Mpa) καθώς και ότι το βέλος κάμψης που προκύπτει στην περιοχή σύνδεσης με τον υπόλοιπο μηχανισμό είναι σχετικά αυξημένο (περίπου 7mm), αποδεικνύει τον «οριακό» θα λέγαμε σχεδιασμό και διαστασιολόγηση της ράβδου προκειμένου να μην αυξηθεί η μάζα. Αυτό φαίνεται και στο γράφημα (δ) όπου εμφανίζεται ο συντελεστής ασφαλείας αρκετά κοντά στο 1 σχεδόν κατά μήκος ολόκληρης της ράβδου πράγμα που σημαίνει ότι η κατασκευή θα μπορέσει να υποστηρίξει σχεδόν ακριβώς το σχεδιασμένο φορτίο και τίποτα περισσότερο.

Στο στάδιο αυτό, επιλέγεται τελικά αυτή η λύση, μιας και δίνει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα από προηγούμενες διαστασιολογήσεις πχ Φ12 γιατί συνυπολογίζεται το γεγονός ότι η παραδοχή του φορτίου των 900N είναι ήδη υπερδιαστασιολογημένη και τίθεται σαν προτεραιότητα η ελαχιστοποίηση της μάζας.



Σχήμα 5-5. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης οριζόντιας ράβδου σύνδεσης του ρομπότ, roll. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο.



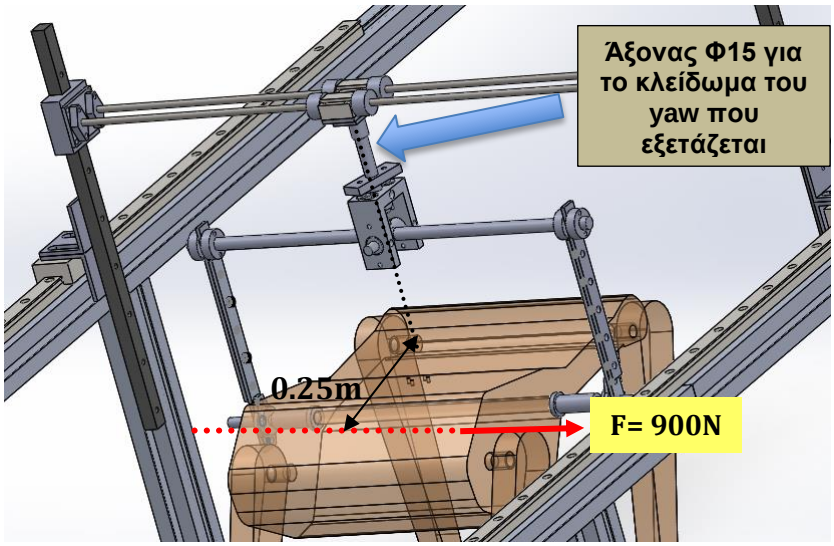


Σχήμα 5-6. (α) Ράβδος Φ15 από Al 7075 T6, 900N remote load και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται τα πλακίδια με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 437Mpa < 505Mpa. (γ) Resultant displacement: μέγιστο βέλος κάμψης στο σημείο έδρασης με τα πλευρικά πλακίδια περίπου 7mm. (δ) FoS: κατά μήκος σχεδόν ολόκληρης της ράβδου ο συντελεστής ασφαλείας βρίσκεται αρκετά κοντά στο 1.

5.1.4 Άσκηση ροπής στον κάθετο άξονα σύνδεσης της κατασκευής με το gimbal – προσομοίωση σε τεμάχιο

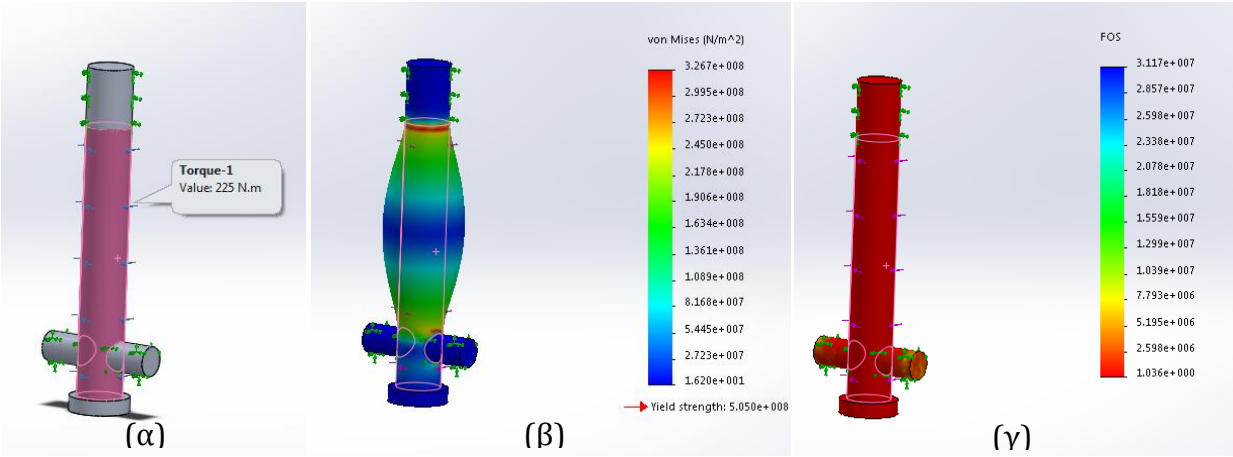
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η περιστροφή yaw, προκύπτει από την περιστροφή όλου του συστήματος σύνδεσης του ρομπότ μέσω το gimbal γύρω από τον κάθετο άξονα Φ15 από Al 7075 T6 (Σχήμα 4-40). Το κλείδωμα της περιστροφής yaw, γίνεται με τη χρήση ενός πείρου Φ10 που διαπερνά τον άξονα και το gimbal (Σχήμα 4-21).

Επομένως, το σενάριο που εξετάζεται εδώ είναι η αντοχή τόσο του άξονα όσο και του πείρου. Οι παραδοχές και εδώ αφορούν στο μέγιστο ενδεχόμενο φορτίο των 900N του μεγαλύτερου ρομπότ του εργαστηρίου που θα εξεταστεί σε διάδρομο και επομένως εξετάζεται η ροπή που μπορεί να ασκεί το ρομπότ στον άξονα ως αποτέλεσμα της προσπάθειάς του να περιστραφεί κατά yaw. Στο σχεδιασμό ακόμα θεωρείται ότι ο άξονας και ο πείρος είναι ένα σώμα.



- YAW LOCKED
- $\begin{cases} m=30Kg \\ F= 3*(m*g)= 900N \\ M=900*0,25=225Nm \end{cases}$

Σχήμα 5-7. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης άξονα Φ15 για το κλείδωμα του yaw. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο.



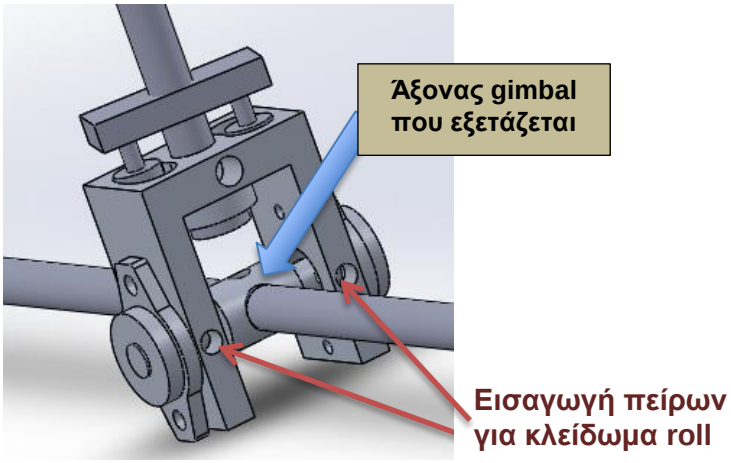
Σχήμα 5-8. (α) Ράβδος Φ15 και πείρος Φ10 από Al 7075 T6, 225Nm ροπή και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που πακτώνεται ο άξονας με τη χρήση των shaft supports Φ15 και ακόμα θεωρείται ο πείρος πακτωμένος μέσα στο gimbal. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 326Mpa < 505Mpa. (γ) FoS: κατά μήκος σχεδόν ολόκληρου του άξονα ο συντελεστής ασφαλείας βρίσκεται αρκετά κοντά στο 1.

5.1.5 Άσκηση ροπής στον άξονα του gimbal – προσομοίωση σε τεμάχιο

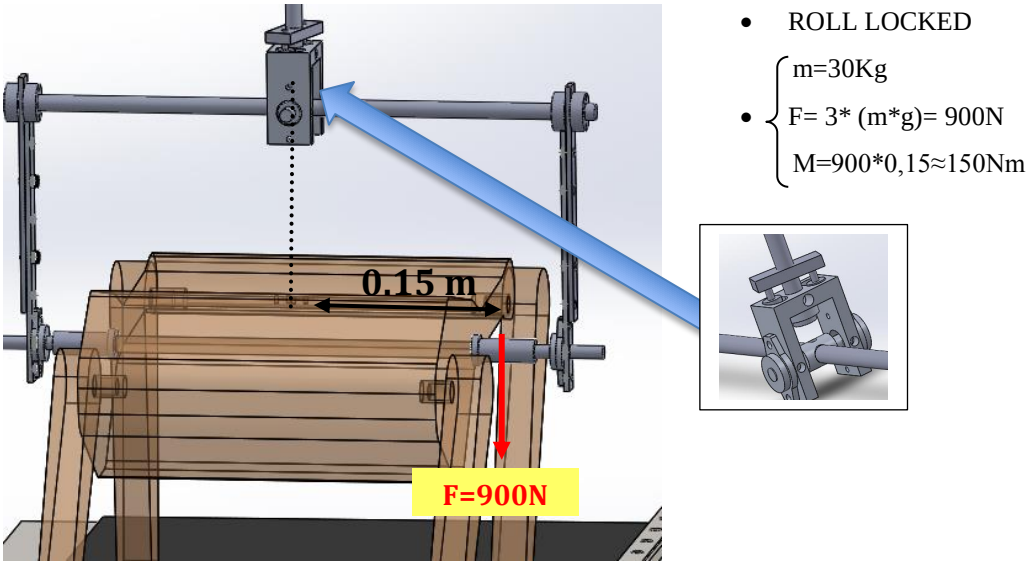
Εδώ παρουσιάζεται ο έλεγχος αντοχής για τον άξονα του gimbal μέσα από τον οποίο περνά ο οριζόντιος άξονας Φ15 του πλαισίου που συνδέει το ρομπότ με το υπόλοιπο σύστημα και δίνει την περιστροφή roll στο ρομπότ. Το κλείδωμα του roll επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο πείρων διατομής Φ8 που διαπερνούν τον άξονα και το gimbal (Σχήμα 4-21).

Επομένως, το σενάριο που εξετάζεται σε αυτή την περίπτωση αφορά και πάλι την άσκηση της αντίστοιχης ροπής στο άξονα αυτό λόγω της κάθετης δύναμης των 900N από το ρομπότ όταν αυτό επιχειρεί να περιστραφεί κατά roll. Ισχύει και εδώ όπως και παραπάνω η διαστασιολόγηση σύμφωνα με το μεγαλύτερο ρομπότ, όπου λογικά ασκούνται τα μεγαλύτερα φορτία. Έτσι η κατασκευή εξετάζεται στο χειρότερο δυνατό σενάριο μιας και πρέπει να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές τόσο της αντοχής και του σωστού σχεδιασμού όσο και τις προσαρμοστικότητας και ευκολίας στη χρήση (μια κατασκευή – πολλά διαφορετικά ρομπότ). Στο σχεδιασμό ακόμα θεωρείται ότι ο άξονας και ο πείρος είναι ένα σώμα.

