



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

Διπλωματική Εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ  
ΔΙΠΟΔΟΥ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΚΡΙΒΩΣΗ  
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΠΟΔΟ ΠΕΡΠΑΤΗΜΑ**

Βασιλείου Χρήστος

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος*

ΑΘΗΝΑ 2019



## Περίληψη

Η ανάγκη για τη συστηματοποιημένη μελέτη του ανθρώπινου βαδίσματος έχει οδηγήσει τον τεχνολογικό κόσμο στην ανάπτυξη δίποδων ρομπότ. Πρόκειται για ένα ευρύ επιστημονικό πεδίο, το οποίο εξετάζει τόσο τις διάφορες πτυχές της ρομποτικής, όσο και αυτές της φυσιολογίας του ανθρώπινου ποδιού. Δίποδα ρομπότ και γενικότερα ρομπότ με πόδια έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν από πολλούς ερευνητές. Αυτά βασίζονται σε μαθηματικές μοντελοποιήσεις που στόχος τους είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς του ανθρώπου κατά το βηματισμό.

Η παρούσα εργασία αξιολογεί ένα ήδη υπάρχον απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο για το δίποδο περπάτημα και τείνει να επαληθεύσει την εγκυρότητά του μέσω της κατασκευής απλού δίποδου μηχανισμού, ο οποίος υπόκειται σε πείραμα παθητικού βηματισμού σε κεκλιμένο επίπεδο. Προηγούμενες μελέτες έχουν παρουσιάσει πειραματικά αποτελέσματα από δίποδες μηχανές, ενεργητικές ή παθητικές, απλούστερες ή πολυπλοκότερες, ωστόσο δεν συσχετίζουν συστηματικά τα πειραματικά αποτελέσματά τους με την προτεινόμενη θεωρία τους.

Το κατασκευασθέν δίποδο ρομπότ αποτελείται από ενδοτικά σκέλη με ημικυκλικά πέλματα και δεν περιλαμβάνει γόνατα ή αστραγάλους. Γιαρά το γεγονός ότι αποτελεί μία παθητική διάταξη, θέτει τα θεμέλια για τη μετέπειτα επέκτασή του με τη χρήση επενεργητών και την επαύξησή του με την τοποθέτηση γονάτου, αστραγάλου και διαφορετικής γεωμετρίας πελμάτων. Ένας από τους βασικούς στόχους της εργασίας αυτής είναι να θίξει τις βασικές αρχές σχεδιασμού μιας μηχανολογικής διάταξης και κάποιες βασικές μεθόδους αξιολόγησής της. Το βέβαιον είναι ότι η διαδικασία του σχεδιασμού είναι εντόνως επαναληπτική και “μη γραμμική”: ξεκινά από καταγισμό ιδεών, οι οποίες εξετάζονται, αναδιαμορφώνονται, συγχωνεύονται ή απορρίπτονται προκειμένου να προκύψει ο τελικός σχεδιασμός. Από τεχνικής σκοπιάς, η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητο να αξιολογείται με κάποια κριτήρια, βασικότερα των οποίων είναι η λειτουργικότητα, η αντοχή και το κόστος της κατασκευής.

Επιπρόσθετα εφόσον έχει κατασταλαχθεί η τελική ιδέα, ο σχεδιαστής-κατασκευαστής μηχανολόγος μηχανικός οφείλει να εξετάσει τα διαθέσιμα μέσα, ώστε να μπορέσει να παράξει την επιθυμητή κατασκευή. Έτσι ζητήματα κατασκευασμότητας που αφορούν τις διαθέσιμες εργαλειομηχανές, τα διαθέσιμα κοπτικά εργαλεία και τη διαθέσιμη τεχνογνωσία είναι πολύ σημαντικά για την επίτευξη του στόχου του, που δεν είναι άλλος από την κατεργασία πρώτων υλών που θα δώσουν την τελική μορφή του ρομπότ.

Τέλος η εκτέλεση πειραμάτων είναι αυτή που επαληθεύει τη θεωρία. Η επαλήθευση αυτή θα πρέπει να είναι όχι μόνο ποιοτική, που θα ικανοποιούνταν από την επιτυχία του ρομπότ στο να περπατήσει, αλλά και ποσοτική. Η ποσοτικοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων. Με αυτά τα δεδομένα μπορεί κανείς να συμπεράνει πόσο συγκλίνει ή αποκλίνει η τελική κατασκευή του από τη μαθηματική μοντελοποίηση.

Όλα τα παραπάνω συμβάλλουν σε μια κοινή συνισταμένη, η οποία τείνει να εμπλουτίσει τις επιστημονικές γνώσεις γύρω από την περιοχή της βιομηχανοτρονικής. Συγκεκριμένα η μελέτη του βηματισμού της κατασκευασθείσας δίποδης μηχανής και η εφαρμογή διαφόρων μεθόδων επενέργησής της μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργικές ιδέες όχι μόνο για την αντικατάσταση απαγχονισμένων σκελών με προσθετικά άκρα, αλλά και για την υποβοήθηση υπολειτουργικών κάτω άκρων με το σχεδιασμό εξωσκελετικών συστημάτων.

## **Abstract**

The need for the systematic study of human gait has led the technological community to the development of bipedal robots. This is a broad scientific field, which examines both the different aspects of robotics as well as those of human leg physiology. Bipedal robots and legged robots in general have been developed in the past by many researchers; they usually rely on mathematical models and their goal is to assess the dynamics of human walking.

This diploma thesis examines an already existing simplified mechanical model and aims to verify its validity with the construction of a simple bipedal passive mechanism, which performs passive walking on an inclined plane. Previous studies have presented experimental results from bipedal machines, active or passive, simpler or more complicated. However, these do not correlate systematically their results to their proposed theory.

The bipedal robot constructed here consists of compliant legs with semicircular feet; it does not take into consideration the human knee and ankle configurations. It is primarily designed for a study of its passive dynamics; a future expansion that will include actuators and augmentation by the placement of knees, ankle joints and different foot geometry is taken into account during the design process. One of the main goals of this thesis is to explore the basic principles of mechanical design and some basic methods for its evaluation. There is no doubt that the process of design is highly repetitive and “non-linear”: it starts from brainstorming and some ideas are examined, reshaped, merged or rejected in order for the final design to emerge. Moreover, from a technical point of view, it is very important that the design is evaluated with some criteria, such as its mechanical strength and the mechanism's functionality, as well as its production cost.

Additionally, once the final idea has been settled, the designer mechanical engineer has to examine the available means so as to produce the desired structure. Therefore issues regarding the machinability of the robot, such as the available machine-tools, the available cutting tools and the technological know-how are critical for achieving the main purpose of the construction process, which is no other than the manufacturing of raw material in order to shape the final robot.

Finally, experiments are needed to verify the existing theory. This verification is not only qualitative, for which it would suffice that the passive robot is able to walk, but also quantitative. The quantification of experimental results is achieved by the use of sensors for data collection. Thus, with these data, it is possible to conclude how well the manufactured robot converges to the mathematical modeling.

All of the above contribute in a common direction, which tends to enrich the scientific knowledge of the field of biomechatronics. In particular, the gait analysis of the developed bipedal machine and the implementation and testing of various actuation methods can lead to creative ideas not only for the replacement of amputated limbs with artificial prostheses, but also for the assistance of disabled lower legs with the design of exoskeletal systems.

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Περιεχόμενα</b> .....	<b>5</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων</b> .....	<b>6</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Εισαγωγή</b> .....	<b>11</b>
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	11
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση – State of the Art biped robots .....	12
1.3 Δομή Εργασίας .....	15
<b>2 Στοιχεία Θεωρίας</b> .....	<b>16</b>
2.1 Εισαγωγή .....	16
2.2 Ο κύκλος του ανθρώπινου βαδίσματος .....	16
2.3 Το μηχανικό μοντέλο του ανθρώπινου ποδιού και το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου .....	18
2.4 Μοντελοποίηση επαφής .....	21
2.5 Ανάλυση κατασκευής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	26
<b>3 Μοντελοποίηση του δίποδου ρομπότ στο λογισμικό MSC Adams</b> .....	<b>31</b>
3.1 Το λογισμικό προσομοίωσης MSC Adams .....	31
3.2 Περιγραφή του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου.....	32
3.3 Προσομοίωση .....	37
3.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	42
<b>4 Σχεδιασμός του δίποδου ρομπότ</b> .....	<b>51</b>
4.1 Το λογισμικό σχεδιασμού SolidWorks .....	52
4.2 Εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού.....	53
4.3 Τελικός σχεδιασμός .....	55
<b>5 Κατασκευαστική και λειτουργική αξιολόγηση σχεδιασμού</b> .....	<b>78</b>
5.1 Κατασκευαστική αξιολόγηση .....	78
5.2 Λειτουργική αξιολόγηση.....	88
<b>6 Κατασκευή ρομπότ και πειραματική διάταξη</b> .....	<b>97</b>
6.1 Εισαγωγή .....	97
6.2 Παρουσίαση κατασκευής .....	97
6.3 Πειραματική διάταξη .....	105
6.4 Εκτέλεση πειραμάτων.....	109
<b>7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία</b> .....	<b>114</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	114
7.2 Μελλοντική Εργασία .....	115
<b>8 Βιβλιογραφία</b> .....	<b>116</b>
<b>9 Παράτημα</b> .....	<b>118</b>
9.1 Κώδικες Matlab.....	118
9.2 Κώδικας G για τη διαμόρφωση του κάτω ποδιού σε εργαλειομηχανή CNC .....	125

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1:	Πέντε πιθανοί τρόποι πλευρικής σταθεροποίησης. (a) Άσκηση ροπής στον αστράγαλο (b) Σφόνδυλος αντίδρασης (c) Κίνηση κορμού (d) Αύξηση πλάτους βήματος (e) Χρήση στρεπτικού ελατηρίου .....	12
Σχήμα 1-2:	Δίποδα ρομπότ υψηλής τεχνολογίας, (A) Ρομπότ των Stopforth et al. [7] (B) Ρομπότ των Koop και Wu [8] (C) Το ρομπότ Dexter MK III [9] (D) Το πρωτότυπο ρομπότ Max [10] .....	13
Σχήμα 1-3:	Δίποδα ρομότ τελευταίας τεχνολογίας, (A) Το ρομπότ Lucy [11] (B) Το ρομπότ Veroonica [12] (C) Το ρομπότ Mike [13] .....	14
Σχήμα 1-4:	Το BioBiped3 (a) Σχηματική αναπαράσταση του κορμού, ενός ποδιού, του πέλματος και των επενργητών (b) Το πραγματικό ρομπότ (c) Σχηματική αναπαράσταση της μίμησης της βιολογικής κίνησης του BioBiped3 [18] .....	14
Σχήμα 1-5:	Το δίποδο ρομπότ ATRIAS στο DARPA Robotics Challenge [15] .....	15
Σχήμα 2-1:	Σχηματική αναπαράσταση των ορισμών μήκους βήματος (step length), μήκους διασκελισμού (stride length) και πλάτους βήματος (step width) .....	17
Σχήμα 2-2:	Οι φάσεις του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος .....	18
Σχήμα 2-3:	Μοντελοποίηση του ανθρωπίνου σώματος με εύκαμπτα στοιχεία. (A) Απλοποιημένο μοντέλο για ολόκληρο το σώμα (B) Συνεισφορά του γονάτου στη δυσκαμψία των σκελών .....	18
Σχήμα 2-4:	Το μονογραμμικό μοντέλο του δίποδου ρομπότ .....	19
Σχήμα 2-5:	Κρούση μεταξύ δύο σωμάτων .....	21
Σχήμα 2-6:	Φάσεις παραμόρφωσης κατά την κρούση .....	22
Σχήμα 2-7:	Σύγκριση θεωρίας Hertz και Hunt-Crossley .....	23
Σχήμα 2-8:	Δύναμη τριβής έναντι ταχύτητας ολίσθησης. (a) Μοντέλο Coulomb (b) Μοντέλο ιξώδους τριβής (c) Ολοκληρωμένο μοντέλο .....	25
Σχήμα 2-9:	Το μοντέλο τριβής Stribeck .....	26
Σχήμα 2-10:	Καμπύλη S-N για ψαθυρό αλουμίνιο με όριο αντοχής 320 MPa .....	27
Σχήμα 2-11:	Διαγραμματική απεικόνιση των τριών κριτηρίων .....	28
Σχήμα 3-1:	Αρχική μοντελοποίηση του δίποδου ρομπότ με εύκαμπτα σκέλη και ημικυκλικά πέλματα στο λογισμικό MSC Adams .....	33
Σχήμα 3-2:	Παράθυρο του λογισμικού Adams για τον ορισμό στοιχείων ελαστικότητας και απόσβεσης .....	34
Σχήμα 3-3:	Διαγραμματική απεικόνιση των δύο όρων που συνθέτουν τη συνάρτηση κρούσης (IMPACT function) .....	35
Σχήμα 3-4:	Αναπαράσταση της συνάρτησης της δύναμης τριβής .....	36
Σχήμα 3-5:	Παράθυρο προσδιορισμού παραμέτρων της κάθετης δύναμης και της δύναμης τριβής .....	37
Σχήμα 3-6:	Έδαφος με σχηματισμούς νησίδων .....	38
Σχήμα 3-7:	Παράθυρο διαλόγου για ορισμό αισθητήρα .....	39
Σχήμα 3-8:	Σύγκριση τροχιάς και ταχύτητας του κέντρου μάζας του ισχίου στις δύο κατευθύνσεις για το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο σε Matlab και Adams .....	43
Σχήμα 3-9:	(A) Κέντρο μάζας ημικυκλικού πέλματος εκτός σώματος (B) Κέντρο μάζας κυκλικού πέλματος εντός σώματος .....	44
Σχήμα 3-10:	Μελέτη βηματισμού για διαφορετικούς επιλύτες .....	45
Σχήμα 3-11:	Μελέτη βηματισμού για διαφορετικά επιτρεπόμενα σφάλματα .....	45
Σχήμα 3-12:	Εστίαση σε μια περιοχή της καμπύλης μετατόπισης του ισχίου .....	46
Σχήμα 3-13:	Μελέτη βηματισμού για διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους .....	47

Σχήμα 3-14:	Μελέτη βηματισμού για διαφορετικές αποσβέσεις εδάφους .....	47
Σχήμα 3-15:	Μελέτη βηματισμού για διαφορετικούς εκθέτες δύναμης .....	48
Σχήμα 3-16:	Μελέτη βηματισμού για διαφορετικούς συντελεστές τριβής .....	48
Σχήμα 3-17:	Παράδειγμα κυλινδρικού εξαρτήματος .....	49
Σχήμα 3-18:	Τροχιά ισχίου μοντέλου με αδράνεια .....	49
Σχήμα 3-19:	Ταχύτητα ισχίου μοντέλου με αδράνεια .....	50
Σχήμα 4-1:	Εξαγωγή του SolidWorks μοντέλου σε αρχείο συμβατό με το λογισμικό Adams .....	53
Σχήμα 4-2:	Εναλλακτικοί σχεδιασμοί που αξιολογήθηκαν και απορρίφθηκαν .....	54
Σχήμα 4-3:	Το δίποδο ρομπότ σε φωτορεαλιστική απεικόνιση .....	55
Σχήμα 4-4:	Καμπύλες S-N για τις 4 διευθύνσεις ινών με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων .....	57
Σχήμα 4-5:	Καμπύλη S-N για τη μοντελοποίηση της κόπωσης των εξαρτημάτων από ABS .....	58
Σχήμα 4-6:	Συναρμολόγημα εσωτερικών ποδιών .....	58
Σχήμα 4-7:	Άνω εσωτερικό πόδι .....	59
Σχήμα 4-8:	Κάτω εσωτερικό πόδι .....	60
Σχήμα 4-9:	Πέλμα εσωτερικών ποδιών .....	60
Σχήμα 4-10:	Γωνίες πελμάτων του δίποδου με το έδαφος .....	61
Σχήμα 4-11:	Εύρος γωνίας πέλματος .....	61
Σχήμα 4-12:	Υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης .....	62
Σχήμα 4-13:	Δακτύλιος στήριξης ελατηρίου .....	62
Σχήμα 4-14:	Σφιγκτήρας προσαρμογής θέσης .....	63
Σχήμα 4-15:	Ο σφιγκτήρας προσαρμόζει τη θέση του ελατηρίου μέσω του άνω άκρου αυτού .....	63
Σχήμα 4-16:	Διατήρηση πρισματικής άρθρωσης .....	63
Σχήμα 4-17:	Ελατήριο .....	64
Σχήμα 4-18:	Συναρμολόγημα εξωτερικού ποδιού .....	65
Σχήμα 4-19:	Άνω εξωτερικό πόδι .....	66
Σχήμα 4-20:	Σύνδεσμος ένωσης και μετάδοσης κίνησης από το ένα εξωτερικό πόδι στο άλλο .....	67
Σχήμα 4-21:	Πέλμα εξωτερικού ποδιού .....	67
Σχήμα 4-22:	Συναρμολόγημα του άξονα ισχίου .....	67
Σχήμα 4-23:	Άξονας ισχίου σε τομή και σύνδεσή του με πόδια .....	68
Σχήμα 4-24:	Άξονας ισχίου σε τομή .....	68
Σχήμα 4-25:	Κύριος άξονας περιστροφής σε τομή .....	69
Σχήμα 4-26:	Α' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών σε όψη και σε τομή .....	70
Σχήμα 4-27:	Β' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών σε όψη και τομή .....	70
Σχήμα 4-28:	Σύνδεση εξωτερικών ποδιών .....	71
Σχήμα 4-29:	Σύνδεση εσωτερικών ποδιών .....	71
Σχήμα 4-30:	Κάλυμμα εδράνου (Bearing cap) .....	72
Σχήμα 4-31:	Αποστάτης (Spacer) .....	72
Σχήμα 4-32:	Ειδικό εργαλείο τοποθέτησης εδράνων κύλισης .....	73
Σχήμα 4-33:	Βασικές διαστάσεις του εδράνου κύλισης W61802 .....	74
Σχήμα 4-34:	Κέλυφος αισθητήρα IMU σε εξαντλημένο σχέδιο προβολής (exploded view) .....	75
Σχήμα 4-35:	Κέλυφος αισθητήρα IMU. Τοποθετείται κοντά στον άξονα του ισχίου και ανάμεσα στα εσωτερικά πόδια .....	75

Σχήμα 4-36:	Φωτορεαλιστική εικόνα του δίποδου ρομπότ με προσαρτημένες τις επιπρόσθετες μάζες .....	76
Σχήμα 4-37:	Επιπρόσθετη μάζα.....	76
Σχήμα 4-38:	Σχηματική εξήγηση της ανεξαρτησίας περιστροφών του ισχίου.....	77
Σχήμα 5-1:	Δυνάμεις επαφής και ελατηρίου εξαγόμενες από προσομοίωση στο λογισμικό Adams .....	80
Σχήμα 5-2:	Ασκούμενες δυνάμεις στο άνω εξωτερικό πόδι .....	80
Σχήμα 5-3:	Κατανομή τάσεων (MPa)στο άνω εξωτερικό πόδι.....	81
Σχήμα 5-4:	Ασκούμενες δυνάμεις στο άνω εσωτερικό πόδι.....	81
Σχήμα 5-5:	Κατανομή τάσεων (MPa) στο άνω εσωτερικό πόδι .....	82
Σχήμα 5-6:	Ασκούμενες δυνάμεις στο κάτω πόδι.....	82
Σχήμα 5-7:	Κατανομή τάσεων (MPa) στο κάτω πόδι .....	83
Σχήμα 5-8:	Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση υπό διάφορες γωνίες επαφής του πέλματος με το έδαφος .....	83
Σχήμα 5-9:	Κατανομή τάσεων (MPa) στο εξωτερικό πέλμα.....	84
Σχήμα 5-10:	Κατανομή τάσεων (MPa) στο εσωτερικό πέλμα .....	84
Σχήμα 5-11:	Ασκούμενες δυνάμεις και στηρίξεις στο υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης .....	85
Σχήμα 5-12:	Κατανομή τάσεων (MPa) στο υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης .....	85
Σχήμα 5-13:	Κατανομή τάσεων (MPa) στον κύριο άξονα περιστροφής – φάση απλής στήριξης των εσωτερικών ποδιών .....	86
Σχήμα 5-14:	Κατανομή τάσεων (MPa) στον κύριο άξονα περιστροφής – φάση απλής στήριξης των εξωτερικών ποδιών.....	86
Σχήμα 5-15:	Κατανομή τάσεων (MPa) στον κύριο άξονα περιστροφής – φάση διπλής στήριξης .....	87
Σχήμα 5-16:	Το λεπτομερές μοντέλο του SolidWorks σε περιβάλλον Adams .....	88
Σχήμα 5-17:	Γωνίες και γωνιακές ταχύτητες σκελών .....	90
Σχήμα 5-18:	Μετατόπιση ισχίου κατά τις διευθύνσεις x και y του βηματισμού.....	90
Σχήμα 5-19:	Ταχύτητα ισχίου κατά τις διευθύνσεις x και y του βηματισμού.....	91
Σχήμα 5-20:	Επιτάχυνση ισχίου κατά τις διευθύνσεις x και y του βηματισμού.....	91
Σχήμα 5-21:	Αναπτυσσόμενες δυνάμεις επαφής και ελατηρίου κατά το βηματισμό .....	92
Σχήμα 5-22:	Μεταβολή της επιτάχυνσης του ισχίου στην κατεύθυνση y με μεταβολή του κ .....	93
Σχήμα 5-23:	Μεταβολή της επιτάχυνσης του ισχίου στην κατεύθυνση y με αλλαγή του β.....	93
Σχήμα 5-24:	Αρχική θέση δίποδου σε πρόοψη, απόκλιση από την αρχική πορεία και συνέχεια βηματισμού .....	94
Σχήμα 5-25:	Το δίποδο μοντέλο σε στραμμένη πορεία λόγω διαφορετικού μήκους σκελών σε κάτοψη .....	95
Σχήμα 5-26:	Επίδραση συντελεστή τριβής στο μέσο μήκος βήματος .....	95
Σχήμα 5-27:	Μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη για διάφορους συντελεστές δυσκαμψίας.....	96
Σχήμα 6-1:	Το δοκιμαστικό εύκαμπτο σκέλος .....	98
Σχήμα 6-2:	Τοποθέτηση σκέλους στη μέγγενη και εναπόθεση πρότυπης μάζας .....	98
Σχήμα 6-3:	3D σχέδιο που προκύπτει από το λογισμικό .....	99
Σχήμα 6-4:	Το αρχείο stl του τρισδιάστατου μοντέλου χωρισμένο σε τρίγωνα, ώστε να διακριτοποιηθεί και να εισαχθεί για εκτύπωση.....	99
Σχήμα 6-5:	Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής του εργαστηρίου .....	100
Σχήμα 6-6:	Συσκευή απομάκρυνσης υποστηρικτικού υλικού.....	101

Σχήμα 6-7:	(A) Τοποθέτηση του τσωκ στο τραπέζι του CNC και εύρεση της αρχής συντεταγμένων (B) Σταθεροποίηση του τσωκ με χρήση σφιγκτήρων (C) Μηδενισμός κοππικών εργαλείων (D) Πρόσδεση τεμαχίου στο τσωκ και μηδενισμός (E) Κοπή τεμαχίου .....	102
Σχήμα 6-8:	Προσομοίωση κατεργασίας με οπτικοποίηση του τεμαχίου και του κοππικού εργαλείου.....	102
Σχήμα 6-9:	Η φυσική κατασκευή του δίποδου ρομπότ .....	103
Σχήμα 6-10:	Το δίποδο ρομπότ με τα υποστηρικτικά ελάσματα στα εξωτερικά σκέλη.....	104
Σχήμα 6-11:	Το δίποδο ρομπότ με τις πρόσθετες μάζες .....	104
Σχήμα 6-12:	Το έδαφος με τις νησίδες (stepping stones) .....	105
Σχήμα 6-13:	Χρήση υποστηρικτικής κοιλοδοκού για αύξηση της δυσκαμψίας .....	106
Σχήμα 6-14:	Χρήση ρυθμιστών θέσης για προσαρμογή του μήκους βήματος .....	106
Σχήμα 6-15:	Ο εκτοξευτής σε φωτορεαλιστική απεικόνιση και οι επιτυγχανόμενοι βαθμοί ελευθερίας .....	107
Σχήμα 6-16:	Αισθητήρας IMU DA14583 IoT της Dialog Semiconductor.....	107
Σχήμα 6-17:	Σύστημα συντεταγμένων αισθητήρα. Με “a” συμβολίζεται η επιτάχυνση, ενώ με “g” η γωνιακή ταχύτητα.....	108
Σχήμα 6-18:	Προσανατολισμός αισθητήρων IMU. (A) Τοποθέτηση αισθητήρα στο πέλμα (B) Τοποθέτηση αισθητήρα κοντά στο ισχίο.....	108
Σχήμα 6-19:	Η συνολική πειραματική διάταξη περιλαμβανομένου του εδάφους, του δίποδου ρομπότ και του εκτοξευτή.....	109
Σχήμα 6-20:	Παθητικός βηματισμός χωρίς τη χρήση εκτοξευτή.....	110
Σχήμα 6-21:	Παθητικός βηματισμός με τη χρήση εκτοξευτή .....	110
Σχήμα 6-22:	Επιταχύνσεις που καταγράφονται από τον αισθητήρα του ισχίου.....	111
Σχήμα 6-23:	Επιταχύνσεις που καταγράφονται από τον αισθητήρα του πέλματος .....	111
Σχήμα 6-24:	Γωνιακές ταχύτητες που καταγράφονται από τους αισθητήρες.....	111
Σχήμα 6-25:	Διαγράμματα σύγκρισης επιταχύνσεων ισχίου .....	112
Σχήμα 6-26:	Διαγράμματα σύγκρισης επιταχύνσεων πέλματος.....	112
Σχήμα 6-27:	Διαγράμματα σύγκρισης γωνιακών ταχυτήτων .....	113

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 2-1: Αδιάστατες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου.....	20
Πίνακας 3-1: Εκλεχθείσες τιμές των αδιάστατων παραμέτρων.....	42
Πίνακας 4-1: Μηχανικές ιδιότητες Αλουμινίου 5083.....	56
Πίνακας 4-2: Μηχανικές ιδιότητες πλαστικού ABS.....	56
Πίνακας 4-3: Μηχανικές ιδιότητες ακετάλης .....	56
Πίνακας 4-4: Εκθέτης και συντελεστής κόπωσης για διάφορες διευθύνσεις των ινών .....	57
Πίνακας 4-5: Εξαρτήματα εσωτερικών ποδιών .....	59
Πίνακας 4-6: Προδιαγραφές των τυποποιημένων εξαρτημάτων huco collar one piece clamps.....	64
Πίνακας 4-7: Εξαρτήματα εξωτερικών ποδιών.....	66
Πίνακας 4-8: Εξαρτήματα του άξονα ισχίου .....	69
Πίνακας 4-9: Προδιαγραφές επιλεχθέντων εδράνων κύλισης.....	74
Πίνακας 4-10: Εξαρτήματα πρόσθετης μάζας.....	77

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη του βηματισμού ενός δίποδου ρομπότ μέσω της κατασκευής αυτού, αλλά και την πειραματική επαλήθευση των προσομοιώσεων ενός απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου. Συγκεκριμένα οι μαθηματικές εξισώσεις και περιορισμοί που διέπουν το δίποδο παθητικό βηματισμό αντικαθίστανται από την ίδια την κατασκευή, η οποία αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον. Βασικό σημείο της εργασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τις αριθμητικές προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab, τις δυναμικές προσομοιώσεις σε περιβάλλον MSC Adams και τις τελικές πειραματικές μετρήσεις.

Σκοπός των δίποδων ρομπότ είναι η δυνατότητα μετακίνησής τους και πλοήγησής τους σε μη ομαλά και μη δομημένα εδάφη. Αν καταστεί δυνατή η εκμετάλλευση αυτής της ικανότητάς τους, τότε θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις διαχείρισης καταστροφών, στην εξερεύνηση του διαστήματος ή ακόμα και στη διεκπεραίωση τετριμμένων εργασιών σε καθημερινή βάση. Αυτό είναι και το βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των τροχοφόρων ρομπότ, τα οποία για τη λειτουργία τους απαιτούν ομαλό έδαφος και διαρκή επαφή με αυτό. Επίσης, συγκριτικά με τα τετράποδα ρομπότ, τα δίποδα υπερτερούν στο γεγονός ότι απαιτούν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς επενεργείται μικρότερος αριθμός ποδιών, αλλά και είναι εν γένει πιο συμπαγή όσον αφορά το μέγεθος, με αποτέλεσμα να μπορούν να εργασθούν σε αρκετά στενούς χώρους. Ακόμη τα δίποδα είναι περισσότερο ανθρωπομορφικά και επομένως θα είναι ευκολότερο να αλληλοεπιδράσουν με τον άνθρωπο και να λειτουργήσουν σε ανθρωπογενή περιβάλλοντα.

Ειδική κατηγορία των δίποδων ρομπότ αποτελούν τα παθητικά δίποδα, τα οποία εξαιτίας της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσής τους προσφέρουν πολλές προοπτικές για τη δημιουργία αποδοτικών επενεργούμενων δίποδων ρομπότ. Τα παθητικά δίποδα παρουσιάζουν τη δυνατότητα βαδίσματος σε κατηφορικό έδαφος, το οποίο παίζει το ρόλο της εισόδου ενέργειας. Ο παθητικός αυτός βηματισμός μπορεί εύκολα να οδηγηθεί στην αστάθεια, καθώς η δυναμική που διέπει τα δίποδα παθητικά ρομπότ είναι μη γραμμική και υβριδική. Η γνώση και η μελέτη της δυναμικής δίνει τη δυνατότητα χειρισμού και ελέγχου του βηματισμού, διατηρώντας την ενεργειακή κατανάλωση σε χαμηλά επίπεδα.

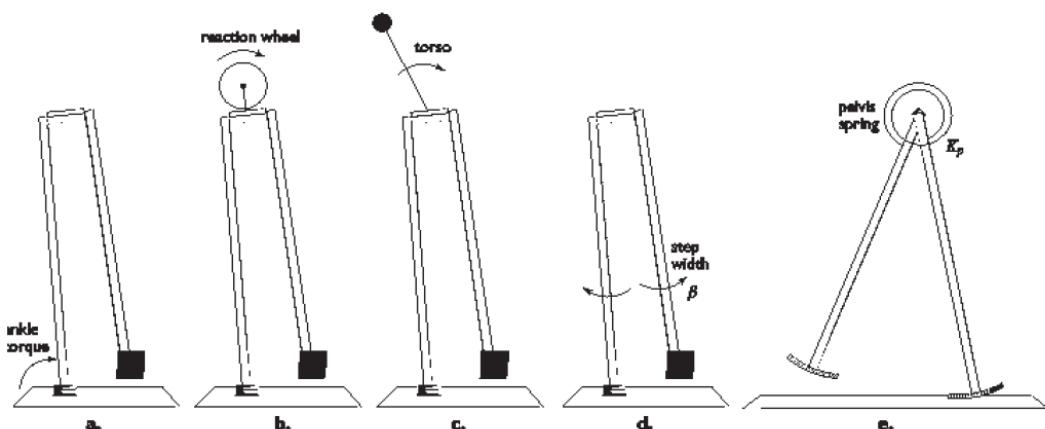
Τελικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός δίποδου ρομπότ με ημικυκλικά πέλματα, χωρίς γόνατο, με ύπαρξη γραμμικού συστήματος ελατηρίου-αποσβεστήρα για την ενδοτικότητα του ποδιού και χωρίς επενέργηση, ώστε να ελεγχθεί ο παθητικός βηματισμός του. Ο απλουστευμένος αυτός σχεδιασμός είναι επεκτάσιμος: μπορεί να υποδεχτεί σε μεταγενέστερο στάδιο κινητήρες που θα τον επενεργούν, αλλά και υποδοχή για τη δημιουργία άρθρωσης γονάτου. Επίσης ο σχεδιασμός στηρίζεται κυρίως σε σπονδυλωτή μορφή, έτσι ώστε να μπορεί να συναρμολογείται και να αποσυναρμολογείται εύκολα, να μπορούν να δοκιμασθούν διαφορετικής γεωμετρίας πέλματα εκτός των ημικυκλικών και να μπορούν να αλλάζουν σχετικά εύκολα οι συνθήκες τριβής μεταξύ του πέλματος και του εδάφους. Τα πειραματικά αποτελέσματα σε συνδυασμό με τη γνώση της εμβιομηχανικής του ανθρώπινου βηματισμού θα αποτελέσουν προοίμιο για την ανάπτυξη προσθετικών σκελών.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση – State of the Art biped robots

Η μελέτη και κατασκευή δίποδων ρομπότ έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα εδώ και αρκετά χρόνια. Η ερευνητική αξιολόγηση αυτών ξεκίνησε από απλούς παθητικούς μηχανισμούς, οι οποίοι μέσω της δυναμικής τους επετύγχαναν ευσταθείς βηματισμούς. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν πολυπλοκότερα ενεργητικά ρομπότ με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και κατ' επέκταση περισσότερες δυνατότητες κίνησης. Φυσικά οι μελέτες αυτές συνεχίζουν να διεξάγονται τόσο σε θεωρητικό-μαθηματικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο προσομοιώσεων και πειραμάτων.

Από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με αυτόν τον επιστημονικό τομέα ήταν οι Mochon και McMahon [1], οι οποίοι ισχυρίσθηκαν ότι δεν χρειάζονται μυϊκές ροπές στους συνδέσμους των κάτω άκρων, εφόσον έχουν αποδοθεί σε αυτούς αρχικές θέσεις και ταχύτητες, προκειμένου να επιτευχθεί παθητικός βηματισμός. Στη συνέχεια ο McGeer [2] μελέτησε εκτενέστατα μεγάλη ποικιλία δίποδων μηχανισμών ξεκινώντας από απλές περιπτώσεις, όπως αυτή του ποδιού χωρίς γόνατο και συγκεντρωμένες μάζες σε ισχίο και πέλματα και προχώρησε σε πολυπλοκότερους σχηματισμούς με την προσθήκη γονάτου, με τη χρησιμοποίηση ημικυκλικών πελμάτων και τη διερεύνηση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν το μοντέλο, όπως η ακτίνα του πέλματος, η μάζα του ισχίου, η ύπαρξη απόσβεσης. Επίσης μελέτησε παθητικούς μηχανισμούς τόσο σε μαθηματικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο με την κατασκευή αυτών και διερεύνησε την επίδραση της επενέργησης σε αυτούς.

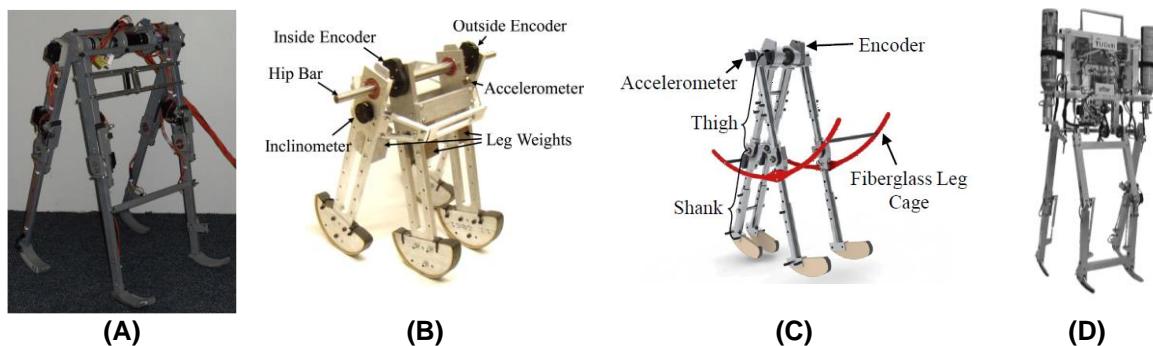
Από κατασκευαστικής σκοπιάς, πολύ σημαντική ήταν η συμβολή των Collins και Ruina [3] στο χώρο των δίποδων ρομπότ. Οι ίδιοι σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα πλήρως λειτουργικό δίποδο το οποίο περιλαμβάνει κορμό, ισχίο, γόνατο, αστράγαλο, ενδοτικά σκέλη και ειδικής διαμόρφωσης πέλματα που συνεισφέρουν στην ισορροπία κατά την πλευρική κατεύθυνση. Η σταθεροποίηση των διπόδων κατά την πλευρική κατεύθυνση κρίθηκε ιδιαιτέρως σημαντική και είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση της επενέργησης στους αστραγάλους και την όσο το δυνατόν περισσότερο ανεξαρτησία από υποστηρικτικούς μηχανισμούς των ρομπότ κατά την κίνηση. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη ο Kuo [4] πρότεινε μεθόδους πλευρικής σταθεροποίησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1.



**Σχήμα 1-1:** Πέντε πιθανοί τρόποι πλευρικής σταθεροποίησης. (a) Ασκηση ροπής στον αστράγαλο (b) Σφόνδυλος αντίδρασης (c) Κίνηση κορμού (d) Αύξηση πλάτους βήματος (e) Χρήση στρεπτικού ελατηρίου [4].

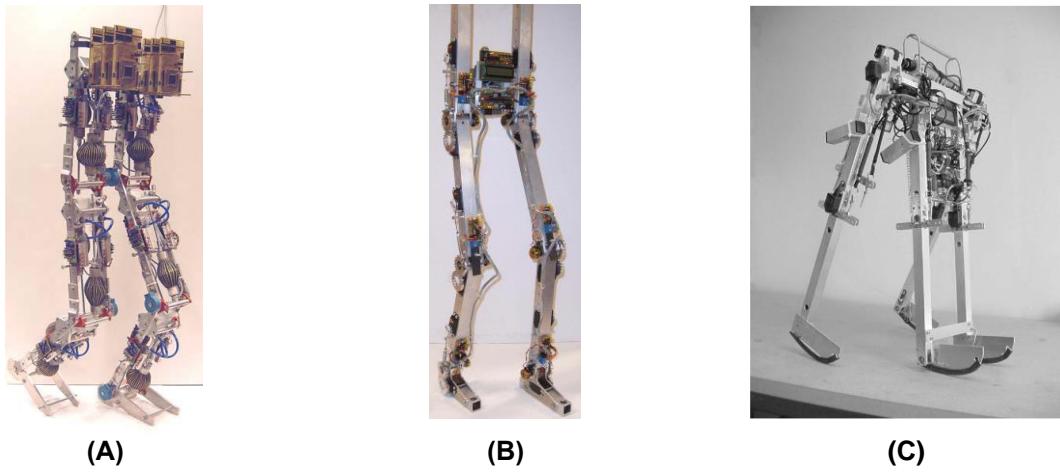
Περαιτέρω μελετήθηκε από τους Beigzadeh et al. [5] [6] και η συμπεριφορά τέτοιων μηχανισμών κατά την αλλαγή κατεύθυνσης της πορείας τους κάτι που δίνει τη χροιά τρισδιάστατης ανάλυσης αυτών.

Πλέον η τεχνολογία γύρω από τα δίποδα ρομπότ έχει εξελιχθεί σημαντικά και μπορεί να συναντήσει κανείς πολύπλοκους και ακριβούς μηχανισμούς που επενεργούνται από πολύπλοκα σχήματα ελέγχου. Οι Stopforth et al. [7] σχεδίασαν και επαλήθευσαν πειραματικά ένα δίποδο με ζεύγη ποδιών και μηχανισμό κλειδώματος του γονάτου. Οι Koop και Wu [8] μοντελοποίησαν τον παθητικό βηματισμό λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο επαφής Hunt-Crossley και το μοντέλο τριβής LuGre και με βάση αυτά επικύρωσαν τη θεωρία τους με την κατασκευή του μοντέλου. Οι Rushdi et al. [9] κατασκεύασαν το δίποδο ρομπότ ζεύγους ποδιών Dexter MK III, ώστε να μελετήσουν πειραματικά το βηματισμό του κατά την αλλαγή παραμέτρων, όπως είναι το κέντρο μάζας του ρομπότ, το μέγεθος των πελμάτων κ.ά. Επίσης χρησιμοποίησαν σκελετό από ίνες γυαλιού προκειμένου να κρατήσουν συγχρονισμένα τα εξωτερικά πόδια του μηχανισμού. Οι Wisse et al. [10] κατασκεύασαν το δίποδο ρομπότ Max το οποίο περιλαμβάνει άνω σώμα συνδεδεμένο με ένα μηχανισμό διχοτόμησης στο ισχίο.



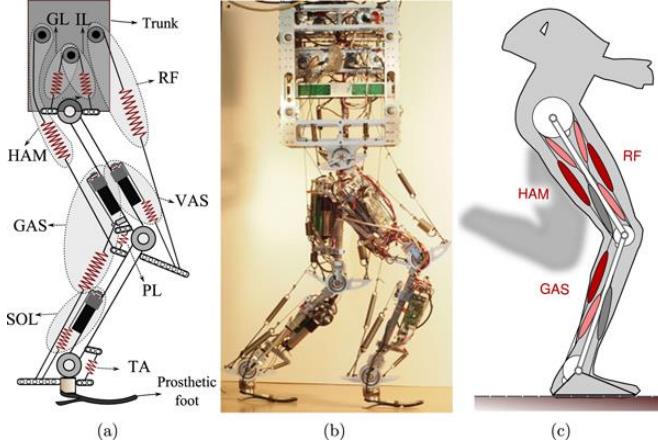
Σχήμα 1-2: Δίποδα ρομπότ υψηλής τεχνολογίας, (Α) Ρομπότ των Stopforth et al. [7] (Β) Ρομπότ των Koop και Wu [8] (C) Το ρομπότ Dexter MK III [9] (D) Το πρωτότυπο ρομπότ Max [10].

Πρωτοπορία σημειώνεται και ως προς τα τεχνολογικά στοιχεία που έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς επιστήμονες όσον αφορά θέματα ενδοτικότητας και απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, ελατήρια και αποσβεστήρες μεταβλητών ιδιοτήτων βρίσκουν εφαρμογή σε τέτοιου είδους μηχανισμούς. Οι Verrelst et al. [11] χρησιμοποιούν ως επενέργηση μεμβράνες οι οποίες εκτείνονται ακτινικά και συρρικνώνονται αξονικά κατά τη διόγκωσή τους, ώστε να μεταφέρουν ισχυρές ελκτικές δυνάμεις κατά τη διαμήκη κατεύθυνση και ονομάζονται πτυχωτοί πνευματικοί τεχνητοί μύες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε το δίποδο ρομπότ Lucy. Οι Ham et al. [12] χρησιμοποίησαν για το δίποδο ρομπότ Veronica περιστροφικό επενεργητή προσαρμοζόμενης ενδοτικότητας που είναι γνωστός ως MACCEPA. Οι Wisse et al. [13] παρέχουν ενέργεια στο ρομπότ Mike, μέσω των μυών McKibben που αποτελούν μια υποκατηγορία των πτυχωτών πνευματικών τεχνητών μυών που περιεγράφηκαν παραπάνω. Ακόμη στο [14] χρησιμοποιείται αποσβεστήρας μεταβλητής σταθεράς απόσβεσης, γνωστός ως MR damper, προκειμένου να αποδιθεί η κατάλληλη απόσβεση με ενεργητικό τρόπο στο δίποδο ρομπότ.



**Σχήμα 1-3: Δίποδα ρομότ τελευταίας τεχνολογίας, (Α) Το ρομπότ Lucy [11] (Β) Το ρομπότ Veroonica [12] (C) Το ρομπότ Mike [13].**

Επίσης πολλές μελέτες εστιάζουν στο πως θα πρέπει να μοντελοποιηθεί η κάθε λειτουργία του σώματος και ειδικότερα των σκελών, ώστε αυτό στη συνέχεια να μπορεί να αξιοποιηθεί από την επιστημονική κοινότητα της ρομποτικής. Συγκεκριμένα οι Sharbafi et al. [18] μελέτησαν πώς η μορφολογία του σώματος σε συνδυασμό με το σχεδιασμό κατάλληλων επενεργητών μπορούν να διευρύνουν τη λειτουργικότητα του ανθρωπομορφικού ποδιού. Γι' αυτό το σκοπό ανέπτυξαν το BioBiped3, το οποίο προσεγγίζει βιολογικά εμπνευσμένα, συμβατά μυοσκελετικά ρομπότ.



**Σχήμα 1-4: Το BioBiped3 (a) Σχηματική αναπαράσταση του κορμού, ενός ποδιού, του πέλματος και των επενεργητών (b) Το πραγματικό ρομπότ (c) Σχηματική αναπαράσταση της μίμησης της βιολογικής κίνησης του BioBiped3 [18].**

Τέλος αναφέρεται ως ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα στο χώρο των δίποδων ρομπότ το ATRIAS [15], το οποίο συνδυάζει σκόπιμα παθητική δυναμική με συμπληρωματικούς αλγορίθμους ελέγχου και είναι ικανό να περπατήσει και να τρέξει σε διάφορες ταχύτητες και υπό διαφορετικές συνθήκες εδάφους και εμποδίων χωρίς εξωτερική υποστήριξη.



**Σχήμα 1-5: Το δίποδο ρομπότ ATRIAS στο DARPA Robotics Challenge [15].**

Λαμβάνοντας υπόψη τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε ανωτέρω, καθώς και παίρνοντας έμπνευση από τα ήδη κατασκευασμένα ρομπότ τελευταίας τεχνολογίας δημιουργείται η πρόκληση για την κατασκευή ενός δίποδου το οποίο ως πρωτότυπο θα είναι σχετικά απλό και θα συνδυάζει κάποια πλεονεκτήματα που κρίνονται επιθυμητά σε αυτόν το χώρο.

### 1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε έξι ενότητες, με διάφορες υποενότητες για την κάθε μία.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την εκπόνηση και κατανόηση της παρούσας εργασίας. Έτσι παρέχονται γνώσεις σχετικές τόσο με το ανθρώπινο βάδισμα και την υπάρχουσα μοντελοποίηση του ποδιού, όσο και με στοιχεία της μηχανολογίας, όπως η μοντελοποίηση της επαφής δύο σωμάτων και η αντοχή των εξαρτημάτων σε καταπονήσεις.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει την εισαγωγή του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου στο λογισμικό προσομοιώσεων MSC Adams και συγκρίνει τα αποτελέσματα με αντίστοιχη μοντελοποίηση στο προγραμματιστικό πακέτο Matlab.

Ο λεπτομερής μηχανολογικός σχεδιασμός περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, στο οποίο εξηγείται με σαφήνεια το πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο, τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται και η λειτουργικότητα του καθενός. Για την επίτευξη αυτών ακολουθούνται κάποιες βασικές αρχές σχεδιασμού, οι οποίες ορίζονται στην αρχή του κεφαλαίου.

Το Κεφάλαιο 5 αξιολογεί το λεπτομερή σχεδιασμό. Η αξιολόγηση αυτή αποτελεί το τελικό στάδιο πριν την έναρξη κατασκευής της διάταξης. Χωρίζεται σε δύο μέρη, την κατασκευαστική αξιολόγηση, στην οποία ελέγχονται τα εξαρτήματα ως προς τις φορτίσεις που δέχονται, και τη λειτουργική αξιολόγηση, στην οποία το πλέον λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο προσομοιώνεται σε παθητικό βάδισμα σε κεκλιμένο επίπεδο υπό διάφορες συνθήκες.

Εφόσον έχει επικυρωθεί και θεωρητικά η επάρκεια του δίποδου, υλοποιείται η κατασκευή αυτού, η οποία αναλύεται στο Κεφάλαιο 6. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι όχι μόνο να σχεδιάσει μια παθητική κατασκευή, αλλά και να την υποβάλλει σε πείραμα παθητικού βηματισμού. Έτσι στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται ολόκληρη η πειραματική διάταξη, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα του πειράματος.

Τέλος στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται κάποια βασικά συμπεράσματα και προτείνεται μελλοντική εργασία σχετικά με τη βελτίωση του δίποδου ρομπότ, την αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιασμών, αλλά και την επενέργηση αυτού.

## 2 Στοιχεία Θεωρίας

### 2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα **Θεωρητικά στοιχεία** που χρειάσθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς επίσης και τα μαθηματικά, φυσικά και σχεδιαστικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλεία για τη μελέτη και τον σχεδιασμό του δίποδου ρομπότ. Το κεφάλαιο αυτό θέτει το υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η πορεία της εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, στην Ενότητα 2.2 αναλύεται ο κύκλος του ανθρώπινου βαδίσματος, επεξηγείται η σχετική ορολογία που χρησιμοποιείται από το πεδίο της εμβιομηχανικής και γίνεται ο διαχωρισμός του βαδίσματος σε επιμέρους φάσεις.

Στην Ενότητα 2.3 παρουσιάζεται μια βασική μοντελοποίηση του ανθρωπίνου σώματος, με εστίαση στο ανθρώπινο πόδι και γίνεται αναφορά στο ήδη υπάρχον απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. για το δίποδο βάδισμα, το οποίο αποτέλεσε το σημείο έναρξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον επεξηγείται η μέθοδος “κλιμάκωσης”, με χρήση της οποίας προέκυψαν οι τελικές διαστάσεις της δίποδης κατασκευής.

Στην Ενότητα 2.4 αναλύονται τα σημαντικότερα μοντέλα περιγραφής της κρούσης και της τριβής μεταξύ δύο σωμάτων, διότι τα δύο αυτά φαινόμενα παίζουν κομβικό ρόλο στην επίτευξη του παθητικού βηματισμού.

Τέλος η Ενότητα 2.5 περιλαμβάνει τα θεωρητικά στοιχεία που οφείλει να έχει κανείς υπόψη του για τον έλεγχο μιας κατασκευής σε στατική, δυναμική αντοχή, αντοχή κόπωσης και λυγισμού. Επιπλέον παρουσιάζεται η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αποτελούν εργαλείο υλοποίησης των παραπάνω ελέγχων.

### 2.2 Ο κύκλος του ανθρώπινου βαδίσματος

Το δίποδο ρομπότ που θα αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία εμπνέεται από τον ανθρώπινο σχεδιασμό και μιμείται, σε περιορισμένο βαθμό, το ανθρώπινο βάδισμα. Επομένως η παρατήρηση του ανθρώπινου βαδίσματος κρίνεται αναγκαία προτού εκκινήσει ο σχεδιασμός του δίποδου ρομπότ.

