

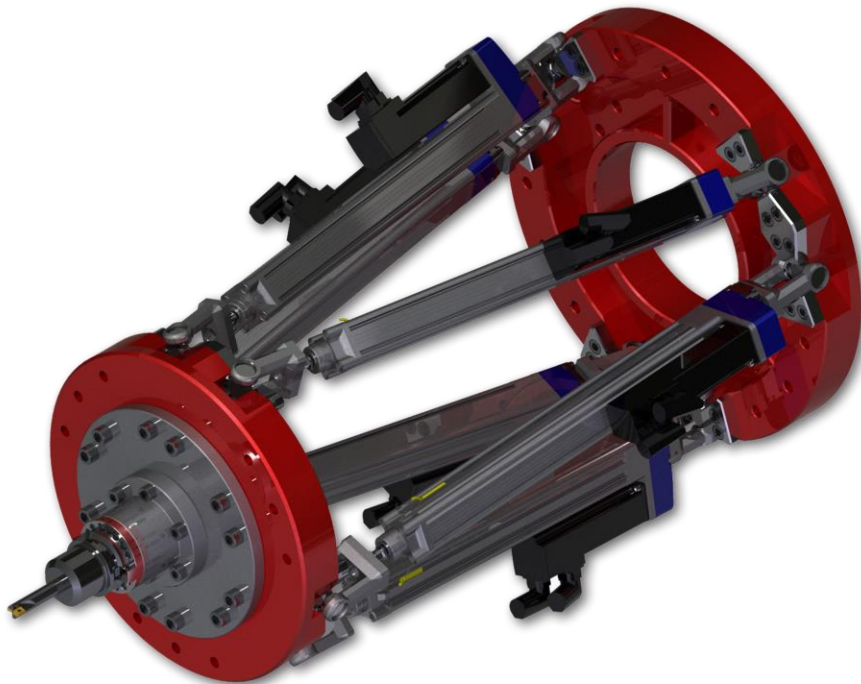


ΤΕΙ Κρήτης  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

## Πτυχιακή Εργασία

Σχεδιασμός και Υπολογιστική Προσομοίωση Πλατφόρμας Stewart για  
κατεργασία έξι αξόνων σε λογισμικό CAD/CAM/CAE

---



Σπουδαστής:

Μουντάκης Νικόλαος

Επιβλέπων Καθηγητές:

Δρ. Βιδάκης Νεκτάριος  
Δρ. Πετούσης Μάρκος

Ηράκλειο 2017



TEI of Crete

School of Engineering - Department of Mechanical Engineering

## Graduation Project

# Design and Computational Simulation of Stewart Platform for Six Axis Machining in CAD/CAM/CAE Software

---



Student: Mountakis Nikolaos

Supervising Teachers: Dr. Vidakis Nectarios  
Dr. Petousis Markos

Heraklion 2017

Στην αγαπημένη μου μητέρα.



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	i
Περιεχόμενα εικόνων .....	iii
Περιεχόμενα πινάκων .....	vi
Abstract.....	vii
Επιτελική σύνοψη .....	viii
1 Εισαγωγή πτυχιακής εργασίας.....	1
2 Τύποι ρομποτικών διατάξεων με γραμμικούς επενεργητές και σφαιρικές αρθρώσεις.....	2
2.1 Επιμέρους τυποποιημένα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις.....	2
2.1.1 Τύποι γραμμικών επενεργητών που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις .....	2
2.1.2 Τύποι περιστροφικών επενεργητών που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις .....	4
2.1.3 Κοχλίες .....	7
2.1.4 Γενικής χρήσεως σφαιρικές αρθρώσεις και εφαρμογές τους.....	8
2.2 Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου Hexapteron.....	9
2.3 Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Quattro Robot.....	10
2.4 Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Delta Robot .....	10
2.5 Μηχανισμός SmarPod έξι βαθμών ελευθερίας από την SmarAct.....	11
2.6 Μηχανισμός τριών βαθμών ελευθερίας σφαιρικού τύπου .....	11
2.7 Μηχανισμός τριών βαθμών ελευθερίας τύπου Τρίποδα.....	12
2.8 Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας παράλληλου τύπου με γραμμικούς επενεργητές από την PI miCos.....	12
2.9 Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας παράλληλου τύπου SCARA.....	13
3 Πλατφόρμα Stewart έξι βαθμών ελευθερίας .....	14
3.1 Εισαγωγή στην πλατφόρμα Stewart έξι βαθμών ελευθερίας .....	14
3.2 Ιστορική αναδρομή πλατφόρμας Stewart.....	14
3.3 Περιγραφή πλατφόρμας Stewart.....	17
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πλατφόρμας Stewart .....	19
3.5 Τομείς χρήσης πλατφόρμας Stewart.....	19
3.5.1 Προσομοιωτής πτήσης.....	19
3.5.2 Προσομοιωτές οδήγησης.....	20
3.5.3 Συσκευές οστεογένεσης.....	21
3.5.4 Επιπλέον εφαρμογές πλατφόρμας Stewart .....	22
4 Μελέτη γεωμετρικής μοντελοποίησης πλατφόρμας Stewart.....	23
4.1 Εισαγωγή .....	23
4.2 Επιλογή τύπου πλατφόρμας Stewart.....	23
4.3 Επιλογή τύπου γραμμικών επενεργητών .....	23
4.3.1 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHB.....	24
4.3.2 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHM .....	24
4.3.3 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CASM.....	25
4.3.4 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAT & CAR.....	26
4.3.5 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CEMC.....	27
4.3.6 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου EcoMag.....	28
4.3.7 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου LEMC .....	28
4.3.8 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου Matrix .....	29
4.3.9 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου Runner.....	30
4.3.10 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου SRSA.....	31
4.3.11 Επιλογή τύπου σφαιρικών αρθρώσεων Cardan.....	32
5 Γεωμετρική μοντελοποίηση μη τυποποιημένων εξαρτημάτων υλοποίησης πλατφόρμας Stewart.....	33
5.1 Κάτω βάση .....	33
5.2 Πάνω βάση.....	33
5.3 Εξαρτήματα συγκράτησης γραμμικών επενεργητών.....	34
5.4 Εξαρτήματα συγκράτησης σφαιρικών αρθρώσεων.....	34
5.5 Επιλογή κατάλληλων στοιχείων λυόμενων συνδέσεων.....	36
5.6 Σύστημα συγκράτησης μηχανισμού κοπής τύπου Router .....	36
5.7 Γεωμετρική μοντελοποίηση βάσης στήριξης περιστροφικού μηχανισμού κοπής τύπου Router.....	36
5.8 Τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση πλατφόρμας Stewart.....	38



5.9	Περιορισμοί και υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα γεωμετρικής μοντελοποίησης για την συναρμολόγηση της πλατφόρμας .....	41
6	Κινηματική προσομοίωση πλατφόρμας Stewart .....	42
6.1	Εισαγωγή στο περιβάλλον εργασίας λογισμικού προσομοίωσης PTC Creo 3.0 Mechanism .....	42
6.2	Προσθήκη σερβοκινητήρων στο κινηματικό μοντέλο .....	42
6.3	Υπολογισμός τροχιάς σερβοκινητήρων και δημιουργία αρχείων κίνησης πλατφόρμας Stewart.....	43
6.4	Δημιουργία και πραγματοποίηση ανάλυσης θέσης πλατφόρμας Stewart.....	44
7	Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων .....	47
7.1	Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό μελέτης μηχανικής συμπεριφοράς PTC Creo Simulate 3.0.....	47
7.2	Προσδιορισμός υλικών (Materials).....	48
7.3	Δήλωση στηρίξεων (Constraints) .....	49
7.4	Ορισμός συνδέσεων (Connections) .....	50
7.5	Εισαγωγή μετρητικών οργάνων (Measures).....	50
7.6	Εισαγωγή φορτίσεων (Loads) .....	51
7.7	Διαδικασία για την διεξαγωγή στατικής ανάλυσης (Static Analysis).....	53
8	Αποτελέσματα προσομοίωσης μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας Stewart.....	55
8.1	Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της βάσης του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart .....	55
8.2	Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της βάσης του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε φορτία υπό κλίση.....	56
8.3	Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της άνω και κάτω βάσης της πλατφόρμας Stewart μαζί με τις έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών μαζί με τις σφαιρικές αρθρώσεις .....	60
8.4	Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart .....	62
8.5	Ανάλυση αποτελεσμάτων και επιλογή υλικών .....	69
9	Τελική σύνοψη πτυχιακής εργασίας .....	70
Βιβλιογραφία .....		71
Βιβλία.....		71
Ιστοσελίδες.....		71
Παράρτημα .....		72
Κώδικας κατασκευής αρχείων κίνησης της πλατφόρμας Stewart για τον προσδιορισμό του χώρου εργασίας .....		72
Κώδικας δημιουργίας γραφήματος κίνησης σερβοκινητήρων ως προς τον χρόνο .....		74
Πληροφορίες εγγράφου .....		75



## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 2.1:	Πνευματικοί επενεργητές διαφόρων βάσεων και διαδρομών από την Festo.....	3
Εικόνα 2.2:	Υδραυλικοί επενεργητές, αριστερά βρίσκεται ένας γραμμικός ενώ δεξιά ένας περιστροφικός. ....	4
Εικόνα 2.3:	Γραμμικοί επενεργητές από την Industrial Devices (GB), τάση 12 ή 24 Volt, μέγιστο φορτίο 2500Nt, διαδρομή 600mm.....	4
Εικόνα 2.4:	Κινητήρας τύπου Stepper που ενσωματώνει επανακυκλοφορούντα σφαιρίδια με δυνατότητα ροπής από 1,7 έως 10 Nm.....	5
Εικόνα 2.5:	Περιστροφικά μοντέλα κινητήρων τύπου Servo μικρής ισχύος.....	6
Εικόνα 2.6:	Περιστροφικά μοντέλα κινητήρων τύπου Servo μεγάλης ισχύος. ....	6
Εικόνα 2.7:	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μικρής ισχύος.....	7
Εικόνα 2.8:	Κινητήρες εναλλασόμενου ρεύματος μέσης - μεγάλης ισχύος. ....	7
Εικόνα 2.9:	Κοχλίες μετρικού σπειρώματος M10x35.....	8
Εικόνα 2.10:	Διπλός σφαιρικός σύνδεσμος βαρέως τύπου Universal Joint / Cardan. ....	8
Εικόνα 2.11:	Σφαιρικός σύνδεσμος τύπου Ball Joint σε τομή. ....	9
Εικόνα 2.12:	Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου Hexapteron μαζί με τομή στο τελικό άκρο δράσης. ....	9
Εικόνα 2.13:	Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Quattro robot από την adept. ....	10
Εικόνα 2.14:	Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Delta robot από την ABB. ....	11
Εικόνα 2.15:	Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου SmartPod από την SmartAct.....	11
Εικόνα 2.16:	Μηχανισμοί τριών βαθμών ελευθερίας σφαιρικού τύπου με γραμμικούς και περιστροφικούς επενεργητές. ....	12
Εικόνα 2.17:	Παράλληλος μηχανισμός από την FESTO με τρία πόδια, τριών βαθμών ελευθερίας με γραμμικούς επενεργητές. ....	12
Εικόνα 2.18:	Παράλληλος μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας από την PI miCos.....	13
Εικόνα 2.19:	Ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου SCARA.....	13
Εικόνα 3.1:	Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου πλατφόρμας Stewart ..... 14	14
Εικόνα 3.2:	Ενδεχομένως η πρώτη παράλληλη ρομποτική πλατφόρμα που εφευρέθηκε το 1928 από τον James E. Winnett.....	14
Εικόνα 3.3:	Το παράλληλο ρομπότ τριών βραχιόνων και πέντε βαθμών ελευθερίας που σχεδιάστηκε το 1934 από τον Willard L. V. Pollard και τον γιό του Willard L. G. Pollard Jr. για τον ψεκάσμο βαφής.....	15
Εικόνα 3.4:	Η πρώτη οκτάεδρη εξάποδη πλατφόρμα του Dr. Eric Gough που κατασκευάστηκε το 1954 για δοκιμές σε ελαστικά αεροσκαφών. Αριστερά φαίνεται μια παλιά φωτογραφία όταν ακόμη ήταν σε λειτουργία ενώ δεξιά μια πιο πρόσφατη που βρίσκεται στο μουσείο επιστημών στο Λονδίνο.....	16
Εικόνα 3.5:	Ο πρώτος προσομοιωτής πτήσης από του Klaus L. Cappel που κατασκευάστηκε το 1965. Αριστερά και στο κέντρο φαίνεται η πλατφόρμα ενώ στην δεξιά εικόνα διακρίνεται ο Klaus L. Cappel να εξηγεί τον τρόπο λειτουργίας της πλατφόρμας στους διευθυντές του ιδρύματος Franklin. ....	16
Εικόνα 3.6:	Ο εφευρέτης της πλατφόρμας Stewart, ο D. Stewart και το πρώτο σχέδιο της πλατφόρμας που πρότεινε για χρήση ως προσομοιωτής πτήσεων το 1965.....	17
Εικόνα 3.7:	Επεξήγηση έξι βαθμών ελευθερίας κίνησης πλατφόρμας Stewart, 3 για την θέση και 3 για τον προσανατολισμό .....	18
Εικόνα 3.8:	Τύποι διάταξης επενεργητών πλατφόρμας Stewart.....	18
Εικόνα 3.9:	Προσομοιωτής πτήσεως που χρησιμοποιείται από την Lufthansa με τη χρήση πλατφόρμας Stewart και προσομοιωτής πτήσεως από την CAE για Boeing 737.....	19
Εικόνα 3.10:	Προσομοιωτής οδήγησης τράκτορα 6 αξόνων, μοντέλο AS1600 από την Automex.....	20
Εικόνα 3.11:	Ο μεγαλύτερος προσομοιωτής οδήγησης αυτοκινήτου από την Toyota.....	21
Εικόνα 3.12:	Σχηματική αναπαράσταση συσκευών οστεογένεσης με τη χρήση πλατφόρμας Stewart. ....	21
Εικόνα 4.1:	Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμικού επενεργητή που επιλέχθηκε για την υλοποίηση κίνησης της πλατφόρμας Stewart. ....	23
Εικόνα 4.2:	Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHB-10 κατάλληλος για εφαρμογές σε αντίξοες συνθήκες... 24	24
Εικόνα 4.3:	Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHM-31 κατάλληλος για μεγάλες εφαρμογές φορτίων. ....	25
Εικόνα 4.4:	Γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου CASM κατάλληλοι για χρήση σε ρομποτικά συστήματα και μηχανές κατεργασίας. ....	26
Εικόνα 4.5:	Γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου CAT και CAR κατάλληλοι για άπειρες εφαρμογές. ....	27
Εικόνα 4.6:	Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CEMC κατάλληλος για χρήση βαρέους τύπου σε σημεία όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα ισχύος.....	27



Εικόνα 4.7:	Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου EcoMag κατάλληλος για χρήση σε νοσοκομεία, κλινικές και ιδρύματα αποκατάστασης.....	28
Εικόνα 4.8:	Οι γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου LEMC είναι κατάλληλος για βαριά βιομηχανική χρήση κάτω από αντίξοες συνθήκες.....	29
Εικόνα 4.9:	Γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου Matrix κατάλληλοι για εργασία σε περιβάλλον όπου απαιτείται ισχία.....	30
Εικόνα 4.10:	Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου Runner κατάλληλος για ιατρικές εφαρμογές υψηλής δύναμης και συμπαγούς κατασκευής.....	31
Εικόνα 4.11:	Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου SRSA κατάλληλος για εφαρμογές υψηλής ισχύος με μεγάλες επιταχύνσεις.....	31
Εικόνα 4.12:	Σφαιρικές αρθρώσεις / Universal Joint διαφόρων τύπων.....	32
Εικόνα 5.1:	Κάτω βάση της πλατφόρμας Stewart.....	33
Εικόνα 5.2:	Πάνω βάση της πλατφόρμας Stewart.....	34
Εικόνα 5.3:	Εξαρτήματα συγκράτησης των γραμμικών επενεργητών και των σφαιρικών αρθρώσεων.....	34
Εικόνα 5.4:	Εξαρτήματα συγκράτησης των σφαιρικών αρθρώσεων της κάτω βάσης.....	35
Εικόνα 5.5:	Εξαρτήματα συγκράτησης των σφαιρικών αρθρώσεων της πάνω βάσης.....	35
Εικόνα 5.6:	Περιστροφικός μηχανισμός κοπής τύπου Router μαζί με το σύστημα συγκράτησης κοπτικών εργαλείων και την βάση στήριξης.....	36
Εικόνα 5.7:	Επίπεδα σχεδιασμού του λογισμικού PTC Creo, δισδιάστατος σχεδιασμός γεωμετρίας εξαρτήματος και τελική τρισδιάστατη μορφή της βάσης στήριξης μηχανισμού τύπου Router.....	37
Εικόνα 5.8:	Αριστερά φαίνεται η λοξοτομημένες περιοχές του εξαρτήματος, στην μέση η κατασκευή των οπών και δεξιά το τελικό εξάρτημα.....	37
Εικόνα 5.9:	Τρισδιάστατη απεικόνιση της βάσης του γραμμικού επενεργητή.....	38
Εικόνα 5.10:	Τρισδιάστατη απεικόνιση του γραμμικού επενεργητή μαζί με τις βάσεις και τις σφαιρικές αρθρώσεις.....	38
Εικόνα 5.11:	Τρισδιάστατη απεικόνιση της κάτω βάσης πλατφόρμας Stewart.....	39
Εικόνα 5.12:	Τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart μαζί με γραμμικούς επενεργητές.....	39
Εικόνα 5.13:	Τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart χωρίς κοπτικό εργαλείο.....	40
Εικόνα 5.14:	Τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart με βάση εργαλείου τύπου Router.....	40
Εικόνα 6.1:	Περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo 3.0 - Mechanism.....	42
Εικόνα 6.2:	Περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo 3.0 - Mechanism μαζί με την πλατφόρμα Stewart, αριστερά φαίνονται τα Joints ενώ δεξιά φαίνεται το παράθυρο επιλογής κινήσεων.....	43
Εικόνα 6.3:	Τροχιά κίνησης πλατφόρμας Stewart στον μέγιστο δυνατό χώρο εργασίας.....	44
Εικόνα 6.4:	Γράφημα απεικόνισης χώρου εργασίας πλατφόρμας Stewart.....	44
Εικόνα 6.5:	Περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης λογισμικού PTC Creo Parametric 3.0 Mechanism, αριστερά φαίνεται το παράθυρο επιλογής τύπου ανάλυσης ενώ δεξιά οι επιλογές εξαγωγής της τροχιάς που πραγματοποίησε η πλατφόρμα.....	45
Εικόνα 6.6:	Σπειροειδής τροχιά κίνησης που ακολουθήθηκε σε συνδυασμό με τον χώρο που κινήθηκε το κοπτικό εργαλείο.....	45
Εικόνα 6.7:	Χώρος εργασίας πλατφόρμας Stewart.....	46
Εικόνα 6.8:	Γράφημα απεικόνισης μήκους επενεργητών συναρτήσει του χρόνου, για τη σπειροειδή τροχιά κίνησης που ακολουθήθηκε.....	46
Εικόνα 7.1:	Περιβάλλον μηχανικής προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo 3.0 Simulate μαζί με την πλατφόρμα Stewart.....	47
Εικόνα 7.2:	Η καρτέλα Model Setup στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.....	48
Εικόνα 7.3:	Περιβάλλον καταχώρησης υλικών στο PTC Creo Simulate.....	49
Εικόνα 7.4:	Η καρτέλα Constraints (Displacement) στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.....	50
Εικόνα 7.5:	Η καρτέλα Interface στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.....	50
Εικόνα 7.6:	Η καρτέλα Measure Definition στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.....	51
Εικόνα 7.7:	Η καρτέλα Force/Moment Load στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.....	52



Εικόνα 7.8:	Η καρτέλα Analysis Definition Load στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate. ....	54
Εικόνα 8.1:	Σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N στην κάθε πλευρά του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart και επιφάνεια πάκτωσης της βάσης συγκράτησης. ....	55
Εικόνα 8.2:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart σε κυλινδρικό φορτίο 350 N στην κάθε πλευρά. ....	56
Εικόνα 8.3:	Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή. ....	57
Εικόνα 8.4:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N. ....	57
Εικόνα 8.5:	Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N υπό κλίση 15 μοιρών σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή. ....	57
Εικόνα 8.6:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N υπό κλίση 15 μοιρών. ....	58
Εικόνα 8.7:	Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N υπό κλίση 30 μοιρών σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή. ....	58
Εικόνα 8.8:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N υπό κλίση 30 μοιρών. ....	58
Εικόνα 8.9:	Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N υπό κλίση 45 μοιρών σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή. ....	59
Εικόνα 8.10:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N υπό κλίση 45 μοιρών. ....	59
Εικόνα 8.11:	Κάτω βάση πλατφόρμας Stewart μαζί με τις έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών σε φόρτιση 700 N στην κάθε βάση και πάκτωση στην κάτω μεριά. ....	60
Εικόνα 8.12:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της κάτω βάσης της πλατφόρμας Stewart σε δύναμη 700 N στην κάθε βάση του γραμμικού επενεργητή. ....	60
Εικόνα 8.13:	Πάνω βάση πλατφόρμας Stewart μαζί με τις έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών σε φόρτιση 700 N στην κάθε βάση και πάκτωση στην πάνω μεριά. ....	61
Εικόνα 8.14:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πάνω βάσης της πλατφόρμας Stewart σε δύναμη 700 N στην κάθε βάση του γραμμικού επενεργητή. ....	61
Εικόνα 8.15:	Γραμμικός επενεργητής μετά την απλοποίηση του. ....	62
Εικόνα 8.16:	Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση. ....	63
Εικόνα 8.17:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης. ....	63
Εικόνα 8.18:	Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση. ....	64
Εικόνα 8.19:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης. ....	64
Εικόνα 8.20:	Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση. ....	65
Εικόνα 8.21:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης. ....	65
Εικόνα 8.22:	Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση. ....	66
Εικόνα 8.23:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης. ....	66
Εικόνα 8.24:	Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση. ....	67
Εικόνα 8.25:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης. ....	67
Εικόνα 8.26:	Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση. ....	68
Εικόνα 8.27:	Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης. ....	68





## Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή.....	56
Πίνακας 2:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή, καθώς επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν.....	56
Πίνακας 3:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή μαζί με την σφαιρική άρθρωση. ....	59
Πίνακας 4:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή μαζί με την σφαιρική άρθρωση, καθώς επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν.....	59
Πίνακας 5:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την πάνω και κάτω βάση. ....	61
Πίνακας 6:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την πάνω και κάτω βάση, καθώς επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν. ..	61
Πίνακας 7:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την ανάλυση του συνολικού μοντέλου της πλατφόρμας. ....	68
Πίνακας 8:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την ανάλυση του συνολικού μοντέλου της πλατφόρμας. ....	69
Πίνακας 9:	Συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς του συνολικού μοντέλου της πλατφόρμας.....	69



## Abstract

This thesis examines the use of the Stewart Platform in industrial applications for material removal processes. This section is a summary of the content of the individual chapters of this thesis.

The second chapter is a brief review of the most widely used robotic devices with spherical joints. We present the advantages and disadvantages, the number of the degrees of freedom, the type of movement that runs the end effector and possible areas of application for each of these mechanisms.

The third chapter is an introduction to the main subject of this project, the Stewart Platform. Here we submit a historical review where we analyze the Platform's development in time, with a description of the various Platform types available and the movements they can perform, as well as its advantages and disadvantages. Finally, reference is made to the most common areas of use of the Stewart Platform.

In the fourth chapter, initially the type of Platform chosen is indicated and then we present the market research that was carried out for the selection of actuators that drive the prismatic joints of the Platform.

The fifth chapter presents the geometric modeling process of non-standard parts. Also, here is described the cutter retaining system that was developed for performing material removal machining. Finally, the assembly process of the individual components is shown in a central assembly file.

The sixth chapter presents the Platform kinematics simulation process using the Mechanism application provided by PTC Creo Parametric 3.0 software package. More specifically, here is provided a list of the available types of simulation and the options that are provided for each of them. Finally, the arrangements that were made for the execution of kinematics analysis are set out.

The seventh chapter presents the process of studying the mechanical behavior of the Stewart Platform using the PTC Creo Simulate 3.0 software package. Reference is made to the settings required for the realization of a simulation including material selection for parts, fixing supports, connections and loads and the input of measuring instruments. Finally, a description of the static analysis process is carried out.

In the eighth chapter the results of the simulations are presented for the study of the mechanical behavior of the Stewart Platform. At first, a set of analyzes were performed for each of the components of the Platform and then they were analyzed as a total for the assembled Platform. For every case, it is shown how the load is applied as a graphical display of the results as well as the aggregate tables with the input data and the results of the analysis are presented.

Finally, a summary of the conclusions drawn from the entire process of this project, both during the development process and during the writing process.



## Επιτελική σύνοψη

Στην παρούσα πτυχιακή εξετάζεται η χρήση της πλατφόρμας Stewart σε βιομηχανικές εφαρμογές για κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Στην συνέχεια αυτής της ενότητας γίνεται σύνοψη του περιεχομένου των επιμέρους κεφαλαίων της παρούσας πτυχιακής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική ανασκόπηση των πιο διαδεδομένων ρομποτικών διατάξεων με σφαιρικές αρθρώσεις. Για κάθε έναν από αυτούς τους μηχανισμούς παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας τους, ο τύπος κίνησης που εκτελεί το άκρο καθώς και πιθανοί τομείς εφαρμογής τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο κυρίως θέμα της παρούσας πτυχιακής, την πλατφόρμα Stewart. Αρχικά γίνεται μια ιστορική αναδρομή όπου αναλύεται η εξέλιξη στο χρόνο αυτού του μηχανισμού, στην συνέχεια γίνεται περιγραφή των διάφορων διαθέσιμων τύπων πλατφόρμας Stewart και των κινήσεων που μπορούν να εκτελέσουν, όπως επίσης τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της. Τέλος γίνεται αναφορά στους πιο διαδεδομένους τομείς χρήσης της πλατφόρμας Stewart.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αρχικά αναφέρεται ο τύπος της πλατφόρμας που επιλέχθηκε και στην συνέχεια παρατίθεται η διαδικασία έρευνας αγοράς που πραγματοποιήθηκε για την επιλογή των επενεργητών που οδηγούν τις πρισματικές αρθρώσεις τις πλατφόρμας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία γεωμετρικής μοντελοποίησης των μη τυποποιημένων εξαρτημάτων. Επίσης παρουσιάζεται το σύστημα συγκράτησης μηχανισμού κοπής που αναπτύχθηκε για την πραγματοποίηση κατεργασιών αφαίρεσης υλικού. Τέλος, παρουσιάζεται η συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων σε ένα κεντρικό αρχείο συναρμολόγησης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία κινηματικής προσομοίωσης της πλατφόρμας Stewart με τη χρήση της εφαρμογής Mechanism του λογισμικού PTC Creo Parametric 3.0. Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται οι διαθέσιμοι τύποι προσομοίωσης και οι επιλογές που παρέχονται για τον κάθε ένα από αυτούς. Τέλος παρατίθενται οι ρυθμίσεις που έγιναν για την εκτέλεση της κινηματικής ανάλυσης.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart με χρήση του λογισμικού PTC Creo Simulate 3.0. Ειδικότερα, γίνεται αναφορά στις ρυθμίσεις που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης οι οποίες περιλαμβάνουν την επιλογή υλικών για τα εξαρτήματα, τον καθορισμό στηρίξεων, συνδέσεων και φορτίσεων αλλά και την εισαγωγή μετρητικών οργάνων. Τέλος, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας διεξαγωγής στατικής ανάλυσης.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τα επιμέρους εξαρτήματα της πλατφόρμας ενώ στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε συνολική ανάλυση για ολόκληρη τη συναρμολογημένη πλατφόρμα. Για την κάθε περίπτωση παρουσιάζεται ο τρόπος εφαρμογής του φορτίου, η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, όπως επίσης συγκεντρωτικοί πίνακες με τα δεδομένα εισαγωγής και τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Τέλος, γίνεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από όλη την διαδικασία εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής, τόσο κατά την διαδικασία ανάπτυξης όσο και κατά την διαδικασία συγγραφής.



## 1 Εισαγωγή πτυχιακής εργασίας

Παραδοσιακά, οι εφαρμογές κατεργασίας υλικών στην βιομηχανία γίνονται με χρήση εργαλειομηχανών που υποστηρίζουν έως πέντε άξονες κατεργασίας. Στην παρούσα πτυχιακή προτείνεται η χρήση πλατφόρμας Stewart έξι βαθμών ελευθερίας ενώ σκοπός ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης της πλατφόρμας σε εφαρμογές κατεργασίας υλικών. Στα πλαίσια της εργασίας γίνεται εμβάθυνση στη λειτουργία της συγκεκριμένης ρομποτικής διάταξης και στην τεχνολογία των CAD/CAE συστημάτων.

Αντικείμενο της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι ο σχεδιασμός της πλατφόρμας Stewart σε κατάλληλο CAD/CAE λογισμικό με προδιαγραφές οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν βιομηχανικές διαδικασίες, όπως η κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Επίσης, γίνεται προσομοίωση και μελέτη της κινηματικής και μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας με κατάλληλες προδιαγραφές εισόδου που επαληθεύουν τη δυνατότητα χρήσης της σε τέτοιου είδους βιομηχανικές κατεργασίες.

Για την γεωμετρική μοντελοποίηση, την συναρμολόγηση, τις προσομοιώσεις και τις αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PTC CREO 3.0 και πιο συγκεκριμένα οι εφαρμογές Parametric, Mechanism και Simulate για την γεωμετρική μοντελοποίηση, κινηματική και μηχανική ανάλυση αντίστοιχα. Επίσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB για την σύνταξη βοηθητικού κώδικα.



## 2 Τύποι ρομποτικών διατάξεων με γραμμικούς επενεργητές και σφαιρικές αρθρώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση των πιο γνωστών παράλληλων ρομποτικών μηχανισμών. Γίνεται αναφορά στα επιμέρους τυποποιημένα εξαρτήματα και τον τύπο των επενεργητών που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις, στο πλήθος των βαθμών ελευθερίας που διαθέτουν αλλά και στα μειονεκτήματα - πλεονεκτήματα τους.

### 2.1 Επιμέρους τυποποιημένα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις

Για τις κινήσεις των ρομποτικών διατάξεων είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι επενεργητές οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τις κινήσεις αυτές και σφαιρικές αρθρώσεις για την επιμέρους στήριξη των επενεργητών. Επίσης μεταξύ άλλων χρησιμοποιούνται και κοχλίες για την στήριξη των επιμέτρων εξαρτημάτων.

#### 2.1.1 Τύποι γραμμικών επενεργητών που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις

Ένας γραμμικός επενεργητής είναι ένας επενεργητής που δημιουργεί κίνηση σε ευθεία γραμμή, σε αντίθεση με την κυκλική κίνηση ενός συμβατικού ηλεκτροκινητήρα. Οι γραμμικοί επενεργητές χρησιμοποιούνται στον τομέα των εργαλειομηχανών και βιομηχανικών μηχανημάτων, στα περιφερειακά των υπολογιστών όπως εκτυπωτές και σε πολλά άλλα μέρη όπου απαιτείται γραμμική κίνηση. Την γραμμική κίνηση την παράγουν είτε υδραυλικοί είτε πνευματικοί κύλινδροι. Επίσης χρησιμοποιούνται μηχανισμοί για την παραγωγή γραμμικής κίνησης από έναν ηλεκτρικό περιστροφικό κινητήρα.

##### 2.1.1.1 Πνευματικοί επενεργητές

Τα πνευματικά συστήματα είναι συστήματα που χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα προκειμένου να κινήσουν κατάλληλους επενεργητές. Ο πεπιεσμένος αέρας μπορεί να υπάρξει σε κάθε βιομηχανική εγκατάσταση. Η παραγωγή του γίνεται με εμβολοφόρους ή κοχλιοφόρους συμπιεστές και υπάρχει συνήθως δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει και αεριοφυλάκιο. Η χρήση πνευματικών επενεργητών ενδείκνυται σε περιπτώσεις που υπάρχει επενέργεια σε μικρά φορτία και χρειάζονται μεγάλες ταχύτητες.

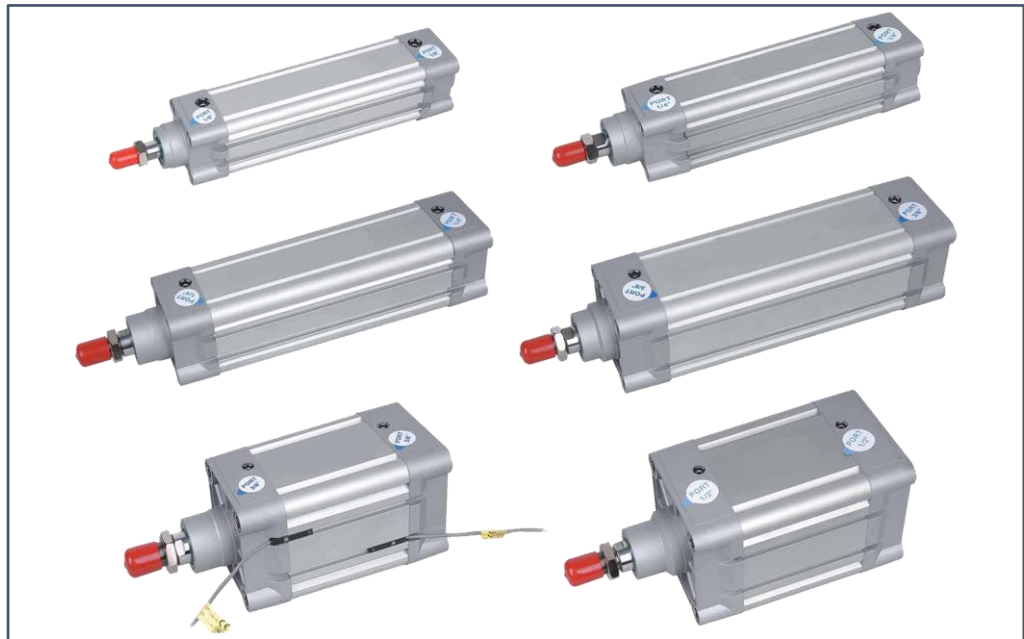
Τα πλεονεκτήματα τους είναι:

- χαμηλό κόστος
- αξιοπιστία
- μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες
- δεν λερώνουν

Στα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγονται τα παρακάτω:

- δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές ελέγχου θέσης που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια λόγω συμπίεστικότητας
- δεν είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου απαιτείται να ασκηθούν μεγάλες δυνάμεις

Συνεπώς, οι πνευματικοί επενεργητές είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου δεν απαιτούνται μεγάλα φορτία ή ακρίβεια, προσφέροντας μεγάλη αξιοπιστία, λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό κόστος.



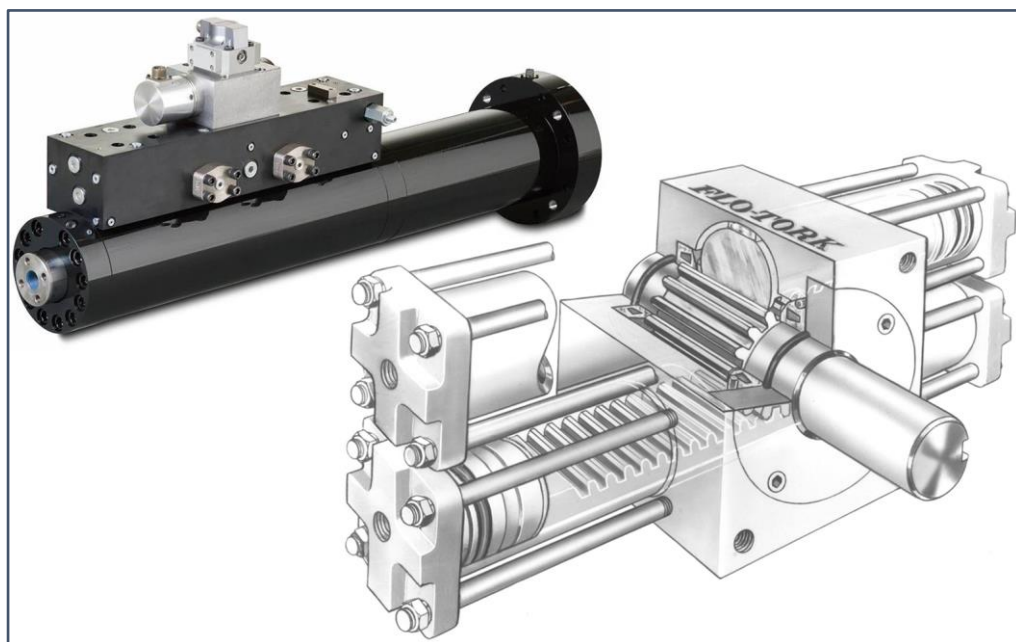
Εικόνα 2.1: Πνευματικοί επενεργητές διαφόρων βάσεων και διαδρομών από την Festo.