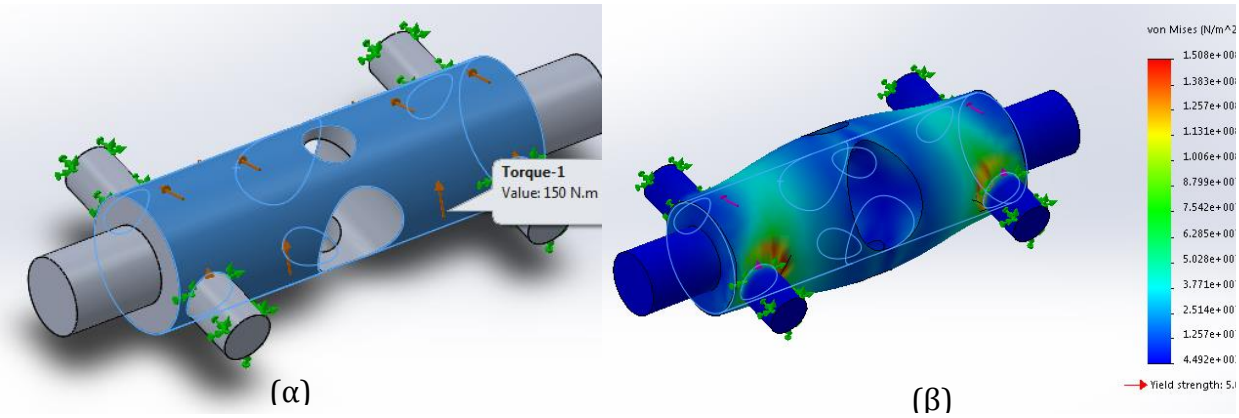
Στην περίπτωση αυτή ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας που εμφανίζεται είναι 3, επομένως θεωρείται το σχέδιο σχετικά υπερδιαστασιολογημένο. Αυτό όμως επηρεάζει κατά ελάχιστο την κατασκευή ως προς το βάρος, επομένως τελικά επιλέγεται για κατασκευή και δεν βελτιώνεται περαιτέρω.



Σχήμα 5-9. Gimbal και άξονας που εξετάζεται σε περίπτωση κλειδώματος του roll.



Σχήμα 5-10. Παραδοχές για προσομοίωση στατικής ανάλυσης άξονα Φ20 για το κλείδωμα του yaw. Το φορτίο είναι της τάξεως του τριπλάσιου του βάρους και θεωρείται ότι ασκείται στο εικονιζόμενο σημείο.



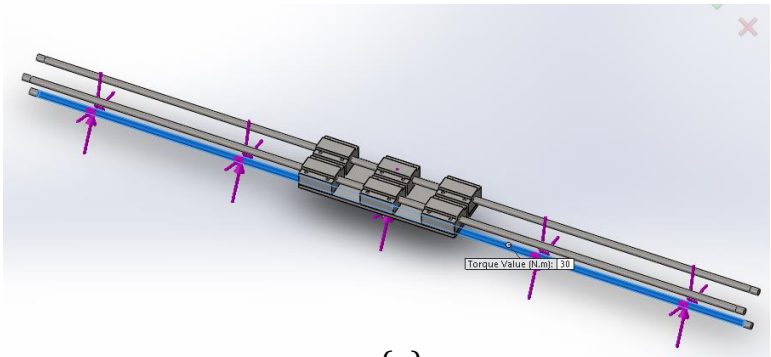
Σχήμα 5-11. (α) Ράβδος Φ20 και πείροι Φ8 από Al 7075 T6, 150Nm ροπή και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που πακτώνονται οι πείροι μέσα στο gimbal. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 505Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 150Mpa < 505Mpa.

5.1.6 Άσκηση ροπής στρέψης σε μηχανισμό l / r – προσομοίωση σε συναρμολόγημα

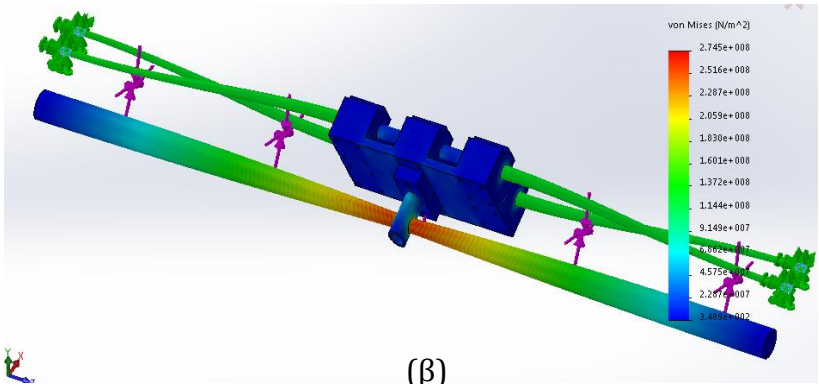
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, το ενδεχόμενο κλειδώματος του pitch, εμφανίζεται μόνο στην περίπτωση του μονόποδου ρομπότ. Έτσι οι προσομοιώσεις αφορούν στο αντίστοιχο φορτίο και όχι στο μέγιστο των 900N που θεωρείται γενικά σαν μεταβλητή για τα υπόλοιπα πειράματα.

Η περίπτωση κλειδώματος του pitch όμως και άρα η άσκηση ροπής στρέψης, επηρεάζει και τον μηχανισμό που δίνει το l /r στην κατασκευή (Σχήμα 4-37).

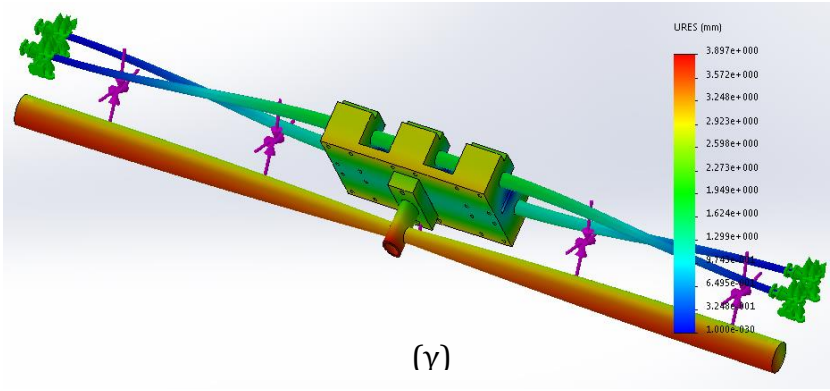
Οι παραδοχές εδώ είναι οι ίδιες όπως και στην περίπτωση της Ενότητας 5.1.1 και άρα η ροπή που μεταφέρεται είναι περίπου 30Nm. Μια ακόμα παραδοχή που τίθεται για τις ανάγκες της προσομοίωσης, είναι ο σχεδιασμός και η προσαρμογή ενός άξονα που περνά ακριβώς από το κέντρο της κατασκευής και χρησιμοποιείται ως αναφορά για την άσκηση της ροπής.



(α)



(β)



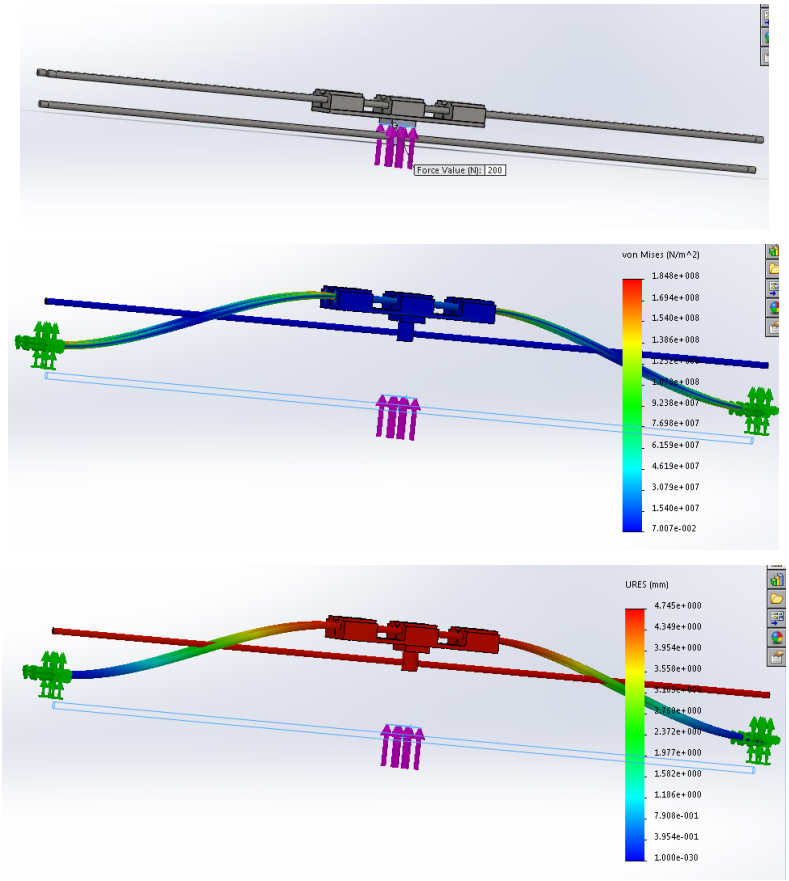
(γ)

Σχήμα 5-12. (α) Συναρμολόγημα για το l / r, 30Nm ροπή σε ελεύθερο άξονα και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται οι άξονες Φ8 με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 565Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 184Mpa < 505Mpa. (γ) Resultant displacement: μέγιστο βέλος κάμψης κατά τον κατακόρυφο άξονα στα ακρότατα σημεία του πλακιδίου σύνδεσης των γραμμικών ρουλεμάν περίπου 3.9mm.

5.1.7 Άσκηση κάθετης δύναμης σε μηχανισμό l / r – προσομοίωση σε συναρμολόγημα

Ολόκληρος ο μηχανισμός έτσι όπως έχει σχεδιαστεί δεν πρόκειται να επιβαρυνθεί με το κάθετο φορτίο των 900N ποτέ. Αυτό, είναι το ενδεχόμενο σενάριο σε ξαφνική πτώση του ρομπότ, που όμως όπως έχει αναφερθεί την προστασία του ρομπότ από πτώση την εξασφαλίζει δευτερεύον μηχανισμός που πακτώνεται στο ταβάνι του εργαστηριακού χώρου.

Παρ’ όλ αυτά, προσομοιώνεται η περίπτωση κάθετης δύναμης ενδεικτικής τιμής 200N όπως στο Σχήμα 5-13.



Σχήμα 5-13. (α) Συναρμολόγημα για το l / r, 200N κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο πρόσδεσης του υπόλοιπου συστήματος και fixtures (με πράσινο) ορίζονται τα σημεία που συνδέονται οι άξονες ακριβείας Φ8 1.1191 με τον υπόλοιπο μηχανισμό. (β) Stress test: συγκρίνεται το όριο διαρροής (yield strength = 565Mpa) του υλικού με την τάση Von Misses με μέγιστη τιμή αυτής πάνω στο τεμάχιο: 275Mpa < 505Mpa. (γ) Resultant displacement: μέγιστο βέλος κάμψης κατά τον κατακόρυφο άξονα στα σημεία του πλακιδίου σύνδεσης των γραμμικών ρουλεμάν περίπου 4.7mm.

5.2 Πειράματα και συγκριτική μελέτη

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα στάδια του σχεδιασμού και των στατικών αναλύσεων που έχουν ως αποτέλεσμα την τελική επιλογή των δομών της κατασκευής, η ανάλυση των οποίων προηγήθηκε στην προηγούμενη Ενότητα. Δηλαδή, τα βασικά μέρη της κατασκευής, μετά τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές βελτιώσεις που δέχονται, βελτιώνονται σταδιακά και ως προς τη δομή και τις διαστάσεις τους σύμφωνα με τη στατική ανάλυσή τους. Επομένως εδώ παρουσιάζονται οι περιπτώσεις εκείνες οι οποίες αστόχησαν στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού και επιδέχτηκαν βελτιώσεις ούτως ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

5.2.1 Διερεύνηση λύσης για οριζόντια ράβδο ράβδο σύνδεσης του ρομπότ με το μηχανισμό

Η τελική επιλογή της λύσης για τη ράβδο Φ15 που αναλύθηκε στην 5.1.3, προκύπτει από τη μελέτη διαφόρων εναλλακτικών. Στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, και εφ' όσον επιθυμείται η ράβδος αυτή να λειτουργεί απλά σαν συνδετικό κομμάτι, η διατομή της κατά τον σχεδιασμό επιλέχθηκε να είναι τετράγωνη. Ακόμα ένας λόγος είναι η ανάλυση που αποδεικνύει ότι η ορθογωνική διατομή είναι αποτελεσματικότερη της κυκλικής (Ενότητα 2.3.4).