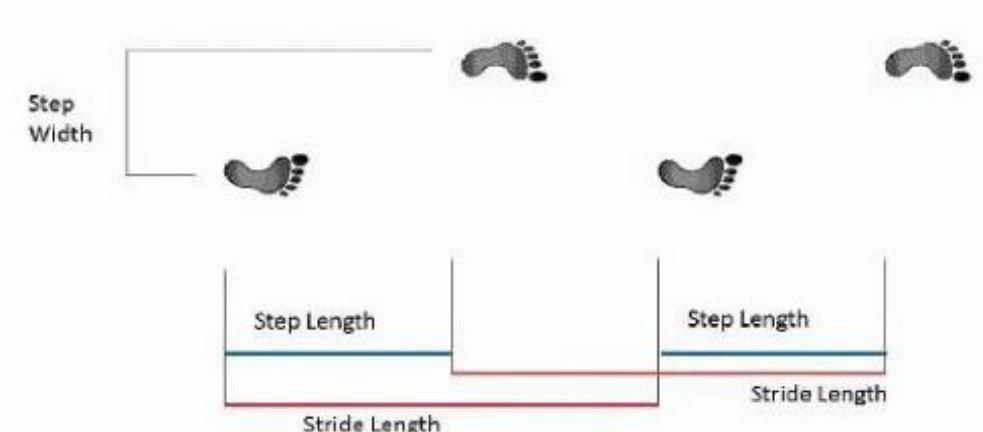
Η ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος αφορά τη μελέτη της μετακίνησης του ανθρώπου. Προκειμένου να αναλυθεί και να ποσοτικοποιηθεί το πώς κάποιος περπατά, είναι απαραίτητο να απομονωθεί η **συντομότερη, μοναδική και επαναλαμβανόμενη εργασία κατά τη διάρκεια του βαδίσματος**. Αυτή η εργασία ονομάζεται **κύκλος βαδίσματος** και μπορεί να μετρηθεί από ένα συμβάν του ενός πέλματος μέχρι αυτό να επαναληφθεί για το ίδιο πέλμα. Ο κύκλος βαδίσματος χωρίζεται σε δύο κύριες φάσεις, τη **φάση στάσης (stance phase)**, που αποτελείται από το χρόνο που το πέλμα βρίσκεται στο έδαφος και τη **φάση αιώρησης (swing phase)**, που αποτελείται από το χρόνο που το πέλμα βρίσκεται στον αέρα. Οι δύο φάσεις εναλλάσσονται για κάθε κάτω άκρο.

Η παρατήρηση των χωρικών και χρονικών χαρακτηριστικών των δύο ανθρωπίνων σκελών επιτρέπει έναν εναλλακτικό, συνδυαστικό χαρακτηρισμό των φάσεων. Όταν και τα δύο σκέλη βρίσκονται ταυτόχρονα σε φάση στάσης, τότε πρόκειται για τη **φάση διπλής στήριξης**. Όταν μόνο το ένα σκέλος βρίσκεται σε φάση στάσης, τότε αυτή αποκαλείται και **φάση απλής στήριξης**.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι ορισμοί κάποιων βασικών χαρακτηριστικών:

- **Μήκος βήματος:** Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο αντίστοιχων συνεχόμενων σημείων επαφής της πτέρνας του ανθρώπου με το έδαφος. Σε ένα κανονικό βάδισμα το δεξί μήκος βήματος ισούται με το αριστερό.
- **Μήκος διασκελισμού:** Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων σημείων επαφής της πτέρνας του ίδιου πέλματος του ανθρώπου με το έδαφος. Σε ένα κανονικό βάδισμα το μήκος διασκελισμού ισούται με το διπλάσιο του μήκους βήματος.
- **Πλάτος βήματος:** Ορίζεται ως η πλευρική απόσταση μεταξύ των βημάτων των δύο πελμάτων.
- **Ρυθμός περπατήματος:** Ορίζεται ως ο αριθμός των βημάτων στη μονάδα του χρόνου.

Οι παραπάνω ορισμοί γίνονται καλύτερα κατανοητοί μέσω του Σχήματος 2-1.



**Σχήμα 2-1: Σχηματική αναπαράσταση των ορισμών μήκους βήματος (step length), μήκους διασκελισμού (stride length) και πλάτους βήματος (step width).**

Αναλυτικότερα οι φάσεις του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος μπορούν να υποδιαιρεθούν σε επιμέρους κινήσεις.

#### Φάση στάσης (Stance phase)

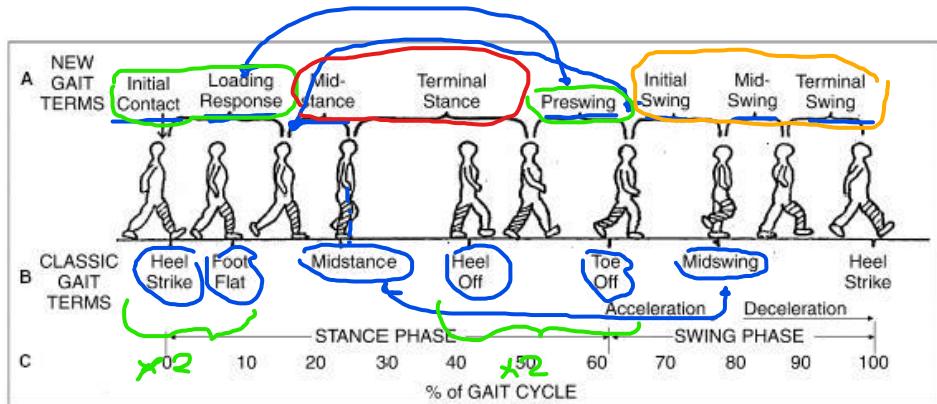
Η φάση στάσης αποτελεί περίπου το 60% του κύκλου και χωρίζεται σε πέντε επιμέρους κινήσεις:

- a. **Αρχική επαφή (Initial contact – Heel strike):** Κατά την αρχική επαφή, η πτέρνα είναι το πρώτο σημείο του πέλματος που ακουμπά το έδαφος.
- b. **Απόκριση φόρτωσης (Loading response):** Σε αυτή τη φάση, το βάρος μεταφέρεται στο σκέλος που μόλις εισήλθε στη φάση στάσης.
- c. **Μέση στάση (Mid stance):** Περιλαμβάνει την ευθυγράμμιση και την εξισορρόπηση του βάρους του σώματος.
- d. **Τερματική στάση (Terminal stance):** Σε αυτή τη φάση η πτέρνα χάνει επαφή με το έδαφος, ενώ τα δάχτυλα του ποδιού ακουμπούν ακόμα σε αυτό.
- e. **Απομάκρυνση των δαχτύλων από το έδαφος (Toe off):** Σε αυτή τη φάση τα δάχτυλα του πέλματος αποχωρίζονται το έδαφος. Αποτελεί το τέλος της φάσης στάσης και σηματοδοτεί την έναρξη της φάσης αιώρησης.

### Φάση αιώρησης (Swing phase)

Η φάση αιώρησης είναι το μέρος του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος κατά το οποίο δεν είναι σε επαφή με το έδαφος και αιωρείται στον αέρα. Αποτελεί περίπου το 40% του κύκλου και χωρίζεται σε τέσσερις επιμέρους φάσεις, την προ-αιώρηση (pre-swing), την αρχική αιώρηση (initial swing), τη μέση αιώρηση (mid swing) και την τερματική αιώρηση (terminal swing).

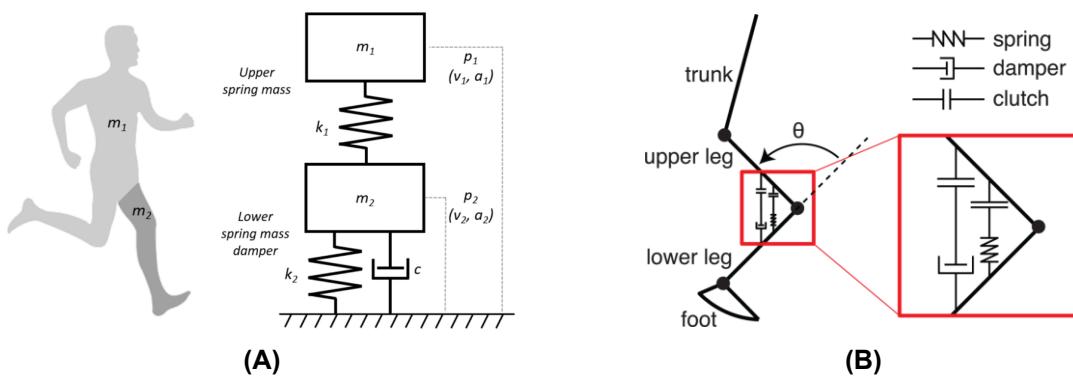
Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται και σχηματικά η κάθε φάση του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος, καθώς και το ποσοστό του χρόνου που αυτή καταλαμβάνει στο συνολικό κύκλο.



Σχήμα 2-2: Οι φάσεις του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος.

### 2.3 Το μηχανικό μοντέλο του ανθρώπινου ποδιού και το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου

Το ανθρώπινο σώμα με την πολύπλοκη κατανομή μάζας, τις τρισδιάστατες αρθρώσεις του και την μυική επενέργηση σε αυτές αποτελεί σύνθετη διάταξη, και η ακριβής αποτύπωσή του σε μηχανικό μοντέλο θα ήταν περίπλοκη, ενώ οι αντίστοιχες υπολογιστικές προσομοιώσεις βηματισμού θα ήταν χρονοβόρες και υπολογιστικά ακριβές. Κατ' αντίστοιχία με τις βασικές αρχές μοντελοποίησης συστημάτων, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης της πολυπλοκότητας του μοντέλου, με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της λειτουργικής ομοιότητάς του με το αρχικό σύστημα. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3, στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί από πολύ απλά μοντέλα, όπως ένα σύστημα δύο μαζών με ελατήρια και αποσβεστήρες για ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα (Α), έως και περισσότερο σύνθετα, όπως η τριαρθρωτή διάταξη με κορμό, γόνατο και πέλμα (Β) για την μοντελοποίηση ενός κάτω άκρου.

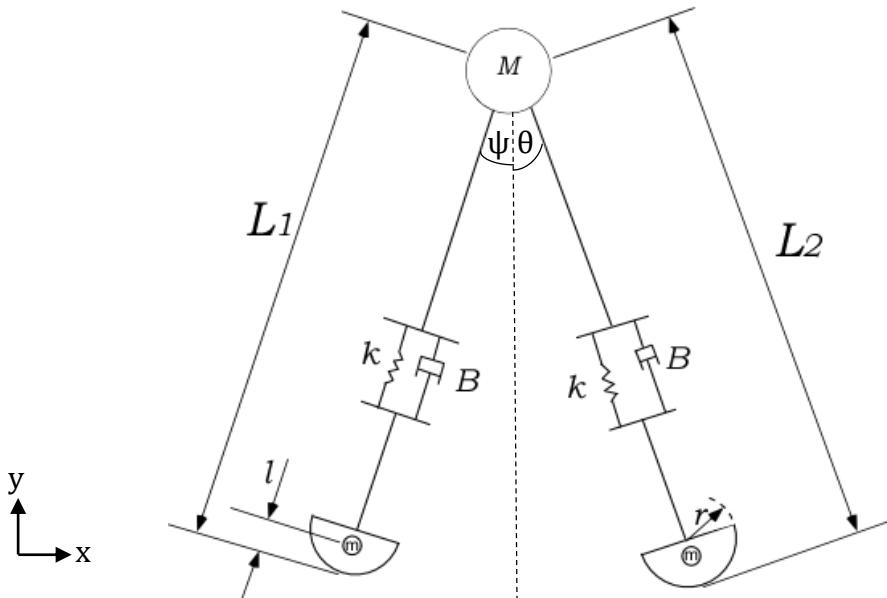


Σχήμα 2-3: Μοντελοποίηση του ανθρωπίνου σώματος με εύκαμπτα στοιχεία. (Α) Απλοποιημένο μοντέλο για ολόκληρο το σώμα (Β) Συνεισφορά του γονάτου στη δυσκαμψία των σκελών.

Η μελέτη και η κατασκευή της τρισδιάστατης διάταξης σε αυτή την εργασία στηρίζεται στην ανάλυση του απλοποιημένου μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) του Ε.Μ.Π. και αποτελείται από δύο ενδοτικά σκέλη συνδεδεμένα με άρθρωση στο ισχίο μάζας  $M$ , με σημειακές μάζες  $m$  σε πέλματα ημικυκλικής διαμόρφωσης [16]. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-4.

Τα ενδοτικά σκέλη έχουν μοντελοποιηθεί μέσω επιλογής κατάλληλων σταθερών ελατηρίου  $k$  και απόσβεσης  $B$ . Αυτό έχει γίνει, διότι ενδιαφέρει μέσω της εν λόγω μελέτης να προκύψουν συμπεράσματα, τα οποία θα μπορούν να έχουν επεκτάσεις στον ανθρώπινο βηματισμό. Για το λόγο αυτό, γίνεται προσπάθεια προσέγγισης της ενδοτικότητας των ποδιών του ανθρώπου μέσω τεχνολογικών στοιχείων, όπως το σύστημα ελατηρίου-αποσβεστήρα. **Η γραμμική ενδοτικότητα των σκελών αντικαθιστά μερικώς την ύπαρξη γονάτου**, το οποίο στον άνθρωπο επίσης προσδίδει μια ενδοτικότητα κατά τον βηματισμό.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δικαιολογείται η μορφή που έχει αποδοθεί στο απλοποιημένο μοντέλο του ΕΑΕ.



**Σχήμα 2-4: Το μονογραμμικό μοντέλο του δίποδου ρομπότ.**

Σε αυτό το μοντέλο έχουν ληφθεί για διευκόλυνση της ανάλυσης ορισμένες απλοποιήσεις, οι οποίες στο πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο δεν μπορούν να αμεληθούν. Οι βασικότερες από αυτές είναι το γεγονός ότι οι μάζες **θεωρούνται σημειακές και συγκεντρωμένες στα πέλματα ( $m$ ) και το ισχίο ( $M$ )**, δεν λαμβάνεται υπόψη η ροπή αδράνειας γύρω από τις σημειακές μάζες, δεν λαμβάνεται υπόψη η τρίτη διάσταση (δηλαδή τα μήκη κατά την έννοια του πάχους), ενώ τα **στοιχεία ελαστικότητας και απόσβεσης θεωρούνται ιδανικά και γραμμικά ( $F_k = k \cdot x$ ,  $F_B = B \cdot \dot{x}$ )**.

Η αρχική ανάλυση έχει γίνει για  $M = 80\text{kg}$  και  $L_{nat} = 1\text{m}$ , ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένες προδιαγραφές για τα υπόλοιπα βασικά μεγέθη, μέσω μιας διαδικασίας αδιαστατοποίησης [25], οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1.

**Πίνακας 2-1: Αδιάστατες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου.**

Όνομασία παραμέτρου	Σύμβολο	Ορισμός
Συντελεστής κύλισης	$\rho$	$\rho = \frac{r}{L_{nat}}$
Λόγος μάζών	$\mu$	$\mu = \frac{m}{M}$
Συντελεστής κατανομής μάζας πέλματος	$\lambda$	$\lambda = \frac{l}{L_{nat}}$
Αδιάστατη σταθερά ελατηρίου	$\kappa$	$\kappa = \frac{k \cdot L_{nat}}{M \cdot g}$
Αδιάστατη σταθερά απόσβεσης	$\beta$	$\beta = \frac{B}{M} \sqrt{\frac{L_{nat}}{g}}$

### 2.3.1 Κλιμάκωση μάζας και διαστάσεων

Προκειμένου να αποφασισθεί η μάζα και το συνολικό ύψος του δίποδου ρομπότ ακολουθείται μια προσεγγιστική μέθοδος “Κλιμάκωσης”. Σύμφωνα με αυτή θεωρείται πως η κατασκευή περικλείεται σε έναν κύβο όγκου  $V_{box}$ , ακμής ίσης με το συνολικό ύψος  $L_{nat}$ . Μειώνοντας λοιπόν τη βασική διάσταση σε  $L_{nat}^*$ , μειώνεται κυβικά και η μάζα από  $M$  σε  $M^*$ .

Τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζουν άμεσα τις απαιτήσεις εξωτερικής πρόσδοσης ενέργειας. Με αυτόν τον γνώμονα επιδιώκεται να δημιουργηθεί ένα πρώτο πρωτότυπο το οποίο δεν θα έχει πολύ υψηλές απαιτήσεις εξωτερικής ροπής και ισχύος, επομένως επιλέγεται:

$$L_{nat}^* = \frac{L_{nat}}{3} = 0.333m \quad (2-1)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη μέθοδο “Κλιμάκωσης” θεωρείται ότι η πυκνότητα  $d$  της διάταξης παραμένει περίπου σταθερή. Η πρόταση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι ο κύβος στον οποίο περικλείεται το ρομπότ αποτελείται από δομικά στοιχεία, όπως αλουμίνιο και ABS, καλώδια και αέρα, τα οποία προκαλούν μια ισοδύναμη σταθερή πυκνότητα.

Ωστόσο επειδή η ακμή του κύβου υποτριπλασιάστηκε, για τη μάζα που προκύπτει θα έχουμε:

$$M^* = d \cdot V_{box}^* = d \cdot L_{nat}^{*3} = d \cdot \frac{L_{nat}^3}{3^3} = \frac{M}{3^3} \approx 3kg \quad (2-2)$$

Αυτός ο υπολογισμός αποτελεί μόνο μια ένδειξη των μεγεθών που αναμένεται να προκύψουν κατά το σχεδιασμό, δεν σημαίνει ότι θα πρέπει οι διαστάσεις να τηρηθούν επακριβώς. Έτσι τελικά θα επιλεχθεί η συνολική μάζα να είναι μικρότερη (περίπου 1 kg), έχοντας όμως τη δυνατότητα για αύξηση αυτής με πολύ μικρές τροποποιήσεις. Οι λόγοι για τους οποίους ακολουθείται αυτός ο τρόπος σκέψης αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

Οι υπόλοιπες διαστάσεις προκύπτουν με βάση τις αδιάστατες παραμέτρους, όπως έχουν προκύψει από τη μαθηματική ανάλυση σύμφωνα με το [16]. Ωστόσο από κατασκευαστικής σκοπιαίς αποδείχθηκε ανέφικτο να τηρηθούν ακριβώς οι ονομαστικές τιμές που είχαν εκλεχθεί για το μαθηματικό μοντέλο, καθώς προέκυπταν περιορισμοί σχετικά με την επιλογή των χρησιμοποιούμενων υλικών, τις ελάχιστες διαστάσεις που θα μπορούσαν να έχουν τα εξαρτήματα ώστε να αντέχουν τις απαραίτητες φορτίσεις, αλλά και σχετικά με την ομαλή διεκπεραίωση των πειραμάτων. Για τους λόγους αυτούς ήταν απαραίτητη η απόκλιση από τις ονομαστικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου και πραγματοποιήθηκαν κάποιες αλλαγές προκειμένου το πλήρες μοντέλο να είναι λειτουργικά και κατασκευαστικά υλοποιήσιμο.

## 2.4 Μοντελοποίηση επαφής

Μια από τις βασικότερες δυνάμεις που καταπονούν το δίποδο κατά τη διάρκεια του βηματισμού αναπτύσσεται στην επαφή των πελμάτων με το έδαφος. Παράλληλα όμως η τριβή που αναπτύσσεται κατά την επαφή αποτελεί και το βασικό μηχανισμό που εξασφαλίζει το βάδισμα. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητο να μοντελοποιηθεί η επαφή με ακρίβεια στις προσομοιώσεις, ώστε να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα.

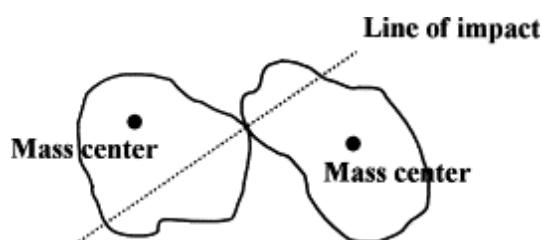
Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα που επικρατούν για την πλήρη μοντελοποίηση της επαφής, δηλαδή τόσο της κρούσης όσο και της τριβής.

### 2.4.1 Κρούση

Η κρούση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα σώματα. Το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό σε πολλές διαφορετικές τεχνολογικές περιοχές, όπως στο σχεδιασμό μηχανών, στη ρομποτική κ.ά. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κρούσης είναι η πολύ σύντομη χρονική διάρκεια, τα υψηλά επίπεδα δύναμης, η ταχύτατη διάχυση ενέργειας και η εμφάνιση μεγάλων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων. Αυτοί οι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την ανάλυση οποιουδήποτε μηχανικού συστήματος. Επιπλέον, κατά την κρούση, το σύστημα παρουσιάζει ασυνέχειες στη γεωμετρία και ορισμένες ιδιότητες υλικών ενδέχεται να τροποποιηθούν.

#### Βασική θεωρία κρούσεων

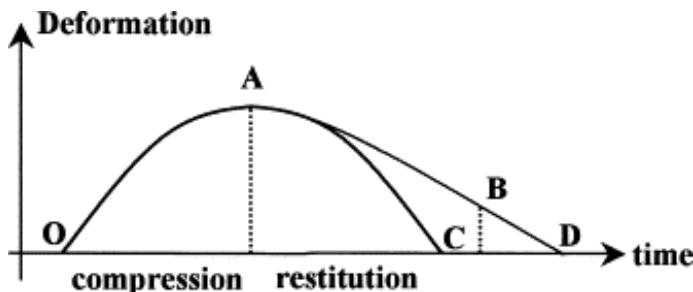
Η κρούση μεταξύ δύο σωμάτων χαρακτηρίζεται από μεγάλες δυνάμεις αντίδρασης και αλλαγές στις ταχύτητες των σωμάτων. Ως αποτέλεσμα, τα σώματα υπόκεινται σε ελαστική ή πλαστική παραμόρφωση με διάχυση ενέργειας σε διάφορες μορφές. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γενικής μορφής κρούση μεταξύ δύο σωμάτων.



Σχήμα 2-5: Κρούση μεταξύ δύο σωμάτων.

Η γραμμή κρούσης (Line of Impact – LoI) είναι μια ευθεία γραμμή κάθετη στις επιφάνειες επαφής. Για σημειακές συγκρούσεις μπορούν να ορισθούν τέσσερεις τύποι μεταξύ των δύο σωμάτων: (α) Κεντρική ή συγγραμμική, αν τα κέντρα μάζας των σωμάτων βρίσκονται στη LoI (β) έκκεντρη, αν τα κέντρα μάζας του ενός ή και των δύο σωμάτων δεν βρίσκονται στη LoI (γ) άμεση, αν οι αρχικές ταχύτητες των δύο σωμάτων βρίσκονται κατά μήκος της LoI (δ) πλάγια, αν οι αρχικές ταχύτητες του ενός ή και των δύο σωμάτων δεν βρίσκονται κατά μήκος της LoI.

Γενικά κατά την κρούση αναγνωρίζονται δύο φάσεις παραμόρφωσης με το χρόνο, η συμπίεση (compression) και η επιστροφή (restitution), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6: Φάσεις παραμόρφωσης κατά την κρούση.

Σύμφωνα με αυτό, η κρούση κατηγοριοποιείται ως εξής: (α) Απολύτως ελαστική, γραμμή O-A-C, στην οποία δεν σημειώνονται απώλειες ενέργειας, (β) απολύτως πλαστική, γραμμή O-A, στην οποία χάνεται ολόκληρη η ενέργεια και η παραμόρφωση είναι μόνιμη, (γ) Μερικώς ελαστική, γραμμή O-A-D, με απώλειες ενέργειας αλλά όχι μόνιμη παραμόρφωση, (δ) Μερικώς πλαστική, γραμμή O-A-B, με απώλειες ενέργειας και μόνιμη παραμόρφωση.

#### Θεωρία κρούσεων Hertz

Η θεωρία αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες πραγματοποιείται επαφή μεταξύ δύο σωμάτων και τηρούνται οι εξής παραδοχές:

- Η προσκόλληση των επιφανειών αμελείται.
- Οι επιφάνειες είναι συνεχείς και μη συμμορφωτές, δηλαδή η αρχική επαφή είναι ένα σημείο ή μια γραμμή.
- Οι πιέσεις μεταξύ των υλικών είναι αρκετά μικρές, έτσι ώστε να προκαλέσουν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις.
- Η περιοχή επαφής είναι αρκετά μικρότερη από τη χαρακτηριστική ακτίνα καμπυλότητας του σώματος.
- Οι επιφάνειες είναι λείες, δηλαδή η θεωρία αυτή μελετά μόνο δυνάμεις που αναπτύσσονται σε διεύθυνση κάθετη των επιφανειών επαφής.

Έστω ότι δύο σώματα έρχονται σε φυσική επαφή μέσω ασκούμενων δυνάμεων. Η περιοχή επαφής εξαρτάται από τη γεωμετρία των επιφανειών, το φορτίο και τις ιδιότητες του υλικού. Εξετάζεται η περίπτωση κρούσης σφαίρας ακτίνας  $R$  που εισχωρεί σε βάθος  $\delta$  σε ελαστική επιφάνεια. Η δυσκαμψία της επαφής εξαρτάται επίσης από τις ιδιότητες του υλικού και των δύο σωμάτων μέσω των παρακάτω σχέσεων:

➤ Δυσκαμψία επαφής: 
$$K = \frac{4}{3} \sqrt{R E^*} \quad (2-3)$$

➤ Ακτίνα επαφής κατά Hertz: 
$$a = \sqrt{R \delta} \quad (2-4)$$

➤ Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας: 
$$E^* = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2-5)$$

όπου  $E_1, E_2$  τα μέτρα ελαστικότητας και  $\nu_1, \nu_2$  οι λόγοι Poisson του κάθε σώματος

➤ Ασκούμενη δύναμη: 
$$F_N = K \delta^{\frac{3}{2}} \quad (2-6)$$

#### Θεωρία κρούσεων Kelvin-Voigt (KV)

Η θεωρία αυτή αποτελεί ένα από τα επονομαζόμενα βισκοελαστικά μοντέλα κρούσης, καθώς εκτός από συντελεστή δυσκαμψίας λαμβάνει επίσης υπόψη και ένα συντελεστή απόσβεσης μοντελοποιώντας έτσι και τις ενεργειακές απώλειες κατά την επαφή δύο σωμάτων. Με το μοντέλο KV η δύναμη μεταξύ των σωμάτων δίνεται ως συνάρτηση του βάθους διείσδυσης  $\delta$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$F_N = K \delta + \lambda \dot{\delta} \quad (2-7)$$

Σύμφωνα με το [17], ο συντελεστής απόσβεσης της κρούσης συσχετίζεται με το συντελεστή δυσκαμψίας μέσω της σχέσης

$$\lambda = 1.5 c_a K \quad (2-8)$$

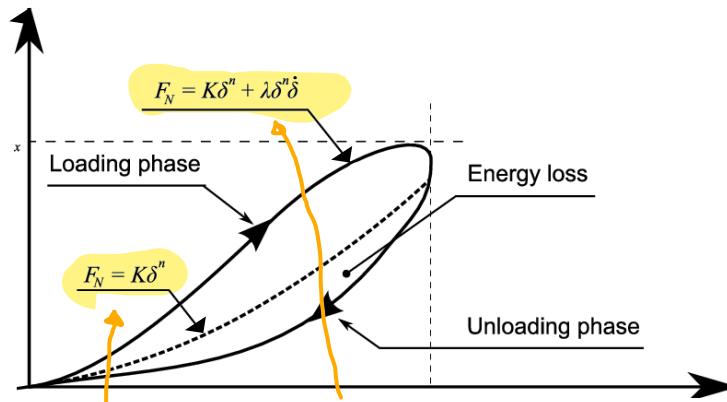
όπου  $c_a$  συντελεστής με τιμές μεταξύ 0.01 και 0.5.

#### Θεωρία κρούσεων Hunt-Crossley (HC)

Η θεωρία HC αποτελεί επίσης βισκοελαστικό μοντέλο κρούσης και είναι η μη γραμμική εξέλιξη του μοντέλου KV. Έτσι η δύναμη επαφής μεταξύ των σωμάτων δίνεται από τη σχέση

$$F_N = K \delta^{\frac{3}{2}} + \lambda \dot{\delta} \delta^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

Στο Σχήμα 2-7 παρουσιάζεται διαγραμματικά μια ποιοτική σύγκριση μεταξύ της θεωρίας κατά Hertz και κατά Hunt-Crossley, καθώς επίσης και οι επιμέρους φάσεις ενός κύκλου φόρτισης.



Σχήμα 2-7: Σύγκριση θεωρίας Hertz και Hunt-Crossley.

### Θεωρία μοντελοποίησης κρούσεων σύμφωνα με το λογισμικό MSC Adams

Στην παρούσα εργασία η μοντελοποίηση της επαφής γίνεται μέσω του περιβάλλοντος **MSC Adams** και για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται μια μαθηματική έκφραση, η οποία **εισάγει μη γραμμικότητα σε δυσκαμψία και απόσβεση, επομένως προσεγγίζει τη θεωρία κρούσεων Hunt-Crossley**. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ακριβή μαθηματική έκφραση που χρησιμοποιείται από το λογισμικό για να περιγράψει την κρούση μεταξύ δύο σωμάτων, αλλά και σχετικά με τις τιμές και τη σημασία των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων (δυσκαμψία, απόσβεση, εκθέτης δύναμης, βάθος διείσδυσης) αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.2. Σε αυτό αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται η κρούση των πελμάτων με το έδαφος, καθώς επίσης και το πώς επιδρούν οι διάφορες παράμετροι στην απόκριση βηματισμού του δίποδου μοντέλου.

#### **2.4.2 Τριβή**

Η τριβή αποτελεί τη δεύτερη σημαντική συνιστώσα που οφείλει κανείς να λαμβάνει υπόψη για τη μοντελοποίηση της επαφής, καθώς αυτή μπορεί να σταματήσει ή να αντιστρέψει την κίνηση, ενώ συμβάλλει σημαντικά στη διάχυση ενέργειας. Η τριβή μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί με διάφορες προσεγγίσεις. Εδώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εξ αυτών.

#### Μοντέλο τριβής Coulomb

Το μοντέλο τριβής Coulomb αντιπροσωπεύεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F = \begin{cases} F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}), & a\dot{v} \dot{x} \neq 0 \\ F_{app}, & a\dot{v} \dot{x} = 0 \text{ και } F_{app} < F_c \end{cases} \quad (2-10)$$

όπου  $F$  είναι η δύναμη τριβής,  $\dot{x}$  η ταχύτητα ολίσθησης,  $F_{app}$  ασκούμενη δύναμη και  $F_c$  η δύναμη τριβής Coulomb. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το μέγεθος της δύναμης τριβής σχετίζεται με την κάθετη δύναμη  $F_N$  μέσω ενός συντελεστή τριβής και η κατεύθυνσή της είναι πάντα αντίθετη στη σχετική κίνηση. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

(α) Sliding με  $F_c = \mu_d F_N$ , όπου  $\mu_d$  ο συντελεστής δυναμικής τριβής

(β) Sticking με  $F_c \leq \mu_s F_N$ , όπου  $\mu_s$  ο συντελεστής στατικής τριβής

Οι τιμές των συντελεστών αυτών εξαρτώνται από τη φύση των επιφανειών επαφής και κυρίως από το υλικό και την ποιότητα της επιφάνειας.

#### Μοντέλο ιξώδους τριβής

Το μοντέλο ιξώδους τριβής περιγράφεται από την εξίσωση:

$$F = k_v \dot{x} \quad (2-11)$$

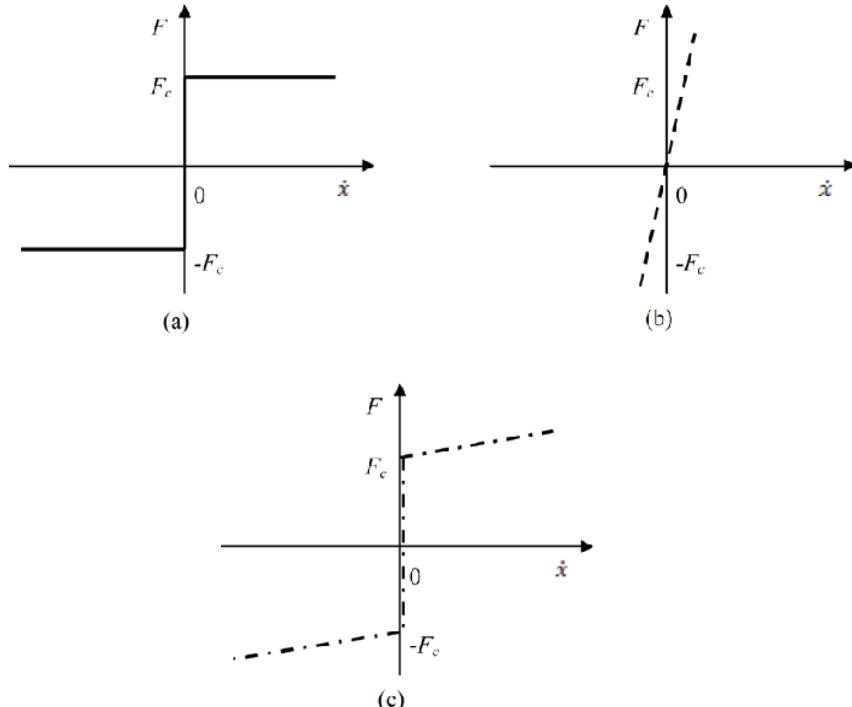
όπου  $F$  είναι η δύναμη τριβής,  $\dot{x}$  η ταχύτητα ολίσθησης και  $k_v$  ο συντελεστής ιξώδους. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η δύναμη τριβής είναι μια γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας. Ωστόσο η εφαρμογή της ιξώδους τριβής περιορίζεται αρκετά και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις στις οποίες δεν χρησιμοποιείται λίπανση.

### Ολοκληρωμένο μοντέλο τριβής Coulomb και ιξώδους τριβής

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μοντέλων, δηλαδή του μοντέλου τριβής Coulomb και της ιξώδους τριβής, οδηγεί στο ολοκληρωμένο μοντέλο τριβής Coulomb και ιξώδους τριβής που περιγράφεται περιγράφεται ως:

$$F = \begin{cases} F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + k_v \dot{x}, & a v \dot{x} \neq 0 \\ F_{app}, & a v \dot{x} = 0 \text{ και } F_{app} < F_c \end{cases} \quad (2-12)$$

Το μοντέλο Coulomb, ιξώδους τριβής, καθώς και το ολοκληρωμένο μοντέλα απεικονίζονται στο Σχήμα 2-8.



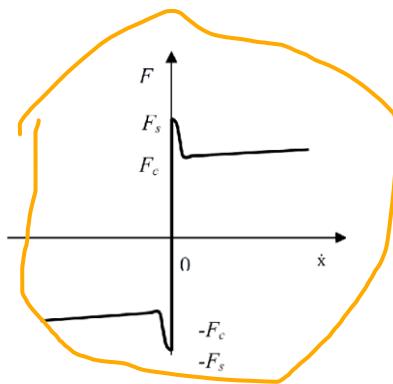
Σχήμα 2-8: Δύναμη τριβής έναντι ταχύτητας ολίσθησης. (a) Μοντέλο Coulomb (b) Μοντέλο ιξώδους τριβής (c) Ολοκληρωμένο μοντέλο.

### Μοντέλο τριβής Stribeck

Το μοντέλο τριβής Stribeck περιγράφεται ως:

$$F = \left\{ F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{|\dot{x}|}{v_s}\right)^i} \right\} \operatorname{sgn}(\dot{x}) + k_v \dot{x} \quad (2-13)$$

όπου  $F$  είναι η δύναμη τριβής,  $\dot{x}$  η ταχύτητα ολίσθησης,  $F_c$  η δύναμη τριβής Coulomb,  $F_s$  η δύναμη στατικής τριβής,  $v_s$  η ταχύτητα Stribeck,  $k_v$  ο συντελεστής ιξώδους τριβής και  $i$  ένας εκθέτης. Η δύναμη τριβής Stribeck θεωρεί ως ανώτατο όριο την  $F_s$  και ως κατώτατο όριο την  $F_c$ . Η σχέση μεταξύ της τριβής και της ταχύτητας ολίσθησης απεικονίζεται στο Σχήμα 2-9.



**Σχήμα 2-9: Το μοντέλο τριβής Stribeck.**

Στην παρούσα εργασία η μοντελοποίηση της τριβής γίνεται μέσω του περιβάλλοντος **MSC Adams** και για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται το μοντέλο **Coulomb**, καθώς κρίνεται επαρκώς ικανοποιητικό.

## 2.5 Ανάλυση κατασκευής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένας από τους βασικότερους παράγοντες που συνέβαλαν στο σχεδιασμό του δίποδου ρομπότ είναι η αντοχή του στις καταπονήσεις που δέχεται κατά τη λειτουργία του. Σε αυτό το σημείο γίνεται μια θεωρητική αναφορά σχετικά την αντοχή των μηχανολογικών κατασκευών.

### 2.5.1 Ανάλυση αντοχής

Η αντοχή μιας μηχανολογικής κατασκευής εξαρτάται τόσο από τις εξωτερικές φορτίσεις, όσο και από την ίδια την κατασκευή και συγκεκριμένα από τη γεωμετρία και το υλικό που την αποτελεί. Κάθε υλικό έχει τις δικές του μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του υπό δεδομένη φόρτιση. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό είναι:

- **Αντοχή σε εφελκυσμό/θλίψη**

Η αντοχή ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να υπομένει φορτία που τείνουν είτε να το επιμηκύνουν είτε να το συμπιέσουν και ποσοτικοποιείται μέσω της μέγιστης τάσης που μπορεί να υποστεί η κατασκευή πριν τη θραύση. **Η συγκεκριμένη ιδιότητα βρίσκεται πειραματικά μέσω δοκιμών εφελκυσμού/θλίψης, στα οποία καταγράφεται η μηχανική τάση έναντι της παραμόρφωσης.** Έτσι το σημείο στο οποίο καταγράφεται η μέγιστη τάση αποτελεί την αντοχή σε εφελκυσμό/θλίψη.

- **Μέτρο ελαστικότητας**

**Το μέτρο ελαστικότητας είναι μια μηχανική ιδιότητα που ποσοτικοποιεί τη δυσκαμψία ενός στερεού σώματος** και καθορίζει τη σχέση ανάμεσα στην τάση και την παραμόρφωση, όσο το υλικό παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής. Ένα υλικό υπόκειται σε ελαστική παραμόρφωση όταν του ασκείται ένα μικρό φορτίο. Η ελαστική παραμόρφωση είναι αντιστρέψιμη, δηλαδή το υλικό επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα, όταν αφαιρεθεί το φορτίο. Στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης κοντά στην αρχή των

αξόνων, η καμπύλη είναι γραμμική και η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης διέπεται από το νόμο του Hooke ( $\sigma = E\varepsilon$ , όπου  $\sigma$  η μονοαξονική τάση,  $\varepsilon$  η παραμόρφωση και  $E$  το μέτρο ελαστικότητας).

- **Όριο διαρροής**

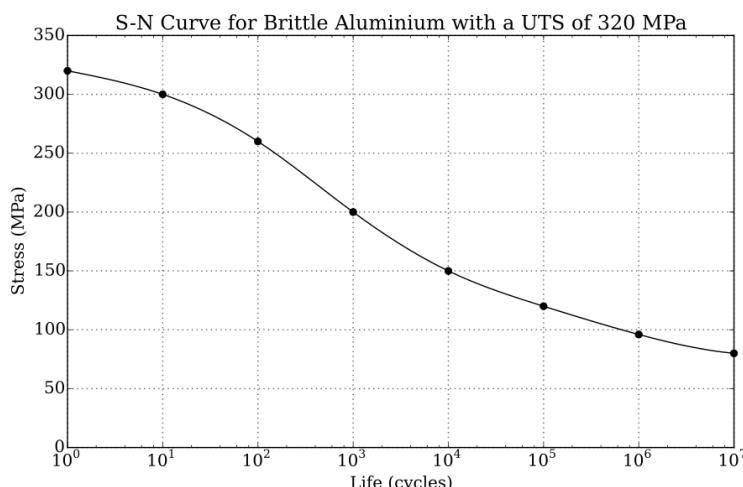
Το όριο διαρροής είναι εκείνη η μηχανική ιδιότητα που καθορίζεται ως η τάση στην οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά, δηλαδή μετά από αυτό το σημείο ένα μέρος της παραμόρφωσης είναι μόνιμο και μη αντιστρεπτό. Ουσιαστικά αποτελεί ένα σημείο το οποίο προειδοποιεί ότι με περαιτέρω αύξηση της τάσης θα επέλθει αστοχία της κατασκευής.

- **Αντοχή σε δυναμική κόπωση**

Η δυναμική κόπωση είναι το φαινόμενο αστοχίας υπό επαναλαμβανόμενο ή ταλαντευόμενο φορτίο. Η σημαντικότητα της δυναμικής κόπωσης έγκειται στο γεγονός ότι κάτω από κυκλική φόρτιση τα υλικά αστοχούν σε επίπεδα τάσεων αρκετά χαμηλότερα από ότι σε περίπτωση στατικών φορτίων. Οι ρωγμές κόπωσης ξεκινούν από σημεία συγκέντρωσης τάσεων, συνήθως στην επιφάνεια ενός εξαρτήματος και στη συνέχεια αυξάνονται σταδιακά ανά κύκλο φόρτισης μέχρι η κατασκευή να καταστεί ανίκανη να φέρει το φορτίο.

Σύμφωνα με την ASTM (American Society for Testing and Materials) ορίζεται η διάρκεια ζωής  $N_f$  ως ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που ένα δοκίμιο είναι ικανό να φέρει πριν την αστοχία αυτού. Σε ορισμένα υλικά υπάρχει μια θεωρητική τιμή τάσης κάτω από την οποία το υλικό δεν αστοχεί για οσουσδήποτε κύκλους ζωής και ονομάζεται όριο διαρκούς αντοχής.

Για τη μελέτη της κόπωσης ενός υλικού συνήθως χρησιμοποιείται η καμπύλη του Woehler, ή αλλιώς καμπύλη S-N, η οποία αποτελεί ένα γράφημα της τάσης  $S$  έναντι των απαιτούμενων κύκλων αστοχίας  $N$  σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 2-10: Καμπύλη S-N για ψαθυρό αλουμίνιο με όριο αντοχής 320 MPa.

Οι καμπύλες S-N εξάγονται πειραματικά από δείγματα υλικών που υπόκεινται σε ημιτονοειδές φορτίο από μηχανή δοκιμών, η οποία μετράει τον αριθμό των κύκλων αστοχίας. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να επηρεασθεί από διάφορους παράγοντες, όπως η μέση τιμή της ημιτονοειδούς τάσης, η συχνότητα φόρτισης, η θερμοκρασία, η διάβρωση και οι παραμένουσες τάσεις.

Επιπλέον για τη μελέτη της κόπωσης χρησιμοποιούνται κριτήρια, τα οποία προστικοποιούν την αλληλεπίδραση της μέσης με την εναλλασσόμενη τάση. Τα κριτήρια αυτά εκφράζονται μαθηματικά, αλλά και διαγραμματικά και τα κυριότερα είναι η **Θεωρία Soderberg**, η **Θεωρία Goodman** και η **Θεωρία Gerber**.

➤ **Θεωρία Soderberg:** 
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = I \quad (2-14)$$

➤ **Θεωρία Goodman:** 
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = I \quad (2-15)$$

➤ **Θεωρία Gerber:** 
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = I \quad (2-16)$$

όπου:

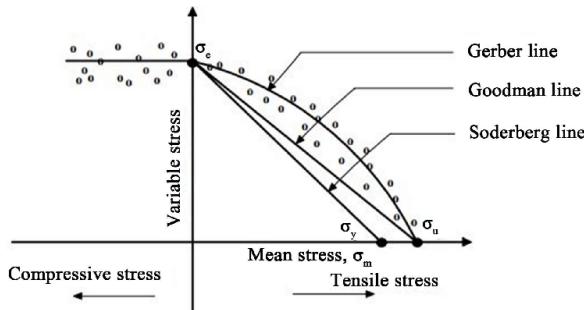
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2-17)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2-18)$$

$\sigma_y$ : Όριο διαρροής του υλικού

$\sigma_u$ : Όριο θραύσης του υλικού

Διαγραμματικά τα τρία κριτήρια απεικονίζονται στο Σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11: Διαγραμματική απεικόνιση των τριών κριτηρίων.

Η περιοχή κάτω από τις καμπύλες υποδεικνύει ότι το υλικό δεν αστοχεί για τις δεδομένες φορτίσεις. Η γενική τάση αυτών των κριτηρίων είναι ότι για δεδομένο επίπεδο εναλλασσόμενης τάσης, η διάρκεια ζωής μειώνεται με την αύξηση της μέσης τάσης.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η **αντοχή σε δυναμική κόπωση**, καθώς η **κατασκευή περιλαμβάνει εξαρτήματα από πλαστικό ABS** τα οποία εν γένει παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή και η άσκηση επαναλαμβανόμενων φορτίσεων ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά τους.

## 2.5.2 Ανάλυση λυγισμού

Εκτός της αντοχής υλικών, υπάρχει μια δεύτερη κατηγορία φαινομένων που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ενός εξαρτήματος. Αυτή είναι η **δομική αστάθεια**, η οποία ονομάζεται **λυγισμός** και προκαλείται από υψηλή θλιππική τάση.

Ο μαθηματικός Leonhard Euler ανέπτυξε έναν τύπο που δίνει το μέγιστο αξονικό φορτίο που μπορεί να φέρει ένα μακρύ, λεπτό, ιδεατό υποστύλωμα χωρίς να λυγίσει. Ένα ιδεατό υποστύλωμα είναι εντελώς ευθύγραμμο, ομοιογενές, και χωρίς αρχικές (παραμένουσες) τάσεις. Το κρίσιμο φορτίο Euler δίνεται από τον τύπο:

$$F = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (2-19)$$

όπου

*E*: το μέτρο ελαστικότητας

*I*: η ροπή αδράνειας επιφάνειας της διατομής του μέλους

*L*: το μή υποστηριζόμενο μήκος του μέλους

*K*: ο συντελεστής ενεργού μήκους μέλους, του οποίου η τιμή εξαρτάται από τις συνθήκες της στήριξης.

Όσο το θλιπτικό φορτίο δεν ξεπερνά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, τότε το εξάρτημα δεν υπόκειται σε λυγισμό.

Ο λυγισμός παίζει καθοριστικό ρόλο και στο κατασκευασθέν δίποδο ρομπότ, διότι τα σκέλη του έχουν μεγάλο μήκος συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις. Επομένως δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο αν τα ασκούμενα θλιπτικά φορτία κατά τον παθητικό βηματισμό είναι ικανά να προκαλέσουν λυγισμό των σκελών.

### 2.5.3 Θεωρία πεπερασμένων στοιχείων

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ομαλή λειτουργία της διάταξης, θα πρέπει οι φορτίσεις που δέχεται αυτή να μην ξεπερνούν τα μηχανικά όρια που περιγράφονται προηγουμένως. Ωστόσο αναλυτικές μέθοδοι ελέγχου αντοχής εφαρμόζονται κυρίως σε περιπτώσεις απλών κατασκευών. Όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα, δυσχεραίνονται οι υπολογισμοί και γι' αυτό προτείνεται η ανάλυση με τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται η προσεγγιστική και αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, συνεχούς μέσου, αυθαίρετης γεωμετρίας, οριακών συνθηκών και φορτίων. Βασίζεται στον συνδυασμό μεταβλητών μεθόδων και τοπικών προσεγγίσεων που ισχύουν στην περιορισμένη περιοχή του πεπερασμένου στοιχείου για την τοπική διακριτοποίηση του προβλήματος. Επανάληψη της τοπικής διακριτοποίησης στον υπόλοιπο χώρο του μέσου, καταλήγει στην διακριτοποίηση του προβλήματος, και τελικά οδηγεί στην προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος. Έτσι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων καθίσταται ως μια υπολογιστική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων με την οποία πολύπλοκα συστήματα χωρίζονται σε μικρότερα απλούστερα έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η επίλυσή τους.

Τα περισσότερα μηχανικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε διακριτά και συνεχή, ενώ τα μηχανολογικής φύσης προβλήματα, όπως είναι η ανάλυση της αντοχής ενός στερεού σώματος, είναι συνήθως συνεχή. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση διδιάστατων και τριδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Για να εξασφαλισθεί η

συνέχεια, τα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους, στους οποίους αντιστοιχούν ορισμένες διακριτές μεταβλητές, οι οποίες είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και οι παράγωγοί τους.

Με αυτή τη μέθοδο οι ιδιότητες της μηχανολογικής διάταξης περιγράφονται μαθηματικά από μητρώα μάζας **M**, απόσβεσης **C** και δυσκαμψίας **K**, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2-20)$$

όπου  $F$  η εξωτερική διέγερση και  $u$  η μετατόπιση του κόμβου. Δεδομένων των μετατοπίσεων που προκύπτουν από την επίλυση της άνωθεν διαφορικής εξίσωσης, δύνανται να υπολογισθούν κατά τα γνωστά οι προκύπτουσες παραμορφώσεις  $\epsilon$  και κατ' επέκταση μέσω του νόμου του Hooke ( $\sigma = E\epsilon$ ) οι ασκούμενες τάσεις.

Όσον αφορά τον έλεγχο της κατασκευής σε λυγισμό μέσω των πεπερασμένων στοιχείων, προτείνονται δύο μέθοδοι, μία μέθοδος γραμμικής ανάλυσης λυγισμού και μία μη γραμμικής ανάλυσης λυγισμού:

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού προβλέπει το θεωρητικό όριο λυγισμού μιας **ιδανικής γραμμικής ελαστικής διάταξης**. Παρά το γεγονός ότι το φαινόμενο του λυγισμού είναι μη γραμμικό, εν τούτοις η γραμμική ανάλυση παρουσιάζει **ορισμένα πλεονεκτήματα**, όπως το ότι είναι **υπολογιστικά γρήγορη** και **παρέχει μια ικανοποιητική αρχική εκτίμηση** του **κρίσιμου φορτίου** και των **ιδιομορφών λυγισμού**. Έτσι προκειμένου να **εξαχθεί ο πολλαπλασιαστής** του φορτίου λυγισμού  $\lambda$  (δηλαδή το διανυσμα των συντελεστών που πολλαπλασιάζει τα ασκούμενα φορτία προκειμένου να παραχθεί το κρίσιμο φορτίο) **και οι ιδιομορφές λυγισμού  $\psi$** , επιλύεται η παρακάτω εξίσωση:

$$([\mathbf{K}] + \lambda [\mathbf{S}])\{\psi\} = 0 \quad (2-21)$$

όπου

**[K]**: το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος

**[S]**: το μητρώο αρχικής φόρτισης

Πρακτικά, λυγισμός συμβαίνει όταν υπάρχει ένα τουλάχιστον  $\lambda_i$ , έτσι ώστε  $\lambda_i \leq 1$ , διότι αυτό σημαίνει ότι τα ασκούμενα φορτία είναι μεγαλύτερα ή ίσα του κρίσιμου φορτίου.

#### Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού

Η μη γραμμική ανάλυση λυγισμού χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που είναι **απαραίτητη η μεγάλη ακρίβεια** των αποτελεσμάτων. Προϋποθέτει μια μη γραμμική στατική ανάλυση με βαθμιαία αυξανόμενα φορτία μέχρι να φθάσουν στο σημείο που η κατασκευή γίνεται ασταθής. Με τη μη γραμμική ανάλυση λυγισμού, λαμβάνονται **υπόψη επιπλέον χαρακτηριστικά** όπως αρχικές ατέλειες υλικού, πλαστική συμπεριφορά, επαφές σωμάτων, απόκριση σε μεγάλες παραμορφώσεις και άλλες μη γραμμικές συμπεριφορές.