### 2.1.1.2 Υδραυλικοί επενεργητές

Τα υδραυλικά συστήματα είναι συστήματα που χρησιμοποιούν ασυμπίεστο μέσο, συνήθως λάδι, προκειμένου να κινηθεί κατάλληλα ο επενεργητής. Τα υδραυλικά συστήματα λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες πιέσεις από τα πνευματικά και συνεπώς ενδείκνυνται για εφαρμογές όπου απαιτείται να εξασκηθούν μεγάλες δυνάμεις. Η πίεση λειτουργίας μπορεί να φτάσει μέχρι και 500 bar. Εξ άλλου επειδή το χρησιμοποιούμενο μέσο είναι πρακτικά ασυμπίεστο, τα υδραυλικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ακρίβεια ελέγχου κίνησης. Το βασικό πλεονέκτημα των υδραυλικών συστημάτων είναι σίγουρα η πολύ καλή σχέση ισχύος προς βάρος που τα καθιστά ανυπέρβλητα σε εφαρμογές κίνησης μεγάλων φορτίων ή εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιταχύνσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό τους κόστος.

Οι κύριες μονάδες κάθε υδραυλικού συστήματος είναι:

- Η μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος. Περιλαμβάνει δοχείο λαδιού, αντλία και ηλεκτρικό κινητήρα για την κίνησή της
- Βαλβίδες ελέγχου ροής και πίεσης και
- Επενεργητές γραμμικούς (κύλινδροι) ή περιστροφικούς (κινητήρες) για την μετατροπή της υδραυλικής ισχύος σε ωφέλιμο έργο.



Εικόνα 2.2: Υδραυλικοί επενεργητές, αριστερά βρίσκεται ένας γραμμικός ενώ δεξιά ένας περιστροφικός.

### 2.1.1.3 Ηλεκτρομηχανικοί επενεργητές

Οι ηλεκτρομηχανικοί επενεργητές αποτελούνται από, έναν περιστροφικό κινητήρα ο οποίος παράγει την απαραίτητη ισχύ κι από έναν μηχανισμό ο οποίος μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε γραμμική. Ο κινητήρας δύναται να είναι χαμηλής ισχύος συνεχούς ρεύματος έως μεγάλης ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 2.3: Γραμμικοί επενεργητές από την Industrial Devices (GB), τάση 12 ή 24 Volt, μέγιστο φορτίο 2500Nt, διαδρομή 600mm.

### 2.1.2 Τύποι περιστροφικών επενεργητών που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές διατάξεις

Σε ορισμένες εφαρμογές χαμηλού φορτίου, ακρίβειας και προδιαγραφών, χρησιμοποιούνται επενεργητές μικρής ισχύος. Τέτοιοι επενεργητές είναι κατάλληλοι για απλές, συνήθως μικρού κόστους κατασκευές οι οποίες δεν έχουν την δυνατότητα να παραλάβουν μεγάλα φορτία.



### 2.1.2.1 Βηματικοί κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες (stepper motor) είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος που δεν έχουν ψήκτρες. Η κίνηση τους δημιουργείται από επαναλαμβανόμενα μικρά βήματα σταθερής γωνίας τα οποία δημιουργούν την περιστροφή του κινητήρα. Το μειονέκτημα τους είναι ότι σε περίπτωση υπερφόρτωσης του επενεργητή, αυτός μπορεί να χάσει βήματα, και αυτή η ανακρίβεια στην κίνηση δεν ανιχνεύεται εξαιτίας της έλλειψης ανάδρασης. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι τυλίγματος, ο μονοπολικός και ο διπολικός όπου ο δεύτερος έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στο κάθε βήμα του καθώς όμως απαιτεί και πιο περίπλοκο έλεγχο.



**Εικόνα 2.4:** Κινητήρας τύπου Stepper που ενσωματώνει επανακυκλοφορούντα σφαιρίδια με δυνατότητα ροπής από 1,7 έως 10 Nm.

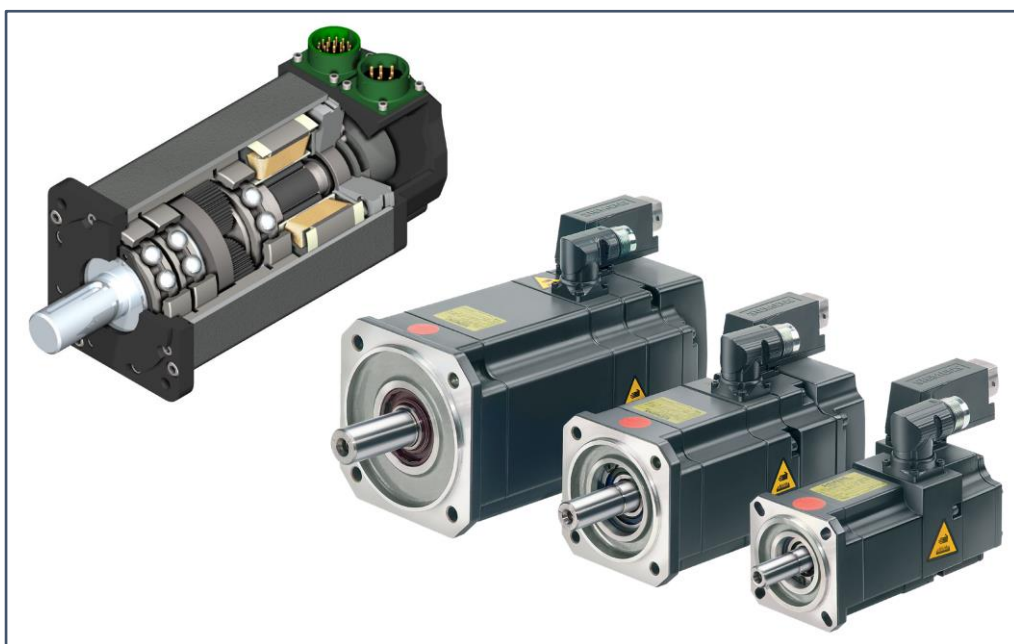
### 2.1.2.2 Κινητήρες Servo

Οι κινητήρες Servo είναι περιστροφικοί ή γραμμικοί επενεργητές που επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης. Οι κινητήρες αυτοί αποτελούνται από έναν περιστροφικό κινητήρα, ένα μειωτήρα ταχύτητας, ένα αισθητήριο ανάδρασης θέσεως καθώς επίσης κι έναν κατάλληλο ελεγκτή ειδικά σχεδιασμένο γι' αυτήν την μονάδα ελέγχου, που εκτελεί όλες τις απαραίτητες ενέργειες για τον έλεγχο του κινητήρα. Οι μορφές όπου μπορεί κάποιος να συναντήσει τέτοιου είδους κινητήρες ποικίλουν, καθώς ξεκινούν από μικρής ισχύος DC κινητήρες και φτάνουν μέχρι και αρκετά kW. Για τον έλεγχο των κινητήρων μικρής ισχύος απαιτούνται μόλις τρία καλώδια, δύο για την τροφοδοσία και ένα για το σήμα ελέγχου, το οποίο αντιστοιχεί στην επιθυμητή γωνία ή μετατόπιση που ζητείται, ενώ για τους κινητήρες μεγάλης ισχύος μπορεί να υπάρχουν ολόκληρες πρίζες καλωδίων.





Εικόνα 2.5: Περιστροφικά μοντέλα κινητήρων τύπου Servo μικρής ισχύος.



Εικόνα 2.6: Περιστροφικά μοντέλα κινητήρων τύπου Servo μεγάλης ισχύος.

### 2.1.2.3 Ηλεκτρικός κινητήρας

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες κινητήρων, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) κι οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς. Αποτελούνται από δύο πηνία, τον στάτη ο οποίος συνήθως παράγει το μαγνητικό πεδίο και τον δρομέα ο οποίος παράγει την περιστροφική κίνηση. Η περιστροφική κίνηση πραγματοποιείται λόγω της αλληλεπίδρασης τους με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα πηνίου. Η ισχύς αυτών των κινητήρων μπορεί να είναι από μερικά Watt έως και αρκετά MWatt.



Εικόνα 2.7: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μικρής ισχύος.



Εικόνα 2.8: Κινητήρες εναλλασόμενου ρεύματος μέσης - μεγάλης ισχύος.

### 2.1.3 Κοχλίες

Ο κοχλίας είναι στοιχείο μηχανών που χρησιμεύει ως συνδετικό στοιχείο με δυνατότητα λύσης και επανασύνδεσης. Συνήθως αποτελείται από το ελικοειδές σπείρωμα, την κεφαλή και τον κορμό καθώς επίσης μπορεί να συναντηθεί και χωρίς κεφαλή. Υπάρχουν δύο βασικά είδη τυποποιήσεων, το μετρικό όπου η γωνία των δοντιών τους είναι  $60^\circ$  και το αγγλοσαξονικό όπου είναι  $55^\circ$ .



Εικόνα 2.9: Κοχλίες μετρικού σπειρώματος M10x35.

#### 2.1.4 Γενικής χρήσεως σφαιρικές αρθρώσεις και εφαρμογές τους

Σε ορισμένους ρομποτικούς μηχανισμούς είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν σφαιρικές αρθρώσεις για την σύνδεση των επενεργητών με τον υπόλοιπο μηχανισμό. Οι αρθρώσεις επιτρέπουν την περιστροφή γύρω από δύο ή τρεις άξονες με πολύ μικρό συντελεστή τριβής και ανάλογα με τον τύπο τους αποτελούνται από δύο ή και περισσότερα επιμέρους εξαρτήματα. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι μπορούν να δεχτούν φορτία σε ένα μεγάλο εύρος κλίσης.

##### 2.1.4.1 Universal Joint / Cardan

Οι σφαιρικές αρθρώσεις τύπου Universal Joint / Cardan χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου ασκούνται μεγάλα φορτία. Αποτελούνται από 2 μέρη, το κεντρικό κομμάτι το οποίο διαθέτει 4 προβόλους με διαφορά 90 μοιρών μεταξύ τους, και 4 ρουλεμάν, συνήθως βελονοειδούς τύπου, που τοποθετούνται σε αυτούς τους προβόλους. Για την υλοποίηση της, η σφαιρική άρθρωση ενώνεται με δύο βάσεις, όπου η πρώτη βρίσκεται πάνω από το κεντρικό κομμάτι, ενώ η δεύτερη κάτω από αυτό.



Εικόνα 2.10: Διπλός σφαιρικός σύνδεσμος βαρέως τύπου Universal Joint / Cardan.



### 2.1.4.2 Ball joint

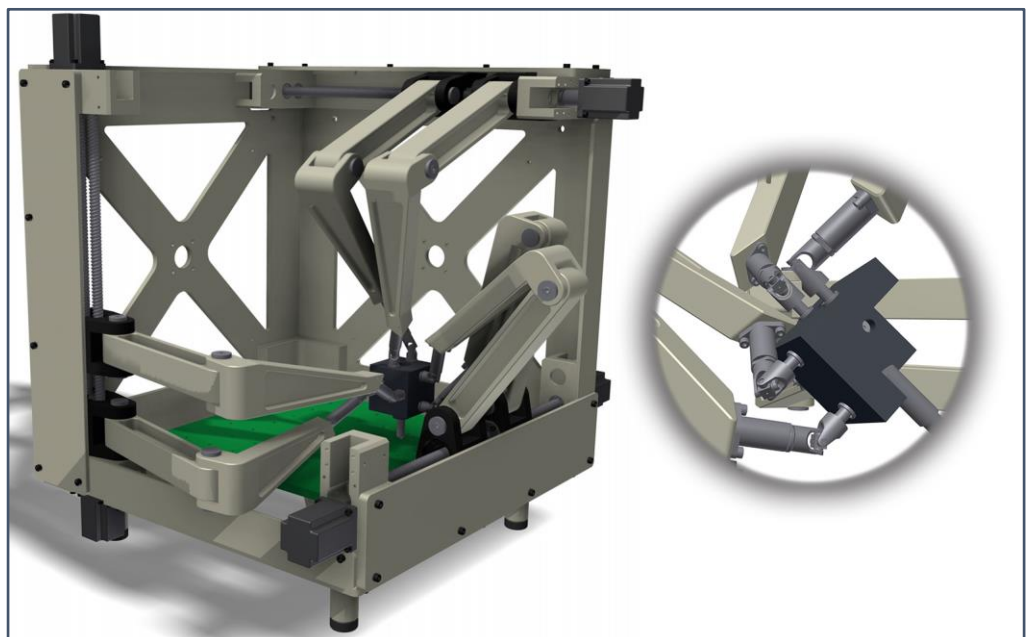
Οι σφαιρικές αρθρώσεις τύπου Ball Joint είναι σφαιρικά ρουλεμάν τα οποία επιτρέπουν την ταυτόχρονη περιστροφική κίνηση σε τρεις άξονες. Αποτελούνται από την βάση και την μπίλια, όπου οι βάσεις συνδέονται στην βάση του ρομπότ ενώ οι μπίλιες με τους βραχίονες του ρομποτικού μηχανισμού, καθώς επίσης και με τα επιμέρους εξαρτήματα που συνθέτουν την άρθρωση.



Εικόνα 2.11: Σφαιρικός σύνδεσμος τύπου Ball Joint σε τομή.

## 2.2 Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου Hexarteron

Ο μηχανισμός Hexarteron είναι ένας νέος παράλληλος ρομποτικός μηχανισμός έξι αξόνων ο οποίος έχει απλό κινηματικό μοντέλο, πολύ πιο απλό από εκείνο του σειριακού ρομπότ έξι αξόνων. Διαθέτει έξι γραμμικούς επενεργητές οι οποίοι ελέγχουν τον προσανατολισμό και την θέση του τελικού άκρου. Επίσης διαθέτει έξι παθητικές αρθρώσεις τύπου Cardan οι οποίες επιτρέπουν την κίνηση του άκρου σε έξι βαθμούς ελευθερίας.



Εικόνα 2.12: Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου Hexarteron μαζί με τομή στο τελικό άκρο δράσης.



### 2.3 Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Quattro Robot

Το Quattro Robot της adept είναι ένας ρομποτικός μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Αποτελείται από μια σταθερή βάση, μια βάση τελικού άκρου δράσης καθώς επίσης και τέσσερις βραχίονες τοποθετημένους σε κυκλική διάταξη ανά  $90^\circ$ . Η συνδυασμένη κίνηση των τεσσάρων βραχιόνων, έχει σαν αποτέλεσμα την ομαλή κίνηση του άκρου. Ο μηχανισμός διαθέτει τέσσερις ηλεκτροκινητήρες υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας για τον έλεγχο της θέσης του άκρου και του προσανατολισμό κατά τον άξονα Z. Είναι κατασκευασμένος για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλών απαιτήσεων ροπής όπως πακετάρισμα, κατεργασίες, συναρμολογήσεις και εφαρμογές Pick n' Place.



Εικόνα 2.13: Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Quattro robot από την adept.

### 2.4 Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Delta Robot

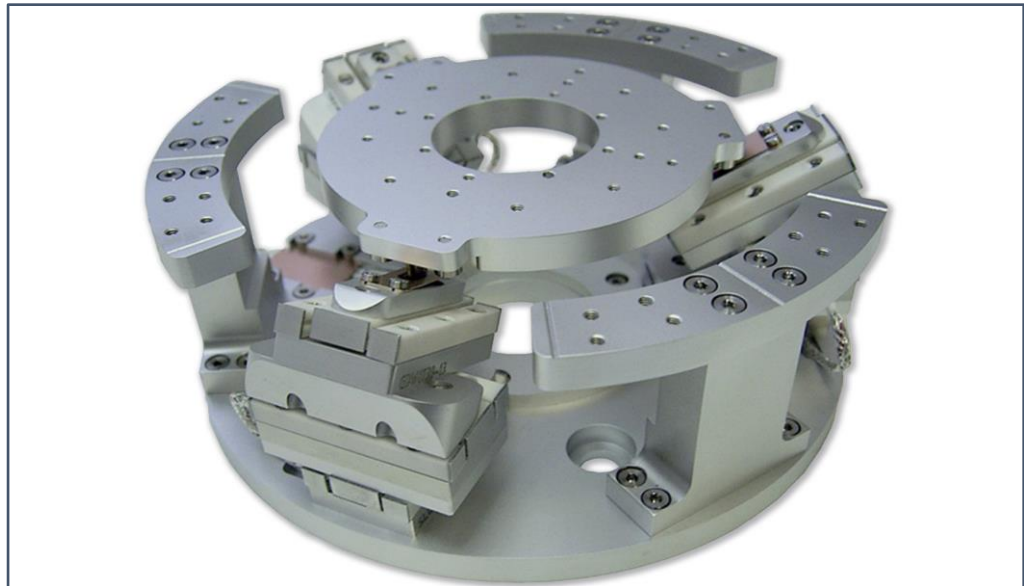
Το Delta Robot της ABB είναι ένας ρομποτικός μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Αποτελείται από μια σταθερή βάση, μια βάση τελικού άκρου δράσης καθώς επίσης και τρεις βραχίονες τοποθετημένους σε κυκλική διάταξη ανά  $120^\circ$ . Ο μηχανισμός διαθέτει τρεις ηλεκτροκινητήρες υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας για έλεγχο θέσης του άκρου, καθώς επίσης άλλον ένα κινητήρα για την περιστροφή του άκρου ως προς τον Z άξονα. Είναι κατασκευασμένος για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλών απαιτήσεων ροπής όπως πακετάρισμα, κατεργασίες, συναρμολογήσεις και εφαρμογές Pick n' Place.



Εικόνα 2.14: Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου Delta robot από την ABB.

## 2.5 Μηχανισμός SmartPod έξι βαθμών ελευθερίας από την SmarAct

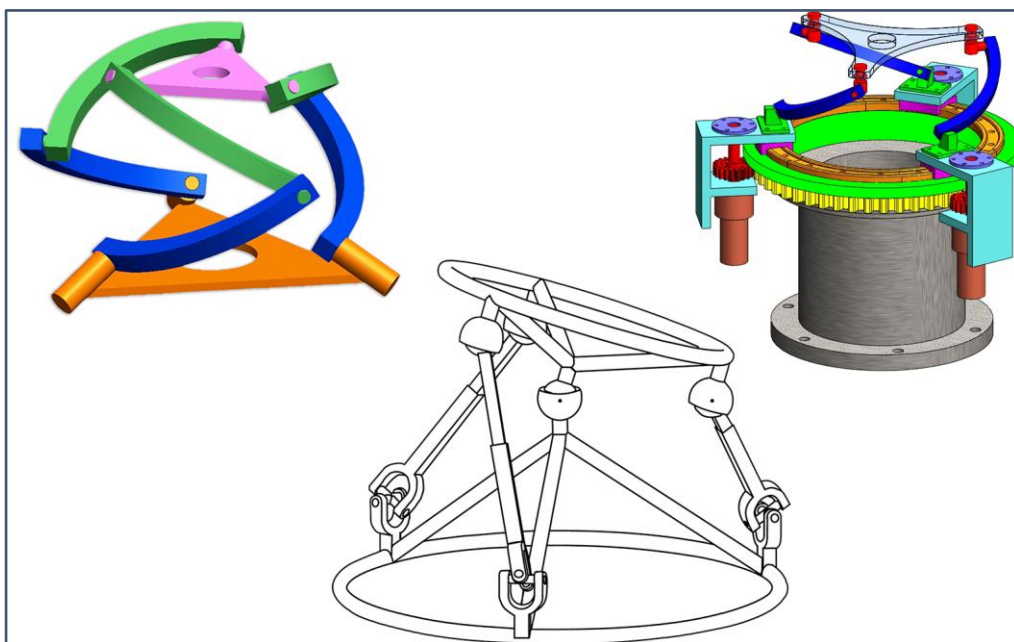
Ο μηχανισμός SmartPod έξι βαθμών ελευθερίας συνδυάζει κίνηση σε έξι βαθμούς ενώ παράλληλα διαθέτει μεγάλη στιβαρότητα. Διαθέτει τρεις όμοιους μηχανισμούς τοποθετημένους σε κυκλική διάταξη ανά  $120^\circ$ . Ο κάθε ένας εξ αυτών αποτελείται από δύο επιμέρους πρισματικούς επενεργητές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε κάθετη διάταξη μεταξύ τους. Αυτός ο μηχανισμός έχει πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια της τάξης του 1 nm για γραμμική κίνηση και 1 mrad για περιστροφική, ενώ ο χώρος εργασίας του ανέρχεται σε  $20 \times 20 \times 10 \text{ mm}$ .



Εικόνα 2.15: Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου SmartPod από την SmarAct.

## 2.6 Μηχανισμός τριών βαθμών ελευθερίας σφαιρικού τύπου

Ο σφαιρικός παράλληλος μηχανισμός τριών βαθμών ελευθερίας μπορεί να πραγματοποιήσει ανεξάρτητες περιστροφές γύρω από τους άξονες X, Y, Z. Αποτελείται από τρεις γραμμικούς ή περιστροφικούς επενεργητές κι ανάλογα με τον τύπο του μπορεί να διαθέτει μόνο σφαιρικές αρθρώσεις ή σφαιρικές αρθρώσεις μαζί με περιστροφικές. Ο μηχανισμός αυτός είναι κατάλληλος μόνο όταν χρειάζονται περιστροφές σε τρεις άξονες αλλά όχι μετατοπίσεις.



Εικόνα 2.16: Μηχανισμοί τριών βαθμών ελευθερίας σφαιρικού τύπου με γραμμικούς και περιστροφικούς επενεργητές.

## 2.7 Μηχανισμός τριών βαθμών ελευθερίας τύπου Τρίποδα

Ο παράλληλος μηχανισμός με τρία πόδια, τριών βαθμών ελευθερίας, μπορεί να πραγματοποιήσει ανεξάρτητες μετατοπίσεις στους άξονες X, Y, Z. Αποτελείται από τρεις γραμμικούς ή περιστροφικούς επενεργητές κι ανάλογα με τον τύπο του μπορεί να διαθέτει μόνο σφαιρικές αρθρώσεις ή σφαιρικές αρθρώσεις μαζί με περιστροφικές. Ο μηχανισμός αυτός είναι κατάλληλος μόνο όταν χρειάζονται μετατοπίσεις σε τρεις άξονες αλλά όχι περιστροφές.



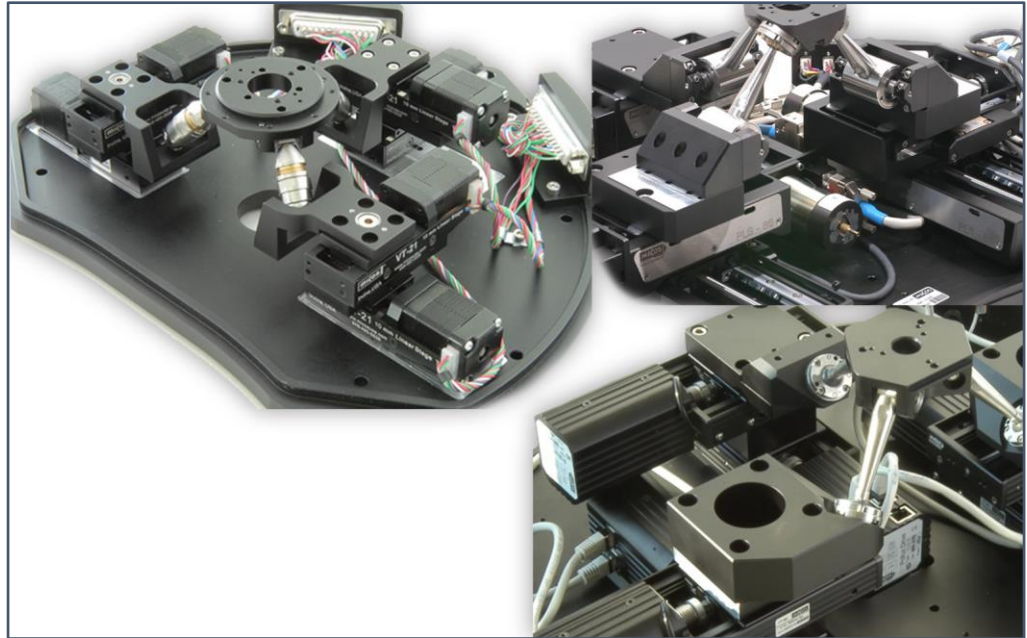
Εικόνα 2.17: Παράλληλος μηχανισμός από την FESTO με τρία πόδια, τριών βαθμών ελευθερίας με γραμμικούς επενεργητές.

## 2.8 Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας παράλληλου τύπου με γραμμικούς επενεργητές από την PI miCos

Η πλατφόρμα έξι βαθμών ελευθερίας της Pi miCos είναι ένας ρομποτικός μηχανισμός ο οποίος αποτελείται από μια σταθερή βάση και μία κινητή. Η σταθερή και κινητή βάση συνδέονται με τρεις βραχίονες που είναι



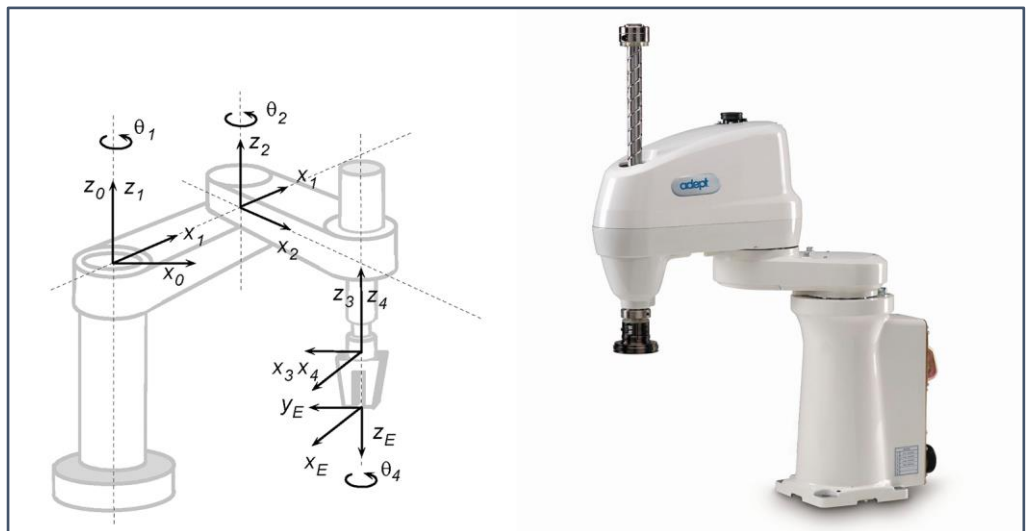
τοποθετημένοι σε κυκλική διάταξη ανά  $120^\circ$  κι ο κάθε ένας αποτελείται από δύο γραμμικούς επενεργητές όπου είναι τοποθετημένοι κάθετα μεταξύ τους. Το χαμηλό βάρος της κινούμενης βάσης επιτρέπει γρήγορη μετατόπιση και υψηλή ακρίβεια τοποθέτησης με μέγιστο ωφέλιμο φορτίο τα 5 kg.



Εικόνα 2.18: Παράλληλος μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας από την PI miCos

## 2.9 Μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας παράλληλου τύπου SCARA

Ο βραχίονας τύπου SCARA είναι αρθρωτός ρομποτικός μηχανισμός τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Αποτελείται από δύο περιστροφικές αρθρώσεις, μια πρισματική καθώς επίσης από μια αρπάγη που έχει δυνατότητα περιστροφής ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Ο βραχίονας SCARA είναι κατάλληλος για διαδικασίες συναρμολόγησης διότι η συγκεκριμένη γεωμετρία παρέχει μεγάλη δυσκαμψία σε κατακόρυφη φόρτιση και ελαστικότητα σε οριζόντια διεύθυνση.



Εικόνα 2.19: Ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων βαθμών ελευθερίας τύπου SCARA.

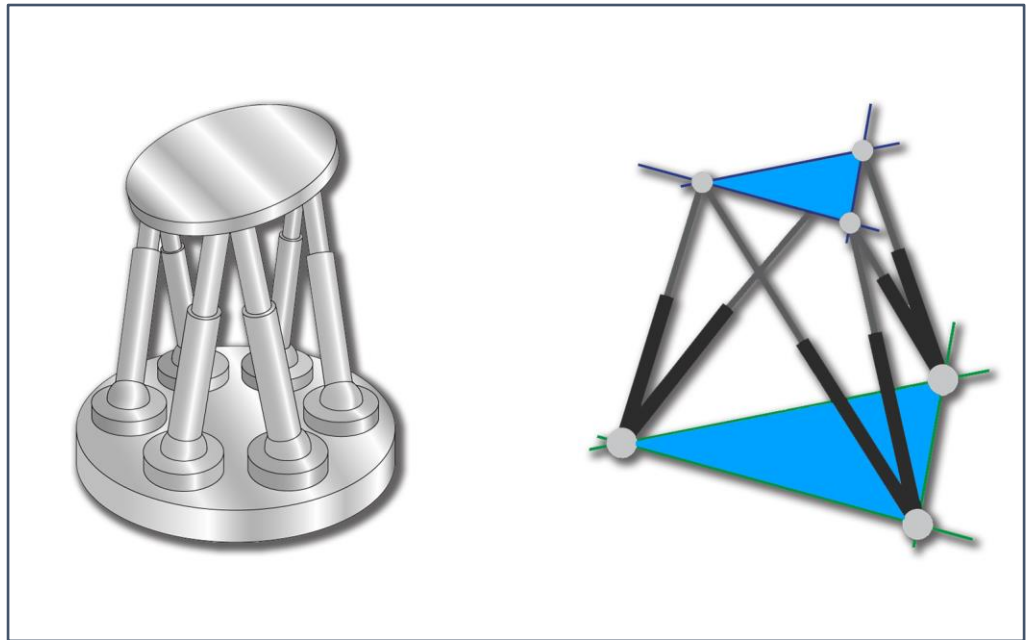




## 3 Πλατφόρμα Stewart έξι βαθμών ελευθερίας

### 3.1 Εισαγωγή στην πλατφόρμα Stewart έξι βαθμών ελευθερίας

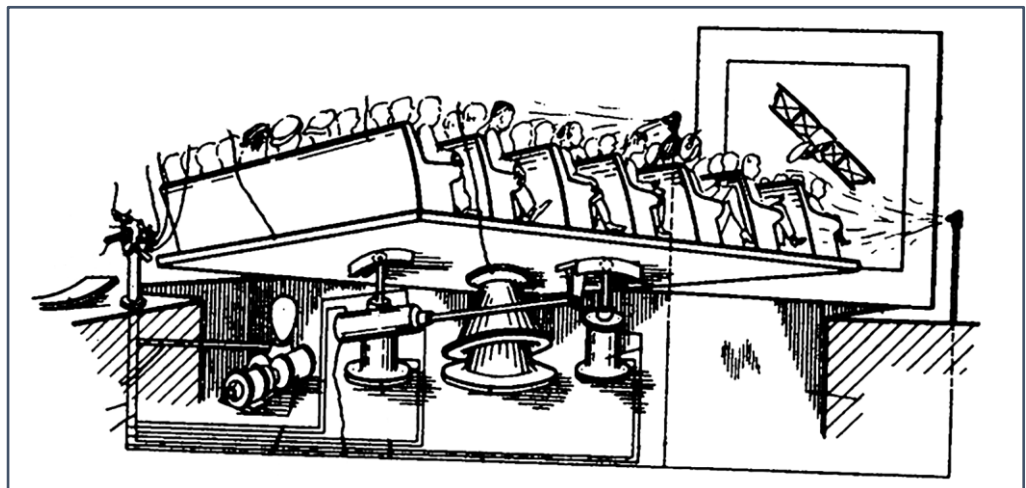
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η παράλληλη ρομποτική πλατφόρμα Stewart έξι βαθμών ελευθερίας. Το όνομα αυτό προήλθε από τον Robert D. Stewart που το 1965 πρότεινε έναν μηχανισμό με έξι πόδια για χρήση ως προσομοιωτής πτήσης. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικότερα η λειτουργία της πλατφόρμας Stewart, τα πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα της, οι τομείς χρήσης της καθώς και τα επιμέρους εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της κίνησης της.



Εικόνα 3.1: Μηχανισμός έξι βαθμών ελευθερίας τύπου πλατφόρμας Stewart

### 3.2 Ιστορική αναδρομή πλατφόρμας Stewart

Τα παράλληλα ρομπότ και ιδιαίτερα τα εξάποδα χρονολογούνται αιώνες τώρα, ωστόσο ίσως το πρώτο παράλληλο ρομπότ να σχεδιάστηκε από τον James E. Gwinnett, που ήταν αγρότης στην Αμερική και κατέθεσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1928. Η εφεύρεση του ήταν μια σφαιρική πλατφόρμα τριών βαθμών ελευθερίας για χρήση σε κινηματογραφικές αίθουσες [Εικόνα 3.2].

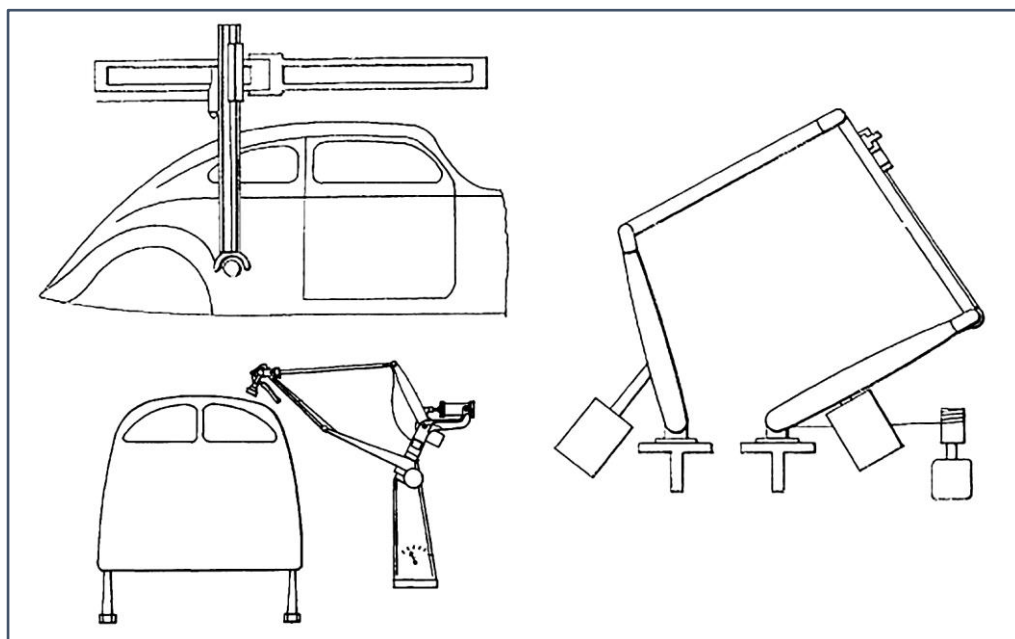


Εικόνα 3.2: Ενδεχομένως η πρώτη παράλληλη ρομποτική πλατφόρμα που εφευρέθηκε το 1928 από τον James E. Gwinnett.



Μία δεκαετία αργότερα, μόλις δεκαεπτά χρόνια μετά τον όρο «ρομπότ» που επινοήθηκε από τον Karel Čapek, ο Willard L. V. Pollard παρουσίασε ένα νέο παράλληλο ρομπότ για αυτόματη βαφή με ψεκασμό [Εικόνα 3.3]. Το 1934 κατέθεσε αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας αλλά δυστυχώς το ρομπότ δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Αυτή η ευφύεστατη εφεύρεση ήταν ένα παράλληλο ρομπότ τριών βραχιόνων, πέντε βαθμών ελευθερίας, περιλάμβανε ένα σύστημα ελέγχου που αποτελούνταν από διάτρητο φιλμ και ο χειρισμός του γινόταν με 5 μοχλούς.

Ο μηχανολόγος ο οποίος βοήθησε στον σχεδιασμό του πρώτου βιομηχανικού ρομπότ ήταν ο γιός του Willard L. V. Pollard, ο Willard L. G. Pollard Jr., (αν δεν ληφθεί υπόψιν ο ρομποτικός γερανός Meccano που κατασκευάστηκε το 1938 από τον Griffith P. Taylor). Ο Pollard Jr. χορήγησε άδεια για την εφεύρεση του στην εταιρεία DeVilbiss το 1937 και το 1941, η εταιρία ολοκλήρωσε το πρώτο πρωτότυπο ρομπότ ψεκασμού βαφής. Ωστόσο αυτό ήταν ένα σειριακό ρομπότ και χρησιμοποιούσε μόνο το σύστημα ελέγχου που ο Pollard Jr. είχε προτείνει.