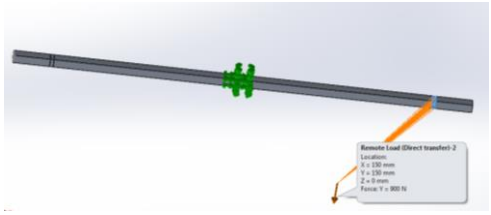
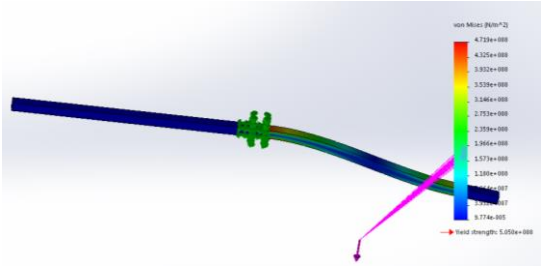
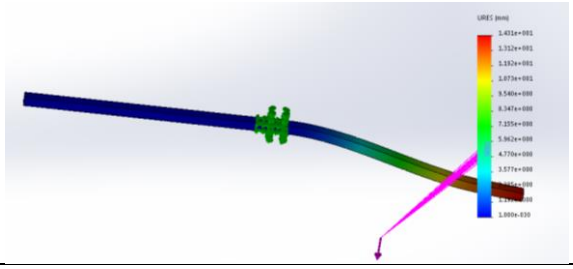
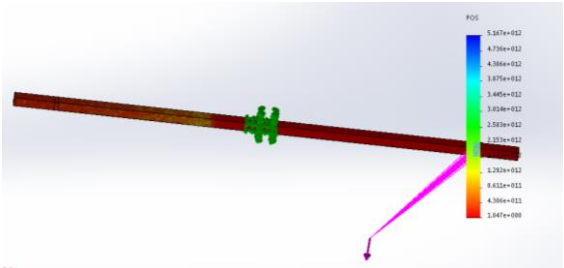
Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια διατομή 12 x 12mm και το υλικό Al 7075 T6. Η μορφή αυτή εξετάστηκε τόσο κατασκευαστικά όσο και σχεδιαστικά για να καταλήξει τελικά μέσα από κάποια στάδια διαφορετικών εναλλακτικών επιλογών στην τελική της μορφή (κυκλική διατομή Φ15).

Όσον αφορά κατασκευαστικά τη ράβδο, παρατηρείται ότι η τετραγωνική της διατομή δημιουργεί αρκετή πολυπλοκότητα στη διαμόρφωση των επιμέρους κομματιών με τα οποία απαιτείται συναρμογή. Για παράδειγμα, για να επιτευχθεί σωστή συναρμογή μεταξύ της ράβδου και ενός τεμαχίου που την περικλείει, θα πρέπει στο τεμάχιο αυτό να διαμορφωθεί ανοιχτό προφίλ τετραγωνικής διατομής πράγμα το οποίο κατασκευαστικά είναι αρκετά πολύπλοκο. Ακόμα, σχετικά με το σχεδιαστικό κομμάτι, η ράβδος αυτή αναλύθηκε στατικά και δεν αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

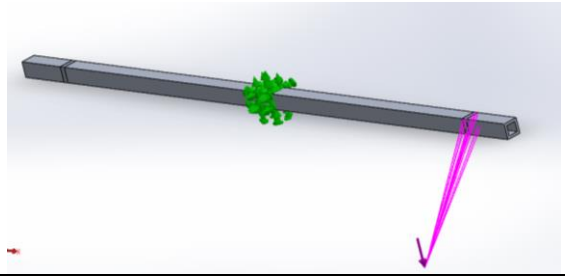
Στη συνέχεια εξετάζεται η λύση του σωλήνα τετραγωνικής διατομής με εξωτερική πλευρά 15mm και εσωτερική 10 από Al 7075 T6. Η λύση αυτή στη στατική ανάλυση, δίνει εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα ενώ ικανοποιεί και το κριτήριο ελαχιστοποίησης της μάζας (221gr). Ωστόσο, η διατομή αυτή μπορεί να προμηθευτεί από την αγορά μόνο σε Al 6063, πράγμα που όπως θα αποδειχθεί παρακάτω αστοχεί πλήρως.

Εξετάζεται ακόμα η περίπτωση της τετραγωνική διατομής 15 x 15, η οποία τελικά απορρίπτεται λόγω των κατασκευαστικών δυσλειτουργιών, για να επιλεγεί τελικά η λύση της Ενότητας 5.1.3

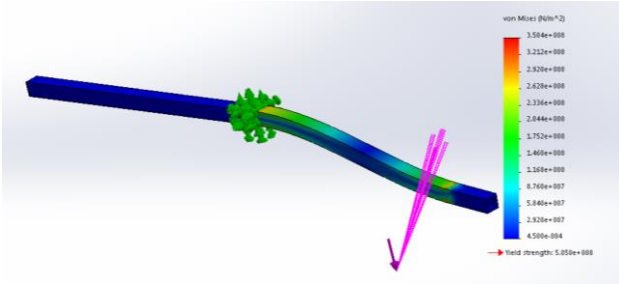
Παρακάτω περιγράφονται οι αναλύσεις όλων των επιλογών που τέθηκαν στα στάδια του σχεδιασμού, με δεδομένες τις προδιαγραφές, τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς.

	Ράβδος τετραγωνικής διατομής από Al 7075 T6 12x12mm και μήκους 630mm - Remote load 900N - Μάζα 255gr.
	Stress plot - max von misses 472Mpa
	Resultant displacement plot - max 14mm
	FoS plot - min 1

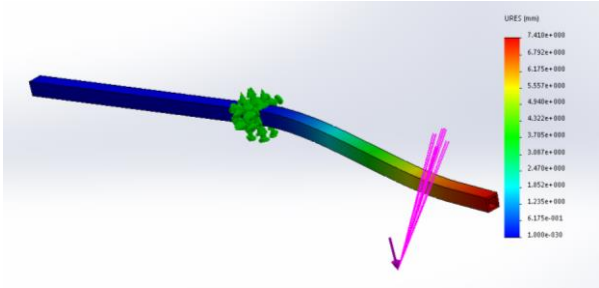
Σχήμα 5-14. Εξέταση επιλογής ράβδου τετραγωνικής διατομής 12x12mm Al 7075 T6 – απορρίπτεται λόγω αυξημένου βέλους κάμψης.



Ράβδος κούφια τετραγωνικής διατομής από Al 7075 T6 15x15mm και εσωτερικά 10x10mm και μήκους 630mm
-
Remote load 900N
-
Μάζα 220 gr.

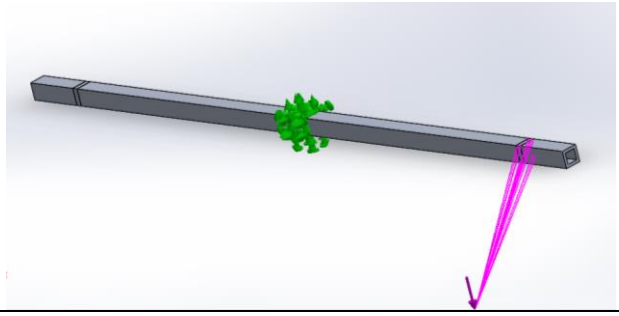


Stress plot
-
max von misses 350Mpa < yield strength Al 7075 505 Mpa

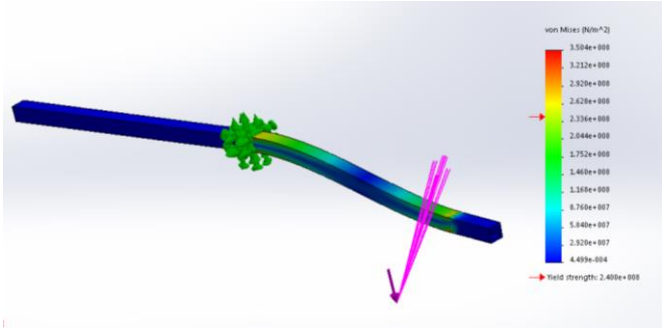


Resultant displacement plot
-
max 7.5mm

Σχήμα 5-15. Εξέταση επιλογής κούφιας ράβδου τετραγωνικής διατομής 15x15mm Al 7075 T6 – απορρίπτεται γιατί δεν μπορεί να προμηθευτεί από την αγορά.

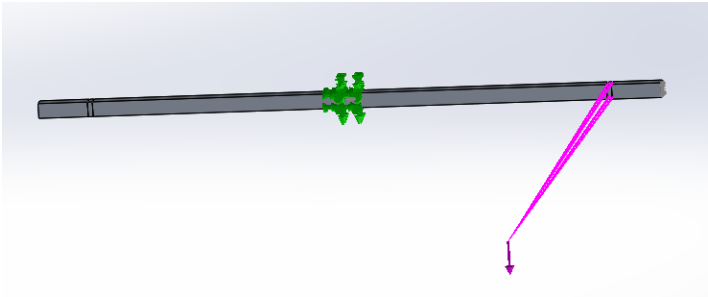


Ράβδος κούφια τετραγωνικής διατομής από Al 6063 15x15mm και εσωτερικά 10x10mm και μήκους 630mm
-
Remote load 900N
-
Μάζα 212 gr.

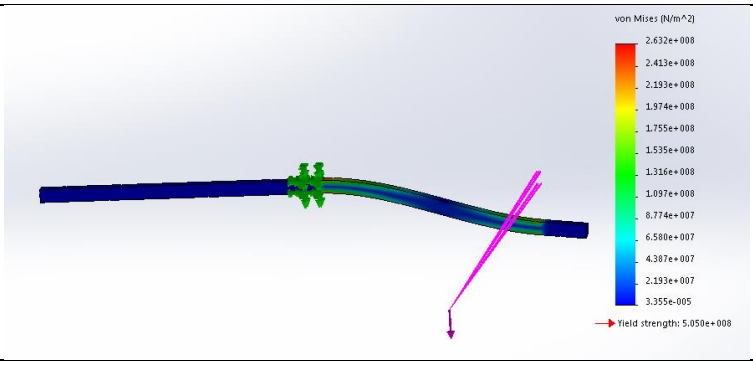


Stress plot
-
max von misses 350Mpa >> yield strength Al 6063 240Mpa
-
αστοχία τεμαχίου

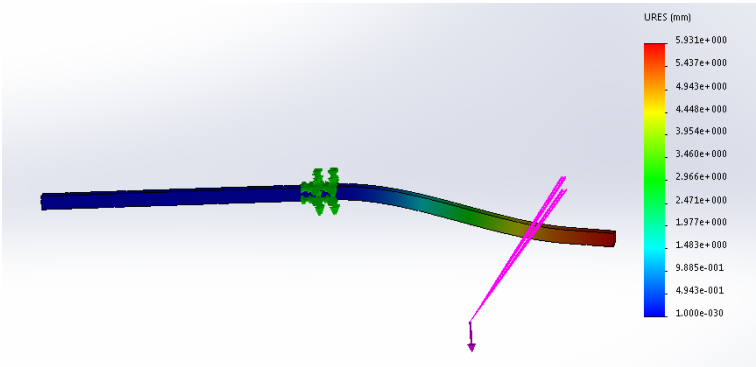
Σχήμα 5-16. Εξέταση επιλογής κούφιας ράβδου τετραγωνικής διατομής 15x15mm Al 6063 – απορρίπτεται λόγω αστοχίας υλικού στο δεδομένο φορτίο.