Στην παρούσα εργασία η κατασκευή δεν αντιμετωπίζει μεγάλα φορτία που επιφέρουν λυγισμό, γι' αυτό ακολουθήθηκε **η γραμμική ανάλυση λυγισμού σε όσες περιπτώσεις κρίθηκε απαραίτητο**.

### 3 Μοντελοποίηση του δίποδου ρομπότ στο λογισμικό MSC Adams

Κομβικό σημείο για το σχεδιασμό και την κατασκευή του δίποδου ρομπότ ήταν η μοντελοποίηση αυτού στο λογισμικό MSC Adams, η επαλήθευση του παθητικού βηματισμού σε κεκλιμένο επίπεδο και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτού με τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση στη Matlab. Με αφετηρία το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο και τις προσομοιώσεις βαδίσματος σε περιβάλλον Matlab, εκτελείται προσομοίωση βαδίσματος σε περιβάλλον MSC Adams, το οποίο έχει ως στόχο να εξάγει επιπλέον στοιχεία για την ανάλυση, όπως δυνάμεις και καταπονήσεις, βασικότερες των οποίων είναι οι δυνάμεις κατά την επαφή των πελμάτων με το έδαφος, οι δυνάμεις των ελατηρίων και οι αδρανειακές δυνάμεις των ίδιων των εξαρτημάτων.

Στη βιβλιογραφία έχει γίνει προσπάθεια για τη μοντελοποίηση δίποδων ρομπότ στο λογισμικό MSC Adams από διάφορους ερευνητές [19] [20]. Αυτοί επιδιώκουν να προσομοιώσουν τον παθητικό βηματισμό υπό την επίδραση της βαρύτητας και να εξάγουν κάποιο συμπέρασμα συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους μεταξύ Matlab και Adams. Ωστόσο τα αποτελέσματά τους παρουσιάζουν ορισμένες αποκλίσεις. Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο στο MSC Adams το οποίο συγκρίνεται με το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, αξιολογείται η όποια σύγκλιση παρουσιάζεται και εξηγούνται οι βασικοί λόγοι για τους οποίους παρουσιάζονται διαφορές. Επίσης αντλούνται σημαντικά συμπεράσματα τα οποία θα έχουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό του ρομπότ.

#### 3.1 Το λογισμικό προσομοίωσης MSC Adams

Το λογισμικό Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων που προσφέρουν τη δυνατότητα αριθμητικής επίλυσης σύνθετων μη γραμμικών συστημάτων χωρίς τη διατύπωση των αναλυτικών μαθηματικών εξισώσεων. Επίσης αποτελεί μια οικογένεια εξελιγμένων προϊόντων με σκοπό τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση, την ανάλυση, τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και τον έλεγχο μηχανολογικών συστημάτων.

Η βασική μεθοδολογία που ακολουθείται στο λογισμικό MSC Adams είναι (α) η δημιουργία του μοντέλου, (β) η εκτέλεση των προσομοιώσεων και (γ) η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

##### (α) Δημιουργία του μοντέλου

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το ADAMS/View, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαμορφώσει το μοντέλο του χρησιμοποιώντας απαραμόρφωτα σώματα, να καθορίσει ο ίδιος τις επιθυμητές γεωμετρίες και να αποδώσει συγκεκριμένες παραμέτρους σε αυτό (π.χ. μάζα σώματος, πυκνότητα σώματος, ροπή αδράνειας, αρχικές θέσεις και ταχύτητες κ.λπ.). Επίσης ο χρήστης μπορεί να επιβάλλει κινηματικούς περιορισμούς μεταξύ των σωμάτων με τη χρήση αρθρώσεων (πρισματική, κυλινδρική, σφαιρική, επίπεδή κ.λπ.), να επιβάλλει εξωτερικά φορτία (εξωτερικές δυνάμεις και ροπές, δύναμη βαρύτητας κ.λπ.), να μοντελοποιεί φαινόμενα επαφής/τριβής, φαινόμενα ελαστικότητας και απόσβεσης. Ακόμη το λογισμικό διαθέτει δυνατότητες μοντελοποίησης τυποποιημένων μηχανικών

συστημάτων, όπως οδοντωτούς τροχούς και ιμάντες, μπορεί να επικοινωνεί με άλλα λογισμικά για την εφαρμογή ελέγχου (π.χ. Matlab) και έχει πολλές ακόμα δυνατότητες που ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει ανάλογα με την περίπτωση.

#### (β) Εκτέλεση προσομοιώσεων

Η εκτέλεση των προσομοιώσεων πραγματοποιείται στο περιβάλλον ADAMS/Solver, όπου δίνεται η επιλογή του τύπου της προσομοίωσης που θα εκτελεσθεί (κινηματική, δυναμική, αρχικών συνθηκών, βελτιστοποίησης κ.ά.), αλλά και του επιλύτη των διαφορικών εξισώσεων (GSTIFF, WSTIFF, HHTM Newmark, HASTIFF). Επίσης ο χρήστης του λογισμικού μπορεί να ρυθμίσει και άλλες παραμέτρους (χρονικό βήμα, συνολικός χρόνος προσομοίωσης, μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα) οι οποίες επηρεάζουν την ακρίβεια των λύσεων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η επιλογή που κάνει ο καθένας εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μοντελοποίησης κρούσης προτείνεται να χρησιμοποιηθεί επιλύτης GSTIFF ή WSTIFF με μεγάλο αριθμό βημάτων ολοκλήρωσης κατά την επίλυση.

Μια άλλη πολύ σημαντική δυνατότητα που παρέχει το Adams είναι αυτή της προσομοίωσης με οδηγίες (scripted simulation), η οποία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση διαφόρων συνθηκών, όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα και στη συνέχεια.

Τέλος σημαντικό πλεονέκτημα του λογισμικού σε επίπεδο προσομοιώσεων είναι το γεγονός ότι επιτρέπει την παρουσίαση της κίνησης του συστήματος κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Έτσι ο χρήστης μπορεί να παρέμβει ακόμα και κατά τη διάρκεια της επίλυσης και να τη διακόψει αν παρουσιασθεί κάπι ανεπιθύμητο.

#### (γ) Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, ο χρήστης μπορεί να λάβει και να επεξεργασθεί τα αποτελέσματα μέσω του ADAMS/Postprocessor. Συγκεκριμένα μπορεί να εξάγει διάφορα μεγέθη, όπως μετατοπίσεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις, δυνάμεις κ.ά. συναρτήσει του χρόνου. Φυσικά δίνεται ακόμα και η δυνατότητα παρουσίασης συνδυασμού μετρήσεων μέσω διαφόρων εργαλείων. Όλα αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σε διάφορες μορφές αρχείων (π.χ. μετρήσεις σε αρχείο μορφής tab delimited), ώστε να καταστεί δυνατή περαιτέρω επεξεργασία τους σε άλλα λογισμικά, όπως το Excel και τη Matlab. Τέλος ο χρήστης μπορεί να αναπαράγει ξανά μέσω διαδικασίας απεικόνισης την ήδη εκτελεσμένη προσομοίωση.

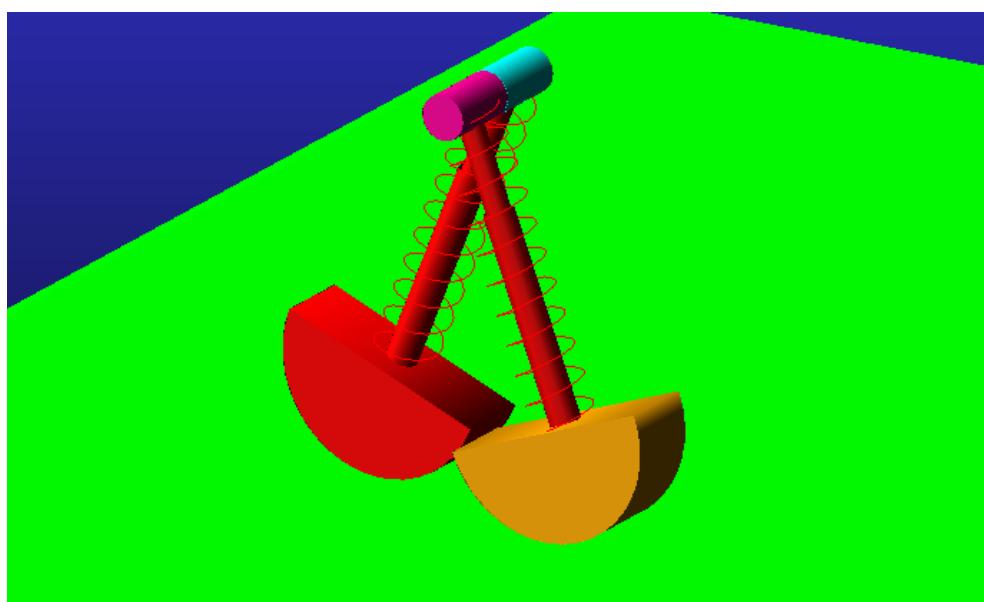
## 3.2 Περιγραφή του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου

Η διαδικασία μοντελοποίησης του δίποδου ρομπότ στο λογισμικό Adams ξεκίνα από την πολύ απλή περίπτωση του προσεγγιστικού μοντέλου με συγκεντρωμένες μάζες στα πέλματα και στο ισχίο και στοιχεία ελαστικότητας-απόσβεσης που αντιπροσωπεύουν τα εύκαμπτα σκέλη. Προς το παρόν αμελούνται οι όποιες αδράνειες, καθώς επιδιώκεται να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στη Matlab.

Για το σκοπό αυτό ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία, η οποία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω και περιλαμβάνει καθορισμένα βήματα.

#### Σύνδεσμοι και αρθρώσεις

Το απλουστευμένο δίποδο ρομπότ απαρτίζεται συνολικά από τέσσερα σώματα, τα δύο πέλματα και το ισχίο που χωρίζεται σε δύο μέρη. **Το κάθε πέλμα ενώνεται με το κάθε ένα μέρος του ισχίου μέσω ελατηρίου-αποσβεστήρα.** Η ανεξάρτητη περιστροφή των πελμάτων γύρω από το ισχίο επιτυγχάνεται μέσω της επιβολής περιστροφικής άρθρωσης μεταξύ των δύο μερών του ισχίου. Επίσης επιβάλλονται επιπλέον **κινηματικοί περιορισμοί (parallel joint primitives, perpendicular joint primitives, cylindrical joints)**, οι οποίοι συγκρατούν τα πέλματα σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους και υποχρεώνουν ολόκληρο το μοντέλο να υπόκειται σε διδιάστατη επίπεδη κίνηση.

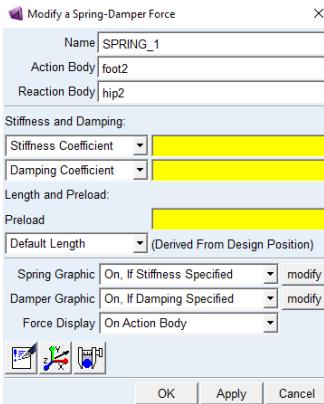


**Σχήμα 3-1: Αρχική μοντελοποίηση του δίποδου ρομπότ με εύκαμπτα σκέλη και ημικυκλικά πέλματα στο λογισμικό MSC Adams.**

Φυσικά για τη μοντελοποίηση του παθητικού βαδίσματος, εκτός από το δίποδο ρομπότ, είναι αναγκαία και η ύπαρξη εδάφους. Ο ρόλος του είναι διπτός, χρησιμοποιείται τόσο για την επίτευξη του βηματισμού, όσο και ως ένα μέσο για τη μέτρηση και καταγραφή μεγεθών με βάση το ίδιο σημείο αναφοράς. **Όλες οι προσομοιώσεις διενεργούνται σε κεκλιμένο έδαφος  $2^\circ$ .**

#### Μοντελοποίηση δυνάμεων

Για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης εισάγονται και οι **δυνάμεις ελατηρίου-απόσβεσης**. Για να γίνει αυτό, πρέπει να εισαχθούν ορισμένες παράμετροι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2.



**Σχήμα 3-2: Παράθυρο του λογισμικού Adams για τον ορισμό στοιχείων ελαστικότητας και απόσβεσης.**

Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να ορισθούν τρία βασικά μεγέθη (αυτά με κίτρινο χρώμα στο Σχήμα 3-2), τα οποία είναι η σταθερά ελατηρίου  $k$ , η σταθερά απόσβεσης  $B$  και η προένταση του ελατηρίου  $F_0$ . Η προένταση του ελατηρίου αφορά την αρχική δύναμη με την οποία είναι φορτισμένο το ελατήριο και υπολογίζεται ως εξής:

$$F_0 = k(L_{nat} - L_0) \quad (3-1)$$

όπου

$L_{nat}$ : το φυσικό μήκος του ποδιού

$L_0$ : το αρχικό μήκος του ποδιού

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που συμπληρώνονται αφορούν την ονομασία, καθώς και τα σώματα που συνδέει το ελατήριο.

Η δεύτερη κατηγορία δυνάμεων που πρέπει να μοντελοποιηθεί είναι η δύναμη επαφής των πελμάτων με το έδαφος. Σε αυτές τις τις δύο συνιστώσες της δύναμης επαφής, δηλαδή την κάθετη στις επιφάνειες δύναμη και την τριβή.

Η κάθετη δύναμη  $F_N$  μπορεί να μοντελοποιηθεί είτε ως κρούση, είτε μέσω του συντελεστή αποκατάστασης (coefficient of restitution), είτε μέσω συνάρτησης που ορίζεται από το χρήστη. Για τις προσομοιώσεις, η κάθετη δύναμη μοντελοποιείται ως κρούση, στην οποία πρέπει να ορισθούν ορισμένες παράμετροι, όπως η δυσκαμψία (stiffness), ο εκθέτης δύναμης (force exponent), η απόσβεση (damping) και το βάθος διείσδυσης (penetration depth). Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μαθηματικά την κρούση σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_N = \begin{cases} 0 & \alpha v q > q_0 \\ k(q_0 - q)^e - B\dot{q} \text{STEP}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) & \alpha v q \leq q_0 \end{cases} \quad (3-2)$$

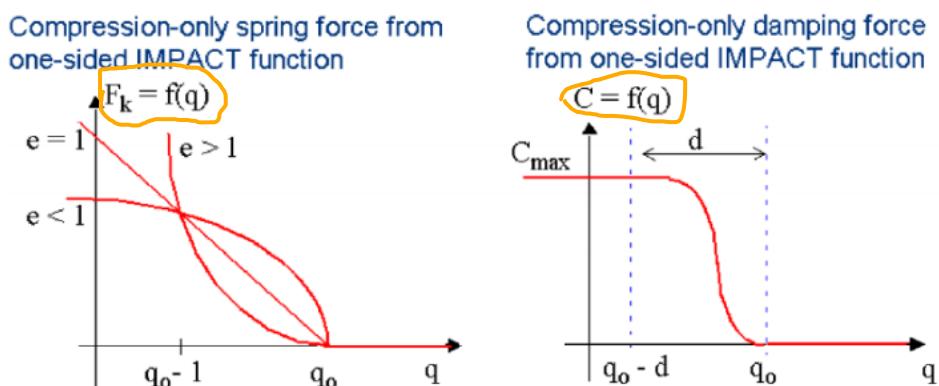
όπου:

$q$ : μια έκφραση που καθορίζει μια μεταβλητή απόστασης.

$\dot{q}$ : μια έκφραση που καθορίζει τη χρονική παράγωγο του  $q$ .

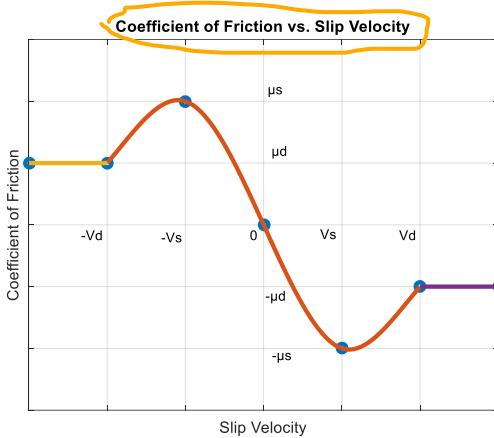
- $q_0$ : μια θετική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει το ελέυθερο μήκος του  $q$ . Αν  $q \leq q_0$  τότε το Adams υπολογίζει μια θετική τιμή για τη δύναμη. Σε αντίθετη περίπτωση η δύναμη παίρνει τη μηδενική τιμή.
- $k$ : μια μη αρνητική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει τη στιβαρότητα μεταξύ των δύο επιφανειών που αλληλεπιδρούν.
- $e$ : μια θετική πραγματική μεταβλητή που προσδίδει μια μη γραμμικότητα στον όρο της δύναμης που αντιπροσωπεύει τη στιβαρότητα.
- $B$ : μια θετική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει το μέγιστο συντελεστή απόσβεσης.
- $d$ : μια θετική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει την οριακή διείσδυση στην οποία το Adams εφαρμόζει την πλήρη απόσβεση.

Οι παραπάνω μεταβλητές χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τη συνάρτηση κρούσης  $IMPACT(q, \dot{q}, q_0, k, e, B, d)$ . Όπως φαίνεται και από τη μαθηματική έκφραση (3-2), αυτή ενεργοποιείται όταν η απόσταση μεταξύ δύο σωμάτων γίνεται μικρότερη από το ελέυθερο μήκος  $q_0$ . Τότε η δύναμη γίνεται μη μηδενική και αποτελείται από δύο όρους: **μία εκθετική δύναμη ελατηρίου** και **μία δύναμη απόσβεσης που ακολουθεί βηματική συνάρτηση**. Πρέπει να σημειωθεί ότι και οι δύο δυνάμεις είναι αυστηρά θετικές. Αυτό εξηγείται, διότι η υπολογιζόμενη δύναμη θα πρέπει να αντιστέκεται στη συμπίεση που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διείσδυσης. Αντίθετα αρνητικές δυνάμεις θα ενίσχυαν τη συμπίεση, κάτι που στην πραγματικότητα δεν μπορεί να συμβεί. Επίσης οι συντελεστές  $k$  και  $e$  χρησιμοποιούνται για να προεγγίσουν την **εκθετική δύναμη ελαστικότητας**. Οι **τιμές που λαμβάνουν αποτελούν μια ένδειξη των υλικών από τα οποία αποτελούνται τα σώματα που έρχονται σε επαφή και συνήθως καθορίζονται από μια διαδικασία δοκιμής και λάθους**, όπως θα δειχθεί και παρακάτω. Επιπρόσθετα, ο λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιείται **γραμμική απόσβεση** είναι το γεγονός ότι **θα προσέθετε μια ασυνέχεια στη δύναμη απόσβεσης**. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, **μια κυβικής μορφής βηματική συνάρτηση** χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη δύναμη απόσβεσης από το μηδέν μέχρι την τιμή  $B \cdot \dot{q}$  κατά το βάθος διείσδυσης  $d$ . Επίσης να σημειωθεί ότι το  $d$  δεν αποτελεί απαραίτητα τη μέγιστη διείσδυση κατά τη διάρκεια της κρούσης, αλλά το βάθος στο οποίο η απόσβεση φθάνει στη μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 3-3: Διαγραμματική απεικόνιση των δύο όρων που συνθέτουν τη συνάρτηση κρούσης (IMPACT function).

Ενώ η κάθετη δύναμη είναι υποχρεωτική για τον ορισμό της επαφής, η τριβή  $F_c$  εμφανίζεται ως προαιρετικό χαρακτηριστικό. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να μην λάβει καθόλου υπόψη την τριβή ή να τη μοντελοποιήσει ως τριβή Coulomb ή μέσω συνάρτησης οριζόμενης από το χρήστη. Για τις προσομοιώσεις σε αυτή την εργασία, η τριβή ορίζεται μέσω του μοντέλου Coulomb, με τη διαφορά ότι το Adams χρησιμοποιεί συνεχή συνάρτηση για τον ορισμό της τριβής Coulomb και όχι ασυνεχή, όπως παρουσιάζεται στη θεωρία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται επιπλέον παράμετροι, εκτός του στατικού και δυναμικού συντελεστή τριβής για τον ορισμό της συνεχούς συνάρτησης της τριβής Coulomb. Αυτές είναι η σχετική ταχύτητα στατικής τριβής (stiction transition velocity -  $V_s$ ) και η σχετική ταχύτητα τριβής ολίσθησης (friction transition velocity -  $V_d$ ), όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4: Αναπαράσταση της συνάρτησης της δύναμης τριβής.

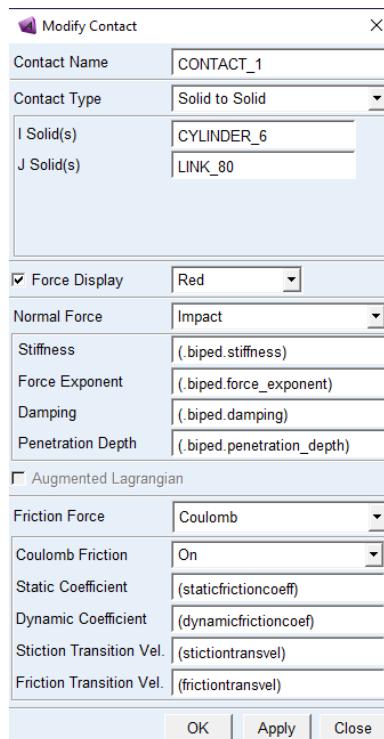
Όσο η τιμή της  $V_s$  λησιάζει το μηδέν, τόσο το μοντέλο προσεγγίζει τη στατική τριβή. Ωστόσο το Adams δεν επιτρέπει να πάρει ακριβώς την τιμή μηδέν, οπότε είναι αδύνατο να μοντελοποιήσει τέλεια το φαινόμενο. Η συνάρτηση που απεικονίζεται παραπάνω ακολουθεί κυβικής μορφής βηματικές συναρτήσεις στο διάστημα από  $-V_d$  έως  $V_d$  (τρεις διαφορετικές, μία για το σύνολο τιμών από  $\mu_d$  έως  $\mu_s$ , μία για το σύνολο τιμών από  $\mu_s$  έως  $-\mu_s$  και μία για το σύνολο τιμών από  $-\mu_s$  έως  $-\mu_d$ ), ενώ λαμβάνει την τιμή  $\pm \mu_d$  στην υπόλοιπη περιοχή.

Επομένως οι τέσσερεις χαρακτηριστικές τιμές καθορίζονται από το χρήστη. Συνήθως οι συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής λαμβάνουν τιμές ανάμεσα στο 0 και το 1 και εξαρτώνται από τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα σώματα που έρχονται σε επαφή. Επίσης τυπικά  $\mu_s > \mu_d$ , καθώς όπως γίνεται και διαισθητικά αντιληπτό είναι ευκολότερο να κρατηθεί σε κίνηση ένα σώμα κατά μήκος μιας οριζόντιας επιφάνειας παρά να ξεκινήσει από την ακινησία. Τέλος ισχύει εξ ορισμού ότι  $V_d > V_s$ . Έτσι το λογισμικό υπολογίζει τους συντελεστές τριβής για κάθε ταχύτητα ολίσθησης. Η τριβή προκύπτει ως:

$$F_c = \mu F_N \quad (3-3)$$

και γι' αυτό οι επιλογές που έχουν γίνει για τον προσδιορισμό της καθέτου δύναμης παίζουν σημαντικό ρόλο και για τον προσδιορισμό της δύναμης τριβής.

Στο Σχήμα 3-5 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ορίζει ο χρήστης τις απαραίτητες παραμέτρους. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που πρέπει να συμπληρώσει (εκτός αυτών που αναφέρθηκαν προηγουμένως) είναι το όνομα που δίνει, ο τύπος της επαφής και τα σώματα που έρχονται σε επαφή. Με τον τύπο επαφής ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν η επαφή θα είναι ανάμεσα σε άκαμπτο σώμα με άκαμπτο σώμα, καμπύλη με καμπύλη, σημείο με καμπύλη, σημείο με επίπεδο, εύκαμπτο σώμα με εύκαμπτο σώμα κ.ο.κ. Τέλος το Adams δίνει τη δυνατότητα να φαίνεται το διάνυσμα της δύναμης (force display) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με χρώμα της αρεσκείας του χρήστη.



**Σχήμα 3-5: Παράθυρο προσδιορισμού παραμέτρων της κάθετης δύναμης και της δύναμης τριβής.**

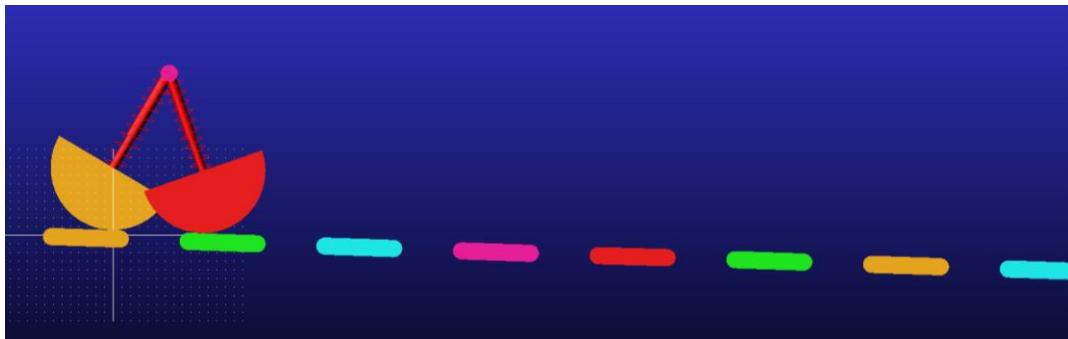
#### Ορισμός μεταβλητών

Το Adams έχει ακόμα ως επιλογή τη δημιουργία σχεδιαστικών μεταβλητών προς διευκόλυνση του χρήστη. Συνήθως αυτές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που πρέπει να αποδοθεί μία τιμή περισσότερες από μία φορές, όπως στον ορισμό των παραμέτρων της δύναμης επαφής. Έτσι αντί ο χρήστης να δώσει την ίδια τιμή δύο φορές, για την δημιουργία επαφής και των δύο πελμάτων με το έδαφος, χρησιμοποιεί μία σχεδιαστική μεταβλητή, στην οποία αποδίδει κάποια τιμή. Κάθε φορά που θα θέλει να αλλάξει αυτήν την τιμή, απλώς αλλάζει την τιμή της σχεδιαστικής μεταβλητής και κατ' επέκταση αλλάζει αυτόματα και η τιμή της αντίστοιχης παραμέτρου με την οποία συνδέεται η συγκεκριμένη σχεδιαστική μεταβλητή.

### 3.3 Προσομοίωση

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση του παθητικού βηματισμού στο λογισμικό MSC Adams. Πολύ σημαντικός παράγοντας κατά τη διάρκεια των

προσομοιώσεων είναι η αλληλεπίδραση του δίποδου με το έδαφος. Επειδή τα δύο σκέλη του δίποδου ρομπότ έχουν ίσο μήκος είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί ενιαίο έδαφος, διότι αυτό θα απέτρεπε την ύπαρξη φάσης αιώρησης κατά το βηματισμό. Επομένως αρχικά γίνεται προσπάθεια δημιουργίας εδάφους με νησίδες (stepping stones).



**Σχήμα 3-6: Έδαφος με σχηματισμούς νησίδων.**

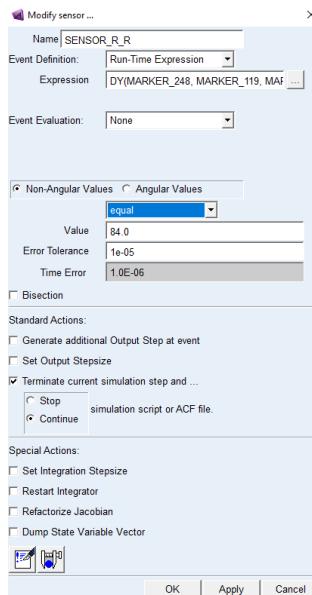
Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η σύγκρουση του πέλματος με τη νησίδα στην οποία δεν αντιστοιχεί φάση στάσης με αυτήν. Με άλλα λόγια η επαφή μεταξύ των πελμάτων και των νησίδων γίνεται εναλλάξ (το πρώτο πέλμα έρχεται σε επαφή με την 1<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> κ.ο.κ νησίδα, ενώ το δεύτερο πέλμα έρχεται σε επαφή με τη 2<sup>η</sup>, 4<sup>η</sup>, 6<sup>η</sup> κ.ο.κ. νησίδα). Ωστόσο επειδή το δίποδο ρομπότ μελετάται σε διαφορετικές συνθήκες, όπως διαφορετικούς συντελεστές τριβής, διαφορετική δυσκαμψία εδάφους κ.λπ., **η απόσταση των νησίδων θα πρέπει να αλλάζει κάθε φορά, κάτι που αποτελεί μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.**

Γι' αυτό το λόγο η **προσομοίωση πραγματοποιείται σε script με ενιαίο έδαφος (χωρίς νησίδες):** μέσω ενός μικρού κώδικα ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί την επαφή ανάμεσα στα πέλματα και το έδαφος. Αυτό είναι επιθυμητό να γίνεται και συγκεκριμένα η επαφή του ενός πέλματος θα πρέπει να ενεργοποιείται κατά την έναρξη της φάσης στάσης και να απενεργοποιείται κατά την έναρξη της φάσης αιώρησης.

**Πρακτικά** αυτή η δυνατότητα δίνεται από το λογισμικό, μέσω μιας ειδικής λειτουργίας που **ονομάζεται αισθητήρας (sensor)**. Η λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται όταν ένα γεγονός καθορισμένο από το χρήστη συμβαίνει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το γεγονός ορίζεται από από μία λογική έκφραση (equal, greater than or equal, less than or equal) που συγκρίνει μια μαθηματική έκφραση (ορίζεται από το χρήστη) με μία τιμή στόχο (target value). Όταν η λογική έκφραση γίνεται αληθής (εντός ενός επιτρεπτού σφάλματος οριζόμενο από το χρήστη) **κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, τότε ο αισθητήρας τροποποιεί χαρακτηριστικά της προσομοίωσης,** όπως το μήκος των βημάτων ολοκλήρωσης, τον τελικό χρόνο προσομοίωσης και αποθηκεύει την τιμή μιας συνάρτησης για μετέπειτα επανάκληση. **Κατά τη διάρκεια της δυναμικής προσομοίωσης το ADAMS/Solver ελέγχει τη λογική έκφραση μετά από κάθε επιτυχές βήμα ολοκλήρωσης.** Ο καθορισμός της μαθηματικής έκφρασης γίνεται είτε μέσω συνάρτησης, είτε μέσω κάποιας υπορουτίνας.

Στο Σχήμα 3-7 ο χρήστης ορίζει τον αισθητήρα. Επίσης φαίνονται τα διάφορα πεδία που πρέπει να συμπληρώσει. Με μπλε φαίνεται η επιλογή της λογικής έκφρασης, ενώ από κάτω ορίζεται η **τιμή στόχος** και τα **επιτρεπτά σφάλματα**. Επιπλέον στο πεδίο "Expression" ορίζεται η μαθηματική έκφραση.

Φυσικά δίνονται και άλλες δυνατότητες, μία εξ αυτών είναι ο τερματισμός της τρέχουσας προσομοίωσης και η συνέχιση εκτέλεσης του script.



Σχήμα 3-7: Παράθυρο διαλόγου για ορισμό αισθητήρα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα βασικό script που ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τις επαφές των πελμάτων με το έδαφος κατά τη διάρκεια ενός διασκελισμού (stride) και ένας επαναληπτικός βρόχος για την εκτέλεση πολλών διασκελισμών.

Η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των επαφών στηρίζεται στις φάσεις λειτουργίας του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου [16]. Σύμφωνα με αυτό ένα βήμα χωρίζεται σε τέσσερεις επιμέρους φάσεις, οι οποίες εναλλάσσονται κυκλικά. Αυτές είναι η επαφή του πέλματος με το έδαφος, η απομάκρυνση του πέλματος από το έδαφος, η προώθηση του σκέλους σε αιώρηση και η κατάβαση του σκέλους σε αιώρηση. Κάθε μία από αυτές τις φάσεις περιγράφεται από μία μαθηματική συνθήκη, οι οποίες αναφέρονται εκτενώς στην αντίστοιχη παραπομπή. Η κάθε μαθηματική συνθήκη μπορεί να χωρισθεί σε τρία μέρη, τη μαθηματική έκφραση (π.χ. η μεταβλητή που περιγράφει τη γωνία ανάμεσα στην κατακόρυφο και το ένα σκέλος), μία λογική έκφραση (μικρότερο, μεγαλύτερο ή ίσο) και μία πιμή στόχο. Γι' αυτό το λόγο μπορούν εύκολα να εισαχθούν στο λογισμικό Adams, μέσω των αισθητήρων. Έτσι προκύπτουν συνολικά οχτώ αισθητήρες, τέσσερεις για κάθε πέλμα. Η αντίστοιχα των φάσεων λειτουργίας του μοντέλου με τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες είναι η εξής:

- Επαφή πέλματος με έδαφος (Φάση A) ↔ SENSOR, ID=1 για το πρώτο πέλμα και SENSOR, ID=7 για το δεύτερο πέλμα.
- Απομάκρυνση πέλματος από έδαφος (Φάση B) ↔ SENSOR, ID=5 για το πρώτο πέλμα και SENSOR, ID=4 για το δεύτερο πέλμα.
- Προώθηση σκέλους σε αιώρηση (Φάση Γ) ↔ SENSOR, ID=2 για το πρώτο πέλμα και SENSOR, ID=6 για το δεύτερο πέλμα.
- Κατάβαση σκέλους σε αιώρηση (Φάση Δ) ↔ SENSOR, ID=3 για το πρώτο πέλμα και SENSOR, ID=8 για το δεύτερο πέλμα.

Η αντιστοιχία αυτή γίνεται ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να παρακολουθήσει ευκολότερα τον κώδικα και την επεξήγηση αυτού.

Για τη δημιουργία του βασικού script, ο χρήστης επιλέγει την καρτέλα Simulation και πατάει το κουμπί “Create a new Simulation Script”, ενώ στον τύπο του script επιλέγει “Adams Solver Commands”. Στο παράθυρο που αναδύεται εισάγει το σχετικό κώδικα. Για τη δημιουργία του επαναληπτικού βρόχου, ο χρήστης ομοίως από την καρτέλα Simulation > Create a new Simulation Script, επιλέγει ως τύπο script “Adams View Commands” και εισάγει το σχετικό κώδικα στο αναδυόμενο παράθυρο.

Παρακάτω παρατίθενται οι δύο κώδικες για την προσομοίωση του παθητικού βηματισμού. Για καλύτερη επεξήγηση γίνεται αναφορά στο Σχήμα 3-1, στο οποίο υπάρχει το πέλμα κίτρινου χρώματος και το πέλμα κόκκινου χρώματος.

➤ **Κώδικας ενός διασκελισμού**

DEACTIVATE/SENSOR, ID=1,3,4

*!απενεργοποίηση αισθητήρων 1,3 και 4*

DEACTIVATE/SENSOR, ID=5,6,7,8

*!απενεργοποίηση αισθητήρων 5,6,7 και 8*

DEACTIVATE/CONTACT, ID=1

*!απενεργοποίηση επαφής 1 (επαφή κόκκινου πέλματος με έδαφος)*

ACTIVATE/SENSOR, ID=2

*!ενεργοποίηση αισθητήρα 2.*

SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000

*!έναρξη δυναμικής προσομοίωσης με τελικό χρόνο και αριθμό βημάτων καθοριζόμενο από το χρήστη. Σε αυτό το σημείο μόνο ο αισθητήρας 2 είναι ενεργοποιημένος, καθώς και η επαφή 2 (επαφή κίτρινου πέλματος με έδαφος). Αυτό σημαίνει ότι το κόκκινο πέλμα ξεκινά από τη φάση 1, ενώ το κίτρινο πέλμα ακουμπά με το έδαφος. Έτσι η προσομοίωση εκτελείται μέχρι το κόκκινο πέλμα να πρωθηθεί ενώ αιωρείται.*

DEACTIVATE/SENSOR, ID=2

*!απενεργοποίηση αισθητήρα 2*

ACTIVATE/SENSOR, ID=3

*!ενεργοποίηση αισθητήρα 3*

SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000

*!έναρξη δυναμικής προσομοίωσης στη φάση που το κόκκινο πέλμα κατεβαίνει ενώ αιωρείται (φάση Δ), ενώ το κίτρινο πέλμα συνεχίζει να βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος.*

DEACTIVATE/SENSOR, ID=3

*!απενεργοποίηση αισθητήρα 3*

ACTIVATE/SENSOR, ID=1

*!ενεργοποίηση αισθητήρα 1*

SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000

**!έναρξη δυναμικής προσομοίωσης στη φάση που το κόκκινο πέλμα ξεκινά την επαφή με το έδαφος (φάση A). Μέχρι στιγμής η επαφή 1 ήταν απενεργοποιημένη και γι' αυτό το κόκκινο πέλμα μπορούσε να διαπεράσει το έδαφος.**

**DEACTIVATE/SENSOR, ID=1**

**!απενεργοποίηση αισθητήρα 1**

**ACTIVATE/CONTACT, ID=1**

**!ενεργοποίηση επαφής 1. Εφόσον έχει εκτελεσθεί η προσομοίωση της φάσης A, θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η επαφή του κόκκινου πέλματος με το έδαφος, διότι θα πρέπει να εισέλθει στη φάση στάσης. Το κίτρινο πέλμα συνεχίζει να βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, επομένως ξεκινά η φάση διπλής στήριξης.**

**ACTIVATE/SENSOR, ID=4**

**!ενεργοποίηση αισθητήρα 4**

**SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000**

**!έναρξη δυναμικής προσομοίωσης μέχρι τη στιγμή που το κίτρινο πέλμα να αποχωρισθεί από το έδαφος (φάση B), ώστε να τελειώσει η φάση διπλής στήριξης.**

**DEACTIVATE/SENSOR, ID=4**

**!απενεργοποίηση αισθητήρα 4**

**DEACTIVATE/CONTACT, ID=2**

**!απενεργοποίηση επαφής 2. Αυτό γίνεται, ώστε το κίτρινο πέλμα να προωθηθεί χωρίς να αλληλοεπιδράσει με το έδαφος και να ακολουθήσουν οι φάσεις λειτουργίας για αυτό. Ετσι το υπόλοιπο του κώδικα ακολουθεί παρόμοιο σκεπτικό σχετικά με τη διαδοχή των φάσεων, την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση επαφών που αφορούν το δεύτερο βήμα του διασκελισμού.**

**ACTIVATE/SENSOR, ID=6**

**SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000**

**DEACTIVATE/SENSOR, ID=6**

**ACTIVATE/SENSOR, ID=8**

**SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000**

**DEACTIVATE/SENSOR, ID=8**

**ACTIVATE/SENSOR, ID=7**

**SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000**

**DEACTIVATE/SENSOR, ID=7**

**ACTIVATE/CONTACT, ID=2**

**ACTIVATE/SENSOR, ID=5**

**SIMULATE/DYNAMIC, END=100.0, STEPS=50000**

**DEACTIVATE/SENSOR, ID=5**

**DEACTIVATE/CONTACT, ID=1**

**Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που προσφέρει η προσομοίωση σε script είναι το γεγονός ότι **ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετικό αριθμό βημάτων προσομοίωσης για κάθε φάση.** Έτσι σε**

περιπτώσεις που χρειάζεται πολύ καλή ανάλυση, όπως κατά την επαφή των πελμάτων με το έδαφος, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μεγάλο αριθμό βημάτων, ενώ σε περιπτώσεις που δεν χρειάζεται πολύ καλή ανάλυση, όπως κατά τη φάση αιώρησης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μικρότερο αριθμό βημάτων.

- Επαναληπτικός βρόχος

```
for variable_name=tempreal start_value=1 end_value=10
    simulation single_run scripted sim_script_name=step &
    reset_before_and_after=no
end
```

Ουσιαστικά δημιουργείται ένας επαναληπτικός βρόχος, ο οποίος εκτελεί το βασικό κώδικα του ενός διασκελισμού, όσες φορές υποδεικνύει η τιμή end\_value. Έτσι στο συγκεκριμένο κώδικα, το δίποδο ρομπότ θα εκτελέσει 20 βήματα ή 10 διασκελισμούς, καθώς σύμφωνα με την ορολογία ένας διασκελισμός αντιστοιχεί σε δύο βήματα.

## 3.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

### 3.4.1 Σύγκριση με Matlab

Εφόσον έχει ορισθεί πλήρως το μοντέλο στο λογισμικό Adams, μπορεί να αξιολογηθεί σύμφωνα με διάφορες μετρικές. Εδώ επιλέγεται να γίνει μια άμεση σύγκριση των προσομοιώσεων του προγράμματος με αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο στη Matlab.

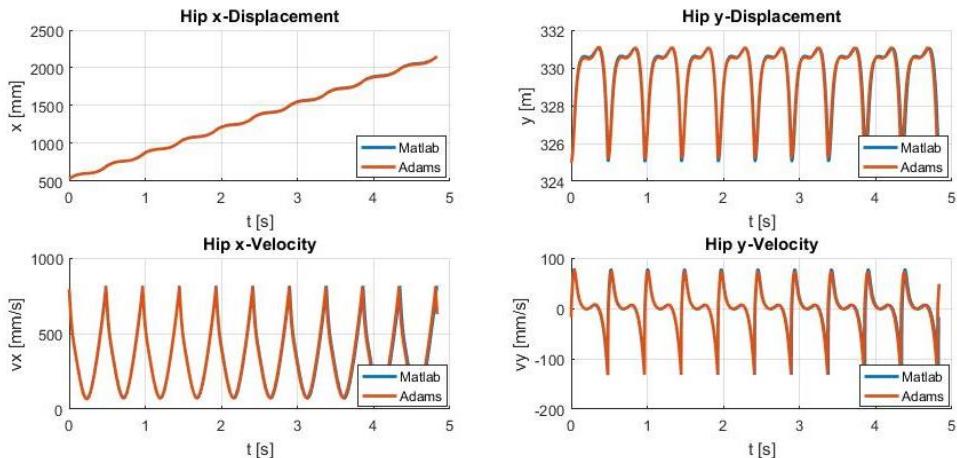
Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, ο δίποδος μηχανισμός χαρακτηρίζεται από κάποια μεγέθη, τα οποία όχι μόνο εισάγονται στο Adams για την εκτέλεση των προσομοιώσεων, αλλά και αποτελούν βασικό οδηγό για το λεπτομερή σχεδιασμό της κατασκευής. Αυτά έχουν παρουσιασθεί και προηγουμένως, όμως στον Πίνακα 3-1 ορίζονται και οι επιλεχθείσες τιμές τους.

**Πίνακας 3-1: Εκλεχθείσες τιμές των αδιάστατων παραμέτρων.**

Όνομασία παραμέτρου	Σύμβολο	Ορισμός	Τιμή
Συντελεστής κύλισης	$\rho$	$\rho = \frac{r}{L_{nat}}$	0.2500
Λόγος μαζών	$\mu$	$\mu = \frac{m}{M}$	1.0600
Συντελεστής κατανομής μάζας πέλματος	$\lambda$	$\lambda = \frac{l}{L_{nat}}$	0.3072
Αδιάστατη σταθερά ελατηρίου	$\kappa$	$\kappa = \frac{k L_{nat}}{M g}$	300.7800
Αδιάστατη σταθερά απόσβεσης	$\beta$	$\beta = \frac{B}{M} \sqrt{\frac{L_{nat}}{g}}$	34.0200

Οι τιμές που λαμβάνουν οι παραπάνω παράμετροι είναι πολύ σημαντικές για την ευστάθεια του βηματισμού. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν συγκεκριμένοι συνδυασμοί παραμέτρων, σύμφωνα με τους οποίους επιτυγχάνεται επαναλαμβανόμενη δυναμική συμπεριφορά.

Η σύγκριση που πραγματοποιείται ανάμεσα στις προσομοιώσεις των δύο λογισμικών αφορά την τροχιά του κέντρου μάζας του ισχίου στις δύο κατευθύνσεις κίνησης, καθώς και την ταχύτητα αυτού.



**Σχήμα 3-8: Σύγκριση τροχιάς και ταχύτητας του κέντρου μάζας του ισχίου στις δύο κατευθύνσεις για το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο σε Matlab και Adams.**

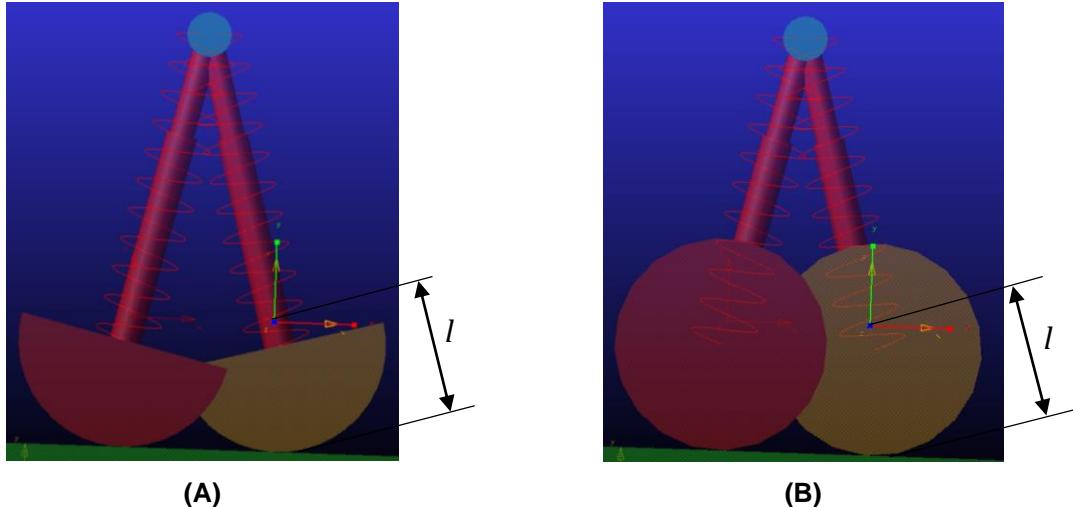
Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα δύο μοντέλα περιγράφουν ουσιαστικά την ίδια δυναμική. Οι ελάχιστες διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο προσέγγισης της συνθήκης κύλισης χωρίς ολίσθηση μεταξύ Matlab και Adams. Πιο συγκεκριμένα στη Matlab χρησιμοποιούνται οι πολλαπλασιαστές Lagrange, επομένως θεωρείται ιδανικό έδαφος απαλλαγμένο από ενδοτικότητα και απόσβεση. Αντίθετα στο μοντέλο του Adams, ~~η~~ επαφή μοντελοποιείται μέσω θεωρίας κρούσεων και τριβής, όπως εξηγείται και προηγουμένως. Αυτό συνεπάγεται ότι το πέλμα αλληλεπιδρά με το έδαφος. Άρα το λογισμικό Adams προκειμένου να υπολογίσει τις προκύπτουσες δυνάμεις επαφής οδηγεί σε μια μικρή εισχώρηση του πέλματος στο έδαφος, γεγονός που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα δύο λογισμικά χρησιμοποιούν και διαφορετικούς αριθμητικούς επιλύτες, άλλος ένας παράγοντας που μπορεί να οδηγεί σε μικροαποκλίσεις.

Σημείωση: Προσοχή πρέπει να δοθεί στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζεται το μοντέλο στο λογισμικό Adams μέσω των επιλεχθεισών παραμέτρων. Δηλαδή, αυτές δεν πρέπει να είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες της Matlab, ώστε να περιγράφεται η ίδια δυναμική. Πραγματικά έτσι συμβαίνει, όμως λόγω του ότι έχει επιλεχθεί  $\lambda = 0.3072$ , συνεπάγεται ότι

$$l = \lambda \cdot L_{nat} = 0.3072 \cdot 0.333 = 0.102m > r = 0.08325m \quad (3-4)$$

που σημαίνει ότι το κέντρο μάζας του πέλματος είναι εκτός του σώματος, όταν αυτό είναι ημικυκλικό. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε ότι οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα κατά την προσομοίωση στο

Adams: γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε πλήρως κυκλικό πέλμα, εφόσον η βασική παράμετρος σε αυτήν την περίπτωση είναι η καμπυλότητα του πέλματος και όχι το αν αυτό θα είναι ημικυκλικό ή πλήρως κυκλικό. Με αυτόν τον τρόπο πλέον το κέντρο μάζας είναι εντός του σώματος του πέλματος, όπως εξηγείται καλύτερα στο Σχήμα 3-9.



**Σχήμα 3-9: (Α) Κέντρο μάζας ημικυκλικού πέλματος εκτός σώματος (Β) Κέντρο μάζας κυκλικού πέλματος εντός σώματος.**

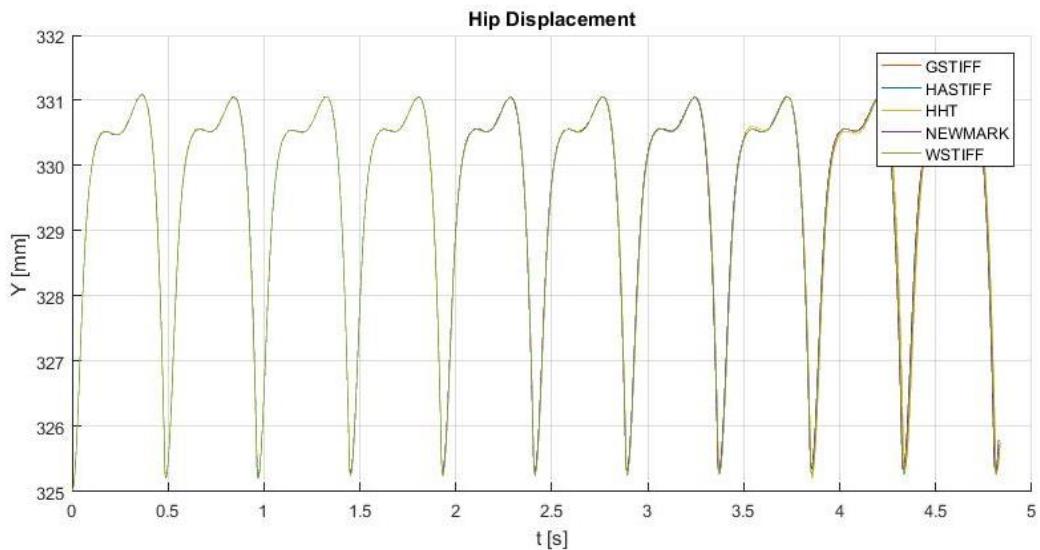
Φυσικά στόχος της εργασίας δεν είναι να ταυτίσει τα δύο μοντέλα, αλλά να ελέγξει μέσω προσομοίωσης και πειράματος την ικανότητα του δίποδου να περπατάει παθητικά. Γι' αυτό το λόγο **είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί το έδαφος με φυσικές μεταβλητές, οι οποίες δίνουν μια εκτίμηση της πραγματικότητας παρακάμπτοντας έτσι τις ιδανικές συνθήκες των μαθηματικών περιορισμών.** Ωστόσο οι μεταβλητές αυτές δεν μπορούν να είναι επακριβώς γνωστές κατά την πειραματική διαδικασία, διότι δεν είναι εύκολος ο άμεσος προσδιορισμός τους, άρα θα πρέπει να ακολουθήσει σχετική διερεύνηση.