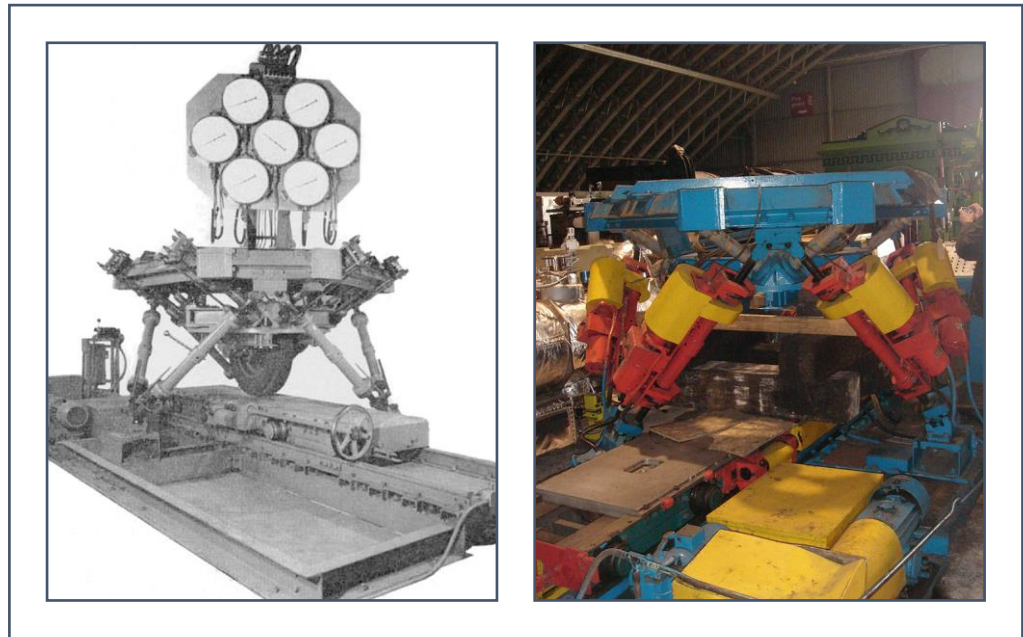


Εικόνα 3.3:

Το παράλληλο ρομπότ τριών βραχιόνων και πέντε βαθμών ελευθερίας που σχεδιάστηκε το 1934 από τον Willard L. V. Pollard και τον γιό του Willard L. G. Pollard Jr. για τον ψεκασμό βαφής.

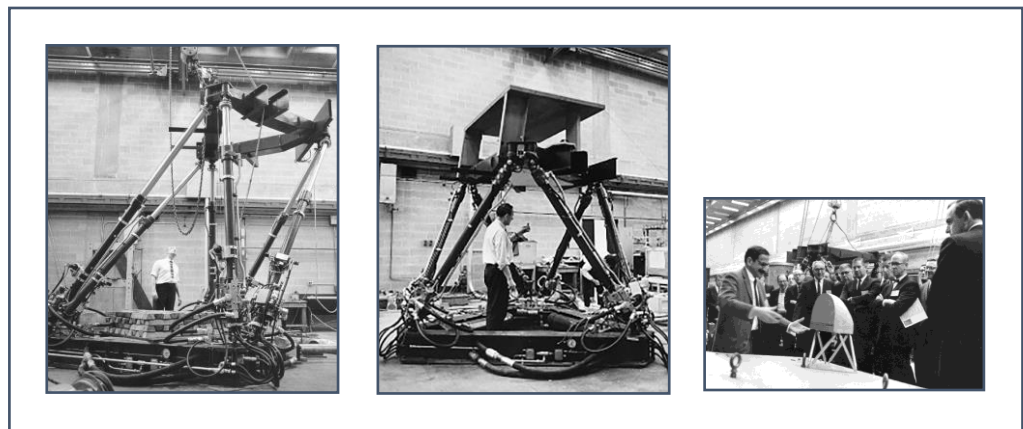
Το 1947 ο Dr. Eric Gough κατασκεύασε το πρώτο οκτάεδρο εξάποδο παράλληλο ρομπότ με γραμμικούς επενεργητές [Εικόνα 3.4]. Ο Dr. Eric Gough ήταν διακεκριμένος μηχανικός αυτοκινήτων στην Fort Dunlop στο Birmingham της Αγγλίας στην πτέρυγα Dunlop Tyres. Ονόμασε την μηχανή του "Universal tyre test machine" (Παντός τύπου μηχανή δοκιμής ελαστικών) και σχεδιάστηκε για να γίνονται δοκιμές σε ελαστικά αεροσκαφών. Παρόλο που ο Dr. Eric Gough σχεδίασε το πρώτο οκτάεδρο εξάποδο παράλληλο ρομπότ, δεν αναγνωρίστηκε ως ο πρώτος εφευρέτης αφού οι παράλληλοι ρομποτικοί μηχανισμοί ήταν ήδη γνωστοί.

Το 1965 ο Klaus L. Cappel σχεδίασε τον πρώτο προσομοιωτή πτήσης στο ίδρυμα Franklin όπου αργότερα έγινε ένα από τα σημαντικότερα διπλώματα ευρεσιτεχνίας στην ιστορία των παράλληλων ρομπότ. Η ιδέα του Cappel προέκυψε από ένα αίτημα του τμήματος αεροσκαφών της Sikorsky της United Technologies για το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός προσομοιωτή πτήσης ελικοπτέρου 6 βαθμών ελευθερίας. Αυτός ήταν ο πρώτος προσομοιωτής πτήσης με βάση ένα οκτάεδρο εξάποδο παράλληλο ρομπότ [Εικόνα 3.5].



Εικόνα 3.4:

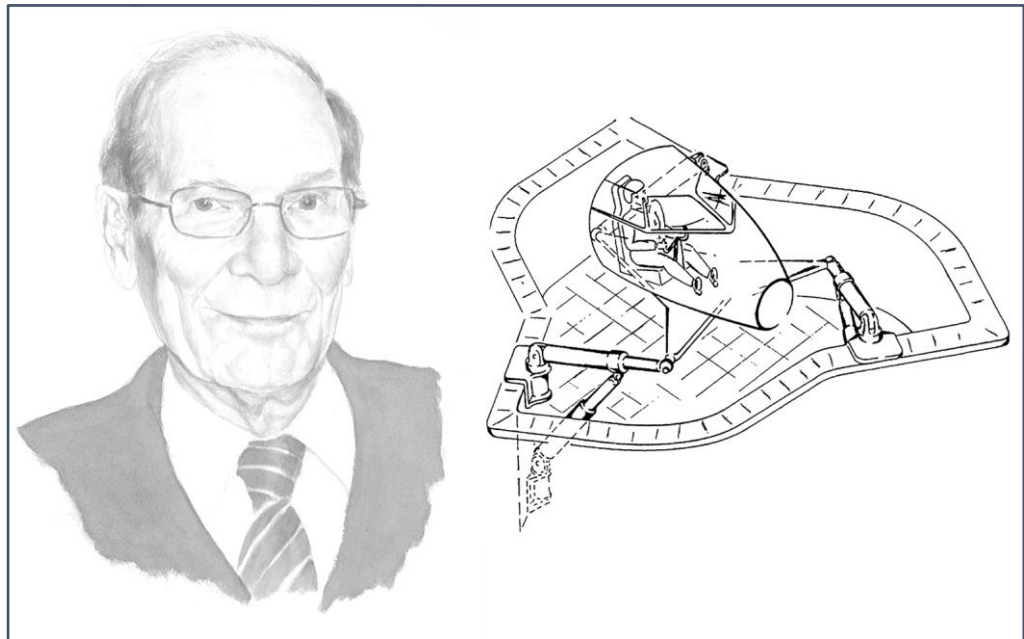
Η πρώτη οκτάεδρη εξάποδη πλατφόρμα του Dr. Eric Gough που κατασκευάστηκε το 1954 για δοκιμές σε ελαστικά αεροσκαφών. Αριστερά φαίνεται μια παλιά φωτογραφία όταν ακόμη ήταν σε λειτουργία ενώ δεξιά μια πιο πρόσφατη που βρίσκεται στο μουσείο επιστημών στο Λονδίνο.



Εικόνα 3.5:

Ο πρώτος προσομοιωτής πτήσης από του Klaus L. Carrel που κατασκευάστηκε το 1965. Αριστερά και στο κέντρο φαίνεται η πλατφόρμα ενώ στην δεξιά εικόνα διακρίνεται ο Klaus L. Carrel να εξηγεί τον τρόπο λειτουργίας της πλατφόρμας στους διευθυντές του ιδρύματος Franklin.

Το 1965 στο Ηνωμένο Βασίλειο, ο Μηχανολόγος Μηχανικός D. Stewart, αγνοώντας το έργο του Dr. Gough και του Carrel, πρότεινε έναν μηχανισμό με έξι γραμμικούς επενεργητές για χρήση ως προσομοιωτής πτήσης [Εικόνα 3.6]. Ο παράλληλος μηχανισμός του ωστόσο, είναι διαφορετικός από τον μηχανισμό του Dr. Gough. Υπήρξαν πολλές συζητήσεις πάνω στις χρήσεις της πλατφόρμας, οι οποίες προέβλεπαν τις υπάρχουσες -τότε μελλοντικές- χρήσεις της.



**Εικόνα 3.6:** Ο εφευρέτης της πλατφόρμας Stewart, ο D. Stewart και το πρώτο σχέδιο της πλατφόρμας που πρότεινε για χρήση ως προσομοιωτής πτήσεων το 1965.

### 3.3 Περιγραφή πλατφόρμας Stewart

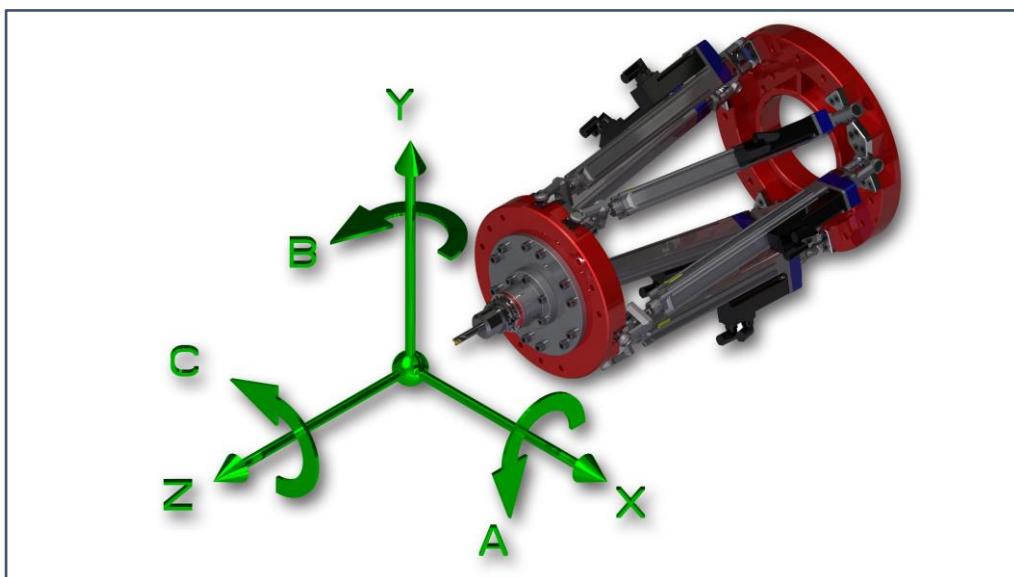
Η πλατφόρμα Stewart είναι μια ρομποτική πλατφόρμα 6 βαθμών ελευθερίας που αποτελείται από 6 γραμμικούς επενεργητές, 12 σφαιρικές αρθρώσεις, όπου περιγράφονται στο **κεφάλαιο 2.1**, κι έχει δύο βασικά επίπεδα. Το κάτω, όπου είναι σταθερό και ονομάζεται επίπεδο της βάσης ή αλλιώς “Base” και το πάνω όπου είναι κινούμενο και ονομάζεται άνω βάση ή αλλιώς “Platform”. Αυτά τα δύο επίπεδα συνδέονται μεταξύ τους με έξι γραμμικούς επενεργητές όπου ο κάθε ένας στο κάθε του άκρο έχει μία σφαιρική άρθρωση. Έτσι επιτυγχάνεται η κίνηση της πάνω βάσης σε έξι βαθμούς ελευθερίας. Για να περιγραφθεί ακριβώς η θέση ενός στερεού σώματος στον χώρο, χρειάζονται 6 μεταβλητές, 3 για την θέση και 3 για τον προσανατολισμό του. Αυτοί οι έξι βαθμοί ελευθερίας είναι οι εξής:

#### Μετατοπίσεις

- Κίνηση μπρος - πίσω (surging) - Άξονας X
- Κίνηση δεξιά - αριστερά (swaying) - Άξονας Y
- Κίνηση πάνω - κάτω (heaving) - Άξονας Z

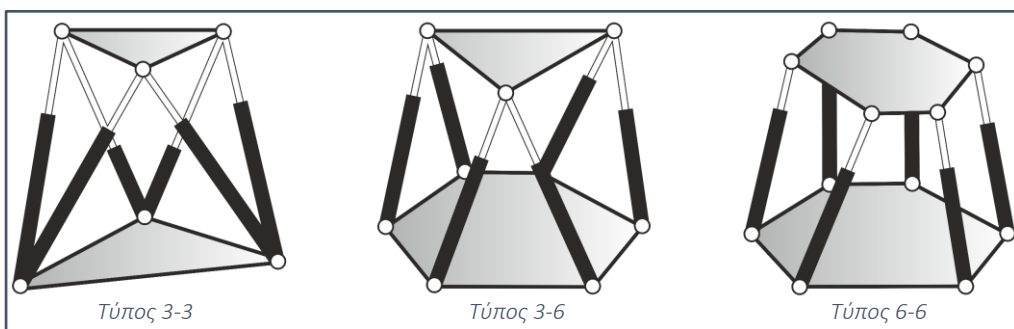
#### Περιστροφές

- Κλίση δεξιά κι αριστερά (rolling ή A) - στροφή γύρω από τον άξονα X
- Κλίση εμπρός και πίσω (pitching ή B) - στροφή γύρω από τον άξονα Y
- Στροφή δεξιά κι αριστερά (yawing ή C) - στροφή γύρω από τον άξονα Z



Εικόνα 3.7: Επεξήγηση έξι βαθμών ελευθερίας κίνησης πλατφόρμας Stewart, 3 για την θέση και 3 για τον προσανατολισμό

Η πλατφόρμα Stewart για να πραγματοποιήσει κινήσεις με ακρίβεια σε έξι άξονες καθορίζοντας τον προσανατολισμό και την θέση της, πρέπει οι γραμμικοί επενεργητές να τοποθετηθούν με συγκεκριμένο τρόπο. Ο χώρος εργασίας εξαρτάται άμεσα από το μήκος των επενεργητών και την γωνία τοποθέτησης τους. Οι τρόποι που μπορούν να τοποθετηθούν οι γραμμικοί επενεργητές, περιγράφονται στο παρακάτω σχήμα [Εικόνα 3.8].



Εικόνα 3.8: Τύποι διάταξης επενεργητών πλατφόρμας Stewart

Επεξήγηση τύπων διάταξης επενεργητών πλατφόρμας Stewart:

- **Στον τύπο διάταξης 3-3**, η πάνω βάση συνδέεται με τους γραμμικούς επενεργητές σε τρία σημεία, ανά δύο επενεργητές, όπως επίσης γίνεται και με την κάτω βάση. Η διάταξη είναι πιο απλή όμως ο χώρος εργασίας της πλατφόρμας Stewart είναι μικρότερος λόγω της διάταξης των επενεργητών.
- **Στον τύπο διάταξης 3-6**, η πάνω βάση συνδέεται με τους γραμμικούς επενεργητές σε τρία σημεία, ανά δύο επενεργητές, όμως η κάτω βάση συνδέεται με τους γραμμικούς επενεργητές σε 6 διαφορετικά σημεία. Η διάταξη αυτή παρέχει μεγαλύτερο χώρο εργασίας απ' ότι η διάταξη τύπου 3-3, όμως ο προγραμματισμός της είναι λίγο πιο πολύπλοκος. Το πλεονέκτημα του τύπου 3-6 είναι ότι για να υπάρξει κίνηση, αρκεί να κινηθεί ένας και μόνο επενεργητής κι όχι κι οι έξι ταυτόχρονα.
- **Στον τύπο διάταξης 6-6**, η πάνω βάση συνδέεται με τους γραμμικούς επενεργητές σε έξι διαφορετικά σημεία, όπως επίσης γίνεται και με την κάτω βάση. Η διάταξη αυτή είναι η καλύτερη δυνατή για την αξιοποίηση του ευρύτερου χώρου εργασίας της πλατφόρμας Stewart. Πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης επίσης αποτελεί η αυξημένη στιβαρότητα που παρέχει καθώς επίσης και η καλύτερη δυνατή ακρίβεια στις κινήσεις της. Το μειονέκτημα της είναι ότι ο προγραμματισμός της είναι αρκετά πιο δύσκολος απ' ότι των προηγούμενων 2 τύπων.

Σε κάθε τύπο πλατφόρμας Stewart, είναι δυνατή η κίνηση σε οποιαδήποτε θέση και προσανατολισμό εντός του χώρου εργασίας της πλατφόρμας με την κατάλληλη συνδυασμένη κίνηση των γραμμικών επενεργητών.



### 3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πλατφόρμας Stewart

Το βασικό πλεονέκτημα της πλατφόρμας Stewart είναι ότι παρά τον μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας που διαθέτει, είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε η όλη κατασκευή να χαρακτηρίζεται από μεγάλη μηχανική ακαμψία. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του ότι είναι μηχανισμός κλειστής κινηματικής αλυσίδας και όλα τα φορτία ισοκατανέμονται σε 6 επενεργητές. Έτσι έχει πολύ μεγάλη μηχανική ακαμψία, και η πλατφόρμα μπορεί να μεταφέρει πολύ μεγάλα φορτία σε σχέση με άλλους ρομποτικούς μηχανισμούς ίδιας κατηγορίας.

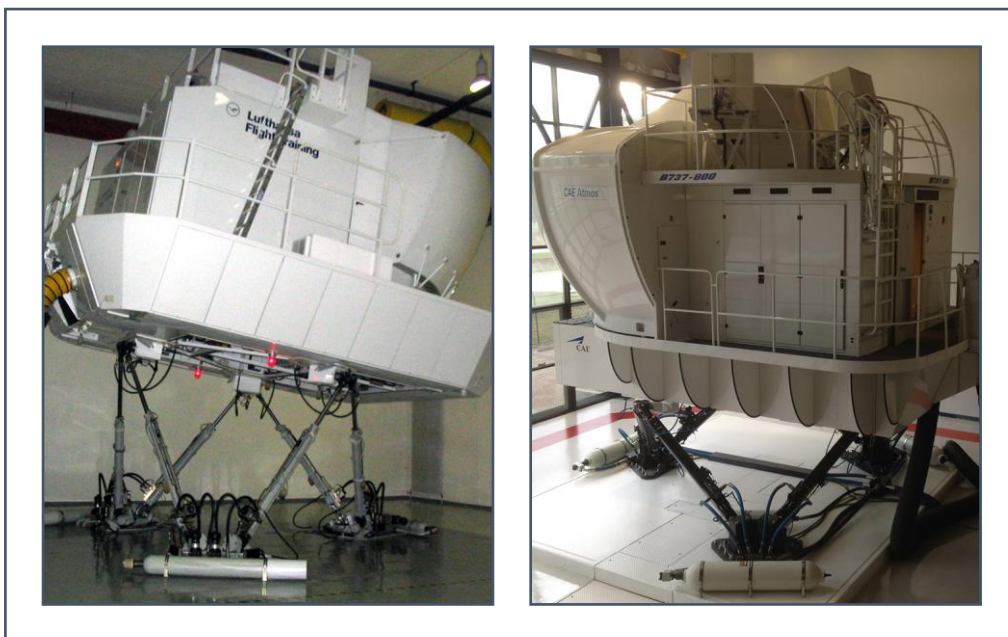
Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι επειδή η πλατφόρμα είναι κλειστής κινηματικής αλυσίδας, ο χώρος εργασίας της είναι πρακτικά μικρότερος απ' ότι άλλων ρομποτικών μηχανισμών. Το αντίστροφο και το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, είναι πιο δύσκολα στην επίλυση τους λόγω κλειστής κινηματικής αλυσίδας καθώς επίσης υπάρχει δυσκολία στον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται για να πραγματοποιηθούν οι κινήσεις. Τέλος, το κόστος κατασκευής μιας τέτοιας πλατφόρμας είναι αυξημένο σε σχέση με των υπόλοιπων ρομποτικών μηχανισμών ίδιου μεγέθους.

### 3.5 Τομείς χρήσης πλατφόρμας Stewart

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι βασικοί τομείς χρήσης της πλατφόρμας Stewart. Γίνεται αναφορά στον τρόπο χρήσης της σε κάθε περίπτωση, αλλά και στην ανάγκη την οποία κάλυψε.

#### 3.5.1 Προσομοιωτής πτήσης

Μία από τις πρώτες εφαρμογές της πλατφόρμας Stewart ήταν στον τομέα της προσομοίωσης πτήσεων. Ο προσομοιωτής πτήσεως είναι μία μηχανοκίνητη διάταξη που αποτελείται από ένα αντίγραφο αεροπορικού πιλοτηρίου, ένα σύστημα οπτικής απεικόνισης πολλών καναλιών, όπως και ένα πιστό αντίγραφο των οργάνων του αεροπλάνου για την ακριβέστερη προσομοίωση της πτήσης. Σκοπός του προσομοιωτή πτήσεως είναι η εκπαίδευση των πιλότων σε πραγματικές συνθήκες όπως αυτές που επικρατούν στην φάση της απογείωσης και προσγείωσης, αλλά και σε συνθήκες διάφορων καιρικών φαινομένων. Για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση πτήσεων, είναι αναγκαίο να υπάρχουν και οι έξι βαθμοί ελευθερίας που διαθέτει ένα αεροπλάνο. Για τη χρήση αυτή ο καταλληλότερος ρομποτικός μηχανισμός είναι η πλατφόρμα Stewart λόγω των έξι βαθμών ελευθερίας και της στιβαρότητας που διαθέτει. Παρακάτω φαίνεται ένας προσομοιωτής πτήσεως της εταιρίας Lufthansa [Εικόνα 3.9].



Εικόνα 3.9:

Προσομοιωτής πτήσεως που χρησιμοποιείται από την Lufthansa με τη χρήση πλατφόρμας Stewart και προσομοιωτής πτήσεως από την CAE για Boeing 737.



### 3.5.2 Προσομοιωτές οδήγησης

Η ανάγκη για βελτίωση του επιπέδου της οδικής ασφάλειας, εξετάζοντας τον ανθρώπινο παράγοντα, οδήγησε στη σχεδίαση και κατασκευή προσομοιωτών οδήγησης, με τους οποίους εξασφαλίζεται η εκπαίδευση των υποψήφιων οδηγών σε κανονικές αλλά και σε δυσμενείς συνθήκες. Στόχος των προσομοιωτών οδήγησης είναι η απόκτηση εμπειρίας των εκπαιδευομένων σε περιβάλλον ασφαλές για τους ίδιους αλλά και για τους υπόλοιπους χρήστες του οδικού δικτύου. Οι προσομοιωτές οδήγησης άρχισαν να αναπτύσσονται στα τέλη της δεκαετίας του '50 και ο πρώτος προσομοιωτής λειτούργησε στα τέλη της δεκαετίας του '60. Πρωταρχικός τους στόχος ήταν η βελτίωση της οδικής ασφάλειας μέσω της βελτίωσης της οδηγικής συμπεριφοράς. Ο προσομοιωτής αναπτύχθηκε πάνω σε μία πλατφόρμα Stewart και το όλο σύστημα βασιζόταν απόλυτα στην κίνηση της καμπίνας σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Για την καλύτερη προσομοίωση της πραγματικότητας, προστέθηκε η δυνατότητα δημιουργίας κραδασμών στη θέση του οδηγού, με στόχο την πιστότερη αίσθηση της οδού. Η καμπίνα περιλάμβανε μόνο τη θέση του οδηγού με το τιμόνι και τα πηδάλια, χωρίς το υπόλοιπο τμήμα του οχήματος, ενώ αργότερα προστέθηκε πραγματικό μοντέλο αυτοκινήτου σε πλήρεις διαστάσεις. Ο μεγαλύτερος προσομοιωτής οδήγησης έχει κατασκευαστεί από την Toyota [Εικόνα 3.11] ενώ παρόμοιες προσπάθειες έχει κάνει η Peugeot Citroën, Renault, Honda, TRL, NADS Iowa, Πανεπιστήμιο του Leeds, MIT AgeLab, Daimler, BMW, Mercedes κι η Ford με το Ford Virttex, φτιάχνοντας επίσης πολύ ρεαλιστικούς προσομοιωτές με πραγματικά μοντέλα αυτοκινήτων.

Ο προσομοιωτής οδήγησης αποτελείται από έναν αριθμό υποσυστημάτων ως ακολούθως:

- Την καμπίνα του οδηγού που μπορεί να είναι είτε ένα πραγματικό όχημα είτε η θέση ενός οδηγού εξοπλισμένη με πηδάλια και πίνακα οργάνων ελέγχου. Σε πολλούς προσομοιωτές η καμπίνα του οδηγού είναι περιστρεφόμενη. Τονίζεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι λειτουργίες του οχήματος είναι πλήρως προσομοιωμένες και οι συνθήκες περιβάλλοντος, υγρασίας και θερμοκρασίας στην καμπίνα είναι παρόμοιες με τις πραγματικές.
- Το λογισμικό με τις προσομοιωμένες επιδόσεις ενός συγκεκριμένου πραγματικού οχήματος. Το λογισμικό είναι εγκατεστημένο στον Η/Υ με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο προσομοιωτής.
- Το οπτικό υποσύστημα, το οποίο αποτελείται από το πρόγραμμα που ελέγχει την προσομοιωμένη γραφική αναπαράσταση της πραγματικής οδού και του οδικού περιβάλλοντος, τους προβολείς και τις οθόνες του προσομοιωτή.
- Το υποσύστημα ήχου που προσομοιώνει τους ήχους της μηχανής του οχήματος, των ελαστικών, του ανέμου και του περιβάλλοντος γενικότερα.



Εικόνα 3.10:

Προσομοιωτής οδήγησης τράκτορα 6 αξόνων, μοντέλο AS1600 από την Automex.



Εικόνα 3.11: Ο μεγαλύτερος προσομοιωτής οδήγησης αυτοκινήτου από την Toyota.

### 3.5.3 Συσκευές οστεογένεσης

Τα οστά ποικίλλουν όσον αφορά τη μορφή και το μέγεθος τους. Είναι δυνατόν να είναι μακριά, κοντά, επίπεδα, ή ακανόνιστα διαμορφωμένα. Η οστεογένεση είναι η διαδικασία δημιουργίας νέου οστικού υλικού από τους οστεοβλάστες, δηλαδή είναι η διαδικασία ανάπτυξης των οστών στο ανθρώπινο σώμα. Η πλατφόρμα Stewart μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ιατρικές εφαρμογές, στην ορθοπεδική χειρουργική και να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση απλών και σύνθετων καταγμάτων στα οστά ή ακόμη και στην επιμήκυνση τους λόγω ανομοιομορφίας ή δυσμορφιών. Ο πρώτος άνθρωπος που χρησιμοποίησε αυτού του είδους πλατφόρμα ως εξωτερική συσκευή οστεογένεσης ήταν ο Dr. Charles Taylor, ο οποίος δημιούργησε την Taylor Spatial Frame η οποία συσκευή χρησιμοποιήθηκε για διόρθωση καταγμάτων και δυσμορφιών των οστών.



Εικόνα 3.12: Σχηματική αναπαράσταση συσκευών οστεογένεσης με τη χρήση πλατφόρμας Stewart.





### 3.5.4 Επιπλέον εφαρμογές πλατφόρμας Stewart

Το συγκεκριμένο είδος πλατφόρμας έχει πολλές εφαρμογές, στις διαδικασίες κατεργασίας, στους γερανούς, στην υποθαλάσσια έρευνα, στην διάσωση στον αέρα, στα τηλεσκόπια, σε δορυφορικά πιάτα εντοπισμού θέσης, στην τοποθέτηση δορυφόρων, στην κατασκευή μηχανήματος κοπής με laser, στην κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή, στην κατεργασία μαρμάρων για δημιουργία αγαλμάτων, στην κατασκευή γεφυρών, στην βοήθεια σε συντήρηση οχημάτων, σε κατασκευές προσομοιωτών παιχνιδιομηχανών, στην ορθοπεδική χειρουργική, σε αυτόματο μηχάνημα συναρμολόγησης ή μεταφοράς αντικειμένων, σε κατασκευή φρέζας ή τόρνου CNC, σε ρευστομηχανική μελέτη συμπεριφοράς ανεμογεννήτριας κ.α.. Αξιοσημείωτη είναι η χρήση της πλατφόρμας στην χειρουργική. Η χρήση της πλατφόρμας στην χειρουργική άρχισε να εδραιώνεται τα τελευταία χρόνια λόγω της σημαντικής ικανότητας που έχει όσον αφορά στην ακρίβεια της θέσης κατά τη διάρκεια της κίνησης καθώς και των μικρών διαστάσεων με τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην ιατρική.



## 4 Μελέτη γεωμετρικής μοντελοποίησης πλατφόρμας Stewart

### 4.1 Εισαγωγή

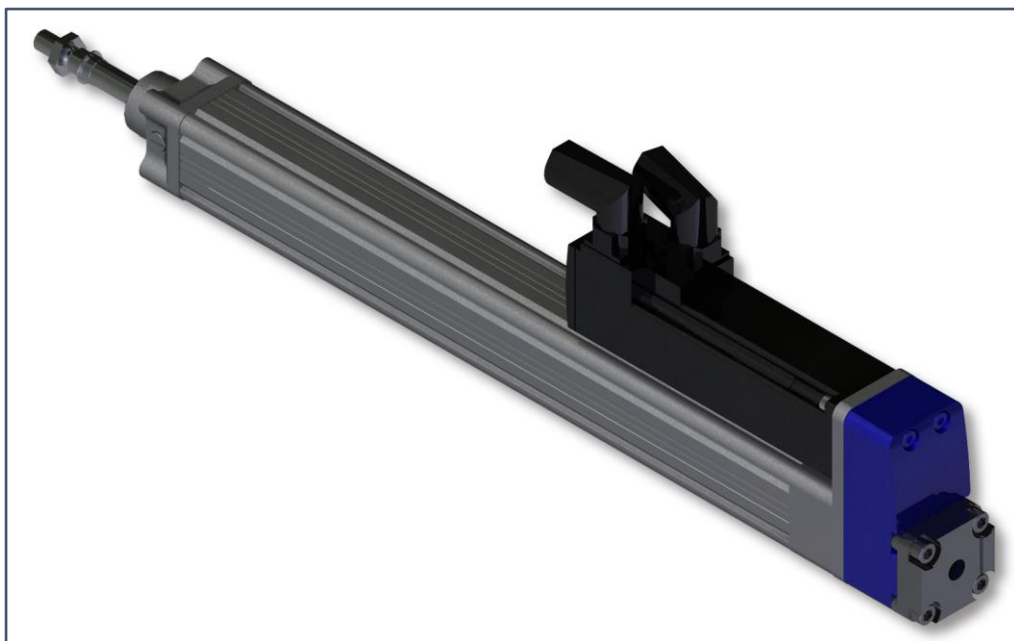
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την μελέτη και ανάλυση της πλατφόρμας Stewart. Οι πλατφόρμες Stewart είναι πολύ διαδεδομένες παγκοσμίως, γεγονός που επιβεβαιώνει η πληθώρα πληροφοριών που βρέθηκε στο διαδίκτυο και στην βιβλιογραφία. Αρχικά έγινε αναζήτηση για να επιλεγεί ο τύπος της πλατφόρμας που θα μελετηθεί όπου επιλέχθηκε ο τύπος 6-6, για τους λόγους που περιγράφονται στο **κεφάλαιο 3.3**. Στην συνέχεια έγινε αναζήτηση για την επιλογή των επενεργητών, όπου επελέγησαν οι ηλεκτρομηχανικοί επενεργητές λόγω της μεγάλης τους ταχύτητας και της ικανοποιητικής δύναμης που μπορούν να ασκήσουν. Τέλος, η έρευνα ολοκληρώθηκε με την επιλογή των σφαιρικών αρθρώσεων, όπου επελέγησαν οι αρθρώσεις Cardan λόγω της μεγάλης τους αντοχής και του ικανοποιητικού εύρους λειτουργίας.

### 4.2 Επιλογή τύπου πλατφόρμας Stewart

Για την επιλογή του τύπου της πλατφόρμας πραγματοποιήθηκε έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο και μετά από σχετική αναζήτηση σε διάφορες ιστοσελίδες, επιλέχθηκαν δύο γνωστοί κατασκευαστές για πλατφόρμες Stewart, η **Physik Instrumente (PI miCos)** και η **CKAS Mechatronics**. Ο τύπος που χρησιμοποιείται κατά κόρον και σχεδόν σε αποκλειστικότητα είναι ο 6-6 κι αυτός χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη.

### 4.3 Επιλογή τύπου γραμμικών επενεργητών

Για την επιλογή του τύπου των γραμμικών επενεργητών πραγματοποιήθηκε έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο και μετά από σχετική αναζήτηση σε διάφορες ιστοσελίδες, επιλέχθηκε η κατασκευάστρια εταιρία SKF. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί αυτή η εταιρία διαθέτει πολύ μεγάλο brand name, παρείχε όλα τα απαραίτητα datasheets και manuals για τους γραμμικούς επενεργητές όπως επίσης και μεγάλη πληθώρα περιφερειακών που μπορούν να εξοπλίσουν τους επενεργητές. Ο επενεργητής που επιλέχθηκε είναι ο **CASM** με διαδρομή 300mm λόγω της μεγάλης του ταχύτητας, απόδοσης, ακρίβειας και της συμπαγούς του κατασκευής. Τα 700 N δύναμης που παράγονται από αυτόν τον επενεργητή σε συνδυασμό με τα 6 τεμάχια που τοποθετούνται παράλληλα για την λειτουργία της πλατφόρμας, παράγουν δύναμη 4200 N που είναι αρκετή για υποστηριχθούν τα φορτία που ασκούνται κατά την διάρκεια της κοπής.



Εικόνα 4.1:

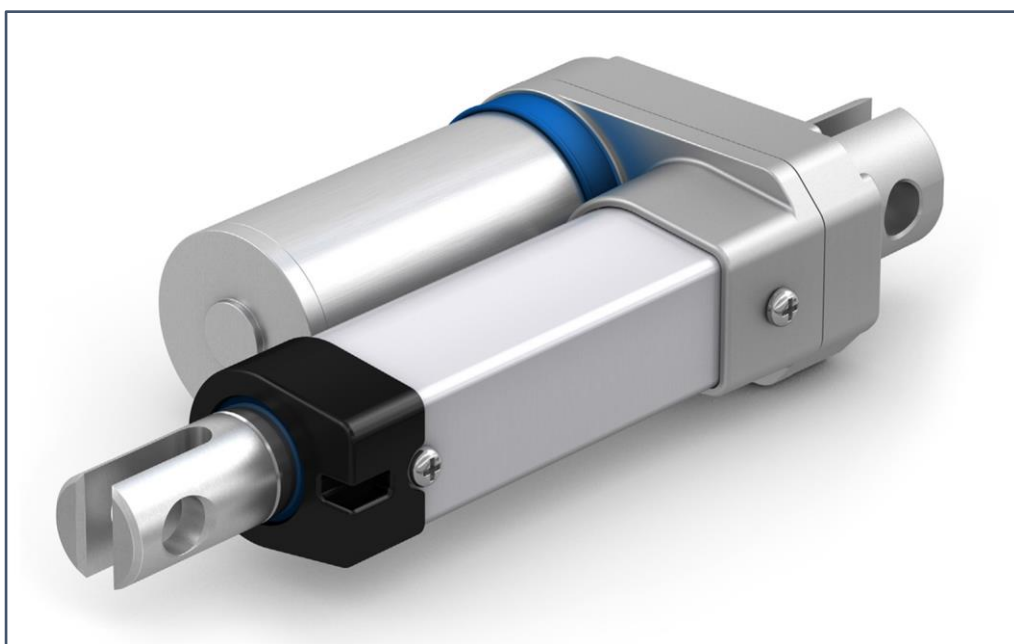
Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμικού επενεργητή που επιλέχθηκε για την υλοποίηση κίνησης της πλατφόρμας Stewart.



#### 4.3.1 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHB

Σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε θερμοκρασίες  $-40$  έως  $85^{\circ}\text{C}$  σε 25% φορτίο, οι ηλεκτρομηχανικοί επενεργητές SKF CAHB διαθέτουν ισχυρά μεταλλικά γρανάζια και περιβλήματα ανθεκτικά στη διάβρωση. Διατίθενται σε δύο σειρές, την CAHB 20/21 για εφαρμογές μέτριου έως υψηλού φορτίου και την CAHB 10 για εφαρμογές χαμηλού φορτίου, έχουν πιστοποίηση IP68 ενώ δεν χρειάζονται κάποια ιδιαίτερη συντήρηση.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Συμπαγής σχεδιασμός
  - Στιβαρή κι αξιόπιστη κατασκευή
  - Σχεδιασμένος να αντέχει σε αντίξοες συνθήκες
  - Υψηλή ικανότητα φορτίου
  - Αυτόματη λίπανση για όλη την διάρκεια ζωής του
  - Ανθεκτικός, ελαφρύς και αντοχή στη διάβρωση
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ιατρική
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων
  - Τρόφιμα και ποτά
  - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά συστήματα
  - Χειρισμός υλικών



Εικόνα 4.2: Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHB-10 κατάλληλος για εφαρμογές σε αντίξοες συνθήκες.