Ράβδος τετραγωνικής διατομής από Al 7075 T6 15x15mm και μήκους 630mm
-
Remote load 900N
-
Μάζα 400gr.



Stress plot
-
max von misses 263 Mpa

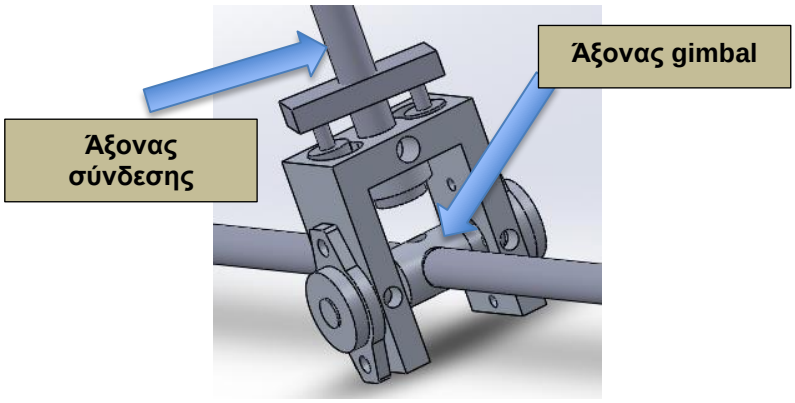


Resultant displacement plot
-
max 6 mm

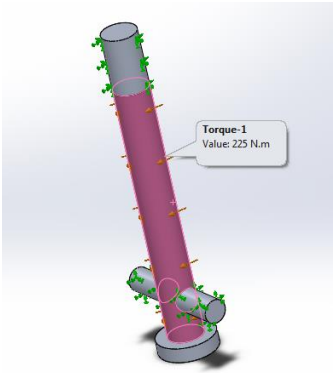
Σχήμα 5-17. Εξέταση επιλογής ράβδου τετραγωνικής διατομής 15x15mm Al 7075 T6 – απορρίπτεται λόγω κατασκευαστικών δυσλειτουργιών από το τετράγωνο προφίλ.

5.2.2 Διερεύνηση λύσης για άξονα σύνδεσης του gimbal με τον μηχανισμό

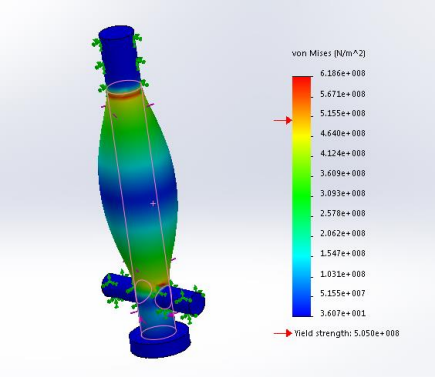
Ο αρχικός σχεδιασμός περιελάβανε άξονα Φ12 από Al 7075 T6 και πείρο Φ8. Η λύση αυτή εξετάζεται με τον ίδιο τρόπο που αναλύεται στην ενότητα 5.1.4 όπου και αστοχεί για να καταλήξει με τη διαστασιολόγηση του άξονα σε Φ15 και του πείρου σε Φ10.



Σχήμα 5-18. Gimbal: Άξονας σύνδεσης με μηχανισμό (yaw) και κεντρικός άξονας (roll).



Άξονας Φ12 και πείρος Φ8 από Al 7075 T6
-
Ροπή 225 Mpa
-
μάζα 40 gr.

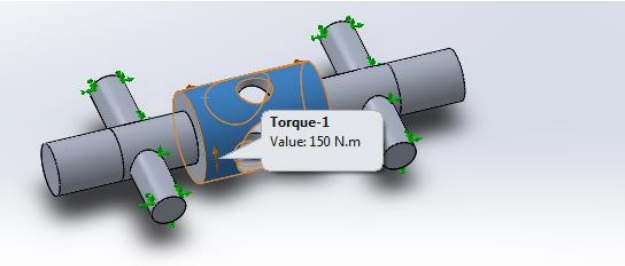


Stress plot
-
max von misses 620 Mpa > yield strenth 505 Mpa
-
αστοχία τεμαχίου

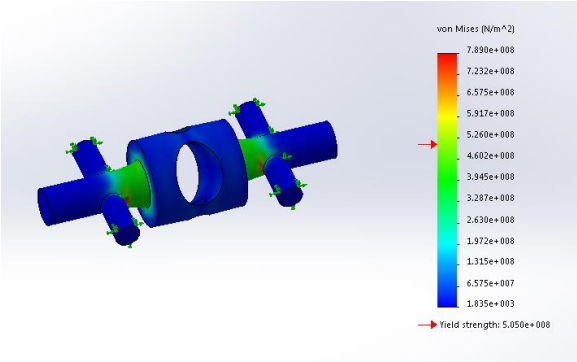
Σχήμα 5-19. Εξέταση επιλογής άξονα Φ12 με πείρο Φ8 Al 7075 T6 – απορρίπτεται λόγω αστοχίας.

5.2.3 Διερεύνηση λύσης για άξονα του gimbal

Και εδώ παρουσιάζεται ο αρχικός σχεδιασμός του άξονα του gimbal, που αστοχεί στην ανάλυση για να ακολουθήσει η αλλαγή στη διαστασιολόγησή του που παρουσιάζεται στην Ενότητα 5.1.5.



Αρχικός σχεδιασμός άξονα gimbal από Al 7075 T6
-
ροπή 150Nm
-
μάζα 28 gr.



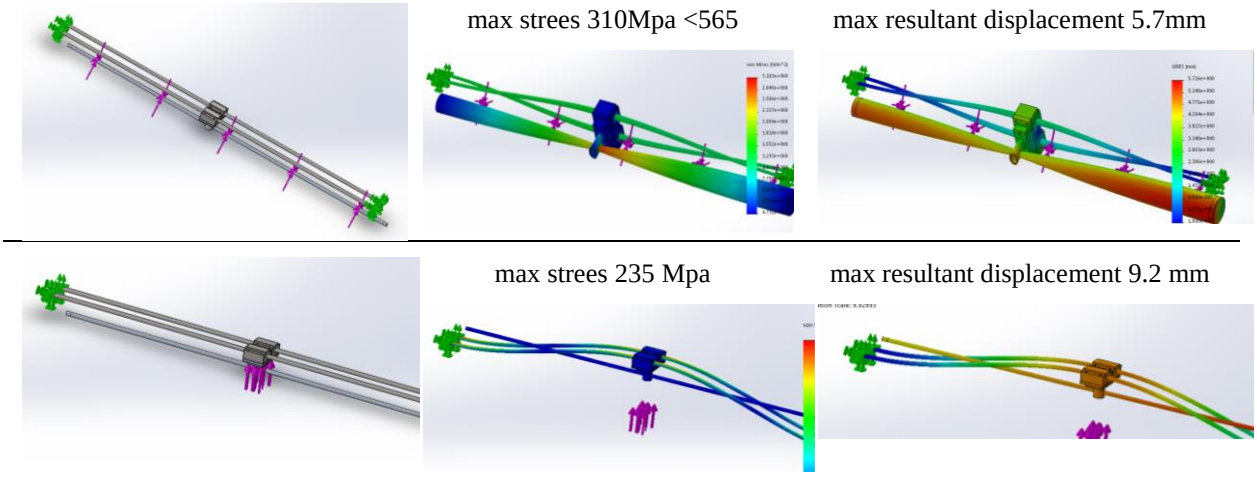
Stress plot
-
max von misses 790Mpa >> yield strength Al 7075 T6 540 Mpa
-
αστοχία τεμαχίου

Σχήμα 5-20. Αρχικός σχεδιασμός άξονα gimbal – απορρίπτεται λόγω αστοχίας.

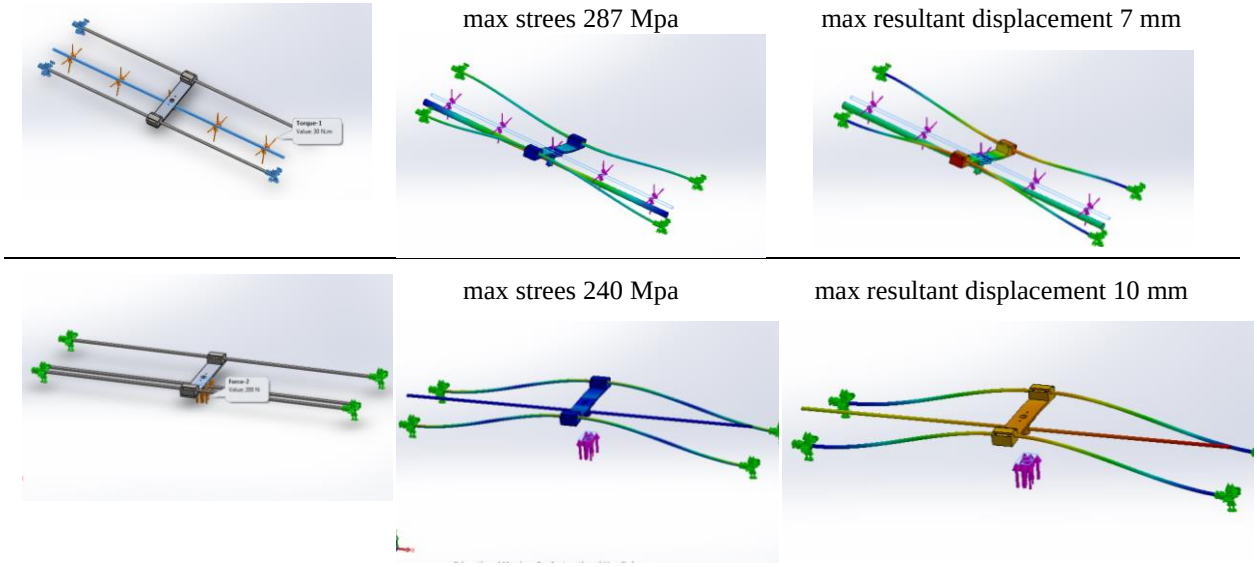
5.2.4 Διερεύνηση λύσης για συναρμολόγημα του β.ε. l / r

Με αντίστοιχη λογική των συνεχών βελτιώσεων, αναλύθηκε και η μελέτη για την επιλογή της καταλληλότερης λύσης για τον μηχανισμό l / r ως προς τα χαρακτηριστικά της αντοχής στα δεδομένα φορτία. Παρουσιάζεται και πάλι μια σειρά από λύσεις που προτάθηκαν στο στάδιο του σχεδιασμού , ο οποίος καταλήγει με την επιλογή της Ενότητας 5.1.6. Εξετάστηκαν τα πειράματα της άσκησης των 900N στον κατακόρυφο άξονα καθώς και της άσκησης της ροπής στρέψης των 30Nm στην περίπτωση κλειδώματος του pitch.