### 3.4.2 Διερεύνηση ως προς τις παραμέτρους επίλυσης

Σε αυτό το στάδιο εκτελούνται διάφορες προσομοιώσεις παθητικού βηματισμού στο λογισμικό Adams, μεταβάλλοντας κάθε φορά κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος του επιλύτη. Αυτό είναι επιθυμητό, ώστε να διερευνηθεί η **ευρωστία του συστήματος ως προς τις παραμέτρους της προσομοίωσης**. Βασικός στόχος είναι τα αποτελέσματα που θα ληφθούν να αποτελούν μια ικανοποιητική εκτίμηση για τη μετέπειτα μελέτη που θα αφορά το πλήρες μοντέλο, αλλά και να μπορούν να προσεγγίσουν ως ένα βαθμό τις συνθήκες του πειράματος με την πραγματική κατασκευή. Για αυτό το λόγο γίνεται διερεύνηση τόσο ως προς τις αριθμητικές μεταβλητές του επιλύτη, όσο και ως προς τις φυσικές μεταβλητές της μοντελοποίησης της κρούσης στο λογισμικό Adams.

Όσον αφορά τις αριθμητικές μεταβλητές δοκιμάζονται διάφοροι επιλύτες σε διάφορα επιτρεπτά σφάλματα. Συγκεκριμένα προσομοιώνεται ο παθητικός βηματισμός με τις ίδιες συνθήκες, δηλαδή  $10^3$  βήματα επίλυσης ανά δευτερόλεπτο και σφάλμα  $10^{-6}$ , αλλάζοντας κάθε φορά τον επιλύτη. Οι επιλύτες

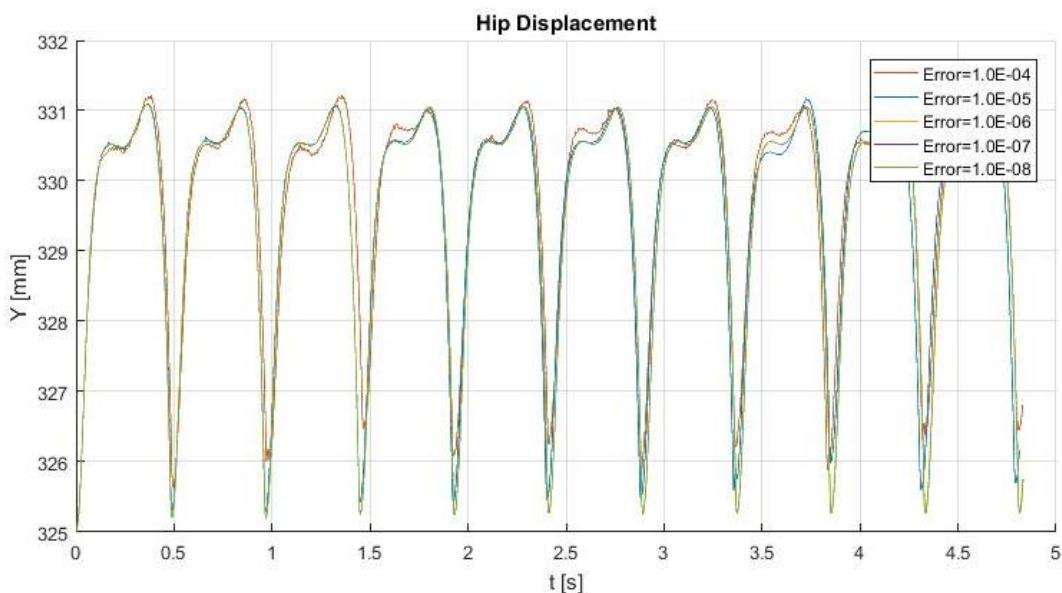
που δοκιμάζονται είναι οι **GSTIFF**, **HASTIFF**, **HHT**, **NEWMARK** και **WSTIFF**. Τα αποτελέσματα που δίνουν είναι σχεδόν πανομοιότυπα, βλ. Σχ. 3-12.



**Σχήμα 3-10: Μελέτη βηματισμού για διαφορετικούς επιλύτες.**

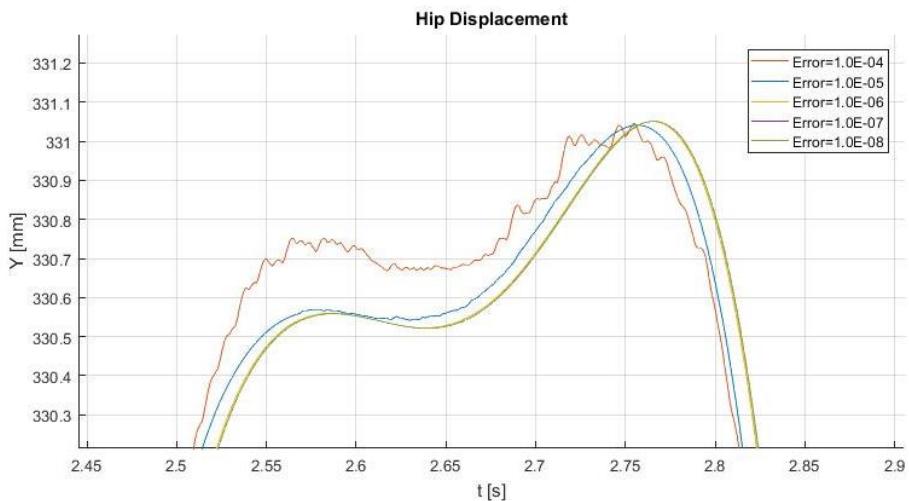
Επομένως συμπεραίνεται ότι **δεν παίζει σημαντικό ρόλο ο χρησιμοποιούμενος επιλύτης** για τις προσομοιώσεις. Παρ' όλα αυτά υιοθετείται ο επιλύτης **GSTIFF** για τις δυναμικές προσομοιώσεις, όπως προτείνεται και από το αντίστοιχο documentation του λογισμικού.

Στη συνέχεια εξετάζεται το επιτρεπόμενο σφάλμα επίλυσης και πώς αυτό επηρεάζει το βάδισμα. Έτσι εκτελείται η προσομοίωση διατηρώντας τις **ΐδιες συνθήκες και αλλάζοντας κάθε φορά το επιτρεπόμενο σφάλμα**.



**Σχήμα 3-11: Μελέτη βηματισμού για διαφορετικά επιτρεπόμενα σφάλματα.**

Οι προσομοιώσεις που έχουν γίνει αφορούν απόλυτο σφάλμα από  $10^{-4}$  έως  $10^{-8}$ . Προκειμένου να εξηγηθούν καλύτερα κάποια σημεία σχετικά με τη μεταβολή του σφάλματος, παρουσιάζεται το Σχήμα 3-11 εστιασμένο σε μια κορυφή.



**Σχήμα 3-12: Εστίαση σε μια περιοχή της καμπύλης μετατόπισης του ισχίου.**

Πλέον φαίνεται ευκρινέστερα ότι για σφάλμα  $10^{-4}$  και  $10^{-5}$  οι καμπύλες παρουσιάζουν αισθητή απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Για τις μικρότερες τιμές του σφάλματος φαίνεται οι καμπύλες να προσεγγίζουν η μία την άλλη ικανοποιητικά. Γι' αυτό το λόγο αποφασίζεται ότι για τις προσομοιώσεις θα χρησιμοποιείται ως επιτρεπόμενο σφάλμα  $10^{-6}$ , το οποίο παρέχει και την επιθυμητή ακρίβεια αλλά δεν απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ. Τέλος να αναφερθεί ότι για ακόμα μικρότερες τιμές του σφάλματος, η προσομοίωση οδηγείται σε αστάθεια, κάτι που πιθανώς οφείλεται στη μεγάλη συσσώρευση σφάλματος όταν εκτελούνται πολλά μικρά βήματα επίλυσης.

Όσον αφορά τις φυσικές μεταβλητές για τη μοντελοποίηση της κρούσης, δοκιμάζεται διαφορετική δυσκαμψία (stiffness), απόσβεση (damping), εκθέτης δύναμης (force exponent) εδάφους, αλλά και διαφορετικοί συντελεστές τριβής. Οι τιμές αυτές στην πραγματικότητα προκύπτουν από το χρησιμοποιούμενο υλικό, τόσο για το πέλμα του ρομπότ, όσο και για το έδαφος που επιλέγονται για την εκτέλεση των πειραμάτων. Ωστόσο επιδιώκεται να υπάρχει μια ευελιξία ως προς τις συνθήκες του πειράματος και γι' αυτό δοκιμάζονται διάφορες τιμές στους συντελεστές αυτούς.

Οι ονομαστικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων είναι:

$$k = 4 \cdot 10^5 \text{ N / mm} \quad (3-5)$$

$$c = 10 \text{ Ns / mm} \quad (3-6)$$

$$e = 2.2 \quad (3-7)$$

$$\mu = 1 \quad (3-8)$$

όπου:

$k$ : stiffness

$c$ : damping

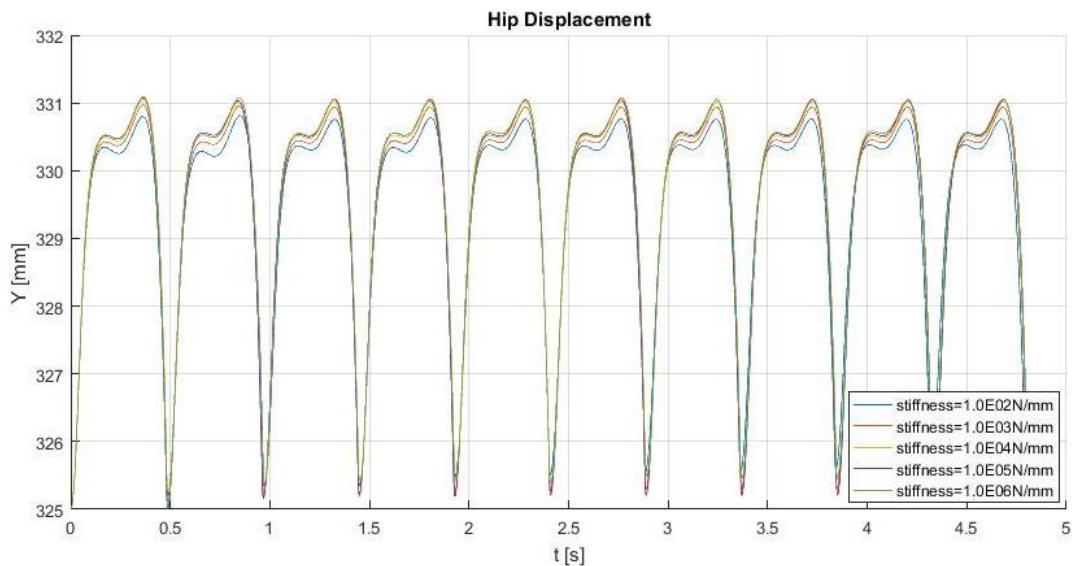
$e$ : force exponent

$\mu$ : συντελεστής στατικής τριβής

Η επίδρασή τους στη μοντελοποίηση της επαφής και της τριβής έχει εξηγηθεί παραπάνω.

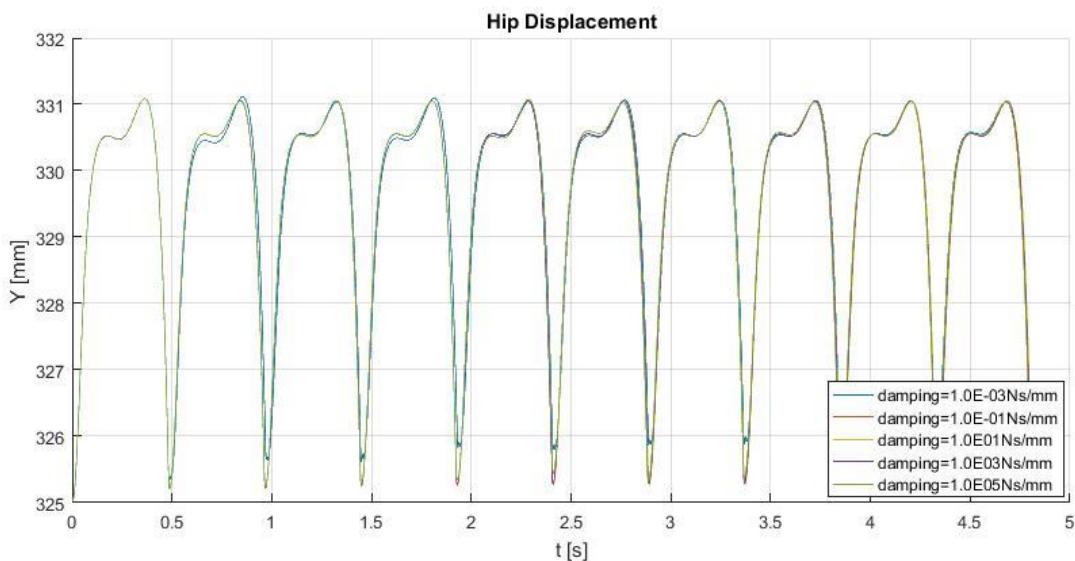
Αλλάζοντας κάθε φορά μία παράμετρο και κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες προκύπτουν τα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-13 η δυσκαμψία του εδάφους επηρεάζει το βηματισμό του δίποδου, ωστόσο βηματισμός επιτυγχάνεται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος  $k$  από  $10^2\text{N/mm}$  έως  $10^6\text{N/mm}$ . Επομένως αυτή η παράμετρος μπορεί να ενταχθεί σε ελεγχόμενα πλαίσια.



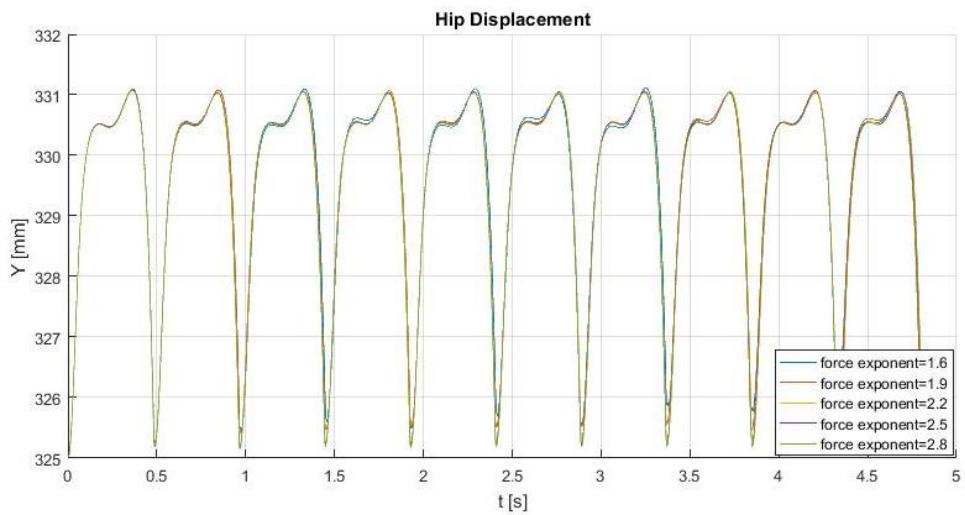
**Σχήμα 3-13: Μελέτη βηματισμού για διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους.**

Επιπροσθέτως ελέγχεται η συμπεριφορά του μοντέλου σε ένα μεγάλο εύρος απόσβεσης εδάφους, από  $10^{-3}\text{Ns/mm}$  έως  $10^5\text{Ns/mm}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14, ενώ οι αποκλίσεις που παρατηρούνται δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Άρα ούτε η απόσβεση του εδάφους επηρεάζει την ευστάθεια βηματισμού σε λογικά πλαίσια.



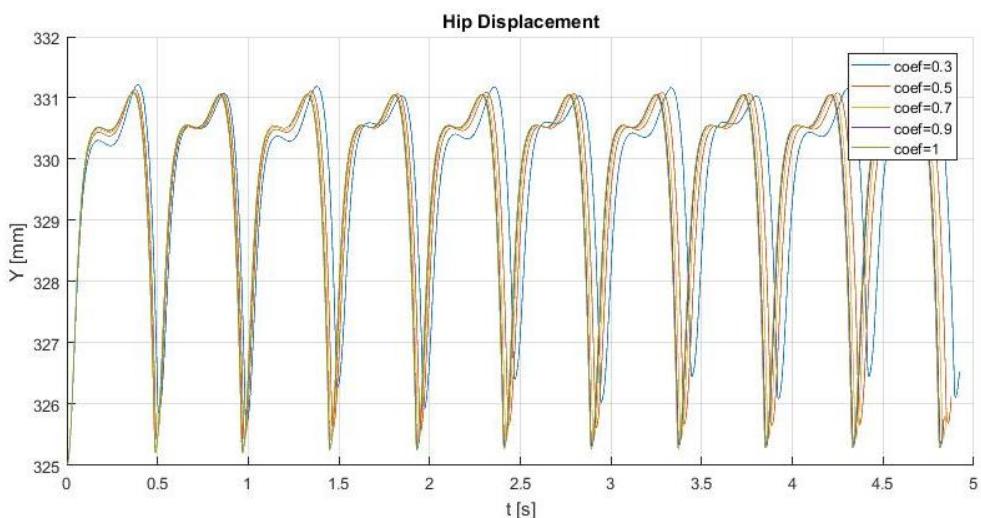
**Σχήμα 3-14: Μελέτη βηματισμού για διαφορετικές αποσβέσεις εδάφους.**

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3-15 πραγματοποιείται διερεύνηση για τον εκθέτη δύναμης που λαμβάνεται υπόψη στη μοντελοποίηση της επαφής. Όπως φαίνεται δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στα αποτελέσματα.



**Σχήμα 3-15: Μελέτη βηματισμού για διαφορετικούς εκθέτες δύναμης.**

Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-16, το δίποδο μοντέλο δοκιμάζεται σε διαφορετικές συνθήκες τριβής. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι αυτό δεν ολισθαίνει για συντελεστή τριβής από 0.3 έως 1. Φυσικά παρατηρούνται αποκλίσεις στην απόκριση, κάτι που είναι αναμενόμενο, διότι η τριβή είναι ένας από τους βασικούς μηχανισμούς που επιτρέπουν το βηματισμό.



**Σχήμα 3-16: Μελέτη βηματισμού για διαφορετικούς συντελεστές τριβής.**

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι ορισμένες διαφορές στην μοντελοποίηση επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συνεπώς θα πρέπει να γίνει αντίστοιχη διερεύνηση και στο λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο θα αντιστοιχεί με μεγαλύτερη ακρίβεια στο πειραματικό δίποδο που θα κατασκευασθεί, όπως θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Έτσι θα μπορούν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, ώστε να επιτευχθούν κατά την πειραματική διαδικασία όσο το δυνατόν ευνοϊκότερες συνθήκες βηματισμού.

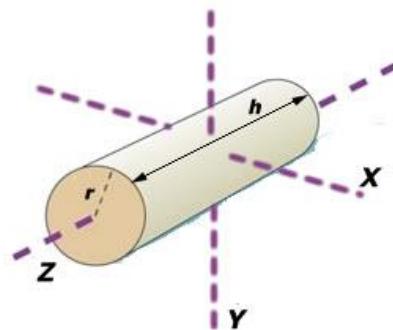
### 3.4.3 Προσθήκη ροπής αδράνειας στα σώματα

Πριν ξεκινήσει ο αναλυτικός σχεδιασμός του δίποδου μηχανισμού, μελετάται μια επέκταση του απλουστευμένου μοντέλου. Συγκεκριμένα εκτελούνται προσομοιώσεις λαμβάνοντας πλέον υπόψη και τις αδράνειες των σωμάτων. Κατ' επέκταση προκύπτουν διαφορές σε σχέση με πριν, οι οποίες βέβαια είναι αναμενόμενες.

Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει μόνο κυλινδρικά τεμάχια, οπότε δεν είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της ροπής αδράνειας των σωμάτων, βλ. Σχ. 3-17. Κατά τα γνωστά, η ροπή αδράνειας γύρω από τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$ , κυλινδρικού εξαρτήματος μάζας  $m$ , ακτίνας  $r$  και ύψους  $h$  δίνεται από τους τύπους:

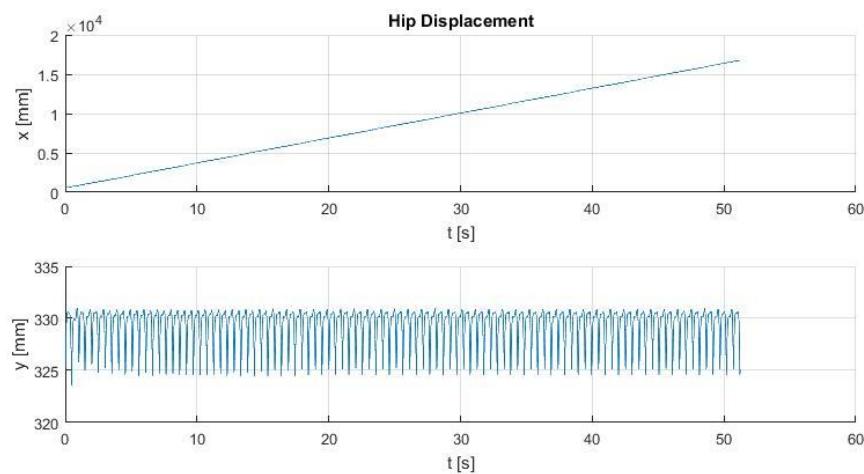
$$I_{xx} = I_{yy} = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (3 \cdot r^2 + h^2) \quad (3-9)$$

$$I_z = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (3-10)$$

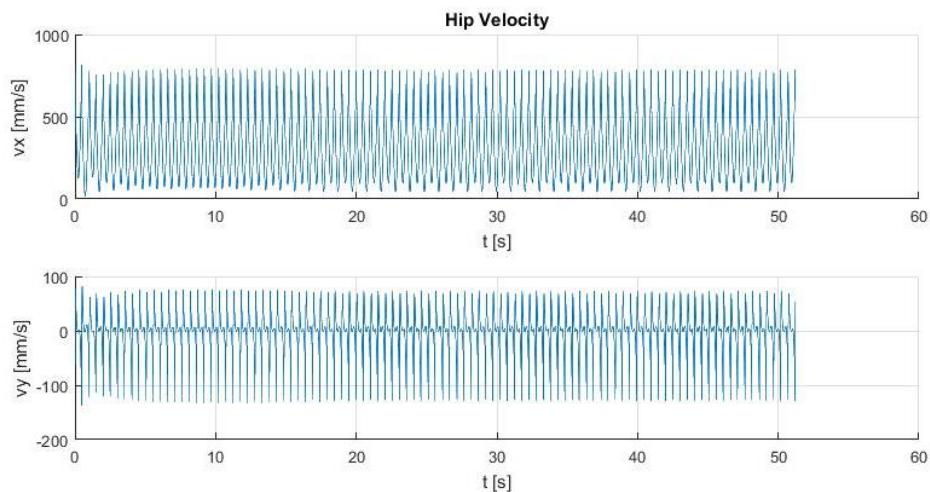


Σχήμα 3-17: Παράδειγμα κυλινδρικού εξαρτήματος.

Η προσθήκη ροπής αδράνειας στο μοντέλο κρίνεται απαραίτητη, διότι στην πραγματικότητα παίζει σπουδαίο ρόλο στη συμπεριφορά του ρομπότ. Έτσι πραγματοποιείται μια εκτεταμένη προσομοίωση, στην οποία το δίποδο μοντέλο επιτυγχάνει 100 βήματα, καλύπτοντας συνολική απόσταση 17m. Για την πιστοποίηση της προσομοίωσης καταγράφονται στο Σχήμα 3-18 και στο Σχήμα 3-19 η τροχιά και η ταχύτητα του κέντρου μάζας του ισχίου αντίστοιχα.



Σχήμα 3-18: Τροχιά ισχίου μοντέλου με αδράνεια.



**Σχήμα 3-19: Ταχύτητα ισχίου μοντέλου με αδράνεια.**

Όπως φαίνεται από τα καταγραφόμενα διαγράμματα, εμφανίζεται και σε αυτήν την περίπτωση μια αρχική μεταβατική περιοχή. Επίσης εύκολα διακρίνεται η εμφάνιση διπλής περιοδικότητας κατά το βηματισμό, καθώς τα ίδια μέγιστα εμφανίζονται ανά δύο επαναλήψεις.

Επομένως επιβεβαιώνεται ότι η δυναμική του μοντέλου, όχι μόνο του απλουστευμένου, αλλά και αυτού που περιλαμβάνει αδράνεια των σωμάτων, είναι ικανή να οδηγήσει σε ευσταθείς βηματισμούς, παρ' ότι αυτοί διαφέρουν πτοιοτικά μεταξύ τους. Αυτό αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την περαιτέρω επέκταση του δίποδου σε τρισδιάστατη μορφή και τη δοκιμή του λεπτομερούς μοντέλου σε παθητικό βάδισμα.

## 4 Σχεδιασμός του δίποδου ρομπότ

Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί οι αρχικές προσομοιώσεις παθητικού βαδίσματος, μπορούν να εξαχθούν από αυτές επιπλέον στοιχεία, όπως οι δυνάμεις που καταπονούν τα πέλματα κατά την επαφή τους με το έδαφος, οι δυνάμεις των ελατηρίων και οι δυνάμεις προερχόμενες από τις μάζες των ίδιων των εξαρτημάτων. Σε αυτό το εδάφιο θα παρουσιασθούν οι διάφορες σχεδιαστικές ιδέες που δημιουργήθηκαν, αλλά και η τελική λύση που τελικά υλοποιήθηκε. Φυσικά οι αρχικές ιδέες διαφέρουν από την τελική, καθώς δεν είναι δυνατόν να υπάρξει κάποια ευθύγραμμη πορεία σχεδιασμού. Δηλαδή κατά τη διάρκεια της μελέτης προέκυψαν διάφορες αλλαγές, τόσο για λόγους λειτουργικότητας, όσο και για λόγους αντοχής των εξαρτημάτων. Συνοπτικά η επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

- a) Εκτέλεση δυναμικών προσομοιώσεων και εξαγωγή φορτίων και χαρακτηριστικών μεγεθών
- b) Σχεδιαστική ιδέα και υλοποίηση αυτής σε περιβάλλον SolidWorks
- c) Ανάλυση αντοχών των εξαρτημάτων με πεπερασμένα στοιχεία
- d) Λειτουργικός έλεγχος του λεπτομερούς μοντέλου με εκτέλεση δυναμικών προσομοιώσεων
- e) Τροποποίηση του μοντέλου και επανεξέταση

Έτσι οι φάσεις αυτές επαναλήφθηκαν αρκετές φορές μέχρι τον τελικό σχεδιασμό. Φυσικά λαμβάνονται υπόψη και άλλες κατευθυντήριες γραμμές, καθώς και απαιτήσεις που θεωρήθηκαν ότι το δίποδο ρομπότ έπρεπε να πληροί απαραίτητως. Αναλυτικότερα αναφέρονται οι εξής:

- **Μειωμένο βάρος κατασκευής.** Το μειωμένο βάρος της κατασκευής θεωρείται σημαντικό για την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της κατασκευής, αλλά και για την ευκολία χειρισμού του ρομπότ. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας **ελαφρά υλικά υψηλής αντοχής**, όπως το **αλουμίνιο στα κρίσιμα εξαρτήματα**, καθώς και υλικών γενικότερα χαμηλής πυκνότητας, όπως **είναι το πλαστικό ABS**. Επίσης επιδιώκονται δομές από τις οποίες αφαιρείται υλικό στα σημεία που δεν χρειάζεται.
- **Αυτοτέλεια μηχανισμού.** Επιδιώκεται το ρομπότ να διατηρεί το κέντρο μάζας του σε σημείο που **να μην ανατρέπεται κατά τη διάρκεια του βηματισμού**. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ρομπότ με ζεύγος εσωτερικών και εξωτερικών ποδιών.
- **Σχεδιασμός σπονδυλωτής μορφής (modular design).** Κρίνεται απαραίτητο το ρομπότ να μπορεί να συναρμολογείται και να αποσυναρμολογείται εύκολα, διότι αυτό δίνει τη δυνατότητα για μετέπειτα αλλαγές και τροποποιήσεις που δεν θα οδηγήσουν σε μεγάλες σχεδιαστικές αναδιαμορφώσεις. Επιπρόσθετα, με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η αντικατάσταση ενός εξαρτήματος σε περίπτωση αστοχίας αυτού.
- **Μείωση των τριβών σε κινούμενα μέρη.** Επειδή είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η επίδραση της τριβής μεταξύ των συναρμολογούμενων εξαρτημάτων κατά την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων, γίνεται προσπάθεια μείωσης αυτής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται εξαρτήματα χαμηλής τριβής, όπως **έδρανα κύλισης στα περιστρεφόμενα μέρη, σωλήνες πολυακετάλης** που ενδείκνυνται ως αντιτριβικά υλικά και γράσο στις περιπτώσεις που υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα σε μεταλλικά μέρη.

- Πρόσδοση ενδοτικότητας. Για την ομαλή λειτουργία του δίποδου, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενδοτικότητας τόσο στην ίδια την κατασκευή με την ύπαρξη ελατηρίων-αποσβεστήρων, όσο και ανάμεσα στα μέρη που έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, τα πέλματα επενδύονται με μια επιπλέον στρώση από φυσικό καουτσούκ, το οποίο θα εξομαλύνει τις δυνάμεις που προέρχονται από την κρούση των πελμάτων με το έδαφος.
- Κατεργασιμότητα. Στο εργαστήριο αυτομάτου ελέγχου του Ε.Μ.Π. ακολουθείται η γενική φιλοσοφία του να κατασκευάζεται ό,τι σχεδιάζεται. Έτσι ένας ακόμη παράγοντας που λήφθηκε υπόψη κατά το σχεδιασμό ήταν όλα τα μη τυποποιημένα εξαρτήματα να μπορούν να κατασκευασθούν με τις μηχανές που διαθέτει το εργαστήριο (φρεζάρισμα, τόρνευση, διάτρηση, σπειροτόμηση, 3D-εκτύπωση).

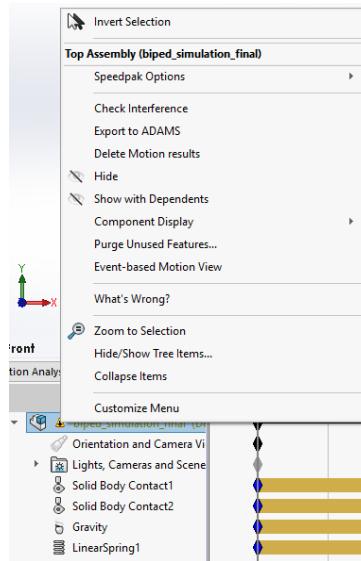
#### 4.1 Το λογισμικό σχεδιασμού SolidWorks

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες του SolidWorks, καθώς αυτό ήταν το βασικό λογισμικό για το σχεδιασμό και την κατασκευή του δίποδου ρομπότ. Συνολικά το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει μια πληθώρα δυνατοτήτων. Μεταξύ αυτών οι βασικότερες είναι η λεπτομερής σχεδίαση τριδιάστατου μοντέλου, η χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων, όπως κοχλίες, έδρανα κύλισης, ασφάλειες αξόνων κ.λπ. (SolidWorks Toolbox), η εκτέλεση κινηματικών και δυναμικών προσομοιώσεων (SolidWorks Motion), ο έλεγχος αντοχής των εξαρτημάτων (SolidWorks Simulation) και η προσομοίωση κατεργασιών κοπής (SolidCAM).

Αναλυτικότερα, σχετικά με τη σχεδίαση του τριδιάστατου μοντέλου, αρχικά ο χρήστης προσδιορίζει την απαιτούμενη γεωμετρία δύο διαστάσεων. Στη συνέχεια, με διάφορες λειτουργίες μπορεί να αποδώσει την επιθυμητή τριδιάστατη μορφή. Έτσι δίνεται η δυνατότητα για τη δημιουργία πολύπλοκων μοντέλων, εξαιτίας των πολλών λειτουργιών (features) που διαθέτει το λογισμικό, όπως εξώθηση βάσης (extruded boss/base), εξώθηση κοπής (extruded cut), περιστροφή βάσης (revolved boss/base), λοξότμηση (chamfer) κ.ά. Αφού δημιουργηθούν τα διάφορα εξαρτήματα, μέσω του SolidWorks μπορεί να προκύψει το τελικό συναρμολόγημα (assembly), καθώς παρέχονται πολλών κατηγοριών συναρμογές (mates), όπως είναι οι βασικές (παραλληλότητα, καθετότητα, ομοκεντρότητα κ.λπ.), οι προχωρημένες, στις οποίες ορίζονται διάφορες συμμετρίες, εύρη αποστάσεων κ.λπ. και οι μηχανολογικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για λειτουργία οδοντωτών τροχών, για τη σωστή μοντελοποίηση αρθρώσεων κ.λπ. Σε αυτό το στάδιο συνίσταται και η χρήση της βιβλιοθήκης των τυποποιημένων εξαρτημάτων του SolidWorks Toolbox, τα οποία εισάγονται κατευθείαν και προσαρμόζονται σύμφωνα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά τους. Επίσης μέσω διαφόρων βιβλιοθηκών αποδίδεται στο κάθε εξάρτημα κάποιο υλικό, το οποίο συνοδεύεται από διάφορες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Τέλος υπάρχει ακόμα και η δυνατότητα εξαγωγής κατασκευαστικών σχεδίων, σύμφωνα με κάποιο διεθνές πρότυπο (ISO, DIN κ.ο.κ.).

Όσον αφορά το SolidWorks Motion, αυτό δίνει τη δυνατότητα για εκτέλεση κινηματικών και δυναμικών προσομοιώσεων, όπως και το λογισμικό MSC Adams. Κατά τα γνωστά ο χρήστης ορίζει το μοντέλο του, το οποίο όμως τώρα είναι πιο λεπτομερές καθώς έχει σχεδιασθεί με πραγματικά εξαρτήματα στο SolidWorks και εκτελεί τις προσομοιώσεις.

Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε πιο εύχρηστο το λογισμικό Adams για τις προσομοιώσεις και έτσι δεν χρησιμοποιήθηκε ως βασικό εργαλείο το SolidWorks Motion. Ωστόσο το SolidWorks Motion είναι απαραίτητο για την εξαγωγή αρχείου Adams (.adm), το οποίο εισάγεται κατόπιν στην αντίστοιχη πλατφόρμα για την προσομοίωση παθητικού βηματισμού: πριν την κατασκευή της δίποδης διάταξης και την εκτέλεση πειραμάτων προηγήθηκε η εκτέλεση προσομοίωσης με το λεπτομερές μοντέλο και όχι με μια απλούστευση αυτού, όπως είχε γίνει προηγουμένως, για την εξαγωγή επιπλέον πληροφοριών για το σχεδιασμό. Επομένως πρέπει με κάποιον τρόπο το πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο που έχει σχεδιασθεί εξ ολοκλήρου στο SolidWorks να εισαχθεί στο λογισμικό Adams. Αυτό γίνεται μέσω του SolidWorks Motion ως εξής: δεξί κλικ στο δέντρο εξαρτημάτων > Export to ADAMS, βλ. Σχ. 4-1.



**Σχήμα 4-1: Εξαγωγή του SolidWorks μοντέλου σε αρχείο συμβατό με το λογισμικό Adams.**

Ενημερωτικά υπάρχει και εναλλακτικός τρόπος, σύμφωνα με τον οποίο το μοντέλο του SolidWorks θα πρέπει να αποθηκευθεί ως αρχείο parasolid (.x\_t), ώστε να είναι συμβατό με το λογισμικό προσομοιώσεων. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι το τρισδιάστατο μοντέλο εισάγεται χωρίς τις απαραίτητες ιδιότητες που προκύπτουν από το SolidWorks, όπως η μάζα και η ροπή αδράνειας των εξαρτημάτων. Κατ' επέκταση θα πρέπει αυτά τα μεγέθη να εισαχθούν από το χρήστη. Αντίθετα, μέσω του SolidWorks Motion και τη δημιουργία αρχείου .adm, τέτοιου είδους ζητήματα παρακάμπτονται και γι' αυτό προτείνεται η συγκεκριμένη μέθοδος.

Το SolidWorks Simulation χρησιμοποιείται για τον έλεγχο αντοχής εξαρτημάτων, την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων, τον έλεγχο σε λυγισμό κ.ά. μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος το SolidCAM χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την προσομοίωση κατεργασιών κοπής, εξάγοντας κώδικες G για την επικοινωνία με αυτόματες εργαλειομηχανές CNC: αυτό ήταν το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του δίποδου μηχανισμού και θα αναφερθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

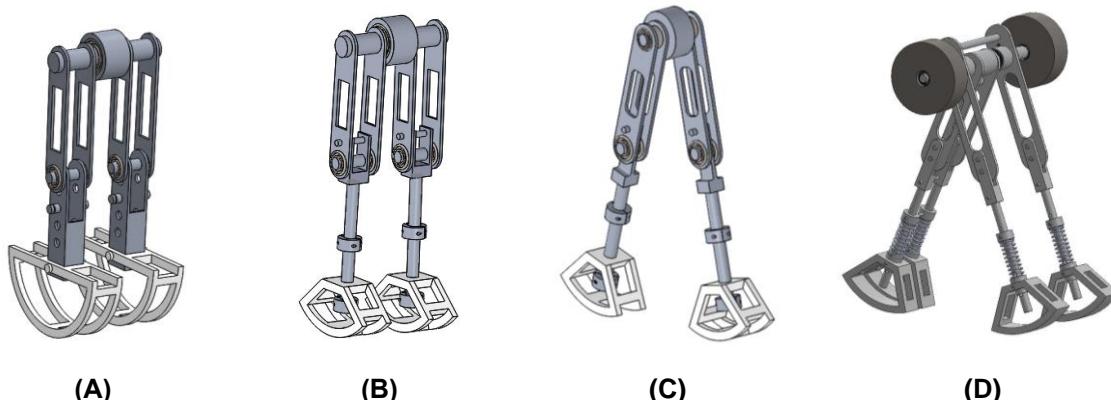
## 4.2 Εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού

Η τελική μορφή του δίποδου ρομπότ προέκυψε ύστερα από πολλές τροποποιήσεις στις διαστάσεις αυτού, στα χρησιμοποιούμενα υλικά, αλλά και στη μορφή του για λειτουργικούς και κατασκευαστικούς

λόγους. Έτσι προτάθηκαν διάφορες εναλλακτικές, οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν, ωστόσο απορρίφθηκαν εξαιτίας κάποιων βασικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζαν.

Αρχικά αναφέρεται ότι ο σχεδιασμός στηρίχθηκε στις αρθρώσεις που αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα το δίποδο ρομπότ περιλαμβάνει στροφικές αρθρώσεις στο ισχίο και πρισματικές στα σκέλη σε συνδυασμό με την ύπαρξη ελατηρίου-αποσβεστήρα. Επίσης τίθεται ως απαραίτηση ο διαχωρισμός του σκέλους σε δύο επιμέρους στοιχεία, τα οποία βέβαια θα είναι πακτωμένα μεταξύ τους, όμως μετέπειτα θα μπορούν να συνδέονται μέσω στροφικής άρθρωσης για τη διαμόρφωση γονάτου. Επομένως το κάθε πόδι αποτελείται από ένα διμερές σκέλος και το πέλμα. Όσον αφορά το σκέλος, ο διαχωρισμός σε άνω και κάτω μέρος στηρίζεται βιβλιογραφικά στη φυσιολογία του ανθρώπου [21] [22] [23]. Έτσι επιλέγεται το άνω και το κάτω μέρος του σκέλους να έχουν περίπου ίσα μήκη. Σχετικά με την πρισματική άρθρωση επιλέγεται αυτή να υλοποιηθεί μεταξύ κάτω σκέλους και πέλματος, στα οποία θα υπάρχει σχετική γραμμική κίνηση.

Στο Σχήμα 4-2 φαίνονται οι αρχικές ιδέες σχεδιασμού και εξηγούνται οι κυριότεροι λόγοι που απορρίφθηκαν.



**Σχήμα 4-2: Εναλλακτικοί σχεδιασμοί που αξιολογήθηκαν και απορρίφθηκαν.**

Όπως είναι ξεκάθαρο οι πρώτες τρεις (Α – Β - Κ) απεικονίζουν το δίποδο μηχανισμό με δύο πόδια συνολικά, ένα αριστερό και ένα δεξιό. Στην περίπτωση (Α) χρησιμοποιούνται ημικυκλικά πέλματα με εύρος γωνίας  $180^\circ$ , ωστόσο όπως βρέθηκε αργότερα δεν ήταν απαραίτητο όλο αυτό το εύρος, καθώς κατά το βηματισμό μόνο ένα μέρος του πέλματος ερχόταν σε επαφή με το έδαφος. Επίσης στην ίδια εναλλακτική το κάτω μέρος του σκέλους φαίνεται να είναι τετραγωνικής διατομής, ώστε να αποτρέπεται η σχετική περιστροφή σκέλους και πέλματος, ενώ οι υποδοχές για τα ελατήρια βρίσκονται στα πλαϊνά μέρη. Ως εξέλιξη αυτού (εναλλακτική Β) μειώνεται το εύρος γωνίας του ημικυκλικού πέλματος, τα κάτω μέρη των σκελών αντικαθίστανται από κυλινδρικά εξαρτήματα, ενώ τα ελατήρια τοποθετούνται γύρω από τους κυλίνδρους. Στην περίπτωση (Κ) γίνεται προσπάθεια μείωσης του συνολικού πλάτους, καθώς και κάποιες μικροδιαφοροποιήσεις στην άρθρωση του γονάτου σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι πρώτοι τρεις εναλλακτικοί σχεδιασμοί στηρίζονται στη βασική ιδέα ότι το δίποδο ρομπότ θα έχει υποστηρικτικό μηχανισμό κατά τη διάρκεια του βαδίσματος. Αυτός είναι απαραίτητος σε αυτά τα μοντέλα, διότι όταν το ένα πέλμα θα ακουμπούσε με το έδαφος, τότε το συνολικό κέντρο μάζας του δίποδου δεν θα βρισκόταν στην κατακόρυφο με την επιφάνεια επαφής με αποτέλεσμα την

αστάθεια. Ωστόσο ένας επιπλέον μηχανισμός στήριξης αυξάνει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, καθώς επίσης και τροποποιεί ορισμένα χαρακτηριστικά (π.χ. προσθέτει επιπλέον μάζα).

Για τους παραπάνω λόγους θεωρήθηκε σκόπιμο να σχεδιασθεί δίποδο ρομπότ με εσωτερικά και εξωτερικά πόδια αντίστοιχα. Αυτό φυσικά αποτελεί δίποδο μηχανισμό, όπως επισημαίνεται και στη βιβλιογραφία, διότι τα εσωτερικά πόδια κινούνται μαζί, όπως επίσης και τα εξωτερικά. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι το κέντρο μάζας πλέον βρίσκεται διαρκώς ανάμεσα στα πόδια που έρχονται σε επαφή με το έδαφος και γι' αυτό δεν τίθεται ζήτημα ανατροπής του ρομπότ κατά το βηματισμό. Έτσι δεν χρειάζεται κάποιος επιπλέον υποστηρικτικός μηχανισμός. Ταυτόχρονα όμως αυξάνεται η πολυπλοκότητα της κατασκευής, κυρίως στο σημείο του ισχίου. Συγκεκριμένα τα εξωτερικά πόδια πρέπει να εδράζονται σε κοίλους άξονες μέσα από τους οποίους διέρχεται ο άξονας εσωτερικών ποδιών. Αυτό είναι αναγκαίο, ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξάρτητη κίνηση μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών ποδιών. Επομένως η τελική διάταξη στηρίζεται στην περίπτωση (D) με κάποιες διορθώσεις, οι οποίες διευκόλυναν τη συναρμολογησιμότητα/αποσυναρμολογησιμότητα, μείωσαν την τριβή μεταξύ των κινούμενων μερών και γενικότερα οδήγησαν σε μια πιο συμπαγή λύση.

#### 4.3 Τελικός σχεδιασμός

Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο του παθητικού δίποδου ρομπότ, καθώς επίσης και τα επιμέρους εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται.



Σχήμα 4-3: Το δίποδο ρομπότ σε φωτορεαλιστική απεικόνιση.

Ο σχεδιασμός έχει γίνει έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλες οι αρχικές απαιτούμενες προδιαγραφές (**συντελεστής κύλισης, συντελεστής κατανομής μάζας πελμάτων, σταθερά ελατηρίου, σταθερά απόσβεσης**), εκτός από το λόγο μαζών μ. **Αντιθέτως, προσαρμόζοντας πρόσθετες μάζες στο αριστερό και το δεξί μέρος του ισχίου μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων διαμορφώσεων, δίνεται η δυνατότητα επιλογής εύρους τιμών για το λόγο μαζών.** Αυτό κρίνεται σκόπιμο, ώστε να υπάρχει ευρωστία ως προς τις τελικές προδιαγραφές της κατασκευής.

Συνολικά αποτελείται από **τριών διαφορετικών ειδών υλικά, αλουμίνιο, ABS και ακετάλη**, και περιλαμβάνει κάποια τυποποιημένα εξαρτήματα, όπως **κοχλίες, περικόχλια, ασφάλειες αξόνων, σφιγκτήρες προσαρμογής θέσης, ελατήρια και έδρανα κύλισης (ρουλεμάν)**. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται ο σχεδιασμός, καθώς δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιείται το ABS **εκεί που τα εξαρτήματα πρέπει να είναι ελαφρύτερα και δεν δέχονται κρίσιμα φορτία, το αλουμίνιο όπου τα εξαρτήματα πρέπει να έχουν αυξημένη αντοχή και σωλήνες ακετάλης στα σημεία απαίτησης χαμηλής τριβής**. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 4–1 έως 4–3.

**Πίνακας 4-1: Μηχανικές ιδιότητες Αλουμινίου 5083.**

Αλουμίνιο 5083		
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Πυκνότητα	2660	$kg/mm^3$
Όριο θραύσης	320	MPa
Όριο διαρροής	250	MPa
Μέτρο ελαστικότητας	71	GPa

**Πίνακας 4-2: Μηχανικές ιδιότητες πλαστικού ABS.**

ABS		
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Πυκνότητα	1020	$kg/mm^3$
Όριο θραύσης	44.3	MPa
Όριο διαρροής	41.4	MPa
Μέτρο ελαστικότητας	2	GPa

**Πίνακας 4-3: Μηχανικές ιδιότητες ακετάλης.**

Ακετάλη		
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Πυκνότητα	1390	$kg/mm^3$
Όριο θραύσης	71.5	MPa
Όριο διαρροής	65	MPa
Μέτρο ελαστικότητας	2.6	GPa

Σχετικά με το ABS, πρόκειται για ένα υλικό σχετικά χαμηλής πυκνότητας, αλλά και χαμηλής αντοχής. Για το λόγο αυτό, εκτός των στατικών και δυναμικών δοκιμών θα πρέπει να μελετηθεί και η αντοχή ορισμένων εξοτημάτων από ABS σε κόπωση. Έτσι για τη μελέτη αυτή, όπως αναφέρεται και στη θεωρία περί κόπωσης, εισάγεται η καμπύλη S-N του υλικού. Ωστόσο, επειδή τα εξαρτήματα έχουν προκύψει από 3D-εκτύπωση, η διεύθυνση των ινών παίζει καίριο ρόλο στο πώς διαμορφώνονται οι τελικές μηχανικές ιδιότητες. Σύμφωνα με τους Ziemian et al. [24], η καμπύλη S-N εκφράζεται μαθηματικά με το δυναμικό νόμο:

$$N = a S^m \quad (4-1)$$

όπου:

$N$ : ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση λόγω κόπωσης

$S$ : το μέγιστο επίπεδο τάσεων ως ποσοστό της αντοχής σε θραύση (UTS)

$m$ : ο εκθέτης κόπωσης

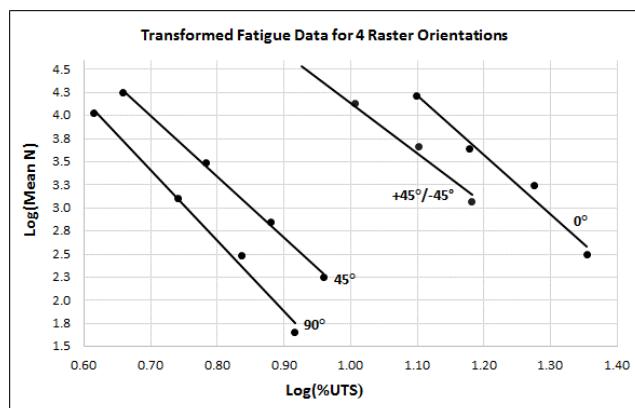
$a$ : ο συντελεστής κόπωσης

Ανάλογα με τη διεύθυνση των ινών, οι τιμές των  $m$  και  $a$  διαμορφώνονται ως εξής:

Πίνακας 4-4: Εκθέτης και συντελεστής κόπωσης για διάφορες διευθύνσεις των ινών.

Διεύθυνση ινών σε μοίρες	Εκθέτης κόπωσης	Συντελεστής κόπωσης
90	-7.67	8.78
45	-6.62	8.64
0	-6.40	11.24
+45/-45	-5.46	9.59

Και οι αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν φαίνονται στο Σχήμα 4-4.

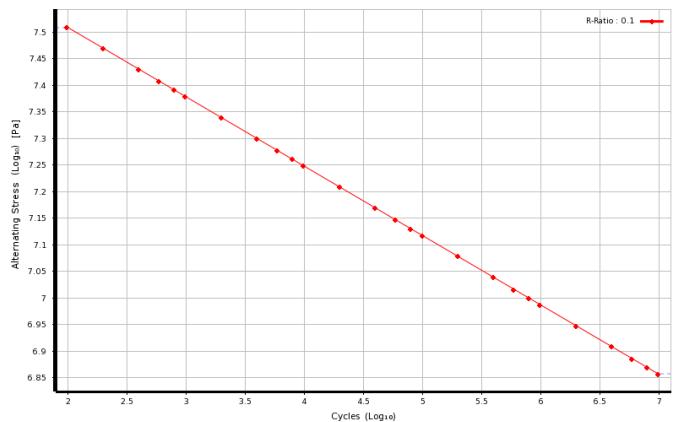


Σχήμα 4-4: Καμπύλες S-N για τις 4 διευθύνσεις ινών με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Για την παρούσα εργασία θα πρέπει να εξετασθεί η δυσμενέστερη περίπτωση, ώστε να υπάρχει περιθώριο ασφαλείας για οποιαδήποτε διεύθυνση ινών. Έτσι επιλέγεται  $a = 8.78$  και  $m = -7.67$ , οπότε για τους κύκλους φόρτισης ισχύει:

$$N = 8.78 S^{-7.67} \quad (4-2)$$

και η λογαριθμική καμπύλη που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-5.