#### 4.3.2 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHM

Η σειρά CAHM αποτελείται από έναν επενεργητή στον άξονα ανύψωσης που μεταφέρει την κίνηση με σύστημα ατέρμονα κοχλία. Πληρούν τις υψηλότερες απαιτήσεις για εφαρμογές στην βιομηχανία και άλλες εφαρμογές. Οι επενεργητές είναι διαθέσιμοι σε πολλές διαφορετικές εκδόσεις του κινητήρα. Η σειρά CAHM προσφέρει ισχυρή, γρήγορη και αθόρυβη κίνηση με υψηλή ασφάλεια. Οι επενεργητές περιλαμβάνουν πολλές επιλογές σύνδεσης με μαγνητικούς ψηφιακούς κωδικοποιητές, τερματικούς διακόπτες, εξωτερικούς άξονες κλπ.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Ιδανικό για βαριές εφαρμογές φορτίου
  - Μεγάλη ταχύτητα / ευρύ φάσμα ισχύος



- Στιβαρή κατασκευή
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ιατρική
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων
  - Τρόφιμα και ποτά
  - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά συστήματα
  - Χειρισμός υλικών



Εικόνα 4.3: Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAHM-31 κατάλληλος για μεγάλες εφαρμογές φορτίων.

### 4.3.3 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CASM

Κατασκευασμένοι από υψηλής ποιότητας υλικά, οι γραμμικοί επενεργητές CASM είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν ακόμη και στις πιο δύσκολες συνθήκες. Αυτή η σειρά διατίθεται με επανακυκλοφορούντα σφαιρίδια ή με τραπεζοειδές σπείρωμα, σε διάφορα μεγέθη και μήκη για να μπορεί να λειτουργήσει σε μεγάλο φάσμα εφαρμογών.

Ένα από τα χαρακτηριστικά του γραμμικού επενεργητή CASM είναι το σύστημα στεγανοποίησης του όπου αποτελείται από:

- Τσιμούχες, οι οποίες παρέχουν πιστοποίηση IP54S
- Μεταλλικό μπρούτζινο φίλτρο, που αντισταθμίζει την διαφορά πίεσης εντός του γραμμικού επενεργητή κατά την κίνηση

Η κίνηση του γραμμικού επενεργητή CASM γίνεται με τη χρήση ενός κινητήρα, όπου αυτός μπορεί να είναι:

- Servo
- Brushless DC
- Ειδική παραγγελία

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Γρήγορη συναρμολόγηση και εύκολη τοποθέτηση
  - Πολλές επιλογές τύπων αρθρώσεων έδρασης
  - Υψηλής ενεργειακής απόδοσης
  - Κορυφαία επίπεδα ακρίβειας και επαναληψιμότητας



- Τυπικές εφαρμογές
  - Ρομπότ
  - Χειρισμός μηχανημάτων
  - Συσκευασία προϊόντων
  - Συστήματα διαλογής
  - Μηχανές κατεργασίας και κοπής



**Εικόνα 4.4:** Γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου CASM κατάλληλοι για χρήση σε ρομποτικά συστήματα και μηχανές κατεργασίας.

#### 4.3.4 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CAT & CAR

Οι γραμμικοί επενεργητές τύπου CAT/CAR είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να είναι εύκολο να αλλαχθούν εξαρτήματα ζωτικής σημασίας όπως ο κινητήρας, οι οδοντωτοί τροχοί, κοχλίες, εξαρτήματα, να μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν οικονομικοί επενεργητές ειδικής παραγγελίας από έτοιμα τυποποιημένα εξαρτήματα. Η ευελιξία εύρους του γραμμικού επενεργητή CAT, τον καθιστά κατάλληλο για ένα άπειρο αριθμό εφαρμογών.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Συμπαγής σχεδιασμός
  - Στιβαρή κι αξιόπιστη κατασκευή
  - Αυτόματη λίπανση για όλη την διάρκεια ζωής του
  - Υψηλής ενεργειακής απόδοσης
  - Βιομηχανικά αξιόπιστος και ισχυρός επενεργητής
  - Μεγάλη γκάμα εξαρτημάτων
  - Δεξιά κι αριστερή έκδοση
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ιατρική
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων
  - Τρόφιμα και ποτά
  - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά συστήματα
  - Χειρισμός υλικών

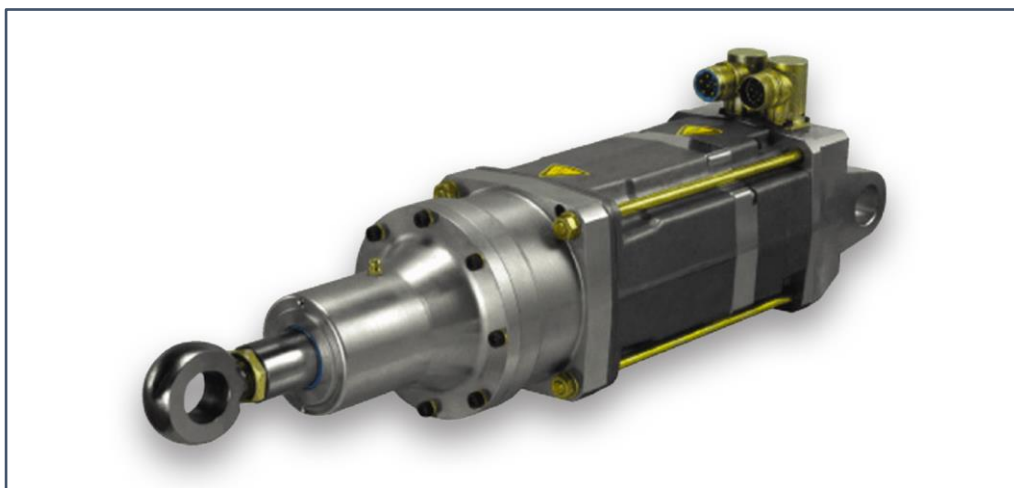


Εικόνα 4.5: Γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου CAT και CAR κατάλληλοι για άπειρες εφαρμογές.

#### 4.3.5 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CEMC

Οι γραμμικοί επενεργητές CEMC παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος σε μικρό μέγεθος. Είναι κατάλληλοι για πολύ μεγάλα φορτία καθώς επίσης παρέχουν υψηλή αξιοπιστία σε ικανοποιητικές τιμές.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Υψηλή ισχύς και αξιοπιστία
  - Συμπαγής και δυναμική λύση
  - Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Τυπικές εφαρμογές
  - Συναρμολόγηση
  - Συγκολλήσεις
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων



Εικόνα 4.6: Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου CEMC κατάλληλος για χρήση βαρέου τύπου σε σημεία όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα ισχύος.



#### 4.3.6 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου EcoMag

Οι γραμμικοί επενεργητές EcoMag επιτρέπουν την ακριβή και ασφαλή κίνηση κρεβατιών, τραπεζιών και καρεκλών για τους ασθενείς στα νοσοκομεία, κλινικές και ιδρύματα αποκατάστασης. Αυτά τα μικρά και οικονομικά αποδοτικά συστήματα διαθέτουν αρθρωτό σχεδιασμό κι είναι ιδανικά για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Συμπαγής σχεδιασμός
  - Οικονομικά αποδοτική κατασκευή
  - Αθόρυβη λειτουργία
  - Η μονάδα ελέγχου μπορεί να τοποθετηθεί στον επενεργητή
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ιατρική
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων
  - Τρόφιμα και ποτά
  - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά συστήματα
  - Χειρισμός υλικών



**Εικόνα 4.7:** Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου EcoMag κατάλληλος για χρήση σε νοσοκομεία, κλινικές και ιδρύματα αποκατάστασης.

#### 4.3.7 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου LEMC

Ο γραμμικός επενεργητής LEMC είναι ένας ηλεκτρομηχανικός κύλινδρος ο οποίος είναι κατασκευασμένος από υψηλής ποιότητας υλικά ώστε να αντέχει στις πιο αντίξοες βιομηχανικές συνθήκες. Διαθέτει πρότυπο πιστοποίησης IP54S ή IP65S κατόπιν αιτήματος. Ο ηλεκτρομηχανικός κύλινδρος αποτελείται από τα:

- Την γραμμική μονάδα
- Τον προσαρμογέα κινητήρα
- Τον τερματικό διακόπτη
- Τον κινητήρα και ελεγκτή



- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Υψηλή αποδοτικότητα
  - Μεγάλη διάρκεια ζωής
  - Συμπαγής και στιβαρός δομικός σχεδιασμός
  - Διαθέσιμο για όλες τις μάρκες κινητήρων
  - Έξυπνο και ελεύθερο προγραμματιζόμενο σύστημα
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ξυλουργικά μηχανήματα
  - Συναρμολόγηση
  - Έλεγχος εξοπλισμού
  - Προσημειώσεις
  - Τεχνολογίες μορφοποίησης
  - Χύτευση
  - Συγκολλήσεις



Εικόνα 4.8:

Οι γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου LEMC είναι κατάλληλος για βαριά βιομηχανική χρήση κάτω από αντίξοες συνθήκες.

#### 4.3.8 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου Matrix

Η σειρά γραμμικών επενεργητών Matrix περιλαμβάνει πανίσχυρους DC και AC κινητήρες. Λειτουργούν πολύ ήσυχα, καταλαμβάνουν λίγο χώρο και μπορούν να εγκατασταθούν σε κάθε γωνία, σε οριζόντια ή κάθετη θέση. Η σειρά Matrix είναι ιατρικά εγκεκριμένη και μπορεί να αποτελεί μέρος ενός πλήρους συστήματος με ελεγκτή, λειτουργικές μονάδες και αξεσουάρ.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Είναι εφικτός ο συγχρονισμός με επενεργητές ίδιου τύπου
  - Αθόρυβη λειτουργία
  - Πλήρες σύστημα με ελεγκτή, λειτουργικές μονάδες και αξεσουάρ
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ιατρική
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων





- Τρόφιμα και ποτά
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά συστήματα
- Χειρισμός υλικών

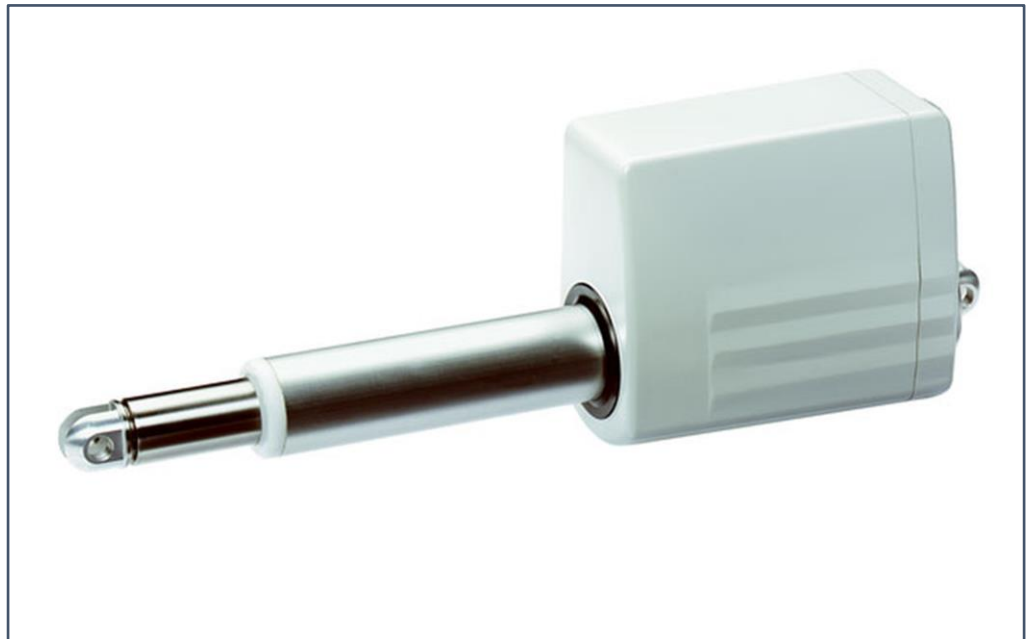


Εικόνα 4.9: Γραμμικοί επενεργητές SKF τύπου Matrix κατάλληλοι για εργασία σε περιβάλλον όπου απαιτείται ισχύα.

#### 4.3.9 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου Runner

Ο τύπος Runner είναι ένας πολύ συμπαγής, υψηλής απόδοσης ενεργοποίησης ο οποίος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με υψηλό φορτίο λειτουργίας. Ο επενεργητής αυτός χρησιμοποιείται συνήθως στην ιατρική, καθώς μπορεί να διαθέτει μια μονάδα αποσφαλμάτωσης όπου μπορούν να συνδεθούν έως και τρεις επενεργητές, για την αποφυγή τυχών λαθών.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Υψηλή δύναμη έλξης και ώθησης
  - Συμπαγής σχεδιασμός
  - Αθόρυβη λειτουργία
  - Ασφαλιστικό περικόχλιο σε όλες τις εκδόσεις
  - Υψηλός συντελεστής ασφάλειας
- Τυπικές εφαρμογές
  - Ιατρική
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων
  - Τρόφιμα και ποτά
  - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά συστήματα
  - Χειρισμός υλικών



**Εικόνα 4.10:** Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου Runner κατάλληλος για ιατρικές εφαρμογές υψηλής δύναμης και συμπαγούς κατασκευής.

#### 4.3.10 Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου SRSA

Οι κύλινδροι SKF που χρησιμοποιούν πλανητικό σύστημα κοχλίων όπως ο τύπος SRSA, είναι σχεδιασμένοι για μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλές επιταχύνσεις καθώς επίσης και για εφαρμογές υψηλής ισχύος.

- Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα
  - Η δύναμη των υδραυλικών συστημάτων
  - Η ταχύτητα του πεπιεσμένου αέρα
- Τυπικές εφαρμογές
  - Αυτοματισμοί εργοστασίων
  - Πετρέλαιο και φυσικό αέριο



**Εικόνα 4.11:** Γραμμικός επενεργητής SKF τύπου SRSA κατάλληλος για εφαρμογές υψηλής ισχύος με μεγάλες επιταχύνσεις.



#### 4.3.11 Επιλογή τύπου σφαιρικών αρθρώσεων Cardan

Για την επιλογή τύπου σφαιρικών αρθρώσεων πραγματοποιήθηκε έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο και μετά από σχετική αναζήτηση σε διάφορες ιστοσελίδες, επιλέχθηκε η κατασκευάστρια εταιρία SKF. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί αυτή η εταιρία διαθέτει πολύ μεγάλο brand name, παρέχει όλα τα απαραίτητα datasheets για τις σφαιρικές αρθρώσεις. Ο τύπος της σφαιρικής άρθρωσης που επιλέχθηκε είναι **Heavy Duty** λόγω της μεγάλης αντοχής και συμπαγούς κατασκευής του.



Εικόνα 4.12: Σφαιρικές αρθρώσεις / Universal Joint διαφόρων τύπων.

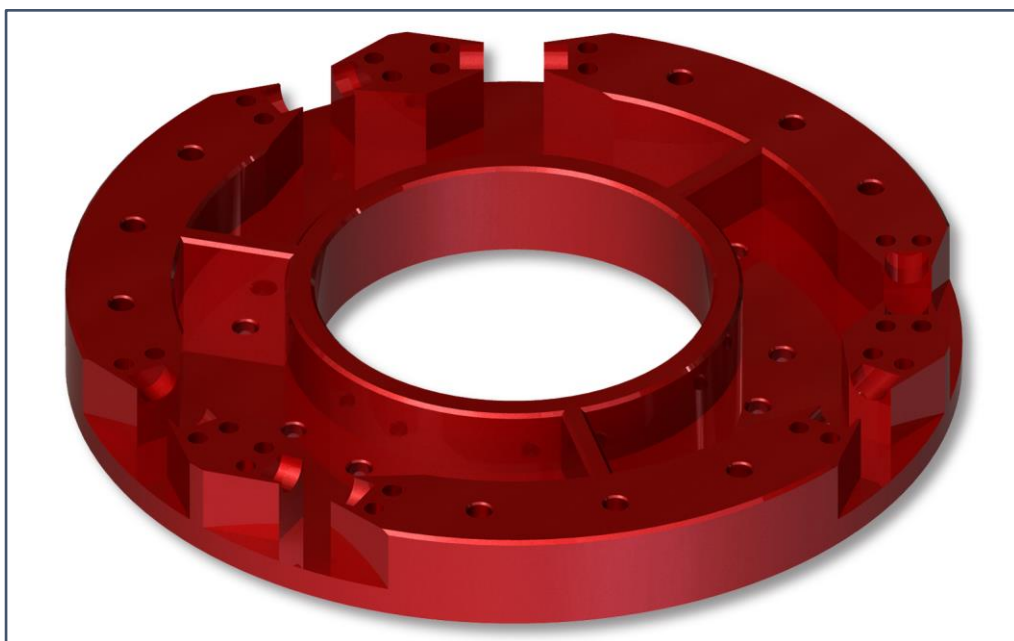


## 5 Γεωμετρική μοντελοποίηση μη τυποποιημένων εξαρτημάτων υλοποίησης πλατφόρμας Stewart

Για την υλοποίηση της πλατφόρμας Stewart είναι απαραίτητο να κατασκευαστούν εξαρτήματα που δεν είναι τυποποιημένα. Η γεωμετρική μοντελοποίηση τους περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια.

### 5.1 Κάτω βάση

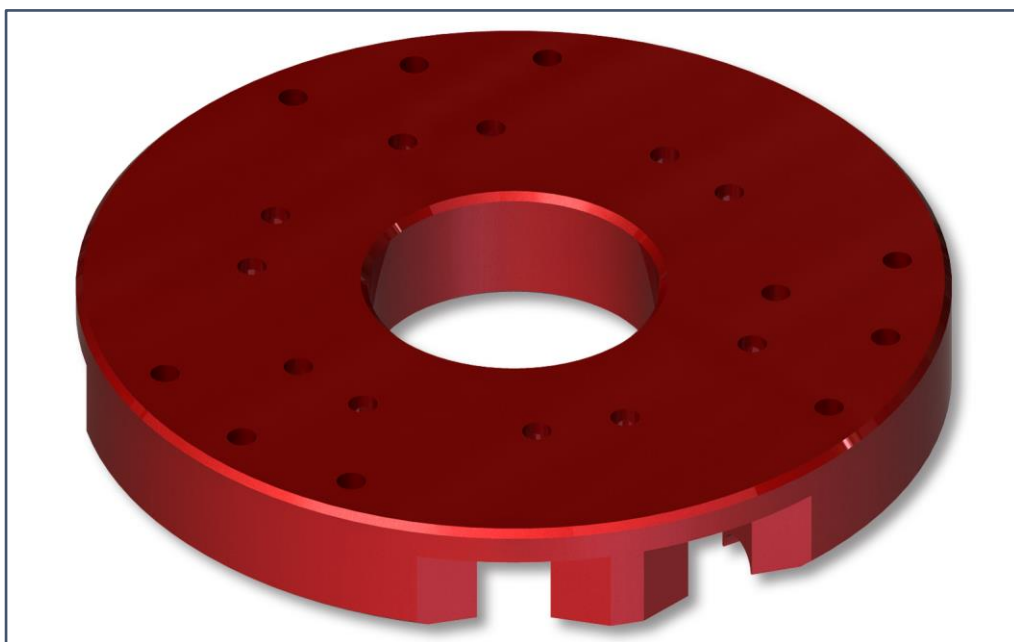
Παρακάτω φαίνεται η κάτω βάση της πλατφόρμας Stewart όπου περιμετρικά φέρει οπές διαφόρων διαμετρημάτων οι οποίες είναι απαραίτητες για την συγκράτηση της πλατφόρμας Stewart πάνω σε κάποια άλλη βάση ή σύστημα. Επίσης υπάρχουν κυλινδρικές φωλιές, μέσα στις οποίες μπαίνουν τα κυλινδρικά ρουλεμάν των σφαιρικών αρθρώσεων καθώς επίσης και οπές όπου μπαίνουν κοχλίες για να γίνει η ασφάλιση των σφαιρικών αρθρώσεων με τη χρήση των εξαρτημάτων που περιγράφονται στο **κεφάλαιο 5.4**.



Εικόνα 5.1: Κάτω βάση της πλατφόρμας Stewart.

### 5.2 Πάνω βάση

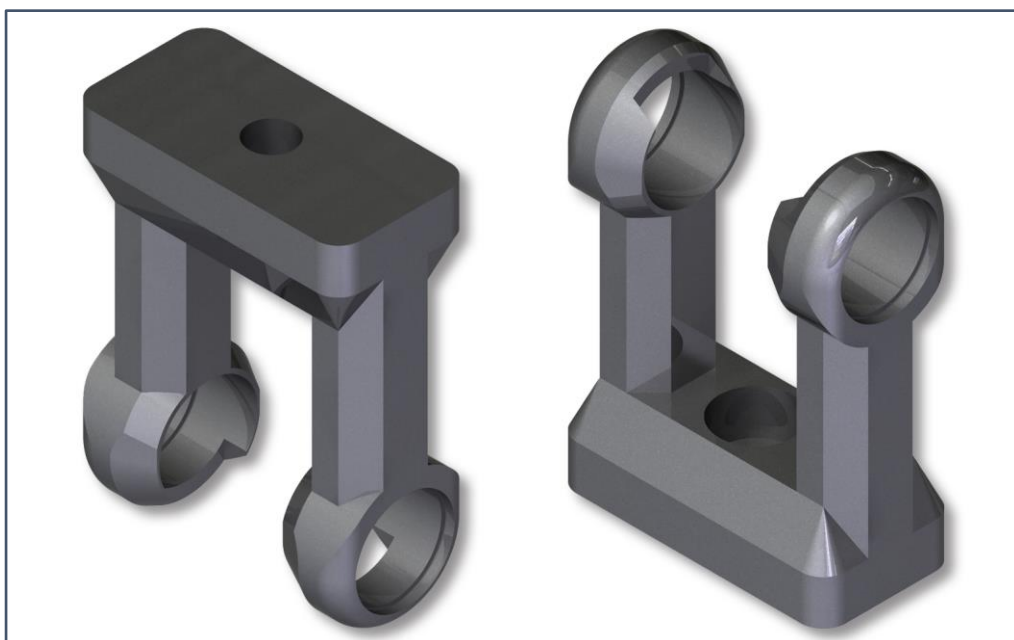
Στην συνέχεια, έγινε γεωμετρική μοντελοποίηση της πάνω βάσης της πλατφόρμας Stewart η οποία στο κέντρο έχει μια μεγάλη οπή ενώ περιμετρικά φέρει οπές διαφόρων διαμετρημάτων, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ασφάλιση του συστήματος συγκράτησης κοπτικού εργαλείου. Στο κάτω μέρος υπάρχουν κυλινδρικές φωλιές, μέσα στις οποίες μπαίνουν τα κυλινδρικά ρουλεμάν των σφαιρικών αρθρώσεων καθώς επίσης και οπές όπου μπαίνουν κοχλίες για να γίνει η ασφάλιση των σφαιρικών αρθρώσεων με τη χρήση των εξαρτημάτων που περιγράφονται στο **κεφάλαιο 5.4**.



Εικόνα 5.2: Πάνω βάση της πλατφόρμας Stewart.

### 5.3 Εξαρτήματα συγκράτησης γραμμικών επενεργητών

Η σύνδεση των γραμμικών επενεργητών με τις σφαιρικές αρθρώσεις γίνεται μέσω κατάλληλου εξαρτήματος. Για το εξάρτημα αυτό έγινε γεωμετρική μοντελοποίηση η οποία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.3**. Το εξάρτημα αυτό είναι ειδικά σχεδιασμένο έτσι ώστε η μία του πλευρά να συνδέεται με τον γραμμικό επενεργητή ενώ η άλλη με την σφαιρική άρθρωση.



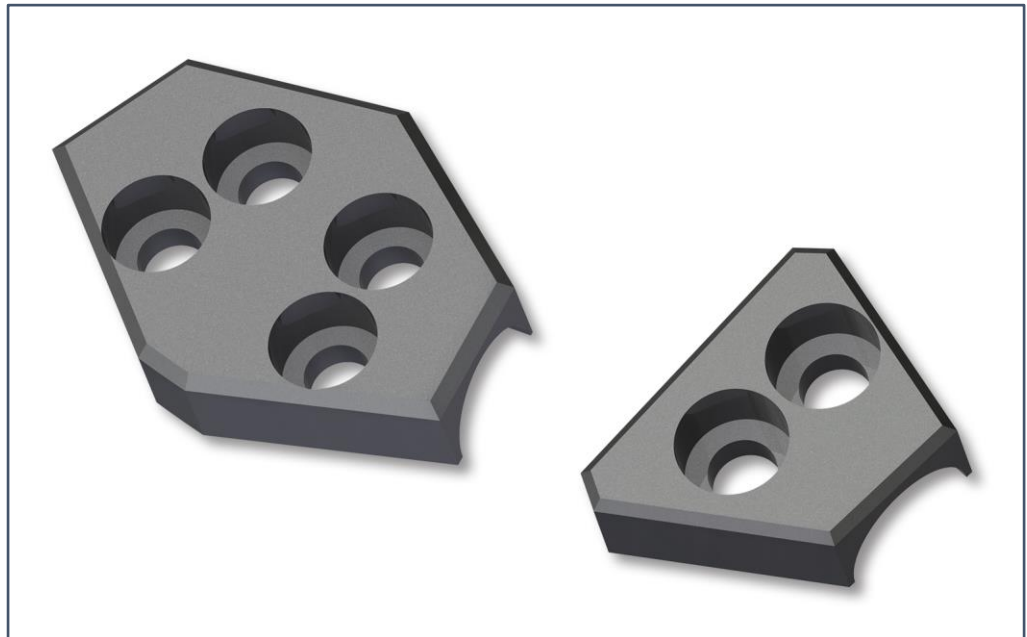
Εικόνα 5.3: Εξαρτήματα συγκράτησης των γραμμικών επενεργητών και των σφαιρικών αρθρώσεων.

### 5.4 Εξαρτήματα συγκράτησης σφαιρικών αρθρώσεων

Για την συγκράτηση των σφαιρικών αρθρώσεων στην πάνω και κάτω βάση, σχεδιάστηκαν κατάλληλα εξαρτήματα τα οποία στηρίζουν τις σφαιρικές αρθρώσεις. Στο κάτω τους μέρος έχουν κυλινδρικές φωλιές, μέσα στις οποίες



μπαίνουν τα κυλινδρικά ρουλεμάν των σφαιρικών αρθρώσεων ενώ στο πάνω μέρος έχουν οπές όπου μπαίνουν κοχλίες για την στήριξη τους.



Εικόνα 5.4: Εξαρτήματα συγκράτησης των σφαιρικών αρθρώσεων της κάτω βάσης.



Εικόνα 5.5: Εξαρτήματα συγκράτησης των σφαιρικών αρθρώσεων της πάνω βάσης.



## 5.5 Επιλογή κατάλληλων στοιχείων λυόμενων συνδέσεων

Για την σύνθεση των παραπάνω εξαρτημάτων είναι απαραίτητη η χρήση λυόμενων συνδέσεων.

Χρησιμοποιήθηκαν χωνευτοί κοχλίες τύπου **DIN 912**:

- 42 κοχλίες **M10x35**, για την στερέωση των σφαιρικών αρθρώσεων της κάτω και πάνω βάσης
- 6 κοχλίες **M12x30**, για την στερέωση των γραμμικών επενεργητών με τις βάσεις τους
- 12 κοχλίες **M12x30**, για την στερέωση της βάσης του εργαλείου στην πάνω βάση της πλατφόρμας
- 6 κοχλίες **M12x70** ή **M12x45** για την στερέωση των εργαλείων πάνω στην βάση τους

## 5.6 Σύστημα συγκράτησης μηχανισμού κοπής τύπου Router

Για την πραγματοποίηση κατεργασιών με χρήση της πλατφόρμας, πρέπει να επιλεγεί ο τύπος του μηχανισμού κοπής. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε περιστροφικός μηχανισμός κοπής τύπου Router όπου με αυτόν τον τρόπο καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος των εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μηχανουργικές κατεργασίες. Για την προσαρμογή του μηχανισμού αυτού χρειάζεται να σχεδιαστεί μία βάση στήριξης που θα τοποθετηθεί στο πάνω μέρος της πλατφόρμας και θα συνδέσει την πλατφόρμα με τον μηχανισμό κοπής. Η γεωμετρική μοντελοποίηση του προσαρμογέα περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Παρακάτω φαίνεται ο περιστροφικός μηχανισμός κοπής τύπου Router μαζί με την βάση στήριξης του.

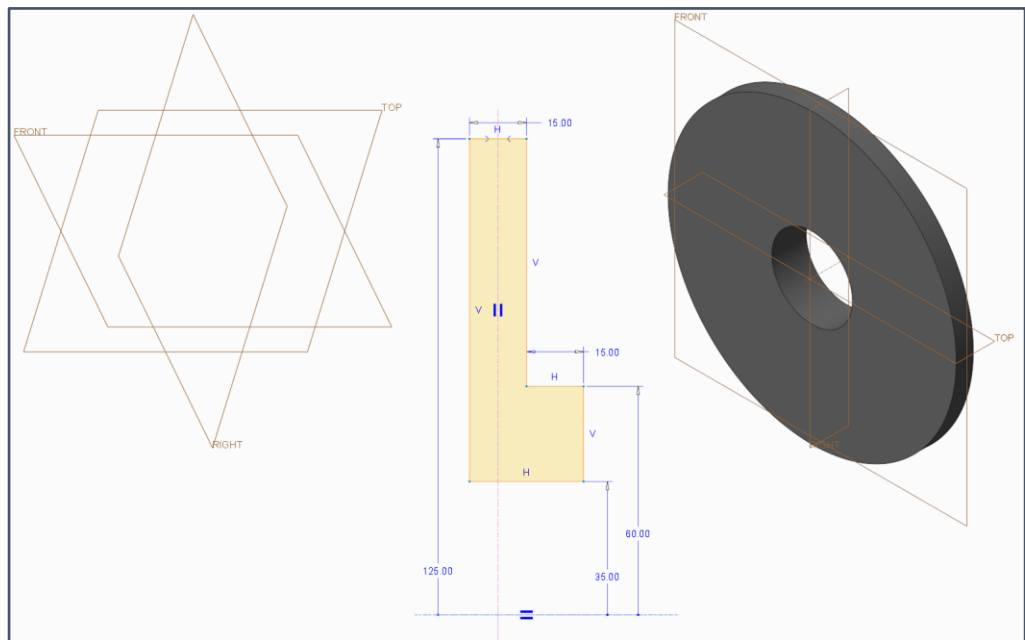


Εικόνα 5.6:

Περιστροφικός μηχανισμός κοπής τύπου Router μαζί με το σύστημα συγκράτησης κοπτικών εργαλείων και την βάση στήριξης.

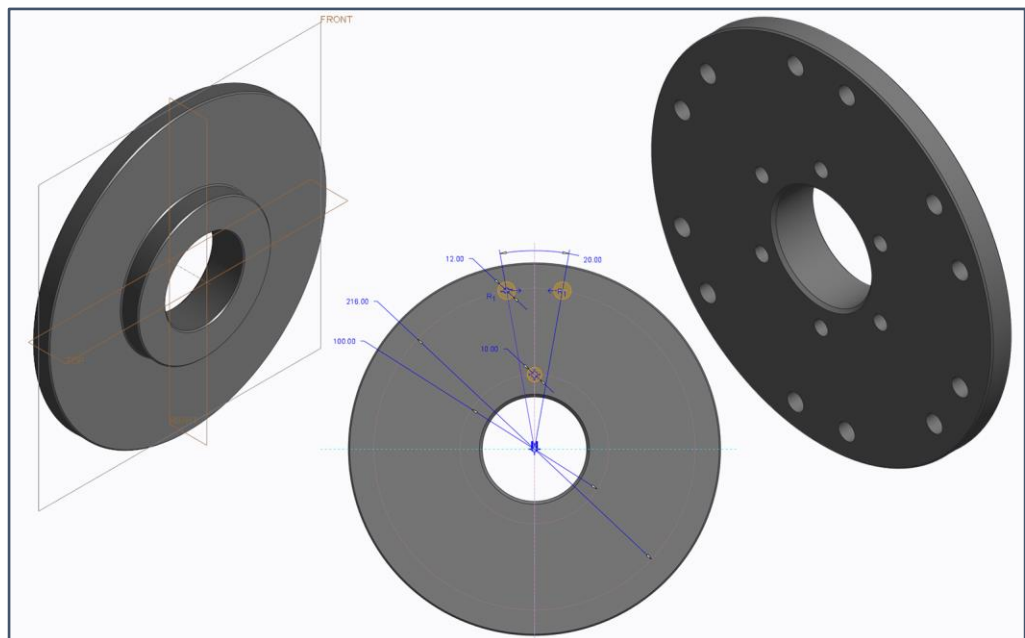
## 5.7 Γεωμετρική μοντελοποίηση βάσης στήριξης περιστροφικού μηχανισμού κοπής τύπου Router

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος που πραγματοποιήθηκε η γεωμετρική μοντελοποίηση της βάσης στήριξης του μηχανισμού κοπής τύπου Router. Το λογισμικό PTC Creo διαθέτει τρία βασικά επίπεδα σχεδιασμού που είναι κάθετα μεταξύ τους, **FRONT**, **RIGHT**, **TOP** και με τη χρήση αυτών των πλαισίων πραγματοποιείται η γεωμετρική μοντελοποίηση των κομματιών. Για την έναρξη του σχεδιασμού, αρχικά έγινε η τυχαία επιλογή ενός από τα τρία βασικά επίπεδα σχεδίασης και στην συνέχεια με τη χρήση της εντολής **Revolve**, η οποία δημιουργεί κομμάτια εκ περιστροφής, έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του κομματιού στις δύο διαστάσεις. Κλείνοντας την εντολή, εμφανίζεται το κομμάτι σε τρισδιάστατη μορφή.



Εικόνα 5.7: Επίπεδα σχεδιασμού του λογισμικού PTC Creo, δισδιάστατος σχεδιασμός γεωμετρίας εξαρτήματος και τελική τρισδιάστατη μορφή της βάσης στήριξης μηχανισμού τύπου Router.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν λοξοτομές (**Chamfer**) μεγέθους  $1\text{mm} \times 45^\circ$  σε όλη την επιφάνεια του εξαρτήματος, εκτός από την μπροστινή κυλινδρική μεριά όπου πραγματοποιήθηκε λοξοτομή μεγέθους  $2\text{mm} \times 45^\circ$  για την καλύτερη προσαρμογή του μηχανισμού κοπής τύπου Router. Τέλος σχεδιάστηκαν οι σπές συγκράτησης των εξαρτημάτων όπου με τη χρήση της εντολής **Pattern** η γεωμετρία αντιγράφηκε συνολικά έξι φορές γύρω από τον άξονα περιστροφής του Revolve και ανά εξήντα μοίρες για την δημιουργία όλων των σπών.



Εικόνα 5.8: Αριστερά φαίνεται η λοξοτομημένες περιοχές του εξαρτήματος, στην μέση η κατασκευή των σπών και δεξιά το τελικό εξάρτημα.

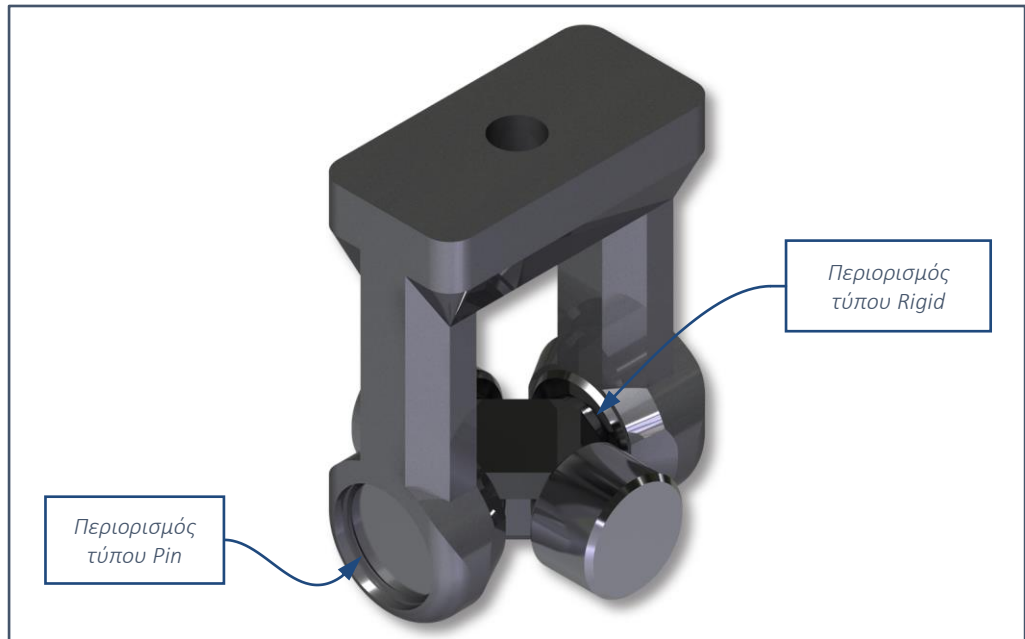




## 5.8 Τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση πλατφόρμας Stewart

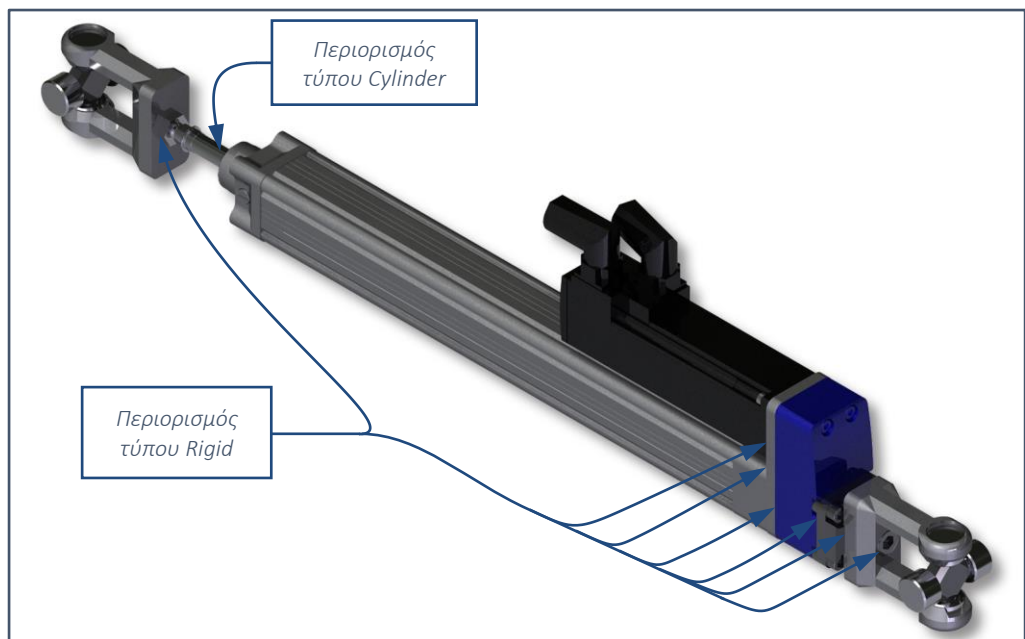
Η τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας έγινε σε βήματα. Όλες οι συναρμολογήσεις πραγματοποιήθηκαν με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε το λογισμικό γεωμετρικής μοντελοποίησης να καταλαβαίνει τον τύπο της συναρμογής.