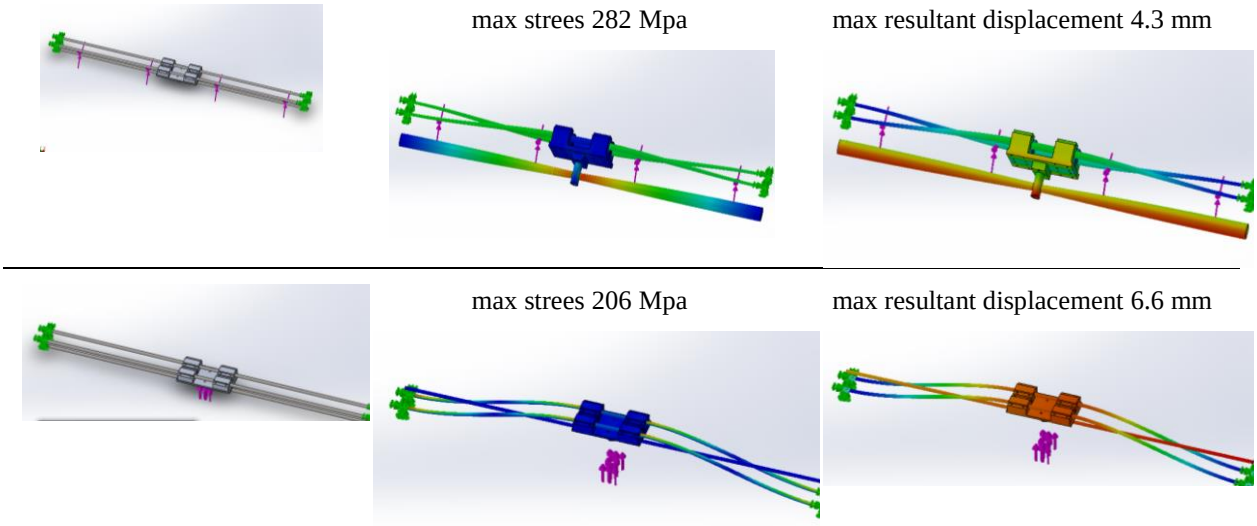
Η ανάλυση ξεκινά με την εξέταση της περίπτωση που επιλέχθηκε σαν καλύτερη εναλλακτική στην Ενότητα 4.5.6. Όπως αποδείχθηκε, η λύση αυτή που εισάγει τη λογική των δύο γραμμικών ρουλεμάν που εδράζονται σε άξονες ακριβείας από χάλυβα, είναι η βέλτιστη από κατασκευαστικής άποψης. Ωστόσο, παρατηρούνται μικρές αστοχίες κατά την υλοποίηση που έχουν να κάνουν με την παραμόρφωση σε στρεπτικά αλλά και κάθετα φορτία. Κατά την εξέταση των εναλλακτικών, διατηρείται η σχεδιαστική λογική που περιγράφηκε παραπάνω όμως εξετάζονται αρκετά διαφορετικά σενάρια που έχουν να κάνουν με τη μελέτη της απόδοσής τους ως προς τις παραμορφώσεις.



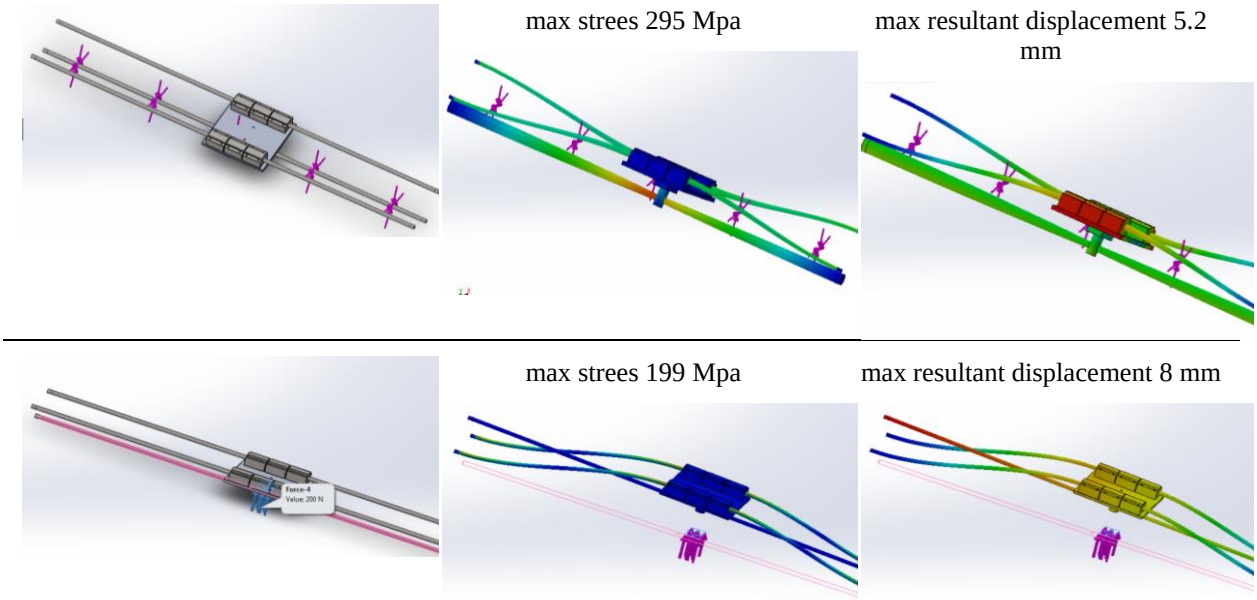
Σχήμα 5-21. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N σε αρχικό σχεδιασμό.



Σχήμα 5-22. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N αυξάνοντας την απόσταση των ράβδων.



Σχήμα 5-23. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N αυξάνοντας τα set των γραμμικών ρουλεμάν.



Σχήμα 5-24. Άσκηση ροπής στρέψης 30 Nm και κάθετου φορτίου 200N αυξάνοντας τα set των γραμμικών ρουλεμάν και την απόσταση των ράβδων.

5.2.5 Διερεύνηση λύσης για σύστημα συγκράτησης σε περίπτωση πτώσης

Για τη διερεύνηση σε σχέση με την επιλογή του κατάλληλου συστήματος από ράγες, λαμβάνονται υπ' όψιν οι προδιαγραφές του κατασκευαστή. Ωστόσο, πριν την τελική επιλογή, γίνονται κάποια πειράματα σε μια συγκεκριμένη σειρά μοντέλων, την «21000». Τα πειράματα αυτά αφορούν τόσο στην φόρτιση των ραγών σε κάθετο φορτίο 900N (περίπτωση πτώσης του ρομπότ), όσο και σε φορτίο που υπολογίζεται σύμφωνα με το Σχήμα 5-25 και αφορά στην οριζόντια δύναμη που ασκεί το ρομπότ σε περίπτωση που κινηθεί κατά l / r. Στο Σχήμα αυτό, φαίνεται το δεμένο ρομπότ σε πρόσοψη και η ανάλυση δυνάμεων στη ράγα αν αυτό κινηθεί προς τα δεξιά κατά 10cm. Ισχύουν τα εξής:

$$900^2 = A^2 + B^2 \tag{5-1}$$

$$\tan\varphi = \frac{A}{\mathrm{B}} = \frac{10}{100} = 0.1 \rightarrow \mathrm{A} = 0.1\mathrm{B} \tag{5-2}$$

$$900^2 = (0.1B)^2 + \mathrm{B}^2 \rightarrow B \approx 900N \tag{5-3}$$

και άρα, από τις παραπάνω εξισώσεις που προκύπτουν από το Σχήμα 5-25, παίρνουμε $A \approx 90N$.

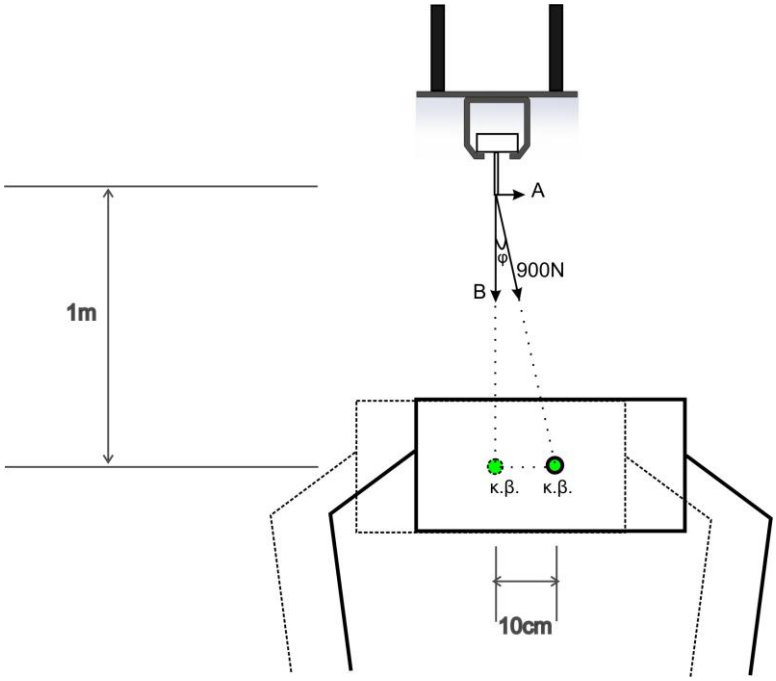
Εκείνο που πρέπει ακόμα να εξεταστεί είναι η απόσταση μεταξύ των πακτώσεων της ράγας με το ταβάνι, η οποία γίνεται με ζεύγη ντιζών.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πειράματα, για να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να συγκρατήσει το ρομπότ.

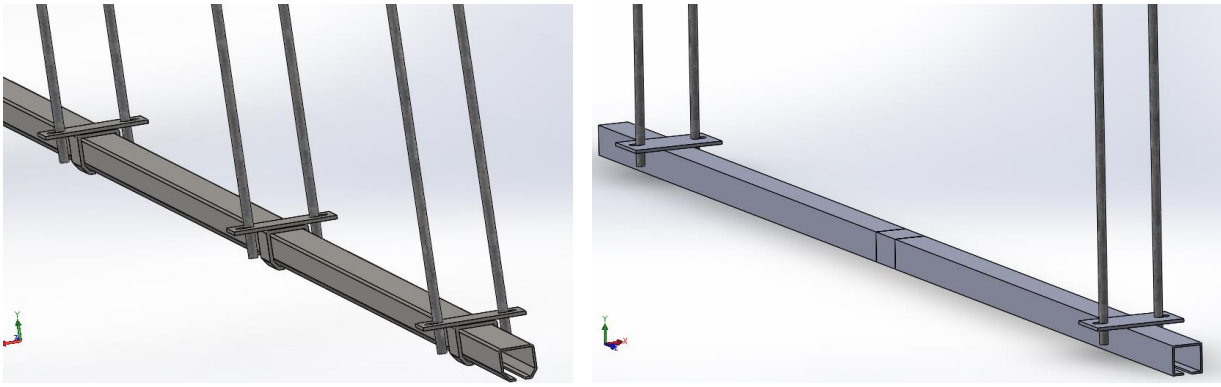
Η παραδοχή που έχει τεθεί, έχει να κάνει με το σχήμα της διάταξης. Δεδομένου ότι για τα προφίλ αυτά, δεν υπάρχουν από τον κατασκευαστή ακριβή δεδομένα ως προς τη διαστασιολόγηση, ο σχεδιασμός που γίνεται στο λογισμικό, είναι με μια προσέγγιση σε σχέση με μικρές λεπτομέρειες. Αυτό οδηγεί σε σφάλμα κατά τη στατική ανάλυση, μια και δεν υπάρχουν απολύτως εφαπτόμενες επιφάνειες στο συναρμολόγημα , και έτσι επιχειρείται ένας σχεδιασμός που προσεγγίζει πολύ την αρχική μορφή σε βασικές διαστάσεις, είναι όμως απλοποιημένος (Σχήμα 5-26). Σε αυτό το σχεδιασμό, εκτελούνται τα πειράματα. Αρχικά εκτελείται το πείραμα με κάθετο φορτίο 900N που όμως εφαρμόζεται ομοιόμορφα κατά μήκος της ράγας. Αυτό, δεν μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα γιατί το φορτίο θα ασκείται μόνο σε ένα μικρό κομμάτι της επιφάνειας της ράγας. Διορθωτικά λοιπόν, εκτελείται και το πείραμα φόρτισης σε επιφάνεια 40mm (ρεαλιστικότερη κατάσταση). Το αποτέλεσμα δείχνει να αστοχεί σημαντικά, πράγμα που διασταυρώνεται και από τις δεδομένες προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Υπενθυμίζεται ότι εδώ το ζητούμενο είναι ένας μεγάλος συντελεστής ασφαλείας γιατί, σύμφωνα με τα κριτήρια της Ενότητας 2.3.5, εδώ το βάρος δεν επηρεάζει το συνολικό βάρος της κατασκευής, εφόσον δεν αποτελεί ένα φορτίο που θα επιβαρύνει το ρομπότ, αλλά θα στηρίζεται στο ταβάνι. Επομένως, μπορεί να υπερδιαστασιολογηθεί προκειμένου να παρέχει την απαιτούμενη ασφάλεια.