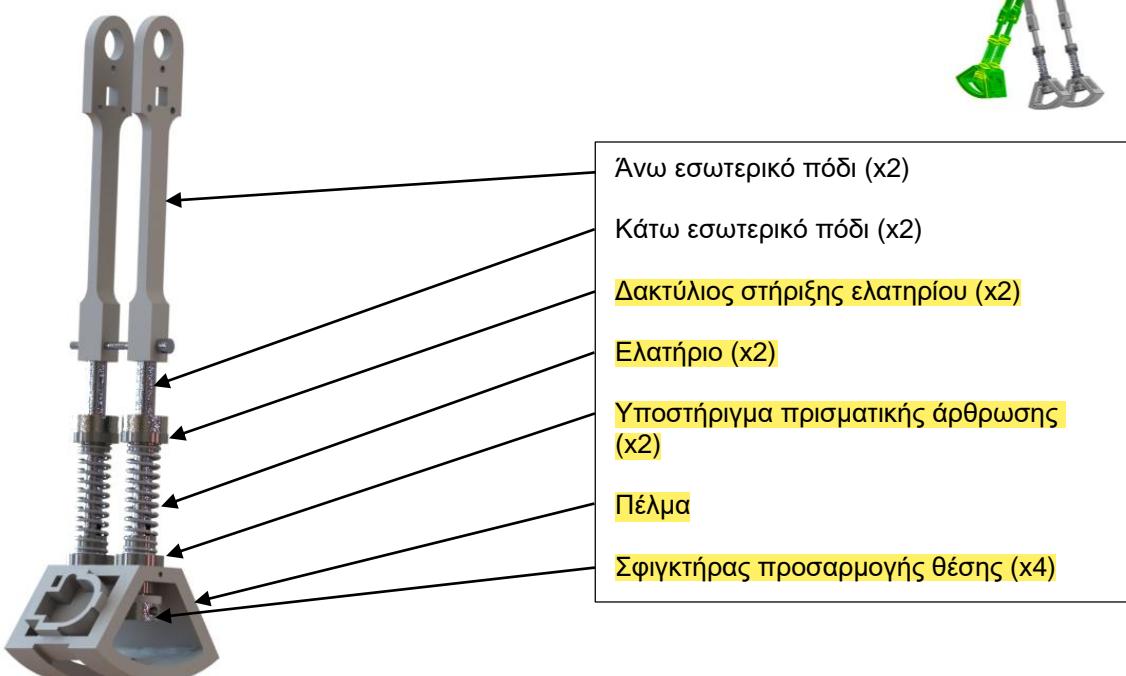


Σχήμα 4-5: Καμπύλη S-N για τη μοντελοποίηση της κόπωσης των εξαρτημάτων από ABS.

Σχετικά με την ακετάλη, αποτελεί ένα σκληρό υλικό χωρίς πόρους, το οποίο είναι εύκολο στην κατεργασία με εξαιρετική διαστασιακή σταθερότητα σε εξαρτήματα μικρής αντοχής. Έχει χαμηλό συντελεστή τριβής και εξαιρετική αντοχή στη φθορά, ειδικά σε βρεγμένο ή υγρό περιβάλλον. Έχει διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές, όπως σε ρουλεμάν και κουζινέτα, σε ηλεκτρικά εξαρτήματα, σε λεπτίδες ξυστρών κ.λπ. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του δίποδου ρομπότ σε μορφή σωλήνων ακετάλης στα σημεία που επιδιωκόταν χαμηλός συντελεστής τριβής, όπως στην πρισματική άρθρωση μεταξύ κάτω σκέλους και πέλματος.

Συνολικά το συναρμολόγημα μπορεί να χωρισθεί σε τρία επιμέρους υποσυναρμολογήματα, τα οποία είναι:

#### 4.3.1 Εσωτερικά πόδια



Σχήμα 4-6: Συναρμολόγημα εσωτερικών ποδιών.

Τα εσωτερικά πόδια μπορούν να χωρισθούν σε επιμέρους εξαρτήματα, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 4-5.

**Πίνακας 4-5: Εξαρτήματα εσωτερικών ποδιών.**

α/α	Ονομασία	Ποσότητα
1	Άνω εσωτερικό πόδι	2
2	Κάτω εσωτερικό πόδι	2
3	Πέλμα	1
4	Υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης	2
5	Δακτύλιος στήριξης ελατηρίου	2
6	Σφιγκτήρας προσαρμογής θέσης	4
7	Ελατήριο	1

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερες πληροφορίες για κάθε ένα εξάρτημα σχετικά με το υλικό από το οποίο αποτελούνται, τις διαστάσεις τους, καθώς και τη λειτουργικότητά τους:

1. Άνω εσωτερικό πόδι (upper inner leg)

- **Υλικό: ABS**
- Τριδιάστατο μοντέλο:



**Σχήμα 4-7: Άνω εσωτερικό πόδι.**

- Πρόσθετα σχόλια: Διαθέτει οπές και διαμορφώσεις, ώστε να συνεργάζεται με τα υπόλοιπα εξαρτήματα, όπως είναι το κάτω εσωτερικό πόδι και ο άξονας του ισχίου, αλλά και να ικανοποιείται η προδιαγραφή μάζας. **Μπορεί να κατασκευασθεί με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου.**

2. Κάτω εσωτερικό πόδι (lower inner leg)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο:

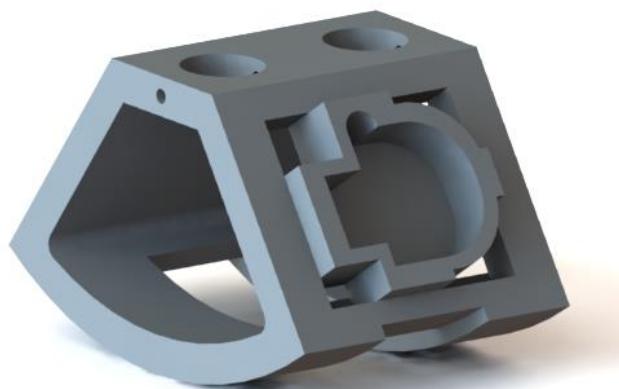


**Σχήμα 4-8: Κάτω εσωτερικό πόδι.**

- Πρόσθετα σχόλια: Διαθέτει κατάλληλη σχισμή, ώστε **μέσω πείρου να οδηγεί το πέλμα και να λειτουργεί ως πρισματική άρθρωση**. Επίσης διαθέτει **οπή με σπείρωμα για τη σύνδεσή του με το άνω εσωτερικό πόδι**. Μπορεί να διαμορφωθεί με κατάλληλες κατεργασίες κοπής (φρεζάρισμα) από κυλινδρικό τεμάχιο που διατίθεται στην αποθήκη του εργαστηρίου.

3. Πέλμα (inner foot)

- Υλικό: ABS
- Τριδιάστατο μοντέλο:

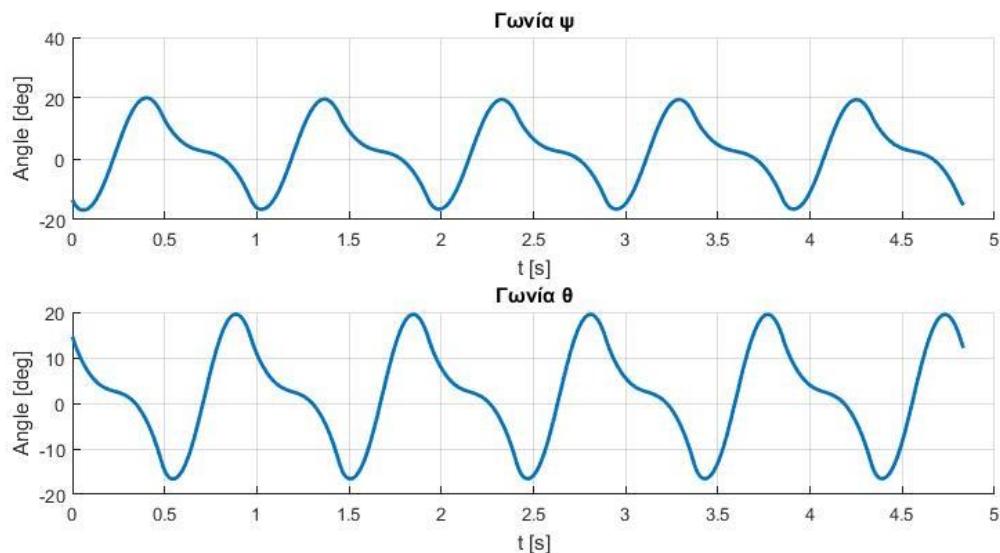


**Σχήμα 4-9: Πέλμα εσωτερικών ποδιών.**

- Πρόσθετα σχόλια: **Διαθέτει οπές μέσα στις οποίες ολισθαίνουν τα κάτω εσωτερικά πόδια, εξασφαλίζοντας έτσι τη λειτουργία πρισματικής άρθρωσης**. Ανάμεσα στις οπές και στα πόδια παρεμβάλλονται υποστηρίγματα ακετάλης για **μείωση της τριβής στην πρισματική**.

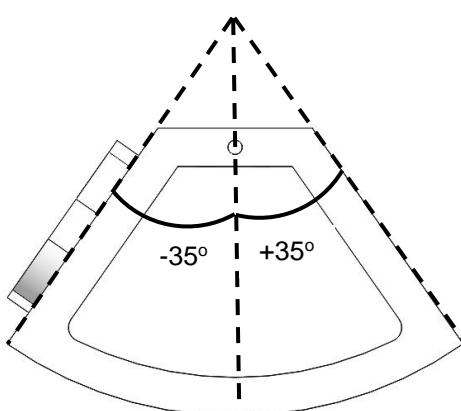
**άρθρωση.** Επίσης διαθέτει κενούς χώρους, ώστε να ικανοποιούνται οι τιθέμενες προδιαγραφές βάρους. Τέλος διαθέτει **ειδική εσοχή για την υποδοχή αισθητήρα IMU**, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων παθητικού βαδίσματος. Μπορεί να κατασκευασθεί με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου.

- **Εύρος γωνίας τόξου επαφής πέλματος με το έδαφος:** Για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου τόξου επαφής του πέλματος με το έδαφος πραγματοποιείται προσομοίωση παθητικού βηματισμού του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου στο MSC Adams και μετρώνται οι γωνίες που σχηματίζει το πέλμα με το έδαφος.



**Σχήμα 4-10: Γωνίες πελμάτων του δίποδου με το έδαφος.**

Από τα αποτελέσματα και δίνοντας ένα μικρό περιθώριο ασφαλείας, προκύπτει ότι το τόξο επαφής του πέλματος με το έδαφος θα πρέπει να είναι  $\pm 35^\circ$  ως προς τον άξονα συμμετρίας:



**Σχήμα 4-11: Εύρος γωνίας πέλματος.**

4. Υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης (prismatic joint support)

- Υλικό: Ακετάλη
- Τριδιάστατο μοντέλο:

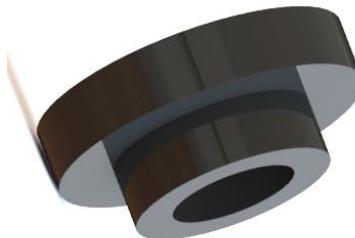


Σχήμα 4-12: Υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης.

- Πρόσθετα σχόλια: Διαθέτει πλευρικές οπές, ώστε να σταθεροποιείται σε συγκεκριμένη θέση στο πέλμα μέσω πείρου ή κοχλία. Ουσιαστικά αποτελεί το “διαμεσολαβητή” μεταξύ του αλουμινένιου κάτω εσωτερικού ποδιού και του πέλματος από ABS. Δηλαδή είναι το εξάρτημα που υλοποιεί την πρισματική άρθρωση. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να είναι από ακετάλη, καθώς εμφανίζει χαμηλούς συντελεστές τριβής και φθοράς. Για ακόμα μεγαλύτερη μείωση της τριβής μπορεί να παρεμβληθεί γράσο. Επίσης από τις δύο εξοχές που διακρίνονται, η μία χρησιμοποιείται για να εφαρμόζει ακριβώς με το πέλμα, ενώ η άλλη χρησιμοποιείται για να περιορίσει την ακτινική κίνηση του ελατηρίου, καθώς η εξωτερική της διάμετρος ισούται με την εσωτερική του ελατηρίου. Μπορεί να κατασκευασθεί με κατεργασίες τόρνευσης και διάτρησης με τα διαθέσιμα μέσα του εργαστηρίου.

5. Δακτύλιος στήριξης ελατηρίου (spring support)

- Υλικό: Ακετάλη
- Τριδιάστατο μοντέλο:



Σχήμα 4-13: Δακτύλιος στήριξης ελατηρίου.

- Πρόσθετα σχόλια: Έχει παρόμοια λειτουργία εν μέρει με αυτήν του υποστηρίγματος πρισματικής άρθρωσης. Συγκεκριμένα ο δακτύλιος στήριξης ελατηρίου έχει προεξοχή εξωτερικής διαμέτρου ίσης με της εσωτερικής του ελατηρίου, ώστε να περιορίζει την ακτινική κίνηση αυτού.

## 6. Σφιγκτήρας προσαρμογής θέσης (huc collar one piece clamp)

Πρόκειται για τυποποιημένο εξάρτημα, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της θέσης ενός εξαρτήματος πάνω σε ένα κυλινδρικό τεμάχιο. Το συγκεκριμένο εξάρτημα αγοράζεται στην Ελλάδα από την εταιρεία RS Components και εικονίζεται στο Σχήμα 4-14.



Σχήμα 4-14: Σφιγκτήρας προσαρμογής θέσης.

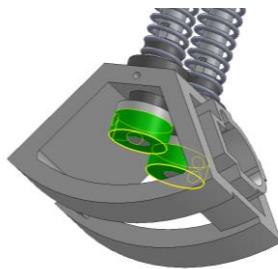
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-14 πρόκειται για ένα ενιαίο κοίλο κυλινδρικό τεμάχιο με σχισμή στο ένα μέρος του. Επίσης διαθέτει κοχλία, ο οποίος καθώς σφίγγεται τείνει να μειώσει το διάκενο της σχισμής. Έτσι όταν ο κοχλίας είναι χαλαρός τότε μπορεί να ολισθαίνει κατά μήκος ενός κυλίνδρου, στη συγκεκριμένη περίπτωση του κάτω εσωτερικού ποδιού. Όταν ο κοχλίας σφίγγει τότε ο σφιγκτήρας ασφαλίζει πάνω στον κύλινδρο και δεν μετακινείται.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα χρησιμοποιείται ως ένα μηχανικό τέρμα για το ελατήριο του ποδιού. Δηλαδή ρυθμίζοντας το σφιγκτήρα κατά μήκος του κάτω εσωτερικού ποδιού, ρυθμίζεται αντίστοιχα και η θέση του ελατηρίου. Ακόμα μπορεί μέσω του σφιγκτήρα να αποδοθεί και προένταση στο ελατήριο, συμπιέζοντάς το σε σχέση με το φυσικό μήκος του ελατηρίου.



Σχήμα 4-15: Ο σφιγκτήρας προσαρμόζει τη θέση του ελατηρίου μέσω του άνω άκρου αυτού.

Επομένως για κάθε πόδι χρησιμοποιείται ένας σφιγκτήρας στο άνω άκρο του ελατηρίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15, και ένας σφιγκτήρας στο κάτω άκρο του ελατηρίου, και συγκεκριμένα στο εσωτερικό του πέλματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-16, ο οποίος αποτρέπει την απώλεια επαφής στην πρισματική άρθρωση.



Σχήμα 4-16: Διατήρηση πρισματικής άρθρωσης.

Αναλυτικά οι προδιαγραφές των χρησιμοποιούμενων huco collar one piece clamps παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-6.

**Πίνακας 4-6: Προδιαγραφές των τυποποιημένων εξαρτημάτων huco collar one piece clamps.**

Threaded Bore Size	M3 x 10
Finish	Black Oxide
Width	9mm
Brand	Huco
Outside Diameter	24mm
Fastening	Clamp Screw
Material	Steel
Shaft Diameter	10mm
One/Two Piece	One Piece

#### 7. Ελατήριο (spring)

- Τρισδιάστατο μοντέλο



**Σχήμα 4-17: Ελατήριο.**

- Προμηθευτής:** Τα ελατήρια προμηθεύονται από την εταιρεία LIKOUDIS SPRINGS. Για την κατασκευή τους δόθηκαν στον προμηθευτή οι επιθυμητές προδιαγραφές, όπως εσωτερική διάμετρος, συνολικό μήκος και σταθερά ελατηρίου.
- Πρόσθετα σχόλια:** Για επαλήθευση έχουν μετρηθεί πειραματικά οι σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης. Για να γίνει αυτό τοποθετήθηκε αρχικά συγκεκριμένη μάζα πάνω στο ελατήριο και μετρήθηκε το μήκος συμπίεσης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της σταθεράς ελατηρίου. Συγκεκριμένα μία μάζα  $m = 1kg$  προκαλεί συμπίεση  $7mm$ , επομένως:

$$k = \frac{1kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}}{7mm} = 1.4 \frac{N}{mm} \quad (4-3)$$

Για τον προσδιορισμό της σταθεράς απόσβεσης αφέθηκε πάνω στο ελατήριο μάζα ώστε αυτή να εκτελέσει ελεύθερη ταλάντωση και μετρήθηκαν τα διαδοχικά πλάτη της

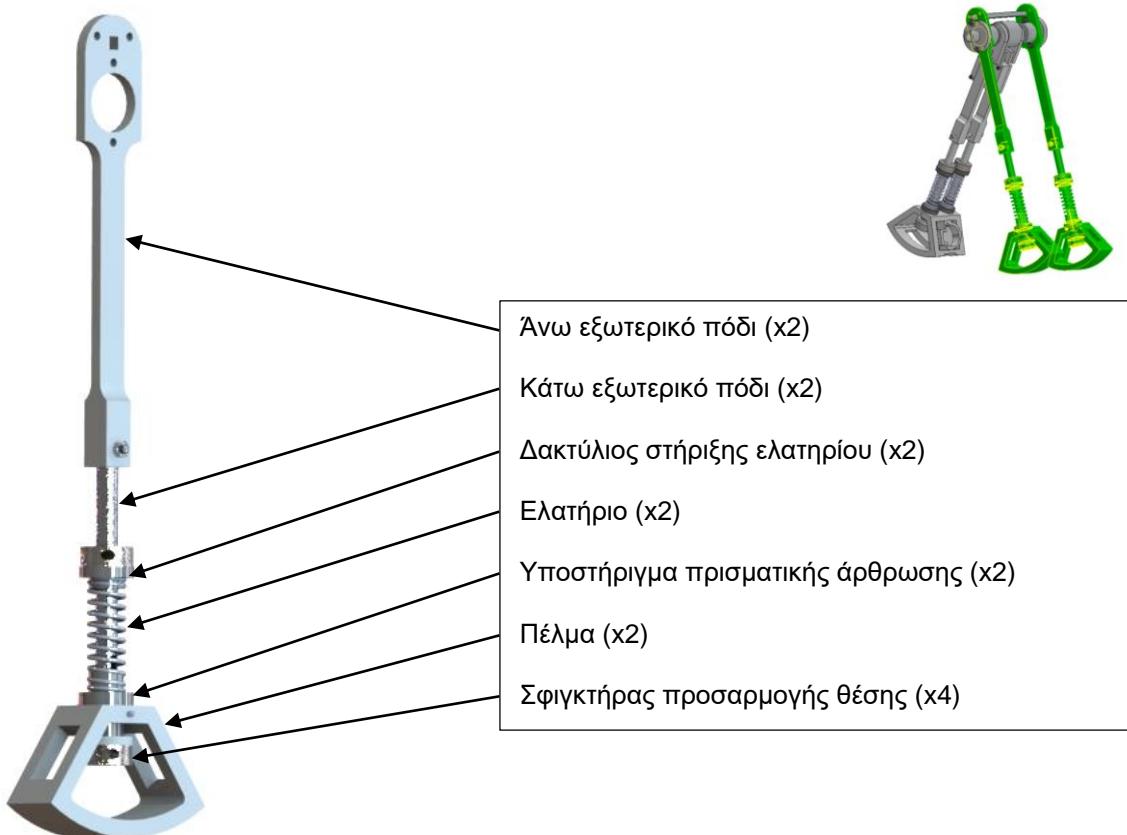
ταλάντωσης. Συγκεκριμένα έγιναν διάφορες δοκιμές και τα διαδοχικά πλάτη που μετρήθηκαν έχουν λόγο  $\frac{x_i}{x_{i+1}} \in (5.4, 14.5)$ . Ωστόσο είναι γνωστό ότι:

$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{km}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right)} \right)^2}} \quad (4-4)$$

Έχοντας γνωστά τα  $k = 1.4 \text{ N/mm}$  και  $m = 1 \text{ kg}$ , προκύπτει ότι:

$$B \in (19.4, 29.31) \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$$

#### 4.3.2 Εξωτερικά πόδια



Σχήμα 4-18: Συναρμολόγημα εξωτερικού ποδιού.

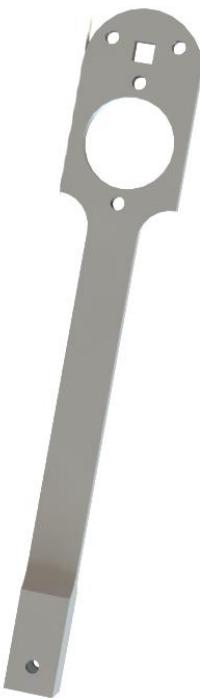
Τα εξωτερικά πόδια μοιάζουν αρκετά με τα εσωτερικά, αλλά παρουσιάζουν κάποιες μικροδιαφορές, αφού τα πρώτα χωρίζονται σε δύο πανομοιότυπα συναρμολογήματα, ενώ τα δεύτερα αποτελούν ένα ενιαίο συναρμολόγημα. Σχεδόν όλα τα εξαρτήματα είναι ίδια με αυτά των εσωτερικών ποδιών εκτός από το άνω εξωτερικό πόδι και το πέλμα. Αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-7: Εξαρτήματα εξωτερικών ποδιών.

α/α	Ονομασία	Ποσότητα
8	Άνω εξωτερικό πόδι	1
9	Πέλμα	1
10	Κάτω εξωτερικό πόδι	1
11	Υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης	1
12	Δακτύλιος στήριξης ελατηρίου	1
13	Σφιγκτήρας προσαρμογής θέσης	2
14	Ελατήριο	1

8. Άνω εξωτερικό πόδι (upper outer leg)

- Υλικό: ABS
- Τριδιάστατο μοντέλο:



Σχήμα 4-19: Άνω εξωτερικό πόδι.

- Πρόσθετα σχόλια: Είναι ένα από τα εξαρτήματα που διαφέρουν με το αντίστοιχο των εσωτερικών ποδιών. Ο λόγος που διαφοροποιείται από το άνω εσωτερικό πόδι είναι ώστε να εξασφαλίζεται σωστά η μετάδοση κίνησης από το ένα εξωτερικό πόδι στο άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδέσμου τετραγωνικής διατομής που δεν επιτρέπει την σχετική

γωνιακή μετατόπιση ανάμεσα στα δύο άνω εξωτερικά πόδια, και εδράζεται σε ειδική διαμόρφωση του άνω εξωτερικού ποδιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-20.



Σχήμα 4-20: Σύνδεσμος ένωσης και μετάδοσης κίνησης από το ένα εξωτερικό πόδι στο άλλο.

#### 9. Πέλμα (foot)

- Υλικό: ABS
- Τρισδιάστατο μοντέλο:



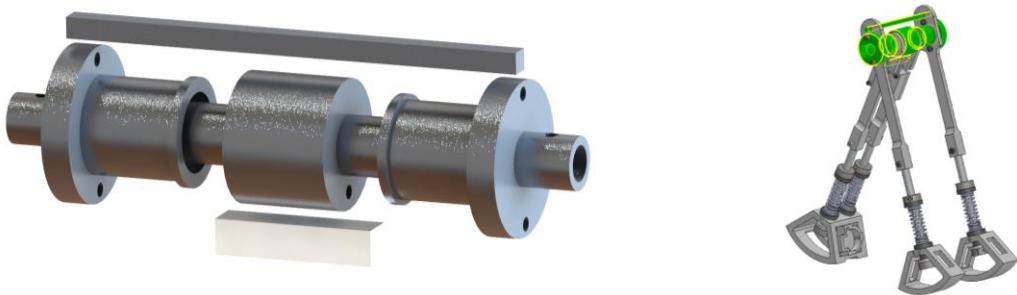
Σχήμα 4-21: Πέλμα εξωτερικού ποδιού.

- Πρόσθετα σχόλια: Διαθέτει οπή μέσα στην οποία τοποθετείται το υποστήριγμα ακετάλης όπου ολισθαίνει το κάτω εξωτερικό πόδι, εξασφαλίζοντας έτσι τη λειτουργία πρισματικής άρθρωσης. Επίσης διαθέτει κενούς χώρους, ώστε να ικανοποιούνται οι τιθέμενες προδιαγραφές. Μπορεί να κατασκευασθεί με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου.

Τα υπόλοιπα εξαρτήματα των εξωτερικών ποδιών είναι ίδια με τα αντίστοιχα των εσωτερικών και έχουν τους ίδιους λειτουργικούς σκοπούς που έχουν ήδη αναλυθεί, επομένως δεν παρουσιάζονται εδώ.

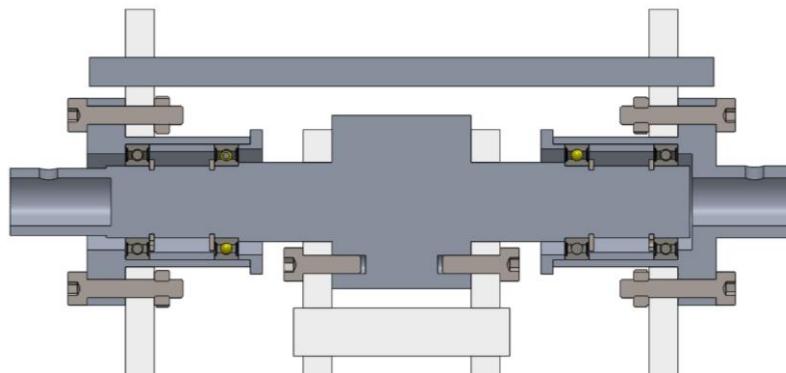
#### 4.3.3 Αξονας ισχίου

Στο Σχήμα 4-22 φαίνονται μόνο τα εξαρτήματα που συγκαταλέγονται στον άξονα ισχίου και απουσιάζουν οι στηρίξεις των δύο τετραγωνικής διατομής εξαρτημάτων, καθώς αυτά εδράζονται στα άνω εσωτερικά και εξωτερικά πόδια αντίστοιχα και δεν έχουν συμπεριληφθεί στο παρόν σκαρίφημα για λόγους ευκρίνειας.

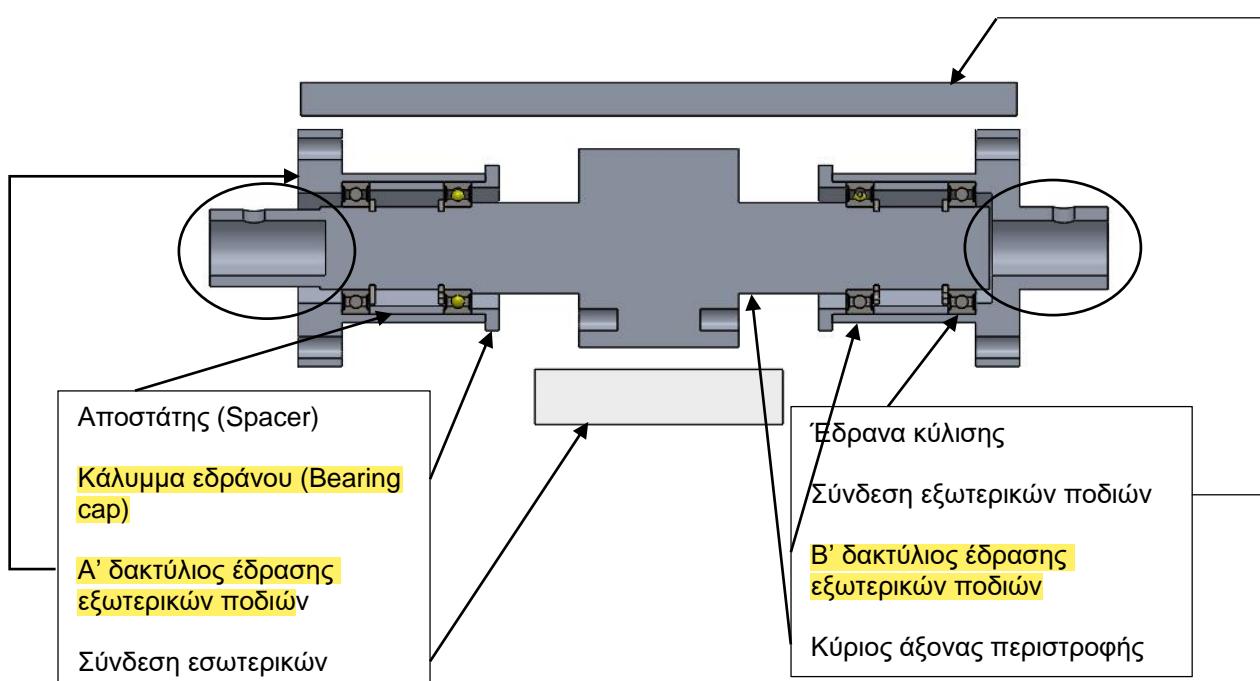


Σχήμα 4-22: Συναρμολόγημα του άξονα ισχίου.

Για μεγαλύτερη κατανόηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-23 σε τομή ο άξονας ισχίου συνδεόμενος με τα πόδια μέσω κοχλιών, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων ασφαλιστικών δακτυλίων και διαμορφώσεων για τη σταθεροποίηση των διαφόρων εξαρτημάτων στη σωστή θέση. Επιπλέον στο Σχήμα 4-24 παρουσιάζεται ο ίδιος άξονας σε τομή με εμφανή μόνο τα βασικά εξαρτήματά του, ώστε να είναι πιο σαφείς οι εσωτερικές του διαμορφώσεις.



Σχήμα 4-23: Άξονας ισχίου σε τομή και σύνδεσή του με πόδια.



Σχήμα 4-24: Άξονας ισχίου σε τομή.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, βασικός στόχος κατά το σχεδιασμό ήταν να μπορεί να υπάρχει μια σχετική ευρωστία ως προς τις παραμέτρους. Με το συγκεκριμένο σχεδιασμό του ισχίου υπάρχει η δυνατότητα να μεταβάλλεται η συνολική μάζα αυτού. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας επιπλέον μάζες στις ειδικές οπές στο αριστερό και δεξί άκρο αντίστοιχα (οι κυκλωμένες στο Σχήμα 4-24). Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται σε επόμενο εδάφιο. Επίσης οι διαμορφώσεις αυτές δίνουν τη δυνατότητα μελλοντικής προσάρτησης κινητήρων για την επενέργηση του δίποδου μηχανισμού.

Ο άξονας ισχίου χωρίζεται σε επιμέρους εξαρτήματα, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 4-8.

**Πίνακας 4-8: Εξαρτήματα του άξονα ισχίου.**

α/α	Ονομασία	Ποσότητα
15	Κύριος άξονας περιστροφής	1
16	Α' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών	1
17	Β' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών	1
18	Σύνδεση εξωτερικών ποδιών	1
19	Σύνδεση εσωτερικών ποδιών	1
20	Κάλυμμα εδράνου (Bearing cap)	2
21	Αποστάτης (Spacer)	2
22	Έδρανα κύλισης	4

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερες πληροφορίες για κάθε ένα εξάρτημα σχετικά με το υλικό από το οποίο αποτελούνται, τις διαστάσεις τους, καθώς και τη λειτουργία τους:

#### 15. Κύριος άξονας περιστροφής (rotating shaft)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο σε τομή:

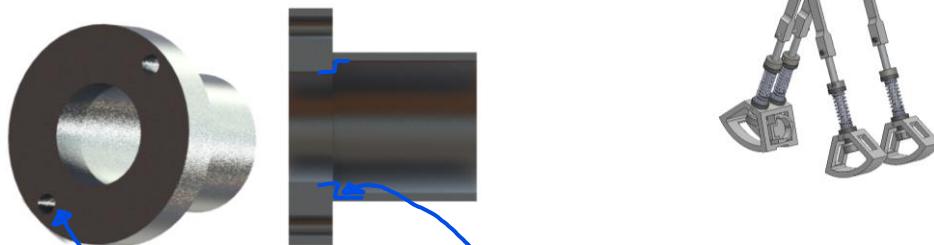


**Σχήμα 4-25: Κύριος άξονας περιστροφής σε τομή.**

- Πρόσθετα σχόλια: Πρόκειται για το βασικό άξονα περιστροφής. Πάνω σε αυτόν είναι πακτωμένα τα εσωτερικά πόδια, ενώ τα εξωτερικά πόδια περιστρέφονται ανεξάρτητα από αυτόν μέσω εδράνων κύλισης (ρουλεμάν). Κατά μήκος αυτού υπάρχουν διάφορες διαβαθμίσεις διαμέτρων, οι οποίες εξυπηρετούν την ευκολότερη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση των εδράνων, καθώς και τη σωστή τοποθέτησή τους. Επιπλέον υπάρχουν κατάλληλες εγκοπές (grooves), στις οποίες τοποθετούνται ασφαλιστικά δαχτυλίδια (retaining rings) που επίσης σταθεροποιούν τα έδρανα σε συγκεκριμένες θέσεις. Τέλος στο αριστερό του άκρο υπάρχει οπή, στην οποία μπορεί να προσαρτηθεί είτε επιπλέον μάζα είτε κινητήρας για την επενέργηση του άξονα. Διαμορφώνεται με μια σειρά κατεργασιών κοπής (τόρνευση, φρεζάρισμα, διάτρηση, σπειροτόμηση) με τα διαθέσιμα μέσα του εργαστηρίου.

#### 16. A' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών (ring bearing a)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο:

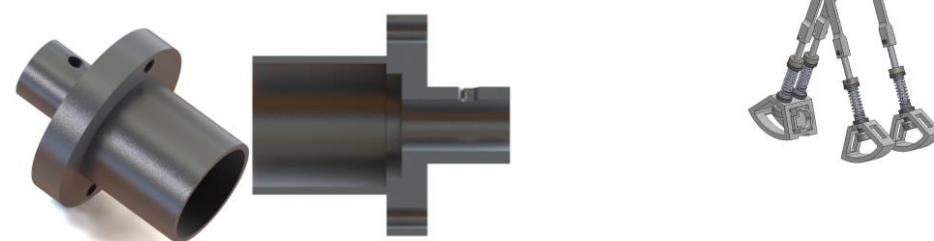


Σχήμα 4-26: A' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών σε όψη και σε τομή.

- Πρόσθετα σχόλια: Οι διαστάσεις του εξαρτήματος προκύπτουν ώστε να συνεργάζεται κατάλληλα τόσο με την αντίστοιχη οπή του εξωτερικού ποδιού, όσο και με τα επιλεχθέντα ρουλεμάν και γι' αυτό διαθέτει εσωτερική διαμόρφωση έδρασης αυτών. Επίσης διαθέτει οπή με σπείρωμα στη φλάντζα, ώστε να συνδέεται σταθερά με το ένα εξωτερικό πόδι μέσω κοχλία. Μπορεί να διαμορφωθεί με κατάλληλη κατεργασία από κυλινδρικό τεμάχιο το οποίο διατίθεται στην αποθήκη του εργαστηρίου.

#### 17. B' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών (ring bearing b)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο:



Σχήμα 4-27: B' δακτύλιος έδρασης εξωτερικών ποδιών σε όψη και τομή.

- Πρόσθετα σχόλια: Οι διαστάσεις του εξαρτήματος προκύπτουν, ώστε να συνεργάζεται κατάλληλα τόσο με την αντίστοιχη οπή του εξωτερικού ποδιού, όσο και με τα επιλεχθέντα ρουλεμάν και γι' αυτό διαθέτει εσωτερική διαμόρφωση έδρασης αυτών. Επίσης διαθέτει οπή με σπείρωμα στη φλάντζα, ώστε να συνδέεται σταθερά με το ένα εξωτερικό πόδι μέσω κοχλία. Τέλος μέσω της οπής στο δεξί του άκρο μπορεί να προσαρτηθεί επιπλέον μάζα ή κινητήρας για την επενέργηση της κίνησης των εξωτερικών ποδιών, κάτι που αποτελεί και τη βασική διαφορά από τον Α' δακτύλιο έδρασης εξωτερικών ποδιών. Μπορεί να διαμορφωθεί με κατάλληλη κατεργασία από κυλινδρικό τεμάχιο το οποίο διατίθεται στην αποθήκη του εργαστηρίου.

#### 18. Σύνδεση εξωτερικών ποδιών (outer legs connector)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο:

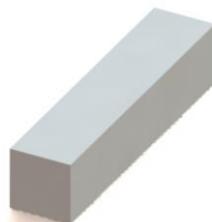


**Σχήμα 4-28: Σύνδεση εξωτερικών ποδιών.**

- Πρόσθετα σχόλια: Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση κίνησης από το ένα εξωτερικό πόδι στο άλλο. Οι διαστάσεις του προκύπτουν ώστε να συνεργάζεται με την αντίστοιχη διαμόρφωση του εξωτερικού ποδιού. Επειδή τα άνω εξωτερικά πόδια είναι από πλαστικό ABS μπορεί να υπόκεινται σε στρεπτικές παραμορφώσεις και **κατ' επέκταση να μην συντονίζονται πλήρως κατά το βηματισμό**. Προκειμένου να εξαλειφθεί όσο το δυνατόν περισσότερο αυτό το **ζήτημα επιδιώχθηκε το εξάρτημα αυτό να είναι τετραγωνικής διατομής, καθώς παρουσιάζει υψηλή στρεπτική δυσκαμψία συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατομές για τις ίδιες διαστάσεις**.

#### 19. Σύνδεση εσωτερικών ποδιών (inner legs connector)

- Υλικό: ABS
- Τριδιάστατο μοντέλο:



**Σχήμα 4-29: Σύνδεση εσωτερικών ποδιών.**

- Πρόσθετα σχόλια: Συνδέει τα εσωτερικά πόδια μεταξύ τους ώστε να συντονίζονται αν και δεν είναι απαραίτητο, καθώς αυτά έχουν ενιαίο πέλμα. Επίσης χρησιμεύει για να διατηρεί το κέντρο βάρους του ισχίου συνολικά στο γεωμετρικό άξονα περιστροφής όλων των εξαρτημάτων του ισχίου. **Τέλος αποτελεί μια επιπλέον έδραση για το υποσυναρμολόγημα-φωλιά του αισθητήρα IMU που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των επιταχύνσεων στο ισχίο, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.** Μπορεί να κατασκευασθεί με τον τριδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου.

#### 20. Κάλυμμα εδράνου (Bearing cap)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο:

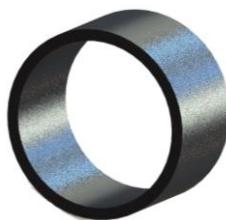


**Σχήμα 4-30: Κάλυμμα εδράνου (Bearing cap).**

- Πρόσθετα σχόλια: Η λειτουργία τους είναι κυρίως **επιβοηθητική** και χρησιμοποιούνται για τη σωστή έδραση των εδράνων κύλισης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-24, αυτά πιέζουν τον εξωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν και περιορίζουν την κίνηση αυτού κατά την αξονική κατεύθυνση. Η σημαντικότητά τους έγκειται κυρίως κατά την τοποθέτηση των εδράνων καθώς θα πρέπει σε αυτά να ασκείται φόρτιση τόσο στον εσωτερικό, όσο και στον εξωτερικό δακτύλιο, έτσι ώστε να μην καταπονούνται οι ένσφαιροι τριβείς.

#### 21. Αποστάτης (Spacer)

- Υλικό: Αλουμίνιο 5083
- Τριδιάστατο μοντέλο:



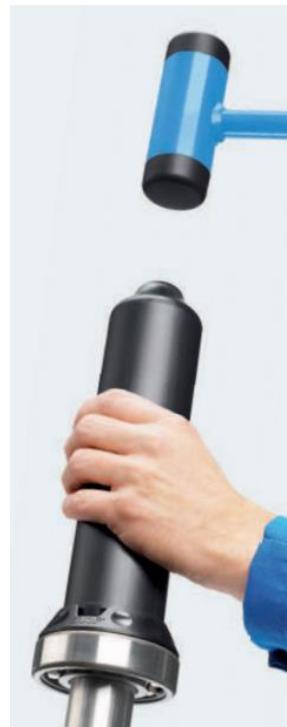
**Σχήμα 4-31: Αποστάτης (Spacer).**

- Πρόσθετα σχόλια: Το συγκεκριμένο εξάρτημα λειτουργεί βοηθητικά για τη σωστή τοποθέτηση των εδράνων κύλισης. Συγκεκριμένα εξασφαλίζει ότι η απόσταση μεταξύ των δύο εδράνων διατηρείται. Αυτό επιτυγχάνεται όπως **απεικονίζεται και στο Σχήμα 4-24**, τόσο **μέσω των ασφαλιστικών δακτυλιδιών** άξονα που ασφαλίζουν τον εσωτερικό δακτύλιο των εδράνων, όσο και **μέσω των spacer που ασφαλίζουν τον εξωτερικό δακτύλιο των εδράνων**.

## 22. Έδρανα κύλισης (bearings)

Τα έδρανα κύλισης αποτελούν τυποποιημένα εξαρτήματα τα οποία υπόκεινται σε συγκεκριμένες προδιαγραφές και ανοχές. Ο βασικός σκοπός είναι η εξασφάλιση της ανεξάρτητης κίνησης μεταξύ στρεφόμενων μερών. Στη συγκεκριμένη κατασκευή οι Α' και Β' δακτύλιοι έδρασης εξωτερικών ποδιών περιστρέφονται ανεξάρτητα από το βασικό άξονα λόγω της ύπαρξης των εδράνων.

Η ομαλή τοποθέτησή τους υλοποιείται επιλέγοντας **σφιχτή συναρμογή ανάμεσα στον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου** και το βασικό άξονα περιστροφής **και ελεύθερη συναρμογή ανάμεσα στον εξωτερικό δακτύλιο του εδράνου** και **τους δακτυλίους έδρασης των εξωτερικών ποδιών**. Επίσης είναι απαραίτητες κατάλληλες διαμορφώσεις, οι οποίες **συγκρατούν στη σωστή θέση τους δακτυλίους του εδράνου** και γίνονται αντιληπτές καλύτερα στα Σχήματα 4-23 και 4-24. Όσον αφορά το εργαλείο που χρησιμοποιείται για την τοποθέτησή τους, αυτό είναι ένα ειδικό **εργαλείο το οποίο ασκεί ομοιόμορφη πίεση στο εσωτερικό και εξωτερικό δαχτυλίδι του εδράνου**. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται μόνο για την επίτευξη της σφιχτής συναρμογής και φαίνεται στο Σχήμα 4-32.

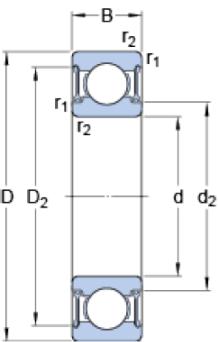


**Σχήμα 4-32: Ειδικό εργαλείο τοποθέτησης εδράνων κύλισης.**

Όπως φαίνεται, το εργαλείο αυτό έρχεται σε επαφή με ολόκληρο το έδρανο αποτρέποντας τον τραυματισμό των ένσφαιρων τριβέων. Ένα μαλακό σφυράκι χρησιμοποιείται για την άσκηση δύναμης.

**Ωστόσο επειδή για τη συγκεκριμένη κατασκευή δεν απαιτείται τοποθέτηση πολλών εδράνων, δεν κρίθηκε σκόπιμο να αγορασθεί τέτοιο εργαλείο. Αντί αυτού κατασκευάσθηκε “αυτοσχέδιο” εργαλείο, το οποίο αποτελείται από έναν κοίλο κύλινδρο, ο οποίος έχει τις αντίστοιχες διαστάσεις των δακτυλίων του εδράνου.**

Τα έδρανα που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατά με τις διαστάσεις των τεμαχίων στα οποία προσαρμόζονται. Συγκεκριμένα είναι η σειρά W61802 με τις ακόλουθες διαστάσεις και προδιαγραφές:



d	15	mm
D	24	mm
B	5	mm
$d_2$	$\approx$ 16.8	mm
$D_2$	$\approx$ 22.15	mm
$r_{1,2}$	min. 0.3	mm

Σχήμα 4-33: Βασικές διαστάσεις του εδράνου κύλισης W61802.

Πίνακας 4-9: Προδιαγραφές επιλεχθέντων εδράνων κύλισης.

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Basic dynamic load rating	C	1.65	kN
Basic static load rating	$C_0$	1.08	kN
Fatigue load limit	$P_u$	0.048	kN
Limiting speed	n	30000	rpm
Mass bearing	m	7.1	g

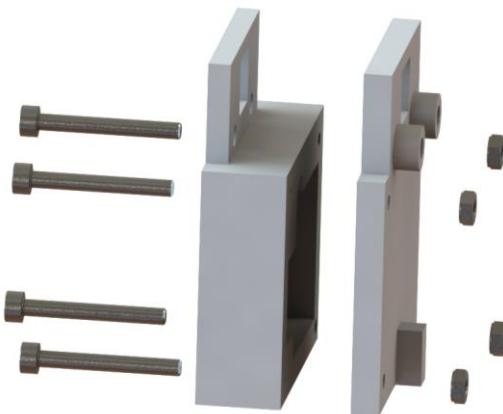
Όσον αφορά τις λειτουργικές προδιαγραφές, αυτές υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις φόρτισης της κατασκευής, καθώς τα ασκούμενα φορτία κατά τον παθητικό βηματισμό είναι της τάξης των λίγων Newton, ενώ οι ταχύτητες περιστροφής που αναπτύσσονται είναι πολύ χαμηλότερες του τιθέμενου ορίου.

#### 4.3.4 Επιπλέον υποσυναρμολογήματα

Το παθητικό δίποδο ρομπότ ολοκληρώνεται με δύο επιπλέον υποσυναρμολογήματα. Αυτά είναι το υποσυναρμολόγημα που φέρει τον αισθητήρα IMU στον άξονα του ισχίου και το υποσυναρμολόγημα της επιπρόσθετης μάζας.

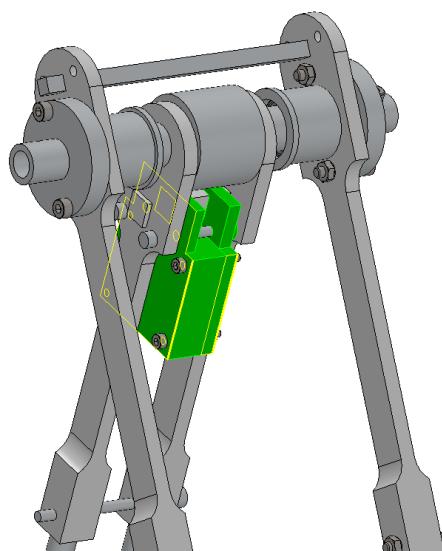
##### Κέλυφος αισθητήρα IMU

- Υλικό: ABS
- Τριδιάστατο μοντέλο:



**Σχήμα 4-34: Κέλυφος αισθητήρα IMU σε εξαντλημένο σχέδιο προβολής (exploded view).**

- Πρόσθετα σχόλια: Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, κατά το παθητικό βάδισμα θα πρέπει να καταγραφούν ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη, ώστε να μπορεί να υπάρξει σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες IMU που καταγράφουν γραμμικές επιταχύνσεις και γωνιακές ταχύτητες. Περισσότερα γι' αυτούς θα αναφερθούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Αυτοί τοποθετούνται στο πέλμα και στο ισχίο. Η τοποθέτηση στο πέλμα πραγματοποιείται με ειδική εσοχή που διαμορφώνεται στο πέλμα των εσωτερικών ποδιών (βλ. Σχήμα 4-9). Η τοποθέτηση στο ισχίο υλοποιείται μέσω του κελύφους που φαίνεται στο Σχήμα 4-34. Πρόκειται για ένα διμερές κέλυφος που φέρει εσωτερική κοιλότητα για να υποδεχτεί τον αισθητήρα. Ο αισθητήρας θα πρέπει να είναι ακίνητος μέσα στην εσωτερική κοιλότητα και αυτό επιτυγχάνεται με ένα καπάκι που σφίγγεται στην κοιλότητα με τέσσερα ζεύγη κοχλιών-περικοχλίων. Όλα τα εξαρτήματα του κελύφους προκύπτουν με τρισδιάστατη εκτύπωση και η ακριβής θέση του παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-35.



**Σχήμα 4-35: Κέλυφος αισθητήρα IMU. Τοποθετείται κοντά στον άξονα του ισχίου και ανάμεσα στα εσωτερικά πόδια.**

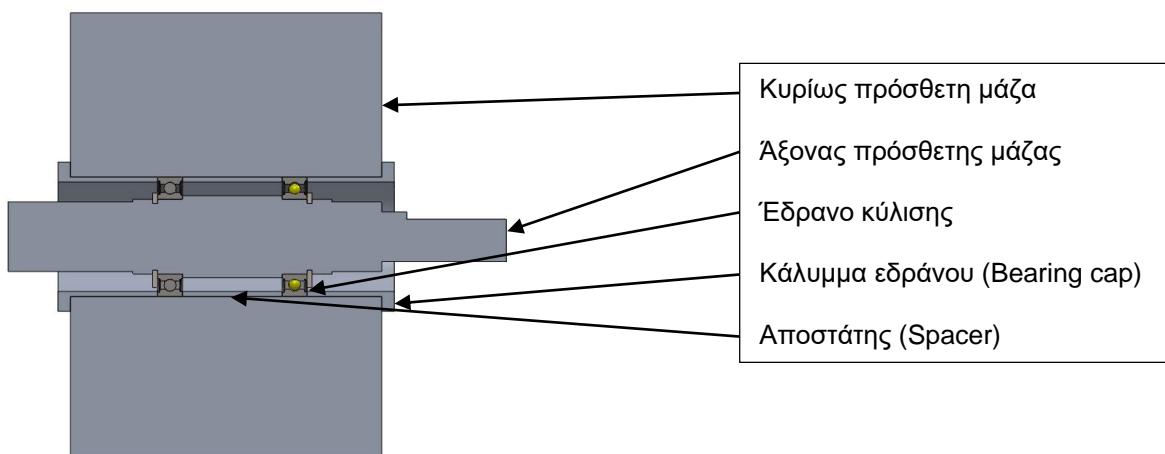
### Συναρμολόγημα πρόσθετης μάζας

Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο, ο δίποδος μηχανισμός θα πρέπει να ικανοποιεί προδιαγραφές, όπως ο λόγος μαζών μεταξύ ποδιού και ισχίου. Ο σχεδιασμός επιτρέπει την προσάρτηση διαφόρων μαζών, όπως έχει υποδειχθεί και προηγουμένως, μέσω των διαμορφώσεων που παρουσιάζει ο άξονας του ισχίου, επομένως υπάρχει ευελιξία ως προς την επιλογή του λόγου μαζών. Έτσι, παρ' όλο που η επιλεγέσια για το λόγο μαζών στα πειράματα δεν απαιτεί την ύπαρξη αυτού του υποσυναρμολογήματος, στο Σχήμα 4-36 παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας το ολοκληρωμένο δίποδο παθητικό ρομπότ.