Για την συναρμολόγηση της πλατφόρμας, αρχικά δημιουργήθηκε η συναρμολόγηση της βάσης του γραμμικού επενεργητή με την σφαιρική άρθρωση. Οι ενώσεις αυτές είναι τύπου **Pin**.



Εικόνα 5.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βάσης του γραμμικού επενεργητή.

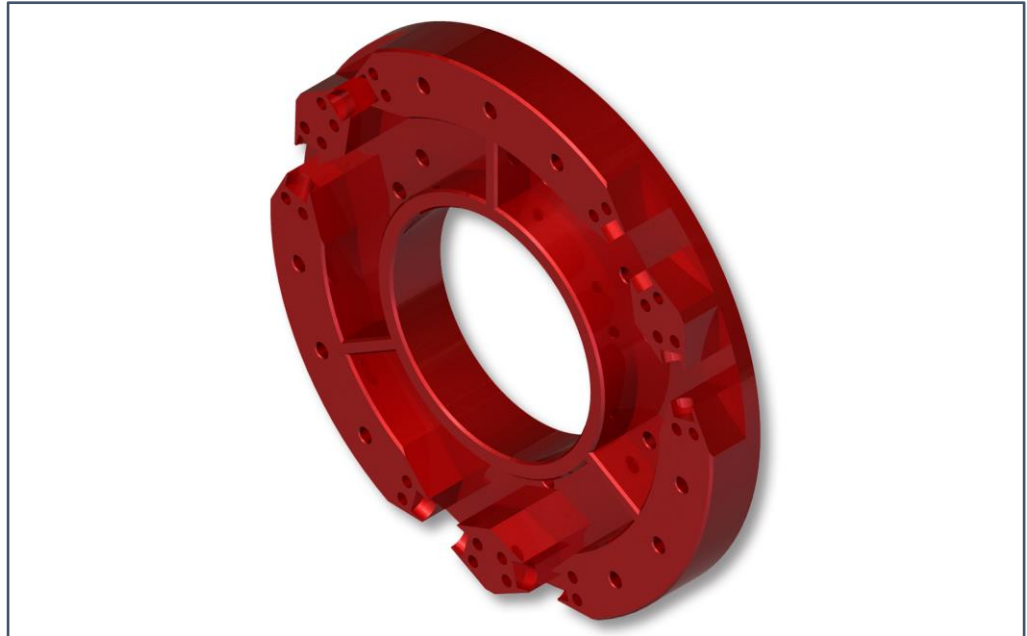
Στην συνέχεια δημιουργήθηκε η συναρμολόγηση του γραμμικού επενεργητή και της βάσης του. Όλα τα κομμάτια της συναρμολόγησης ενώθηκαν μεταξύ τους με τη χρήση ενώσεων τύπου Rigid εκτός αυτό του άξονα όπου έγινε με τη χρήση ένωσης τύπου **Cylinder** όπου ορίστηκε μέγιστη **διαδρομή 300mm** κι ένα εύρος περιστροφής  $\pm 1^\circ$ .



Εικόνα 5.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση του γραμμικού επενεργητή μαζί με τις βάσεις και τις σφαιρικές αρθρώσεις.

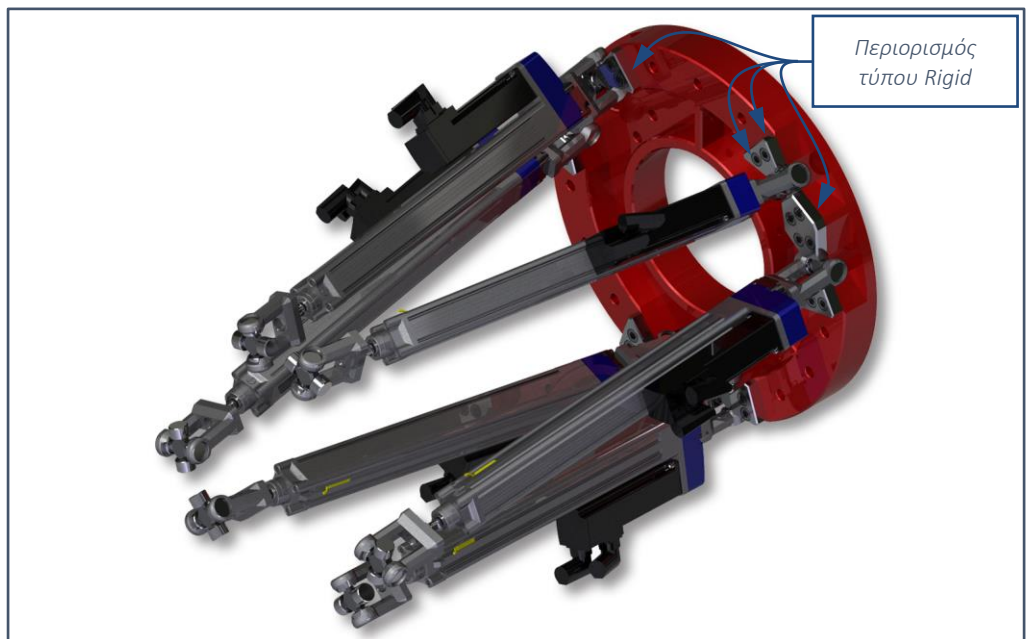


Μετά φτιάχτηκε μια καινούργια συναρμολόγηση η οποία περιέχει την κάτω βάση της πλατφόρμας. Η εν λόγω συναρμολόγηση είναι η τελική και πάνω σε αυτή συνθέτεται η τελική μορφή της πλατφόρμας.



Εικόνα 5.11: Τρισδιάστατη απεικόνιση της κάτω βάσης πλατφόρμας Stewart.

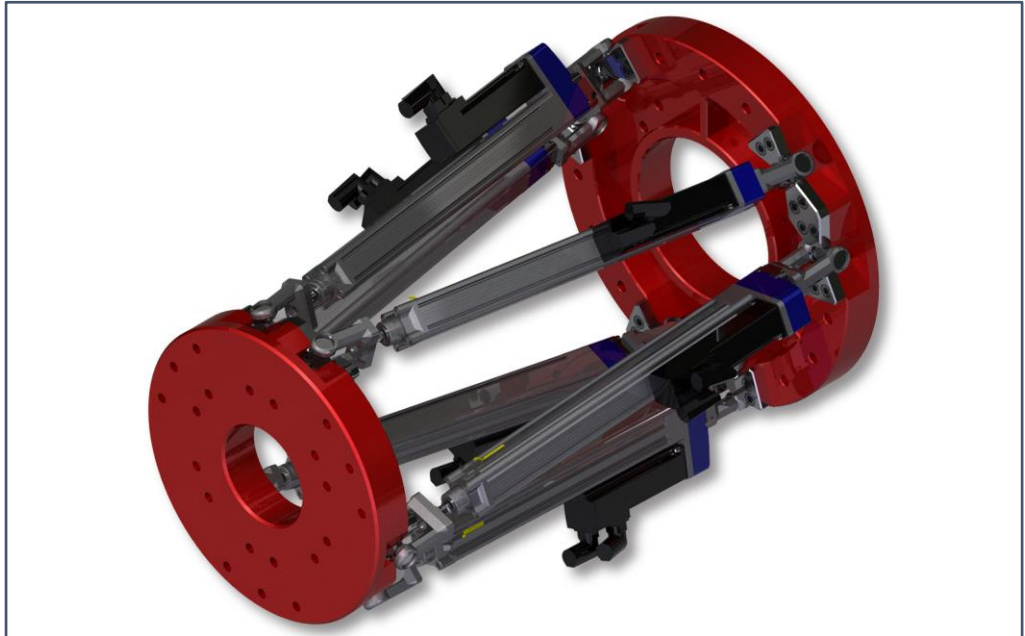
Στην συνέχεια τοποθετήθηκε στην κάτω βάση της πλατφόρμας η προηγούμενη συναρμολόγηση, τα κομμάτια που ασφαλίζουν τις σφαιρικές αρθρώσεις, όπως επίσης και οι απαραίτητοι κοχλίες. Τέλος, η διαδικασία επαναλήφθηκε άλλες πέντε φορές για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του μισού της πλατφόρμας. Οι ενώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να ενωθούν οι σφαιρικές αρθρώσεις με την κάτω βάση είναι τύπου **Pin**, τα πλακίδια συγκράτησης με τις σφαιρικές αρθρώσεις είναι τύπου **Rigid** όπως επίσης και οι κοχλίες.



Εικόνα 5.12: Τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart μαζί με γραμμικούς επενεργητές.

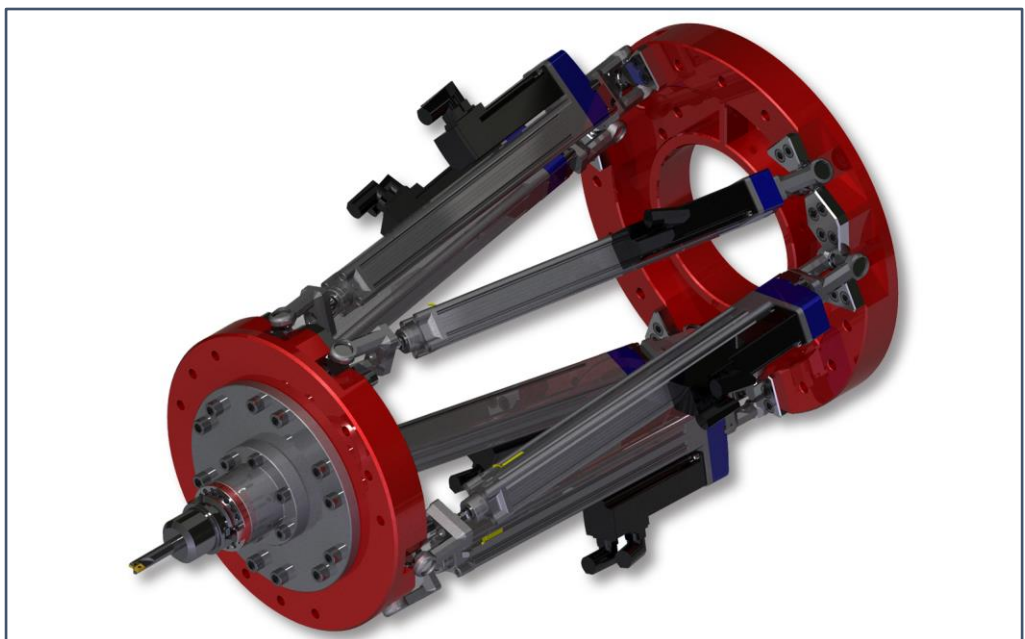


Συνεχίζοντας για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης της πλατφόρμας Stewart, τοποθετήθηκε η πάνω βάση όπως επίσης τα απαραίτητα κομμάτια που ασφαλίζουν τις σφαιρικές αρθρώσεις καθώς επίσης και οι απαραίτητοι κοχλίες. Οι ενώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να ενωθούν οι σφαιρικές αρθρώσεις με την πάνω βάση είναι τύπου **Pin**, τα πλακίδια συγκράτησης με τις σφαιρικές αρθρώσεις είναι τύπου **Rigid** όπως επίσης και οι κοχλίες.



Εικόνα 5.13: Τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart χωρίς κοπτικό εργαλείο.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η συναρμολόγηση η οποία περιλαμβάνει και τη βάση συγκράτησης των κοπτικών εργαλείων. Για την προσαρμογή της βάσης του κοπτικού εργαλείου αρκεί να τοποθετηθεί η βάση στο πάνω μέρος της πλατφόρμας και να ασφαλιστεί με δώδεκα κοχλίες. Παρακάτω φαίνεται η ολοκληρωμένη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart με την βάση συγκράτησης κοπτικών εργαλείων τύπου Spindle, η οποία επιτρέπει την ελεγχόμενη περιστροφή του κοπτικού εργαλείου μέσω της οποίας επιτυγχάνονται οι διάφοροι τύποι κατεργασίας.



Εικόνα 5.14: Τελική τρισδιάστατη συναρμολόγηση της πλατφόρμας Stewart με βάση εργαλείου τύπου Router.



## 5.9 Περιορισμοί και υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα γεωμετρικής μοντελοποίησης για την συναρμολόγηση της πλατφόρμας.

Οι τύποι συναρμολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- **Rigid** για τις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει κάποιος βαθμός ελευθερίας ανάμεσα στα συνδεόμενα κομμάτια,
- **Pin** εκεί όπου υπήρχε μόνο περιστροφή και καθόλου μετατόπιση,
- **Cylinder** εκεί όπου υπήρχε και περιστροφή αλλά και μετατόπιση, και
- **6DOF** εκεί όπου είναι επιθυμητή η μετατόπιση και η περιστροφή γύρω από τους τρεις βασικούς άξονες **X,Y,Z**.

Παρακάτω περιγράφονται οι περιορισμοί (Constraints) που χρησιμοποιήθηκαν για την συναρμολόγηση της πλατφόρμας.

- Η άρθρωση τύπου Cardan και το έδρανο κύλισης ενώνονται με περιορισμό τύπου **Rigid**,
- Η βάση του γραμμικού επενεργητή και η άρθρωση τύπου Cardan ενώνονται με περιορισμό τύπου **Pin**,
- Όλα τα κομμάτια της σταθερής βάσης του γραμμικού επενεργητή ενώνονται με περιορισμό τύπου **Rigid**,
- Όλα τα κομμάτια της κινητής βάσης του γραμμικού επενεργητή ενώνονται με περιορισμό τύπου **Rigid**,
- Το σταθερό και κινητό μέρος της βάσης του γραμμικού επενεργητή ενώνεται με περιορισμό τύπου **Cylinder**,
- Η πάνω και κάτω βάση ενώνεται με τα εξαρτήματα συγκράτησης των σφαιρικών αρθρώσεων με περιορισμό τύπου **Rigid**,
- Οι γραμμικοί επενεργητές ενώνονται με την πάνω και κάτω βάση με περιορισμό τύπου **Pin**, και
- Οι κοχλίες ενώνονται με τα εξαρτήματα συγκράτησης των σφαιρικών αρθρώσεων με περιορισμό τύπου **Rigid**.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την μηχανική μελέτη της πλατφόρμας είναι:

- Το υλικό της σφαιρικής άρθρωσης καθώς επίσης οι σταθερές και κινητές βάσεις της, ορίστηκαν ως χάλυβας,
- Το υλικό του σώματος του γραμμικού επενεργητή ορίστηκε ως αλουμίνιο ενώ ο άξονας του ως χάλυβας, και
- Το υλικό της πάνω και κάτω βάσης της πλατφόρμας ορίστηκε ως αλουμίνιο.



## 6 Κινηματική προσομοίωση πλατφόρμας Stewart

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία κινηματικής προσομοίωσης της πλατφόρμας Stewart με τη χρήση της εφαρμογής **Mechanism** του λογισμικού **PTC Creo Parametric 3.0** σε συνεργασία με το λογισμικό **MATLAB**.

### 6.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον εργασίας λογισμικού προσομοίωσης PTC Creo 3.0 Mechanism

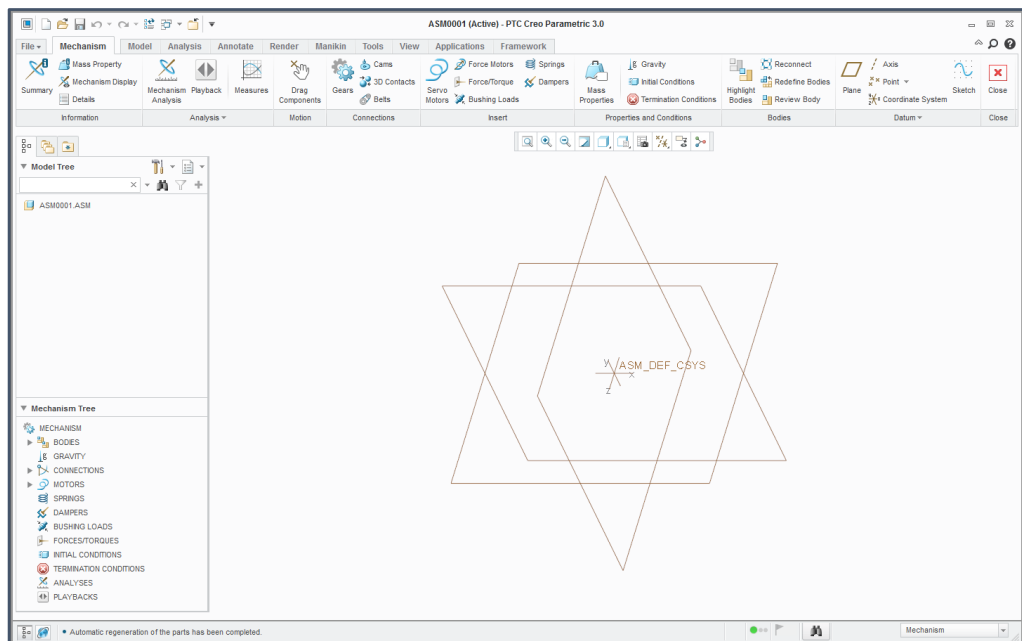
Το λογισμικό **PTC Creo Parametric** διαθέτει μεγάλη γκάμα επιλογών στο περιβάλλον προσομοίωσης μηχανισμών (**Mechanism**) κι αυτό δίνει μεγάλη ευελιξία στον χρήστη. Μπορεί να πραγματοποιήσει κινηματικές, δυναμικές, στατικές αναλύσεις καθώς και αναλύσεις θέσης αλλά και ισορροπίας δυνάμεων. Για την συγκεκριμένη κινηματική ανάλυση της πλατφόρμας Stewart χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση θέσης.

Στην **Εικόνα 6.1** φαίνεται το περιβάλλον εργασίας της εφαρμογής mechanism του λογισμικού Creo 3.0, όπου στο πάνω μέρος φαίνεται η καρτέλα **Mechanism** η οποία είναι μέρος του κεντρικού μενού του προγράμματος. Σε αυτήν την καρτέλα φαίνονται τα εργαλεία που έχει ο χρήστης στην διάθεση του. Στην μέση αριστερά φαίνονται τα επιμέρους εξαρτήματα της συναρμολόγησης ενώ από κάτω φαίνονται όλοι οι διαθέσιμοι τύποι συνδέσεων και επενεργητών που προσφέρει το λογισμικό.

Για να πραγματοποιηθεί η κινηματική ανάλυση θέσης, χρειάζεται να:

- έχει γίνει με κατάλληλο τρόπο η συναρμολόγηση όπως περιγράφεται στο **κεφάλαιο 5.8**
- οριστούν οι κατάλληλοι σερβοκινητήρες (**Servo Motors**) και τα κατάλληλα προφίλ κίνησης
- οριστεί μια καινούργια κινηματική ανάλυση θέσης

Για να είναι εφικτή η χρήση εικονικών σερβοκινητήρων για την κίνηση των αρθρώσεων, στην συναρμολόγηση πρέπει να υπάρχουν οι αντίστοιχοι άξονες. Έτσι, στο **Mechanism Tree** θα εμφανίζονται όλοι οι τύποι των συνδέσεων (**Connections**) όπου πάνω σε αυτούς μπορούν να οριστούν οι σερβοκινητήρες και στην συνέχεια να επιλεγεί ο τύπος της προσομοίωσης και να πραγματοποιηθεί η κινηματική ανάλυση.



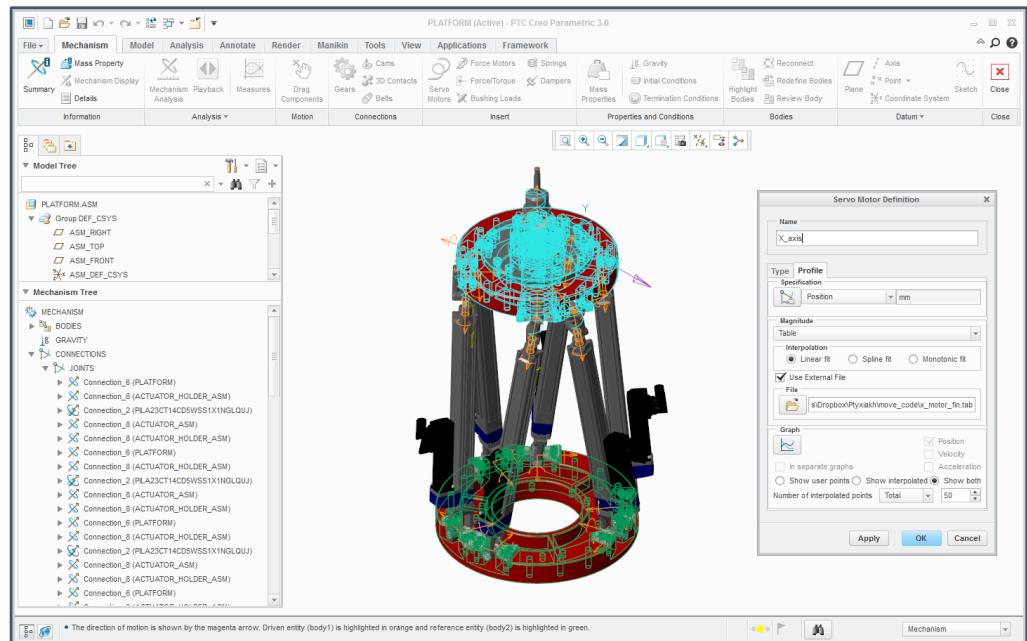
**Εικόνα 6.1:** Περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo 3.0 - Mechanism.

### 6.2 Προσθήκη σερβοκινητήρων στο κινηματικό μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για την υλοποίηση κίνησης και πραγματοποίηση της κινηματικής προσομοίωσης θέσης του μοντέλου, είναι απαραίτητη η εισαγωγή σερβοκινητήρων. Για την εισαγωγή των σερβοκινητήρων, στο μενού **Mechanism Tree** γίνεται ο εντοπισμός του υπό-μενού **Connections** κι έπειτα στην



κατηγορία **Joints** εμφανίζονται όλα τα σημεία συναρμολόγησης που έχουν γίνει, όπως φαίνεται στο κάτω αριστερό μέρος της παρακάτω εικόνας. Εκεί φαίνονται όλοι οι διαθέσιμοι άξονες στους οποίους μπορούν να εφαρμοστούν σερβοκινητήρες.

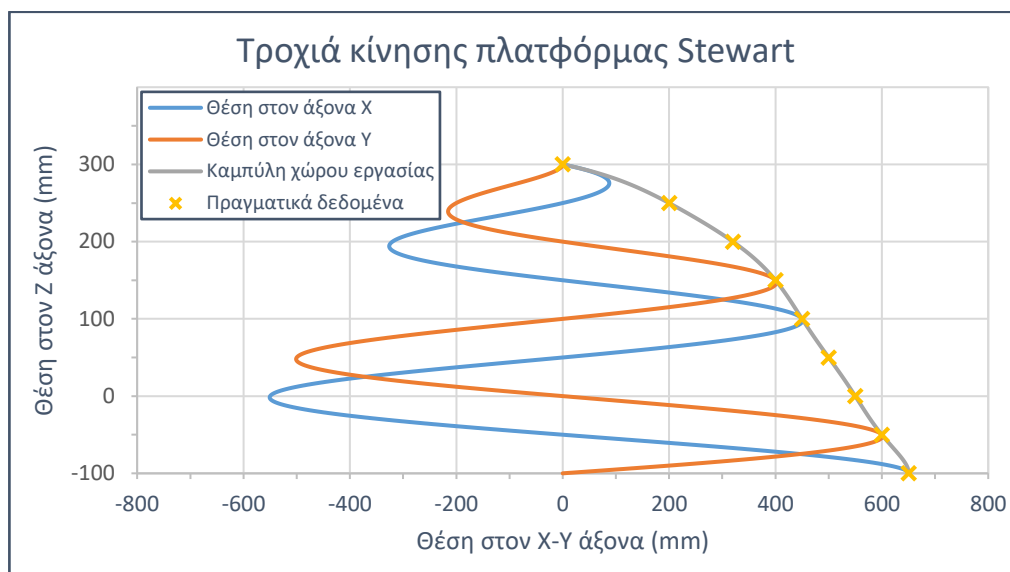


Εικόνα 6.2: Περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo 3.0 - Mechanism μαζί με την πλατφόρμα Stewart, αριστερά φαίνονται τα Joints ενώ δεξιά φαίνεται το παράθυρο επιλογής κινήσεων.

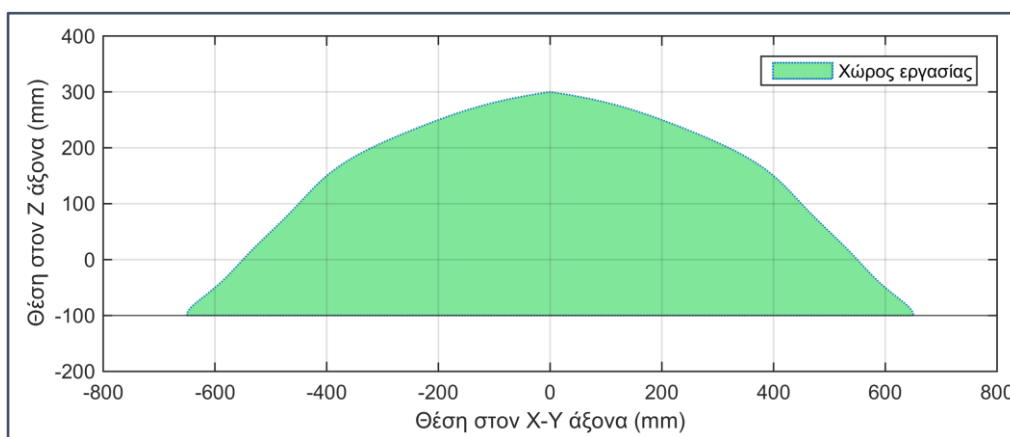
Για την τοποθέτηση ενός σερβοκινητήρα σε κάποιον άξονα, πρώτα επιλέγεται ο άξονας στον οποίο θα γίνει η προσαρμογή του σερβοκινητήρα από την καρτέλα **Joints** και στην συνέχεια επιλέγεται από την καρτέλα **Mechanism** το κουμπί “**Servo Motor**”. Πατώντας το κουμπί **Servo Motor** εμφανίζεται ένα παράθυρο το οποίο έχει δύο καρτέλες, την καρτέλα **Type** και **Profile**. Στο **Type** μπορεί να οριστεί ο τύπος της κίνησης, αν θα είναι πάνω σε κάποιον έτοιμο άξονα ή ανάμεσα σε κάποια εξαρτήματα καθώς επίσης και να αλλάξει η φορά κίνησης, ενώ στο **Profile** ορίζονται οι παράμετροι των κινήσεων, μπορεί να γίνει μηδενισμός του άξονα, να γίνει έλεγχος με βάση την θέση, την ταχύτητα ή την επιτάχυνση, μέσα από πληθώρα επιλογών. Σε αυτήν εδώ την μελέτη για την κίνηση της πλατφόρμας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν εξωτερικά αρχεία χρονοσειρών τύπου **.tab** τα οποία δημιουργήθηκαν με το λογισμικό **MATLAB**, για τον προσδιορισμό της τιμής των θέσεων που θα πάρει η πλατφόρμα σε κάθε χρονική στιγμή.

### 6.3 Υπολογισμός τροχιάς σερβοκινητήρων και δημιουργία αρχείων κίνησης πλατφόρμας Stewart

Για την κίνηση της πλατφόρμας Stewart χρειάζεται να εισαχθούν στο κινηματικό μοντέλο αρχεία που περιέχουν τις τροχιές που θα ακολουθήσει η πλατφόρμα. Για τον υπολογισμό των αρχείων κίνησης, αρχικά βρέθηκαν εννέα ακραία σημεία που βρίσκονται στο όριο του χώρου εργασίας της πλατφόρμας. Στην συνέχεια από αυτά τα σημεία κατασκευάστηκε μία καμπύλη n-1 βαθμού, όπου n το πλήθος των σημείων. Αυτή η καμπύλη υποδηλώνει τα όρια του χώρου όπου μπορεί να κινηθεί η πλατφόρμα, ενώ τέλος κατασκευάστηκαν οι τροχιές που θα ακολουθήσει το άκρο της πλατφόρμας στον άξονα **X**, **Y** και **Z** για να διαγράψει σπειροειδή κίνηση. Με τον τρόπο αυτό καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια του χώρου εργασίας. Τα σημεία που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της καμπύλης αλλά και η ίδια η καμπύλη, όπως και οι τροχιές με την θέση του άκρου στον **X** και **Y** άξονα, φαίνονται στην **Εικόνα 6.3** ενώ στην **Εικόνα 6.4** φαίνεται μια τομή του χώρου εργασίας της πλατφόρμας. Ο κώδικας που κατασκευάζει τα γραφήματα και τα αρχεία τύπου **.tab** παρουσιάζεται στο παράρτημα, στο τέλος της πτυχιακής.



Εικόνα 6.3: Τροχιά κίνησης πλατφόρμας Stewart στον μέγιστο δυνατό χώρο εργασίας.



Εικόνα 6.4: Γράφημα απεικόνισης χώρου εργασίας πλατφόρμας Stewart.

## 6.4 Δημιουργία και πραγματοποίηση ανάλυσης θέσης πλατφόρμας Stewart

Για την ανάλυση θέσης της πλατφόρμας Stewart, επιλέχθηκε από την καρτέλα **Mechanism** η επιλογή **Mechanism Analysis**. Στην συνέχεια στο **Type** επιλέχθηκε η ανάλυση θέσης (**Position**) όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.5**. Στην συνέχεια τροποποιήθηκαν οι εξής παράμετροι:

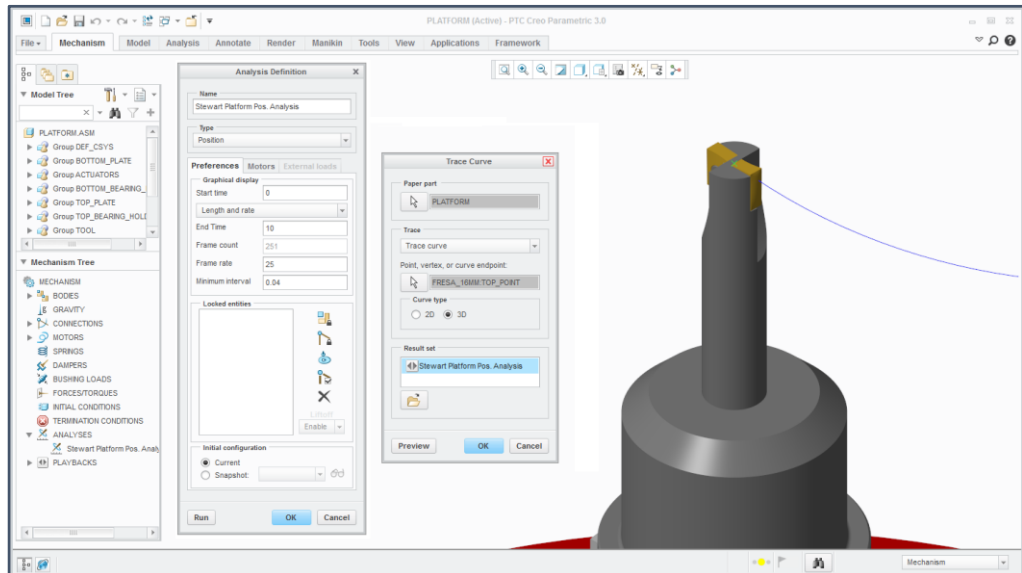
- Χρόνος εκκίνησης → 0 δευτερόλεπτα
- Χρόνος τέλους → 10 δευτερόλεπτα
- Ρυθμός καρτέ → 25 καρτέ ανά δευτερόλεπτο

Στην συνέχεια έγινε εκκίνηση της κινηματικής προσομοίωσης με χρήση του πλήκτρου **Run**, όπου η πλατφόρμα εκτέλεσε την προβλεπόμενη κίνηση που έχει υπολογιστεί μέσω του MATLAB. Μετά το πέρας της προσομοίωσης έγινε χρήση του εργαλείου **Trace Curve** όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.5** και εξήχθη η τροχιά που πραγματοποίησε η πλατφόρμα. Για την εξαγωγή της τροχιάς επιλέχθηκε σαν σημείο αναφοράς η μύτη του κοπτικού εργαλείου και τρισδιάστατος τύπος καμπύλης. Τέλος, από την καρτέλα **PLAYBACKS** έγινε εξαγωγή βίντεο σε ανάλυση Full HD 1080p στα 25 καρτέ το δευτερόλεπτο που περιλαμβάνει την κίνηση της πλατφόρμας.

Για την δημιουργία του χώρου εργασίας σε μορφή αντικειμένου, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που εξάγει ο κώδικας που γράφτηκε στο MATLAB. Αρχικά προστέθηκε ένα νέφος σημείων που περιγράφει τα όρια του χώρου

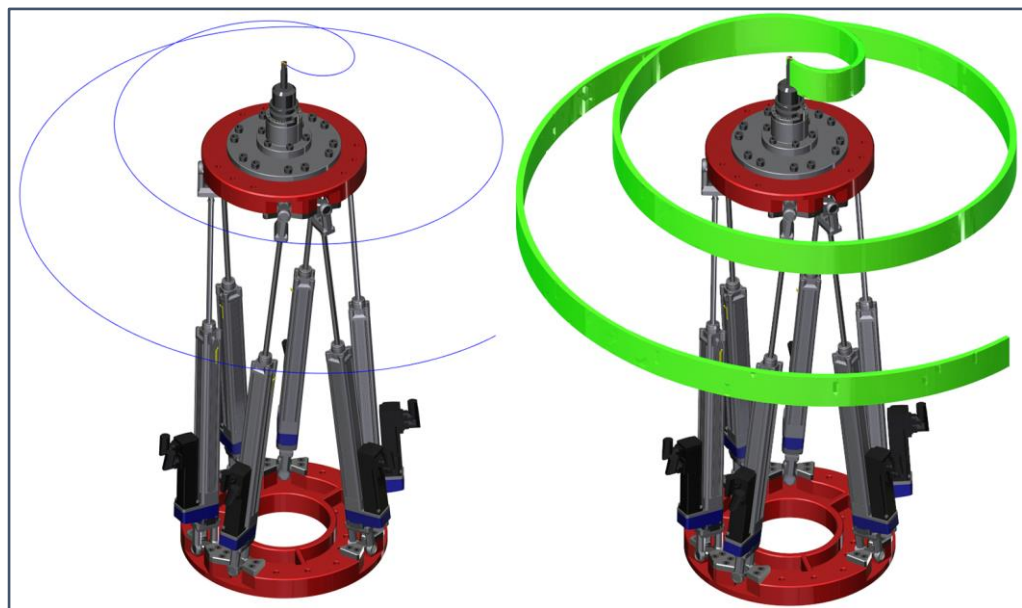


εργασίας της πλατφόρμας Stewart, στην συνέχεια δημιουργήθηκε μία ομαλή καμπύλη που περνάει από όλα αυτά τα σημεία και τέλος με χρήση της εντολής **Revolve** περιστράφηκε κατά 360 μοίρες αυτή η γραμμή και δημιουργήθηκε το αντικείμενο. Τέλος, του δόθηκε εμφάνιση γυαλιού για την καλύτερη δυνατή κατανόηση του χώρου εργασίας.