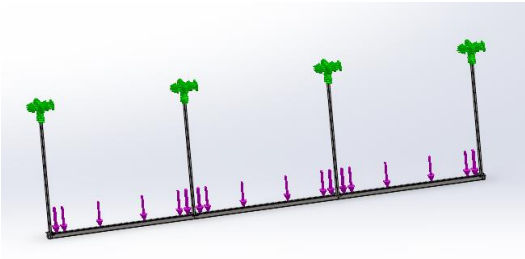
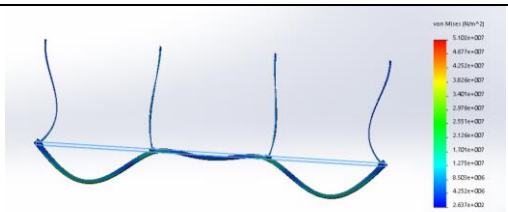
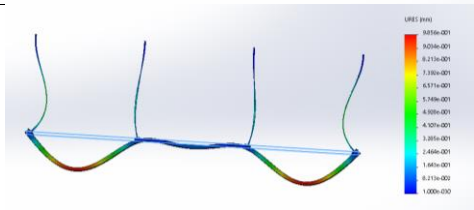
Στο τέλος της ανάλυσης, προκύπτει ότι το συγκεκριμένο μοντέλο (σειρά «21000»), δεν μπορεί να υποστηρίξει την κατασκευή. Επομένως πρέπει να επιλεγεί διαφορετική σειρά από ράγες και εξαρτήματα. Για την επιλογή χρησιμοποιείται ο πίνακας του κατασκευαστή όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.5.9 και τελικά το μοντέλο που επιλέγεται είναι το «24000», εφόσον όπως αναφέρθηκε ήδη εδώ το ζητούμενο είναι υψηλή αντοχή και μεγάλος συντελεστής ασφαλείας.



Σχήμα 5-25. Υπολογισμός οριζόντιας δύναμης που προκύπτει στη ράγα, αν δεχθούμε ότι το εύρος κίνησης του ρομπότ προς τα δεξιά ή αριστερά είναι περίπου 10cm.



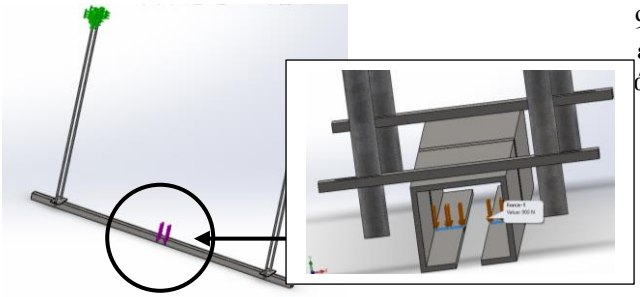
Σχήμα 5-26. Παραδοχές σχεδιασμού για τις ανάγκες της προσομοίωσης: αρχικός σχεδιασμός και απλοποιημένος.

	900N ομοιόμορφο φορτίο κατά τον κάθετο άξονα - απόσταση μεταξύ των ντιζών 1m
	Stress plot - max von misses 51 Mpa << yield strenth 235 Mpa
	Resultant displacement plot - max <1 mm

Σχήμα 5-27. Κάθετο ομοιόμορφο φορτίο 900N. Η κατασκευή δείχνει να αντέχει.

Σε αυτό το στάδιο, εξετάζονται αυτή τη φορά μη ομοιόμορφα φορτία κατά τον κάθετο άξονα αλλά και κατά τον οριζόντιο. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι αρκετά χρήσιμα, μιας και αποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα σε ομοιόμορφο φορτίο δεν είναι αξιόπιστα, μια και η κατασκευή αστοχεί και επομένως θα πρέπει σίγουρα η σειρά «21000», να αντικατασταθεί από επόμενη σειρά με πιο αυξημένη αντοχή.

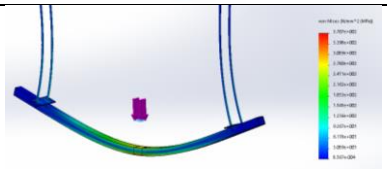
Στα παρακάτω Σχήματα φαίνεται η απόδειξη του παραπάνω ισχυρισμού.



900N φορτίο κατά τον κάθετο άξονα ασκούμενο σε επιφάνεια μήκους 40mm στο εσωτερικό της ράγας, άρα στο σημείο που κινείται το ράουλο που συνδέει τη ράγα με το ρομποτ

-

απόσταση μεταξύ των ντιζών 1m



Stress plot

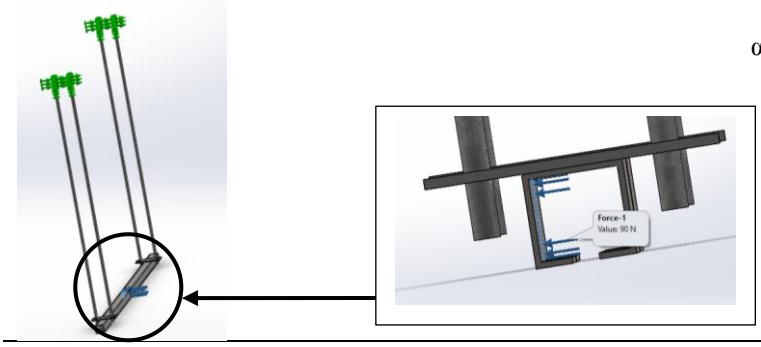
-

max von misses 370 Mpa > yield strenth 235 Mpa

-

αστοχία

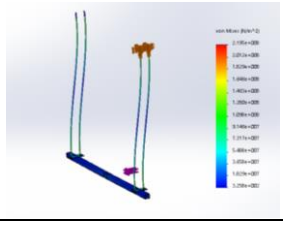
Σχήμα 5-28. Κάθετο φορτίο 900N σε εσωτερική επιφάνεια. Πακτώσεις ανά 1m. Η κατασκευή δείχνει να αστοχεί.



90N φορτίο κατά τον οριζόντιο άξονα ασκούμενο σε επιφάνεια μήκους 40mm στο εσωτερικό της ράγας, δηλαδή στο σημείο που κινείται το ράουλο που συνδέει τη ράγα με το ρομποτ

-

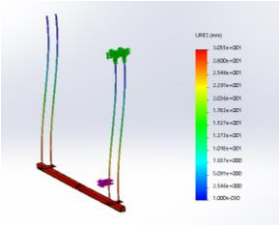
απόσταση μεταξύ των ντιζών 1m



Stress plot

-

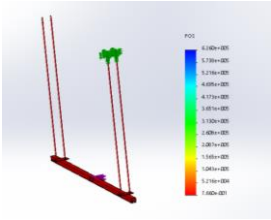
max von misses 219 Mpa < yield strenth 235 Mpa



Resultant displacement plot

-

max 30 mm



FoS plot

-

min<1mm

Σχήμα 5-29. Οριζόντιο φορτίο 90N σε εσωτερική επιφάνεια. Πακτώσεις ανά 1m. Η κατασκευή δείχνει να αστοχεί.

6 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή, γίνεται μια προσπάθεια δημιουργίας και κατασκευής ενός μηχανισμού που σχεδιάζεται με το συνδυασμό των προδιαγραφών και απαιτήσεων που τίθενται εξ' αρχής. Από τη μελέτη της υπάρχουσας ερευνητικής δραστηριότητας (σχετικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για αντίστοιχα ρομπότ), δεν μπορούν να αντληθούν σημαντικές πληροφορίες μιας και οι προδιαγραφές και απαιτήσεις που τίθενται εδώ έχουν να κάνουν περισσότερο με τους βαθμούς ελευθερίας. Ακόμα ένα γεγονός που δίνει σχετική πολυπλοκότητα στην εργασία, είναι ότι δεν υπάρχουν σαφείς προδιαγραφές σε σχέση με τις διαστάσεις και τη μορφολογία των ρομπότ, εφόσον τα διαφορετικά ρομπότ και ο μηχανισμός που τα υποστηρίζει κτίζονται παράλληλα. Η συγκριτική μελέτη των εναλλακτικών όμως και η σταδιακή κατασκευή των μηχανικών μερών του, δίνουν σε κάθε φάση μια εικόνα για το αποτέλεσμα. Έτσι, η εργασία προσανατολίζεται σε συνεχείς βελτιώσεις από το ένα στάδιο στο επόμενο.

Όσον αφορά στην τελική κατασκευή στήριξης, εκείνο που παρατηρείται είναι η κάπως αυξημένη μάζα του τελικού συστήματος που επιβαρύνει το ρομπότ σε σχέση με εκείνη του πρωτοτύπου. Αυτό γιατί οι απαιτήσεις σε φορτία και οι ροπές που προκαλούνται στο μηχανισμό από το ρομπότ, είναι αρκετά αυξημένες (ενδεικτικά, η δύναμη που μπορεί να ασκήσει ένα ρομπότ 30 κιλών καθώς πέφτει με τα πόδια στον ιμάντα, που για τις ανάγκες του πειράματος, ο μηχανισμός μπορεί να έχει κλειδώσει έναν βαθμό ελευθερίας π.χ. το roll, άρα αυτό το φορτίο θα μεταφερθεί στο σύστημα, μπορεί να είναι μέχρι και τρείς φορές το βάρος του, άρα 900N). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην πρωταρχική φάση του μηχανισμού, με τα custom κομμάτια, η συνολική μάζα ήταν της τάξης των 2 κιλών, ενώ κατά τις βελτιώσεις η μάζα αυξάνεται κατά περίπου το διπλάσιο. Ωστόσο και πάλι η συνολική μάζα δεν ξεπερνά τη μάζα των μπαταριών που θα έφερε το ρομπότ αν κινούνταν εκτός κυλιόμενου διαδρόμου.

Ακόμα, με δεδομένες τις ενέργειες βελτίωσης που έχουν να κάνουν με αντικατάστασης του custom εξοπλισμού με εξοπλισμό από την αγορά σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής, το κόστος επιβαρύνεται ακόμα περισσότερο. Και πάλι αναφέρεται ενδεικτικά το κόστος, το οποίο τελικά ανέρχεται περίπου στα 1800€.

6.2 Μελλοντική εργασία

Η μελλοντική εργασία που μπορεί να συνδεθεί με την εργασία αυτή μπορεί να συμπεριλαμβάνει μεταξύ άλλων τα εξής:

- Ελαχιστοποίηση του βάρους η οποία μπορεί να προκύψει από την επιλογή του υλικού με την αντικατάσταση του ήδη αρκετά ελαφρού μετάλλου Al 7075 T6 με εξαρτήματα από ανθρακονήματα. Το υλικό αυτό, είναι ένα πολύ ελαφρύ υλικό με εξαιρετική αντοχή. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μμηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Προσοχή όμως θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι αρκετά από τα εξαρτήματα από ανθρακονήματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι ανισοτροπικά και έτσι η αντοχή τους σε διατμητικές τάσεις είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή σε εφελκυστικές.
- Αντιστάθμιση του βάρους του υπάρχοντος μηχανισμού με διάφορες τεχνικές παθητικής ισορροπίας (passively balance) όπως με χρήση αντίβαρων, ελατηρίων, αποσβεστήρων, βοηθητικών παραλληλόγραμμων κ.α.
- Συνδυασμός της κατασκευής με ηλεκτρονικό σύστημα ανάδρασης θέσης του ρομπότ πάνω στο διάδρομο και αυτόματη προσαρμογή της ταχύτητας του διαδρόμου.