**Σχήμα 4-36: Φωτορεαλιστική εικόνα του δίποδου ρομπότ με προσαρτημένες τις επιπρόσθετες μάζες.**

Αναλυτικότερα το υποσυναρμολόγημα της πρόσθετης μάζας σε τομή είναι:



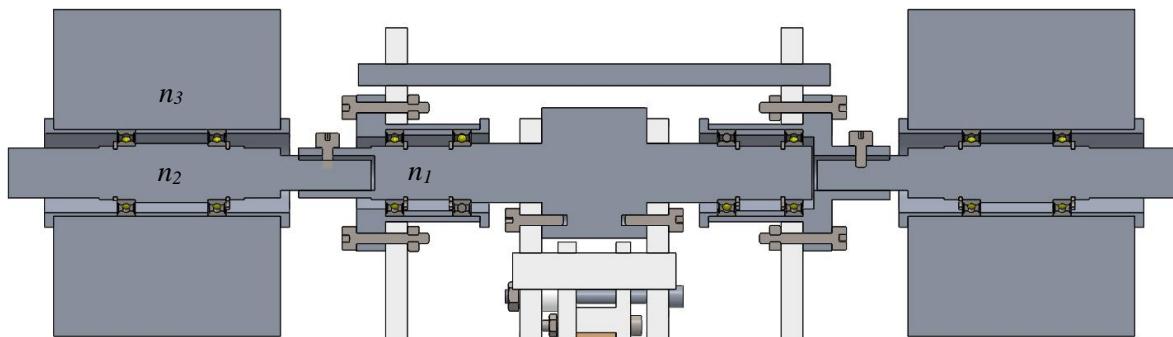
**Σχήμα 4-37: Πρόσθετη μάζα.**

Το συναρμολόγημα αυτό χωρίζεται σε επιμέρους εξαρτήματα, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 4-10.

**Πίνακας 4-10: Εξαρτήματα πρόσθετης μάζας.**

α/α	Ονομασία	Ποσότητα
1	Κυρίως επιπρόσθετη μάζα	1
2	Άξονας επιπρόσθετης μάζας	1
3	Κάλυμμα εδράου (Bearing cap)	2
4	Αποστάτης (Spacer)	1
5	Έδρανα κύλισης	2

Το κάλυμμα εδράου και ο αποστάτης σχεδιάζονται κατ' αντιστοιχία με αυτά που φέρει ο άξονας ισχίου και έχουν την ίδια λειτουργικότητα. Επίσης τα έδρανα κύλισης που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια (W61802). Ο λόγος που τοποθετούνται έδρανα κύλισης είναι για να περιορισθεί η επίδραση της κυρίως επιπρόσθετης μάζας στην αδράνεια του συνόλου. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας πρόσθετης μάζας πακτώνεται μέσω κοχλία πάνω στον άξονα του ισχίου, επομένως περιστρέφεται μαζί με αυτόν και κατ' επέκταση ακολουθεί την περιστροφή των ποδιών. Ωστόσο είναι επιθυμητό να αυξηθεί η συνολική μάζα χωρίς να επηρεασθεί κατά το δυνατόν η συνολική ροπή αδράνειας. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η χρήση εδράνων κύλισης. Έτσι η κυρίως πρόσθετη μάζα δεν περιστρέφεται μαζί με τον άξονα και δεν επηρεάζει την κίνηση με αυτόν τον τρόπο. Αυτό εξηγείται καλύτερα στην απεικόνιση του Σχήματος 4-38.



**Σχήμα 4-38: Σχηματική εξήγηση της ανεξαρτησίας περιστροφών του ισχίου.**

Έτσι αν ο κύριος άξονας του ισχίου περιστρέφεται με ταχύτητα  $n_1$ , ο άξονας της πρόσθετης μάζας με  $n_2$  και η κυρίως πρόσθετη μάζα με  $n_3$ , όπως συμβολίζονται στο Σχήμα 4-38, θα ισχύει

$$n_1 = n_2 \neq n_3 \equiv 0 \quad (4-5)$$

Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι το ότι αλλάζοντας μόνο την εξωτερική διάμετρο της κυρίως πρόσθετης μάζας αλλάζει το βάρος στο ισχύο, και έτσι μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικές τιμές για τον λόγο μαζών με ελάχιστη παρέμβαση στο δίποδο ρομπότ.

## 5 Κατασκευαστική και λειτουργική αξιολόγηση σχεδιασμού

Εφόσον πλέον ο σχεδιασμός έχει ελεγχθεί ως προς την ικανοποίηση των προδιαγραφών που τίθενται από τη μαθηματική μοντελοποίηση, θα πρέπει να γίνει αξιολόγηση του σχεδιασμού τόσο **κατασκευαστικά**, όσο **και λειτουργικά**. Οι δύο αυτές αξιολογήσεις εμπλέκουν η μία την άλλη. Η κατασκευαστική αξιολόγηση αφορά τον έλεγχο της αντοχής των εξαρτημάτων στις φορτίσεις που δέχεται η διάταξη κατά τη διάρκεια του παθητικού βηματισμού μέσω του λογισμικού πεπερασμένων **στοιχείων ANSYS**. Η **λειτουργική αξιολόγηση** αφορά την **επίτευξη παθητικού βηματισμού** του λεπτομερούς μοντέλου στο λογισμικό **MSC Adams**, την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις δυνατότητες υλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας, καθώς και την εκτίμηση επιτυχίας του πειράματος. Μέσω της προσομοίωσης **στο Adams προκύπτουν διάφορες δυνάμεις**, όπως η επαφή των πελμάτων με το έδαφος και η δύναμη του ελατηρίου-αποσβεστήρα, οι οποίες εισάγονται στο **ANSYS** για την εκτέλεση **στατικών, δυναμικών και κοπωτικών αναλύσεων**.

Παρά το γεγονός ότι **οι δύο αυτές μέθοδοι εμπλέκονται**, στην παρούσα ενότητα αναλύονται ξεχωριστά για καλύτερη κατανόηση και συστηματικότερη επεξήγηση. Αφού επικυρωθεί ο σχεδιασμός, τότε θα είναι δυνατή η έναρξη της κατασκευής του.

### 5.1 Κατασκευαστική αξιολόγηση

Η **κατασκευαστική αξιολόγηση** του μοντέλου **πραγματοποιείται στο λογισμικό ANSYS** μέσω δοκιμών στατικής και δυναμικής αντοχής, δοκιμών κόπωσης και **ελέγχων λυγισμού**. Το ANSYS είναι ένα λογισμικό προσομοιώσεων για διάφορους κλάδους της μηχανολογίας. Χωρίζεται σε πολλές υποενότητες με σημαντικές δυνατότητες για την κάθε μία, οι σημαντικότερες των οποίων είναι:

- ANSYS Mechanical: Χρησιμοποιείται για ανάλυση δομικών μηχανικών προβλημάτων και διαθέτει το ανάλογο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικές, μη γραμμικές και δυναμικές αναλύσεις.
- ANSYS Fluent (CFD, CFX): Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής με το ανάλογο εικονικό περιβάλλον.
- ANSYS Electronics: Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, για την ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών συσκευών, καθώς και άλλων πεδίων της ηλεκτρονικής.
- ANSYS Optimization: Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Στη συγκεκριμένη εργασία, το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε μόνο για δομικές αναλύσεις με τη χρήση του πακέτου Mechanical, καθώς αυτό ήταν το σημείο ενδιαφέροντος. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται με τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων και ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία για τη σωστή επίλυση του προβλήματος.

Αρχικά ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης, η οποία μπορεί να είναι **στατική ανάλυση (static structural)**, **δυναμική ανάλυση (explicit dynamics)**, **ανάλυση ιδιοσυχνότητών (modal)**, **ανάλυση λυγισμού (eigenvalue buckling)** κ.ά. Στη συνέχεια ο χρήστης εισάγει το μοντέλο προς ανάλυση (π.χ. κάποιο

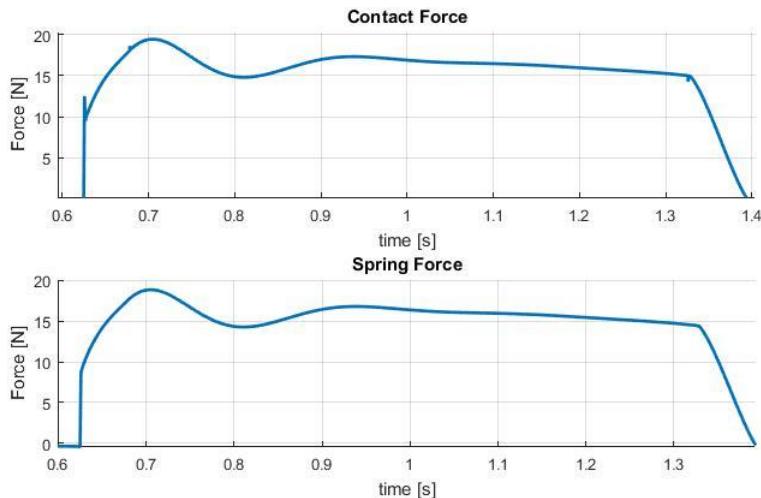
εξάρτημα που έχει σχεδιάσει στο SolidWorks) και ένας προ-επεξεργαστής (pre-processor) το διαβάζει, έτσι ώστε να μπορέσει να δημιουργήσει το κατάλληλο πλέγμα (mesh). Με τον όρο πλέγμα εννοείται ο χωρισμός του μοντέλου σε κόμβους και στοιχεία που διακριτοποιούν το εξάρτημα. Ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο ακριβή θα είναι τα αποτελέσματα, αλλά και τόσο πιο αυξημένη θα είναι η υπολογιστική ισχύς και ο χρόνος που θα δεσμευτεί για την επίλυση του προβλήματος. Απαραίτητο στάδιο επίσης είναι ο ορισμός του υλικού, το οποίο μπορεί να επιλεχθεί είτε κατευθείαν μέσω βιβλιοθηκών του λογισμικού είτε να μοντελοποιηθεί από το χρήστη με την απόδοση τιμών σε κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού, όπως η αντοχή σε θραύση, το όριο διαρροής, το μέτρο ελαστικότητας κ.λπ. Πριν την έναρξη της επίλυσης πρέπει να εφαρμοσθούν οι οριακές συνθήκες στους κόμβους, δηλαδή οι απαιτούμενες γενικευμένες μετατοπίσεις-στηρίξεις και δυνάμεις. Έτσι το αρχείο εισάγεται στον κώδικα ανάλυσης FEA (Finite Element Analysis), ο οποίος επιλύει τις προκύπτουσες εξισώσεις σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.5. Τέλος το λογισμικό διαθέτει κατάλληλο μετα-επεξεργαστή (post processor) για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Δηλαδή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να λάβει σε αριθμητική και γραφική μορφή διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως τις ασκούμενες τάσεις στο εξάρτημα, τις προκύπτουσες παραμορφώσεις κ.ο.κ. Έτσι ο χρήστης λαμβάνει τα αποτελέσματα και εκτιμά τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του σχεδιασθέντος μοντέλου. Για παράδειγμα αν οι τάσεις που προκύπτουν από τα φορτία είναι μεγαλύτερες των ορίων διαρροής και θραύσης ενός εξαρτήματος, τότε θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στο σχεδιασμό, οι οποίες μπορεί να είναι η επιλογή άλλου υλικού, η αύξηση των διαστάσεων των κρίσιμων διατομών ή όποια άλλη τροποποίηση εξυπηρετεί αυτό το σκοπό.

### 5.1.1 Αξιολόγηση αντοχής των εξαρτημάτων του δίποδου ρομπότ

Το δίποδο ρομπότ αποτελείται από πολλά εξαρτήματα, το κάθε ένα με διαφορετική λειτουργία, σχεδιασμό και φορτίσεις. Για το λόγο αυτό, για το **κάθε εξάρτημα επιλέγεται διαφορετικός τύπος ανάλυσης**, ορισμένα ελέγχονται σε στατικές δοκιμές, άλλα ελέγχονται δυναμικά **και σε κόπωση**, ενώ σε άλλα γίνεται **ανάλυση λυγισμού ή συνδυασμός των ανωτέρω**.

Επειδή μέσω των αναλύσεων επιδιώκεται να εξαχθεί μια ικανοποιητική εκτίμηση των ασκούμενων καταπονήσεων των εξαρτημάτων, η γένεση του πλέγματος είναι σχετικά πυκνή (από το δένδρο ενεργειών Mesh > Sizing > element size = 1mm, high smoothing, fine relevance center, fine span angle center). Όσον αφορά τα χρησιμοποιούμενα υλικά, αυτά μοντελοποιούνται με χρήση των πραγματικών μηχανικών ιδιοτήτων τους που αναφέρονται στο εδάφιο 4.3. Ειδικά για τον έλεγχο αντοχής σε δυναμική καταπόνηση, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού της καμπύλης S-N για τις δοκιμές κόπωσης (Σχήμα 4-5).

Για την μελέτη αντοχής των υλικών, **από τις προσομοιώσεις βηματισμού εξάγονται τα προφίλ των δυνάμεων** που αναπτύσσονται κατά τον βηματισμό (**δύναμη επαφής και δύναμη ελατηρίου**). Για να υπάρχει μεγαλύτερος συντελεστής ασφάλειας ως προς τις επιτρεπόμενες καταπονήσεις, επιλέγεται να ελεγχθεί η αντοχή των εξαρτημάτων για το σενάριο βηματισμού του δίποδου ρομπότ **με τη μέγιστη μάζα σχεδιασμού, προσθέτωντας τις επιπρόσθετες μάζες στο ισχίο** και συνεπώς αυξάνοντας τα ασκούμενα φορτία.



**Σχήμα 5-1: Δυνάμεις επαφής και ελατηρίου εξαγόμενες από προσομοίωση στο λογισμικό Adams.**

Επιπλέον οι φορτίσεις που εισάγονται στο λογισμικό ANSYS για τις δοκιμές αντοχής είναι οι διπλάσιες από αυτές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. **Αυτό εισάγει μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας στο δίποδο ρομπότ.** Με αυτά τα περιθώρια που έχουν ληφθεί υπόψη μπορεί να υπάρχει μια επιπλέον ασφάλεια όσον αφορά την πιθανή άσκηση φορτίων που δεν προβλέπονται κατά την κανονική λειτουργία του ρομπότ: **για παράδειγμα, αν το δίποδο δεν έχει τέλεια επαφή με το έδαφος θα αναπτυχθούν και πλευρικές δυνάμεις, ή ακόμα το δίποδο ενδέχεται να δεχτεί αυξημένο φορτίο σε περίπτωση πτώσης του κατά το βηματισμό.**

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνθήκες φόρτισης που εφαρμόζονται σε κάθε εξάρτημα, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα των αναλύσεων:

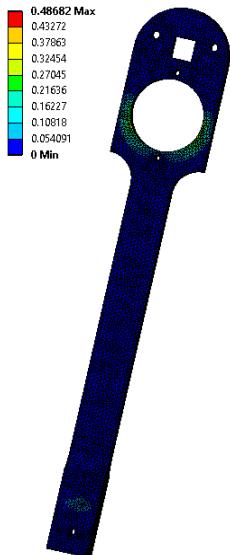
➤ Άνω εξωτερικό πόδι

Τα φορτία που δέχεται το άνω εξωτερικό πόδι προέρχονται από τη μάζα του ισχίου και από το ελατήριο. Η δύναμη του ελατηρίου μεταδίδεται μέσω του κοχλία σύνδεσης του άνω με το κάτω εξωτερικό πόδι.



**Σχήμα 5-2: Ασκούμενες δυνάμεις στο άνω εξωτερικό πόδι.**

Επειδή το συγκεκριμένο εξάρτημα είναι σχετικά μεγάλου μήκους και μικρού πάχους, κρίνεται απαραίτητο να εξετασθεί όχι μόνο η αντοχή του σε δυναμικά φορτία, αλλά και η αντοχή του σε λυγισμό. Έτσι εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



**Σχήμα 5-3: Κατανομή τάσεων (MPa) στο άνω εξωτερικό πόδι.**

Όμως το άνω εξωτερικό πόδι είναι από ABS που έχει όριο διαρροής 41.4 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος. Επίσης από την ανάλυση λυγισμού προκύπτει ο ελάχιστος πολλαπλασιαστής του φορτίου λυγισμού  $\lambda_c = 213.77$  (δηλαδή ο συντελεστής που πολλαπλασιάζει τα ασκούμενα φορτία προκειμένου να παραχθεί το κρίσιμο φορτίο). Έτσι το συγκεκριμένο εξάρτημα δεν αντιμετωπίζει ούτε πρόβλημα λυγισμού.

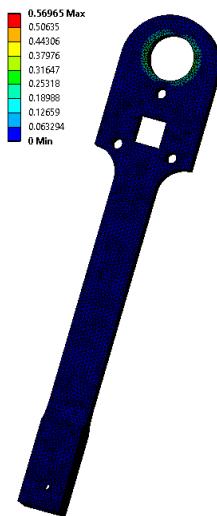
➤ Άνω εσωτερικό πόδι

Η ανάλυση είναι ίδια τόσο για το άνω εξωτερικό, όσο και για το άνω εσωτερικό πόδι.



**Σχήμα 5-4: Ασκούμενες δυνάμεις στο άνω εσωτερικό πόδι.**

Έτσι εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



**Σχήμα 5-5: Κατανομή τάσεων (MPa) στο άνω εσωτερικό πόδι.**

Όμως το άνω εσωτερικό πόδι είναι από ABS που έχει όριο διαρροής 41.4 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος. Επίσης από την ανάλυση λυγισμού προκύπτει ο ελάχιστος πολλαπλασιαστής του φορτίου λυγισμού  $\lambda_c = 188.38$  (δηλαδή ο συντελεστής που πολλαπλασιάζει τα ασκούμενα φορτία προκειμένου να παραχθεί το κρίσιμο φορτίο). Έτσι το συγκεκριμένο εξάρτημα δεν αντιμετωπίζει ούτε πρόβλημα λυγισμού.

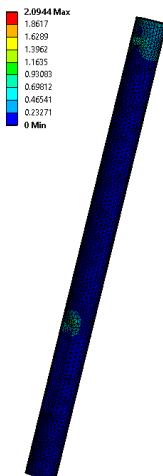
➤ Κάτω πόδι

Το κάτω πόδι αποτελεί κοινό εξάρτημα τόσο για τα εσωτερικά, όσο και για τα εξωτερικά πόδια και επομένως εξετάζεται από κοινού. Τα φορτία που δέχεται το κάτω πόδι προέρχονται από το ελατήριο στο σημείο που συνδέεται με αυτό και από τη μάζα του ισχίου που μεταδίδεται μέσω του κοχλία σύνδεσης του άνω με το κάτω εσωτερικό πόδι.



**Σχήμα 5-6: Ασκούμενες δυνάμεις στο κάτω πόδι.**

Εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



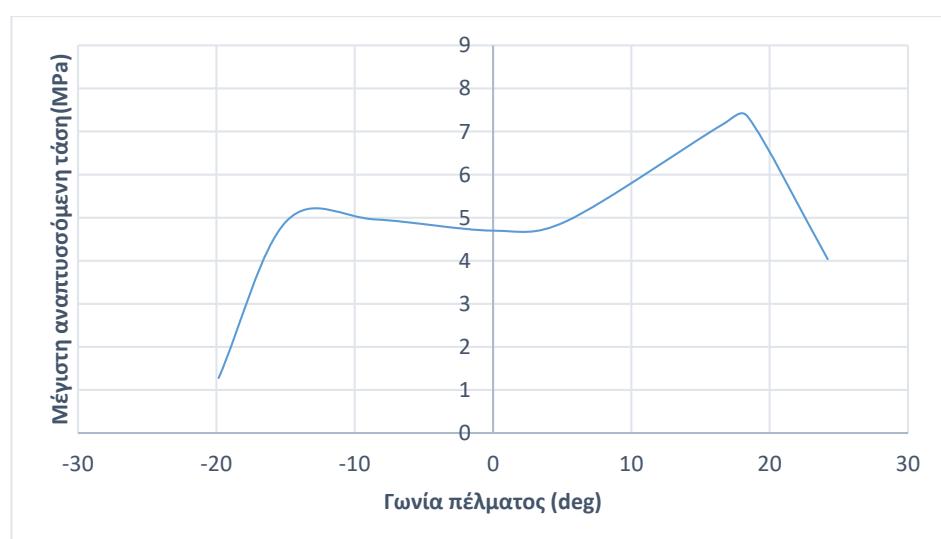
**Σχήμα 5-7: Κατανομή τάσεων (MPa) στο κάτω πόδι.**

Όμως το κάτω πόδι είναι από αλουμίνιο - 5083 που έχει όριο διαρροής 250 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος

#### ➤ Εξωτερικό πέλμα

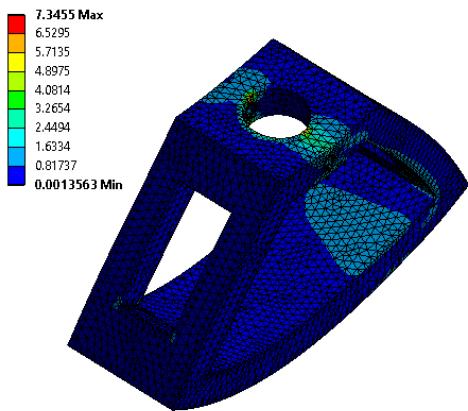
Τα φορτία που δέχεται το εξωτερικό πέλμα προέρχονται από το ελατήριο στην άνω επιφάνεια αυτού και από την επαφή του πέλματος με το έδαφος.

Επειδή το πέλμα έρχεται σε επαφή με το έδαφος υπό διάφορες γωνίες, πραγματοποιήθηκε καταγραφή ζευγών γωνίας και δύναμης κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης στο λογισμικό Adams. Έτσι, στο Σχήμα 5-8 φαίνεται η κατανομή των τάσεων συναρτήσει της γωνίας επαφής.



**Σχήμα 5-8: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση υπό διάφορες γωνίες επαφής του πέλματος με το έδαφος.**

Όσον αφορά μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται κυρίως στις οπές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-9.

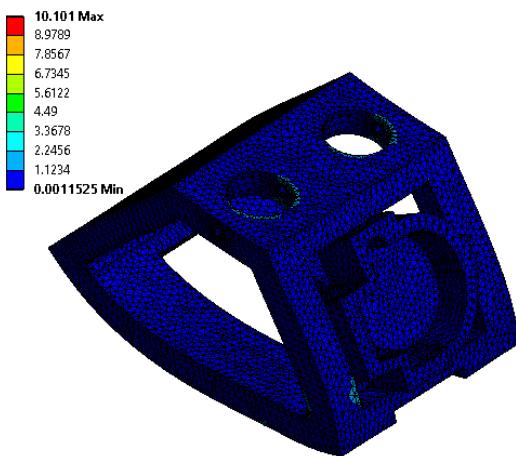


**Σχήμα 5-9: Κατανομή τάσεων (MPa) στο εξωτερικό πέλμα.**

Όμως το υλικό κατασκευής είναι το ABS που έχει όριο διαρροής 41.4 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος. Επίσης επειδή το πέλμα είναι το εξάρτημα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, κρίνεται **απαραίτητο να εξετασθεί και η αντοχή του πέλματος σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις**. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο Soderberg (βλ. Κεφάλαιο 2.5), η διάρκεια ζωής του εξαρτήματος προκύπτει απεριόριστη ( $10^7$  κύκλοι ζωής).

➤ Εσωτερικό πέλμα

Το εσωτερικό πέλμα δέχεται αντίστοιχες φορτίσεις με αυτές του εξωτερικού. Έτσι εξετάζεται η φόρτιση για τη γωνία του πέλματος που δίνει τη μέγιστη καταπόνηση, η οποία φαίνεται παρακάτω.



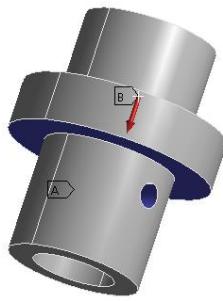
**Σχήμα 5-10: Κατανομή τάσεων (MPa) στο εσωτερικό πέλμα.**

Όμως το υλικό κατασκευής είναι το ABS που έχει όριο διαρροής 41.4 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος. Επίσης επειδή το πέλμα είναι το εξάρτημα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, κρίνεται απαραίτητο να εξετασθεί και η αντοχή του πέλματος σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις

επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο Soderberg (βλ. Κεφάλαιο 2.5), η διάρκεια ζωής του εξαρτήματος προκύπτει απεριόριστη ( $10^6$  κύκλοι ζωής).

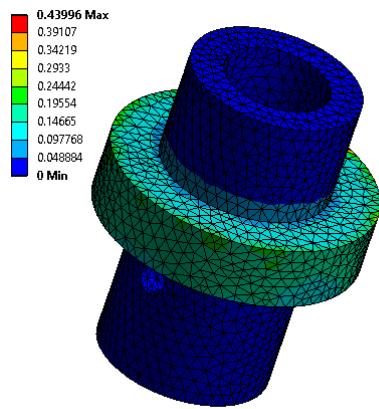
➤ Υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης

Τα φορτία που δέχεται το υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης προέρχονται από το ελατήριο στην άνω επιφάνεια αυτού, ενώ στηρίζεται στις οπές του πέλματος μέσω πείρου σύνδεσης, καθώς και στην άνω επιφάνεια του πέλματος.



**Σχήμα 5-11: Ασκούμενες δυνάμεις και στηρίξεις στο υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης.**

Εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



**Σχήμα 5-12: Κατανομή τάσεων (MPa) στο υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης.**

Όμως το υποστήριγμα πρισματικής άρθρωσης είναι από ακετάλη που έχει όριο διαρροίς 65 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος.

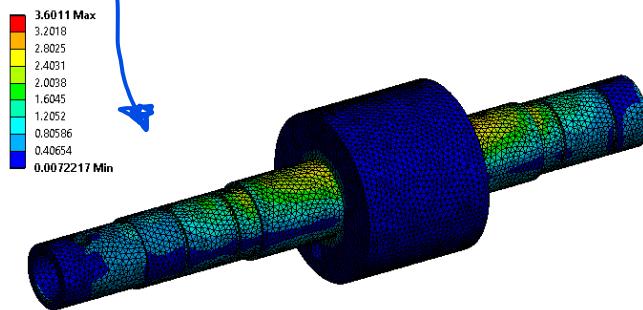
➤ Κύριος άξονας περιστροφής

Τα φορτία που δέχεται ο κύριος άξονας περιστροφής διαφοροποιούνται ανάλογα με τη φάση βηματισμού στην οποία βρίσκεται το δίποδο ρομπότ. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιούνται τρεις ξεχωριστές αναλύσεις, μία στη φάση απλής στήριξης μέσω των εσωτερικών ποδιών, μία στη φάση απλής στήριξης μέσω των εξωτερικών ποδιών και μία στη φάση διπλής στήριξης.

#### **Φάση απλής στήριξης – Εσωτερικά πόδια σε επαφή με το έδαφος**

Σε αυτήν την περίπτωση **τα φορτία που δέχεται ο κύριος άξονας περιστροφής προέρχονται από τα ελατήρια των ποδιών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, από τις μάζες των ποδιών που αιωρούνται και από τις μάζες των εξαρτημάτων του ισχίου.**

Εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



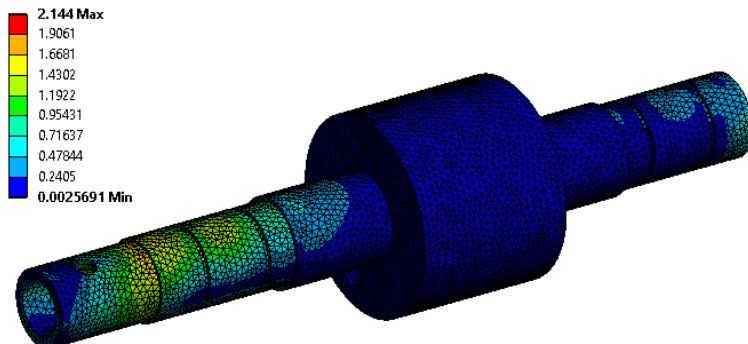
**Σχήμα 5-13: Κατανομή τάσεων (MPa) στον κύριο άξονα περιστροφής – φάση απλής στήριξης των εσωτερικών ποδιών.**

Όμως ο κύριος άξονας περιστροφής είναι από αλουμίνιο - 5083 που έχει όριο διαρροής 250 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος, σε αυτή τη φάση βηματισμού.

#### **Φάση απλής στήριξης – Εξωτερικά πόδια σε επαφή με το έδαφος**

Σε αυτήν την περίπτωση **τα φορτία που δέχεται ο κύριος άξονας περιστροφής προέρχονται από τα ελατήρια των ποδιών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, από τις μάζες των ποδιών που αιωρούνται και από τις μάζες των εξαρτημάτων του ισχίου.**

Εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



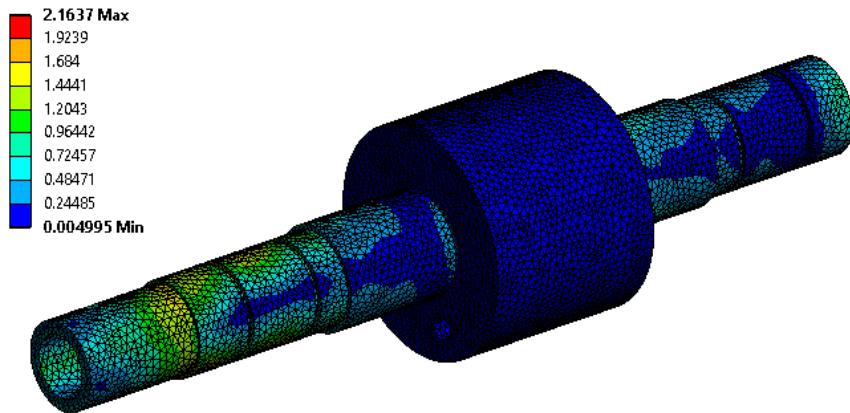
**Σχήμα 5-14: Κατανομή τάσεων (MPa) στον κύριο άξονα περιστροφής – φάση απλής στήριξης των εξωτερικών ποδιών.**

Όμως ο κύριος άξονας περιστροφής είναι από αλουμίνιο - 5083 που έχει όριο διαρροής 250 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος, σε αυτή τη φάση βηματισμού.

#### Φάση διπλής στήριξης – Εσωτερικά και εξωτερικά πόδια σε επαφή με το έδαφος

Σε αυτήν την περίπτωση τα φορτία που δέχεται ο κύριος άξονας περιστροφής προέρχονται από τα ελατήρια των ποδιών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος και από τις μάζες των εξαρτημάτων του ισχίου.

Εισάγοντας τα προφίλ των δυνάμεων (διπλασιασμένα) που προκύπτουν από τη δυναμική προσομοίωση, η κατανομή των τάσεων είναι η παρακάτω.



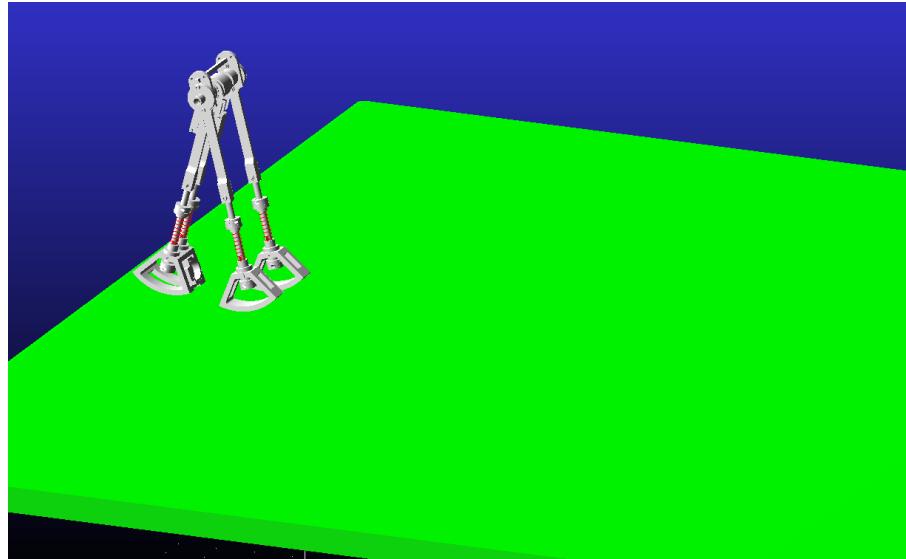
**Σχήμα 5-15: Κατανομή τάσεων (MPa) στον κύριο άξονα περιστροφής – φάση διπλής στήριξης.**

Όμως ο κύριος άξονας περιστροφής είναι από αλουμίνιο - 5083 που έχει όριο διαρροής 250 MPa, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής του συγκεκριμένου εξαρτήματος, σε αυτή τη φάση βηματισμού.

Συμπερασματικά όλα τα εξαρτήματα αντέχουν στις συνθήκες φόρτισης, έχοντας λάβει υπόψη και έναν υψηλό συντελεστή ασφαλείας, καθώς για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι φορτίσεις που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις βηματισμού με τις πρόσθετες μάζες, οι οποίες προκαλούν μεγαλύτερες δυνάμεις επαφής και μεγαλύτερες συμπιέσεις στα ελατήρια και άρα μεγαλύτερες δυνάμεις. Επίσης στο ANSYS εισήχθησαν οι δυνάμεις αυτές διπλασιασμένες κατά μέτρο. Έτσι μπορεί εύκολα να συμπεράνει κανείς ότι υπάρχει αρκετό περιθώριο ασφαλείας πριν τη θραύση των εξαρτημάτων με τις δεδομένες φορτίσεις. **Δεν πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση των διαστάσεων, διότι ενδέχεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων να αναπτυχθούν επιπλέον φορτία από εξωγενείς παράγοντες που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν (π.χ. πτώση του δίποδου ρομπότ).** Επίσης πολλά εξαρτήματα έχουν οπές και διαμορφώσεις που ενισχύουν τη συγκέντρωση τάσεων, επομένως κάποια μείωση διαστάσεων θα οδηγήσει σε μη γραμμική αύξηση των τάσεων. Τέλος είναι αναγκαίο το δίποδο ρομπότ να ικανοποιεί όλες τις **προδιαγραφές που έχουν τεθεί εξαρχής σχετικά με τη μάζα και την κατανομή αυτής**, το συνολικό μήκος, τις σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης και την ακτίνα καμπυλότητας των πελμάτων και γι' αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται επιπλέον υλικό.

## 5.2 Λειτουργική αξιολόγηση

Η λειτουργική αξιολόγηση του σχεδιασμού πραγματοποιείται στο λογισμικό MSC Adams με την εκτέλεση προσομοιώσεων, όπως έχει αναφερθεί ξανά. Στη σύντομη παρουσίαση του σχεδιαστικού λογισμικού στο εδάφιο 4.1 αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο το τρισδιάστατο μοντέλο του SolidWorks εισάγεται για προσομοίωση στο Adams.



**Σχήμα 5-16: Το λεπτομερές μοντέλο του SolidWorks σε περιβάλλον Adams.**

Φυσικά για τη σωστή εκτέλεση προσομοιώσεων θα πρέπει να αποδοθούν στα εξαρτήματα αρχικές συνθήκες, δηλαδή αρχικές θέσεις και ταχύτητες. Όσον αφορά τις αρχικές θέσεις ο χρήστης θα πρέπει να τις έχει ορίσει από το SolidWorks και πριν εισάγει το μοντέλο στο Adams. Σχετικά με τις αρχικές ταχύτητες, από τη μοντελοποίηση στη Matlab, έχουν ορισθεί οι αρχικές γωνιακές ταχύτητες των σκελών γύρω από το ισχίο και οι αρχικές γραμμικές ταχύτητες παραμόρφωσης των εύκαμπτων σκελών. Επίσης το απλούστευμένο μηχανικό μοντέλο θεωρεί σημειακές μάζες στο ισχίο και στα πέλματα. Αντίθετα στο λογισμικό Adams θα πρέπει να εισαχθούν οι γραμμικές ταχύτητες όλων των εξαρτημάτων σε ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων και γι' αυτό θα πρέπει να γίνει μετατροπή των αρχικών συνθηκών της Matlab, ώστε να αντιστοιχίζονται σε αυτές του Adams. Συγκεκριμένα σύμφωνα με το Σχήμα 2-4 και επεκτείνοντάς το γεωμετρικά για το λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο ισχύει:

$$x_M = x_o + r\theta + (L_1 - r)\sin \theta \quad (5-1)$$

$$y_M = r + (L_1 - r)\cos \theta \quad (5-2)$$

$$x_{l_1} = x_M - (L_1 - l_1)\sin \theta \quad (5-3)$$

$$y_{l_1} = y_M - (L_1 - l_1)\cos \theta \quad (5-4)$$

$$x_{l_2} = x_M + (L_2 - l_2)\sin \psi \quad (5-5)$$

$$y_{l_2} = y_M - (L_2 - l_2)\cos \psi \quad (5-6)$$

όπου

$x_M, y_M$ : οι συντεταγμένες όλων των εξαρτημάτων του ισχίου

$x_o$ : η αρχική θέση αναφοράς

$x_{1i}, y_{1i}$ : οι συντεταγμένες του εξαρτήματος  $i$  του σκέλους 1 (στο πλήρες μοντέλο, των εξωτερικών ποδιών)

$x_{2i}, y_{2i}$ : οι συντεταγμένες του εξαρτήματος  $i$  του σκέλους 2 (στο πλήρες μοντέλο, των εξωτερικών ποδιών)

$L_1, L_2, \theta, \psi, r$ : σύμφωνα με το Σχήμα 2-4

$l_i$ : η απόσταση του κέντρου μάζας του εξαρτήματος  $i$  από το κατώτατο σημείο του πέλματος

Επομένως παραγωγίζοντας αυτές τις εξισώσεις ως προς το χρόνο προκύπτουν οι αντίστοιχες γραμμικές ταχύτητες όλων των μερών του ρομπότ στο Καρτεσιανό σύστημα:

$$\dot{x}_M = r\dot{\theta} + \dot{L}_1 \sin \theta + (L_1 - r)\dot{\theta} \cos \theta \quad (5-7)$$

$$\dot{y}_M = \dot{L}_1 \cos \theta - (L_1 - r)\dot{\theta} \sin \theta \quad (5-8)$$

$$\dot{x}_{1i} = \dot{x}_M - \dot{L}_1 \sin \theta - (L_1 - l_i)\dot{\theta} \cos \theta \quad (5-9)$$

$$\dot{y}_{1i} = \dot{y}_M - \dot{L}_1 \cos \theta + (L_1 - l_i)\dot{\theta} \sin \theta \quad (5-10)$$

$$\dot{x}_{2i} = \dot{x}_M + \dot{L}_2 \sin \psi + (L_2 - l_i)\dot{\psi} \cos \psi \quad (5-11)$$

$$\dot{y}_{2i} = \dot{y}_M - \dot{L}_2 \cos \psi + (L_2 - l_i)\dot{\psi} \sin \psi \quad (5-12)$$

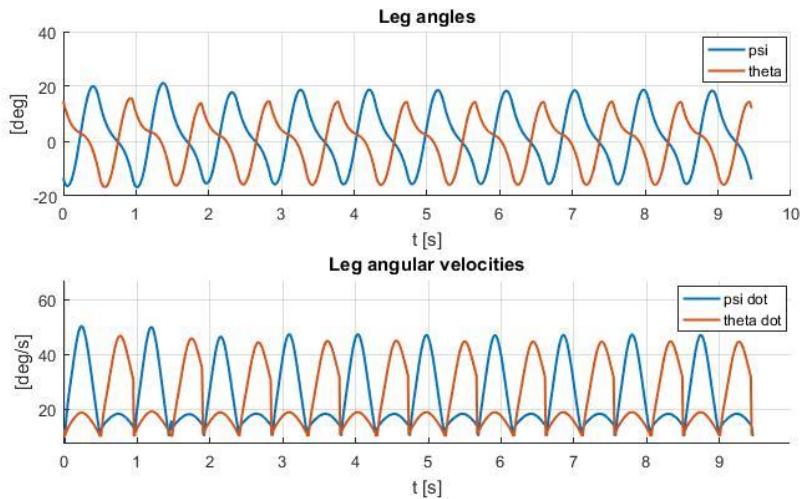
Θέτοντας στις παραπάνω εξισώσεις  $t=0$ , λαμβάνονται οι αρχικές συνθήκες των εξαρτημάτων στην επιθυμητή μορφή.

Έχοντας προσδιορίσει τις αρχικές συνθήκες, το λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο δοκιμάζεται κάτω από διάφορα σενάρια, ώστε να ελεγχθεί η ευρωστία του σε κάποιες μεταβολές ή διαταραχές. Αρχικά εκτελείται προσομοίωση με τις εκλεχθείσες αδιάστατες παραμέτρους  $(\rho, \mu, \lambda, \kappa, \beta)$  σύμφωνα με τις οποίες υλοποιείται ολόκληρος ο σχεδιασμός. Επειδή όμως οι πραγματικές σταθερές ελαστικότητας και απόσβεσης έχουν μετρηθεί πειραματικά, θα πρέπει να εκτελεσθούν επίσης προσομοιώσεις παθητικού βηματισμού αλλάζοντας λίγο τις σταθερές αυτές γύρω από μία περιοχή. Επιπλέον κατά την εκτέλεση πειραμάτων αναμένεται να εμφανίζονται φαινόμενα που δεν μπορούν να προβλεφθούν μέσω των προσομοιώσεων γι' αυτό εξετάζονται κάποιες ακόμα περιπτώσεις, όπως η απόδοση πλευρικής διαταραχής, δηλαδή δίνεται αρχική ταχύτητα στον άξονα σε κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο κίνησης, η προσομοίωση με διαφορετικά μήκη ποδιών και με μεταβολή των παραμέτρων επαφής των πελμάτων με το έδαφος.

### 5.2.1 Προσομοίωση με ονομαστικές παραμέτρους

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του τρισδιάστατου μοντέλου στο λογισμικό MSC Adams. Οπως είναι αναμενόμενο δεν υπάρχει η ίδια επαναληψιμότητα στο βηματισμό, όπως στα απλουστευμένα μηχανικά μοντέλα, λόγω πολυπλοκότητας του μηχανισμού, της ύπαρξης ροπών αδράνειας των εξαρτημάτων και άλλων παραγόντων, ωστόσο επιτυγχάνεται βηματισμός, κάτι που αποτελεί ένα πολύ θετικό σημείο για την επέκταση του μοντέλου σε φυσική κατασκευή.

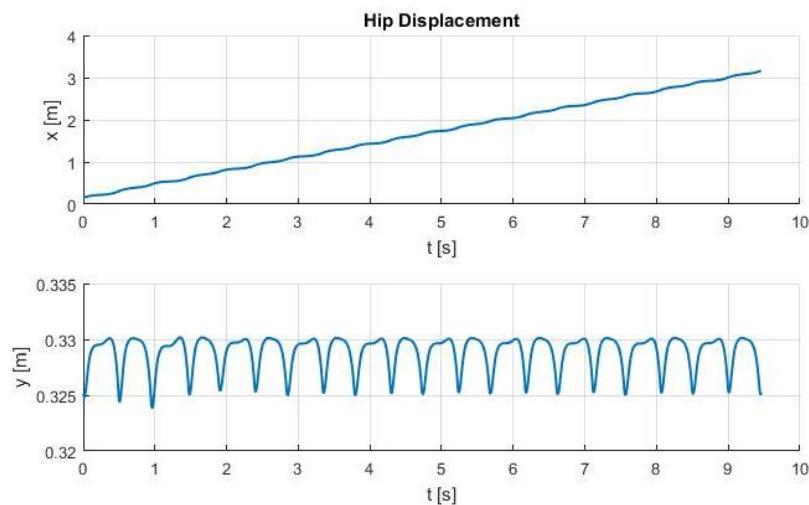
Αρχικά καταγράφονται οι γωνίες και οι γωνιακές ταχύτητες περιστροφής των σκελών γύρω από το ισχίο.



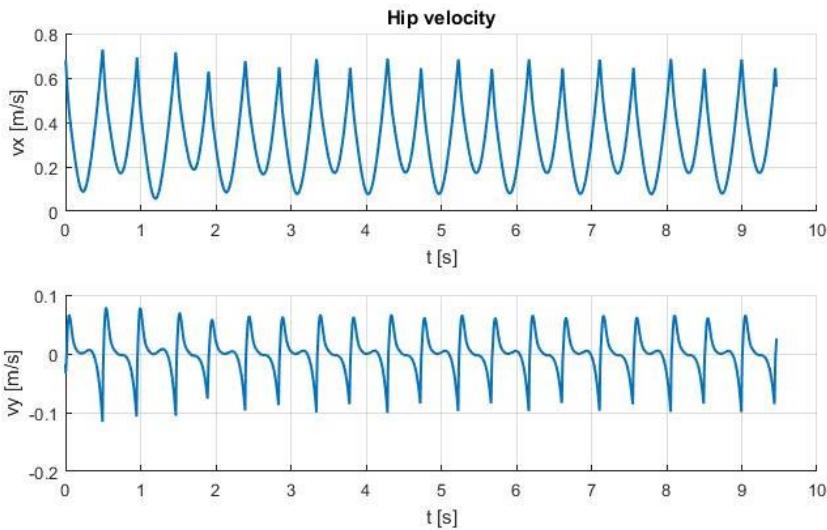
**Σχήμα 5-17: Γωνίες και γωνιακές ταχύτητες σκελών.**

Οι γωνίες ορίζονται για κάθε ζεύγος ποδιών ξεχωριστά, δηλαδή η γωνία  $\psi$  αφορά τα εσωτερικά, ενώ η γωνία  $\theta$  αφορά τα εξωτερικά σκέλη και το αντίστοιχο ισχύει και για τις γωνιακές ταχύτητες. Εύκολα παρατηρείται ότι τα μέγιστα των καταγραφόμενων μεγεθών επαναλαμβάνονται τόσο για τα εσωτερικά, όσο και για τα εξωτερικά πόδια, όμως διαφέρουν μεταξύ τους. Επίσης αξιοσημείωτη είναι μια αρχική μεταβατική κατάσταση, η οποία παρατηρείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

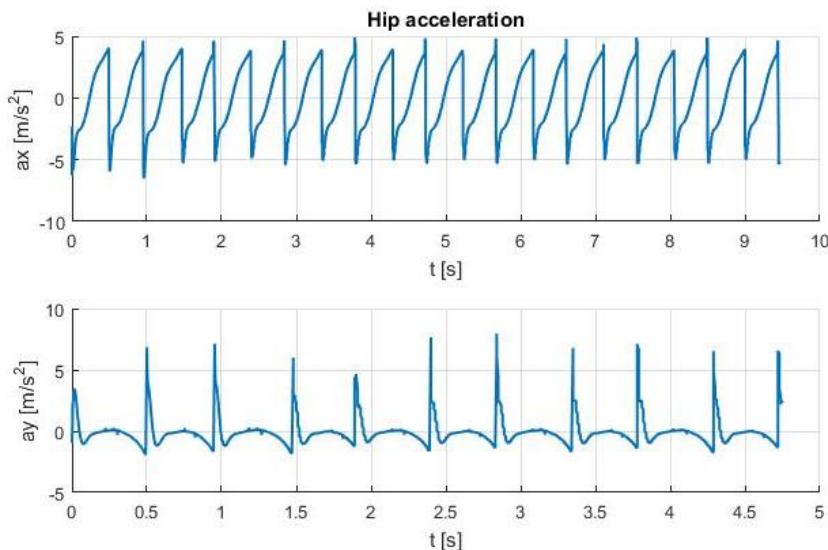
Προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητή η κίνηση του ισχίου κατά τη διάρκεια του βηματισμού, καθώς και να ληφθεί ένα μέτρο της καταπόνησης που αυτό δέχεται, καταγράφονται οι μετατοπίσεις, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις αυτού, στις δύο βασικές κατευθύνσεις, δηλαδή κατά  $x$  και κατά  $y$  (βλ. Σχ. 2-4). **Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται διαγραμματικά και εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο αυτά καθορίζουν σημαντικές παραμέτρους για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.**



**Σχήμα 5-18: Μετατόπιση ισχίου κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  του βηματισμού.**



**Σχήμα 5-19:** Ταχύτητα ισχίου κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  του βηματισμού.



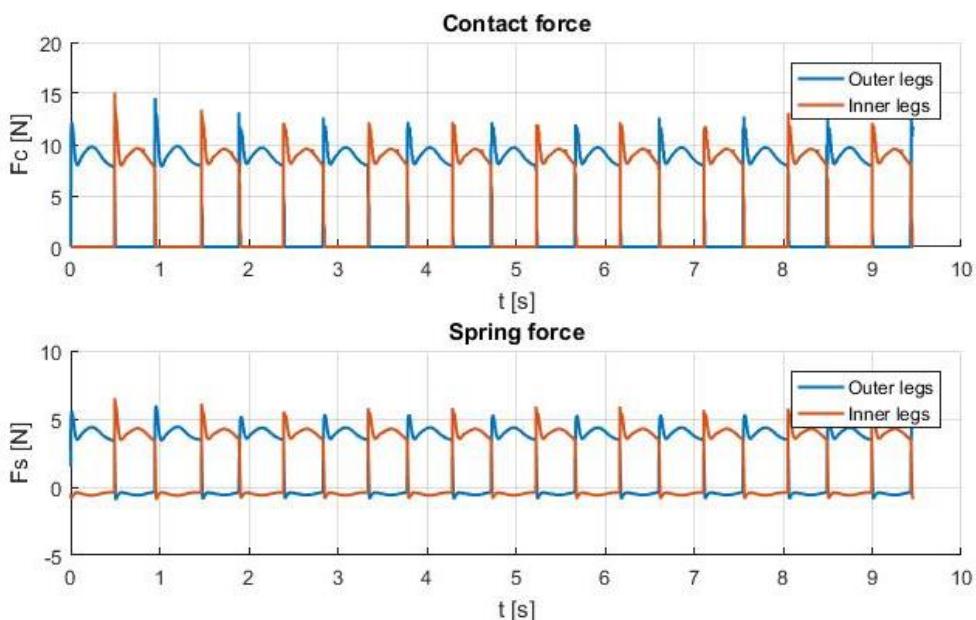
**Σχήμα 5-20:** Επιτάχυνση ισχίου κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  του βηματισμού.