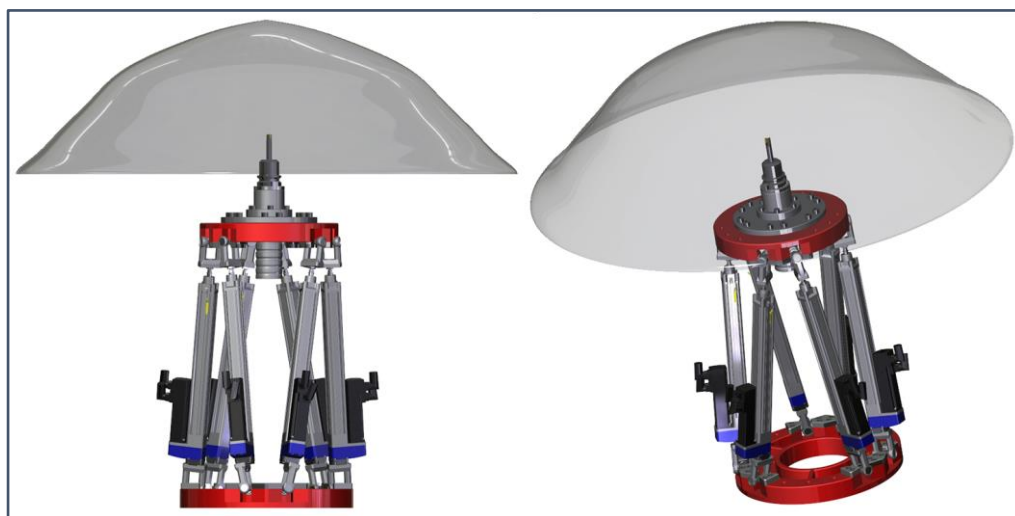
Εικόνα 6.5: Περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης λογισμικού PTC Creo Parametric 3.0 Mechanism, αριστερά φαίνεται το παράθυρο επιλογής τύπου ανάλυσης ενώ δεξιά οι επιλογές εξαγωγής της τροχιάς που πραγματοποίησε η πλατφόρμα.

Τέλος, με τη χρήση του εργαλείου **Measures** υπολογίστηκαν και εξήχθησαν τα μήκη των επενεργητών συναρτήσει του χρόνου. Στην συνέχεια έγινε επεξεργασία των δεδομένων αυτών κι έπειτα έγινε η γραφική απεικόνισή τους στο λογισμικό **MATLAB**.

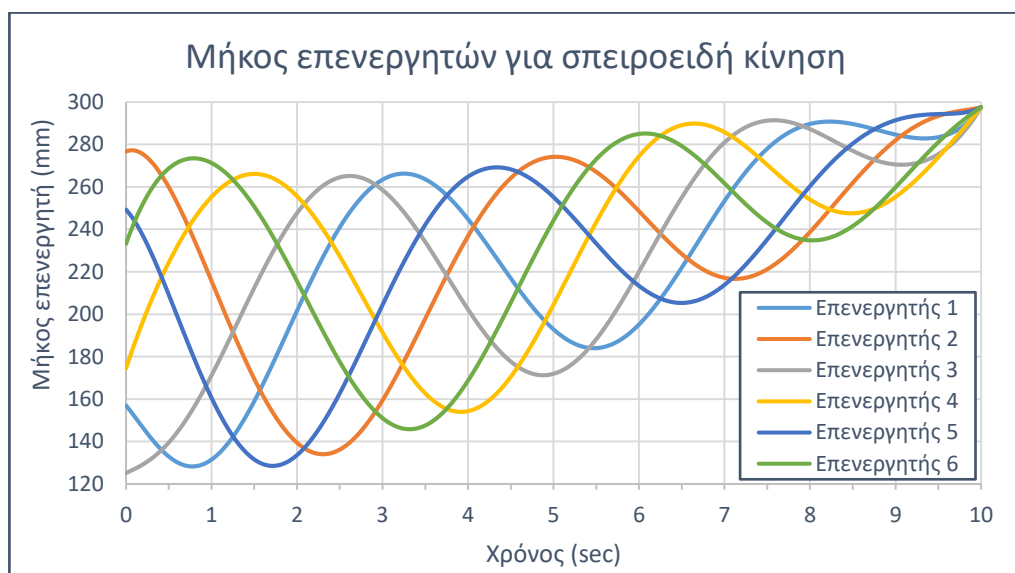


Εικόνα 6.6: Σπειροειδής τροχιά κίνησης που ακολουθήθηκε σε συνδυασμό με τον χώρο που κινήθηκε το κοπτικό εργαλείο.





Εικόνα 6.7: Χώρος εργασίας πλατφόρμας Stewart.



Εικόνα 6.8: Γράφημα απεικόνισης μήκους επενεργητών συναρτήσει του χρόνου, για τη σπειροειδή τροχιά κίνησης που ακολουθήθηκε.

Συνοψίζοντας, από την παραπάνω μελέτη αποδεικνύεται ότι με την προσομοίωση της πλατφόρμας Stewart μπορούν να εξαχθούν αρκετά χαρακτηριστικά όπως, ο χώρος εργασίας, η τροχιά που θα ακολουθήσει για να εκτελέσει την εκάστοτε κίνηση ή να υπολογισθεί ο χώρος που κινήθηκε κάποιο αντικείμενο. Η πλατφόρμα Stewart μπορεί να πραγματοποιήσει κινήσεις με την χρήση των ενσωματωμένων επιλογών που διαθέτει το περιβάλλον κινηματικής προσομοίωσης ή με την χρήση δεδομένων από το MATLAB. Οι κινήσεις αυτές μπορούν να είναι ως προς την πάνω βάση ή ως προς κάποιο άλλο σύστημα συντεταγμένων, ή δίνοντας κίνηση σε κάθε έναν επενεργητή ξεχωριστά.



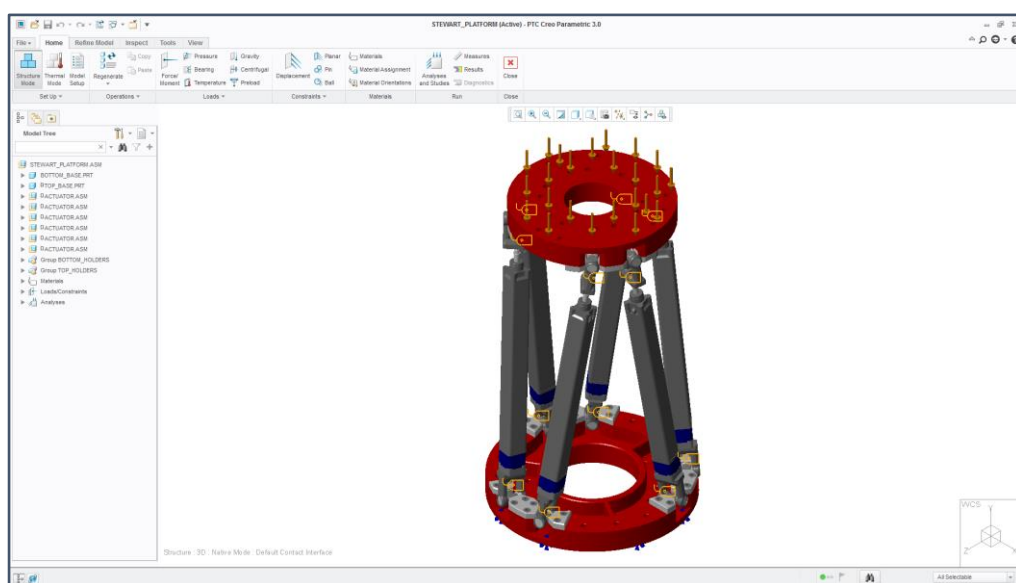
## 7 Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία μελέτης μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart με τη χρήση του λογισμικού PTC Creo Simulate 3.0.

### 7.1 Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό μελέτης μηχανικής συμπεριφοράς PTC Creo Simulate 3.0

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, πρέπει να οριστούν κάποιες παράμετροι που βρίσκονται στην καρτέλα **Home** όπου φαίνεται στην **Εικόνα 7.2**. Αρχικά ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάμεσα στην μελέτη μηχανικών αναλύσεων (**Structure Mode**) και στην μελέτη θερμικών αναλύσεων (**Thermal Mode**). Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η μελέτη μηχανικών αναλύσεων (**Structure Mode**).

Στην συνέχεια μέσω της καρτέλας **Model Setup** η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 7.2**, επιλέγονται οι παράμετροι του μοντέλου. Ανοίγοντας την καρτέλα Model Setup, εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε **Mode**, **Type** και **Default Interface**. Στο Mode υπάρχει η δυνατότητα **FEM Mode**, όπου ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα μαθηματικό μοντέλο του εξαρτήματος ή της συναρμολόγησης και να προχωρήσει μέχρι το στάδιο της δημιουργίας πλέγματος. Στην συνέχεια το μοντέλο αυτό πρέπει να αποθηκευτεί και να εισαχθεί σε ένα άλλο λογισμικό το οποίο μπορεί να κάνει ανάλυση της δομής ή της θερμικής ακεραιότητας του μοντέλου, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν οριστεί στο PTC Creo Simulate. Κάποια από τα λογισμικά που μπορούν να κάνουν την ανάλυση αυτή είναι τα ANSYS, COSMOS και NASTRAN.



**Εικόνα 7.1:** Περιβάλλον μηχανικής προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo 3.0 Simulate μαζί με την πλατφόρμα Stewart.

Στο **Type** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε 3D, 2D Plane Stress (Thin Plate), 2D Plane Strain (Infinitely Thick) και 2D Axisymmetric. Σε κάθε περίπτωση 2D Model Type ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ένα σύστημα συντεταγμένων και την αντίστοιχη γεωμετρία του μοντέλου.

- 3D, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση τρισδιάστατων μοντέλων
- 2D Plane Stress (Thin Plate), που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μιας λεπτής επίπεδης πλάκας δύο διαστάσεων
- 2D Plane Strain (Infinitely Thick), που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μοντέλων όπου η παραμόρφωση ως προς την μία κατεύθυνση είναι αμελητέα.
- 2D Axisymmetric, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μοντέλων όπου η γεωμετρία τους, τα φορτία και οι περιορισμοί είναι συμμετρικά ως προς έναν άξονα

Στο **Default Interface** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε **Bonded**, **Free** ή **Contact**.



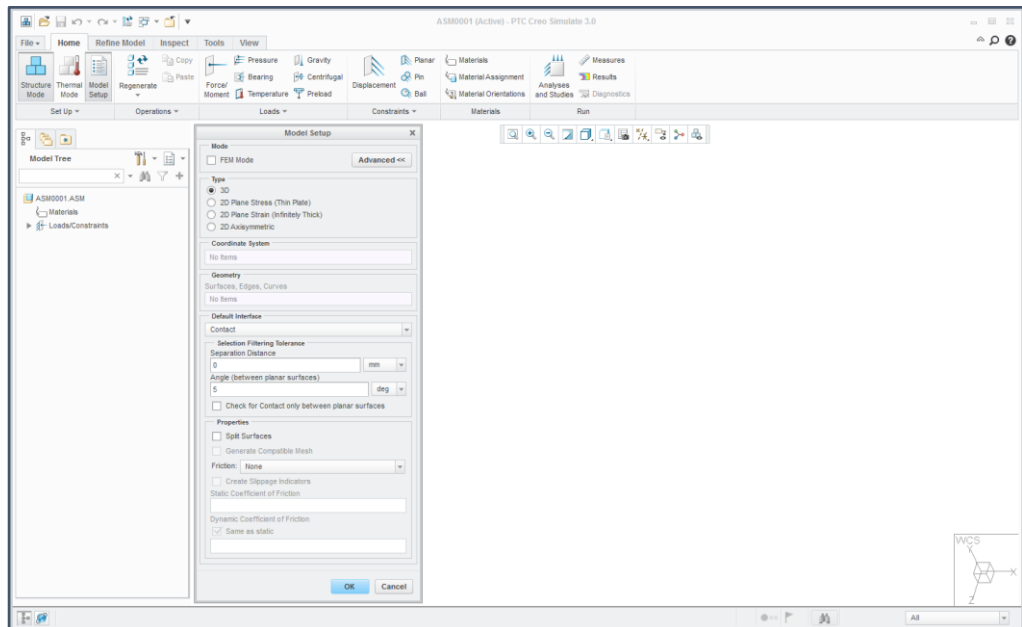
- **Bonded**, όπου το μοντέλο κατά την δημιουργία του πλέγματος, μεταξύ των κόμβων δημιουργεί άκαμπτους συνδέσμους ανάμεσα σε συνεργαζόμενες επιφάνειες
- **Free**, όπου το μοντέλο δεν δημιουργεί καθόλου συνδέσμους ανάμεσα σε συνεργαζόμενες επιφάνειες
- **Contact**, όπου το μοντέλο έχει την δυνατότητα μεταφέρει δυνάμεις από την μία επιφάνεια στην άλλη, αλλά μόνο όταν αυτές δημιουργούνται από άπωση

Στην περίπτωση που επιλεγεί **Contact Interface**, δίνονται οι επιλογές **Selection Filtering Tolerance** και **Properties** όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την απόσταση και την γωνία που των επιφανειών που εφαρμόζεται το Contact Interface όπως επίσης και να οριστεί ο συντελεστής τριβής των επιφανειών αυτών.

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ο **3D** τύπος ανάλυσης και Contact Interface.

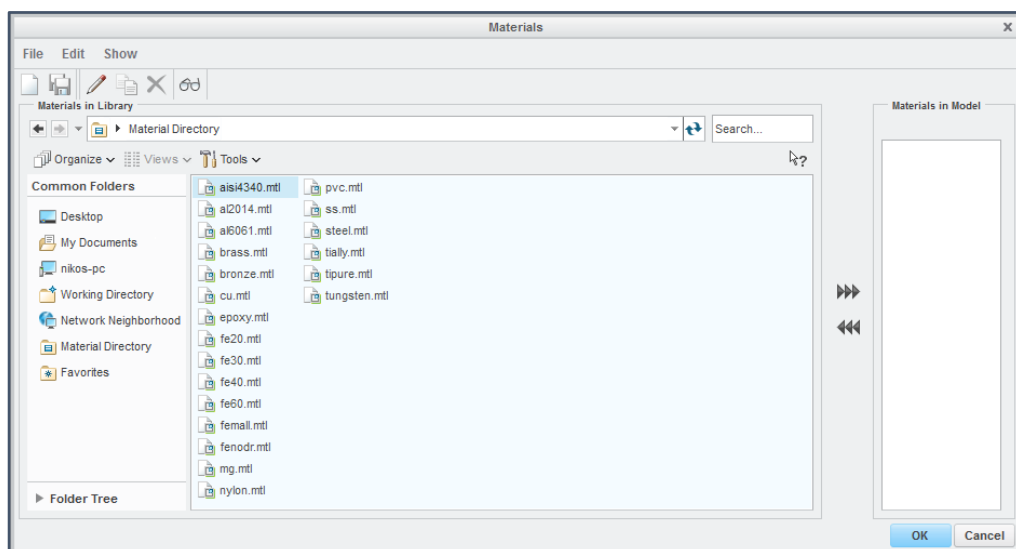
## 7.2 Προσδιορισμός υλικών (Materials)

Ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών των εξαρτημάτων γίνεται από την καρτέλα **Home**, στην επιλογή **Materials**. Για τον ορισμό των υλικών, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε ένα πλήθος υλικών από την βιβλιοθήκη που υπάρχει στο πρόγραμμα ή να δημιουργήσει ένα νέο υλικό. Στην παρούσα μελέτη δημιουργήθηκε καινούργια καταχώρηση για τον κραματούχο χάλυβα **AISI 4340** όπου και χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του μοντέλου.



Εικόνα 7.2:

Η καρτέλα Model Setup στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate



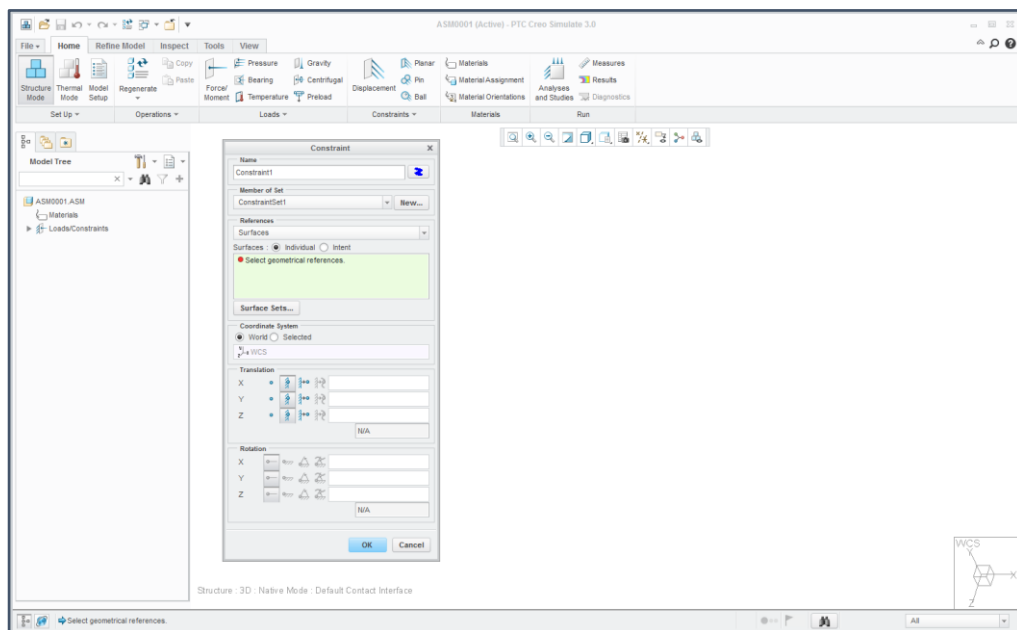
Εικόνα 7.3: Περιβάλλον καταχώρησης υλικών στο PTC Creo Simulate

### 7.3 Δήλωση στηρίξεων (Constraints)

Στο περιβάλλον του Creo Simulate όπως και στην πραγματικότητα, οποιοδήποτε αντικείμενο στο χώρο έχει έξι βαθμούς ελευθερίας. Οι πρώτοι τρεις αφορούν στη μετατόπιση του αντικειμένου κατά μήκος των κύριων αξόνων XYZ του αναφερόμενου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Οι υπόλοιποι τρεις αφορούν στην περιστροφή του αντικειμένου γύρω από αυτούς τους άξονες.

Με τον περιορισμό μερικών εκ των βαθμών ελευθερίας του αντικειμένου, αλλάζουν και οι αντιδράσεις λόγω των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν σε αυτό. Πηγαίνοντας στην καρτέλα **Home** στον τομέα **Constraints** υπάρχουν οι επιλογές **Displacement**, **Planar**, **Pin**, **Ball**, **Symmetry** και **Constraint Sets**.

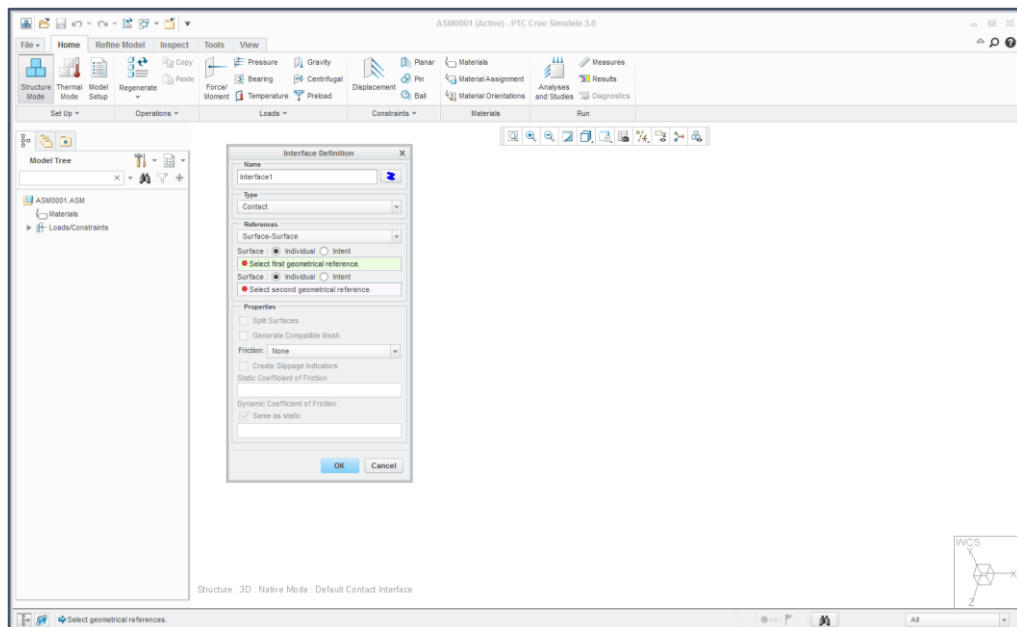
- Η πρώτη επιλογή **Displacement** μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδους μορφή επιφάνειας, ακμής ή σημείου στο χώρο και έχει την δυνατότητα περιορισμού των μετατοπίσεων και περιστροφών του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ μέσω τριών θέσεων: **Free**, όπου δεν υπάρχει κανένας περιορισμός κίνησης, **Fixed** όπου δεν υπάρχει δυνατότητα κίνησης στον εκάστοτε άξονα και **Prescribed** όπου υπάρχει δυνατότητα καθορισμού του εύρους κινήσεων.
- Η δεύτερη επιλογή **Planar** μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επίπεδες επιφάνειες και έχει προεπιλεγμένη την θέση **Fixed** όπου θέτει υπό περιορισμό τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ.
- Η τρίτη επιλογή **Pin** μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κυλινδρικές επιφάνειες και έχει προεπιλεγμένη την θέση **Fixed** όπου θέτει υπό περιορισμό τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ.
- Η τέταρτη επιλογή **Ball** μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σφαιρικές επιφάνειες και έχει προεπιλεγμένη την θέση **Fixed** όπου θέτει υπό περιορισμό τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ.
- Η πέμπτη επιλογή **Symmetry** διαθέτει δύο τύπους περιορισμών, **Cyclic** και **Mirror**. Ο πρώτος περιορισμός επιτρέπει την ανάλυση μίας τομής ενός κυκλικού συμμετρικού μοντέλου που προσομοιώνει την συμπεριφορά του συνολικού μοντέλου ή μίας συναρμολόγησης. Αυτός ο σχεσιακός περιορισμός μειώνει τον χρόνο της διακριτοποίησης αλλά και της ανάλυσης. Ο δεύτερος περιορισμός επιδιορθώνει τους βαθμούς ελευθερίας της μετατόπισης, κάθετα στο επίπεδο συμμετρίας και αποδεσμεύει τους βαθμούς ελευθερίας της περιστροφής γύρω από τον άξονα, κάθετα στο επίπεδο συμμετρίας.
- Η έκτη και τελευταία επιλογή **Constraint Sets** ομαδοποιεί τα παραπάνω Constraints σε ομάδες και με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η ανάλυση περίπλοκων μοντέλων.



Εικόνα 7.4: Η καρτέλα Constraints (Displacement) στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate

## 7.4 Ορισμός συνδέσεων (Connections)

Ο ορισμός των συνδέσεων - συσχετισμών μεταξύ των κομματιών που έρχονται σε επαφή γίνεται μέσω της δεύτερης καρτέλας επιλογών **Refine Model**, στον τρίτο τομέα Connections → Interfaces τα οποία περιέχουν τρεις τύπους συνδέσεων **Bonded**, **Free**, **Contact**, που έχουν προαναφερθεί παραπάνω.



Εικόνα 7.5: Η καρτέλα Interface στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.

## 7.5 Εισαγωγή μετρητικών οργάνων (Measures)

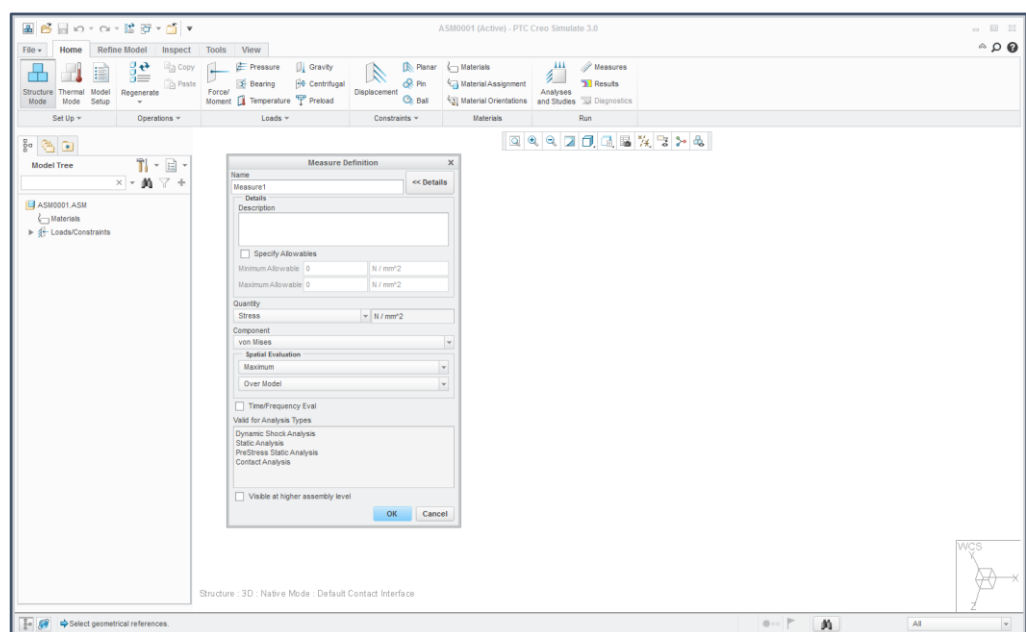
Η εισαγωγή των μετρητικών οργάνων γίνεται μέσω της πρώτης καρτέλας επιλογών Home, στον έκτο τομέα **Run** → **Measures** → **New**. Στην επιλογή Quantity υπάρχει μια λίστα στην οποία βρίσκονται όλα τα φυσικά μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν κατά την εκτέλεση μιας ανάλυσης. Αυτά τα μεγέθη είναι: Τάση, παραμόρφωση, μετατόπιση, περιστροφή γύρω από κάποιον άξονα, ταχύτητα, επιτάχυνση, περιστροφική ταχύτητα, περιστροφική



επιτάχυνση, φάση, δείκτης αποτυχίας, κόπωση, δυνάμεις, ροπές, ροπή αδράνειας, συντεταγμένες κέντρου μάζας, χρόνος.

Στην επιλογή Component υπάρχει η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένης διεύθυνσης ως προς τους άξονες XYZ εξαγωγής των αποτελεσμάτων της οποιοσδήποτε μέτρησης, σύμφωνα με το προκαθορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Στην επιλογή Spatial Evaluation είναι δυνατόν να μετρηθούν τα μεγέθη αυτά κατά τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους, ακόμα και επάνω σε σημεία. Επίσης μπορεί να επιλεγεί η περιοχή στην οποία θα εφαρμοστούν οι μετρήσεις. Π.χ. κοντά σε σημείο, σε ολόκληρο το μοντέλο, σε επιλεγμένες επιφάνειες, σε επιλεγμένα εξαρτήματα, σε επιλεγμένα στρώματα και σε επιλεγμένες γεωμετρίες. Χρησιμοποιώντας την επιλογή Time/Frequency Eval το είδος της μέτρησης που έχει επιλεγεί από τον χρήστη μπορεί να εξαχθεί για χρονική ανάλυση και ανάλυση συχνοτήτων.

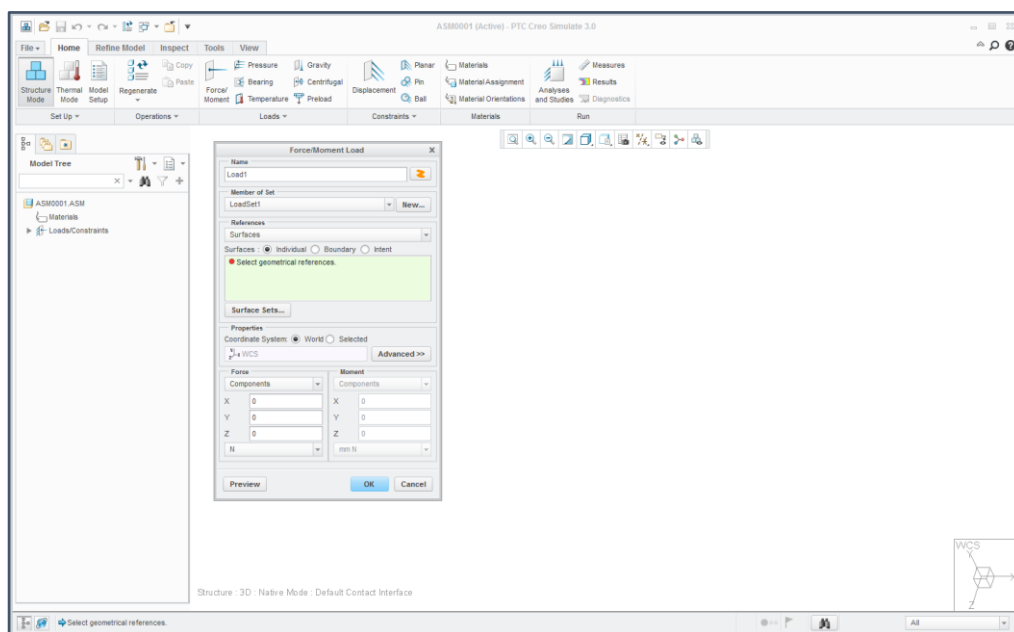
Ένα σημαντικό εργαλείο που παρέχεται είναι ο πίνακας Valid for Analysis Types, όπου όταν ο χρήστης επιλέξει να πάρει μία μέτρηση εμφανίζονται στον πίνακα όλες εκείνες οι αναλύσεις στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέτρηση. Ακόμα μέσω του Details → Specify Allowables μπορεί ο χρήστης να ορίσει ένα εύρος τιμών στο οποίο θα περιορίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που θα επιλέξει ο ίδιος.



Εικόνα 7.6: Η καρτέλα Measure Definition στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.

## 7.6 Εισαγωγή φορτίσεων (Loads)

Ο ορισμός των φορτίσεων στο γεωμετρικό μοντέλο γίνεται μέσω της πρώτης καρτέλας επιλογών **Home**, στον τρίτο τομέα **Loads** όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7.7**. Ο τομέας αυτός συμπεριλαμβάνει επτά είδη φορτίσεων: **Force / Moment, Pressure, Bearing, Temperature, Gravity, Centrifugal, Preload**.



Εικόνα 7.7: Η καρτέλα Force/Moment Load στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.

- Στο πρώτο είδος φόρτισης **Force / Moment** ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εισαγωγής δύναμης ή ροπής. Για να εφαρμοστεί η δύναμη απαιτείται να επιλεγεί μέσω του References επιφάνεια, ακμή ή σημείο καθώς και μέσω του Force άξονες στους οποίους θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις, σύμφωνα με το προκαθορισμένο από τον χρήστη σύστημα συντεταγμένων. Επίσης μέσω του Force μπορεί να ορισθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί μια δύναμη.
- Στο δεύτερο είδος φόρτισης **Pressure** ο χρήστης έχει τη δυνατότητα άσκησης πίεσης επάνω σε μία επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται δηλώνοντας στα References την επιφάνεια στην οποία θα ασκηθεί η πίεση, στην επιλογή Pressure → Value το μέτρο και προαιρετικά στο Advanced → Spatial Variation το είδος της κατανομής του φορτίου.
- Στο τρίτο είδος φόρτισης **Bearing** ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μεταφερόμενα διανεμημένα φορτία μέσα από σύνδεση με έδρανα κύλισης, προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το είδος των φορτίων αυτών προσεγγίζει την πίεση που εφαρμόζεται σε μία τρισδιάστατη επιφάνεια (οπή) ή ένα δισδιάστατο κυκλικό τομέα (δακτύλιος), από ένα άκαμπτο πείρο ή άξονα που διέρχεται από το κέντρο μιας οπής ή δακτυλίου. Αυτό επιτυγχάνεται δηλώνοντας στα References την επιφάνεια ή την ακμή στην οποία θα ασκηθεί το φορτίο. Επίσης, μέσω του Force μπορεί να ορισθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί μια δύναμη.
- Στο τέταρτο είδος φόρτισης **Temperature** δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει μια κατάσταση αλλαγής της θερμοκρασίας σε ένα μοντέλο. Μέσω αυτού του είδους φόρτισης ο χρήστης μπορεί να αντλήσει πολύτιμες πληροφορίες για το πώς η δομή του εξεταζόμενου μοντέλου παραμορφώνεται λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας. Αρχικά, πρέπει να επιλεγεί στα References το εξάρτημα, η επιφάνεια η ακμή/καμπύλη ή ο όγκος στα οποία θα έχει επίδραση η μεταβολή της θερμοκρασίας και αργότερα μέσω του Reference Temperature (αρχική θερμοκρασιακή κατάσταση) και του Entity Temperature (Τελική θερμοκρασιακή κατάσταση) να δηλωθούν οι τιμές των θερμοκρασιών. Επίσης στο Entity Temperature μπορεί να δηλωθεί το είδος της θερμοκρασιακής μεταβολής.
- Το πέμπτο είδος φόρτισης **Gravity** χρησιμοποιείται για να προσομοιωθούν σε μία κατασκευή οι βαρυτικές συνθήκες, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη σε μία ανάλυση το ίδιο βάρος της κατασκευής. Μέσω του Acceleration μπορεί να ορισθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί η επιτάχυνση της βαρύτητας.
- Στο έκτο είδος φόρτισης **Centrifugal** υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν φυγοκεντρικά φορτία δυνάμεων. Αυτό μπορεί να γίνει είτε στο Angular Velocity ορίζοντας γωνιακή ταχύτητα, είτε στο Angular Acceleration ορίζοντας την γωνιακή επιτάχυνση.
- Στο έβδομο και τελευταίο είδος φόρτισης **Preload** υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής προφόρτισης, η οποία περιγράφει το φορτίο που εφαρμόζεται σε ένα προσδετήρα απλώς ως ένα αποτέλεσμα του να προσδεθεί (πριν από την εφαρμογή κάθε εξωτερικού φορτίου). Αυτό επιτυγχάνεται δηλώνοντας στα References το εξάρτημα ή τον όγκο στα οποία θα εφαρμοστεί η προφόρτιση και στο Preload το μέτρο της προφόρτισης.



## 7.7 Διαδικασία για την διεξαγωγή στατικής ανάλυσης (Static Analysis)

Η διαδικασία διεξαγωγής της στατικής ανάλυσης γίνεται χρησιμοποιώντας την πρώτη καρτέλα επιλογών **Home**, στον έκτο τομέα **Run**. Μέσω του **Home** → **Run** → **Analyses and Studies** → **New Static**. Αυτή η ανάλυση αφορά την ανάλυση μοντέλων υπό στατικά φορτία. Η επιλογή αυτή υποστηρίζει τον υπολογισμό μοντέλων όταν υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις, τον υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσεις έχουν οριστεί ως Contact, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και τη μη γραμμικότητα των μοντέλων.

Τα τρία βασικά βήματα που απαιτούνται για την διεξαγωγή μιας στατικής ανάλυσης είναι:

- Επιλογή Constraints
- Επιλογή Loads
- Επιλογή μεθόδου προσαρμοστικότητας αποτελεσμάτων

Στην πρώτη επιλογή **Constraints** → **Constraint Set / Component** επιλέγεται ο/οι περιορισμός/οί που ο χρήστης έχει εφαρμόσει στο μοντέλο, ενώ υπάρχει μια πρόσθετη επιλογή Time Dependence όπου επιτρέπει στον/στους περιορισμούς να εφαρμοστεί στο μοντέλο συναρτήσει του συντελεστή περιορισμού.

Στην δεύτερη επιλογή **Loads** → **Load Set/Component** επιλέγεται το/τα φορτίο-α που ο χρήστης έχει εφαρμόσει στο μοντέλο. Επίσης, υπάρχει μια πρόσθετη επιλογή Time Dependence όπου επιτρέπει στο/στα φορτίο-α να εφαρμοστεί στο μοντέλο συναρτήσει του συντελεστή φόρτισης.