7 Βιβλιογραφία

[1] Agrawal S., Gardner G., Pledgie S., "*Design and fabrication of an active gravity balanced planar mechanism using auxiliary parallelograms*", Mech. Systems laboratory, University of Delaware, December 2001

[2] P. Chatzakos and E. Papadopoulos, "Bio-inspired design of electrically-driven bounding quadrupeds via parametric analysis," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, is. 3, pp. 559-579, Mar. 2009.

[3] N. Cherouvim and E. Papadopoulos, "Novel Energy Transfer Mechanism in a Running Quadruped Robot with One Actuator per Leg," *Advanced Robotics*, vol. 24, no. 7, pp. 963-978, 2010.

[4] Joseph S. Colett, Jonathan w. Hurst, "Artificial Restraint Systems for Walking and Running Robots: An Overview", *Inetrnational Journal of Humanoid Robotics*, May 2011

[5] Doumpos M.: "Μεθοδολογία επιχειρησιακής έρευνας", *Technical University of Crete* 2010

[6] M. Focchi, E. Guglielmino, C. Semini, T. Boaventura, Y. Yang and D. G. Caldwell, "Control of a Hydraulically-Actuated Quadruped Robot Leg," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, Alaska, USA, 2010.

[7] S. Hirose and Y. Umetani, "The basic motion regulation system for a quadruped walking vehicle," *ASME Conference on Mechanisms*, Los Angeles, CA, Sept. – Oct. 1980.

[8] Lowen G., Tepper F., Serkof R., "*Balances of linkages – an update*", Mechanism and machine theory, 1983

[9] M. A. Hoepflinger, C. D. Remy, M. Hutter, L. Spinello and R. Siegwart, "Haptic Terrain Classification for Legged Robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, AK, USA, 2010.

[10] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, M. Mistry and S. Schaal, "Learning, Planning, and Control for Quadruped Locomotion over Challenging Terrain," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 2, pp. 236-258, Feb. 2011

[11] R. B. McGhee, "Finite State Control of Quadruped Locomotion," *SIMULATION*, vol. 9, no. 3, pp. 135-140, Sept. 1967.

[12] R. B. McGhee and A. A. Frank, "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," *Mathematical Biosciences*, vol. 3, pp. 331-351, Aug. 1968.

[13] Mpilalis N., Maravelakis E., "Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση", 2009

[14] E. Muybridge, *Animal Locomotion: An Electro-photographic Investigation of Consecutive Phases of Animal Movements*. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania, Printed by JB Lippincott Co., 1887.

[15] Na, B., Choi, H., Kong, K., "Design of a Direct-Driven Linear Actuator for Development of a Cheetaroid Robot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 6-10 May 2013.

[16] Papadopoulos E. G.: "Μηχανοτρονικά συστήματα", *σημειώσεις μαθήματος*

[17] Papamichos E., Charalampakis N., "Αντοχή των υλικών", 2006

[18] I. Poulakakis, E. Papadopoulos and M. Buehler, "On the Stability of the Passive Dynamics of Quadrupedal Running with a Bounding Gait," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 7, pp. 669-687, Jul. 2006.

[19] M. H. Raibert, *Legged Robots that Balance*. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

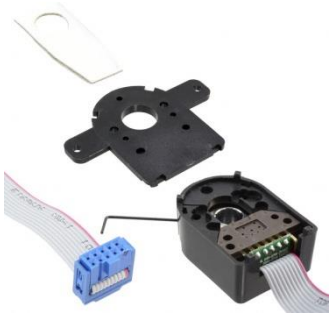
[20] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter and the BigDog Team, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," *Proc. IFAC World Congress*, South Korea, 2008.

[21] Slocum A.: “Fundamentals of design”, 2008
[22] “Solidcam 2012 Milling and training course”
[23] C. D. Remy, O. Baur, M. Latta, A. Lauber, M. Hutter, M. A. Hoepflinger, C. Pradalier and R. Siegwart, “Walking and Crawling with ALoF – A Robot for Autonomous Locomotion on Four Legs,” *Proc. International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Nagoya, Japan, 2010.
[24] Yamada, Y.; Nishikawa, S.; Shida, K.; Niiyama, R.; Kuniyoshi, Y., "Neural-body coupling for emergent locomotion: A musculoskeletal quadruped robot with spinobulbar model," *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 25-30 Sept. 2011, pp. 1499-1506.
[25] Zhang, J., Song, G., Qiao, Li, Z., Wang, W., Song, A., "A Novel One-Motor Driven Robot That Jumps and Walks," *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 6-10 May 2013.
[26] M. Zucker, J. A. Bagnell, C. G. Atkeson and J. Kuffner, “An Optimization Approach to Rough Terrain Locomotion,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Anchorage, Alaska, USA, 2010.
[27] «Σύνθετα υλικά»

8 Παράρτημα Α

8.1 Κατασκευή συστήματος προσαρμογής παλμογεννήτριας στην άτρακτο του κινητήρα περιστροφής του τυμπάνου του κυλιόμενου διαδρόμου

Για τις ανάγκες της ερευνητικής μελέτης και των πειραμάτων, απαιτείται ο έλεγχος του διαδρόμου. Ο αισθητήρας που μετρά την γωνιακή ταχύτητα που περιστρέφεται το τύμπανο του ιμάντα, είναι η παλμογεννήτρια (encoder) στο Σχήμα 8-1. Απαιτείται ένας τρόπος για την προσαρμογή του αισθητήρα στην άτρακτο του κινητήρα, ώστε να δίνονται αξιόπιστες μετρήσεις.



Σχήμα 8-1. Παλμογεννήτρια HEDL 5640 #A13 της εταιρίας Avago.

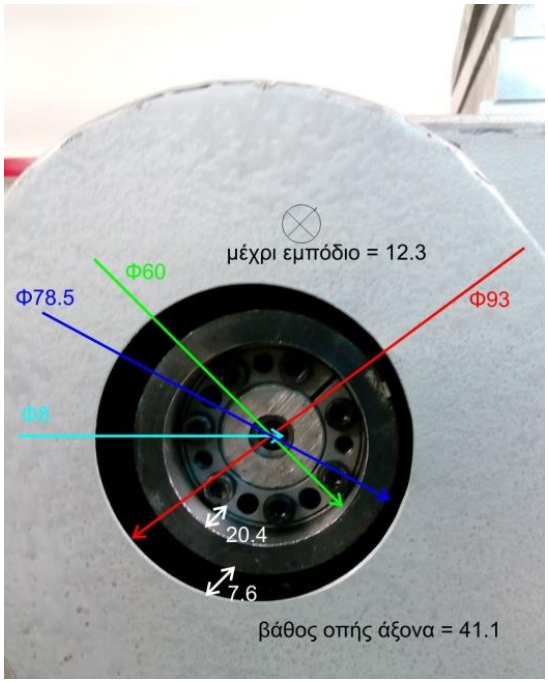
Σχήμα 8-2. Κυλιόμενος διάδρομος, κινητήρας περιστροφής τυμπάνου και τύμπανο.

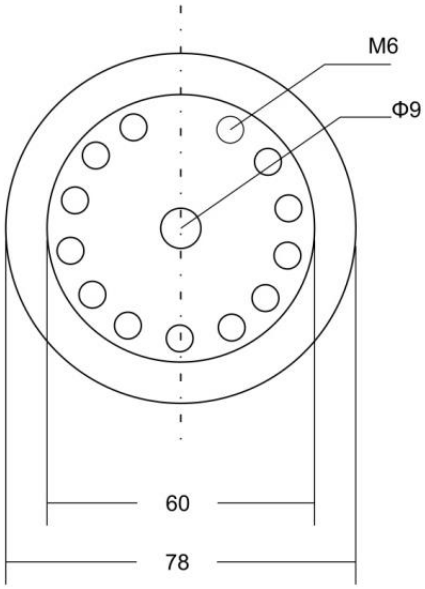
8.1.1 Διαδικασία που ακολουθήθηκε

1. Διαστασιολόγηση και αποτύπωση υπάρχουσας κατασκευής.
2. Ιδέα για κατασκευή σύνδεσης της παλμογεννήτριας με τον άξονα του τυμπάνου.
3. Σχεδιασμός.
4. Κατασκευή.
5. Πειράματα.
6. Βελτιώσεις.

8.1.2 Στάδιο 1: Διαστασιολόγηση

Η αποτύπωση της υπάρχουσας κατασκευής επιτυγχάνεται δια της απευθείας διαστασιολόγησης, δεδομένου του ότι δεν υπάρχουν τεχνικά φύλλα και σχέδια από τον κατασκευαστή (Σχήμα 8-3).



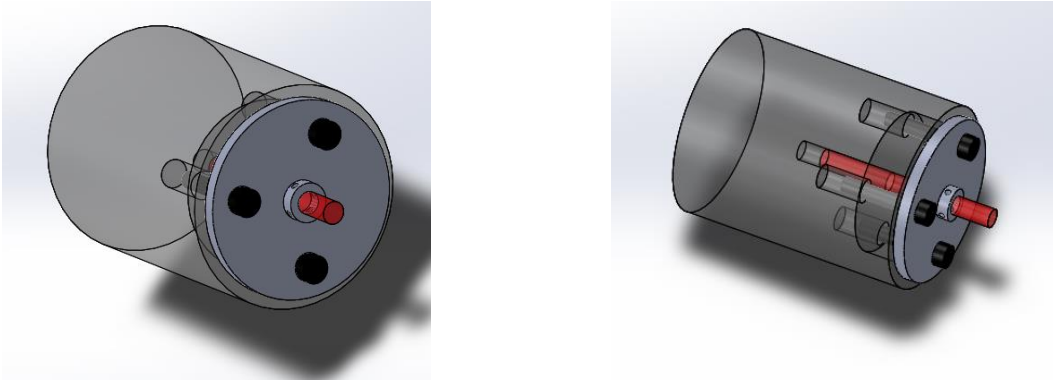


Σχήμα 8-3. Διαστασιολόγηση κατασκευής.

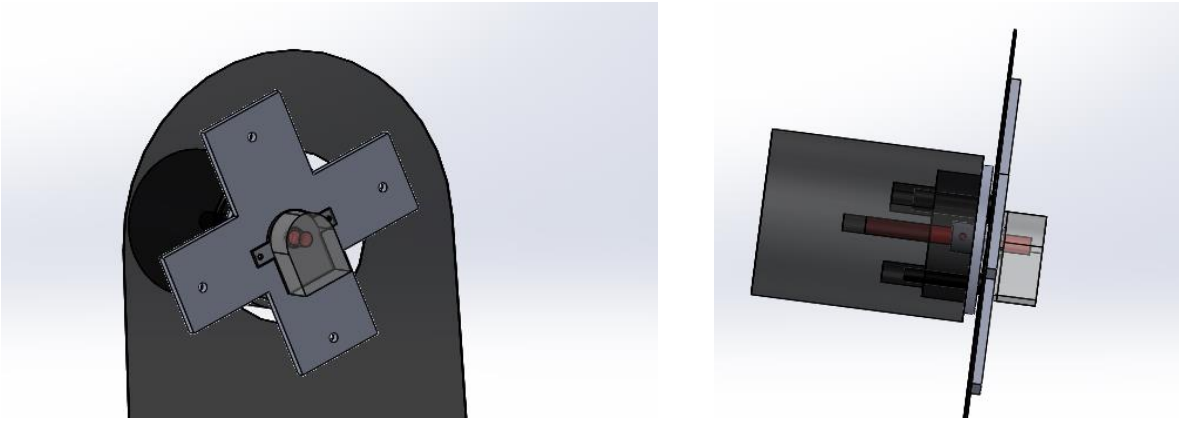
8.1.3 Στάδιο 2: Ιδέα

Εφόσον η παλμογεννήτρια χρειάζεται έναν άξονα περιστροφής και δεδομένου ότι η υπάρχουσα κατασκευή δεν περιλαμβάνει τέτοιο άξονα, μονάχα μια οπή (Φ9), αρκεί να κατασκευαστεί άξονας που να συνδέει την οπή με αυτήν. Επομένως η λογική που ακολουθείται είναι η κατασκευή ενός άξονα Φ8 (σύμφωνα με τις προδιαγραφές της παλμογεννήτριας) για αυτό το σκοπό. Εκείνο που πρέπει να εξασφαλιστεί είναι ότι η περιστροφή του άξονα θα είναι σύμφωνη με την περιστροφή του τυμπάνου.