Πιο συγκεκριμένα από τα διαγράμματα μετατόπισης φαίνεται ότι σε είκοσι βήματα το δίποδο ρομπότ διανύει περίπου 3m κατά τη διεύθυνση  $x$ . Πρόκειται για μια απόσταση που θεωρείται ικανοποιητική για την πειραματική διαδικασία και γι' αυτό ο διάδρομος που θα σχεδιαστεί για τα πειράματα θα έχει συνολικό μήκος 3m. Επίσης σχετικά με τα διαγράμματα ταχύτητας, χαρακτηριστική είναι η ταλάντωση γύρω από το μηδέν της ταχύτητας του ισχίου κατά την κατεύθυνση  $y$ . Τέλος η καταγραφή των επιταχύνσεων, σε αμφότερες διευθύνσεις, αποτελεί σημαντική πληροφορία για την επιλογή και την ρύθμιση των αισθητήρων IMU κατά τα πειράματα βηματισμού.

Προκειμένου να υπάρξει άμεση σύγκριση ανάμεσα στις προσομοιώσεις και το πείραμα, θα πρέπει να μετρηθούν τα ίδια μεγέθη στα ίδια σημεία, τόσο στο μοντέλο, όσο και στην πραγματική κατασκευή. Οπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4, κατά την πειραματική διαδικασία, θα χρησιμοποιηθούν αισθητήρες IMU, οι οποίοι τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται οι αισθητήρες πάνω στο δίποδο ρομπότ παίζει σημαντικό ρόλο για

την καταγραφή των επιταχύνσεων και των γωνιακών ταχυτήτων, διότι οι αισθητήρες αυτοί έχουν συγκεκριμένο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο θα παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 6, όπου αναφέρονται αναλυτικότερες πληροφορίες για τα αισθητήρια όργανα. Φυσικά στο λογισμικό Adams το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων IMU μπορεί να ορισθεί κατ' αντίστοιχία με την πραγματική διάταξη και να ληφθούν μετρήσεις σε αυτό, και έτσι δίνεται η δυνατότητα να καταγράφονται τα ίδια μεγέθη στα ίδια συστήματα συντεταγμένων τόσο κατά τις προσομοιώσεις, όσο και κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων.

Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις επαφής και ελατηρίου που παρατηρούνται κατά την προσομοίωση του δίποδου μηχανισμού χωρίς πρόσθετες μάζες είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στις προσομοιώσεις με πρόσθετες μάζες και οι οποίες λήφθηκαν υπόψη για την κατασκευαστική αξιολόγηση του ρομπότ, όπως εξηγείται και στο Κεφάλαιο 5-1 (βλ. Σχήμα 5-1).



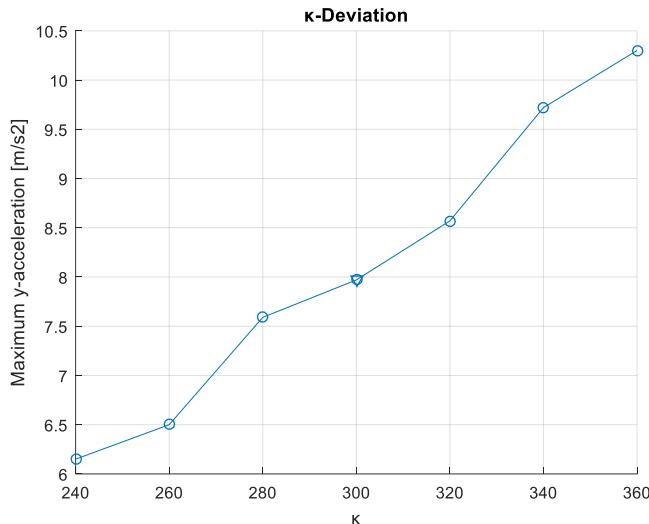
Σχήμα 5-21: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις επαφής και ελατηρίου κατά το βηματισμό.

Επίσης να αναφερθεί ότι στα παραπάνω καταγράφονται οι δυνάμεις του εσωτερικού πέλματος (με μπλε γραμμή) και το άθροισμα των δυνάμεων επαφής του εξωτερικού πέλματος (με κόκκινη γραμμή) και γι' αυτό σαν τάξη μεγέθους είναι περίπου διπλάσιες από τις αντίστοιχες του ελατηρίου, καθώς δύο ελατήρια παραλαμβάνουν τις δυνάμεις στο εσωτερικό πέλμα, ενώ ταυτόχρονα δύο ελατήρια αντιστοιχούν στα δύο εξωτερικά πέλματα.

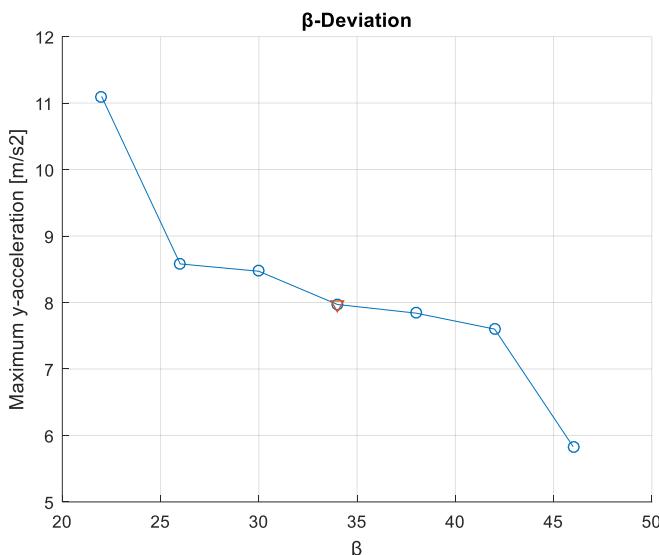
## 5.2.2 Προσομοίωση παθητικού βηματισμού με μεταβολή των ονομαστικών παραμέτρων

Σε αυτό το σημείο ελέγχεται η απόκριση του δίποδου μηχανισμού στις μεταβολές των παραμέτρων του. Οπως εξηγείται και παραπάνω, μεταβολή πραγματοποιείται στις παραμέτρους που δεν είναι ακριβώς καθορισμένες. Για παράδειγμα η ακτίνα καμπυλότητας των πελμάτων θα είναι καθορισμένη εκ κατασκευής, οπότε δεν έχει νόημα να ελεγχθεί σε αυτό το σημείο κάποια μεταβολή της. Έτσι κάθε φορά αλλάζει μία εκ των αδιάστατων παραμέτρων  $\kappa$  και  $\beta$ , κρατώντας όμως τις υπόλοιπες σταθερές. Μέσω

των προσομοιώσεων επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι **το δίποδο ρομπότ επιτυγχάνει ευσταθή βηματισμό**, ενώ για λόγους σύγκρισης καταγράφεται ένα χαρακτηριστικό μέγεθος, η μέγιστη σημειούμενη επιτάχυνση κατά την κατεύθυνση  $y$  και τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 5-22 και 5-23.



**Σχήμα 5-22: Μεταβολή της επιτάχυνσης του ισχίου στην κατεύθυνση  $y$  με μεταβολή του  $\kappa$ .**



**Σχήμα 5-23: Μεταβολή της επιτάχυνσης του ισχίου στην κατεύθυνση  $y$  με αλλαγή του  $\beta$ .**

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι με αύξηση της αδιάστατης παραμέτρου  $\kappa$  (Πίνακας 2-1), **άρα και της σταθεράς του ελατηρίου**, η μέγιστη επιτάχυνση αυξάνεται, κάτι που είναι αναμενόμενο διότι η επιτάχυνση αποτελεί ένα μέγεθος αναφοράς για τα ασκούμενα φορτία στο ισχίο. Έτσι όσο αυξάνεται η σκληρότητα του ελατηρίου είναι λογικό να ασκούνται μεγαλύτερα φορτία στο ισχίο και επομένως να σημειώνονται μεγαλύτερες επιταχύνσεις. Αντίθετα με αύξηση της αδιάστατης σταθεράς  $\beta$ , **άρα και της απόσβεσης του ελατηρίου**, η μέγιστη επιτάχυνση μειώνεται.

Σε κάθε περίπτωση η μέγιστη επιτάχυνση στη μία ακραία τιμή των αδιάστατων παραμέτρων είναι σχεδόν διπλάσια από την αντίστοιχη μέγιστη επιτάχυνση στην άλλη ακραία τιμή των αδιάστατων

παραμέτρων. Αυτό δεν αποτελεί ιδιαίτερη ανησυχία για τις δεχόμενες καταπονήσεις λόγω των συντελεστών ασφαλείας που έχουν ληφθεί, όπως εξηγείται και παραπάνω.

### 5.2.3 Διαταραχές στην κατασκευή

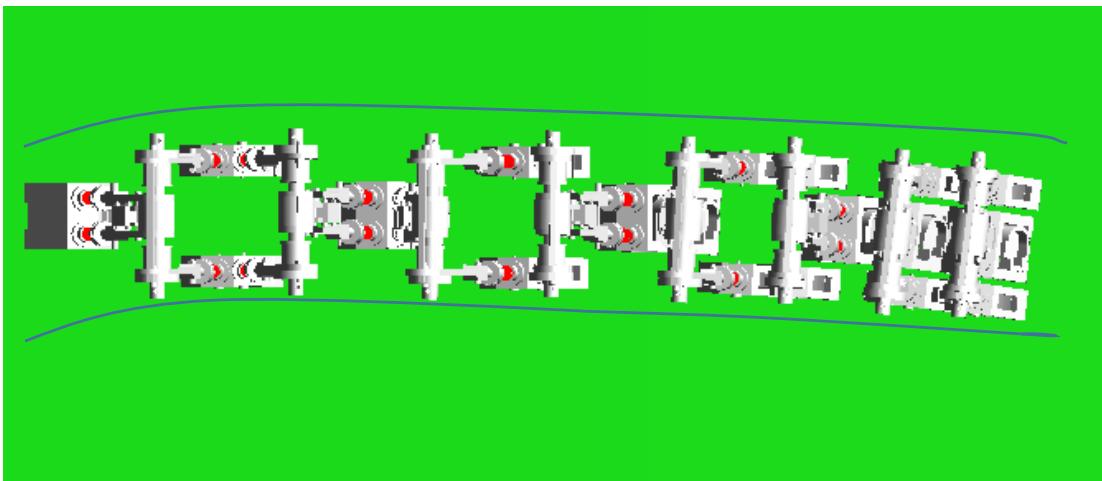
Ένας από τους βασικούς στόχους του σχεδιασμού είναι το δίποδο ρομπότ να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αυτονομία, δηλαδή **να μην χρειάζεται υποστηρικτικούς μηχανισμούς** για το παθητικό βάδισμα. Η βασική μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται αυτό είναι η **δημιουργία ζεύγους ποδιών (εσωτερικά και εξωτερικά)**, αντί για δύο μεμονωμένα. Αυτός ο σχεδιασμός θεωρητικά επιτρέπει την προσομοίωση διδιάστατων συνθηκών από το τρισδιάστατο δίποδο ρομπότ, λόγω συμμετρίας κατασκευής και φόρτισης στην τρίτη διάσταση. Ωστόσο **θα πρέπει να ελεγχθεί σε τι βαθμό ικανοποιείται αυτή η αυτονομία**, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν διαταραχές στη διεύθυνση της τρίτης διάστασης. Για το σκοπό αυτό αποδίδεται κατά την έναρξη της προσομοίωσης μια **αρχική πλευρική ταχύτητα 0.3m/s**, δηλαδή ταχύτητα σε κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της κίνησης και αξιολογείται η ανταπόκριση του παθητικού μηχανισμού.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι το δίποδο λόγω της διαταραχής σημειώνει μια αρχική απόκλιση από την αρχική του κατεύθυνση. Όμως επειδή το κέντρο βάρους διατηρείται πάντα ανάμεσα στα σκέλη, **το δίποδο δεν ανατρέπεται και δεν δημιουργείται πρόβλημα βηματισμού**, όπως φαίνεται **χαρακτηριστικά στην παρακάτω διαδοχή στιγμιότυπων** του Σχήματος 5–24.



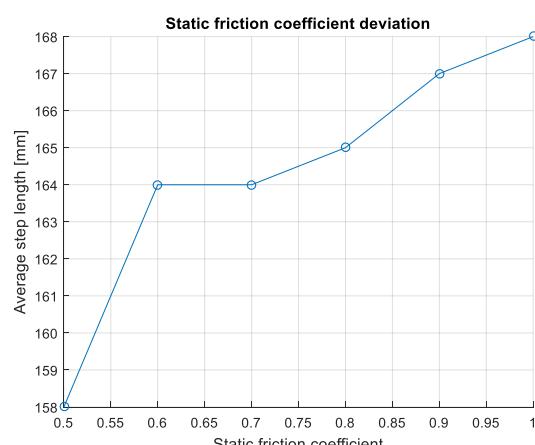
Σχήμα 5-24: Αρχική θέση δίποδου σε πρόωψη, απόκλιση από την αρχική πορεία και συνέχεια βηματισμού.

**Επίσης επειδή η κατασκευή πάντα υπόκειται σε γεωμετρικές και διαστασιολογικές ανοχές, εν αντιθέσει με το μοντέλο σχεδιασμένο σε λογισμικό όπου υπάρχει απόλυτη ακρίβεια, γίνεται έλεγχος της απόδοσης του δίποδου ρομπότ στην περίπτωση που τα σκέλη του δεν έχουν το ίδιο μήκος.** Έτσι δημιουργείται μια ελαφρά διαφορά μήκους **2mm μεταξύ των δύο εξωτερικών ποδιών**. Το δίποδο ρομπότ φαίνεται να μην επηρεάζεται σημαντικά, καθώς μπορεί να βαδίζει χωρίς όμως να διατηρεί την αρχική του πορεία. Συγκεκριμένα σημειώνεται μια χαρακτηριστική στραμμένη πορεία, όπως φαίνεται καλύτερα και στο Σχήμα 5–25.



**Σχήμα 5-25: Το δίποδο μοντέλο σε στραμμένη πορεία λόγω διαφορετικού μήκους σκελών σε κάτοψη**

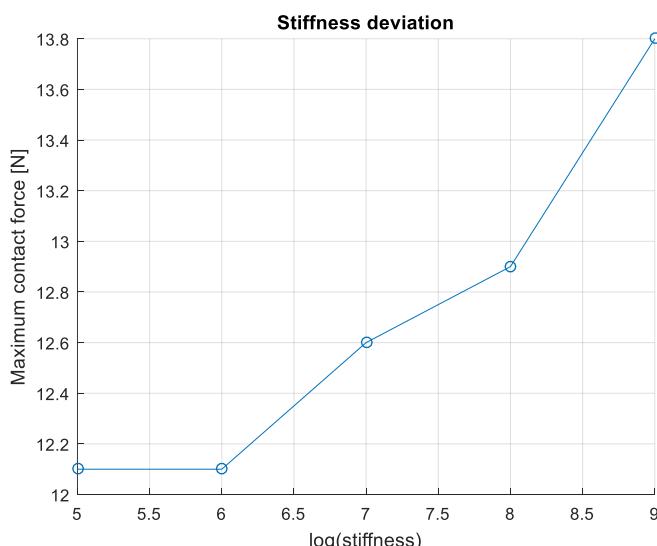
Τέλος δοκιμάζονται και διαφορετικές παράμετροι επαφής των πελμάτων με το έδαφος, καθώς η δίποδη διάταξη δυνητικά ελέγχεται σε εδάφη με διάφορες δυσκαμψίες και συντελεστές τριβής. Έτσι μελετάται η συμπεριφορά του μοντέλου, καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής τριβής. Από τις προσομοιώσεις συμπεραίνεται ότι το δίποδο δεν ολισθαίνει για ένα εύρος συντελεστών τριβής από 0.5 έως 1, το οποίο διάστημα είναι λίγο μικρότερο από αυτό που είχε βρεθεί με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου (βλ. Κεφάλαιο 3.4), κάτι που είναι αναμενόμενο εξαιτίας της αύξησης της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα στο απλουστευμένο μοντέλο είχαν θεωρηθεί δύο ξεχωριστά πόδια, ενώ στο λεπτομερές δύο ζεύγη ποδιών με αποτέλεσμα η ευστάθεια του βηματισμού να εξαρτάται και από το συγχρονισμό των ζευγών πελμάτων κατά την επαφή. Παρ' όλα αυτά το εύρος που προκύπτει αποτελεί θετικό σημείο, καθώς πολλά ζεύγη υλικών έχουν συντελεστές τριβής σε αυτό το εύρος τιμών. Γενικά είναι επιθυμητή και δυνατή η χρήση υλικών διεπαφής με σχετικά υψηλό συντελεστή τριβής κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ώστε τα κυκλικά πέλματα να μπορούν να κυλίονται χωρίς να ολισθαίνουν. Για λόγους ποσοτικής σύγκρισης παρουσιάζεται η επίδραση του συντελεστή τριβής στο μέσο μήκος βήματος κάθε προσομοίωσης στο Σχήμα 5-26.



**Σχήμα 5-26: Επίδραση συντελεστή τριβής στο μέσο μήκος βήματος.**

Όπως εύκολα παρατηρείται το μέσο μήκος βήματος αυξάνεται με αύξηση του συντελεστή τριβής. Αυτό εξηγείται, καθώς όταν μειώνεται ο συντελεστής τριβής, μειώνεται και η κάθετη δύναμη αντίδρασης. Έτσι προκειμένου το πέλμα να μην ολισθαίνει, θα πρέπει να αυξηθεί η δύναμη αντίδρασης που πρακτικά επιτυγχάνεται με τη μείωση του μήκους βήματος. Επομένως η δυναμική του ίδιου του δίποδου μηχανισμού οδηγεί σε μικρότερο μήκος βήματος, ώστε να υπάρχει καλύτερη επαφή των ποδιών με το έδαφος.

Επίσης αναφορικά με τη δυσκαμψία του εδάφους, ελέγχεται ο βηματισμός της δίποδης μηχανής σε ένα εύρος από  $10^5$  N/m έως  $10^9$  N/m. Με αυτόν τον τρόπο συμπεριλαμβάνεται μια μεγάλη ποικιλία εδαφών με τις αντίστοιχες σκληρότητες, ώστε να μην δημιουργείται ζήτημα σχετικά με το χρησιμοποιούμενο υλικό από το οποίο θα αποτελείται το έδαφος της πειραματικής διάταξης. Για λόγους πιστοποίησης σύγκρισης παρατίθεται στο Σχήμα 5-27 η μεταβολή της μέγιστης αναπτυσσόμενης δύναμης επαφής για τις διάφορες δυσκαμψίες που μοντελοποιήθηκαν.



**Σχήμα 5-27: Μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη για διάφορους συντελεστές δυσκαμψίας.**

Όπως παρατηρείται, αύξηση της σκληρότητας του εδάφους οδηγεί σε μεγαλύτερες δυνάμεις επαφής. Παρ' όλα αυτά η αύξηση της δύναμης δεν είναι πολύ μεγάλη, κάτι που δεν είναι ανησυχητικό σχετικά με την αντοχή των πελμάτων λόγω κρούσης.

Έχοντας ελέγχει το δίποδο μοντέλο τόσο από κατασκευαστικής σκοπιάς, δηλαδή αντοχής των εξαρτημάτων κ.λπ., όσο και από λειτουργικής σκοπιάς, μέσω των προσομοιώσεων στο Adams, είναι δυνατόν να κατασκευασθεί το δίποδο ρομπότ, σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού που έχουν ορισθεί, δεδομένου ότι όλα τα απαιτούμενα εξαρτήματα προκύπτουν είτε από τρισδιάστατη εκτύπωση, είτε από κατάλληλη κατεργασία με τα διαθέσιμα μέσα και μηχανές του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## 6 Κατασκευή ρομπότ και πειραματική διάταξη

### 6.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην κατασκευή του δίποδου ρομπότ, στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί αυτό, αλλά και στη συνολική πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε προκειμένου να εκτελεσθούν τα πειράματα παθητικού βηματισμού. Στην Ενότητα 6.2 γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των μηχανών του εργαστηρίου και της όλης διαδικασίας που ακολουθήθηκε ώστε οι διατιθέμενες πρώτες ύλες να πάρουν τη μορφή των τελικών εξαρτημάτων. Στην Ενότητα 6.3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, δηλαδή ο διάδρομος που κατασκευάσθηκε, ώστε να εκτελεσθούν τα πειράματα και παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών προς αξιολόγηση.

### 6.2 Παρουσίαση κατασκευής

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, το δίποδο ρομπότ κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου με τα διαθέσιμα μέσα του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα τα πλαστικά εξαρτήματα εκτυπώνονται στο 3D-printer, ενώ τα μεταλλικά εξαρτήματα και τα εξαρτήματα ακετάλης κατεργάζονται με μεθόδους αποβολής υλικού, όπως τόρνευση και φρεζάρισμα, στις μηχανές τόρνου και CNC αντίστοιχα.

#### 6.2.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση

Σε αυτό το εδάφιο παρουσιάζεται η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αρκετών μερών των σκελών του δίποδου μηχανισμού. Πρόκειται για μία μέθοδο προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, ενώ στη συγκεκριμένη εργασία τα αντίστοιχα εξαρτήματα της τελικής κατασκευής είναι από πλαστικό ABS (Στυρόλιο Βουταδιενίου Ακρυλονιτριλίου – Acrylonitrile Butadiene Styrene) και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το ABSplus-P43, το οποίο είναι κατάλληλο για τη διαμόρφωση τρισδιάστατων μοντέλων και πρωτοτύπων σε περιβάλλον γραφείου.

Πριν όμως ολοκληρωθεί η κατασκευή, είχε δημιουργηθεί ένα “δοκιμαστικό” σκέλος από PLA (πολυγαλακτικό οξύ – polylactic acid) επίσης μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Με την έννοια “δοκιμαστικό”, εννοείται ότι αυτό το σκέλος δημιουργήθηκε ώστε να αξιολογηθούν ορισμένες παράμετροι του ελατηρίου, όπως η συνολική ελαστικότητα και απόσβεση του εύκαμπτου συναρμολογήματος. Σε καμία περίπτωση όμως δεν προτείνεται για δομικό υλικό, εξαιτίας κυρίως της ψαθυρότητάς του και της χαμηλής αντοχής του υλικού αυτού. Έτσι προέκυψε το πρώτο ολοκληρωμένο υποσυναρμολόγημα, αυτό του ενός εξωτερικού ποδιού. Η διαδικασία αυτή επιχειρήθηκε για πρώτη φορά και αποτέλεσε έναν ουσιαστικό οδηγό αντίληψης σφαλμάτων που θα έπρεπε να αποφευχθούν κατά την τελική κατασκευή. Το “δοκιμαστικό” σκέλος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-1.



**Σχήμα 6-1: Το δοκιμαστικό εύκαμπτο σκέλος.**

Η ελαστικότητα και η απόσβεση του εύκαμπτου σκέλους προέρχεται κυρίως λόγω της ύπαρξης του ελατηρίου, το οποίο έχει ελεγχθεί προηγουμένως μεμονωμένα (δηλαδή ως στοιχείο και όχι συνολικά ενσωματωμένο στο πόδι). Η ελαστικότητα που προέρχεται από το υλικό εκτύπωσης (PLA) δεν είναι συγκρίσιμη με αυτή του ελατηρίου, και επομένως θεωρείται αμελητέα, επιτρέποντας την γενίκευση των αποτελεσμάτων του πειράματος ελαστικότητας και στα διαφορετικού υλικού μελλοντικά πόδια (από ABS). Έτσι εκτελούνται τα ίδια πειράματα με την τοποθέτηση μάζας πάνω στο πέλμα και την καταμέτρηση του πλάτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-2.



**Σχήμα 6-2: Τοποθέτηση σκέλους στη μέγγενη και εναπόθεση πρότυπης μάζας.**

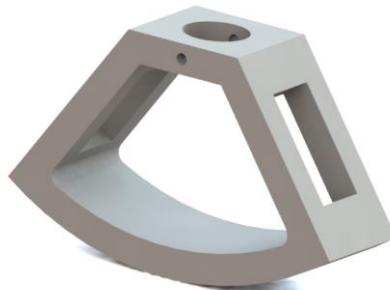
Αντίστοιχα τοποθετείται πρότυπη μάζα και αφήνεται να ταλαντωθεί: μετρώντας τα διαδοχικά πλάτη προσδιορίζεται η σταθερά απόσβεσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πολύ κοντά με αυτά που είχαν εξαχθεί στη δοκιμή του ελατηρίου μεμονωμένο και είναι:

$$k = \frac{mg}{\Delta x} = \frac{1kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}}{7mm} = 1.4 \frac{N}{mm} \quad (6-1)$$

$$B = \frac{2\sqrt{km}}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right)} \right)^2}} \in [17, 24] \frac{Ns}{m} \quad (6-2)$$

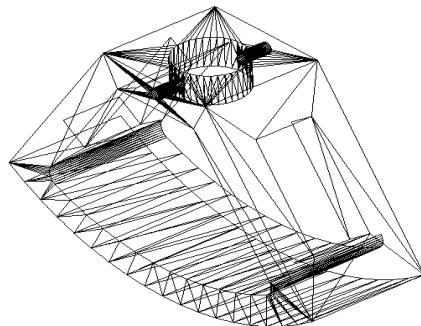
Εφόσον λοιπόν προκύπτουν οι αναμενόμενες τιμές ελαστικότητας και απόσβεσης, συνεχίζεται η κατασκευή της ολικής διάταξης με την τρισδιάστατη εκτύπωση των απαραίτητων εξαρτημάτων από ABS. Τα βασικά βήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης που ακολουθήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Δημιουργία ενός 3D σχεδίου με το αντικείμενο που θέλει κανείς να εκτυπώσει, χρησιμοποιώντας ψηφιακό λογισμικό σχεδίασης, εδώ το SolidWorks.



**Σχήμα 6-3: 3D σχέδιο που προκύπτει από το λογισμικό.**

- Αποθήκευση του σχεδίου σε αρχείο stl.



**Σχήμα 6-4: Το αρχείο stl του τρισδιάστατου μοντέλου χωρισμένο σε τρίγωνα, ώστε να διακριτοποιηθεί και να εισαχθεί για εκτύπωση.**

- Προετοιμασία του εκτυπωτή. Στο εργαστήριο χρησιμοποιείται ο εκτυπωτής **uPrint SE plus**. Για τη σωστή εκτύπωση του αντικειμένου χρησιμοποιείται τόσο **υλικό ABS**, όσο και **υποστηρικτικό υλικό** που βοηθάει στη δημιουργία πιο περίπλοκων διαμορφώσεων. Χρησιμοποιείται η μέθοδος **FDM (Fused Deposition Modeling)**, στην οποία τήκεται υλικό που έχει αρχική μορφή νήματος και εξωθείται μέσω ακροφυσίου. Τελικά αυτό εναποτίθεται σε μια βάση που έχει τοποθετήσει ο χρήστης στο χώρο εργασίας του ακροφυσίου για την παραγωγή του τεμαχίου.



**Σχήμα 6-5: Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής του εργαστηρίου.**

- **Φόρτωση του αρχείου stl** στο πρόγραμμα επικοινωνίας με τον εκτυπωτή. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται είναι το **CatalystEx**. Σε αυτό δίνονται **διάφορες δυνατότητες** του **τρόπου εκτύπωσης** του επιθυμητού αντικειμένου, όπως η ανάλυση της κάθε στρώσης, η πικνότητα του πλέγματος, ο τρόπος τοποθέτησης του υποστηρικτικού υλικού και ο προσανατολισμός του εξαρτήματος. Ο χρήστης κάνει τις αντίστοιχες επιλογές κατά την κρίση του.
- **Διαδικασία εκτύπωσης.** Αφού έχει εισαχθεί το μοντέλο και έχουν ορισθεί όλες οι απαραίτητες συνθήκες ξεκινάει η **διαδικασία της εκτύπωσης**, η οποία διαρκεί χρόνο ανάλογα με το μέγεθος, το σχήμα και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου.
- **Αφαίρεση υποστηρικτικού υλικού.** Είναι το τελευταίο στάδιο για την παραλαβή του τελικού τεμαχίου. Μετά το πέρας της εκτύπωσης λαμβάνεται το εξάρτημα, το οποίο όμως περιέχει και **υποστηρικτικό υλικό**. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να αφαιρεθεί. Αυτό γίνεται κυρίως με **χημική διεργασία**, σύμφωνα με την οποία το εξάρτημα τοποθετείται σε κατάλληλο



πλυντήριο (SCA – Support Cleaning Apparatus) το οποίο περιλαμβάνει κατάλληλο χημικό υγρό.



**Σχήμα 6-6: Συσκευή απομάκρυνσης υποστηρικτικού υλικού.**

Αφήνοντάς το εξάρτημα για το απαραίτητο χρονικό διάστημα, αποβάλλεται το υποστηρικτικό υλικό και στη συνέχεια ξεπλένεται το τεμάχιο και είναι έτοιμο προς χρήση.

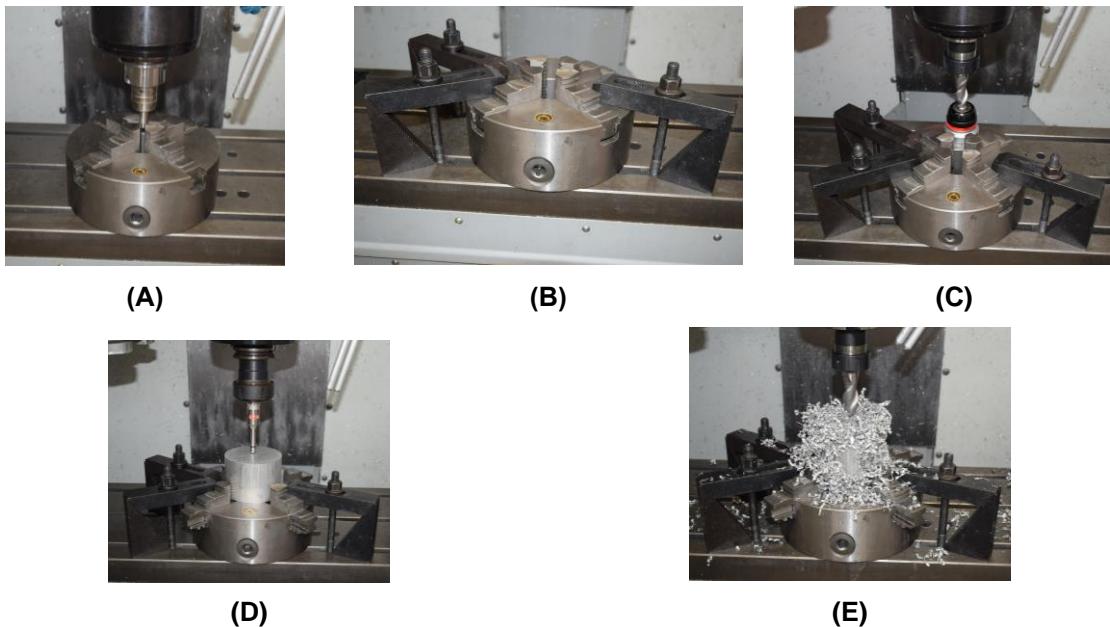
### 6.2.2 Κατεργασίες αποβολής υλικού

Όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα, εκτός αυτών που εκτυπώθηκαν, προκύπτουν με κατεργασίες κοπής. Αυτό είναι δυνατόν με τις διαθέσιμες εργαλειομηχανές του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα οι κατεργασίες κοπής που εκτελέσθηκαν είναι τόρνευση, φρεζάρισμα, διάτρηση και σπειροτόμηση, ενώ υλοποιούνται σε **τόρνο** και **CNC**.

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του πώς χρησιμοποιείται η μηχανή CNC για την κοπή κυλινδρικών τεμαχίων, ενώ δεν αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με τη χρήση του τόρνου, καθώς δεν κρίνεται βοηθητικό προς τον αναγνώστη.

Το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου διαθέτει μια μηχανή HAAS Mini Mill, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για **κοπή σε τρεις άξονες x-y-z**, όμως έχει και τη δυνατότητα **χρήσης τέταρτου άξονα**, του περιστροφικού. Η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να προσδεθεί το τεμάχιο στη μηχανή και να ετοιμασθεί για κατεργασία είναι η εξής:

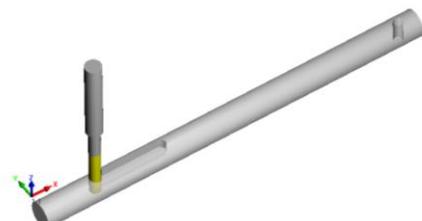
- a. **Τοποθέτηση του τσωκ πάνω στο τραπέζι του CNC, εύρεση της αρχής συντεταγμένων και σταθεροποίηση με χρήση σφιγκτήρων.**
- b. **Τοποθέτηση των κοπτικών εργαλείων στον εργαλειοφορέα (carousel).**
- c. **Μηδενισμός κοπτικών εργαλείων με τη χρήση κατάλληλου μετρητικού εργαλείου (probe).**
- d. **Πρόσδεση τεμαχίου στο τσωκ και μηδενισμός αυτού με τη χρήση κατάλληλου μετρητικού εργαλείου (probe).**
- e. **Εισαγωγή κώδικα G και εκκίνηση κατεργασίας.**



**Σχήμα 6-7:** (A) Τοποθέτηση του τσωκ στο τραπέζι του CNC και εύρεση της αρχής συντεταγμένων (B) Σταθεροποίηση του τσωκ με χρήση σφιγκτήρων (C) Μηδενισμός κοπτικών εργαλείων (D) Πρόσδεση τεμαχίου στο τσωκ και μηδενισμός (Ε) Κοπή τεμαχίου.

Για την παραγωγή του κώδικα G χρησιμοποιείται το πακέτο SolidCAM του λογισμικού SolidWorks που προσομοιώνει κατεργασίες κοπής. Αυτό δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων τύπων κατεργασιών, όπως face, profile, pocket milling, drilling, thread milling, contour 3D milling. Έτσι ο χρήστης αφού επιλέξει τον τύπο της κατεργασίας που επιθυμεί, μπορεί να ρυθμίσει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα εκτελεσθεί. Συγκεκριμένα ορίζει τη γεωμετρία που θέλει να κατεργασθεί και στη συνέχεια εισάγει το χρησιμοποιούμενο κοπτικό εργαλείο. Για να γίνει αυτό, το κοπτικό εργαλείο διαστασιογείται όσον αφορά το μήκος της κοπτικής του ακμής, το συνολικό μήκος του, τη διάμετρο κοπής, τον αριθμό πτερυγίων κ.λπ. Επίσης θα πρέπει να ορισθούν μεγέθη όπως η ταχύτητα πρόσωσης και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου. Τέλος ορίζονται κάποιες ακόμα συνθήκες, όπως το συνολικό βάθος κοπής, ο τρόπος προσέγγισης του τεμαχίου από το εργαλείο (π.χ. ελικοειδώς, zig-zag κ.λπ.), ενώ μπορεί προστεθεί και κάποιο τελικό φινίρισμα για την παραγωγή καλύτερης ποιότητας επιφάνειας.

Εφόσον έχει ορισθεί πλήρως η κατεργασία, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την ομαλότητα αυτής, καθώς το λογισμικό προειδοποιεί σε περίπτωση που γίνει κάποια ανεπιθύμητη σύγκρουση μεταξύ τεμαχίου και εργαλείου ή ακόμα δείχνει και το συνολικό χρόνο κατεργασίας.



**Σχήμα 6-8:** Προσομοίωση κατεργασίας με οπτικοποίηση του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου.

Επομένως ο χρήστης μπορεί πλέον να εξάγει κατευθείαν τον κώδικα G, τον οποίο εισάγει σε ένα πρόγραμμα (CIMCO Edit v7) διαμόρφωσης του αρχείου του κώδικα, ώστε να μπορεί να το υποδεχθεί ο επεξεργαστής της εργαλειομηχανής CNC. Στο παράρτημα παρατίθεται ένας ενδεικτικός κώδικας G που παράχθηκε από το λογισμικό SolidCAM και χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του κάτω ποδιού του ρομπότ.

### 6.2.3 Τελικό συναρμολόγημα

Το τελικό συναρμολόγημα, το οποίο κατασκευάσθηκε σύμφωνα με το λεπτομερή σχεδιασμό που είχε προηγηθεί, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-9.



Σχήμα 6-9: Η φυσική κατασκευή του δίποδου ρομπότ.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6-9, τα πέλματα του δίποδου μηχανισμού έχουν επενδυθεί με φυσικό καουτσούκ. Αυτό γίνεται κυρίως για να επιτευχθεί ο επιθυμητός συντελεστής τριβής. Γενικά ο παθητικός βηματισμός του δίποδου ρομπότ επιτυγχάνεται μέσω της κύλισης χωρίς ολίσθηση και δεδομένου ότι το έδαφος θα είναι κατασκευασμένο από ξύλο, ο συνδυασμός καουτσούκ με ξύλο δίνει ένα συντελεστή τριβής 0.7-0.9 που θεωρείται ικανοποιητικά υψηλός για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Τέλος πραγματοποιείται μια βελτίωση κυρίως ως προς τη στιβαρότητα του μηχανισμού. Αυτή έγκειται στο γεγονός ότι έχουν χρησιμοποιηθεί κάποια υποστηρικτικά ελάσματα στα εξωτερικά σκέλη.



**Σχήμα 6-10: Το δίποδο ρομπότ με τα υποστηρικτικά ελάσματα στα εξωτερικά σκέλη.**

Αυτό γίνεται διότι το άνω μέρος των σκελών είναι από πλαστικό ABS και είναι σχετικά μεγάλου μήκους, επομένως έχει την τάση να συμπεριφέρεται ως καμπτόμενος πρόβολος. Με την προσθήκη των μεταλλικών ελασμάτων το πρόβλημα αυτό υπερνικάται.

Τέλος παρουσιάζεται και το δίποδο ρομπότ με τις πρόσθετες μάζες, οι οποίες έχουν ως στόχο να μεταβάλλουν τη συνολική μάζα του μηχανισμού ανάλογα με την περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί και στο λεπτομερή σχεδιασμό.



**Σχήμα 6-11: Το δίποδο ρομπότ με τις πρόσθετες μάζες.**

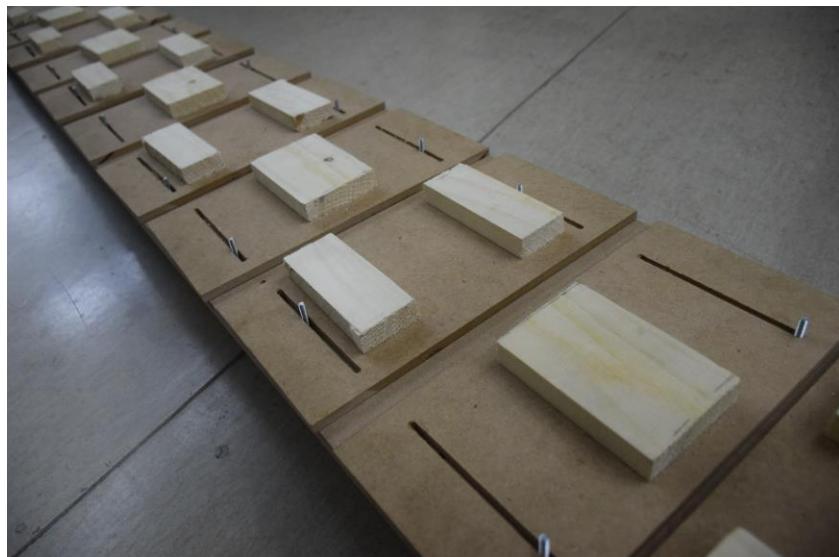
Έτσι αντί των πρόσθετων μαζών ο υπάρχων σχεδιασμός δίνει τη δυνατότητα για προσαρμογή κινητήρων στα σημεία αυτά που θα επενεργούν τη διάταξη.

### 6.3 Πειραματική διάταξη

Η συνολική πειραματική διάταξη αποτελείται από το δίποδο ρομπότ, το έδαφος πάνω στο οποίο θα δοκιμασθεί και έναν εκτοξευτή που προσδίδει αρχικές συνθήκες για την επίτευξη παθητικού βηματισμού. Επίσης να αναφερθεί ότι για την εκτέλεση πειραμάτων και τη συλλογή δεδομένων χρησιμοποιούνται αισθητήρες IMU.

#### 6.3.1 Έδαφος

Το έδαφος ουσιαστικά αποτελείται από τρία μέρη, ενώ βασικός στόχος είναι να διαμορφωθεί έτσι ώστε να είναι εύκολο στο χειρισμό: επειδή τα πόδια του μηχανισμού έχουν ίσο μήκος, δεν θα μπορεί να επιτευχθεί βηματισμός χωρίς να υπάρχουν οι κατάλληλες εσοχές και προεξοχές στο έδαφος. Έτσι υιοθετείται η ιδέα της δημιουργίας νησίδων (stepping stones), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-12.



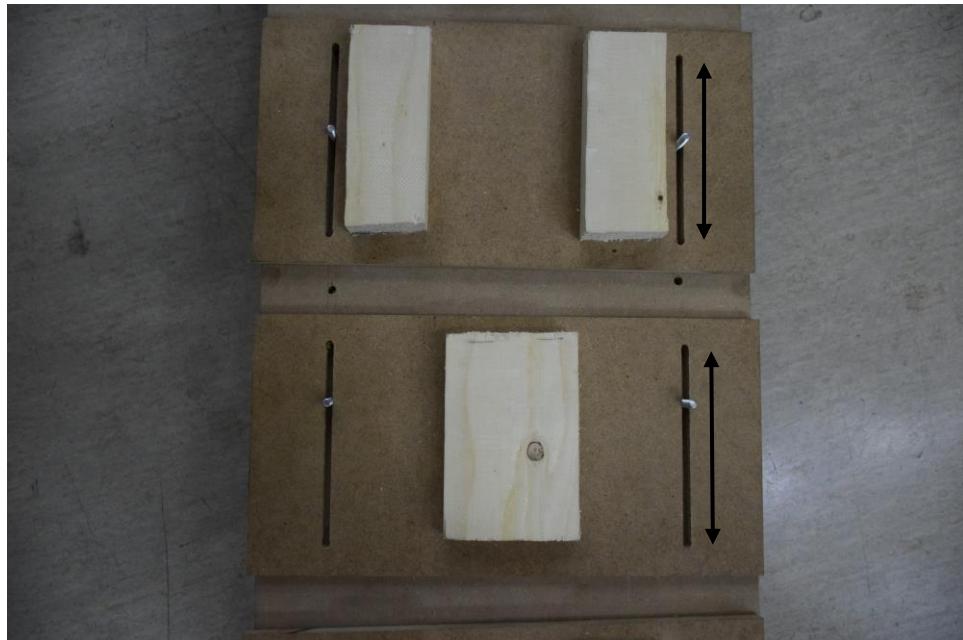
Σχήμα 6-12: Το έδαφος με τις νησίδες (stepping stones).

Επομένως τα τρία μέρη από τα οποία αποτελείται το έδαφος είναι ένας ενιαίος ξύλινος διάδρομος από MDF (Medium Density Fibreboard), οι νησίδες από ξύλινο καδρόνι και οι ρυθμιστές θέσης που επίσης είναι από MDF. Ο λόγος που χρησιμοποιείται ως βασικό υλικό το MDF είναι το γεγονός ότι είναι εύκολο να κατεργασθεί, είναι φθηνό και παρουσιάζει ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες, όπως δυσκαμψία και υψηλή ανθεκτικότητα. Επειδή όμως το έδαφος θα πρέπει να είναι μεγάλου μήκους, στην προκειμένη περίπτωση 3m, ήταν απαραίτητη η χρήση ενός υλικού που δεν κάμπτεται εύκολα. Ακόμα και με το MDF αυτό δεν επιτυγχάνεται απολύτως, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται επιπλέον αλουμινένιες κοιλοδοκοί τετραγωνικής διατομής, οι οποίες αυξάνουν επιπλέον τη δυσκαμψία.



**Σχήμα 6-13: Χρήση υποστηρικτικής κοιλοδοκού για αύξηση της δυσκαμψίας.**

Επιπλέον, μεταξύ των νησίδων και του ενιαίου διαδρόμου παρεμβάλλονται ρυθμιστές θέσης που επίσης είναι από MDF. Αυτό γίνεται ώστε να υπάρχει μια ευελιξία ως προς τη θέση των νησίδων. Η θέση των νησίδων καθορίζει άμεσα και το μήκος βήματος του βαδίσματος. Φυσικά υπάρχει μια εκτίμηση του μήκους βήματος από τις προσομοιώσεις στη Matlab και το Adams, ωστόσο λόγω των διαφόρων απρόβλεπτων παραγόντων κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, μπορεί το μήκος βήματος να μεταβάλλεται λίγο. Έτσι χρησιμοποιώντας τους ρυθμιστές θέσης που διαθέτουν κατάλληλες ράγες, ρυθμίζεται η ακριβής θέση των νησίδων. Στη συνέχεια σταθεροποιούνται με τη χρήση κοχλία-περικοχλίου. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η διάταξη του εδάφους επεξηγείται καλύτερα και στο Σχήμα 6-14.

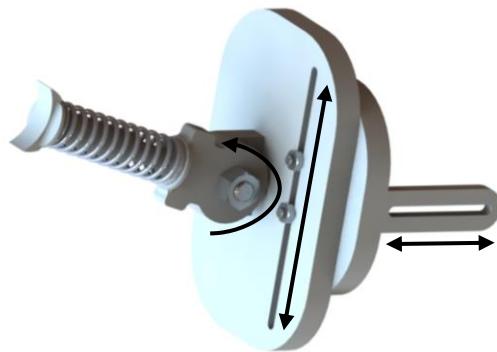


**Σχήμα 6-14: Χρήση ρυθμιστών θέσης για προσαρμογή του μήκους βήματος.**

Τέλος με τη χρήση κατάλληλων ξύλινων υποστηριγμάτων που τοποθετούνται στο κάτω μέρος του ενιαίου διαδρόμου μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή κλίση του εδάφους.

### 6.3.2 Εκτοξευτής

Η απόδοση των σωστών αρχικών συνθηκών στο δίποδο μηχανισμό είναι αναγκαία για την επίτευξη σταθερού και επαναλαμβανόμενου βηματισμού. Στην παρούσα εργασία επιδιώκεται να επιτευχθεί αυτό με απλά μέσα και με πολλές δοκιμές. Αρχικά το δίποδο σπρώχνεται από ανθρώπινο χέρι και με οπτική ανάδραση ο χρήστης προσπαθεί να ασκήσει μεγαλύτερη ή μικρότερη δύναμη κάθε φορά. Επειδή όμως αυτό είναι αρκετά αυθαίρετο και ελάχιστα επαναλήψιμο, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ένας απλός “εκτοξευτής”. Πρόκειται για μία πολύ απλή κατασκευή τριών βαθμών ελευθερίας, η οποία προσαρμόζεται μεταξύ εδάφους και ρομπότ και μέσω ενός ελατηρίου αποθηκεύεται ελαστική ενέργεια συμπίεσης, η οποία αποδίδεται στο δίποδο κατά την απελευθέρωση του ελατηρίου. Το πλεονέκτημα που παρέχει είναι το ότι πλέον ο χρήστης ρυθμίζει τη διεύθυνση και τη συμπίεση του ελατηρίου μόνο για να πετύχει τις επιθυμητές αρχικές συνθήκες και έτσι αποκτά καλύτερο έλεγχο. Ο “εκτοξευτής” παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-15 σε φωτορεαλιστική απεικόνιση.



Σχήμα 6-15: Ο εκτοξευτής σε φωτορεαλιστική απεικόνιση και οι επιτυγχανόμενοι βαθμοί ελευθερίας.

Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν τους τρεις βαθμούς ελευθερίας. Αυτοί είναι απαραίτητοι, ώστε να μπορεί ο εκτοξευτής να ρυθμίζεται ακριβώς στο σημείο που πρέπει ώστε να αποδίδει ομαλά τις αρχικές συνθήκες στο δίποδο ρομπότ.

### 6.3.3 Αισθητήρες IMU (Inertial Measurement Unit)

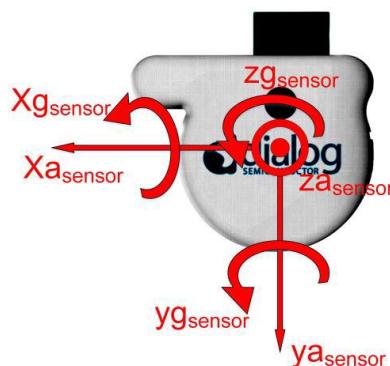
Για τη συλλογή δεδομένων από την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιούνται αισθητήρες IMU. Αυτοί διαθέτουν επιταχυνσόμετρο και γυροσκόπιο για τη μέτρηση των γραμμικών επιταχύνσεων στις τρεις κατευθύνσεις, αλλά και των γωνιακών ταχυτήτων στις τρεις κατευθύνσεις. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται είναι ο DA14583 IoT Sensor.



Σχήμα 6-16: Αισθητήρας IMU DA14583 IoT της Dialog Semiconductor.

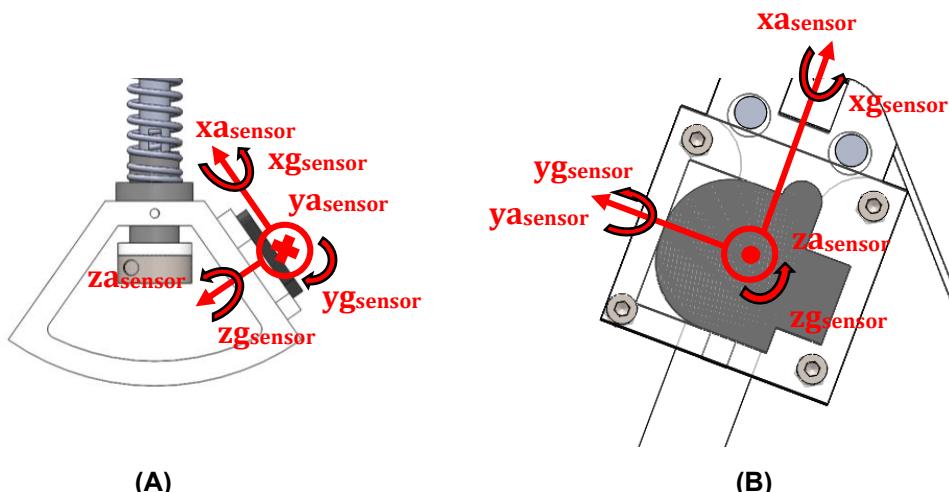
Για τη χρήση των συγκεκριμένων αισθητήρων έχει αναπτυχθεί από προηγούμενη εργασία συγκεκριμένη εφαρμογή (EVOTHINGS) [26]. Επίσης η καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων γίνεται σε μια βάση δεδομένων, οπως περιγράφεται αναλυτικά στο [26]. Για τη διαδικασία αυτή χρειάζεται ένα κινητό, το οποίο έχει εγκατεστημένη την εφαρμογή και επικοινωνεί με τους αισθητήρες μέσω Bluetooth. Το κινητό πρέπει να είναι συνδεδεμένο στο ίδιο δίκτυο με έναν υπολογιστή στον οποίο τρέχει η βάση δεδομένων και δέχεται τα αποτελέσματα. Τέλος η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω αντίστοιχου κώδικα στη Matlab, ο οποίος επίσης αναπτύχθηκε στην ίδια εργασία [26].