Η Τρίτη επιλογή **Convergence** → **Method**, αποτελείται από τρεις μεθόδους προσαρμοστικότητας:

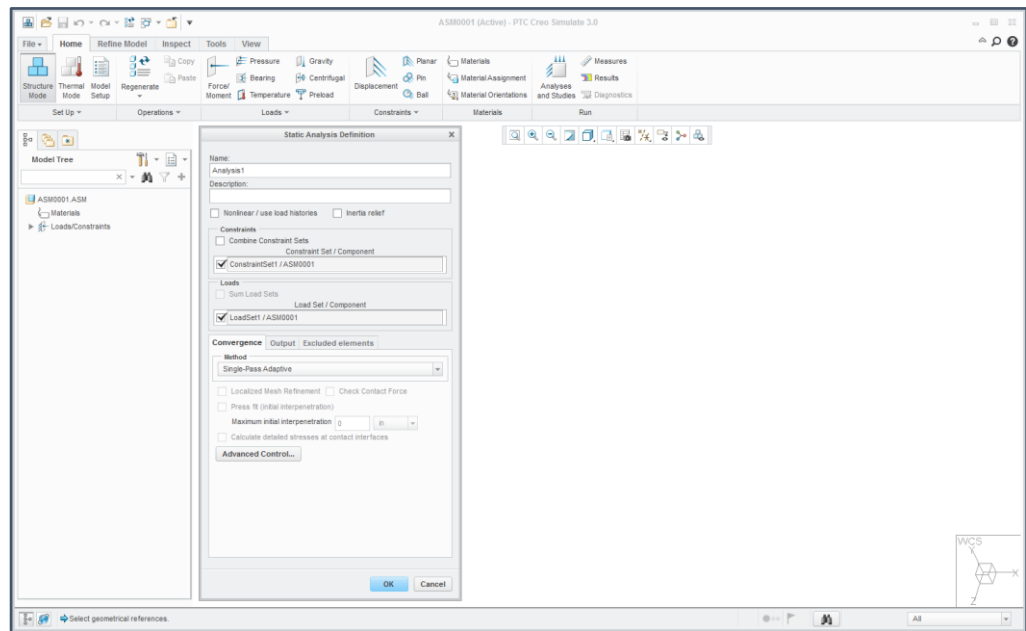
- Quick Check
- Single-Pass Adaptive (SPA)
- Multi-Pass Adaptive (MPA)

Κατά την εκτέλεση μίας ανάλυσης, τα αποτελέσματα που θα παραχθούν δεν είναι γνωστό αν είναι σωστά. Η λέξη σύγκλιση χρησιμοποιείται επειδή τα αποτελέσματα που βγάζει το Creo Simulate συγκλίνουν σε ένα ενιαίο αποτέλεσμα. Προκειμένου να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων, απαιτούνται τουλάχιστον δύο λύσεις στο ίδιο πρόβλημα. Τα αποτελέσματα ελέγχονται με υψηλή ακρίβεια κι αν το αποτέλεσμα με την υψηλότερη ακρίβεια έχει μεγάλη διαφορά από το πραγματικό που αναμενόταν, τότε το αποτέλεσμα δεν συγκλίνει. Ωστόσο αν το ποσοστό μη σύγκλισης του αποτελέσματος είναι μικρότερο του 15%, τότε θεωρείται πως το αποτέλεσμα συγκλίνει.

Το Creo Simulate χρησιμοποιεί την μέθοδο P-Element Method για την σύγκλιση, η οποία προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυξάνει την τάξη του πολυωνύμου κι έτσι το δίκτυο δεν χρειάζεται να αλλάξει στα κρίσιμα σημεία του μοντέλου. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στο πρόγραμμα να παρακολουθεί την λύση του αποτελέσματος ανά πέρασμα και να τροποποιεί αντίστοιχα την προσεγγιστική πολυωνυμική τάξη, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να εκφραστεί με μεγάλη ακρίβεια. Η διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται, κάθε φορά που το πρόγραμμα δίνει κάποιο σύνολο αποτελεσμάτων και αυτό συγκρίνεται με ένα προηγούμενο (έτσι ώστε να εντοπιστεί το ποσοστό σύγκλισης) ονομάζεται P-Loop Pass Convergence.

- Η απλούστερη μέθοδος **Quick Check** εκτελεί μόνο ένα πέρασμα σε όλα τα στοιχεία με πολυώνυμο παρεμβολής τρίτης τάξης. Η επιλογή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έναν αρκετά γρήγορο έλεγχο ενός μοντέλου, προτού ο χρήστης εκτελέσει μία από τις παρακάτω δύο μεθόδους.
- Η μέθοδος **SPA** εκτελεί δύο περάσματα σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος του μοντέλου, με πολυώνυμο παρεμβολής έως έκτης τάξης. Η επίλυση του προβλήματος ξεκινάει με το πρώτο πέρασμα και τη χρήση χαμηλής πολυωνυμικής τάξης (πολυώνυμο 3ης τάξης). Σύμφωνα με το πρώτο πέρασμα γίνεται εκτίμηση του σφάλματος σε όλο το μοντέλο και στην συνέχεια στο δεύτερο πέρασμα επανάληψης της λειτουργίας αυτής αυξάνεται το πολυώνυμο.
- Η μέθοδος **MPA** αποτελείται από μία ομοιόμορφη πολυωνυμική κλιμάκωση. Η επίλυση του προβλήματος ξεκινάει με τη χρήση χαμηλής πολυωνυμικής τάξης (πολυώνυμο 1ης τάξης) και στην συνέχεια επανάληψης της λειτουργίας αυτής αυξάνεται το πολυώνυμο ανά πέρασμα επίλυσης σε όλα τα στοιχεία του δικτύου μέσα σε ένα προκαθορισμένο από το χρήστη εύρος πολυωνυμικής τάξης ( $1 \leq$  τάξη πολυωνύμου  $\leq 9$ ). Η μέθοδος αυτή διακόπτεται όταν επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.





Εικόνα 7.8: Η καρτέλα Analysis Definition Load στο περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού PTC Creo Simulate.

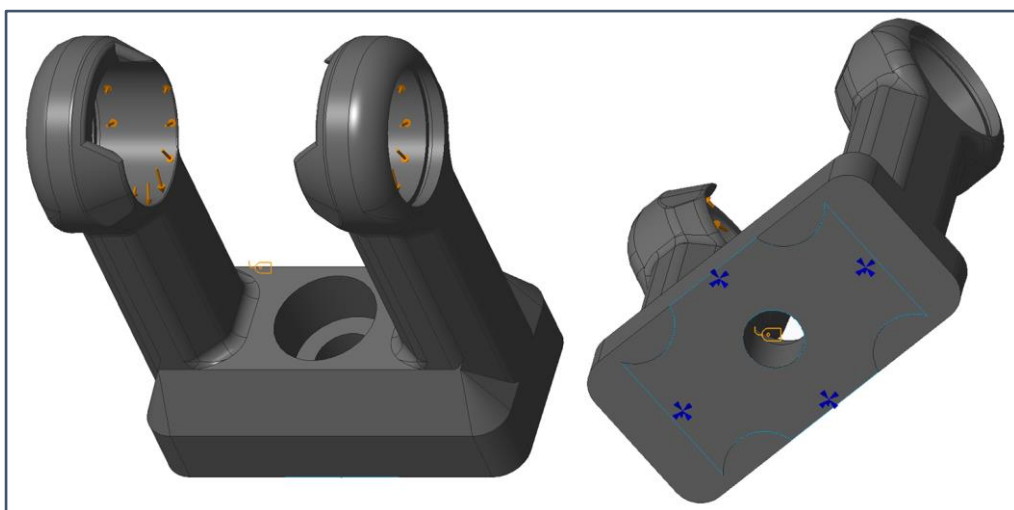


## 8 Αποτελέσματα προσομοίωσης μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας Stewart

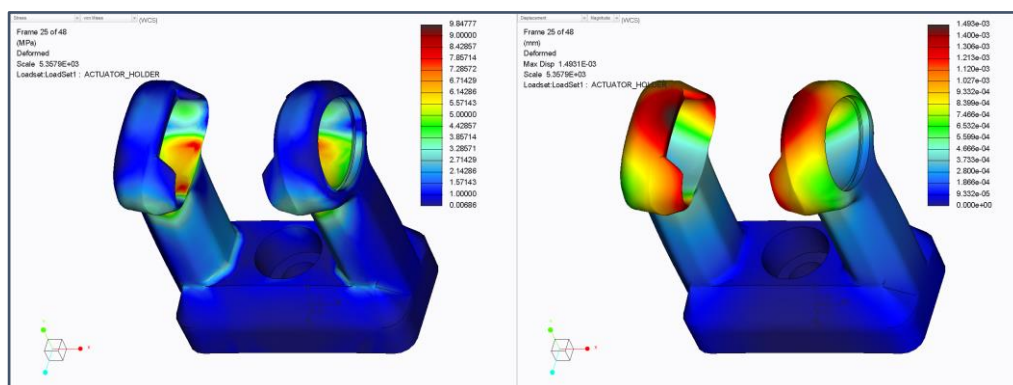
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart. Η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς αρχικά έγινε στα επιμέρους εξαρτήματα για την απλούστερη και καλύτερη δυνατή ανάλυση τους, ενώ στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτενέστερη ανάλυση στο απλοποιημένο μοντέλο ολόκληρης την πλατφόρμας. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε για να εξεταστεί η συμπεριφορά των εξαρτημάτων και της πλατφόρμας σε εφαρμογές φορτίων. Τα υλικά που επιλέχθηκαν εμπεριέχονται στην βιβλιοθήκη του λογισμικού ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς. Η ονομασία του υλικού που επιλέχθηκε για την πάνω και κάτω βάση της πλατφόρμας είναι το **AL6061** και είναι αλουμίνιο με λόγο **Poisson 0.3** και έχει μέτρο ελαστικότητας **68948 MPa**, ενώ για όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα το υλικό ορίστηκε ως **AISI 4330** και είναι κραματούχος χάλυβας με λόγο **Poisson 0.29** και έχει μέτρο ελαστικότητας **200000 MPa**. Αρχικά οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με αυτά τα δύο υλικά και στην συνέχεια μετά την ολοκλήρωσή τους γίνεται εξέταση των αποτελεσμάτων για τον ακριβή προσδιορισμό του κατάλληλου τύπου των υλικών που μπορούν να αντέξουν τις τάσεις που προκύπτουν.

### 8.1 Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της βάσης του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μηχανικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart σε εφελκυστικό κυλινδρικό φορτίο 700 N, που είναι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκήσει ο γραμμικός επενεργητής. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς της βάσης του γραμμικού επενεργητή εφαρμόστηκε κυλινδρικό φορτίο 350 N που είναι το μισό του συνολικού φορτίου των 700 N. Το φορτίο ασκήθηκε στην κάθε πλευρά της βάσης ενώ η πάκτωση έγινε στην επίπεδη της επιφάνεια. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι κραματούχος χάλυβας AISI 4340. Στην **Εικόνα 8.1** αριστερά φαίνονται τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων ενώ δεξιά εμφανίζεται η περιοχή που έγινε η πάκτωση. Στην **Εικόνα 8.2** στην αριστερή μεριά φαίνονται τα αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται πάνω στην βάση. Με σκούρο κόκκινο χρώμα εμφανίζονται τα σημεία που το εξάρτημα παρουσιάζει την μέγιστη τάση ενώ με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι περιοχές που παρουσιάζουν μικρές τιμές μηχανικής τάσης. Στην δεξιά μεριά της εικόνας φαίνονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων που εμφανίζονται πάνω στην βάση. Με σκούρο κόκκινο χρώμα εμφανίζονται τα σημεία που το εξάρτημα παρουσιάζει την μέγιστη παραμόρφωση ενώ με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι περιοχές που παρουσιάζουν μικρές τιμές παραμόρφωσης.



**Εικόνα 8.1:** Σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N στην κάθε πλευρά του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart και επιφάνεια πάκτωσης της βάσης συγκράτησης.



Εικόνα 8.2: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart σε κυλινδρικό φορτίο 350 N στην κάθε πλευρά.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η βάση του γραμμικού επενεργητή σε εφελκυστικό κυλινδρικό φορτίο 350 N στην κάθε πλευρά, παρουσιάζει μέγιστη τάση **9.85 MPa** ενώ η μέγιστη παραμόρφωση είναι **1.49  $\mu\text{m}$** . Η μέγιστη τάση αναπτύσσεται στο σημείο που εδράζεται η σφαιρική άρθρωση και επισημαίνεται με σκούρο κόκκινο χρώμα στο αριστερό σχήμα της παραπάνω εικόνας, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται στην επάνω πλευρά της βάσης του γραμμικού επενεργητή και επισημαίνεται με σκούρο κόκκινο χρώμα στο δεξί σχήμα της παραπάνω εικόνας.

Εξάρτημα	Ονομασία υλικού	Όριο διαρροής υλικού [MPa]	Λόγος Poisson [ ]
Βάση γραμμικού επενεργητή	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29

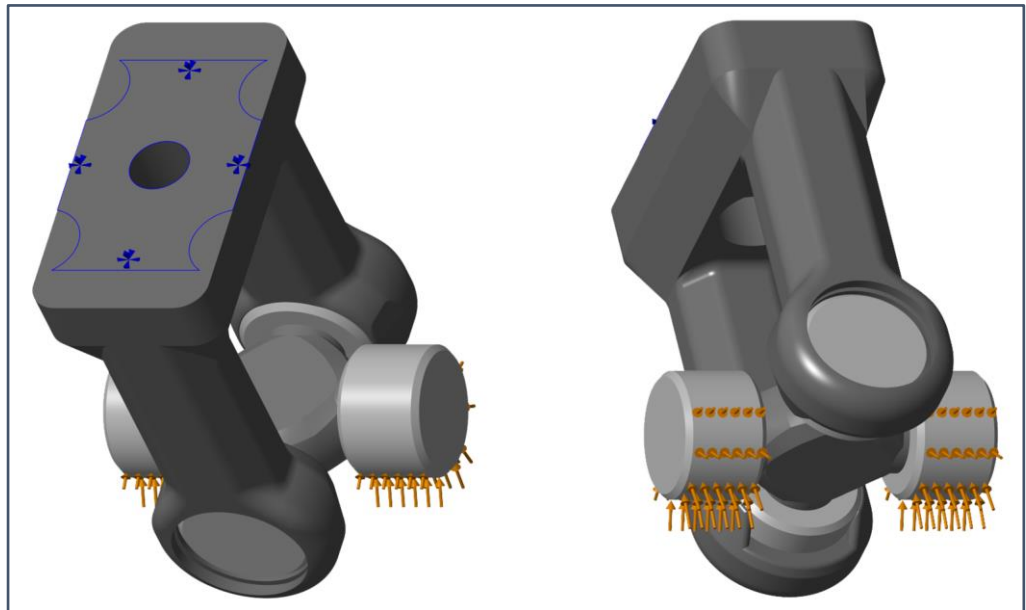
Πίνακας 1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή.

Είδος στήριξης	Φορτίο [N]	Τάση [MPa]	Παραμόρφωση [ $\mu\text{m}$ ]
Πάκτωση	Κυλινδρικό 350 + 350	9,84777	1,4931

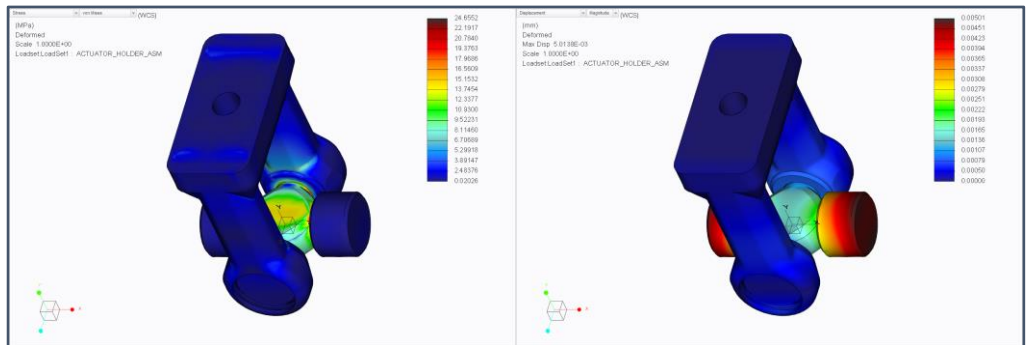
Πίνακας 2: Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή, καθώς επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

## 8.2 Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της βάσης του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε φορτία υπό κλίση

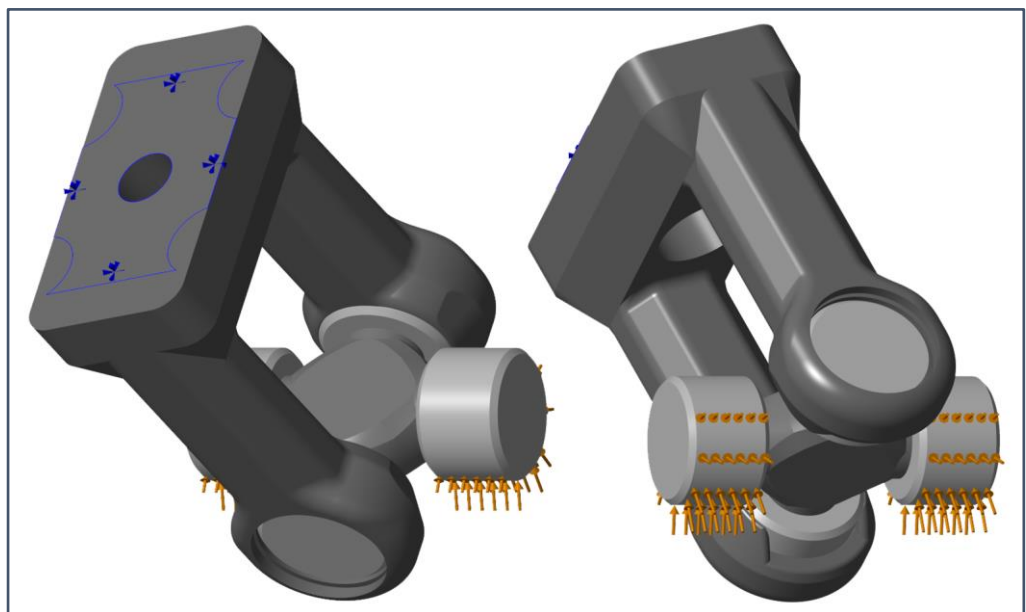
Αντίστοιχα όπως και στο **κεφάλαιο 8.1** πραγματοποιήθηκε ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της βάσης του γραμμικού επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση, σε εφελκυστικό κυλινδρικό φορτίο 350 N στην κάθε πλευρά της, το οποίο επισημαίνεται με τα πορτοκαλί βέλη. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για κλίση 0, 15, 30 και 45 μοιρών του κυλινδρικού φορτίου.



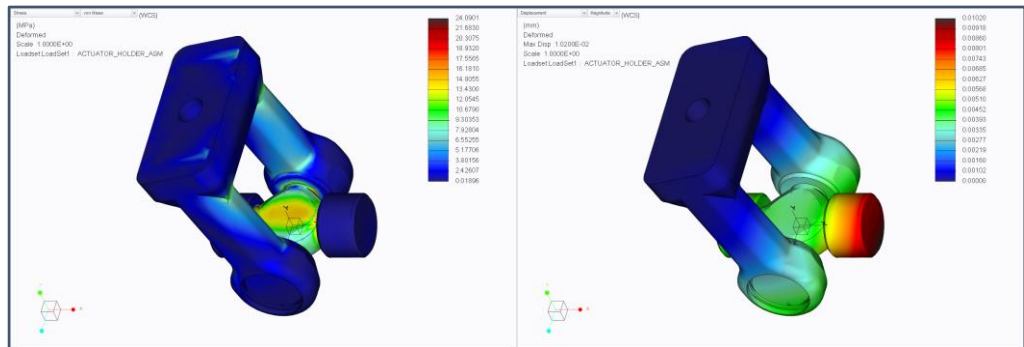
Εικόνα 8.3: Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή.



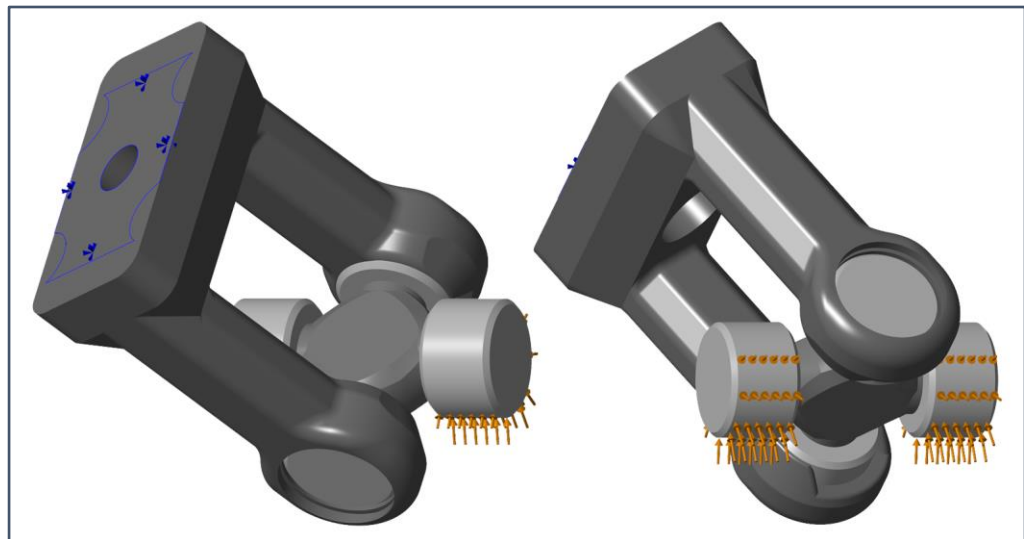
Εικόνα 8.4: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N.



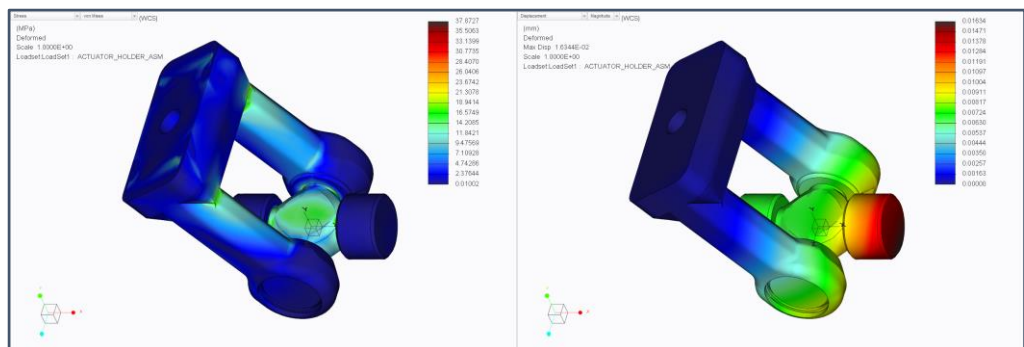
Εικόνα 8.5: Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N υπό κλίση 15 μοιρών σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή.



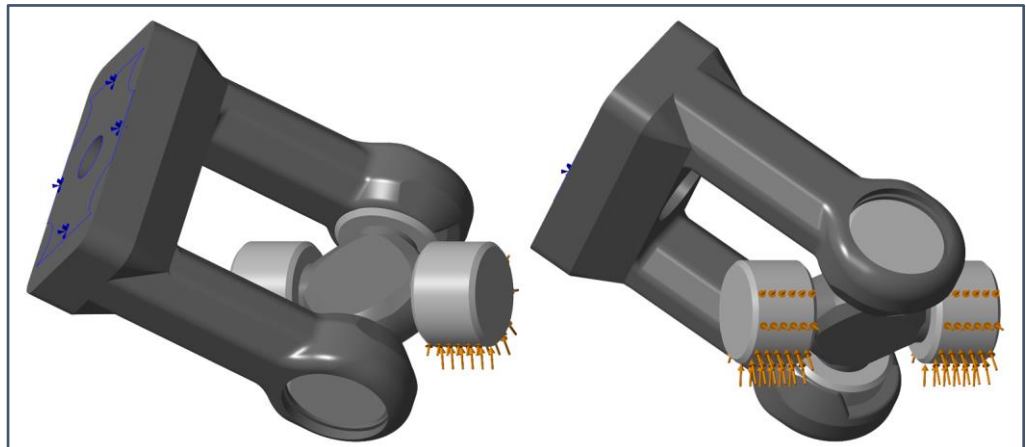
Εικόνα 8.6: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N υπό κλίση 15 μοιρών.



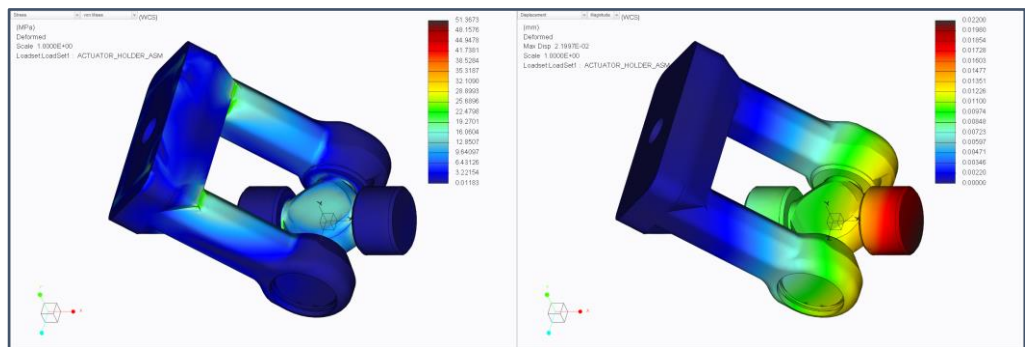
Εικόνα 8.7: Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N υπό κλίση 30 μοιρών σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή.



Εικόνα 8.8: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N υπό κλίση 30 μοιρών.



**Εικόνα 8.9:** Επιφάνεια πάκτωσης και σημεία εφαρμογής κυλινδρικών φορτίων 350 N υπό κλίση 45 μοιρών σε κάθε πλευρά της σφαιρικής άρθρωσης της βάσης συγκράτησης του γραμμικού επενεργητή.



**Εικόνα 8.10:** Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της βάσης του επενεργητή της πλατφόρμας Stewart μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο στην κάθε πλευρά 350 N υπό κλίση 45 μοιρών.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η βάση του γραμμικού επενεργητή μαζί με την σφαιρική άρθρωση σε κυλινδρικό φορτίο 350 N στην κάθε πλευρά, παρουσιάζει την μεγαλύτερη τάση και παραμόρφωση για γωνία φορτίου 45 μοίρες. Η μέγιστη τάση που εμφανίστηκε για αυτήν την γωνία φορτίου είναι **51.3673 MPa** ενώ η μέγιστη παραμόρφωση είναι **21.997 μm**. Η μέγιστη τάση αναπτύχθηκε στο σημείο που εδράζεται το έδρανο κύλισης στην σφαιρική άρθρωση ενώ η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίστηκε στην άκρη του εδράνου κύλισης..

Εξάρτημα	Ονομασία υλικού	Όριο διαρροής υλικού [MPa]	Λόγος Poisson [ ]
Βάση γραμμικού επενεργητή	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Σφαιρική άρθρωση	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29

**Πίνακας 3:** Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή μαζί με την σφαιρική άρθρωση.

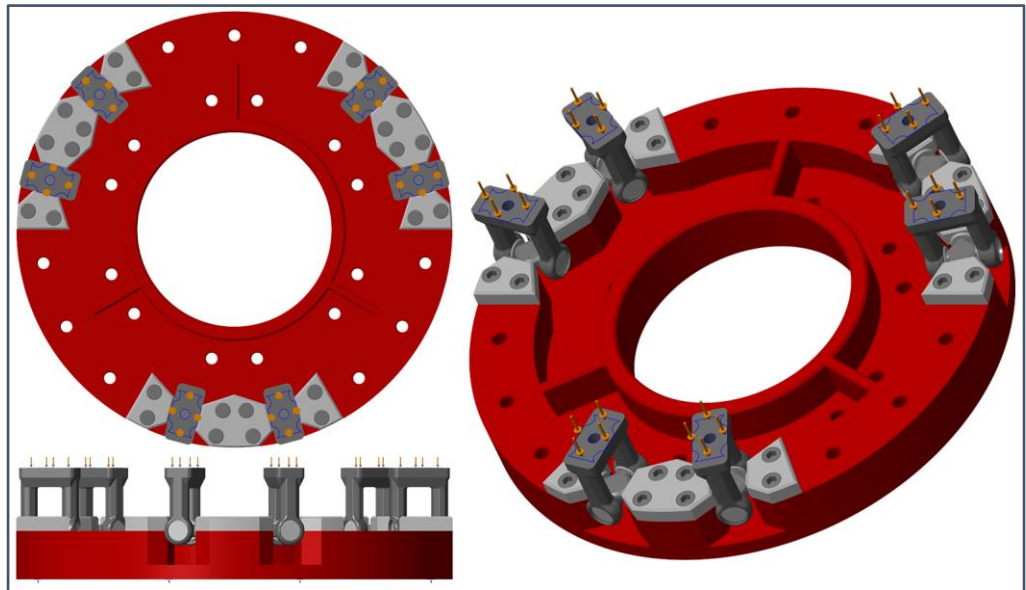
Είδος στήριξης	Φορτίο [N]	Γωνία [μοίρες]	Τάση [MPa]	Παραμόρφωση [μm]
Πάκτωση	700	0	24,6552	5,0138
Πάκτωση	700	15	24,0901	10,200
Πάκτωση	700	30	37,8727	16,344
Πάκτωση	700	45	51,3673	21,997

**Πίνακας 4:** Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την βάση του γραμμικού επενεργητή μαζί με την σφαιρική άρθρωση, καθώς επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

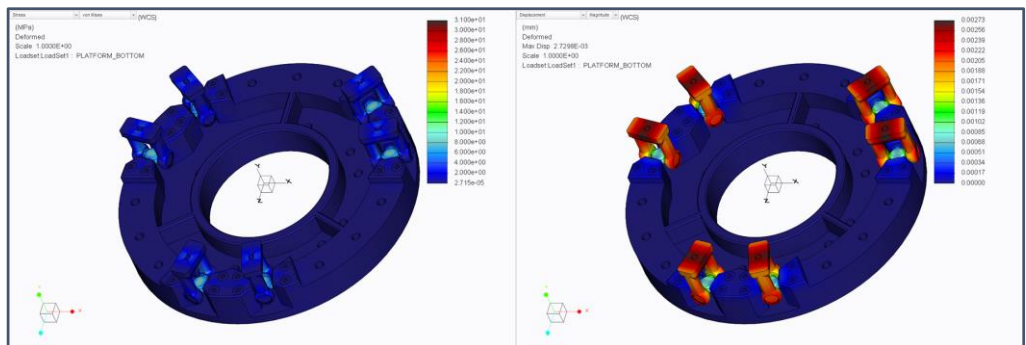


### 8.3 Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της άνω και κάτω βάσης της πλατφόρμας Stewart μαζί με τις έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών μαζί με τις σφαιρικές αρθρώσεις

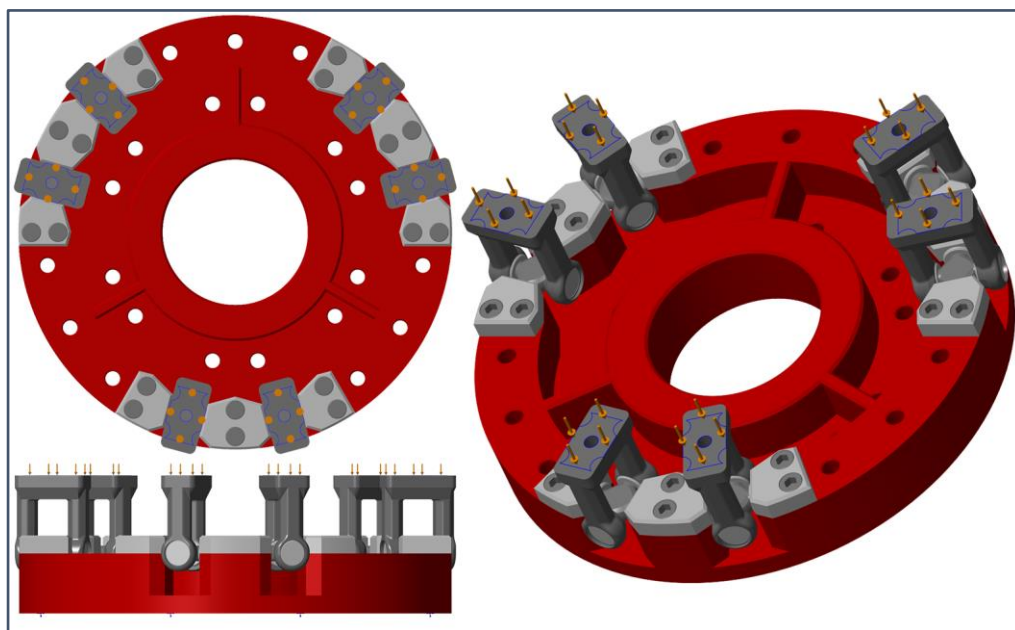
Στην συγκεκριμένη ανάλυση τοποθετήθηκαν οι έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών μαζί με τις σφαιρικές αρθρώσεις πάνω στην βάση και στην συνέχεια προστέθηκε φορτίο 700 N στην κάθε μία βάση, ενώ παράλληλα σαν επιφάνεια στήριξης ορίστηκε η κάτω μεριά της βάσης. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν στατικού τύπου. Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα μηχανικής ανάλυσης της άνω και κάτω βάσης της πλατφόρμας Stewart.



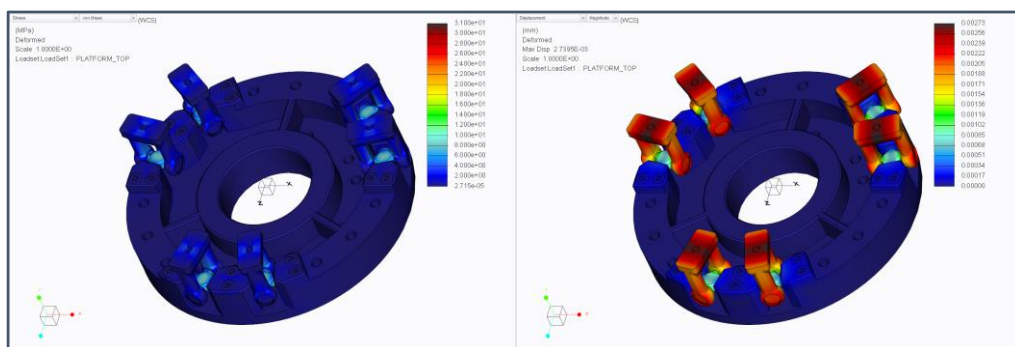
Εικόνα 8.11: Κάτω βάση πλατφόρμας Stewart μαζί με τις έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών σε φόρτιση 700 N στην κάθε βάση και πάκτωση στην κάτω μεριά.



Εικόνα 8.12: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της κάτω βάσης της πλατφόρμας Stewart σε δύναμη 700 N στην κάθε βάση του γραμμικού επενεργητή.



Εικόνα 8.13: Πάνω βάση πλατφόρμας Stewart μαζί με τις έξι βάσεις των γραμμικών επενεργητών σε φόρτιση 700 N στην κάθε βάση και πάκτωση στην πάνω μεριά.



Εικόνα 8.14: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πάνω βάσης της πλατφόρμας Stewart σε δύναμη 700 N στην κάθε βάση του γραμμικού επενεργητή.

Εξάρτημα	Ονομασία υλικού	Όριο διαρροής υλικού [MPa]	Λόγος Poisson [ ]
Βάση γραμμικού επενεργητή	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Σφαιρική άρθρωση	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Βάσεις σφαιρικής άρθρωσης	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Πάνω βάση πλατφόρμας	Αλουμίνιο, <b>AL6061</b>	68948	0,30
Κάτω βάση πλατφόρμας	Αλουμίνιο, <b>AL6061</b>	68948	0,30

Πίνακας 5: Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την πάνω και κάτω βάση.

Βάση	Είδος στήριξης	Φορτίο [N]	Τάση [MPa]	Παραμόρφωση [μm]
Κάτω	Πάκτωση	700 * 6	31,0	2,7298
Πάνω	Πάκτωση	700 * 6	31,0	2,7395

Πίνακας 6: Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την πάνω και κάτω βάση, καθώς επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν.





## 8.4 Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart

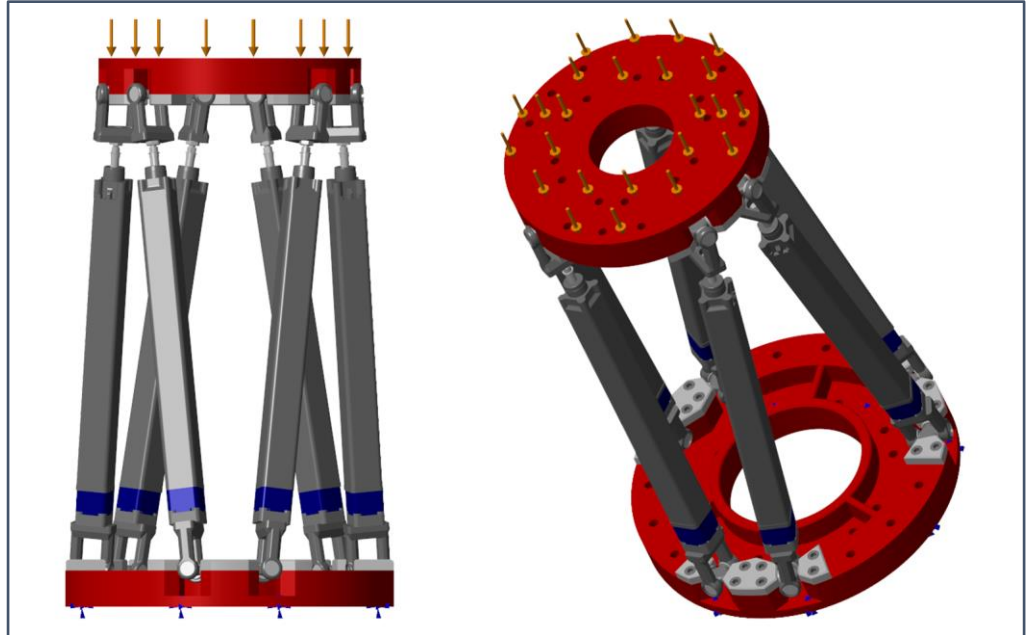
Στην συγκεκριμένη ανάλυση μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά του πλήρους μοντέλου της πλατφόρμας Stewart. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης χρειάστηκε να γίνει απλοποίηση του γραμμικού επενεργητή. Αφαιρέθηκε ο κινητήρας όπως επίσης έγιναν κάποιες απλοποιήσεις στο εξωτερικό του μέρος. Στην **Εικόνα 4.1** που βρίσκεται στην σελίδα 23 φαίνεται πως ήταν ο γραμμικός επενεργητής πριν την απλοποίηση του. Το φορτίο που ορίστηκε για την ανάλυση είναι 4200 N, και προκύπτει από την άθροιση της μέγιστης δύναμης που μπορούν να ασκήσουν οι 6 επενεργητές (700 N x 6). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για διάφορες θέσεις της πλατφόρμας και για δύο προσανατολισμούς στο φορτίο, κάθετο και οριζόντιο. Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας Stewart, καθώς επίσης και η δυσμενέστερη θέση. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν στατικού τύπου. Παρακάτω εμφανίζεται ο γραμμικός επενεργητής μετά την απλοποίηση του όπως επίσης και τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης.