Επιπλέον πρέπει να στηριχθεί η παλμογεννήτρια σε σταθερό σημείο πάνω στη λαμαρίνα και να εξασφαλιστεί η ομαλή περιστροφή του άξονα Φ8 μέσα σε αυτόν.



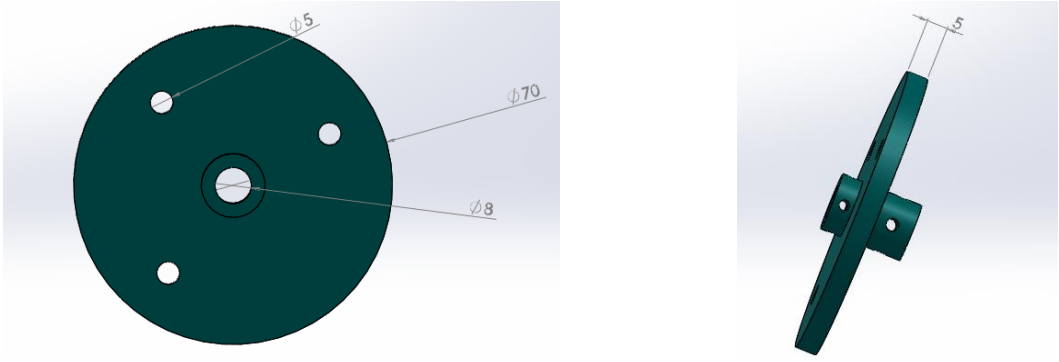
Σχήμα 8-4. Αποτύπωση στο λογισμικό Solidworks: Coupler τυμπάνου, shaft support και άξονας που κατασκευάζονται.



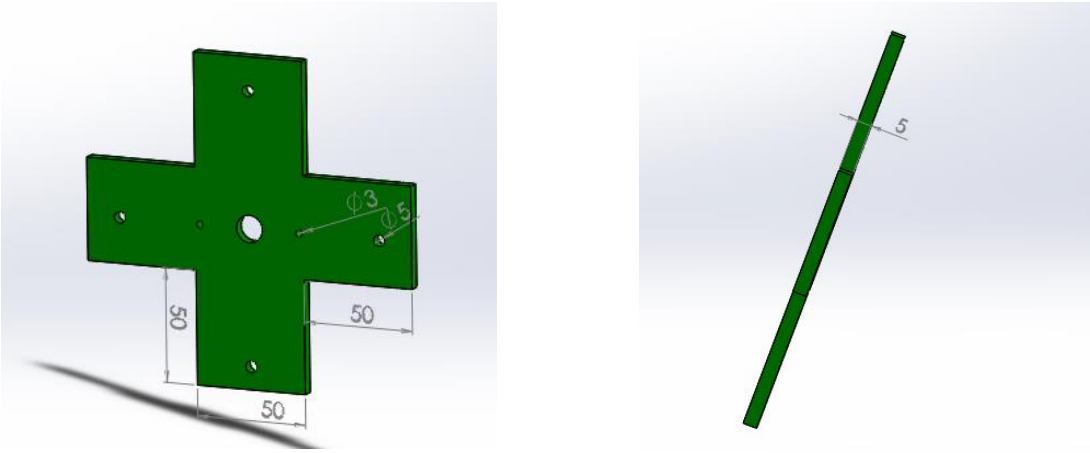
Σχήμα 8-5. Στήριξη encoder σε σταθερό σημείο.

8.1.4 Στάδιο 3: Σχεδιασμός

Για το σχεδιασμό, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Solidworks. Σχεδιάζονται δύο κομμάτια: ένα shaft support για τη σύνδεση με το coupler του τυμπάνου και ένα κομμάτι σε σχήμα σταυρού για τη σύνδεση της παλμογεννήτριας. Σκοπός είναι ο σταυρός και η παλμογεννήτρια να βρίσκονται σε σταθερό σημείο ενώ το coupler και ο άξονας Φ8 να περιστρέφονται σύμφωνα με το τύμπανο.



Σχήμα 8-6. Coupler.



Σχήμα 8-7. Σταυρός.

8.1.5 Στάδιο 4: Κατασκευή

Η κατασκευή των κομματιών επιλέγεται να γίνει σε τριδιάστατο εκτυπωτή για λόγους ταχύτητας και άμεσης αντικατάστασης. Χρησιμοποιείται ο εκτυπωτής Uprint της εταιρίας Stratasys και το STL file

handling για την εισαγωγή των Solidworks αρχείων στον εκτυπωτή είναι το Catalyst. Η πυκνότητα στη διάταξη των layer που θα εκτυπωθούν επιλέγεται να είναι “solid”, για υψηλότερη αντοχή. Ο χρόνος κατασκευής είναι περίπου 4 ώρες και ο χρόνος για την απαλλαγή των κομματιών από support material, περίπου 2 ώρες στο ειδικό «πλυντήριο» του εκτυπωτή.

Ο άξονας Φ8 είναι φτιαγμένος στον τόρνο του εργαστηρίου και είναι αλουμινένιος. Το μήκος του είναι 80mm.

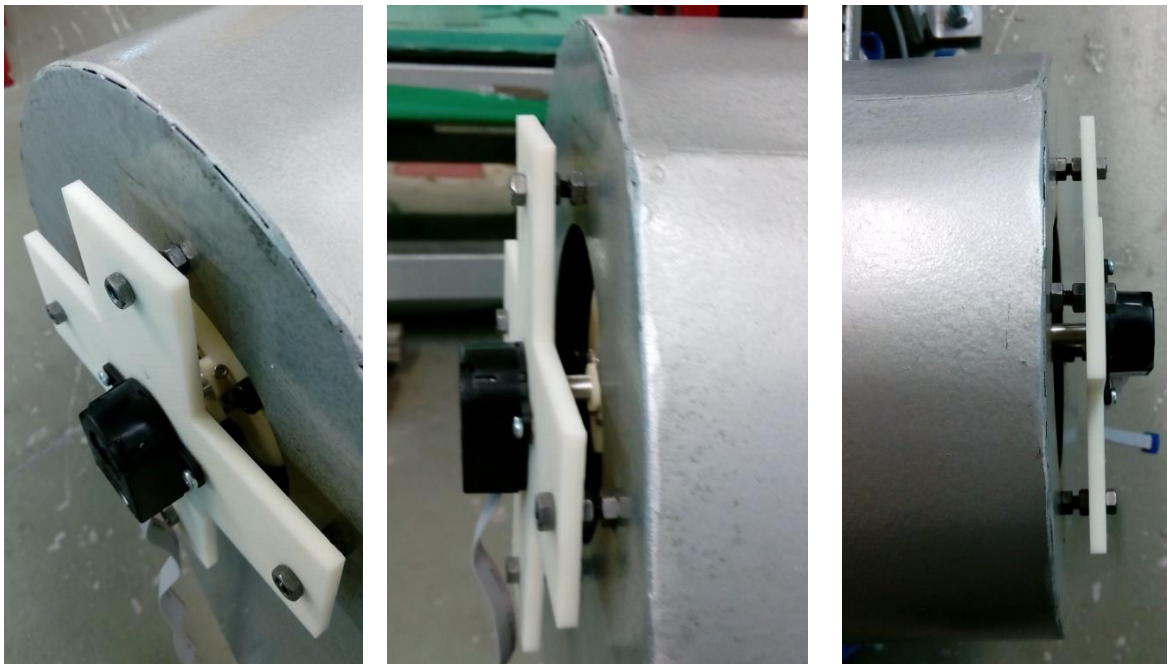
Τα σπειρώματα M6 στις τρύπες Φ5 του shaft support γίνονται με σπειρότομο.

8.1.6 Στάδιο 5: Πειράματα

Κατά τη διαδικασία περιστροφής του τυμπάνου του διαδρόμου και όσο αυξάνεται η ταχύτητα παρατηρείται έντονη ταλάντωση της παλμογεννήτριας καθώς περιστρέφεται μέσα σε αυτόν ο άξονας Φ8. Αυτό συμβαίνει όταν όλο το σύστημα δεν είναι πλήρως κεντραρισμένο και οι επιφάνειες των μερών όχι παράλληλες. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο αισθητήρας δίνει σωστές τις μετρήσεις των ταχυτήτων.

8.1.7 Στάδιο 6: Βελτιώσεις

Για να εξασφαλιστεί το κατά το δυνατόν κεντράρισμα του άξονα με όλα τα συστήματα και η παραλληλία των επιφανειών, χρησιμοποιούνται βίδες που «σφίγγουν» τον άξονα στο shaft support ενώ ο σταυρός βιδώνεται πάνω στη λαμαρίνα σε σταθερή απόσταση από το coupler.

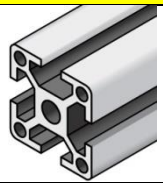
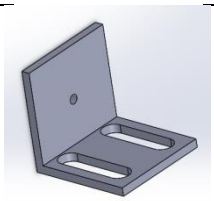


Σχήμα 8-8. Τοποθέτηση κομματιών και αισθητήρα – τελική κατασκευή.

8.2 Πίνακας εξαρτημάτων τελικής κατασκευής

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τα εξαρτήματα που περιλαμβάνει η κατασκευή καθώς και κάποια χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 8-1. Αναλυτικός πίνακας εξαρτημάτων κατασκευής

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΚΟΣΤΟΣ [€]
Προφίλ αλουμινίου 50x50 T8		Προμήθεια από την αγορά	Al 6063	-
Γραμμικοί οδηγοί ***MISUMI SXR33*** συνολικό μήκος 6m 6 blocks		Προμήθεια από την αγορά	JIS STKM (Alloy steel including JIS SCM 58 HRC)	1200
Γωνίες αλουμινίου με adjustment slots		Χειροκίνητη φρέζα	Al 6063	-
Γραμμικοί οδηγοί ***HIWIN HGW 20*** συνολικό μήκος 0.6m 2 blocks		Προμήθεια από την αγορά	-	300
Πλακίδια αλουμινίου πάχους 5mm 2 τμχ.		Εργαλειομηχανή cnc	AL 7075 T6	-
Shaft support ***MISUMI SHF 8*** 4 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά	EN AC - 51300	30
St. Steel Shafts Φ8 μήκους 1m 2τμχ.		Προμήθεια από την αγορά	EN 1.1191	
Rings ***MISUMI SCD8*** 4 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά	EN 1.1191	20

linear Bearings ***MISUMI LHBBD8*** 6 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά		30
Πλακίδιο αλουμινίου πάχους 5mm		Εργαλειομηχανή cnc	AL 7075 T6	
Shaft support ***MISUMI SHFL 15*** τμχ. 1		Προμήθεια από την αγορά	EN 1.1191	19
Άξονας Φ15 - 20		Χειροκίνητος τόρνος	AL 7075 T6	
Cam followers ***MISUMU CFFAG6 16*** 2 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά	EN 1.3505	20
Ακτινικό ρουλεμάν ***SKF 51102*** 1 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά		14
GIMBAL		Εργαλειομηχανή cnc	AL 7075 T6	

Άξονας gimbal		Χειροκίνητος τόρνος	AL 7075 T6	
Ρουλεμάν Oval flange ***KDF UFL001*** 2 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά		10
Άξονας Φ15 μήκους 60cm		Χειροκίνητος τόρνος	AL 7075 T6	
Shaft collars MISUMI SCSW15 10 4 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά	EN 1.4301	20
Πλακίδια πάχους 5mm.		Χειροκίνητη φρέζα	AL 7075 T6	
Άξονες Φ12		Χειροκίνητος τόρνος	AL 7075 T6	
Bushings square flange ***MISUMI LHZSW12*** 2 τμχ.		Προμήθεια από την αγορά	EN 1.3505	30