Για τη σωστή καταγραφή των μετρήσεων του πειράματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων, όσο και ο προσανατολισμός αυτών στο δίποδο ρομπότ. Το σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 6-17 [26].



**Σχήμα 6-17:** Σύστημα συντεταγμένων αισθητήρα. Με “a” συμβολίζεται η επιτάχυνση, ενώ με “g” η γωνιακή ταχύτητα.

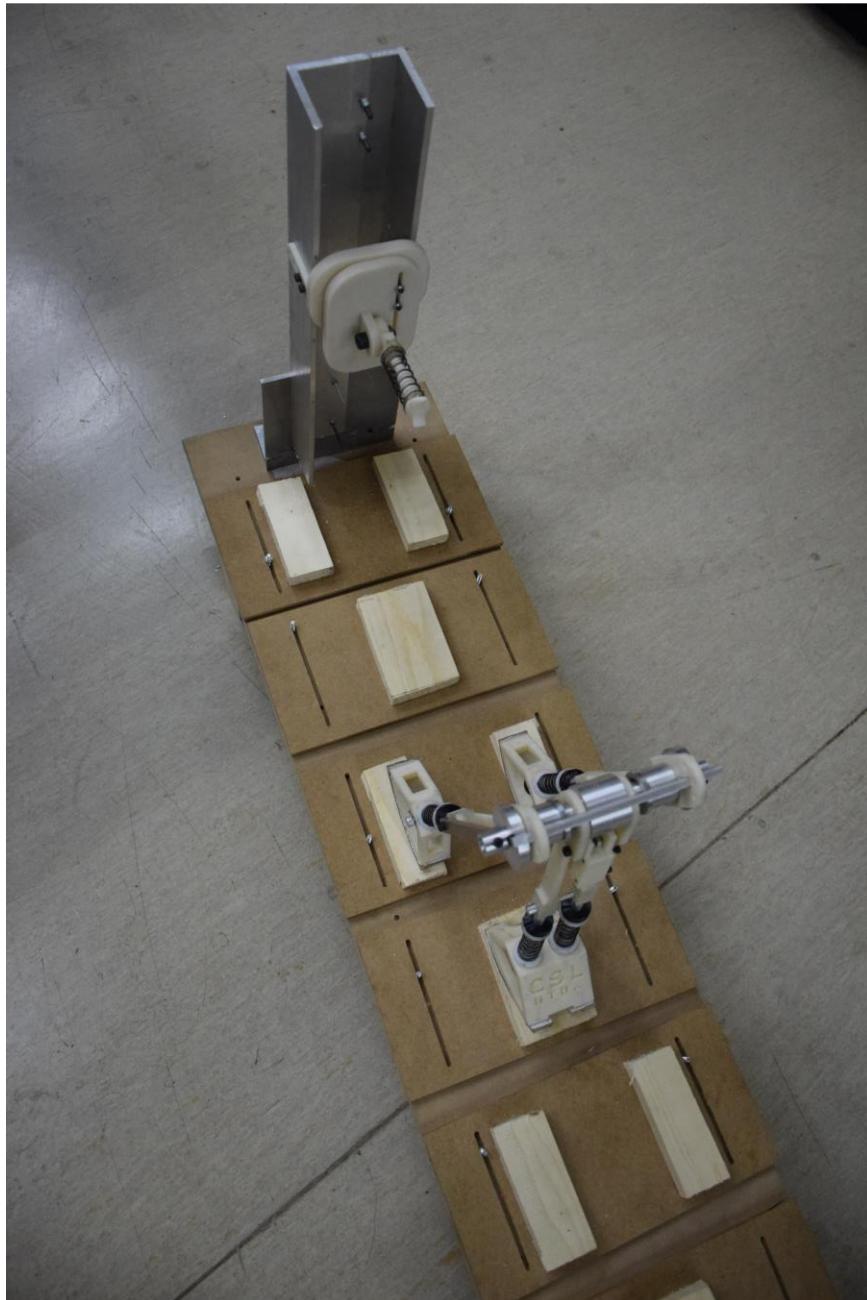
Ο προσανατολισμός τόσο του αισθητήρα που τοποθετείται στο πέλμα, όσο και αυτού που τοποθετείται κοντά στο ισχίο φαίνονται στο Σχήμα 6-18.



**Σχήμα 6-18:** Προσανατολισμός αισθητήρων IMU. (A) Τοποθέτηση αισθητήρα στο πέλμα (B) Τοποθέτηση αισθητήρα κοντά στο ισχίο.

#### 6.4 Εκτέλεση πειραμάτων

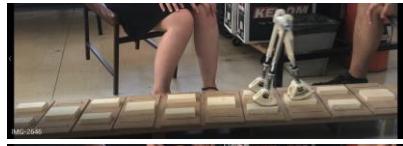
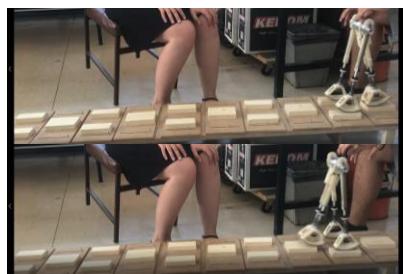
Η συνολική διάταξη μαζί με το δίποδο ρομπότ, το έδαφος και τον εκτοξευτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-19.



**Σχήμα 6-19: Η συνολική πειραματική διάταξη περιλαμβανομένου του εδάφους, του δίποδου ρομπότ και του εκτοξευτή.**

Επομένως πλέον μπορούν να εκτελεσθούν τα πειράματα. Στόχος των πειραμάτων είναι η επίτευξη παθητικού βηματισμού σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας δύο μοιρών, όπως υλοποιείται και στις προσομοιώσεις.

Έγινε από πολλές προσπάθειες με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους, επιτυγχάνεται παθητικός βηματισμός τόσο χωρίς τη χρήση του εκτοξευτή, όσο και με τη χρήση αυτού.



**Σχήμα 6-20:** Παθητικός βηματισμός χωρίς τη χρήση εκτοξευτή.

**Σχήμα 6-21:** Παθητικός βηματισμός με τη χρήση εκτοξευτή.

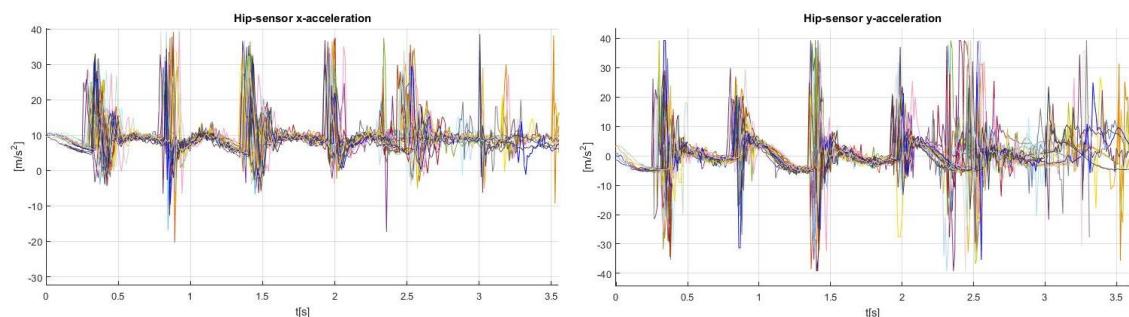
Παρατηρείται ότι η επαναληψιμότητα των πειραμάτων είναι αρκετά πιο αυξημένη με τη χρήση του εκτοξευτή, δηλαδή έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες επιτυχημένες προσπάθειες βηματισμού με τη χρήση αυτού, παρά με την απλή ρίψη του ρομπότ με τα χέρια.

Στη συνέχεια, αφού έχει διασφαλισθεί το παθητικό βάδισμα, επιδιώκεται ποσοτικοποίηση του πειράματος με τη χρήση των αισθητήρων, όπως έχει περιγραφεί και προηγουμένως. Έτσι καταγράφονται οι επιταχύνσεις και οι γωνιακές ταχύτητες των χρησιμοποιούμενων αισθητήριων

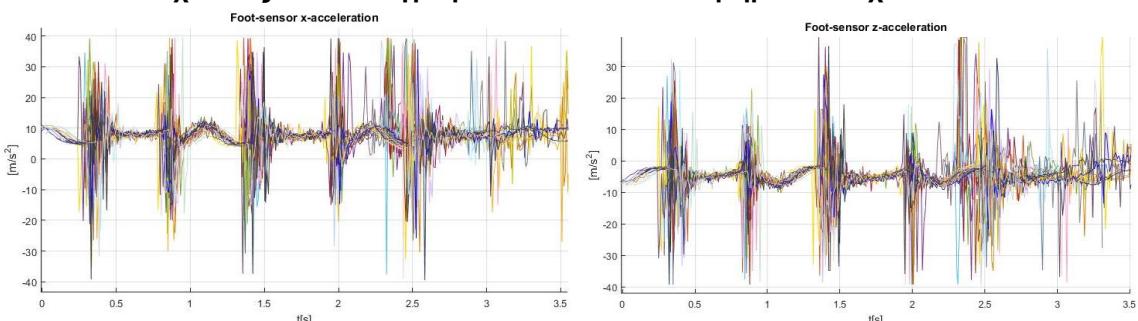
οργάνων. Επειδή πρακτικά το πείραμα διεξάγεται σε διδιάστατο επίπεδο, δηλαδή δεν υπάρχει κίνηση ως προς τον τρίτο άξονα, παρατίθενται οι επιταχύνσεις στις δύο κατευθύνσεις κίνησης και η αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα. Συγκεκριμένα για τον αισθητήρα στο πέλμα καταμετρώνται οι επιταχύνσεις στις κατευθύνσεις  $xa_{sensor}$ ,  $za_{sensor}$  και η γωνιακή ταχύτητα στην κατεύθυνση  $yg_{sensor}$ . Αντίστοιχα για τον αισθητήρα κοντά στο ισχίο καταμετρώνται οι επιταχύνσεις στις κατευθύνσεις  $xa_{sensor}$ ,  $ya_{sensor}$  και η γωνιακή ταχύτητα στην κατεύθυνση  $zg_{sensor}$  (βλ. Σχήμα 6-18).

Επίσης προκειμένου να υπάρχει μία πιο αξιόπιστη αξιολόγηση του πειράματος, εκτελούνται πολλοί παθητικοί βηματισμοί, ώστε να διαπιστωθεί ότι οι καταγραφόμενες μετρήσεις έχουν μια ομοιότητα μεταξύ τους και επομένως ο παθητικός βηματισμός παρουσιάζει ένα επίπεδο επαναληψιμότητας.

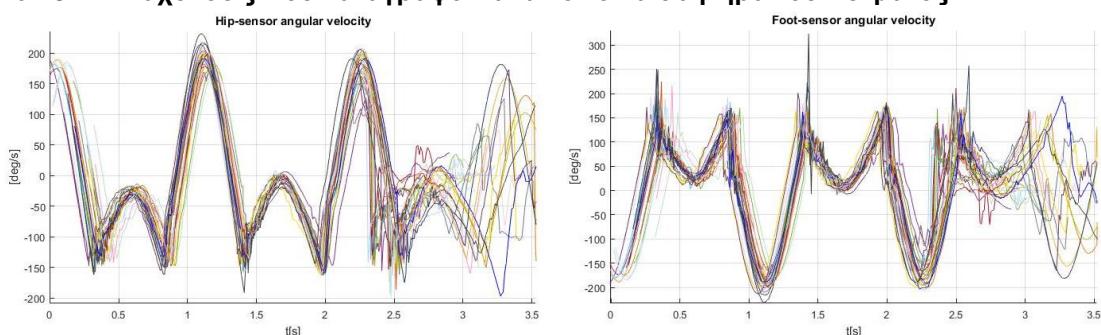
Στα παρακάτω σχήματα καταγράφονται οι επιταχύνσεις και γωνιακές ταχύτητες για 30 δοκιμές παθητικού βαδίσματος. Κάθε παθητικός βηματισμός περιλαμβάνει 5 έως 7 βήματα πριν το δίποδο ρομπότ σημειώσει πτώση. Για λόγους πληρότητας φαίνονται και οι καταγραφόμενες τιμές για ένα μικρό χρονικό διάστημα μετά το τελευταίο επιτυχές βήμα.



Σχήμα 6-22: Επιταχύνσεις που καταγράφονται από τον αισθητήρα του ισχίου.



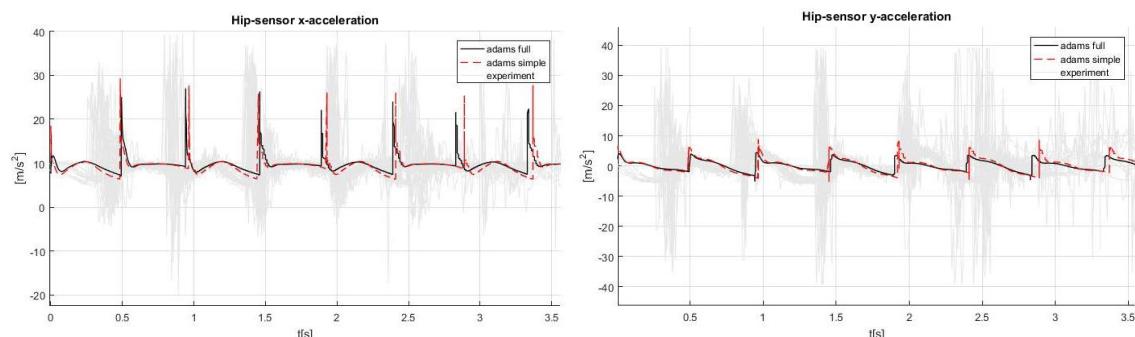
Σχήμα 6-23: Επιταχύνσεις που καταγράφονται από τον αισθητήρα του πέλματος.



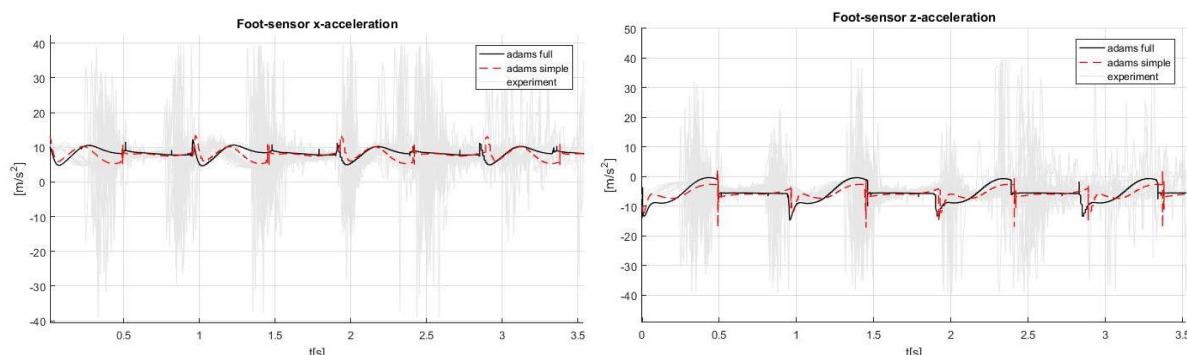
Σχήμα 6-24: Γωνιακές ταχύτητες που καταγράφονται από τους αισθητήρες.

Από τα διαγράμματα επιταχύνσεων γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι εκεί που σημειώνονται απότομες μεταβολές, σημαίνει ότι ξεκινάει η φάση στάσης για το κάθε σκέλος. Επίσης να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι χωρίς να έχει προηγηθεί αντιστάθμιση βαρύτητας ως προς τις επιταχύνσεις. Αυτό κρίνεται σκόπιμο, διότι προκειμένου να επιτευχθεί θα πρέπει κάθε φορά να προστίθεται/αφαιρείται η αντίστοιχη συνιστώσα του διανύσματος της βαρύτητας, το οποίο ωστόσο στο σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων αλλάζει κατεύθυνση καθώς αυτοί περιστρέφονται. Επομένως θα πρέπει να είναι γνωστή η γωνία περιστροφής, η οποία δυνητικά προκύπτει με ολοκλήρωση των γωνιακών ταχυτήτων, κάτι που προτείνεται να αποφεύγεται, διότι τότε αυξάνονται τα υπεισερχόμενα σφάλματα, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ανακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα αντιστάθμιση της βαρύτητας πραγματοποιείται στις προσομοιώσεις του λογισμικού Adams, καθώς εκεί οι καμπύλες που λαμβάνονται προκύπτουν με αριθμητικές μεθόδους. Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν θα είναι δυνατόν να συγκρίνονται ίδια μεγέθη επιταχύσεων και γωνιακών ταχυτήτων μεταξύ προσομοιώσεων και πειράματος.

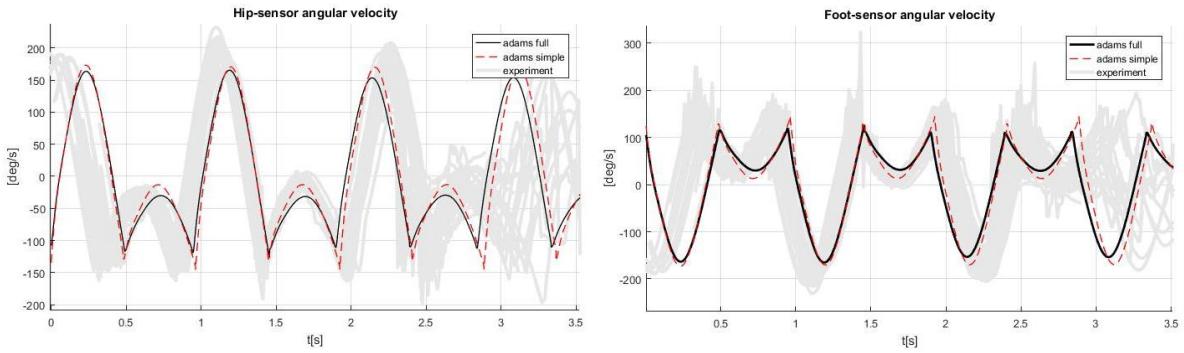
Στα παρακάτω σχήματα υλοποιείται σύγκριση των καταγραφόμενων μεγεθών μεταξύ της προσομοίωσης του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου στο Adams (adams simple), της προσομοίωσης του λεπτομερούς τρισδιάστατου μοντέλου επίσης στο Adams (adams full) και της πειραματικής διαδικασίας (experiment).



Σχήμα 6-25: Διαγράμματα σύγκρισης επιταχύνσεων ισχίου.



Σχήμα 6-26: Διαγράμματα σύγκρισης επιταχύνσεων πέλματος.



**Σχήμα 6-27: Διαγράμματα σύγκρισης γωνιακών ταχυτήτων.**

Όπως παρατηρείται, οι προσομοιώσεις προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως είναι αναμενόμενο παρουσιάζουν και αποκλίσεις, οι οποίες μπορούν να εξηγηθούν.

Καταρχάς η διαφορά μεταξύ των ίδιων των πειραματικών μετρήσεων οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες υπό τις οποίες εκτελέσθηκαν οι βηματισμοί. Όπως εξηγείται και παραπάνω, το δίποδο ρομπότ **παίρνει αρχικές συνθήκες είτε μέσω του εκτοξευτή είτε μέσω της ρίψης αυτού** δια χειρός. Επομένως είναι σχεδόν **απίθανο να επιτευχθούν οι ίδιες αρχικές συνθήκες σε κάθε δοκιμή**. Επίσης περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η **θερμοκρασία του χώρου** μπορούν να επιδράσουν ελαφρά στα αποτελέσματα.

Αντίστοιχοι είναι και οι λόγοι ύπαρξης διαφορών μεταξύ προσομοιώσεων και πειραμάτων. Εκτός αυτών, **η πραγματική κατασκευή διαθέτει στοιχεία ελαστικότητας και απόσβεσης, τα οποία δεν είναι ακριβώς προσδιορισμένα, αλλά υπάρχει μια εκτίμηση της τιμής τους**, εν αντιθέσει με το μοντέλο στο οποίο εισάγονται ακριβείς τιμές για την περιγραφή των ελατηρίων και των αποσβεστήρων. Επιπλέον, το δίποδο ρομπότ διαθέτει **πρισματικές και στροφικές αρθρώσεις στις οποίες αναπόφευκτα υπάρχει τριβή**, η οποία δεν μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς και δεν έχει μοντελοποιηθεί στις προσομοιώσεις. Τέλος δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι η σύγκριση πραγματοποιείται για τα πρώτα βήματα του ρομπότ, επομένως υπάρχει κάποια μεταβατική κατάσταση, τόσο στο πείραμα, όσο και στις προσομοιώσεις, η οποία επίσης είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί.

Παρ' όλα αυτά είναι δυνατόν να διακριθούν και **σημαντικές ομοιότητες**, κάτι που αποτελεί θετικό στοιχείο για την **πιστότητα του λογισμικού Adams να μοντελοποιεί πραγματικούς μηχανισμούς**. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερη ομοιότητα παρατηρείται στις μετρήσεις γωνιακών ταχυτήτων, όπου τα **επίπεδα θορύβου είναι σχετικά χαμηλότερα από ότι των επιταχύνσεων**. Πράγματι οι μετρήσεις των επιταχύνσεων παρουσιάζουν πολλές απότομες μεταβολές, οι οποίες δημιουργούν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Ωστόσο οι πειραματικές μετρήσεις εν γένει δείχνουν σημαντική σύγκλιση κυρίως ως προς τη μορφή των διαγραμμάτων και τις αναμενόμενες τάξεις μεγέθους.

## 7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Σε αυτήν την εργασία μελετάται το παθητικό βάδισμα δίποδου ρομπότ, τόσο σε επίπεδο προσομοιώσεων, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με προσομοιώσεις του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου σε περιβάλλον Matlab. Έτσι μπορούν να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα, καθώς επίσης και να προταθεί μελλοντική εργασία.

### 7.1 Συμπεράσματα

Οι αρχικές προσομοιώσεις που εκτελέσθηκαν στο λογισμικό Adams με το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο ανέδειξαν τη δυναμική του παθητικού βηματισμού σε κεκλιμένο επίπεδο, η οποία οδηγεί σε επαναλαμβανόμενους βηματισμούς, εξαρτώμενη βέβαια από διάφορες παραμέτρους, όπως οι αρχικές συνθήκες βηματισμού, οι συνθήκες επαφής των πελμάτων του ρομπότ με το έδαφος και οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν το μηχανισμό, όπως η μάζα, η ελαστικότητα, η απόσβεση και η ακτίνα καμπυλότητας των πελμάτων.

Στη συνέχεια ο σχεδιασμός της όλης διάταξης με τον τρόπο που αυτός υλοποιήθηκε οδήγησε στο συμπέρασμα ότι είναι επιτεύξιμη η κατασκευή ενός παθητικού ρομπότ, το οποίο θα μπορεί να μετατραπεί σε επενεργούμενο μέσω κινητήρων, χωρίς την παρέμβαση στην αρχική διαμόρφωσή του. Επίσης η αξιολόγηση των φορτίσεων που δέχεται το ρομπότ πιστοποίησε την αρχική ιδέα χρησιμοποίησης υλικών χαμηλής πυκνότητας για τη διευκόλυνση του σχεδιασμού και την παραγωγή εξαρτημάτων πολυπλοκότερης γεωμετρίας μέσω της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Η επαλήθευση των θεωρητικών συμπερασμάτων και των μαθηματικών μοντελοποιήσεων του δίποδου βηματισμού μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων, προκαλεί την επέκταση της μελέτης, ώστε να προσεγγίσει τη συμπεριφορά του ανθρώπινου σκέλους κατά τη διάρκεια του περπατήματος κάνοντας βέβαια διαστασιολογική αναγωγή, ώστε να υπάρχει αντιστοίχιση του μεγέθους του ανθρώπινου ποδιού με αυτό του κατασκευασμένου δίποδου ρομπότ. Ακόμη, η χρήση στοιχείων ελαστικότητας και απόσβεσης προσδίδει ενδοτικότητα στο σκέλος και υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν αυτά να υποκαταστήσουν μέχρι ενός βαθμού την άρθρωση γονάτου.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον σημείο που προκύπτει από την παρούσα εργασία είναι το πώς μπορεί να πιστοποιηθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό γίνεται μέσω των αισθητήρων IMU, οι οποίοι καταγράφουν γραμμικές επιταχύνσεις και γωνιακές ταχύτητες και δίνουν τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης της θεωρίας με την πράξη.

Τέλος ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτει τόσο από τις προσομοιώσεις, όσο και από το πείραμα είναι το γεγονός ότι η όλη μελέτη βασίζεται σε μια παθητική διάταξη που δεν χρειάζεται να έχει «κρίση», υπό τη μορφή ενός σχήματος ελέγχου για το δίποδο ρομπότ, προκειμένου να περπατήσει. Έτσι συμπεραίνεται ότι ο άνθρωπος εκ φύσεως μπορεί να μετακινείται καταβάλλοντας ελάχιστη σωματική και πνευματική προσπάθεια, καθώς όπως φαίνεται πρόκειται για μια πολύ απλή διαδικασία, η οποία ναι μεν δεν επιτυγχάνεται εντελώς παθητικά από τα έμψυχα όντα, ωστόσο δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης και άλλων καθηκόντων ταυτόχρονα, ενώ αυτά περπατάνε.

## 7.2 Μελλοντική Εργασία

Η μελλοντική εργασία αφορά τόσο υπολογιστικά ζητήματα, όσο κατασκευαστικές βελτιώσεις και επεκτάσεις.

Σχετικά με τα υπολογιστικά ζητήματα, **ένα από τα πιο ενδιαφέροντα είναι αυτό του προσδιορισμού των σχεδιαστικών παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων.** Η εκτέλεση πειραμάτων με το υπάρχον ρομπότ παράγει κάποιες συγκεκριμένες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές ωστόσο αποκλίνουν μέχρι ενός βαθμού από τις προσομοιώσεις. Αυτό συμβαίνει, διότι για την εκτέλεση των προσομοιώσεων έχουν ορισθεί παράμετροι, οι οποίες άλλες είναι σαφώς προσδιορισμένες, ενώ άλλες δεν είναι δυνατόν να προσεγγισθούν με μεγάλη ακρίβεια. Συγκεκριμένα παράμετροι όπως η ακτίνα καμπυλότητας των πελμάτων, η μάζα αυτών, η συνολική μάζα του ρομπότ και το συνολικό μήκος αυτού μπορούν να προσδιορισθούν με ακρίβεια μέσω μετρητικών οργάνων ακριβείας, όπως παχύμετρο και ηλεκτρονική ζυγαριά. **Αντιθέτως παράμετροι όπως η ελαστικότητα και η απόσβεση των χρησιμοποιούμενων ελατήριών, αλλά και η κατανομή μάζας των πελμάτων εκτιμώνται προσεγγιστικά είτε από το λογισμικό σχεδίασης είτε με τη διεξαγωγή πολύ απλών πειραμάτων.** Επομένως μια διερεύνηση των προσεγγιστικών παραμέτρων θα μπορούσε να οδηγήσει στον ακριβή προσδιορισμό τους μέσω της ταύτισης των θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων.

Σχετικά με τις κατασκευαστικές βελτιώσεις και επεκτάσεις, αυτές μπορούν να είναι πολλών ειδών. **Καταρχήν προτείνεται η δημιουργία μιας βελτιωμένης έκδοσης πρισματικής άρθρωσης.** Η υπάρχουσα πρισματική άρθρωση επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών χαμηλής τριβής και φθοράς. Ενώ αυτή δείχνει να λειτουργεί ικανοποιητικά για τις ανάγκες του ρομπότ, η τριβή και η φθορά θα μπορούσαν να περιορισθούν ακόμα περισσότερο με τη χρήση γραμμικών εδράνων (γραμμικά ρουλεμάν).

Επίσης σημαντικό είναι να αξιολογηθεί ο παθητικός βηματισμός και με διαφορετικής γεωμετρίας πέλματα. Εφόσον ο τελικός στόχος είναι η προσέγγιση ενός προσθετικού κάτω άκρου, θα πρέπει σταδιακά **τα ημικυκλικά πέλματα να αντικατασταθούν από πέλματα πολυπλοκότερης γεωμετρίας**, όπως ημιελλεπτικά, γενικευμένης γεωμετρίας και τέλος γεωμετρίας που προσεγγίζει τη λειτουργική μορφή του ανθρώπινου πέλματος.

Φυσικά **η επενέργηση του ρομπότ κρίνεται απαραίτητη προσθήκη**, καθώς θα δώσει πολλές περισσότερες δυνατότητες, εκτός του βηματισμού σε κατηφορικό έδαφος. Έτσι θα πρέπει να προστεθούν στον άξονα του ισχίου δύο κινητήρες οι οποίοι **θα εδράζονται σε ένα αντίβαρο**, όπως έχει προβλεφθεί θεωρητικά από παλαιότερη εργασία του εργαστηρίου. Έτσι θα δοθεί η δυνατότητα η μέχρι τώρα είσοδος ισχύος λόγω της βαρύτητας να αντικατασταθεί από την ισχύ των κινητήρων, και να μελετηθεί ο βηματισμός **σε οριζόντιο ή και σε ανηφορικό επίπεδο**.

Μια ακόμα σημαντική επέκταση της υπάρχουσας κατασκευής θα ήταν η **προσθήκη δύο αρθρώσεων, μία στο γόνατο και μία στον αστράγαλο**, οι οποίες θα προσεγγίσουν ακόμα περισσότερο την πραγματική εικόνα του ανθρώπινου ποδιού. Οι αρθρώσεις αυτές θα μπορούν να είναι αρχικά παθητικές, και σταδιακά να εισαχθεί επενέργηση και σε αυτές.

Τέλος ιδιαίτερης σημασίας θα ήταν και η χρήση πιο προηγμένων τεχνολογιών όσον αφορά τα **στοιχεία ελαστικότητας και απόσβεσης**. Τα απλά παθητικά ελατήρια μπορούν να αντικατασταθούν από ενεργητικά στοιχεία τα οποία ρυθμίζουν τη σταθερά ελαστικότητας και απόσβεσης, όπως συμβαίνει με τα **McKibben muscles** και τα **MR dampers**.

## 8 Βιβλιογραφία

- [1] Mochon, S. and McMahon, T.A., "Ballistic walking: an improved model", *Mathematical Biosciences*, vol. 52, no.3, 1980, pp. 241-260.
- [2] McGeer, T., "Passive Dynamic Walking", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, 1990, pp. 62-82.
- [3] Collins, S.H. and Ruina, A., "A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '05)*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1983-1988.
- [4] Kuo, A.D., "Stabilization of Lateral Motion in Passive Dynamic Walking", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 9, 1999, pp. 917-930.
- [5] Beigzadeh, B., Sabaapour, M.R. and Hairi Yazdi, M.R., (2016) "Passive dynamic turning in 3D biped locomotion: an extension to passive dynamic walking", *Advanced Robotics*, 30:3, 218-231.
- [6] Beigzadeh, B., Sabaapour, M.R., Hairi Yazdi, M.R. and Raahemifar, K., "From a 3D Passive Walker to a 3D Passivity-Based Controlled Robot", *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 15, 2018.
- [7] Stopforth, R., Bright, G., Feng, C., "A Hip Actuated Passive Dynamic Walking Biped", *Eurocon 2013*, Zagreb, 2013, pp. 1905-1910.
- [8] Koop, D. and Wu, C.Q., "Passive Dynamic Biped Walking – Part I: Development and Validation of an Advanced Model", *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol. 8, 2013.
- [9] Rushdi, K., Koop, D., Wu, C.Q., "Experimental Study on Passive Dynamic Bipedal Walking: Comparing Test Platforms and Effects of Parameter Changes on Gait Patterns", *ASME Dynamic Systems and Control Conference*, Arlington, VA, USA, 2011.
- [10] M. Wisse, D. G. E. Hobbelen and A. L. Schwab, "Adding an Upper Body to Passive Dynamic Walking Robots by Means of a Bisecting Hip Mechanism," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 1, Feb. 2007, pp. 112-123.
- [11] Verrelst, B., Ham, R.V., Vanderborght, B., et al., "The Pneumatic Biped "Lucy" Actuated with Pleated Pneumatic Artificial Muscles", *Auton. Robot.* (2005) 18: 201.
- [12] R. Van Ham, B. Vanderborght, M. Van Damme, B. Verrelst and D. Lefeber, "MACCEPA: the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator for 'controlled passive walking'", *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, Orlando, FL, 2006, pp. 2195-2200.
- [13] M. Wisse, A. L. Schwab, R. Q. van der Linde and F. C. T. van der Helm, "How to keep from falling forward: elementary swing leg action for passive dynamic walkers," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, June 2005, pp. 393-401.
- [14] Z. Li, Z. Wu and Y. Zhao, "Semi-active stable landing control for biped robot by using switching control", *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Hailar, 2014, pp. 740-745.

- [15] C. Hubicki *et al.*, "Walking and Running with Passive Compliance: Lessons from Engineering: A Live Demonstration of the ATRIAS Biped," in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 25, no. 3, pp. 23-39, Sept. 2018.
- [16] Σμυρλή, Α., "Μοντελοποίηση, ανάλυση παθητικής δυναμικής και έλεγχος δίποδου ρομπότ με επεκτάσεις στη μηχανική του ανθρώπινου βηματισμού", *Διπλωματική Εργασία, ΕΑΕ ΕΜΠ*, Αθήνα, 2017.
- [17] Marhefka, D.W. and Orin, D.E., "A Compliant Contact Model with Nonlinear Damping for Simulation of Robotic Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part A: Systems and Humans*, vol. 29, no. 6, 1999, pp. 566-572.
- [18] Sharbafi, M.A. et al., "A new biarticular actuator design facilitates control of leg function in BioBiped3", *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 11, no. 4, 2016.
- [19] Ylikorpi, T., Peralta, J., Halme, A., "Comparing passive walker simulators in Matlab and Adams", *Journal of Structural Mechanics*, vol. 44, no. 1, 2011, pp. 65-92.
- [20] Cao H., Wang Y., Zhu J., Ling Z. (2009) Dynamic Simulation of Passive Walker Based on Virtual Gravity Theory. In: Xie M., Xiong Y., Xiong C., Liu H., Hu Z. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2009*. Lecture Notes in Computer Science, vol 5928. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [21] Stanley Plagenhoef, F. Gaynor Evans & Thomas Abdelnour (1983) *Anatomical Data for Analyzing Human Motion, Research Quarterly for Exercise and Sport*, 54:2, 169-178.
- [22] Dare, W.N., Erefah, A.Z. & Ogbe, P.D., "A Comparative Study on Thigh Length to Leg Length Ratio in Adult Males of Two Southern States in Nigeria", *European Journal of Applied Sciences*, 5 (4): 115-117, 2013.
- [23] Leva, Paolo de, "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters", *Journal of Biomechanics*, vol. 29, no. 9, pp. 1223-1230, 1996.
- [24] Ziemian, C.W. et al., "Monotonic and Cyclic Tensile Properties of ABS Components Fabricated by Additive Manufacturing".
- [25] Δάλλας, Α., "Τρόποι προσομοίωσης υβριδικών συστημάτων με κρούσεις και συγκρίσεις επιλυτών με Matlab", *Διπλωματική Εργασία, ΕΑΕ ΕΜΠ*, Αθήνα, 2017.
- [26] Δρογώσης, Α., "Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης ασύρματων IMUs για αναγνώριση της συνάρτησης μεταφοράς του ανθρώπινου ποδιού κατά το βάδισμα", *Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΑΕ ΕΜΠ*, Αθήνα, 2017.

# 9 Παράρτημα

## 9.1 Κώδικες Matlab

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχήματος 3-8

```
figure(1)
subplot(2,2,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t,xM_ellip*1000+617.4446, 'Color', [0 0.4471
0.7412], 'Linewidth',2);
lgd2=plot(t_adams,xM_adams, 'Color', [0.8510      0.3255      0.0980],
'Linewidth',2);
legend([lgd1,lgd2],{'Matlab','Adams'})
xlabel('t [s]')
ylabel('x [mm]')
title('Hip x-Displacement')

subplot(2,2,2)
grid on
hold on
lgd1=plot(t,yM_ellip*1000,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',2);
lgd2=plot(t_adams,yM_adams,'Color',[0.8510      0.3255
0.0980], 'Linewidth',2);
legend([lgd1,lgd2],{'Matlab','Adams'})
xlabel('t [s]')
ylabel('y [m]')
title('Hip y-Displacement')

subplot(2,2,3)
grid on
hold on
lgd1=plot(t,vMx*1000,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',2);
lgd2=plot(t_adams,vxM_adams,'Color',[0.8510      0.3255
0.0980], 'Linewidth',2);
legend([lgd1,lgd2],{'Matlab','Adams'})
xlabel('t [s]')
ylabel('vx [mm/s]')
title('Hip x-Velocity')

subplot(2,2,4)
grid on
hold on
lgd1=plot(t,vMy*1000,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',2);
lgd2=plot(t_adams,vyM_adams,'Color',[0.8510      0.3255
0.0980], 'Linewidth',2);
legend([lgd1,lgd2],{'Matlab','Adams'})
xlabel('t [s]')
ylabel('vy [mm/s]')
title('Hip y-Velocity')
```

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχημάτων 3-10 και 3-11

```
figure(1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_yM_gstiff,yM_gstiff, 'Color', [0.8510      0.3255      0.0980]);
lgd2=plot(t_yM_hastiff,yM_hastiff, 'Color', [0      0.4471      0.7412]);
```

```

lgd3=plot(t_yM_hht,yM_hht,'Color',[0.9294      0.6941      0.1255]);
lgd4=plot(t_yM_newmark,yM_newmark,'Color',[0.4941      0.1843      0.5569]);
lgd5=plot(t_yM_wstiff,yM_wstiff,'Color',[0.4667      0.6745      0.1882]);
legend([lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,lgd5],{'GSTIFF','HASTIFF','HHT','NEWMARK','WSTI
FF'})
xlabel('t [s]')
ylabel('Y [mm]')
title('Hip Displacement')

figure(2)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_yM_e_04,yM_e_04,'Color',[0.8510      0.3255      0.0980]);
lgd2=plot(t_yM_e_05,yM_e_05,'Color',[0      0.4471      0.7412]);
lgd3=plot(t_yM_e_06,yM_e_06,'Color',[0.9294      0.6941      0.1255]);
lgd4=plot(t_yM_e_07,yM_e_07,'Color',[0.4941      0.1843      0.5569]);
lgd5=plot(t_yM_e_08,yM_e_08,'Color',[0.4667      0.6745      0.1882]);
legend([lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,lgd5],{'Error=1.0E-04','Error=1.0E-
05','Error=1.0E-06','Error=1.0E-07','Error=1.0E-08'})
xlabel('t [s]')
ylabel('Y [mm]')
title('Hip Displacement')

```

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχημάτων 3-13 έως 3-16

```

figure(1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_yM_coef_03,yM_coef_03,'Color',[0      0.4471      0.7412]);
lgd2=plot(t_yM_coef_05,yM_coef_05,'Color',[0.8510      0.3255      0.0980]);
lgd3=plot(t_yM_coef_07,yM_coef_07,'Color',[0.9294      0.6941      0.1255]);
lgd4=plot(t_yM_coef_09,yM_coef_09,'Color',[0.4941      0.1843      0.5569]);
lgd5=plot(t_yM_coef_1,yM_coef_1,'Color',[0.4667      0.6745      0.1882]);
legend([lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,lgd5],{'coef=0.3','coef=0.5','coef=0.7','coef=0
.9','coef=1'})
xlabel('t [s]')
ylabel('Y [mm]')
title('Hip Displacement')

figure(2)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_yM_stiff_1E02,yM_stiff_1E02,'Color',[0      0.4471      0.7412]);
lgd2=plot(t_yM_stiff_1E03,yM_stiff_1E03,'Color',[0.8510      0.3255
0.0980]);
lgd3=plot(t_yM_stiff_1E04,yM_stiff_1E04,'Color',[0.9294      0.6941
0.1255]);
lgd4=plot(t_yM_stiff_1E05,yM_stiff_1E05,'Color',[0.4941      0.1843
0.5569]);
lgd5=plot(t_yM_stiff_1E06,yM_stiff_1E06,'Color',[0.4667      0.6745
0.1882]);
legend([lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,lgd5],{'stiffness=1.0E02N/mm','stiffness=1.0E03
N/mm','stiffness=1.0E04N/mm','stiffness=1.0E05N/mm','stiffness=1.0E06N/mm'})
xlabel('t [s]')
ylabel('Y [mm]')
title('Hip Displacement')

figure(3)
grid on

```

```

hold on
lgd1=plot(t_yM_damp_1E_03,yM_damp_1E_03,'Color',[0 0.4471 0.7412]);
lgd2=plot(t_yM_damp_1E_01,yM_damp_1E_01,'Color',[0.8510 0.3255
0.0980]);
lgd3=plot(t_yM_damp_1E01,yM_damp_1E01,'Color',[0.9294 0.6941
0.1255]);
lgd4=plot(t_yM_damp_1E03,yM_damp_1E03,'Color',[0.4941 0.1843
0.5569]);
lgd5=plot(t_yM_damp_1E05,yM_damp_1E05,'Color',[0.4667 0.6745
0.1882]);
legend([lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,lgd5],{'damping=1.0E-03Ns/mm','damping=1.0E-
01Ns/mm','damping=1.0E01Ns/mm','damping=1.0E03Ns/mm','damping=1.0E05Ns/mm'}
)
xlabel('t [s]')
ylabel('Y [mm]')
title('Hip Displacement')

figure(4)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_yM_exp_16,yM_exp_16,'Color',[0 0.4471 0.7412]);
lgd2=plot(t_yM_exp_19,yM_exp_19,'Color',[0.8510 0.3255 0.0980]);
lgd3=plot(t_yM_exp_22,yM_exp_22,'Color',[0.9294 0.6941 0.1255]);
lgd4=plot(t_yM_exp_25,yM_exp_25,'Color',[0.4941 0.1843 0.5569]);
lgd5=plot(t_yM_exp_28,yM_exp_28,'Color',[0.4667 0.6745 0.1882]);
legend([lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,lgd5],{'force exponent=1.6','force
exponent=1.9','force exponent=2.2','force exponent=2.5','force
exponent=2.8'})
xlabel('t [s]')
ylabel('Y [mm]')
title('Hip Displacement')

```

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχημάτων 3-18 έως 3-19

```

figure(1)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_inertia_adams,xM_inertia_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412]);
xlabel('t [s]')
ylabel('x [mm]')
title('Hip Displacement')

subplot(2,1,2)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_inertia_adams,yM_inertia_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412]);
xlabel('t [s]')
ylabel('y [mm]')

figure(2)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_inertia_adams,vxM_inertia_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412]);
xlabel('t [s]')
ylabel('vx [mm/s]')
title('Hip Velocity')

subplot(2,1,2)

```

```

grid on
hold on
lgd1=plot(t_inertia_adams,vyM_inertia_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412]);
xlabel('t [s]')
ylabel('vy [mm/s]')

➤ Κώδικας προσδιορισμού αρχικών ταχυτήτων των εξαρτημάτων του τρισδιάστατου μοντέλου

%initial conditions
theta_0 = -0.2554;
theta_dot_0 = 2.314;
psi_0 = -0.2346;
psi_dot_0 = -2.3577;
L1_0 = 0.3329;
L1_dot_0 = -0.1687;
L2_0 = 0.3316;
L2_dot_0 = 0.1222;

%parameters
r = 0.083;
k = 2800;
m = 0.237;
B = 58.35;
l = 0.10323;
z1 = 0; %anti gia ton oro (L1-l)
z2 = 0; %anti gia ton oro (L2-l)

%mass x-y velocities
xM_dot = r.*theta_dot_0 + L1_dot_0.*sin(theta_0) + (L1_0 - r).*cos(theta_0).*theta_dot_0
yM_dot = L1_dot_0.*cos(theta_0) - (L1_0 - r).*sin(theta_0).*theta_dot_0

%foot1 x-y velocities
xm1_dot = r.*theta_dot_0 - (r - l).*cos(theta_0).*theta_dot_0
ym1_dot = (r - l).*sin(theta_0).*theta_dot_0

%foot2 x-y velocities
xm2_dot = xM_dot + L2_dot_0.*sin(psi_0) + (L2_0 - l).*cos(psi_0).*psi_dot_0
ym2_dot = yM_dot + (L2_0 - l).*sin(psi_0).*psi_dot_0 - L2_dot_0.*cos(psi_0)

%x-y velocities of leg's 1 parts
xm1p_dot = xM_dot - z1.*cos(theta_0).*theta_dot_0
ym1p_dot = yM_dot + z1.*sin(theta_0).*theta_dot_0

%x-y velocities of leg's 2 parts
xm2p_dot = xM_dot + z2.*cos(psi_0).*psi_dot_0
ym2p_dot = yM_dot + z2.*sin(psi_0).*psi_dot_0

```

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχημάτων 5-17 έως 5-21

```

figure(1)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_adams,psi_adams*180/pi,'Color', [0 0.4471 0.7412],
'Linewidth',1.5);
lgd2=plot(t_adams,-theta_adams*180/pi,'Color', [0.8510 0.3255
0.0980], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')

```

```

ylabel('[deg]')
title('Leg angles')
legend([lgd1,lgd2],{'psi','theta'})

subplot(2,1,2)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_adams,abs(psi_dot_adams*180/pi-10)+10,'Color', [0 0.4471
0.7412], 'Linewidth',1.5);
lgd2=plot(t_adams,abs(theta_dot_adams*180/pi-10)+10,'Color', [0.8510 0.3255
0.0980], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('[deg/s]')
title('Leg angular velocities')
legend([lgd1,lgd2],{'psi dot','theta dot'})

figure(2)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_adams,xM_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('x [m]')
title('Hip Displacement')

subplot(2,1,2)
grid on
hold on
lgd2=plot(t_adams,yM_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('y [m]')

figure(3)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_adams,vxM_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('vx [m/s]')
title('Hip velocity')

subplot(2,1,2)
grid on
hold on
lgd2=plot(t_adams,vyM_adams,'Color', [0 0.4471 0.7412], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('vy [m/s]')

figure(4)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_axM_adams, axM_adams,'Color', [0 0.4471
0.7412], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('ax [m/s^2]')
title('Hip acceleration')

subplot(2,1,2)
grid on

```

```

hold on
lgd2=plot(t_ayM_adams, ayM_adams,'Color', [0 0.4471
0.7412], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('ay [m/s^2]')

figure(5)
subplot(2,1,1)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_contact_force_adams, 2*contact_force_adams,'Color', [0 0.4471
0.7412], 'Linewidth',1.5);
lgd2=plot(t_contact_force_unified_adams, contact_force_unified_adams,'Color'
, [0.8510 0.3255 0.0980], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('Fc [N]')
title('Contact force')
legend([lgd1,lgd2],{'Outer legs','Inner legs'})

subplot(2,1,2)
grid on
hold on
lgd1=plot(t_adams,spring_force_adams2,'Color', [0 0.4471
0.7412], 'Linewidth',1.5);
lgd2=plot(t_adams,spring_force_adams,'Color', [0.8510 0.3255
0.0980], 'Linewidth',1.5);
xlabel('t [s]')
ylabel('Fs [N]')
title('Spring force')
legend([lgd1,lgd2],{'Outer legs','Inner legs'})

```

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχημάτων 5-22 και 5-23

```

kapa = [240 260 280 300 320 340 360];

%megisth epitaxunsh kata y
ayM_kapa = [6.15 6.50 7.59 7.97 8.57 9.72 10.3];

%plots
figure(1)
grid on
hold on
plot(kapa,ayM_kapa,'o-');
plot(kapa(4),ayM_kapa(4),'v-');
xlabel('κ')
ylabel('Maximum y-acceleration [m/s2]')
title('κ-Deviation')

beta = [22 26 30 34 38 42 46];

%megisth epitaxunsh kata y
ayM_beta = [11.1 8.58 8.47 7.97 7.84 7.60 5.83];

%plots
figure(1)
grid on
hold on
plot(beta,ayM_beta,'o-');

```

```

plot(beta(4),ayM_beta(4),'v-');
xlabel('β')
ylabel('Maximum y-acceleration [m/s2]')
title('β-Deviation')

➤ Κώδικας δημιουργίας Σχημάτων 5-26 και 5-27

%meso mhkos vhmatos
distance_coeffrict = [158 164 164 165 167 168];

%plots
figure(1)
grid on
hold on
plot(coeffrict,distance_coeffrict,'o-');
xlabel('Static friction coefficient')
ylabel('Average step length [mm]')
title('Static friction coefficient deviation')

log_stiffness = [5 6 7 8 9];

%megisth dunamh epafhs
contact_force = [12.1 12.1 12.6 12.9 13.8];

%plots
figure(1)
grid on
hold on
plot(log_stiffness,contact_force,'o-');
xlabel('log(stiffness)')
ylabel('Maximum contact force [N]')
title('Stiffness deviation')

```

## 9.2 Κώδικας G για τη διαμόρφωση του κάτω ποδιού σε εργαλειομηχανή CNC

%	X35.
O00005 (LEG_LOWER_MILLING)	Z-10.
(COMPENSATION-WEAR)	X22.
(REV-0.70)	X48.
(APR-18-2019-3:30:21PM)	X35.
(TOOL 1 - DIA 3.3)	Z-12.
(TOOL 3 - DIA 4.)	X22.
G90 G17 G40 G80 G00 G21	X48.
G53 G90 G00 G43 H10 Z110.	X35.
G53 G90 G00 Y0	G00 Z25.
G53 G90 G00 X-405.	M09
M6 T1	M05
G43 H1 Z110.	G90 G17 G40 G80 G00 G21
M01	G53 G90 G00 G43 H10 Z110.
(D-drill)	G53 G90 G00 Y0
G00 G55 G90 X143. Y-5. S4000 M03	G53 G90 G00 X-405.
G43 H1 Z120. M08	M30
Z25.	%
G98 G81 X143. Y-5. Z-12.991 R2. F200.	
G80	
M09	
M05	
M01	
G90 G17 G40 G80 G00 G21	
G53 G90 G00 G43 H1 Z110.	
G53 G90 G00 Y0	
G53 G90 G00 X-405.	
M6 T2	
G43 H2 Z110.	
M01	
(P-contour)	
G00 G55 G90 X35. Y-5. S3100 M03	
G43 H2 Z120. M08	
Z25.	
Z2.	
G01 Z-2. F280.	
X22.	
X48.	
X35.	
Z-4.	
X22.	
X48.	
X35.	
Z-6.	
X22.	
X48.	
X35.	
Z-8.	
X22.	
X48.	