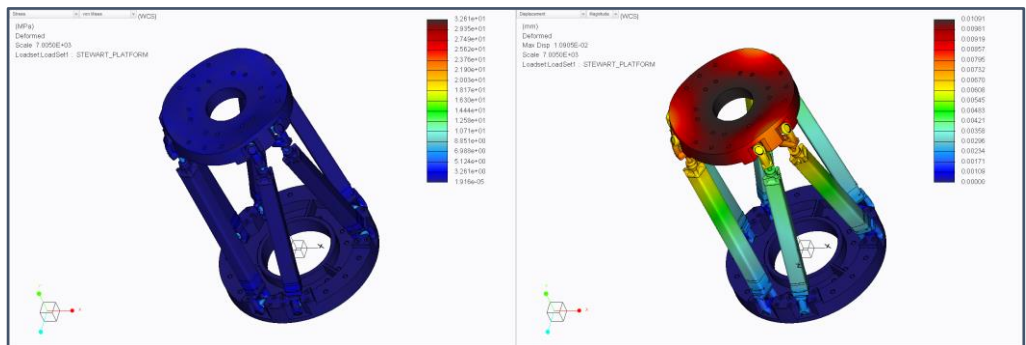
**Εικόνα 8.15:** Γραμμικός επενεργητής μετά την απλοποίηση του.



1. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας για κάθετο φορτίο 4200 N στην πάνω βάση, για την θέση:  
 $X = 0 [mm]$   $Y = 0 [mm]$   $Z = 0 [mm]$   
 $A = 0 [^\circ]$   $B = 0 [^\circ]$   $C = 0 [^\circ]$



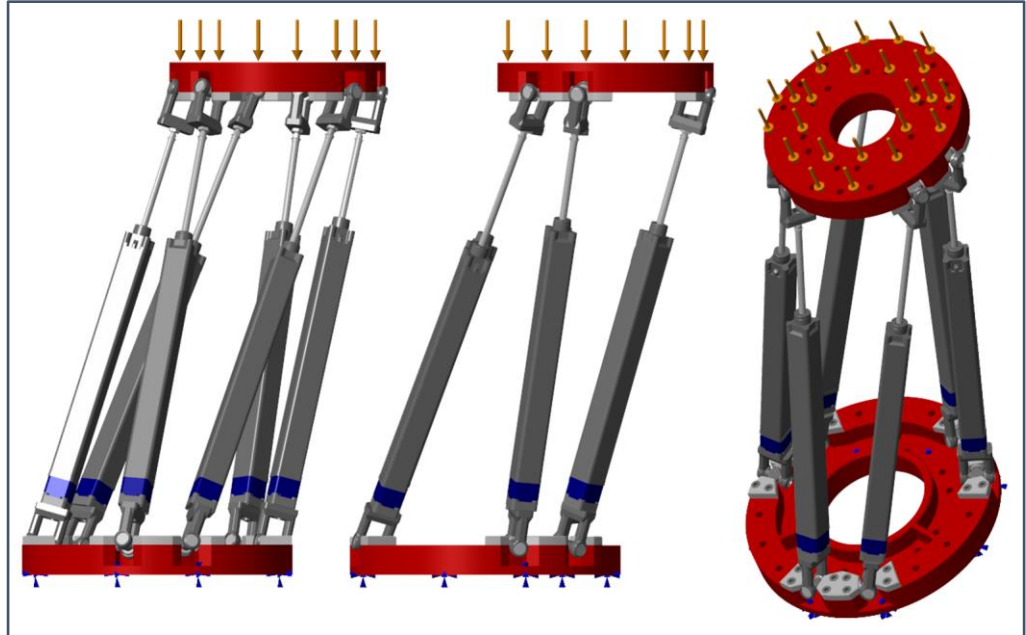
Εικόνα 8.16: Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση.



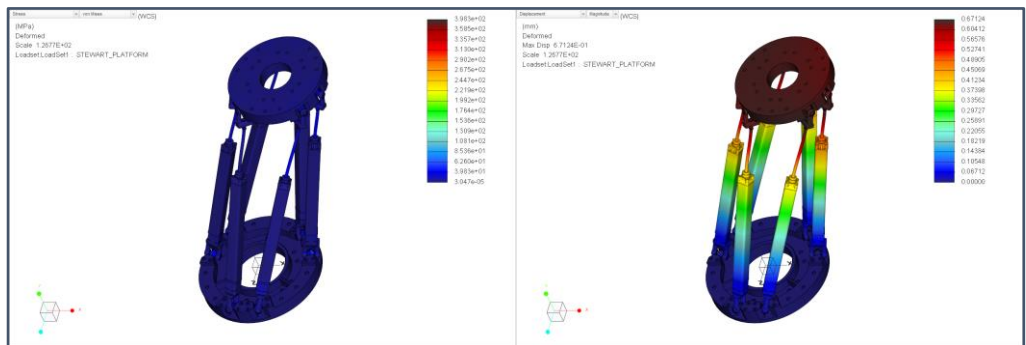
Εικόνα 8.17: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης.



2. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας για κάθετο φορτίο 4200 N στην πάνω βάση, για την θέση:  
 $X = 200 [mm]$   $Y = 200 [mm]$   $Z = 100 [mm]$   
 $A = 0 [^\circ]$   $B = 0 [^\circ]$   $C = 0 [^\circ]$



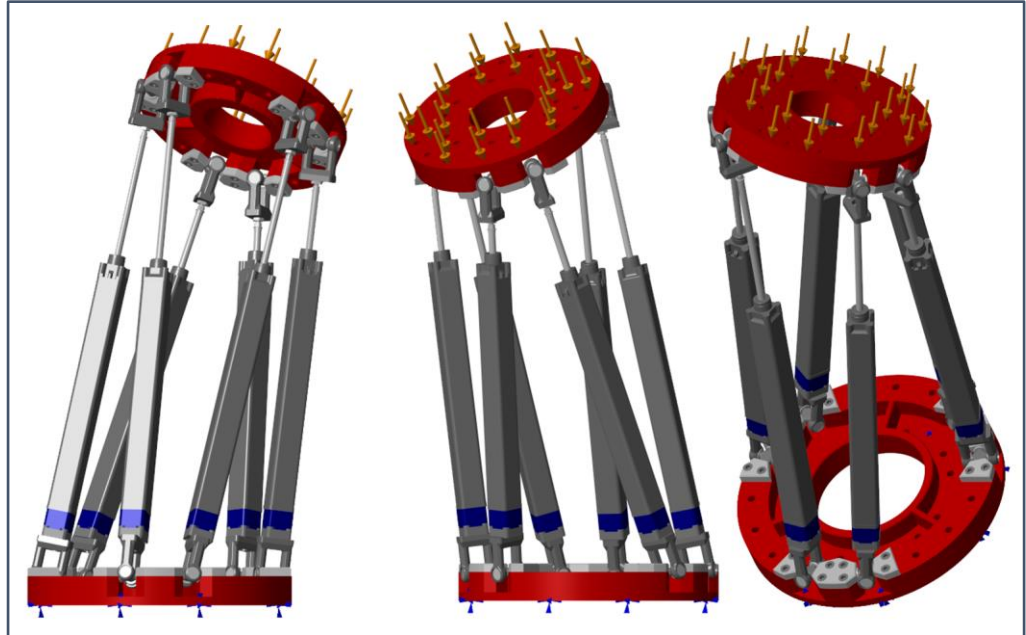
Εικόνα 8.18: Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση.



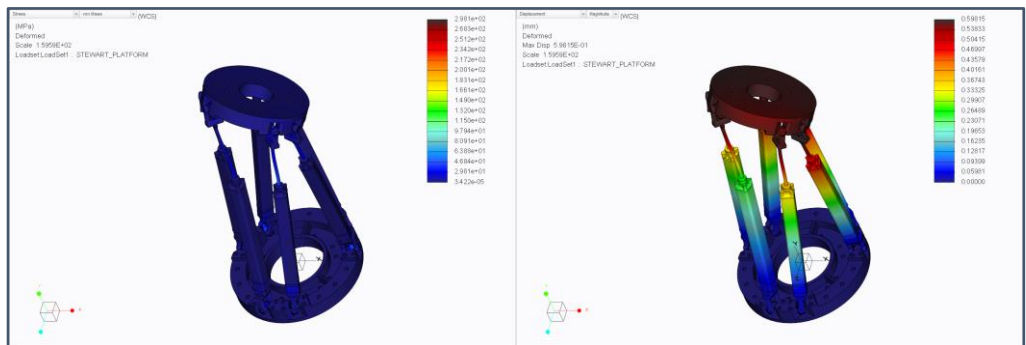
Εικόνα 8.19: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης.



3. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας για κάθετο φορτίο 4200 N στην πάνω βάση, για την θέση:  
 $X = 150 [mm]$   $Y = 150 [mm]$   $Z = 100 [mm]$   
 $A = 30 [^\circ]$   $B = 20 [^\circ]$   $C = 0 [^\circ]$



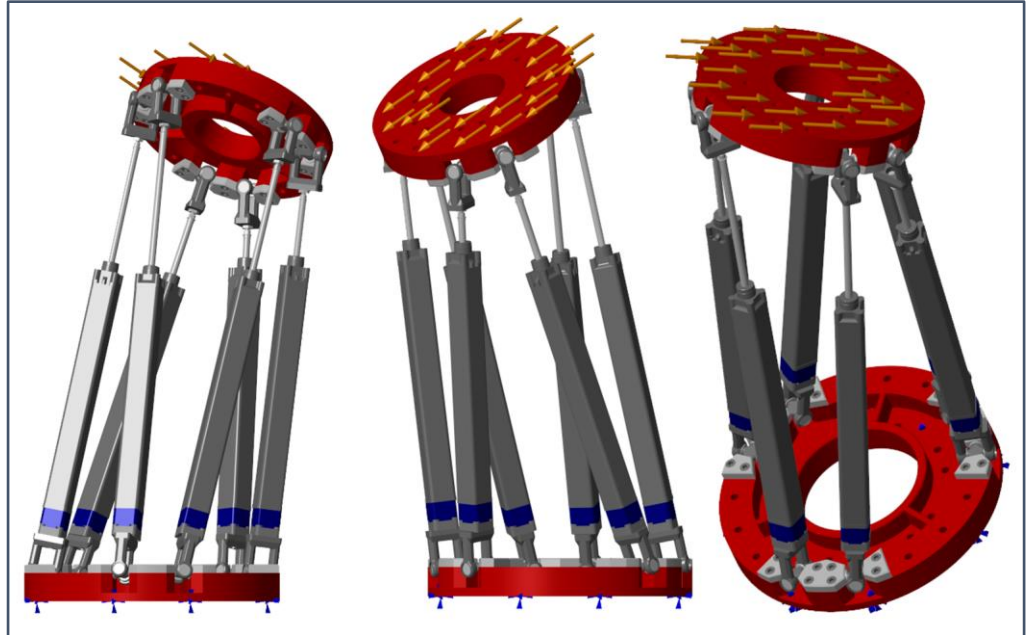
Εικόνα 8.20: Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση.



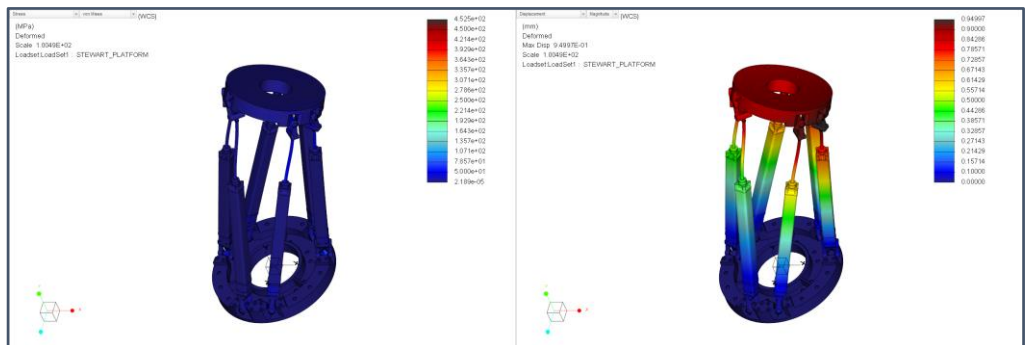
Εικόνα 8.21: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης.



4. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας για οριζόντιο φορτίο 4200 N στην πάνω βάση, για την θέση:  
 $X = 150 [mm]$   $Y = 150 [mm]$   $Z = 100 [mm]$   
 $A = 30 [^\circ]$   $B = 20 [^\circ]$   $C = 0 [^\circ]$



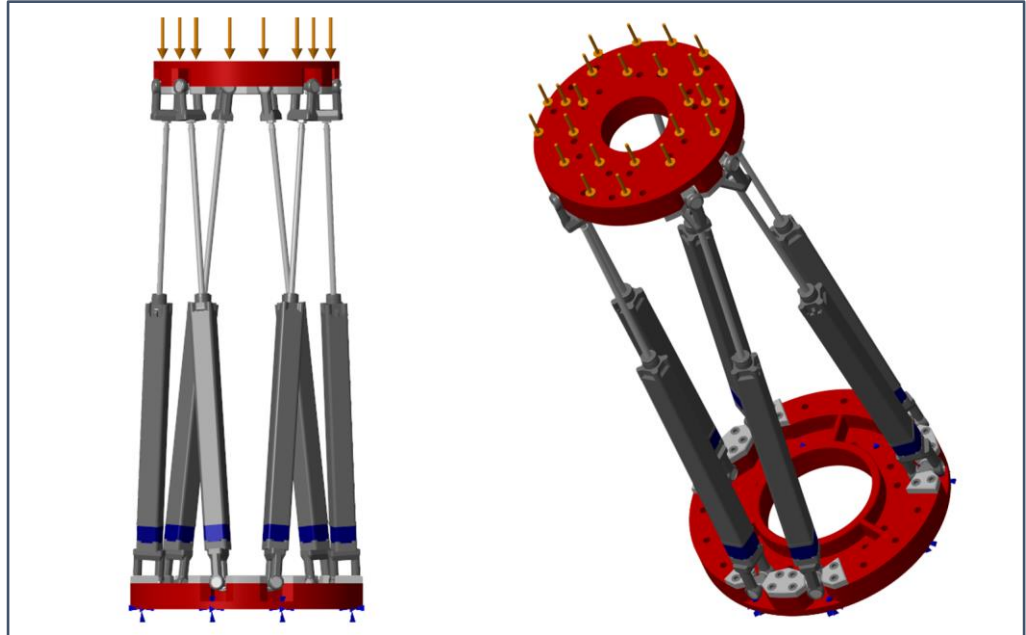
Εικόνα 8.22: Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση.



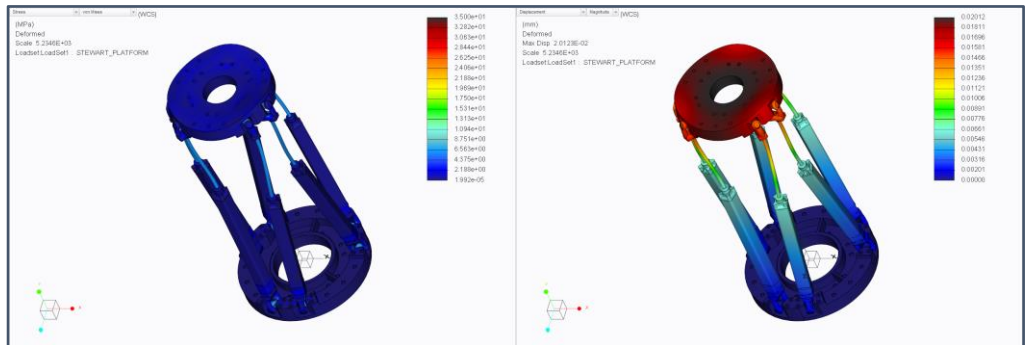
Εικόνα 8.23: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης.



5. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας για κάθετο φορτίο 4200 N στην πάνω βάση, για την θέση:  
 $X = 0 [mm]$   $Y = 0 [mm]$   $Z = 300 [mm]$   
 $A = 0 [^\circ]$   $B = 0 [^\circ]$   $C = 0 [^\circ]$



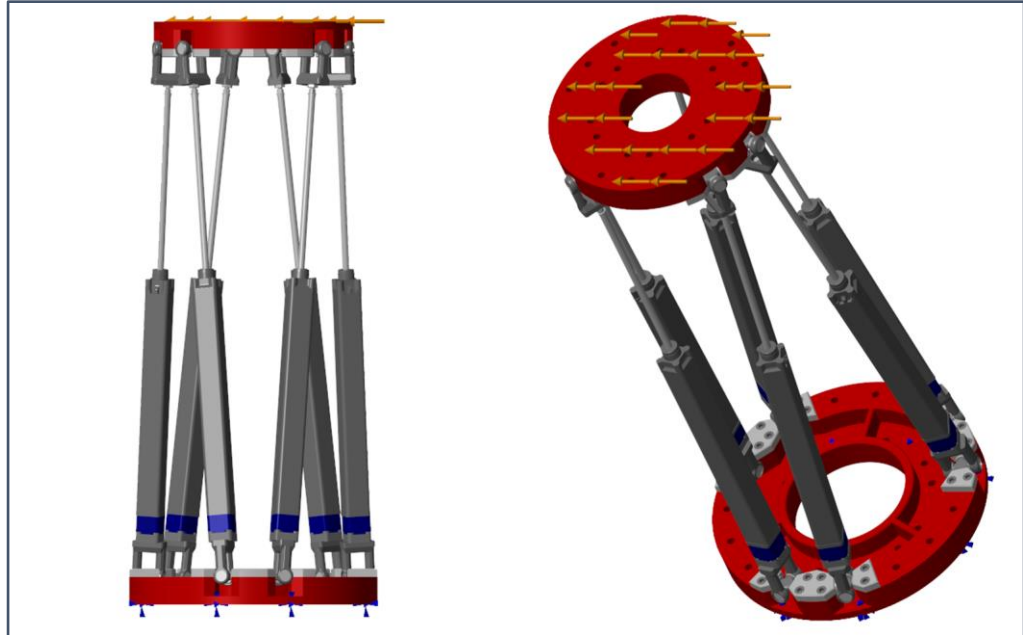
Εικόνα 8.24: Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση.



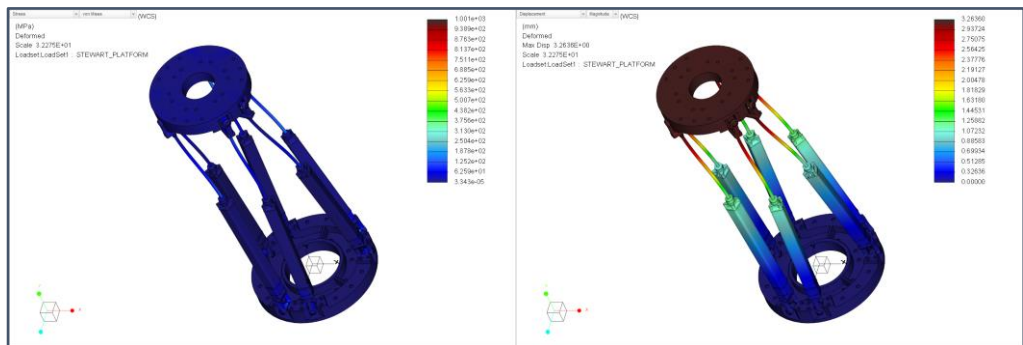
Εικόνα 8.25: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης.



6. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς πλατφόρμας για οριζόντιο φορτίο 4200 N στην πάνω βάση, για την θέση:  
 $X = 0 [mm]$     $Y = 0 [mm]$     $Z = 300 [mm]$   
 $A = 0 [^\circ]$     $B = 0 [^\circ]$     $C = 0 [^\circ]$



Εικόνα 8.26: Απεικόνιση της πλατφόρμας Stewart και των σημείων εφαρμογής του φορτίου στην πάνω βάση.



Εικόνα 8.27: Συγκεντρωτική εικόνα στατικής ανάλυσης της πλατφόρμας Stewart σε φορτίο στην επιφάνεια της πάνω βάσης.

Εξάρτημα	Ονομασία υλικού	Όριο διαρροής υλικού [MPa]	Λόγος Poisson [ ]
Βάση γραμμικού επενεργητή	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Σφαιρική άρθρωση	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Βάσεις σφαιρικής άρθρωσης	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Γραμμικός επενεργητής	Κραματούχος χάλυβας, <b>AISI4340</b>	200000	0,29
Πάνω βάση πλατφόρμας	Αλουμίνιο, <b>AL6061</b>	68948	0,30
Κάτω βάση πλατφόρμας	Αλουμίνιο, <b>AL6061</b>	68948	0,30

Πίνακας 7: Συγκεντρωτική παρουσίαση των υλικών και των ιδιοτήτων τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την ανάλυση του συνολικού μοντέλου της πλατφόρμας.



A/A ανάλυσης	Όριο διαρροής υλικού [MPa]	Είδος στήριξης	Φορτίο	Είδος φορτίου
1	0	Πάκτωση	4200	Κάθετο
2	200	Πάκτωση	4200	Κάθετο
3	150	Πάκτωση	4200	Κάθετο
4	150	Πάκτωση	4200	Οριζόντιο
5	0	Πάκτωση	4200	Κάθετο
6	0	Πάκτωση	4200	Οριζόντιο

Πίνακας 8: Συγκεντρωτική παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάλυσης μηχανικής συμπεριφοράς για την ανάλυση του συνολικού μοντέλου της πλατφόρμας.

A/A ανάλυσης	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	A [°] Roll	B [°] Pitch	C [°] Yaw	Τάση [MPa]	Παραμόρφωση [μm]
1	0	0	0	0	0	0	32,61	10,905
2	200	200	100	0	0	0	398,3	671,24
3	150	150	100	30	20	0	298,1	598,15
4	150	150	100	30	20	0	452,5	949,97
5	0	0	300	0	0	0	35,00	20,123
6	0	0	300	0	0	0	1001	3263,6

Πίνακας 9: Συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς του συνολικού μοντέλου της πλατφόρμας.

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των τάσεων και των παραμορφώσεων για τις παραπάνω 6 περιπτώσεις που πραγματοποιήθηκε μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας. Με A/A συμβολίζεται ο αριθμός της μελέτης, με X,Y,Z η θέση ενώ με A,B,C οι γωνίες της πάνω βάσης ως προς την θέση ηρεμίας.

## 8.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων και επιλογή υλικών

Αναλύοντας τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι όταν εφαρμόζεται φορτίο 700 N στην βάση του γραμμικού επενεργητή, η τιμή της τάσης είναι περίπου 10 MPa ενώ η τιμή της παραμόρφωσης περίπου 1.5 μm. Έπειτα αφού οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης είναι αποδεκτές, γίνεται ανάλυση της βάσης του γραμμικού επενεργητή μαζί με την σφαιρική άρθρωση για γωνίες 0, 15, 30 και 45 μοίρες που υπερκαλύπτει το εύρος λειτουργίας των αρθρώσεων. Από τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι για γωνία 0 μοιρών η τάση είναι περίπου 25 MPa ενώ η παραμόρφωση 5 μm. Η δυσμενέστερη περίπτωση βρίσκεται στις 45 μοίρες με τιμή τάσης περίπου 51 MPa και τιμή παραμόρφωσης 22 μm. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση της κάτω και πάνω βάσης της πλατφόρμας με την βάση του γραμμικού επενεργητή και της σφαιρικής άρθρωσης. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι για την πάνω και κάτω βάση της πλατφόρμας η τιμή της τάσης είναι 31 MPa ενώ η παραμόρφωση 2.7 μm.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ολόκληρου του μοντέλου για φορτίο 4200 N με απλοποιημένους γραμμικούς επενεργητές για διάφορες θέσεις της πλατφόρμας και για δύο προσανατολισμούς στο φορτίο, κάθετο και οριζόντιο. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή η μεγαλύτερη τιμή τάσης, βρίσκεται στην 6<sup>η</sup> και τελευταία ανάλυση όπου η πλατφόρμα είναι σε πλήρη έκταση (300mm) και το φορτίο εφαρμόζεται οριζόντια στην βάση. Οι τιμές της τάσης φτάνουν τα 1000 MPa ενώ η παραμόρφωση ανέρχεται σε 3.3 mm. Η μεγάλη τιμή αυτής της τάσης απαιτεί να χρησιμοποιηθούν υλικά υψηλής αντοχής, κι έτσι το υλικό που επιλέχθηκε για τα εξαρτήματα που χρειάζονται να κατασκευαστούν είναι ο **κραματούχος χάλυβας AISI 4340**, καθώς έχει όριο διαρροής που φτάνει τα 1620 MPa. Για την πάνω και κάτω βάση που το υλικό κατασκευής τους είναι το αλουμίνιο, επιλέχθηκε η σειρά 6000 και συγκεκριμένα ο **τύπος αλουμινίου 6061-T6** που έχει μέτρια έως υψηλή αντοχή, που ξεπερνάει τα 200 MPa. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι το αλουμίνιο αναπτύσσει τάσεις που δεν ξεπερνάνε τα 5 MPa. Τα υλικά που επιλέχθηκαν για κάθε εξάρτημα της πλατφόρμας Steward, δηλαδή το αλουμίνιο AL6061-T6 με μέτρο ελαστικότητας 68948 MPa και ο κραματούχος χάλυβας AISI 4340 με μέτρο ελαστικότητας 200000 MPa, μπορούν να υποστηρίξουν τα φορτία λειτουργίας με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης.





## 9 Τελική σύνοψη πτυχιακής εργασίας

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από όλη την διαδικασία εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής.

Αρχικά, από την έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε, και την εκτεταμένη βιβλιογραφία πάνω στο αντικείμενο, έγινε εμφανές ότι υπάρχει μία μεγάλη γκάμα διαθέσιμων μηχανισμών που πληρούν τις προϋποθέσεις αυτής της εργασίας. Από όλες αυτές τις επιλογές, επιλέχθηκε η πλατφόρμα Stewart και πιο συγκεκριμένα ο τύπος 6-6 λόγω του συνδυασμού στιβαρής κατασκευής και της δυνατότητας κίνησης σε έξι άξονες που διαθέτει.

Επίσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι είναι διαθέσιμη μια μεγάλη πληθώρα εξαρτημάτων, τόσο όσον αφορά στους επενεργητές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όσο και στα συνδεδετικά στοιχεία όπως οι αρθρώσεις και οι κοχλίες. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή των γραμμικών επενεργητών ήταν σχετικά εύκολη διαδικασία, εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας που είναι διαθέσιμη, με βασικά κριτήρια την ταχύτητα, ακρίβεια και συμπαγή κατασκευή.

Η διαδικασία που εκτελέστηκε στο λογισμικό CAD μπορεί να χωριστεί σε δυο σκέλη. Το πρώτο μέρος αποτελείται από την γεωμετρική μοντελοποίηση και συναρμολόγηση του μηχανισμού ενώ το δεύτερο μέρος αποτελείται από ένα σύνολο αναλύσεων που εκτελέστηκαν για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του μηχανισμού. Κατά το πρώτο μέρος, η προηγούμενη εμπειρία του συγγραφέα με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα όσον αφορά στον χρόνο γεωμετρικής μοντελοποίησης των επιμέρους εξαρτημάτων αλλά και της τελικής συναρμολόγησης της πλατφόρμας. Όσον αφορά στο δεύτερο σκέλος αυτής της διαδικασίας, το λογισμικό παρείχε όλα τα εργαλεία που ήταν αναγκαία για την εκτέλεση των αναλύσεων, ενώ το περιβάλλον εργασίας είναι φιλικό προς τον χρήστη.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις αναλύσεις της πλατφόρμας είναι ότι ο χώρος εργασίας είναι ικανοποιητικός για τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται η πλατφόρμα. Επίσης οι μηχανικές αναλύσεις έδειξαν ότι η μηχανική συμπεριφορά της πλατφόρμας ήταν η αναμενόμενη, όπου παρατηρούνται μικρές παραμορφώσεις, παρόλα τα μεγάλα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν.



## Βιβλιογραφία

### Βιβλία

- [1] Μηχανολογικό σχέδιο - Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης - ISBN: 960-418-114-9
- [2] Αντοχή των υλικών - Ευριπίδης Παπαμίχος, Νίκος Χ. Χαραλαμπίδης - ISBN: 960-418-048-7
- [3] Σχεδιασμός μηχανών με τη βοήθεια υπολογιστή - Ανδρέας Δ. Δημαρόγκωνας - ISBN: 960-411-532-4
- [4] Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση - Νικόλαος Μπιλαλής - ISBN: 978-960-218-617-6
- [5] Τεχνική ατζέντα βασικής μηχανολογίας - ISBN: 978-960-331-415-8
- [6] Dynamics of Parallel Robots - Sébastien Briot, Wisama Khalil - ISBN: 978-3-319-19788-3
- [7] Introduction to Finite Elements in Engineering - Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu - ISBN: 978-960-209-920-9
- [8] [Μελέτη δυναμικών φορτίσεων σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων \(Πτυχιακή εργασία, Τσαϊνης Ανδρέας - Μάριος\)](#)
- [9] [Σχεδιασμός τροχήλατης γερανογέφυρας με χρήση παραμετρικού CAD/CAE λογισμικού \(Πτυχιακή εργασία, Παπαδέας Οδυσσέας\)](#)
- [10] [Σχεδιασμός, κατασκευή και έλεγχος μικρής ρομποτικής πλατφόρμας "Stewart" \(Πτυχιακή εργασία, Καλαντζής Σπυρίδων\)](#)
- [11] Τρισδιάστατη μοντελοποίηση άρθρωσης γονάτου και μελέτη τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Πτυχιακή εργασία, Χρυσουλάκης Χρίστος)
- [12] [Πνευματικά - Υδραυλικά συστήματα \(Σημειώσεις, Καββουσάνος Εμμανουήλ\)](#)

### Ιστοσελίδες

- [13] [Adept Quattro Parallel Robots](#)
- [14] [Automex - Driving Simulators](#)
- [15] [CKAS Mechatronics | Flight and Driving Simulators](#)
- [16] [Driving Simulators](#)
- [17] [Lufthansa - Flight simulator](#)
- [18] [Mecademic - What is a parallel robot?](#)
- [19] [Parallelic - Affordable Academic Parallel Robots](#)
- [20] [PI - Piezo Technology and Piezo Systems for Nanopositioning](#)
- [21] [PI miCos Robots](#)
- [22] [SKF Linear Actuators](#)
- [23] [Stepper Motor Linear Actuator](#)
- [24] [Toyota's Driving Simulator](#)
- [25] [Udwadia - Kalaba Approach for Parallel Manipulator Dynamics](#)
- [26] [Tensile - Yield strength of steel](#)
- [27] [DIN EN 10083-3, Steels for quenching and tempering](#)
- [28] [Aluminium Alloy 6061 - Composition, Properties, Temper and Applications of 6061 Aluminium](#)
- [29] [Wikipedia - Actuator](#)
- [30] [Wikipedia - Linear Actuator](#)
- [31] [Wikipedia - Motion simulator](#)
- [32] [Wikipedia - Parallel manipulator](#)
- [33] [Wikipedia - Rotary Actuator](#)
- [34] [Wikipedia - Six Degrees of freedom](#)
- [35] [Wikipedia - Stewart Platform](#)



## Παράρτημα

### Κώδικας κατασκευής αρχείων κίνησης της πλατφόρμας Stewart για τον προσδιορισμό του χώρου εργασίας

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των αρχείων ελέγχου κίνησης της πλατφόρμας Stewart.

```
%% arxikopoihsh
close all;clear all;clc

%% orismos statherwn
sample_time = 0.01; %sample time [sec]
s_time = 10; %synolikos xronos [sec]
turns = 2; %strofes pou tha kanei

%% shmeia xwrou
A=[-100 650
    -50 600
     0 550
    50 500
   100 450
   150 400
   200 320
   250 200
   300 0];

%% ypologismos statherwn
t = 0:sample_time:s_time; %ypologismos xronou
p=polyfit(A(:,1),A(:,2),size(A,1)-1); %kataskeuh poluwnymou
z_motor=linspace(A(1,1),A(end,1),length(t)); %kataskeuh timwn Z aksona
x_gain=polyval(p,z_motor); %ypologismos apostashs gia kathe shmeio ston
aksona X
y_gain=x_gain;
x_motor = x_gain.*cos(t./s_time * 2*pi*turns);
y_motor = y_gain.*sin(t./s_time * 2*pi*turns);
x_gain_2=[-x_gain,fliplr(x_gain)]; %synolikos xwros ergasias, aksonas X/Y
z_motor_2=[z_motor,fliplr(z_motor)]; %synolikos xwros ergasias, aksonas Z

%% profil kinhshs
figure(1);hold on;grid on
plot(x_motor,z_motor,y_motor,z_motor) %emfanish timwn pou tha paroun oi
kinhthres
plot(x_gain,z_motor) %emfanish ypologismenwn dedomenwn
plot(A(:,2),A(:,1),'*','linewidth',1) %emfanish pragmatikwn dedomenwn
xlabel('Θέση στον X-Y άξονα (mm)')
ylabel('Θέση στον Z άξονα (mm)')
legend('Θέση στον άξονα X','Θέση στον άξονα Y','Καμπύλη χώρου
εργασίας','Πραγματικά δεδομένα')
% title('X-Y motor data and Polynomial curve / Actual data')
axis equal
xlim([-800 800])
ylim([-200 400])
% print('moves.png','-dpng','-r300')

%% xwros ergasias platformas
figure(2);
area(x_gain_2,z_motor_2,min(z_motor_2),'FaceColor',[0.5 0.9
0.6],'EdgeColor',[0/255 114/255 189/255],'LineStyle',':');
xlabel('Θέση στον X-Y άξονα (mm)')
```



```
ylabel('Θέση στον Z άξονα (mm)')
legend('Χώρος εργασίας')
% title('Χώρος εργασίας πλατφόρμας Stewart')
grid on
ax = gca; % current axes
ax.Layer = 'top';
axis equal
xlim([-800 800])
ylim([-200 400])
% print('workspace.png','-dpng','-r300')

%% dhmiourgia pinakwn
x_motor_fin = [t',x_motor'];
y_motor_fin = [t',y_motor'];
z_motor_fin = [t',z_motor'];
exp_line = [x_gain',z_motor',(x_gain*0)'];

%% apothikeush dedomenwn
save ('x_motor_fin.tab', '-ascii', 'x_motor_fin')
save ('y_motor_fin.tab', '-ascii', 'y_motor_fin')
save ('z_motor_fin.tab', '-ascii', 'z_motor_fin')
save ('line.pts', '-ascii', 'exp_line')
```



## Κώδικας δημιουργίας γραφήματος κίνησης σερβοκινητήρων ως προς τον χρόνο

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του γραφήματος που εμφανίζει το μήκος που είχαν οι γραμμικοί επενεργητές κατά την κίνηση της πλατφόρμας Stewart πάνω σε μία συγκεκριμένη τροχιά.

```
close all;clear all;clc
A=importdata('pos.txt');
num=find(A(:,1)==0);
motor_nump=size(num,1);
num(size(num,1)+1)=size(A,1)+1;
fi=figure;hold on;grid on
for i=1:motor_nump
    plot(A(num(i):num(i+1)-1,1),A(num(i):num(i+1)-1,2))
end
t_name='Actuator ';
t_leg=[t_name,'1'];
for i=2:motor_nump
    temp=[t_name,num2str(i)];
    t_leg=[t_leg;temp];
end
legend(t_leg,'Location','southeast')
xlabel('Χρόνος (sec)')
ylabel('Μήκος επενεργητή (mm)')

fi.PaperPosition=[0 0 16 9];

print('Servo Motor Pos.png','-dpng','-r300')
```



## Πληροφορίες εγγράφου

Αυτό το κείμενο αποτελείται από **86** σελίδες και περιέχει **17710** λέξεις.